

**Charakterisierung eines neuartigen tubulären Photobioreaktors –
Erarbeitung wesentlicher Einflussparameter und modellgestützte
Effizienzbewertung phototrophen Wachstums zur stabilen
Langzeitkultivierung unter Freilandbedingungen**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING.)

von der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Stefan Matthes
aus Köthen

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Clemens Posten
Zweitgutachterin:	Prof. Dr. Carola Griehl
Tag der mündlichen Prüfung:	27.05.2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Rahmen diverser Forschungsarbeiten im Fachbereich Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik an der Hochschule Anhalt in Köthen und dem Fachbereich Biosolar des Ingenieurbüros GICON GmbH.

Zunächst möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Posten bedanken, der mir die Möglichkeit zur Anfertigung meiner Promotion an der Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik, Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik (Teilinstitut III – Bioverfahrenstechnik), am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eröffnet hat. Trotz größerer örtlicher Entfernungen standen Sie mir stets mit bestem Rat und Tat zur Seite und wiesen mir den zielgerichteten Weg in fachlichen Diskussionen. Sie gaben mir uneingeschränkt das nötige Vertrauen. Dafür gilt Ihnen mein herzlichster Dank.

Mein besonderer Dank geht an Frau Prof. Dr. Carola Griehl für die Aufnahme in ihr Forschungsteam der Algenbiotechnologie und Biochemie im Fachbereich 7 der Hochschule Anhalt und die wissenschaftliche Betreuung. Hier konnte ich meine wissenschaftlichen Arbeiten erfolgreich und zielstrebig durchführen und gleichzeitig eine selbstständige wissenschaftliche Arbeitsweise produktiv gestalten. Sie gaben mir den Raum und die Möglichkeit, sämtliche Ressourcen Ihrer Arbeitsgruppe nutzen zu können und gaben mir auf diesem Wege die finanzielle Unterstützung für die wissenschaftliche Tätigkeit. Mein Dank gilt auch ganz besonders für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Weiterhin ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Hans-Dieter Gottstein vom Fachbereich 1 der Hochschule Anhalt in Bernburg/Strenzfeld. Vielen Dank für das zur Verfügung stellen aller für die Probenanalytik der Mikroalgenbiomasse erforderlichen Gerätschaften und Räumlichkeiten sowie der vielen intensiven fruchtbaren und fachlichen Diskussionen, oftmals auch über den Tellerrand hinaus.

Ein großer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Werner Zschehyge vom Fachbereich 6 der Hochschule Anhalt für das stets unkomplizierte zur Verfügung stellen der Mess- und Analysevorrichtungen zur materialtechnischen Untersuchung des Doppelschlauchsystems.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Kleinschmidt vom Lehrstuhl für Lebensmittelverfahrenstechnik im Fachbereich 7 der Hochschule Anhalt. Sie gaben mir die Möglichkeit und volle Unterstützung meine Promotionsarbeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Lebensmitteltechnik, Biotechnologie und Qualitätssicherung e.V. (Aninsitut der Hochschule Anhalt) intensiv zu finalisieren.

Vielen Dank Dr. Fritz Cotta und Dr. Martin Ecke von der GICON GmbH. Viele gemeinsame Stunden voller fachspezifischer und themenübergreifender Diskussionen haben mich dazu angetrieben, meine Arbeiten von unterschiedlichen Aspekten und Herangehensweisen zu betrachten und nie den Blick für das große Ganze zu verlieren.

Mein allergrößter Dank geht an die großartigen Mitarbeiter an der Hochschule Anhalt und des ILBQ. Ganz herzlichen Dank Nadine Winzer für die unzählige Unterstützung bei der Analytik und im Technikum, lieben Dank Christian Kleinert für die immer wie selbstverständlich selbstlose Mithilfe im Technikum und die vielen fachlichen (und nicht-fachlichen) Unterhaltungen im Büro, danke Helen Polhardt, Mario Salisch, Maren Preßler, Mario Kindling, Susanne Löffler, Christian Taeger, Simone Bieler und Frank Langguth. Danke auch für die entstandenen Freundschaften.

Vielen Dank liebe Sandra für die jahrelange Unterstützung, das Aushalten und Durchstehen aller Unwägbarkeiten und die vielen Kompromisse. Deine tagtägliche fachliche und mentale Unterstützung hat diese Arbeit erst ermöglicht. Ohne Dich hätte ich die Promotion nicht erfolgreich abschließen können. Mein ewiger Dank.

Liebe Eltern, in höchstem Maße bedanken möchte ich mich bei euch – für die bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen und die Mitgabe von Tugenden und Werten. Ihr alle habt mich zu dem Menschen werden lassen, der nun seine Promotion ablegen darf. Eine größere Unterstützung kann es nicht geben. Ganz lieben Dank Renate & Hans-Jörg und Petra & Jochen.

Stefan Matthes

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	14
2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft	17
2.1. Biologie und Wachstum von Mikroalgen	17
2.2. Status quo Mikroalgenbiomasse	21
2.2.1. Biotechnologische Produktion von Mikroalgenbiomasse und deren Anwendungsfelder	21
2.2.2. Aktuelle rechtliche Situation in Deutschland und der Europäischen Union	26
2.3. Grundlagen der Photobioreaktortechnologie.....	29
2.3.1. Grundkonzepte phototropher Kultivierungssysteme für die Produktion von	29
Massenkulturen.....	29
2.3.2. Prozesstechnische Zusammenhänge und Kennzahlen für die	35
Charakterisierung von Photobioreaktoren	35
2.3.3. Kennzahlen für die Effizienzbewertung phototrophen Wachstums in	38
Photobioreaktoren.....	38
2.3.4. Erarbeitung wesentlicher Einflussparameter auf die Mikroalgenkultivierung.....	41
(Biomasseproduktion und Stabilität der Kultivierung).....	41
2.4. Solare Strahlung.....	45
2.4.1. Solare Strahlung im elektromagnetischen Spektrum	45
2.4.2. Globalstrahlung.....	46
2.4.3. Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR).....	52
3. Theoretische Grundlagen zur Modellbildung	53
3.1. Berechnung der Koordinatenbeziehungen zwischen Sonne und Erde.....	53
3.2. Strahlungsangebot und PAR-Anteil	55
3.3. Strahlungsverhalten an Silikonschichten.....	56
3.4. Wärmeübertragung.....	58
4. Material und Methoden.....	60
4.1. Allgemeine Versuchs- und Prozessbeschreibung	60
4.2. Phototrophe Kultivierung der Mikroalgen	62
4.2.1. Verwendete Mikroalgen.....	62

4.2.2.	Kultivierungsmedien und Plattformmedium für semi-kontinuierlichen Betrieb (Arbeitskonzentrationsbereich).....	62
4.2.3.	Kultivierungsbedingungen in den Tannenbaum-Photobioreaktoren.....	63
4.2.4.	Mikroalgenplattform/verwendetes Setup der Photobioreaktoren.....	64
4.3.	Analytische Methoden	66
4.3.1.	Vorbehandlung des Probenmaterials zur Analytik	66
4.3.2.	Bestimmung der Konzentration und Produktivität der Biotrockenmasse.....	66
4.3.3.	Bestimmung des Lipidgehaltes (Rohlipid).....	67
4.3.4.	Bestimmung der elementaren Zusammensetzung hinsichtlich Kohlenstoff (C),.. Stickstoff (N), Schwefel (S) sowie Rückschluss auf den Proteingehalt	67
4.3.5.	Bestimmung der elementaren Zusammensetzung hinsichtlich	
	Spurenelemente und Phosphor.....	68
4.3.6.	Bestimmung des Brennwertes.....	68
4.3.7.	Bestimmung der Nährstoffkomponenten	68
4.4.	Verwendete Doppelschläuche	69
4.4.1.	Geometriedaten und verfahrenstechnische Voruntersuchungen	69
4.4.2.	Bestimmung der Stoffdaten des Silikonmaterialies.....	71
5.	Ergebnisse	74
5.1.	Grunddatenermittlung zum Tannenbaum-Photobioreaktor.....	
	(Doppelschlauchsystem)	74
5.1.1.	Systemgrenze Silikonschlauch.....	74
5.1.1.1.	Ermittlung relevanter Stoffdaten für die Bewertung der	
	Strahlungscharakteristika	74
5.1.1.2.	Strahlungsverhalten an der Phasengrenze Luft - Silikonschlauch	78
5.1.1.3.	Transmissionsverhalten verschiedener Werkstoffe im Vergleich	82
5.1.2.	Untersuchungen zur strömungstechnischen Charakteristik des	
	Doppelschlauchsystems.....	83
5.1.2.1.	Berechnung der Schlauchlänge	83
5.1.2.2.	Strömungstechnische Untersuchungen des Silikonschlauches	86
5.1.2.3.	Bestimmung des realen photoaktiven Volumens.....	87
5.2.	Modellierung des Lichteintrages	90

5.2.1.	Erarbeitung von Modellierungsparametern.....	90
5.2.1.1.	Berechnung des Sonnenstandes am Reaktorstandort..... (Sonnenhöhenwinkel).....	90
5.2.1.2.	Bestrahlungs- und Transmissionsgrad	92
5.2.2.	Wärmebilanz	108
5.3.	Kultivierung im Tannenbaum-Photobioreaktorsystem	115
5.3.1.	Erarbeitung des Kultivierungsregimes als Grundlage für	
	Langzeitkultivierungen.....	115
5.3.1.1.	Bereich der Arbeitskonzentration der Biotrockenmasse im..... Kultivierungsverlauf	115
5.3.1.2.	Anpassung des Nährstoffmilieus	121
5.3.1.3.	Zum Ansatz von selbststabilisierenden Kulturen	124
5.3.1.4.	Vergleich Schlauchgeometrien hinsichtlich stabilen	
	Kultivierungsverhaltens	127
5.3.2.	Stabile Langzeitkultivierung von Mikroalgenbiomasse mit gleichbleibender	
	Zusammensetzung.....	130
5.3.3.	Effizienzbewertung des phototrophen Wachstums hinsichtlich.....	
	Strahlungseintrag	138
6.	Diskussion.....	145
6.1.	Physiko-technische Charakteristika des Silikonmaterials im Hinblick auf das	
	Strahlungsverhalten und verfahrenstechnische Parameter	145
6.2.	Strahlungsaufnahme der Lichtkollektoren	148
6.3.	Wärmebilanzierung der Lichtkollektoren unter Berücksichtigung von.....	
	Freilandbedingungen	151
6.4.	Langzeitkultivierung von Mikroalgenbiomasse im technischen Maßstab unter.....	
	Freilandbedingungen	154
6.4.1.	Einflussparameter zur Prozessstabilität.....	154
6.4.2.	Langzeitkultivierung im saisonal-übergreifenden Betrieb.....	158
6.4.3.	Effizienzbewertung des phototrophen Wachstums im Freiland.....	161
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	165
8.	Literaturverzeichnis	169
9.	Anhang.....	187

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
α_L	[°]	Anstellwinkel Lichtkollektor
α_K	[W m ⁻² K ⁻¹]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
β	[K ⁻¹]	isobarer thermischer Volumenausdehnungskoeffizient
$\gamma_{1,2}$	[°]	Einfall-, Ausfallwinkel (Snelliussches Brechungsgesetz)
δ_S	[°]	Deklination der Sonne
ϵ_0	[F m ⁻¹]	elektrische Feldkonstante
ϵ_r	[-]	Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl)
ϵ_0	[°]	Ekliptik des Erdorbits
ζ	[°]	Zenitwinkel der Sonne
η_L	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitkoeffizient (Luft)
θ	[°]	Sonnenhöhe (Sonnenwinkel)
$\vartheta_{Susp.}$	[°C]	Temperatur Suspensionssegment
$\vartheta_{Temp.}$	[°C]	Temperatur Temperiersegment
$\vartheta_{Gewächshaus.}$	[°C]	Temperatur Gewächshaus
K	[m ⁻¹]	Extinktionskoeffizient
λ	[nm]	Wellenlänge
λ_Q	[nm]	Wellenlänge eines Lichtquants
μ	[d ⁻¹]	spezifische Wachstumsrate
μ_r	[-]	magnetische Permeabilität
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematische Viskosität
o	[-]	Hohlraumanteil einer Rohrreihe
$\rho_{PAR/IR}$	[-]	spektraler Anteil PAR/IR an GHI
τ	[°]	wahre eklptikale Länge
v	[m s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit Prozessmedium

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
$u_{S,krit}$	[m s ⁻¹]	kritische Strömungsgeschwindigkeit Prozessmedium
$\psi_{rs,p}$	[-]	Reflexionsfaktor (s – senkrecht, p – parallel)
$\Psi_{rs,p}$	[-]	Reflexionsgrad (s – senkrecht, p – parallel)
Ψ_r	[-]	Reflexionsgrad
$\Psi_{ts,p}$	[-]	Transmissionsgrad (s – senkrecht, p – parallel)
Ψ_t	[-]	Transmissionsgrad
Ψ_e	[-]	Extinktionsgrad
ω	[°]	Stundenwinkel
ω_W	[m s ⁻¹]	Windgeschwindigkeit
A_G	[m ²]	Stellfläche Lichtkollektor
A_{HKS}	[m ²]	Halbkegelstumpffläche Lichtkollektor
A_K	[m ²]	Kondensatorfläche
A_M	[m ²]	Mantelfläche Außenschlauch
A_S	[m ²]	Schattenwurffläche Lichtkollektor
A_T	[m ²]	Trapezfläche Lichtkollektor
$A_{4,ST,W}$	[m ²]	Querschnittsfläche Zwischenwand Geometrie 4
$A_{4,VK}$	[m ²]	Querschnittsfläche Vollkreis Geometrie 4
$A_{4,T}$	[m ²]	Querschnittsfläche Temperiersegment Geometrie 4
Az_θ	[°]	Sonnenazimut
B	[°]	Breitengrad
c	[km s ⁻¹]	Lichtgeschwindigkeit
C	[F]	Kapazität Plattenkondensator
c_{p,H_2O}	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	spezifische Wärmekapazität, H ₂ O
c_x	[g l ⁻¹]	Biotrockenmassekonzentration (BTM-Konzentration)
$d_{S,i}$	[m]	Innendurchmesser Suspensionssegment
$d_{S,i,H}$	[m]	hydraulischer Innendurchmesser Suspensionssegment

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
$d_{S,a}$	[m]	Außendurchmesser Suspensionssegment
D_M	[m]	mittlerer Durchmesser Lichtkollektor (Vergleichszylinder)
$D_{PBR,oben}$	[m]	Durchmesser Lichtkollektor oben
$D_{PBR,unten}$	[m]	Durchmesser Lichtkollektor unten
D_{RW}	[m]	Durchmesser Rohrwendel
DHI		Diffusstrahlung (engl.: Diffuse Horizontal Irradiance)
DNI		Direktnormalstrahlung (engl.: Direct Normal Irradiance)
e	[m]	Schichtdicke Probenmaterial (hier: Silikon)
e_K	[m]	Plattenabstand des Kondensators
E_Q	[J]	Energie eines Lichtquants
f_Q	[s ⁻¹]	Frequenz eines Lichtquants
g	[m s ⁻²]	Erdbeschleunigung
GHI		Globalstrahlung (engl.: Global Horizontal Irradiance)
Gr	[-]	Grashof-Zahl
h_W	[mm]	Ganghöhe einer Schlauchwindung
h_p	[J s]	Planck'sches Wirkungsququantum (6,626069*10 ⁻³⁴ J s)
H_X	[MJ kg ⁻¹]	Brennwert Mikroalgenbiomasse
I_0	[W m ⁻²]	Sensormesswert GHI
$I_{0,D}$	[kWh m ⁻² d ⁻¹]	Tagessumme der GHI
I_S	[W m ⁻²]	Solarkonstante
I_T	[W]	Transmittierter Strahlungseintrag am Lichtkollektor
I_X	[W m ⁻²]	Strahlungseintrag auf Bezugsfläche (X – Stellfläche, Schattenwurffläche, Trapez, Halbkegelstumpf)
JD	[d]	Julianisches Datum
k	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmedurchgangskoeffizient
l_{ch}	[m]	charakteristische Überstromlänge

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
L_e	[°]	mittlere ekliptikale Länge
L_K	[min]	Längengradkorrektur
$\dot{m}_{Susp.}$	[kg h ⁻¹]	Massenstrom Suspensionssegment
M	[°]	Anomalie der Sonne
MEZ		mitteleuropäische Zeit
n	[d]	Tageszahl
$n_{1,2}$	[-]	Brechzahl (Brechungsindex)
n_W	[-]	Windungsanzahl Doppelschlauchhelix
Nu_{erzw}	[-]	Nusselt-Zahl für erzwungene Konvektion
Nu_{frei}	[-]	Nusselt-Zahl für freie Konvektion
$Nu_{lam/turb}$	[-]	Nusselt-Zahl für laminare/turbulente Strömung
Nu_{Misch}	[-]	Nusselt-Zahl für Mischform aus freier und erzw. Konvektion
$PCE_{SOL/PAR}$	[-]	Photokonversionseffizienz (Indizes: SOL – bezüglich solaren Spektrums; PAR – bezüglich PAR-Anteil)
$PPFD$	[$\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$]	photosynthetisch aktive Photonenflussdichte
Pr	[-]	Prandl-Zahl
\dot{Q}_{bil}	[W]	Wärmestrom, bilanziert
$\dot{Q}_{Konvektion}$	[W]	Wärmestrom aufgrund von Konvektion
$\dot{Q}_{Strahlung}$	[W]	Wärmestrom aufgrund von Globalstrahlung
$\dot{Q}_{Temperierung}$	[W]	Wärmestrom aufgrund von Temperierung
$\dot{Q}_{T1/2}$	[W]	Wärmestrom Temperiersegment (1 – an Umgebung, 2 – in Suspensionssegment)
r	[m]	Integrationsvariable Durchmesser Suspensionssegment
$r_{S,a}$	[m]	Außenradius Suspensionssegment
r_x	[g l ⁻¹ d ⁻¹]	Produktbildungsgeschwindigkeit der Mikroalgenbiomasse
$R_{PBR,oben}$	[m]	Radius Lichtkollektor oben

Nomenklatur

Bezeichnung	Einheit	Beschreibung
$R_{PBR,unten}$	[m]	Radius Lichtkollektor unten
Ra	[-]	Raleigh-Zahl
Re	[-]	Reynoldszahl
Re_o	[-]	Reynoldszahl einer Rohrreihe
$Re_{S,krit}$	[-]	kritische Reynoldszahl für turbulente Strömung
s_0	[mm]	Schlauchabstand pro Windung
t_a	[-]	Materialspezifischer Transmissionsgrad
$T(\theta)$	[-]	Transmissionsgrad Lichtkollektor
$T_{H,r}$	[-]	Transmissionsgrad Lichtkollektor, horizontal, radial
$T_{H,R}$	[-]	Transmissionsgrad Lichtkollektor, horizontal, axial
T_H	[-]	Transmissionsgrad Lichtkollektor, horizontal
T_V	[-]	Transmissionsgrad Lichtkollektor, vertikal
V	[m ³]	Kultivierungsvolumen
WOZ		wahre Ortszeit
$X - \text{Gehalt}$	[% w w ⁻¹]	Massenprozent/-gehalt an X (C – Kohlenstoff, N – Stickstoff, P – Phosphor, S – Schwefel, Protein, Lipid)
$Y(\theta)$	[-]	Bestrahlungsgrad Lichtkollektor
Y_H	[-]	Bestrahlungsgrad Lichtkollektor, horizontal
Y_V	[-]	Bestrahlungsgrad Lichtkollektor, vertikal
$Y_{X I}$	[g MJ ⁻¹]	Ertragskoeffizient der Biomasse bezüglich Licht
Z	[d]	Zeitraum
ZG	[min]	Zeitgleichung

Die Einführung und Definition mathematischer Hilfsgrößen erfolgt anhand detaillierter Abbildungen und in Textform an Ort und Stelle.

1. Einleitung und Zielsetzung

Mikroalgen bieten ein enormes Potential und werden hinlänglich als Multitalente einer biobasierten Zukunft bezeichnet. Dabei steht eine bis zu 5-fach effektivere Ausnutzung des Sonnenlichtes gegenüber Landpflanzen im Mittelpunkt. Mikroalgen sind einzellige Mikroorganismen und bieten daher die Möglichkeit zur intensiven Kultivierung, in dem die Wachstumsparameter innerhalb eines geschlossenen Kultivierungssystems aktiv beeinflussbar sind. Die Gewinnung eines definierten Produktes gleichbleibender Güte und Qualität, der Algenbiomasse selbst und/oder eines darauf basierenden Hochwertproduktes, ist Voraussetzung für eine Vermarktung. Dabei steigen die Anforderungen an eine definierte Produktqualität mit dem Wert des Produktes. Die stabile Produktion von Mikroalgenbiomasse unter Freilandbedingungen mit gleichbleibender und definierter Produktzusammensetzung ist jedoch nach wie vor nicht effektiv möglich.

Die Steuerung biologischer Systeme zur Produktion von Biomasse erfordert die Beherrschung einer Vielzahl an Randbedingungen, die bezüglich ihrer Bedeutung gewichtet werden müssen.

Das Wachstum von Mikroalgen kann photoautotroph erfolgen. Damit ist es möglich, das Sonnenlicht als prinzipiell unerschöpfliche, frei zugängliche Energiequelle nutzbar zu machen. Voraussetzung für eine intensive Umsetzung ist ein System, welches einer größtmöglichen Anzahl von Mikroalgenzellen das Sonnenlicht verfügbar macht. Diese sogenannten Lichtkollektoren besitzen eine möglichst große transparente volumenspezifische Oberfläche (photoaktive Fläche) und werden gemeinsam mit einer definierten Peripherie zu einem in der Regel in Kreislauffahrweise betriebenen geschlossenen System verschaltet – dem Photobioreaktor (Chmiel, 2011a). Für das Wachstum weiterhin erforderlich ist die Versorgung mit Nährsalzen und einer anorganischen Kohlenstoffquelle (in der Regel Kohlendioxid) sowie die Einhaltung weiterer spezifischer Wachstumsparameter, insbesondere der Temperatur sowie des pH-Wertes. Die genannten Prozessgrößen sind direkt beeinflussbar hinsichtlich ihrer konstanten Versorgung und Einhaltung innerhalb von Toleranzbereichen. Einzig und allein das Sonnenlicht stellt sich als nicht steuerbare Prozessgröße dar und muss bei der Konzeption des Lichtkollektors berücksichtigt werden. Beginnend mit der Spezifik hinsichtlich Intensität und Verteilung an verschiedenen Standorten, führen klimatische Wetterverhältnisse zu einer nicht steuerbaren aber obligaten Wachstumskomponente für das Mikroalgenwachstum in Bezug auf Intensität, Verteilung und Zeitdauer (Tageslänge). Aus diesem Grund ist die optimale Gestaltung der Lichtkollektoren für einen effektiven Lichteintrag als entscheidendes Kriterium bei der Konzeption von Photobioreaktoren im Zusammenhang mit der Steuer- und Regelbarkeit zur Einhaltung idealer Bereiche der genannten weiteren Wachstumsparameter, insbesondere der Temperatur, zu betrachten. Damit ist sichergestellt, dass der für das phototrophe Wachstum der Mikroalgen alleinige limitierende Faktor das lokal

verfügbares Sonnenlicht darstellt. Neben der Aufnahme von Sonnenlicht muss selbiges im Regelfall „verdünnt“ werden, da die Intensität direkter Sonneneinstrahlung für Mikroalgen zu hoch ist. Aus diesem Grund steht neben der Anforderung an die größtmögliche Aufnahme auch die Verteilung des Lichtes im Fokus. Hierfür sind die Lichtkollektoren mit einer großen volumenspezifischen Oberfläche (Verteilungseffekt) und einer definierten, möglichst geringen, Stellfläche („Verdünnungseffekt“) zu konzipieren.

Nur unter Einhaltung aller Wachstumsparameter ist eine hohe Verfügbarkeit des Photobioreaktors zur Kultivierung von Mikroalgenbiomasse möglich und erlaubt eine effektive Produktion im Freiland. Schwankende Umgebungsbedingungen erfordern dabei ein direkt steuerbares System. Dabei stellt die Sonneneinstrahlung eine nicht direkt regelbare Prozessgröße dar und hat einen erheblichen Einfluss auf das geschlossene System als solches. Die optimierte Gestaltung der Lichtkollektoren zur Aufnahme von Sonnenlicht als Grundlage für photosynthetisches Wachstum führt dazu, dass gleichzeitig und prozessimmanent dem geschlossenen Flüssigkeitskreislauf Wärme zugeführt wird, welches sich daraufhin erwärmt. Aus diesem Grund muss die überschüssige Wärme dem System kontinuierlich entzogen werden, um den für das Algenwachstum erforderlichen Temperaturbereich abzusichern.

Das Zusammenspiel aus effektivem Lichteintrag bei gleichzeitiger Entfernung überschüssiger Wärme zur Aufrechterhaltung idealer Wachstumsbedingungen ist als Grundaufgabe bei der Konzeption und dem Betrieb von Photobioreaktoren im Freiland zu betrachten. Eine Vielzahl von Konzepten für Photobioreaktoren dient zunächst vordergründig der Aufgabe zur Lichtaufnahme und, im zweiten Schritt, der Lichtverteilung und -verdünnung.

Als transparente Werkstoffe für Lichtkollektoren kommen Glas oder Kunststoffe in Frage. Aufgrund materialtechnischer Eigenschaften ist es in technologischer Hinsicht bisher nicht möglich gewesen, einen effektiven Lichteintrag mit einer aktiven Temperierung am Ort der Entstehung zu konzipieren und somit ein Aufrechterhalten idealer Wachstumsbedingungen im Hinblick auf äußere Einflüsse gewährleisten zu können.

Dieser Aufgabe will sich diese Arbeit stellen. Unter beispielhafter Verwendung der Konzeption des Tannenbaumphotobioreaktors steht die Erarbeitung der Voraussetzung einer stabilen Verfahrensweise eines geschlossenen Kultivierungssystems unter Freilandbedingungen im Mittelpunkt. Hierfür werden einerseits ein Verständnis zum Lichteintrag der Lichtkollektoren für eine Bewertung hinsichtlich des phototrophen Biomasseaufbaus und andererseits die Werkzeuge zur Aufrechterhaltung der Prozessstabilität entwickelt. Die Bewertung des Lichteintrages im Freiland setzt sich zusammen aus der Modellierung der Eingangsgrößen der Globalstrahlung (Sonnenstand) und der Berechnung des Strahlungsverhaltens an der Grenzfläche der eingesetzten Materialien. In Kombination damit ist die Berechnung des

Lichteintrages an der konkreten geometrischen Ausführung des Lichtkollektors mathematisch zu formulieren. Anhand dieses Modells soll eine Berechnung des Lichteintrages für jeden Standort weltweit ermöglicht werden. Speziell erfolgt eine Anwendung der entwickelten Berechnungsmethodik für den Standort der Tannenbaumphotobioreaktoren in Köthen. Dabei soll eine Überprüfung des Modells mit Hilfe einer Wärmebilanzierung unter praktischen Bedingungen erfolgen.

Die erzielten Erkenntnisse werden anhand einer Langzeitkultivierung getestet und weiter optimiert. Dabei soll das stabile Wachstum einerseits an bekannten und charakteristischen Korrelationen hinsichtlich der Lichtaufnahme untersucht und andererseits die kultivierte Mikroalgenbiomasse anhand ihrer chemischen Zusammensetzung begutachtet werden.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1. Biologie und Wachstum von Mikroalgen

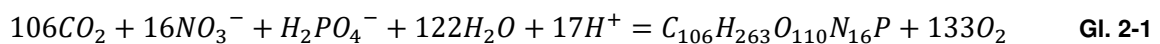
Der Begriff „Algen“ ist taxonomisch nicht belegt und die Vertreter verteilen sich para- und polyphyletisch über den Stammbaum des Lebens. Algen sind photosynthetisch aktive (also Sauerstoff-freisetzende) Organismen und reichen in ihrer Morphologie von mikroskopisch kleinen Einzellern (Cyanobakterien, Mikroalgen) bis hin zu komplexen, mehrzelligen Strukturen (Makroalgen/sea weeds). Im Zuge der Endosymbiontentheorie können nach heutiger Sicht vier Entwicklungsabschnitte (4 Stufen der Endosymbiose) unterschieden werden, die das sich Herausbilden von Prokaryoten und verschiedenen Stufen der Eukaryoten widerspiegeln (Barsanti and Gualtieri, 2014; Lee, 2008). Neben klassischer taxonomischer Einordnung, der vorwiegend morphologische Eigenschaften zu Grunde gelegt werden, spielen genetische Informationen (Sequenzierung verschiedener rDNA-Codes) seit einigen Jahren eine entscheidende Rolle bei der Ein- und Zuordnung von Lebewesen im Allgemeinen, aber auch bei Algen im Speziellen. Im Zuge dessen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Kategorisierung, welche detailliert in der Fachliteratur beschrieben sind und von Zeit zu Zeit aktualisiert werden (Adl et al., 2005, 2012; Barsanti and Gualtieri, 2014; Borowitzka, 2016a; De Clerck et al., 2013; Guiry, 2012; Guiry and Guiry, 2011; Lee, 2008). Die Angaben zur Anzahl weltweit vorkommender Algenspezies reichen bis in den 7-stelligen Bereich, Schätzungen anhand von bisher klassifizierten Algen ergeben mehr als 72.000 Arten (Guiry, 2012).

Mikroalgen kommen vorrangig in aquatischen Habitaten vor, können sich aber auch an terrestrische Lebensräume anpassen und werden innerhalb der erdnahen Luftschichten transportiert. Sie zeichnen sich durch eine große Widerstandsfähigkeit aus, insbesondere wenn sie genügend Adaptionzeit bekommen. Bei stressinduzierenden Umgebungsbedingungen kann es zu einer Ausbildung von Dauerstadien kommen, bis die Bedingungen für vegetatives Wachstum vorhanden sind (Barsanti and Gualtieri, 2014).

Der Metabolismus der meisten Algen verläuft photoautotroph, d.h. sie verwenden CO₂ als Kohlenstoffquelle und Licht/Sonnenlicht als Energiequelle um Kohlenhydrate und ATP zu generieren (Barsanti and Gualtieri, 2014). Einige Vertreter der Algen verfolgen wiederum primär heterotrophe Ernährungsstrategien, also die Nutzung organischer Verbindungen als Kohlenstoffquelle. Der Metabolismus der meisten Algen verläuft obligat, d.h. eine Strategie wird gegenüber der anderen bevorzugt, bei ungünstigen Umgebungsbedingungen kann die jeweils andere Form genutzt werden. Bei fakultativer Ernährungsweise (Mixotrophie) können sowohl autotrophe als auch heterotrophe Wege genutzt werden. Weiterhin benötigen einige photoautotrophe Algen heterotrophe Stoffwechselwege um essentielle Substanzen

aufnehmen zu können, hierbei handelt es sich um obligat heterotrophe oder auxotrophe Ernährungsweisen (Lee, 2008).

Aufgrund der Vielzahl an Algen, vorkommend in unterschiedlichen Habitaten mit diversen Umgebungsbedingungen, kann eine explizite biochemische Zusammensetzung von Mikroalgen nicht erfolgen. Allgemein für maritimes Phytoplankton in natürlichen Gewässern wird häufig eine elementare Biomassezusammensetzung hinsichtlich des molekularen Verhältnisses von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Phosphor (P) von C:N:P = 106 : 16 : 1 angegeben (Redfield et al., 1963), welche aufgrund der großen biologischen Diversität und unterschiedlicher Lebensräume, wie Salz- und Frischwasserhabitats sowie limitierende Nährstoffbedingungen, schwankt und demnach nicht für alle Lebensräume und Arten verwendet werden kann (They et al., 2017; Finkel et al., 2016; Sterner et al., 2008; Hecky et al., 1993). Dennoch wird das ursprünglich von Redfield beschriebene stöchiometrische Verhältnis (Redfield-Verhältnis) nach wie vor häufig angewandt und kann, unter Nutzung von Nitrat als Stickstoffquelle, in folgender Reaktionsgleichung beschrieben werden (Kirk, 2004):



Gl. 2-1 stellt hierbei eine Auswahl an metabolischen Edukten, und somit eine unvollständige Auflistung von Nährstoffen, dar. So werden beispielsweise Schwefel sowie weitere (teilweise artspezifische) Mikroelemente wie Eisen, Magnesium, Kalium, Calcium, Zink, Kupfer, Kobalt, Mangan, Molybdän und Bor (auch Silizium möglich bei Diatomeen) benötigt (Krauss et al., 1956).

Obwohl es sich um eine biologische Matrix handelt und demnach molekulare Bindungen zwischen Biomolekülklassen bestehen (Glykoproteine, Glykolipide, etc.), werden im Regelfall folgende Biomoleküle für die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung von Mikroalgen angegeben (Becker, 2013; Geider and Roche, 2002): Proteine (C-H-O-N-S), Kohlenhydrate (C-H-O) und Lipide (C-H-O/C-H-O-N-P). Weiterhin, aber bezogen auf den Massengehalt in deutlich geringerem Umfang, sind Nucleinsäuren (C-H-O-N-P) enthalten. Der Aschegehalt von Mikroalgen beträgt zwischen 5 und 15 %.

Kohlenstoff kommt in allen drei Klassen vor. Stickstoff findet bei Algen vorrangig in Proteinstrukturen Verwendung. Ca. 10 % des Gesamtstickstoffes kommen in nicht-proteinogenen Verbindungen vor (Becker, 2013). Phosphor wiederum ist vornehmlich in Nucleinsäuren und Phospholipiden zu finden, unterliegt daher kaum Schwankungen im Gehalt und ist kein Bestandteil von Proteinen (Geider and Roche, 2002; Pessaraki et al., 2005).

Eine Möglichkeit von Mikroalgen, bei Nichtvorhandensein bzw. schwankenden Energiequellen (z.B. Sonnenlicht), ist die Anpassung des eigenen Stoffwechsels und Nutzung des

organischen Kohlenstoffes als Zellbaustein und gleichermaßen als Energiequelle. Unter den genannten Stressbedingungen können Mikroalgen Speicherstoffe als Energiereserve anlegen. Hierzu dienen artspezifisch Kohlenhydrate, wie Stärke und andere Polyglukane, und neutrale Lipide (Zachleder et al., 2016). Auf diesem Weg werden die Speicherstoffe angereichert und erhöhte Anteile am Biotrockenmassegehalt können erzielt werden. Die Gesamtbiomasse setzt sich also aus einer aktiven Biomasse, bestehend aus funktionalen Molekülen, und einer Speicherbiomasse zusammen (Schirmer and Posten, 2016; Adesanya et al., 2014; Bernard, 2011). Diese Unterteilung der Biomasse-Gruppen wird häufig für die Modellbildung metabolischer Prozesse herangezogen.

In Anlehnung an die Michaelis-Menten-Kinetik lässt sich das Wachstum photoautotroph metabolisierender Mikroalgen in einen Bezug zur aufgenommenen Lichtenergie bringen. Als Maß können einerseits Umsatzraten, wie z.B. die Photosyntheserate oder Kohlenstoffaufnahme (Barsanti and Gualtieri, 2014; Carvalho et al., 2011; Fernández et al., 2013), und andererseits, als direkter Bezug zur Biomasse, die spezifische Wachstumsrate (μ) dienen (Abbildung 2-1). Anhand des typischen Verlaufes von μ können drei Abschnitte definiert werden – lichtlimitiert (I), lichtgesättigt (II) und lichtinhibiert (III) – wobei die jeweiligen Bereiche artspezifisch verlaufen (Beardall and Raven, 2013; Lehr et al., 2012; Mishra, 2004; Posten, 2016; Wagner et al., 2015). Beispielhaft dient hierfür die grafische Darstellung der Wachstumskinetik von *Chlamydomonas reinhardtii* in Abbildung 2-1 (Posten, 2016). In einem Bereich bis ca. $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ werden die verfügbaren aufgenommenen Lichtphotonen vollständig in der Photosynthese genutzt. Ein Überschreiten dieser Lichtmenge führt zu einer Abnahme des Zuwachses der spezifischen Wachstumsrate und somit der Effizienz bezüglich der aufgenommenen Lichtenergie ohne den linearen Charakter zwischen der Lichtmenge, welche in Biomasse umgewandelt wird, und spezifischer Wachstumsrate zu verlieren. Mit steigender Lichtmenge nimmt jedoch die Differenz zwischen zur Biomassebildung genutzter und aufgenommener Lichtphotonen zu. Diese überschüssige absorbierte Lichtenergie wird in Form von Wärme, teils auch Fluoreszenz, wieder abgegeben und die Zelle somit vor Schädigung bewahrt. Dieser Prozess wird als Nicht-Photochemisches Quenching (NPQ) bezeichnet. Der Maximalwert der spezifischen Wachstumsrate wird, bei diesem Beispiel, bei ca. $1700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erreicht. Oberhalb dessen kommt es zu phototoxischen Effekten (Photoinhibition) und einem daraus folgenden rapiden Abfall der spezifischen Wachstumsrate der Algenpopulation.

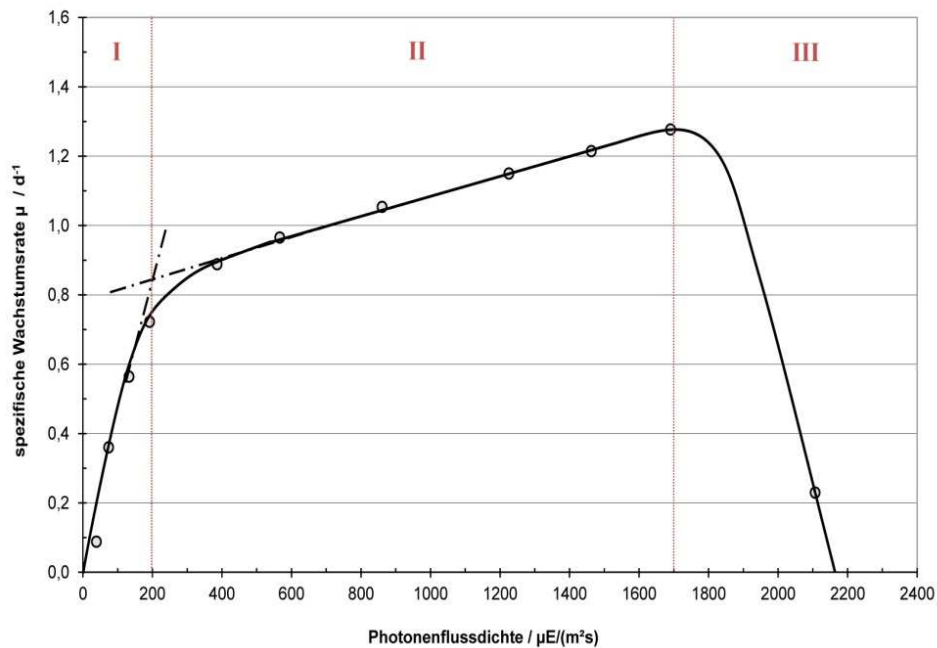


Abbildung 2-1 - Wachstumskinetik phototropher Mikroalgen anhand spezifischer Wachstumsrate bzgl. Photonenflussdichte, Mikroalge: *Chlamdomonas reinhardtii* (Posten, 2016)

Als Lichtkompensationspunkt wird der Wert der Strahlungsleistung beschrieben, ab dessen Überschreiten phototrophes Wachstum beginnt. Für *Scenedesmus*-Kulturen liegt dieser bspw. bei $12,5 \pm 3,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (J. Wang et al., 2015), für *Chlorella pyrenoidosa* ist die kritische Lichtintensität bei $7,65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ beschrieben (Ogbonna et al., 1995). Das beschriebene und in Abbildung 2-1 dargestellte Verhalten gilt für eine grundsätzlich licht-limitierte Kultur, d.h. hinsichtlich aller benötigten Stoff- und Energieressourcen darf nur der Parameter Licht einen limitierenden Faktor darstellen, alle weiteren Eingangsgrößen müssen im Überschuss zur Verfügung stehen.

2.2. Status quo Mikroalgenbiomasse

2.2.1. Biotechnologische Produktion von Mikroalgenbiomasse und deren Anwendungsfelder

Die ersten Nutzungskonzepte von Mikroalgen und Cyanobakterien sind in der Verwendung als Nahrungsmittel zu finden. Die Azteken ernteten bereits 1300 n. Chr. *Arthrospira* aus dem heutigen Texcoco-See und die Kanembu gewinnen *Arthrospira* bereits seit 900 n. Chr. aus dem Tschadsee (Lake Chad, auch Lake Kossorrom). Die sogenannten „Ladies of Chad“ ernten heute jährlich geschätzt bis zu 40 Tonnen Trockenmasse (Abdulqader et al., 2000; Barsanti and Gualtieri, 2006). Obwohl auch modernere Erntetechniken Einzug halten, werden nach wie vor ebenso einfache, aber effektive Methoden der Aufbereitung, wie die Nutzung des Sonnenlichtes zum Trocknen der Biomasse, angewandt (vgl. Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2 - traditionelle Ernte von *Arthrospira*-Biomasse der Kanembu aus dem Tschadsee (Batello et al., 2004)

Mit der Entwicklung von technischen Kultivierungskonzepten von offenen bis geschlossenen Produktionsanlagen hat sich die Nutzung von Algenbiomasse vervielfältigt. Dabei haben sich aufgrund klimatischer Begebenheiten und kultureller Unterschiede hinsichtlich kulinarischer Bedürfnisse Schwerpunkte der Marktfelder im asiatischen und pazifischen Raum gebildet.

Die Angaben zu Produktionsmengen weltweit sind schwankend und liegen, bezogen auf die Trockensubstanz, im fünf-stelligen Tonnenmaßstab (Grewe, 2019; Laurens, 2017; Torzillo and Zittelli, 2015; Enzing et al., 2014; Milledge, 2012, 2011; Darzins et al., 2010; Rosello Sastre and Posten, 2010; Spolaore et al., 2006). Einer der Gründe liegt darin begründet, dass die real produzierten Mengen teilweise von den veröffentlichten Angaben zu den Kapazitäten der jeweiligen Produktionsanlage abweichen. Eine Auswahl an Mikroalgenproduzenten ist im Anhang A-7 zu finden. Allein in Europa wird mittlerweile, Stand 2015, ein Umsatz von mehr als 900 Millionen Euro durch über 100 Firmen verzeichnet (Verdelho Viera, 2015). Das weltweite Marktvolumen von Mikroalgenbiomasse beträgt ca. 2,4 Mrd. Euro (2011) mit einem geschätzten jährlichen Wachstum von 10 % (Enzing et al., 2014). Der Großteil der weltweit produzierten Menge an Mikroalgenbiomasse wird vorrangig in offenen Kultivierungssystemen

erzeugt (Benemann, 2013). Eine vergleichende Betrachtung zu diversen am Markt befindlichen Kultivierungssystemen wird in Abschnitt 2.3 vorgenommen.

Als Handelsform wird Mikroalgenbiomasse einerseits als Rohbiomasse in frischer, meist tiefgefrorener Form (auch Algenslurry) oder in getrockneter Form (Pulver, Tabletten) vertrieben. Andererseits können gezielt Wert- und Wirkstoffe extrahiert und als mikroalgenbasierte Produkte gehandelt werden. Hierbei sind die Anforderungen an das Produkt hinsichtlich stofflicher Eigenschaften, wie Form, Stabilität, Reinheit und Wirkungsweise einerseits und rechtlicher Aspekte andererseits maßgebend (siehe hierzu Abschnitt 2.2.2). Konzepte für Anwendungsfelder von Mikroalgenbiomasse liegen sowohl in der stofflichen als auch energetischen Nutzung. Als Rohstoff für die Lebens- und Futtermittelproduktion, für Fein- und Bulk-Chemikalien und den Kosmetikbereich sind existierende Absatzmärkte in absteigender Wichtung vorhanden (Enzing et al., 2014). Die pharmazeutische Nutzung von Mikroalgenbiomasse bzw. mikroalgenbasierter Wirkstoffe ist im Bereich Forschung und Entwicklung in hohem Maße verbreitet, jedoch haben bisher noch wenige Produkte den Markteintritt geschafft und befinden sich zumeist noch in klinischen Studien (Enzing et al., 2014; Rosales-Mendoza, 2016). Beispielhaft für ein erhältliches Produkt ist Adcetris® (Brentuximab Vedotin) zu nennen, einem Zytostatikum gewonnen aus dem Cyanobakterium *Symploca* sp. (Paterson and Lima, 2017) und seit 2012 in der EU unter besonderer Überwachung zugelassen (European Medicines Agency, 2018). Die Vergärung oder auch hydrothermale Umwandlung von Mikroalgen in direkter Form bzw. als Restbiomasse wird vielfältig in der Fachliteratur diskutiert und spielt vor allem im Rahmen von Bioraffinationsansätzen eine tragende Rolle (Fresewinkel et al., 2014; Hariskos and Posten, 2014; Mussnug et al., 2010; Onwudili et al., 2013).

Heutige Nutzungskonzepte sind vielfältig, wobei sich eine marktwirtschaftliche Grundregel auch beim Absatzmarkt der Mikroalgenbiomasse widerspiegelt – Marktvolumen und Marktpreis verhalten sich gegenläufig. Dieses Prinzip lässt sich anhand einer Produktpyramide darstellen, wonach sogenannte Hochwertprodukte (engl.: *high-value products*) das volumemäßig kleinste Marktsegment ausfüllen, dabei aber die höchsten Produktpreise pro Masse erzielen (siehe Abbildung 2-3).

Phototroph werden heute vor allen Dingen *Arthrospira* (vormals taxonomisch als *Spirulina* bezeichnet und nach wie vor häufig als Handelsform als *Spirulina* vertrieben), *Chlorella*, *Dunaliella* und *Haematococcus* Biomasse produziert. Dabei stellen folgende Anwendungsfelder den Hauptanteil im kommerziellen Großmaßstab dar:

Arthrospira sp. und *Chlorella* sp. als Rohbiomasse

beta-Carotin aus *Dunaliella salina*

Astaxanthin aus *Haematococcus pluvialis*

Phycocyanin aus *Arthrospira platensis*

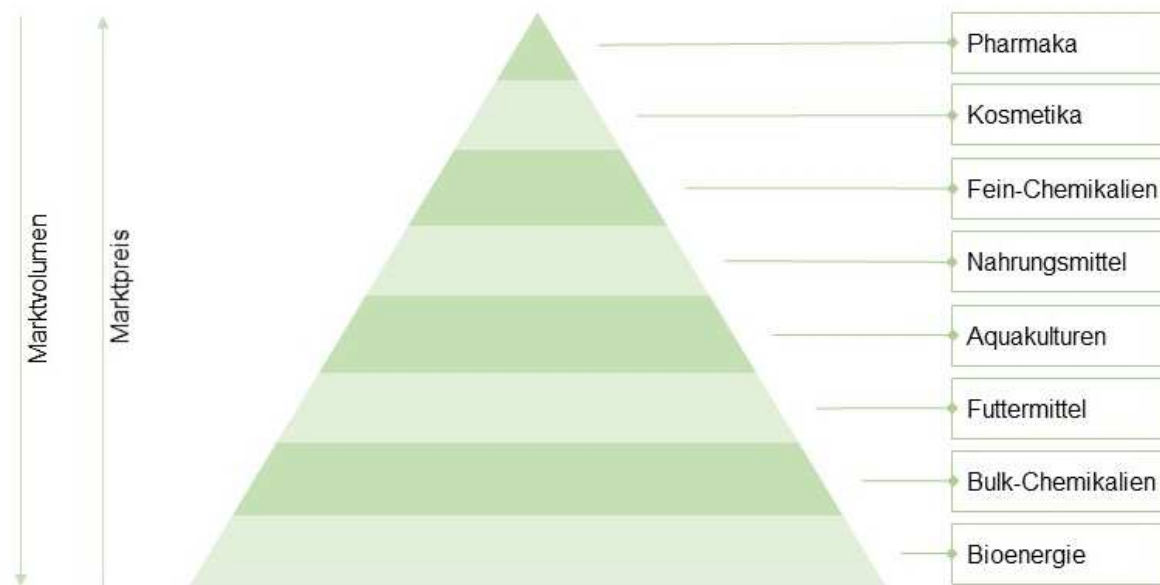


Abbildung 2-3 - Produktpyramide Mikroalgen, erstellt nach (Ahmed et al., 2014; Voort et al., 2015)

Den volumenmäßig größten Anteil am weltweiten Markt an produzierter und gehandelter Mikroalgenbiomasse stellen *Arthrospira* und *Chlorella* dar. Nachdem in den 1990er und 2000er Jahren die weltweiten Produktionszahlen relativ stabil zwischen 2.000 und 5.000 Tonnen (bezogen auf Trockengewicht) lagen (Pulz and Gross, 2004; Spolaore et al., 2006), sind sie in den letzten Jahren mittlerweile auf über 30.000 t angestiegen (Grewe, 2019) – mehrheitlich verteilt auf 10.000 Tonnen *Chlorella* und 15.000 Tonnen *Arthrospira* (Slocombe and Benemann, 2016). Allein in China und Japan wurde die jährliche Produktion von *Chlorella* Biomasse mit 3.500 Tonnen beziffert (Lin, 2005). Für *Arthrospira* werden teilweise Produktionsmengen von mehr als 40.000 Tonnen geschätzt (Habib et al., 2008). Die Schwankungsbreite liegt darin begründet, dass *Arthrospira* mittlerweile in mehr als 22 Ländern von vielen kleinen und mittleren Produzenten (vor allen Dingen im asiatischen Raum) produziert wird (Habib et al., 2008). *Arthrospira* wird ebenfalls vorwiegend in offenen Kultivierungsbecken produziert und für bis zu 25 US Dollar pro kg Trockengewicht vertrieben (Slocombe and Benemann, 2016). Als Verkaufspreise für *Chlorella* im Lebensmittelsektor können zwischen 20 und 30 US Dollar (Grewe, 2019; Slocombe and Benemann, 2016; Lundquist et al., 2010) bzw. 36 Euro (Brennan and Owende, 2010) bis zu mehr als 100 Euro pro kg Trockenmasse erzielt werden, abhängig von Qualität und Art der Produktionsherstellung. Preise von bis zu 100 Euro und mehr können für qualitativ hochwertige phototroph erzeugte Biomasse bei kleineren Absatzmengen im Endkundenbereich erzielt werden, welche im Regelfall in geschlossenen Systemen kultiviert wird (Roquette Klötze GmbH & Co. KG, 2017).

Neben der Verwendung der Rohbiomasse im Nahrungs- und Futtermittelbereich ist der Marktsektor der Hochwertprodukte von großer Relevanz. Hier sind vor allen Dingen

Carotinoide, Phycobilinpigmente und mehrfach ungesättigte Fettsäuren (poly-unsaturated fatty acids – PUFA's) von großer Bedeutung (Dominguez, 2013). Im Bereich der Carotinoide bedingt die Marktfähigkeit der algenbasierten Produkte die Frage des Vorhandenseins eines alternativen Produktes synthetischen Ursprungs. Letztere Varianten sind deutlich kostengünstiger in der Herstellung. So auch bei beta-Carotin und Astaxanthin – zwei der am häufigsten produzierten Hochwert-Produkte aus Mikroalgen. Dennoch wird der Bedarf an Produkten aus natürlicher Produktion größer (Panis and Carreon, 2016; Del Campo et al., 2007). Basierend auf Zahlen von 2014 beträgt die jährliche Produktion von Astaxanthin weltweit insgesamt 300 Tonnen – davon sind ca. 25 Tonnen aus natürlichen Quellen („natürliches“ Astaxanthin). Hergestellt aus Mikroalgenbiomasse (*Haematococcus pluvialis*) sind bis zu 3 Tonnen. Allerdings können hierfür zwischen 2.500 und 7.000 US Dollar als Preis erzielt werden (Cameron Coates et al., 2013; Li et al., 2011; Milledge, 2012; Panis and Carreon, 2016). Synthetisches Astaxanthin kann bisher nur zu färbenden Zwecken im Fischfutter verwendet werden und ist im Gegensatz zu natürlichem Astaxanthin noch nicht im humanen Bereich zugelassen (Borowitzka, 2013; Panis and Carreon, 2016). Der Absatzmarkt von Astaxanthin (aus synthetischen und natürlichen Quellen) wird mit einem jährlichen Wachstum von 7 % im Zeitraum von 2016 bis 2023 belegt (Global Market Insights Inc., 2016a).

Die Produktion von beta-Carotin aus *Dunaliella salina* stellt die erste kommerzielle Herstellung eines Hochwertproduktes aus Mikroalgen dar und geht zurück bis in die 1980er Jahre (Borowitzka, 2013). Beta-Carotin wird hauptsächlich im Lebens- und Futtermittelbereich als Farbstoff und Antioxidationsmittel eingesetzt. Auch bei diesem Carotinoid gibt es synthetische Varianten. Das Marktvolumen zwischen 2010 und 2014 stieg von 270 auf über 300 Millionen US Dollar (Borowitzka, 2013; Credence Research, 2016). Der Marktanteil an beta-Carotin aus *Dunaliella salina* betrug in 2015 37,9 % (Grand View Research Inc., 2016), wobei je nach Produktformulierung ein Marktpreis zwischen 300 und 1.500 US Dollar pro kg erzielt werden kann (Borowitzka, 2013; Guedes et al., 2011).

Aufgrund der beschränkten Produktionskapazitäten von Carotinoiden tierischen Ursprungs (Krabben, Schrimps) sind die Wachstumschancen für mikroalgenbasierte Produkte steigend (Global Market Insights Inc., 2016b). Allerdings existieren auch alternative Herstellungsmöglichkeiten von Carotinoiden aus natürlichen Quellen. So, zum Beispiel, ist die fermentative Astaxanthinproduktion mit Hilfe der Hefe *Phaffia rhodozyma* (E 161y) und dem Bakterium *Paracoccus carotinifaciens* (2a(ii)167), z.B. *Panafert-AX* von der Fa. JX Nippon ANCI (JX Nippon ANCI, 2019), möglich und steht potenziell der Produktion aus Mikroalgen in Konkurrenz gegenüber. Allerdings sind die Zulassungen im Futtermittelbereich (für Lachs und Forelle) im Jahr 2018 ausgelaufen und zurzeit im Status der Wiederbeantragung (EU, 2019a).

Der prinzipielle Vorteil von Phycobilinpigmenten, wie Phycocyanin und Phycoerythrin, liegt darin begründet, dass bisher keine synthetische Form existiert (Borowitzka, 2013). Phycocyanin aus *Arthrospira platensis* oder auch *Arthrospira maxima* stellt einen zugelassenen blauen Lebensmittelfarbstoff aus natürlichen Quellen dar (Carle and Schweiggert, 2016; Dominguez, 2013). Das Marktvolumen von Phycobilinpigmenten im Allgemeinen wird auf ca. 60 Millionen US Dollar geschätzt (Borowitzka, 2013).

Die Herstellung von mehrfach ungesättigten Fettsäuren (PUFA's) wird vorrangig dominiert durch die heterotrophe Produktion von Mikroalgen und Pilzen (Borowitzka, 2013). Die bedeutendsten Produkte sind hierbei Öle aus Eicosapentaensäure (EPA) und Docosahexaensäure (DHA), deren Marktvolumen bis 2022 auf bis zu 95 Tonnen geschätzt wird. Da die Herstellung von EPA und DHA aus traditionellen Quellen, wie die Gewinnung aus Sardinen, stagniert, wird für direkte algenbasierte Öle mit DHA/EPA ein Wachstum bis zu 8 % eingeschätzt (Global Market Insight: Report ID:GMI118).

Abseits des Absatzmarktes der oben genannten großvolumig-produzierten Mikroalgen werden eine Vielzahl im Kosmetik- und Aquakulturbereich verwendet, da die rechtliche Situation nicht im selben Maße restriktiv ist.

Für Kosmetika im Gesichts- und Hautpflegebereich sind hauptsächlich Polysaccharide aus Mikroalgen interessant, jedoch sind häufig günstigere Alternativen bei Makroalgen zu finden (Borowitzka 2013). Mittlerweile existiert eine steigende Nachfrage an Pigmentierungsagenzien aus natürlichen Quellen (Phycobiline), da den bisher genutzten synthetisch hergestellten Carotinoiden gesundheitsschädigende Wirkungen zugeschrieben werden (H.-M. D. Wang et al., 2015). Dies lässt sich auch an der maximal zulässigen Obergrenze für Triphenylphosphin von 100 mg kg^{-1} , einem möglichen Intermediate bei der Synthese von beispielsweise Astaxanthin, widerspiegeln (EU, 2019b; European Chemicals Agency (ECHA), 2019). Der Übergang zwischen kosmetischer und medizinischer Wirkung ist fließend. Dennoch finden, unter Beachtung rechtlicher Vorschriften, immer mehr „Beauty-Produkte“ mit diversen beschriebenen Wirkungen den Eintritt in den Markt.

Im Aquakulturbereich, im Speziellen bei der Aufzucht von Fischen, werden ca. 20 verschiedene Mikroalgen verwendet, wobei häufig gezielt Mischkulturen zum Einsatz kommen um die Nährstoffbasis bedarfsgerecht anpassen zu können (Guedes and Malcata, 2012). In diesem Segment geht es vor allen Dingen um den Einsatz der Mikroalgenbiomasse als Lebendkulturen, teilweise aber auch als Biomasse in getrockneter Form (Becker, 2003). Neben *Chlorella*-Kulturen (Liu and Chen, 2014) kommen verschiedenste Mikroalgen wie *Isochrysis* sp., *Pavlova* sp., *Phaodactylum* sp., *Nannochloropsis* sp., *Skelotenma* sp. oder auch *Tetraselmis* sp. zum Einsatz (Enzing et al., 2014).

2.2.2. Aktuelle rechtliche Situation in Deutschland und der Europäischen Union

Bezüglich des Anwendungsfeldes sind, bei einer wirtschaftlichen Verwertung der Mikroalgenbiomasse, die jeweils den Wirtschaftszweig betreffenden gesetzlichen Regelungen zu beachten. Aufgrund der Komplexität und Variabilität soll an dieser Stelle nur auf die rechtliche Situation in Deutschland bzw. der Europäischen Union (EU) eingegangen werden. In Deutschland sind die Regelungen der legislativen Einrichtungen der EU maßgebend, auch wenn teilweise einzelne Gesetzgebungen bzw. Normlisten auf Landesebene existieren.

Die Anforderungen an die Zulassung im Lebensmittelbereich sind innerhalb der Europäischen Union im Wesentlichen an zwei Verordnungen geknüpft – einerseits die Verordnung über die Lebensmittelsicherheit – allgemeines Lebensmittelrecht – (EC 178/2002), welche hauptsächlich die Rahmenbedingungen hinsichtlich Lebensmittelrecht und Lebensmittelsicherheit im Allgemeinen adressiert, sowie die sogenannte Novel Food Verordnung No 258/97 (EG, 2002, 1997; Spiegel et al., 2013; Vigani et al., 2015). Hierbei werden konkret und im Speziellen neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten gesetzlich bewertet. Demnach müssen Produkte, welche nach dem 15. Mai 1997 neu auf dem Markt eingeführt werden sollten und sollen, nach den Kriterien der Novel Food Verordnung einzeln zugelassen werden. Da Produkte mit *Arthrospira*- und *Chlorella*-Biomasse (im Speziellen *Arthrospira platensis* und *Chlorella pyrenoidosa*), neben *Aphanizomenon flosaquae* („AFA-Alge“) und *Dunaliella salina*, bereits vor diesem Stichtag in breitem Umfang auf dem Markt verfügbar waren und zu einem signifikanten Betrag konsumiert wurden, ist eine positive Risikoabschätzung hinsichtlich gesundheitlicher Kriterien über einen jahrelangen Zeitraum verfügbar. Somit zählen diese Produkte nicht als neuartiges Lebensmittel und fallen nicht unter diese Verordnung. Hingegen fällt Phycocyanin, als Farbstoff extrahiert aus *Arthrospira*, unter die Novel Food Verordnung und zählt folglich als, in diesem Fall, neuartige Lebensmittelzutat. In Konsequenz wird von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (*European Food Safety Authority*, EFSA), welche für die Zulassungsbewertung von Lebensmitteln zuständig ist, eine detaillierte Risikobewertung verlangt, welche zeit- und kostenintensiv ist (Enzing et al., 2014). Mit Einführung der Verordnung zu nährwert- und gesundheitsbezogenen Angaben über Lebensmittel (EC 1924/2006) verlangt die EFSA, dass diese Angaben durch wissenschaftliche Nachweise gestützt werden müssen (EG, 2006). Weiterhin ist es möglich, durch den Nachweis der Gleichwertigkeit mit einem bereits gelisteten Produkt ein Notifizierungsverfahren anzustreben. Auf diesem Wege ist es in den letzten Jahren gelungen, z.B. Biomasse aus *Odontella aurita*, Astaxanthin-reiche Extrakte gewonnen aus *Haematococcus pluvialis*, beta-Carotin aus *Dunaliella salina*, DHA-reiches Öl aus *Ulkenia* sp. und *Schizochytrium* sp. sowie als Lebensmittelzutat sowohl *Tetraselmis chuii* als auch *Nannochloropsis gaditana* in Anlehnung an die Novel Food Verordnung dem Markt zugänglich zu machen (BfR, 2016a, 2016b; EFSA, 2012; EG, 2017a, 2017b).

Im Zuge der Nachfrage nach färbenden Lebensmittelinhaltsstoffen aus natürlichen Quellen wurde am 29. November 2013 eine neue EU-Leitlinie für färbende Lebensmittel verabschiedet (EC, 2013), welche an die EU-Verordnung zu Lebensmittelzusatzstoffen angelehnt ist (EG, 2008). Demnach wird bei Stoffen mit färbenden Eigenschaften zwischen der Einteilung als Farbstoff innerhalb der Lebensmittelzutaten und andererseits der Einteilung als färbendes Lebensmittel, also einem Lebensmittel mit färbenden Eigenschaften, unterschieden (Pisanello, 2014). Bei Ersterem handelt es sich um das selektiv extrahierte und somit angereicherte Produkt, das als Lebensmittelzutat im Sinne der Novel Food Verordnung zugelassen werden muss. Als Beispiel hierfür dienen beta-Carotin aus *Dunaliella salina* (EFSA, 2012) und weitere Carotinoide (z.B. Lutein, Astaxanthin etc.), allerdings nicht mikroalgenbasierten Ursprungs (Scotter, 2015). Im Falle der Phycobiline, z.B. Phycocyanin, gibt es keine Zulassung als Farbstoff (in den meisten EU Ländern). Hierbei wird die oben genannte EU-Leitlinie zu Grunde gelegt und die Einteilung als färbendes Lebensmittel verfolgt, da *Arthrospira* als Rohbiomasse nicht zulassungsbedürftig ist. Allerdings darf das Phycocyanin, wie es in der Leitlinie heißt, nicht selektiv extrahiert und angereichert werden, sondern nur als häufig sogenanntes „*Spirulina* Extrakt“ mit färbenden Eigenschaften vertrieben werden. Dennoch ist das Phycocyanin mit seinen blaufärbenden Eigenschaften hoch interessant, da bislang keine weiteren blauen Farbstoffe aus natürlichen Quellen in relevanten Mengen verfügbar sind. Die EU-Leitlinie für färbende Lebensmittel wird zur Zeit, Stand: 20.10.2019, von der Europäischen Kommission geprüft (European Commission, 2016).

Die Verwendung von Mikroalgenbiomasse im Futtermittelbereich lehnt sich auf der Rechtsebene, sowohl auf EU- als auch auf Landesebene, an den Lebensmittelsektor an und wird im Lebens- und Futtermittelgesetzbuch sowie der Futtermittelverordnung festgehalten (FuttMV, 2016; LFGB, 2016). Das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln wird nach der gleichnamigen EU-Verordnung 767/2009 geregelt (EG, 2009a) und teilt die Futtermittelarten unter anderem in Einzelfuttermittel und Futtermittelzusatzstoff. Der Einsatz von Mikroalgenbiomasse als Futtermittelzusatzstoff ist streng an Zulassungskriterien und -verfahren gebunden (EG, 2003). Die Nutzung als Einzelfuttermittel ist rechtlich gesehen mit weniger Hürden verbunden und bedarf der Aufnahme in den Katalog für Einzelfuttermittel (EU, 2013), welcher in einem Rhythmus von drei Jahren aktualisiert wird. Sollte das Produkt nicht im EU-Katalog enthalten sein, wird die Positivliste für Einzelfuttermittel zu Grunde gelegt. Diese wird vom Zentralausschuss der Deutschen Landwirtschaft veröffentlicht und erweitert den EU-Katalog im deutschen Raum (ZDL, 2014). Bei Neu-Inverkehrbringen von Einzelfuttermitteln muss dieses im Europäischen Futtermittelregister (www.feedmaterialregister.eu) veröffentlicht werden (BMEL, 2012; EG, 2009a; FEFAC, 2017). Eine Aufnahme in die oben genannte Positivliste bzw. den EU-Katalog der Einzelfuttermittel entspricht einer Zulassung für das Inverkehrbringen. Im Futtermittelsektor sind derzeit

Arthrospira und *Chlorella* auf der Positivliste verzeichnet und dürfen als Einzelfuttermittel vertrieben werden (ZDL, 2014). Mit Stand Februar 2017 sind im Futtermittelregister weiterhin Produkte aus Biomasse von *Haematococcus pluvialis*, *Euglena gracilis* sowie Algenöl aus der Gattung *Schizochytrium* eingetragen, jedoch ist noch keine Zulassung erteilt (FEFAC, 2017).

Bei der Verwendung von Mikroalgen im Kosmetikbereich besteht formal keine Zulassungspflicht. Jedoch sind im Rahmen gültiger Rechtsvorschriften, ausgehend von der EU-Kosmetikverordnung, Auflagen an kosmetische Produkte, z.B. die Sicherstellung für die sichere Verwendung für die menschliche Gesundheit, einzuhalten, (EG, 2009b). Für das Inverkehrbringen finden sich rechtliche Berührungspunkte im Lebens- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB, 2016). Aus den genannten Gründen ist im Kosmetiksektor eine deutlich größere Vielfalt an Produkten von und aus Mikroalgen verfügbar.

Eine Herausforderung bezüglich der rechtlichen Situation der Zulassung von Produkten von und aus Mikroalgenbiomasse stellt die sich teilweise verändernde Bezeichnung von Algensorten (Nomenklatur nach Linné) aufgrund neuer taxonomischer Klassifizierungen dar – vergleiche Abschnitt 2.1 (Borowitzka, 2016a).

Die Anforderungen an die Güte des Produktes stellen die Kriterien für die Konzeption des Photobioreaktorsystems dar. Hochpreisige Produkte werden vor allem in der Pharma- und Kosmetikindustrie verwendet, wo die Qualitätsstandards an das Produkt in Bezug auf Reinheit und definierter Zusammensetzung hohen Ansprüchen genügen müssen. Dementsprechend sind die Reaktorsysteme zur Produktion und Herstellung der in diesen Marktsegmenten vertriebenen Produkte in Bezug auf Sterilisierbarkeit und Steuer- und Regelbarkeit der Wachstumsbedingungen zu konzeptionieren (vgl. Abschnitt 2.3).

2.3. Grundlagen der Photobioreaktortechnologie

2.3.1. Grundkonzepte phototropher Kultivierungssysteme für die Produktion von Massenkulturen

Unter dem Begriff „Bioreaktor“ wird ein abgegrenzter Raum bzw. Apparat verstanden, in dem in Anwesenheit und unter Mitwirkung eines Biokatalysators eine Stoffumwandlung stattfindet (Chmiel, 2011b). In Anlehnung daran definiert der Begriff des „Photobioreaktors“ selbigen dadurch, dass für die Versorgung des Biokatalysators, in dem Fall Mikroalgen, Licht benötigt wird (Posten, 2011). Gleichwohl mit „abgegrenzt“ nicht „abgeschlossen“ gemeint ist, zielt der Begriff des Photobioreaktors auf einen materiell abgeschlossenen Raum ab und geht der Fragestellung nach, ob die Mikroalgenkultur von der Umgebung direkt getrennt ist (Photobioreaktor) oder nicht (Borowitzka and Moheimani, 2013; Tredici, 2004). Aus prozesstechnischer Sicht können Photobioreaktoren als 3-Phasensysteme beschrieben werden. Dabei bilden die Algenzellen die Partikel, das Medium die Flüssigphase sowie die Gasblasen die Gasphase. Zusätzlich wird das benötigte Licht als prozessimmanent betrachtet, so dass teilweise auch von 4-Phasensystemen gesprochen wird (Posten, 2011, 2009).

Grundsätzlich können die Systeme in offene und geschlossene Typen hinsichtlich ihrer baulichen bzw. materiellen Abgrenzung des Kultivierungsraumes zur Umgebung unterteilt werden. Im Sinne der technischen phototrophen Kultivierung von Mikroalgen und Cyanobakterien wird nach wie vor ein Großteil der Biomasse in sogenannten offenen Kultivierungssystemen produziert. Die einfachste Methode der Gewinnung von Mikroalgenbiomasse ist die Nutzung natürlicher Vorkommen und Kultivierungssysteme (z.B. Seen), was jedoch aufgrund begrenzter Vorkommen limitiert ist.

Im Folgenden erfolgt eine Betrachtung von Grundgeometrien phototropher Kultivierungssysteme mit dem Hauptschwerpunkt der Freilandnutzung und kommerziellen Produktion. Die technische Konzeption offener Kultivierungssysteme stammt ursprünglich aus der Abwassertechnik und unterscheidet sich im Hinblick auf die Geometrie des Kultivierungssystems selbst und die Art der Durchmischung (Borowitzka, 2005). Offene Systeme („open pond“) werden im Regelfall in der Form eines künstlichen Beckens („shallow pond“), eines sogenannten „raceway ponds“ („high-rated ponds“ – HRP) oder auch „center-pivot ponds“ gestaltet (Benemann, 2013; Borowitzka and Moheimani, 2013). Erstere Variante stellt dabei das technisch einfachste Konzept dar. Hierbei wird die Durchmischung der Mikroalgen lediglich durch auftretende Winde und konvektive Ströme herbeigeführt, ohne jedoch aktiv einen Energieeintrag zu leisten (Borowitzka, 1999). Die häufigste Bauform ist die eines künstlichen, gewundenen Kanals („raceway ponds“), in dem die aktive Umwälzung der Algenkultur mit Hilfe eines Schaufelrades bewerkstelligt werden kann (s. Abbildung 2-4).

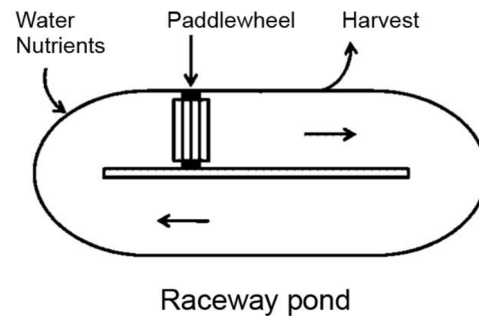


Abbildung 2-4 - konzeptionelles Basisdesign von offenen Kultivierungssystemen (hier: raceway pond) (Satyanarayana et al., 2011)

Im Gegensatz dazu kann der künstliche Kanal auch kreisförmig angelegt und mit einer um den Kreismittelpunkt rotierenden Vorrichtung zur Durchmischung ausgelegt werden („Center Pivot Pond“). Diese Kultivierungssysteme sind die weltweit ältesten und kommen vorwiegend in Asien zur *Chlorella*-Produktion zum Einsatz. Erste Entwicklungen gehen zurück auf die 1950er Jahre, als intensive Forschungsarbeiten zur Umsetzung von biologischen Anforderungen an die Massenproduktion von Mikroalgen mit Hilfe technischer Prozessentwicklungen umgesetzt wurden (Burlew, 1953). Heutige Systeme sind hinsichtlich eines effektiven strömungsmechanischen Energieeintrages vielfältig optimiert, jedoch aufgrund ihrer grundsätzlichen Konzeption als horizontales Kultivierungssystem in ihrem Lichteintrag beschränkt. Gängige Tiefen genannter Systeme sind demnach nicht größer als 20 bis 30 cm (raceway ponds) bzw. bis zu 50 cm (open ponds), so dass aufgrund vorrangig vorherrschender Lichtlimitierung Biomassedichten von 1 g l^{-1} nicht überschritten werden können (Borowitzka, 1999). Um große Kultivierungsvolumina zu erreichen, werden folglich große Grundflächen benötigt (teils mehrere Hektar). Infolgedessen sind für die Logistik jeglicher Medien (Wasser, Biomasse, Nährsalze) erhebliche Wege zurück zu legen. Aufgrund ihrer Offenheit zur Umgebung kommt es zu einem hohen Wasserverbrauch und einer damit einhergehenden Aufsalzung des Prozessmediums. Weiterhin bestehen Probleme bezüglich hoher Kontaminationsrisiken, einer ungenügenden Prozesskontrolle und einer häufig damit einhergehenden undefinierten Biomassequalität (Benemann, 2013; Pulz, 2001). Demgegenüber stehen niedrige Investitionskosten im Vergleich zu Photobioreaktoren, was die bis zum heutigen Tage nach wie vor hauptsächliche Nutzung von offenen Kultivierungssystemen erklärt (Chisti, 2016).

Grundsätzliches Designkriterium bei der Auslegung von geschlossenen Kultivierungssystemen (Photobioreaktoren) ist die optimale Lichtversorgung der Mikroalgen um ein größtmögliches und stabiles Wachstum, unter der Beachtung wirtschaftlicher Randparameter, erzielen zu können. Dementsprechend ist der konzeptionellen Ausführung sowie der Aufstellung in Bezug zur Lichtquelle (hier: Sonnenlicht) eine entscheidende Bedeutung

zuzuschreiben. Photobioreaktoren zur phototrophen Anzucht werden demzufolge hauptsächlich hinsichtlich der Geometrie und Bauform des Lichtkollektormoduls unterschieden. Typischerweise wird die verfahrenstechnische Konzeption von Photobioreaktoren als Kreislaufverfahren umgesetzt. Dabei wird das Gesamtsystem des Photobioreaktors in die Einheiten Lichtkollektor, Gasaustausch- und Mischbehälter, Pumpen- und Sensortechnik sowie weiterer Peripherie eingeteilt (Pulz et al., 2013). In Bezug auf die Geometrie und Bauform des Lichtkollektors haben sich typische Konzepte in Forschung und Entwicklung etabliert und werden teilweise kommerziell genutzt. Als konzeptionelle Basis für geschlossene Kultivierungssysteme dienen Platten- und Röhrenreaktoren, wobei sich typische Bauformen hinsichtlich ausgewählter, der in Tabelle 2-1 dargestellten, Kriterien unterscheiden lassen (Posten, 2011; Tredici, 2004).

Technisch gesehen erfolgt typischerweise der Einsatz von flächigen und tubulären Grundformen, welche in verschiedenen geometrischen Ausführungen konzipiert und, bezogen auf die Stellfläche, in der horizontalen Ebene oder in vertikaler Aufstellung genutzt werden.

Tabelle 2-1 - Typische Bauformen und Geometrieconzepte von PBR für phototrophe Freilandkultivierung (Rührkessel für heterotroph)

Bauform des Lichtkollektors	flächig		tubulär				
	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal			
Aufstellung des Lichtkollektor-Moduls bezogen auf Stellfläche							
Geometrische Ausführung	Zick-Zack-Struktur	Flat panel	serpentin-förmiger Röhrenreaktor	serpentin	zylindrisch-helikale	konisch-helikale	kreisrund
Primäre Durchmischung	gepumpt	Air-Lift	gepumpt	gepumpt			Air-Lift
Beispiele	Zick-Zack PBR ⁽¹⁾	Flat-Panel-Airlift ⁽²⁾	Aquasearch Growth Module (AGM) ⁽³⁾	Glasröhren-PBR ⁽⁴⁾	Biocoil ⁽⁵⁾	Tannenbaum-PBR (GICON-PBR) ⁽⁶⁾	„Hanging-Gardens“ ⁽⁷⁾

(1) (Jacobi et al., 2011), (2) (Graziella Chini Zittelli et al., 2013), (3) (Olaizola, 2000), (4) (Pulz, 2001), (5) (Robinson et al., 1988), (6) (Mueller-Rees et al., 2011), (7) (Koller, 2015)

Die Nutzung flächiger Grundformen für Lichtkollektoren erfolgt meist in vertikaler Aufstellung. Die Durchmischung in diesen sogenannten „Flat panel“ Photobioreaktoren beruht in aller

Regel auf dem „Air Lift“-Prinzip. Bei der Nutzung flächiger Lichtkollektoren in horizontaler Aufstellung kann durch zick-zack-Strukturen die Lichtverteilungsfläche erhöht werden.

Tubuläre Grundstrukturen für Lichtkollektoren können ebenfalls in horizontaler als auch vertikaler Konzeption erfolgen. Beispiele für tubuläre Systeme in horizontaler Orientierung sind zahlreich in der Literatur beschrieben (Del Campo et al., 2007; Molina et al., 2001; Molina Grima et al., 1994; Olaizola, 2000; Richmond et al., 1993).

Die Entwicklung vertikaler Systeme beruht auf dem Ansatz der Erhöhung der Flächenproduktivität ausgehend von einer effizienteren Lichtausnutzung. Vorteilhaft ist hier die größere Verteilungsoberfläche der Lichteintrittsflächen für das Sonnenlicht. Somit kommt es zu einer effizienteren Ausnutzung der Stellfläche. Tubuläre Systeme, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, werden prozessverfahrenstechnisch nach dem Prinzip eines Rohrreaktors betrieben. Demnach erfolgt die primäre Durchmischung in axialer Richtung meist durch den Einsatz von Pumpen. Dabei werden die Lichtkollektoren serpentina- bzw. schleifenförmig oder helikal um eine zylindrische bzw. kegelstumpfförmige Grundkonstruktion in vertikaler Achse gebildet (vgl. Darstellungen in Abbildung 2-5 entsprechend Text von links nach rechts). Die geographische Ausrichtung bezüglich der Himmelsrichtung ist bei helikalen Konzepten nicht von Bedeutung, im Gegensatz dazu muss bei serpentinaförmigen Schleifenreaktoren und Flat panel Modulen auf die Ausrichtung geachtet werden.

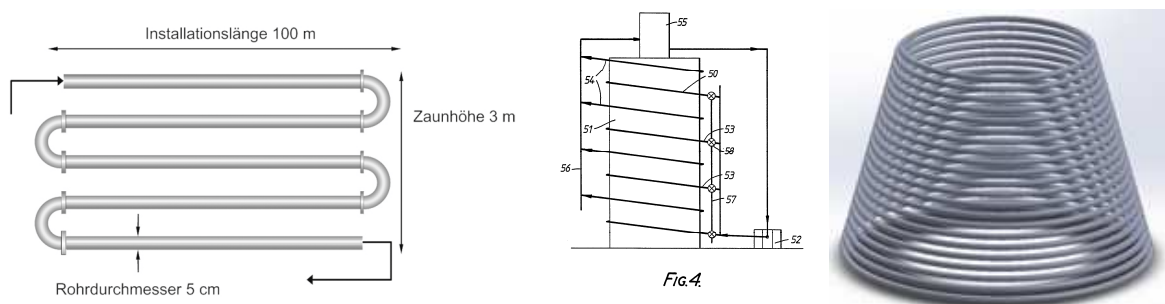


Abbildung 2-5 - Basisdesign tubulärer PBR in vertikaler Ausrichtung
links: serpentinaförmig (Posten, 2018)
mitte: helikal, zylindrisch (Robinson et al., 1988)
rechts: helikal-kegelstumpfförmig (Matthes et al., 2015)

Als Materialien kommen Glas, i.d.R. Borosilikat-Basis (Pulz et al., 2013; Tredici, 2004), oder transparente Kunststoffe wie bspw. Vinylpolymere (Polyvinylchlorid, PVC), Polyacrylate (Polymethylmethacrylat, PMMA), Polyethylen (PE) oder Silikone (Silikonkautschuk) zum Einsatz (Posten and Wilhelm, 2016; Matthes et al., 2015; Carvalho et al., 2014; Raes et al., 2014; Watanabe et al., 1995). Grundsätzliche Auswahlkriterien der einzusetzenden Materialien liegen im Bereich der chemischen Stabilität gegenüber dem flüssigen Prozessmedium (bzgl. pH-Wert, Salinität, Hydrolyseanfälligkeit) sowie der Haltbarkeit

hinsichtlich mechanischer und optischer Eigenschaften infolge thermischer und strahlungsintensiver Belastung (Carvalho et al., 2014; Tredici, 2004). Für die Konstruktion serpentinenförmiger Module werden steife Materialien, wie Glas oder auch hartes PVC (PVC-U) bzw. PMMA, eingesetzt, sodass geradlinige tubuläre Grundformen sowie definierte Kurvenelemente mit Hilfe von speziellen Kupplungsteilen zu einem Kompletmodul zusammengesetzt werden (s. Abbildung 2-5 links). Bei der Verwendung von Weich-PVC und Silikonen besteht die Möglichkeit der Herstellung von nahezu kupplungsfreien und flexiblen Lichtkollektoren durch die Nutzung geeigneter Herstellungsverfahren (z.B. Extrusion). Dadurch sind helikale Grundkonzepte umsetzbar (s. Abbildung 2-5 Mitte und rechts). Silikone allgemein heben sich aufgrund ihrer hohen Alterungsbeständigkeit, vor allen Dingen gegenüber PE, hervor (Geier et al., 2012). Weitere grundsätzliche Eigenschaften und deren Unterschiede sind in Tabelle 2-2 zusammengestellt. Lichtkollektoren mit flächigen Formen bestehen in aller Regel aus steifen Kunststoffen auf PVC- oder PMMA-Basis.

Tabelle 2-2 - Vergleich verschiedener Werkstoffe für den Einsatz von Lichtkollektoren (Kübler and Müller, 2014; Geier et al., 2012; Weißbach, 2012)

Glas	Polymere/Kunststoffe				
	Thermoplast			Elastomer	
Borosilikat	Vinylpolymere z.B. PVC		Polyacrylate z.B. PMMA	Polyethylen (PE)	Silikon
	Hart-PVC	Weich-PVC			
▪ hart/spröde	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ohne Weichmacher ▪ hart/spröde ▪ 60 °C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ mit Weichmacher ▪ flexibel/elastisch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hart/spröde ▪ hohe Festigkeit ▪ 70 °C ▪ „glasklar“ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ weich und flexibel/elastisch ▪ 80 °C/100 °C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ weich und flexibel/elastisch ▪ 200 °C

Serpentinenförmige Glasröhren für den Einsatz in Photobioreaktoren sind vom Institut für Getreideverarbeitung (IGV GmbH) erstmals im Jahre 1987 beschrieben und patentiert worden (Pulz et al., 2013). Die Verwendung von flexiblen kunststoff-basierten tubulären Systemen findet sich einerseits im sogenannten Biocoil oder auch beim Tannenbaum-Photobioreaktor (Markenname: GICON-PBR) wieder (Mueller-Rees et al., 2011; Silva and Reis, 2015). Durch den Einsatz flexibler Kunststoffe können gebogene Formen in axialer Richtung konstruiert werden. Durch die Nutzung eines silikon-basierten Kunststoffes kann das tubuläre System individuell hinsichtlich sämtlicher Geometrieparameter gestaltet werden (siehe hierzu

Abschnitt 4.4). Eine weitere Variante aus steifen Rohrverbindungen stellt das Konzept der vierseitigen Pyramide von Hinkens dar (Hinkens, 2013). Aufgrund der festen Rohre sind hier ebenso Verbindungselemente zwischen vorgefertigten gebogenen und geraden Elementen erforderlich. Lichtkollektoren, welche prinzipiell für den horizontalen Einsatz konzipiert worden, können mit Hilfe geeigneter Gerüststrukturen oder unter Zuhilfenahme geographischer Begebenheiten, in geneigter Aufstellung installiert werden und sind in Bezug zu Tabelle 2-1 als Mischform zu betrachten (Carvalho et al., 2006).

Als Gewächshausdächer bzw. -folien kommen sowohl Glas- als auch Kunststoffmaterialien unterschiedlicher Schichtdicke zum Einsatz, welche häufig Transmissionsgrade zwischen 0,8 und 0,9 aufweisen (Critten and Bailey, 2002; Kittas and Baille, 1998; Pearson et al., 1995). Hinzu kommen Reduzierungen der bestrahlten Fläche innerhalb des Gewächshauses aufgrund von Beschattungen durch Gerüststrukturen und anderen baulichen Vorrichtungen. Ebenso kommt es infolge eines erhöhten Reflexionsanteils zu einer Abschwächung der Transmission in Abhängigkeit des Sonnenstandes und folglich variierendem Einfallwinkel der Strahlung (Pollet and Pieters, 2000; von Elsner et al., 2000). Im Zusammenhang mit einer Optimierung hinsichtlich Transmission der PAR-Strahlung und Wärmetransporteigenschaften werden mit Hilfe von Kombinationen aus Einscheibensicherheitsgläsern und Argonfüllung Transmissionsgrade von 0,84 erzielt (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2015). Ältere und einfache Materialien erreichen hier lediglich Transmissionsgrade von 0,48 bis 0,6, je nach Ausführungsform (Ting and Giacomelli, 1987).

Die Darstellung der prinzipiellen Vor- und Nachteile als vergleichende Kriterien zwischen offenen und geschlossenen Kultivierungssystemen wird in der Literatur kontrovers diskutiert und ist abhängig von dem jeweiligen Einsatzfeld und den damit einhergehenden Anforderungen an das Produkt. Niedrigen Investitionskosten auf Seiten der offenen Systeme werden eine hohe und steuerbare Prozesskontrolle, eine definierte Biomassequalität und ein damit verbundenes niedriges Kontaminationsrisiko, ein vergleichsweise niedriger Wasserverbrauch sowie eine hohe Flächeneffektivität auf Seiten der geschlossenen Kultivierungssysteme gegenüber gestellt (Benemann, 2013; Borowitzka, 2005; Borowitzka and Moheimani, 2013; Carvalho et al., 2006; Del Campo et al., 2007; Posten, 2009; Pulz, 2001; Graziella Chini Zittelli et al., 2013).

Im Folgenden sollen allgemeine Leistungskennzahlen hinsichtlich technischer und biologischer Parameter definiert werden, um eine Möglichkeit zu schaffen, die verschiedenen existierenden Photobioreaktorsysteme trotz ihrer diversen Geometrien und Konzepte vergleichen zu können.

2.3.2. Prozesstechnische Zusammenhänge und Kennzahlen für die Charakterisierung von Photobioreaktoren

Wie in Abschnitt 2.3.1 ersichtlich, ist der wesentliche Baustein eines Photobioreaktors der Lichtkollektor. Dabei stellt die Hauptanforderung die Sicherstellung einer konstanten Versorgung der Algenzellen mit Lichtphotonen dar, sodass jede Zelle beim Gang durch den Lichtkollektor mit den für die Photosynthese notwendigen Photonen versorgt wird. Ausgehend davon, müssen die weiteren physiologischen Bedürfnisse der Algenzellen hinsichtlich physikalischer und chemischer Parameter beachtet werden. So sind die Nährstoffversorgung sowie die Suspensionstemperatur im physiologisch idealen Rahmen zu kontrollieren und eine Gradientenbildung dieser Parameter muss vermieden werden. Bezogen darauf müssen die in Abbildung 2-6 dargestellten Beziehungen, unter der Maßgabe des Vorhandenseins eines 3(4)-Phasen-Systems, behandelt werden.

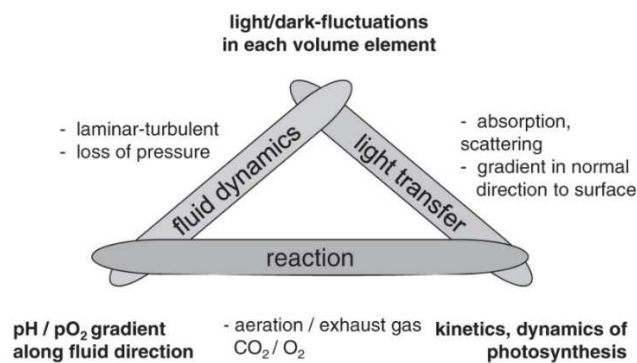


Abbildung 2-6 - Prozesstechnische Zusammenhänge bei der phototrophen Kultivierung in Photobioreaktoren (Posten, 2009)

Aufgrund der unterschiedlichen Konzepte für Lichtkollektoren müssen vergleichende Kriterien für Photobioreaktoren definiert werden, welche zunächst allgemeingültig und somit unabhängig von der konzeptionellen Auslegung zu betrachten sind. Die Bewertung der eingetragenen Lichtmenge in den Photobioreaktor ist vor allem bei der Nutzung im Freiland von entscheidender Bedeutung, da die vorherrschenden Lichtintensitäten häufig oberhalb des idealen Bereiches liegen (vgl. PI-Kurve Abbildung 2-1). Im Gegensatz zu natürlichen Habitaten, wie bspw. Seen, werden die Algen bei der technischen Nutzung in Photobioreaktoren innerhalb eines geschlossenen Systems der eintreffenden Strahlung stärker ausgesetzt und sind dementsprechend in ihren selbstregulierenden Eigenschaften beschränkt, wonach sie sich mit Hilfe metabolischer Anpassungen in unterschiedlichen Höhenschichten (Bildung von Gasvakuolen) aufhalten und somit starker Sonneneinstrahlung entgegenwirken können (Richardson et al., 1983).

Die geometrisch einfachste Form von Lichteintrittsflächen ist bei offenen Kultivierungssystemen zu verzeichnen. Die Grundfläche dient gleichzeitig dem Lichteintrag, wie es bei Seen

und bspw. open ponds der Fall ist. Hierbei fällt die komplette Lichtmenge auf die horizontal gelegene Wasseroberfläche der Algensuspension und bildet folglich die sogenannte photoaktive Fläche. Zellen an der Oberfläche werden der gesamten einfallenden Lichtintensität ausgesetzt, Zellen in größeren Tiefen gelangen in Lichtlimitierung infolge starker Gradientenbildung, was die geringe bauliche Tiefe von künstlichen Kultivierungssystemen begründet. Ein Entgegenwirken ist durch intensive Durchmischung des Kultivierungsvolumens, dem sogenannten photoaktiven Volumen, begrenzt möglich. Die Schaffung turbulenter Zonen kann mit Hilfe konstruktiver Konzepte (z.B. Strombrecher) oder hoher Strömungsgeschwindigkeiten (bis $0,3 \text{ m s}^{-1}$) erfolgen (Chisti, 2016; Borowitzka and Moheimani, 2013).

Die auf eine definierte Grundfläche einfallende Lichtmenge muss in der Theorie dahingehend verteilt werden, dass alle Algenzellen, welche sich im Lichtkollektor befinden, ihre für das Wachstum günstigste Lichtintensität erhalten (vgl. PI Kurve). Dieser Aufgabe kommen die Lichtkollektoren geschlossener Photobioreaktoren nach, mit dem Ziel, ein möglichst großes Oberflächen-Volumenverhältnis bzgl. der photoaktiven Fläche und des photoaktiven Volumens (surface-to-volume ratio, SVR) zu erreichen und folglich die Lichtintensität auf den Lichteintrittsflächen zu verteilen. Je höher dieser Wert ist, desto größer ist der Effekt der Lichtverteilung – ein entscheidendes Kriterium für die Auslegung von Lichtkollektoren (Tredici, 2004; Posten, 2009; Ogbonna and Tanaka, 2000). Verbunden damit ist die photoaktive Einheit auf einer kleinstmöglichen Grundfläche zu platzieren, mathematisch betrachtet also ein großes Verhältnis zwischen photoaktiver Fläche zu Grundfläche (Stellfläche) des Lichtkollektors (A_R/A_G) zu erreichen. Hierbei spricht man vom Effekt der „Lichtverdünnung“. Die in Tabelle 2-1 dargestellten Konzepte von Lichtkollektoren weisen hinsichtlich des SVR und A_R/A_G -Verhältnisses verschiedene grundlegende Kennzahlen auf, welche in Bezug auf die detaillierte Konzeption stark variieren. Eine hohe Lichtverteilung wird mit vertikal aufgestellten Lichtkollektoren erzielt. Die Kombination der beiden beschriebenen Verhältnisse gibt wiederum Aufschluss darüber, welches photoaktive Volumen auf eine gegebene Grundfläche platziert wird (Quotientenbildung von A_R/A_G und SVR).

SVR von offenen, horizontalen Kultivierungssystemen ist konstruktionsbedingt nur abhängig von der baulichen Tiefe und dementsprechend liegen typische Werte zwischen $2,5$ und 4 m^{-1} (Chisti, 2016; Posten, 2011). Durch die Nutzung geschlossener Systeme wird die Lichteintrittsfläche erhöht und es können rechnerisch SVR von mehr als 100 m^{-1} erreicht werden (Morweiser et al., 2010; Watanabe et al., 1995). Typische Werte für Lichtkollektoren in vertikaler Aufstellung im Freilandbereich liegen, sowohl mit Plattenreaktoren als auch mit tubulären Reaktoren, im Bereich von 40 bis 100 m^{-1} , da strömungstechnische Kriterien, bspw. Druckverlust, beachtet werden müssen (Pulz, 2001; Tredici and Zittelli, 1998).

Das durch den Lichtkollektor eingesammelte und verteilte Licht muss jeder Algenzelle gleichermaßen zur Verfügung gestellt werden. Demnach besteht bei der Konzeption der Lichtkollektoren die Herausforderung der Vermeidung von Dunkelzonen im photoaktiven Volumenelement, d.h. Bereichen wo die eintreffende Lichtintensität unterhalb des Kompensationspunktes photosynthetischen Wachstums liegt. In diesem Zusammenhang wird auch von der freien optischen Weglänge gesprochen, also dem zurückgelegten Weg der eintretenden Strahlung innerhalb der Algensuspension, bis die Lichtintensität den Kompensationspunkt unterschreitet (Richmond, 2013). Die Abnahme der Lichtintensität innerhalb der Algensuspension erfolgt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz und ist weiterhin abhängig von der Konzentration, Größenverteilung und Zusammensetzung der Zellen (Richardson et al., 1983). Konstruktiv betrachtet, handelt es sich hierbei um ein Entscheidungskriterium für die Auslegung der Dimension der Schichtdicke des photoaktiven Volumens. Zu beachten ist hierbei der physikalisch bedingte steigende Energieeintrag für die benötigte Durchmischung der Algenkultur mit kleiner werdenden Strömungsquerschnitten aufgrund des auftretenden Druckverlustes. Bei tubulären Systemen werden Durchmesser von 10 bis 20 cm als maximale Obergrenze betrachtet, bei einer allerdings dann benötigten Strömungsgeschwindigkeit von 2 m s^{-1} um eine ausreichende Lichtversorgung infolge intensiver Durchmischung gewährleisten zu können (Kroumov et al., 2013; Molina Grima et al., 2000). Je höher die konzipierte Schichtdicke des Lichtkollektors gewählt wird, desto geringer ist die Arbeitskonzentration der Algenkultur auszulegen, um eine gleichbleibende Lichtverfügbarkeit gewährleisten zu können. Bei konstanten Lichtbedingungen (hinsichtlich Intensität und Verteilung), wie sie unter Laborbedingungen verfügbar sind, kann eine optimale Zellkonzentration (optimal cell density, OCD) ermittelt werden (Richmond, 2013). Aufgrund schwankender Lichtbedingungen im Freiland, muss die Konzeption der Lichtkollektoren in Bezug auf Extremwerte, sowohl hinsichtlich Minima als auch Maxima, ausgelegt werden. In Anlehnung daran finden üblicherweise Schichtdicken für vertikale Lichtkollektoren von 10 bis 30 mm Verwendung (Pulz, 2001; Borowitzka, 1999) was bei tubulären Systemen einem Durchmesser von 20 bis 60 mm entspricht (Pulz et al., 2013; Molina Grima et al., 2000).

Bei Freilandkultivierungen muss bei den meisten Lichtkollektoren dessen Orientierung bezüglich der Himmelsrichtung beachtet werden, da im Regelfall ausschließlich die Sonne als Lichtquelle genutzt wird und dementsprechend nur sich im Strahlengang befindliche bzw. zur Sonne orientierte Flächen infolge der Direktstrahlung als Lichteintrittsflächen genutzt werden können. Aufgrund auftretender Diffusstrahlung können die nicht der Direktstrahlung ausgesetzten Flächen ebenfalls für den Lichteintritt genutzt werden. Dennoch muss bei der Bewertung der photoaktiven Fläche diese Unterscheidung beachtet werden. Besonders bei Plattenreaktoren ist die Orientierung entscheidend, aber auch bei serpentin förmigen vertikalen Systemen. Bei der Nutzung kreisrunder Grundkonzepte wird versucht, das Kriterium

der Himmelsorientierung zu überwinden und die Lichteintrittsflächen mit dem Tagesgang der Sonne zu nutzen.

Für die Betrachtung im größeren Maßstab werden eine Vielzahl von Lichtkollektoren, in der Regel gleicher Parameter, in einer Form des Up-Numbering in einer definierten Aufstellung angeordnet. In Konsequenz ergeben sich zwischen den Modulen Freiflächen, welche in die Betrachtung der Grundfläche mit einfließen müssen. Auch ist die Frage nach der Beeinflussung benachbarter Module in Form von Abschattungs- und Reflexionseffekten zu berücksichtigen. Somit sind einzelne Lichtkollektoren nicht zwangsläufig isoliert zu betrachten.

Da kein klassisches Scale-Up im dreidimensionalen Raum, aufgrund der oben beschriebenen Anforderungen an Lichteintrittsflächen (freie optische Weglänge, Schichtdicke, SVR), möglich ist, erfolgt die Erhöhung des Produktionsvolumens nach dem Grundprinzips des Numbering-Up, d.h. einer Vervielfältigung wiederkehrender Module/Lichtkollektoren (Posten, 2012).

2.3.3. Kennzahlen für die Effizienzbewertung phototrophen Wachstums in Photobioreaktoren

Die grundlegende Zielstellung von Photobioreaktoren ist die effiziente Produktion von Mikroalgenbiomasse oder deren Inhaltsstoffen. Hinsichtlich der Bewertung des Biomassewachstums ist die zeitliche Änderung der Konzentration von Algenzellen, der sogenannten Biomasseproduktivität, maßgebend. Die Konzentrationsangabe erfolgt als Zellzahl (Anzahl Algenzellen pro ml) bzw., besonders in technischer Hinsicht relevant, als Biotrockenmassekonzentration (g l^{-1}). In Bezug auf das zugehörige Arbeits-/Reaktionsvolumen wird die volumetrische Produktivität in $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ berechnet. In Kombination mit der Stellfläche kann die Produktivität auch als sogenannte Flächenproduktivität angegeben werden ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Dies ist für die Leistungsbewertung von Photobioreaktoren im Großmaßstab von Bedeutung. Als Basis dient die Grund- bzw. Stellfläche des Lichtkollektors. Bei einer Vielzahl von Lichtkollektoren stellt sich die Frage nach dem Einbezug der Fläche zwischen den einzelnen Lichtkollektoren, z.B. belegt durch die Peripherie des PBR-Systems und sonstiger Freiflächen. Die gesamte Flächenproduktivität wird als *overall areal productivity* (OAP) bezeichnet und dient der Leistungsbewertung bei der Verwendung im Großmaßstab, wenn eine Vielzahl an Lichtkollektormodulen zum Einsatz kommt und unterschiedliche PBR-Konzepte eingesetzt werden (Tredici, 2004).

Weiterhin sind Produktivitätsangaben auch bezüglich relevanter Inhaltsstoffe (z.B. Lipide) möglich.

In bioprozesstechnischer Sicht entspricht die zeitliche Änderung an Algenzellen einer Reaktionsgeschwindigkeit (r_x). Diese wird ermittelt unter Zuhilfenahme der spezifischen Wachstumsrate (μ) und der Biomassekonzentration (c_x), μ stellt hier also den

Proportionalitätsfaktor dar, und wird für unlimitiertes Wachstum nach folgender Gleichung beschrieben (Emig and Klemm, 2017; Krull et al., 2014; Chmiel, 2011a):

$$\frac{dx}{dt} = r_x = \mu * c_x \quad \text{Gl. 2-2}$$

Die Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit hinsichtlich des Substratverbrauches (r_s), also des Nährstoffverbrauches, erfolgt, unter Berücksichtigung des entsprechenden Ausbeutekoeffizienten und unlimitiertem Verbrauch, in Analogie zu Gl. 2-2, wird jedoch auf Grund konventioneller Festlegungen mit einem negativen Vorzeichen versehen (Schügerl and Sittig, 1994).

Die Produktivität beschreibt eine zeitliche Änderung. Eine weitere bioprozesstechnische Größe ist die des Ausbeute- oder Ertragskoeffizienten (Y). Hierbei werden die Reaktionsgeschwindigkeiten hinsichtlich des Zuwachses an Zellen sowie des Verbrauches an Substrat zusammengefasst und die Ausbeute bzw. der Ertrag des Biomassezuwachses in Relation zum gewählten Substrat gesetzt. Allgemein geschrieben ergibt sich Y nach Gl. 2-3 zu (Chmiel, 2011a):

$$Y_{X/S} = \frac{\text{Zuwachs an Zellen}}{\text{Verbrauch an Substrat}} = \frac{|r_x|}{|r_s|} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Daraus ableitend ergeben sich die Ausbeutekoeffizienten einzelner Nährstoffkomponenten (bspw. Stickstoff, Phosphor, Sulphat, etc.).

Bei phototrophen Wachstumsprozessen ist die Ermittlung des Biomasse-Ertragskoeffizienten hinsichtlich des aufgenommenen Sonnenlichtes von Bedeutung. Er ist definiert als die Menge an gebildeter Biomasse pro Einheit aufgenommenen Lichtes durch die Zellen (Grima et al., 1996; Pirt et al., 1980). Angepasst an Kultivierungsgefäße ergibt sich Gl. 2-4 (Pirt, 1982; Pirt et al., 1980) zu:

$$Y_{X/I} = \frac{\mu * c_x}{I_T * A_V * \varphi} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Hierbei stellen φ den PAR-Anteil des Sonnenspektrums, A_V die volumenspezifische Oberfläche (photoaktive Fläche des Photobioreaktors bzw. die bestrahlte Fläche der Algenzellen in Bezug zum Kulturvolumen) und I_T die Bestrahlungsstärke auf A_V dar. Die angegebene Beziehung besitzt Gültigkeit für Kulturen in licht-limitierter Umgebung in der exponentiellen Wachstumsphase (Borowitzka and Moheimani, 2013; Pirt, 1982), nach Abbildung 2-1 also bis zu einer Photonenflussdichte von 200 bis 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Unter der Voraussetzung der

Regelbarkeit von I_T , folglich in aller Regel bei künstlich beleuchteten Photobioreaktoren, können μ und c_x nach Gl. 2-4 so gesteuert werden, dass $Y_{X/I}$ hinsichtlich des eingetragenen Lichtes den Maximalwert annimmt (Carvalho et al., 2011). Ebenfalls daraus hervor geht die prinzipielle Anforderung an die Konzeption von Photobioreaktoren nach einem großen Oberflächenvolumenverhältnis um hohe Werte der Biomasseproduktivität erreichen zu können (Borowitzka and Moheimani, 2013).

Die Bestimmung von I_T birgt in der Praxis, im Speziellen bei der Nutzung von Photobioreaktoren unter Freilandbedingungen, große Herausforderungen bei der Bestimmung der tatsächlich aufgenommenen Lichtintensität, da sowohl Streueffekte aufgrund spezieller Reaktorgeometrien auftreten können (Grima et al., 1996), als auch Abschattungseffekte durch die Zellen selbst mit zunehmender Eindringtiefe (s. Abschnitt 2.3.2) zum Tragen kommen (Carvalho et al., 2011; Tamiya, 1957).

In wirtschaftlicher und produktionstechnischer Sicht ist die Frage nach dem Anteil, welcher aus der aufgenommenen Solarenergie tatsächlich in chemische Energie, also in Biomasse, umgewandelt werden kann, von großem Interesse. Hierzu wird das Verhältnis aus der gebildeten Biomasse, Angabe erfolgt als volumetrische Biomasseproduktivität r_x , kombiniert mit deren Brennwert H_x (gleichbedeutend mit der Verbrennungsenthalpie der Biomasse), und der zur Bildung dieser Biomasse aufgenommenen Solarstrahlung je Kultivierungsvolumen (V) ermittelt (Hall et al., 2003):

$$PCE_{SOL/PAR} = \frac{r_x * H_x}{\frac{I_{SOL/PAR}}{V}} \quad \text{Gl. 2-5}$$

, mit SOL (gesamtes solares Spektrum)

PAR (PAR-Spektrum 400 bis 700 nm)

Die Angabe der sogenannten Photokonversionseffizienz (engl.: photoconversion efficiency, PCE) erfolgt entweder in Bezug auf das gesamte solare Spektrum (PCE_{SOL}) oder bezüglich PAR (PCE_{PAR}). Das theoretische Maximum für PCE_{SOL} innerhalb physiko-chemischer Grenzen liegt zwischen 9 und 13 % (Bolton and Hall, 1991; Hall and Rao, 1999; Melis, 2009; Parlevliet and Moheimani, 2014; Posten, 2009). Die verschiedenen Werte ergeben sich z.B. durch Unterschiede bei der Messung benötigter Photonen bei den Photosynthesereaktionen (z.B. 8 Photonen bei Bolton und Hall bzw. 9,5 Photonen bei Melis zur Umwandlung von 1 mol CO_2) oder auch durch unterschiedliche, teils artspezifische, zelluläre metabolische Aktivitäten bei nicht-photochemischen Prozessen. Ein Großteil der aufgenommenen Solarenergie wird als Wärme freigesetzt. Hierbei handelt es sich um den Prozess des „Nicht-Photochemischen Quenchings“ der photosynthetisch aktiven Mikroorganismen, beschrieben in Abschnitt 2.1, um die prozessrelevanten Vorgänge nicht zu schädigen (Bolton and Hall, 1991; Melis, 2009). In

der Praxis erreichte PCE liegen deutlich unterhalb der theoretisch machbaren Effizienz. Vor allem die nicht ideale Lichtversorgung der Mikroalgen in größeren Photobioreaktoren trägt dazu bei, dass Werte von lediglich 4,5 bis 5 % erreichbar sind (Posten, 2009; Walker, 2009).

2.3.4. Erarbeitung wesentlicher Einflussparameter auf die Mikroalgenkultivierung (Biomasseproduktion und Stabilität der Kultivierung)

Die Möglichkeiten der Beeinflussung der wesentlichen Wachstumsparameter bei der Mikroalgenkultivierung im Freiland ergeben sich einerseits aus der Konzeption des Photobioreaktors selbst und im Weiteren aus der Verfahrensweise der Kultivierung. Ersteres betrifft hauptsächlich die Strahlungsintensität aufgrund des Lichteintrages und die damit eng verbundene Suspensionstemperatur und Temperierung der Kulturlösung. Da die Nutzung des Sonnenlichtes einen unkontrollierbaren Faktor darstellt, ergibt sich daraus die entscheidende Grundvoraussetzung, dass alle weiteren Wachstumsparameter so gewählt werden sollten, dass das Licht der einzig limitierende Faktor ist. Dementsprechend müssen alle benötigten Nährstoffkomponenten im leichten Überschuss zur Verfügung gestellt werden, um die unter den gegebenen Bedingungen maximale Effizienz der Photosynthese erreichen und somit einen effektiven Biomasseertrag gewährleisten zu können (Becker, 1994).

Unabhängig von der PBR-Technologie ist bei allen phototrophen Prozessen der Lichteintrag und die Lichtverfügbarkeit die Hauptanforderung hinsichtlich der Versorgung der Algenzellen (Pulz, 2001). Der damit verbundene Wärmeeintrag ist vor allen Dingen bei geschlossenen Systemen von Photobioreaktoren kritisch zu betrachten, so dass in aller Regel überschüssige Wärme aktiv aus dem System entfernt werden muss. Durch intensive Strahlungsintensitäten kann sich die Temperatur der Kulturlösung in geschlossenen Lichtkollektoren rapide erhöhen. Die letale Temperatur der meisten Mikroalgen liegt nur geringfügig oberhalb der optimalen Wachstumstemperatur, so dass ein Einhalten der Temperaturgrenzen einen kritischen Faktor darstellt (Bernard and Rémond, 2012; Butterwick et al., 2005). Ein Überschreiten von 2 bis 4 Grad kann zum Totalverlust der Algenkultur führen (Mata et al., 2010).

Die bei geschlossenen Photobioreaktoren in Freilandaufstellung zur Anwendung kommenden Systeme zur Temperierung der Algenkulturlösung beinhalten häufig Nutzungskonzepte zur Verdunstungskühlung (Cheng-Wu et al., 2001; Richmond et al., 1993), den Einsatz von Wärmetauschern (Sierra et al., 2008; Chisti, 2007) oder auch das Eintauchen bzw. Umspülen des gesamten Reaktorsystems (oder Teile davon) in bzw. mit Kühlwasser (Olaizola, 2000; Quinn et al., 2012a, 2012b) oder eine Kombination aus diesen (Tredici and Rodolfi, 2004). Die Nutzung des Prinzips der Verdunstungskälte ist häufig die einzige Möglichkeit von offenen Kultivierungssystemen die Wassertemperatur zu regulieren. Hierbei tritt eine Verdunstung des eigentlichen Prozesswassers auf, so dass es zu einer Aufkonzentrierung der Nährsalze kommt, insofern nicht stetig dem Wasserverlust durch Wiederauffüllen entgegengewirkt wird.

Je nach Differenz zur Umgebungstemperatur kommt es folglich zu einem erheblichen Verbrauch an Wasserressourcen. Die Nutzung der Verdunstungskühlung stellt auch bei geschlossenen Systemen in Freilandaufstellung für Massenkulturen den hauptsächlich genutzten Stand der Technik dar. Das Prinzip erfolgt in der Regel durch ein Aufsprühen von Kühlmedium (meist Wasser) auf die Lichteintrittsflächen. Dadurch ist eine hohe logistische Infrastruktur an Kühlleitungen vonnöten. Um eine Reduzierung der Transparenz der Lichteintrittsflächen durch Verkalken zu verhindern, muss das Kühlwasser entsalzt werden, was wiederum kostenintensiv ist (Davis et al., 2011). Alternativ können die Lichteintrittsflächen kontinuierlich durch mechanisches Reinigen händisch vom Kalk befreit werden. Allerdings ist das bei großtechnischen Produktionsanlagen nur schwer bis nicht ausreichend umsetzbar. Beide Varianten stellen sehr kosten- und arbeitsintensive Schritte dar. Auch geht das Kühlwasser durch Verdunstung in die Atmosphäre verloren, so dass auch bei der Nutzung dieser Methode ein hoher Bedarf an Wasser besteht. In klimatischen Zonen mit hoher Luftfeuchtigkeit funktioniert dieses Prinzip aus physikalischer Sicht nicht.

Um einen erhöhten Wasserbedarf zur Temperaturregulierung zu vermeiden, ist die Verwendung von geschlossenen Kreislaufsystemen wünschenswert. Unterschiedliche Konzepte von Wärmetauschern werden entweder in externen Systemen angewandt (z.B. integriert in Misch- oder Entgasungsbehältern) oder direkt in die Lichtkollektoreinheit integriert (z.B. Doppelmantelschlauch des Tannenbaum-Photobioreaktors oder Kühlrippen in Plattensystemen). Bei der Nutzung interner Systeme sind große Wärmeaustauschflächen zwischen dem Temperiermedium und der Kulturlösung möglich, sodass hohe Wärmeübergänge realisiert werden können. Die Konzipierung kann bspw. durch ein Verlegen von geschlungenen Kühlrohren innerhalb des Lichtkollektors bei Plattenreaktoren (s. Abbildung 2-7 links) erfolgen. Problematisch kann hier die Gestaltung des Wärmetransportes für eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Kultursuspension sein. Auch stellen die Kühlrohre innerhalb des photoaktiven Volumens ein Risiko für Biofouling dar. Bei tubulären Systemen von Lichtkollektoren können die Kühlschläuche in axialer Richtung im photoaktiven Volumen konzipiert werden. Bei optimaler Dimensionierung können die Dunkelphasen minimiert und effektive Wärmeaustauschflächen erzeugt werden. Dieses Doppelschlauchsystem ist in Abbildung 2-7, rechts, dargestellt.

Aufgrund der photoautotrophen Kultivierungsmethode wird Kohlendioxid (CO_2) als anorganische C-Quelle in die Kulturlösung eingetragen. Dadurch kommt es zu einem pH-Wert-abhängigen dynamischen Gleichgewichtsverhalten (vgl. Abbildung 2-8).

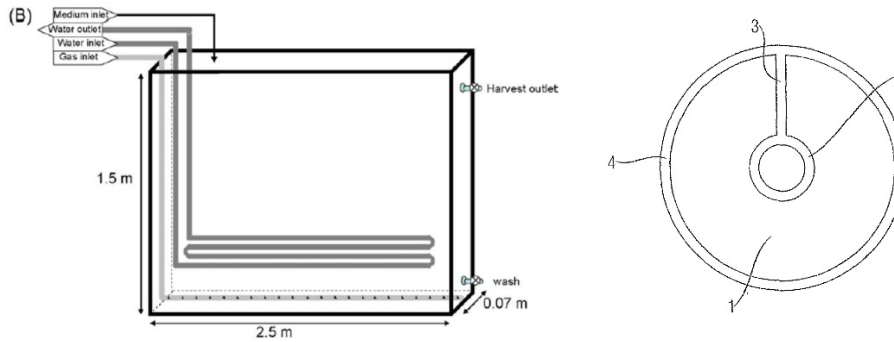


Abbildung 2-7 – Darstellung von, in die Lichtkollektoren, integrierte Kühleinheiten

links: Kühlrippen (Sierra et al., 2008)

rechts: Doppelkammersystem eines tubulären Lichtkollektors – (1) Suspensionskammer, (2) Temperierschlauch, (3) Steg, (4) Außenschlauch (Mueller-Rees et al., 2011)

In einem Bereich zwischen pH-Wert 7 und 8 sind vorwiegend CO_2 und HCO_3^- in der wässrigen Phase gelöst und stehen den Algenzellen zur Verfügung. Beide C-Quellen stellen für die meisten phototroph metabolisierenden Mikroalgen keine Probleme dar. Ab einem pH-Wert größer 8 liegt der anorganische Kohlenstoff mit steigendem pH-Wert zu größer werdenden Anteilen in Form von Carbonat-Ionen vor (CO_3^{2-}). Diese Form ist nicht von allen Mikroalgen zu verstoffwechseln.

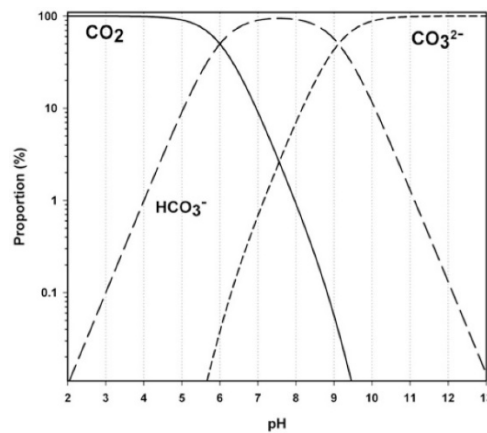


Abbildung 2-8 - Löslichkeitsverhalten von CO_2 in Abhängigkeit vom pH-Wert (Borowitzka, 2016b)

Prozessbedingt kommt es bei der Photosynthese zur Bildung von molekularem Sauerstoff (vgl. Gl. 2-1). Bei einem Überschreiten der jeweiligen Sättigungskonzentrationen von sowohl CO_2 und O_2 kommt es zu einem Flüssigkeits-Gas-Gemisch innerhalb der Kulturlösung. Das Löslichkeitsverhalten beider Gase ist stark temperaturabhängig, dass von CO_2 zusätzlich stark abhängig vom pH-Wert. Insofern ist eine Entgasung erforderlich. In Bezug zu tubulären Systemen von Lichtkollektoren ist der Abtransport der Gasphase auch aus strömungstechnischer Sicht von Bedeutung. Durch Ansammlung von Gasphasen kann es infolge von Blasenbildung zu einem Abreißen der Flüssigkeitsschicht kommen, was wiederum zu höheren Druckverlusten führt. Durch Zuhilfenahme von Gasaustausch- und Mischbehältern können

prozessimmanent entstandene Gase entweichen. Der während der Photosynthese gebildete Sauerstoff kann ab Konzentrationen größer 400 % der Luftsättigung inhibierend auf das Wachstum der Algen wirken, somit sind Systeme zur Entgasung bei der Konzeption von Photobioreaktoren zu beachten (Kumar et al., 2015; Tredici, 2004; Molina et al., 2001; Pulz, 2001). In diesem Zusammenhang sind Längen tubulärer Systeme von mehr als 100 m ohne Entgasung möglich (Rubio et al., 1999). Systeme zur Entgasung mit dem Ziel photosynthetisch gebildeten Sauerstoff entweichen zu lassen führen unweigerlich auch zu einem Verlust an noch in der Prozesslösung enthaltenem CO_2 , was die Ausbeute verringert. Die wachstumshemmende bzw. -inhibierende Wirkung überschüssigen Sauerstoffes ist umstritten (Pulz et al., 2013).

Ein weiterer kritischer Einflussparameter ist die Sicherstellung der Nährstoffversorgung. In Anlehnung an das Redfield-Verhältnis bzw. an die elementare Zusammensetzung der spezifischen Mikroalgenkultur (siehe Abschnitt 2.1) ist die Notwendigkeit und das Verhältnis der jeweiligen Nährstoffe zu ermitteln. Bei der Zugabe von Nährsalzen zum Prozessmedium ist es erforderlich die Verfügbarkeit der einzelnen Nährstoffkomponenten hinsichtlich ihrer metabolen Eignung für die Mikroalgenkultur zu beachten. Für die Versorgung mit Stickstoff stehen Nitrat- (NO_3^-), Nitrit- (NO_2^-) und Ammonium- (NH_4^+) haltige Verbindungen für die meisten Mikroalgen zur Verfügung (Raven and Giordano, 2016). Die Versorgung mit Phosphor erfolgt in der Regel mit phosphathaltigen Verbindungen und stellt langfristig einen bekannten kritischen Engpass dar, da es, im Gegensatz zu alternativen Bereitstellungsmethoden für Stickstoff (z.B. Haber-Bosch-Verfahren), keine alternative Herstellungsmöglichkeit gegenüber der Nutzung endlicher natürlicher Vorkommen gibt, wo es meist aus gesteinhaltigen Schichten gewaschen werden muss (Dyhrman, 2016). Die Versorgung mit Schwefel erfolgt mittels Sulphatverbindungen (Giordano and Prioretti, 2016). Eine Verarmung an Nährstoffen in der Kulturlösung muss zu jeder Zeit verhindert werden, so dass im Regelfall automatisierte Dosiersysteme zum Einsatz kommen um der Nährstoffzehrung kontinuierlich entgegenwirken zu können (Posten and Wilhelm, 2016).

Um ein Sedimentieren von Algenzellen zu verhindern und eine radiale Durchmischung sicherstellen zu können, müssen turbulente Strömungsverhältnisse innerhalb des Lichtkollektors erzeugt werden. Eine homogene Verteilung und effektive Durchmischung der Kultursuspension wird bei Reynoldszahlen oberhalb von 3000 ermöglicht (Acién Fernández et al., 2012). Bei einem Rohrdurchmesser von 30 mm entspricht das einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. $0,1 \text{ m s}^{-1}$. Üblicherweise werden Strömungsgeschwindigkeiten von $0,2$ bis $0,5 \text{ m s}^{-1}$ bei Durchmessern von 20 bis 60 mm eingesetzt, somit sollen Biomasseablagerungen an den Wänden verhindert sowie eine effektive Lichtverfügbarkeit der Zellen gewährleistet werden (Posten and Wilhelm, 2016; Pulz et al., 2013; Molina Grima et al., 2000).

2.4. Solare Strahlung

2.4.1. Solare Strahlung im elektromagnetischen Spektrum

Die wissenschaftliche Beschreibung solarer Strahlung erfordert die Zuhilfenahme zweier Modelle – einerseits werden hierfür die Welleneigenschaften der Strahlung als Transversalwelle herangezogen, welche die Entstehung und Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen (Wellenmodell) erklären. Das Verständnis der Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen geht zurück auf die Huygenssche Wellentheorie von 1690, welche durch später beschriebene Arbeiten von bspw. Fresnel und Maxwell erweitert wurden (Pedrotti et al., 2005).

Andererseits kann solare Strahlung als ein Strom von Teilchen (Photonen) verstanden werden, welche die Grundlage für das Quantenmodell bilden. Dieses besagt, dass ein Quant (hier als Photon) die kleinste unteilbare Energieportion der Strahlung und die Energie eines Quants („Lichtquant“) indirekt proportional zu dessen Wellenlänge ist. Es ergibt sich die Energie eines Strahlungsquants zu

$$E_Q = h_{PQ} * f_Q = \frac{h_{PQ} * c}{\lambda_Q} \quad \text{mit: } h_{PQ} = 6,626069 * 10^{-34} \text{ J * s} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Hierbei ist h_{PQ} das Planck'sche Wirkungsquantum. Aus Gl. 2-6 geht hervor, dass jedes Photon in Abhängigkeit zu dessen Wellenlänge eine definierte Energie besitzt. Das Solarspektrum entspricht also einem Photonengemisch (Zahoransky, 2009).

Je nach Anwendungsfeld stehen beide Theorien nebeneinander zur Verfügung und man spricht vom Welle-Teilchen-Dualismus, welcher besagt, dass Strahlung sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter besitzt.

Das Wellenmodell ist für das Verständnis des Strahlungsverhaltens, also der Reflexions- und Transmissionseigenschaften, das Photonen- bzw. Teilchenmodell wiederum für die Beschreibung des Energiecharakters maßgebend (Tipler and Mosca, 2015). Die Ausbreitung von Lichtstrahlen erfolgt demnach als Welle, Emissions- und Absorptionseffekte erfolgen als Photonen (Harten, 2014).

Für intensivere Studien zu den jeweiligen Theorien sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (Dobrinski et al., 2010; Harten, 2014; Hering et al., 2012; Lindner, 2001; Pedrotti et al., 2005; Tipler and Mosca, 2015).

Um die Strahlungsenergie des kompletten Spektrums der Sonne abbilden zu können, muss die Energie der jeweiligen Photonen definierter Wellenlängen zusammengefasst werden. Dabei wird die Energie, man spricht auch von Intensität, von Photonen definierter Wellenlänge aufsummiert (Harten, 2014; Zahoransky, 2009).

Der flächenbezogene Strahlungsfluss (Strahlungsflussdichte) wird auch als Bestrahlungsstärke (engl.: irradiance) bezeichnet und gibt die Summe der Menge an Photonen definierter Wellenlänge pro Zeiteinheit an, die eine definierte Fläche treffen. Die Angabe der Bestrahlungsstärke erfolgt in der physikalischen Einheit Watt pro Quadratmeter (W m^{-2}).

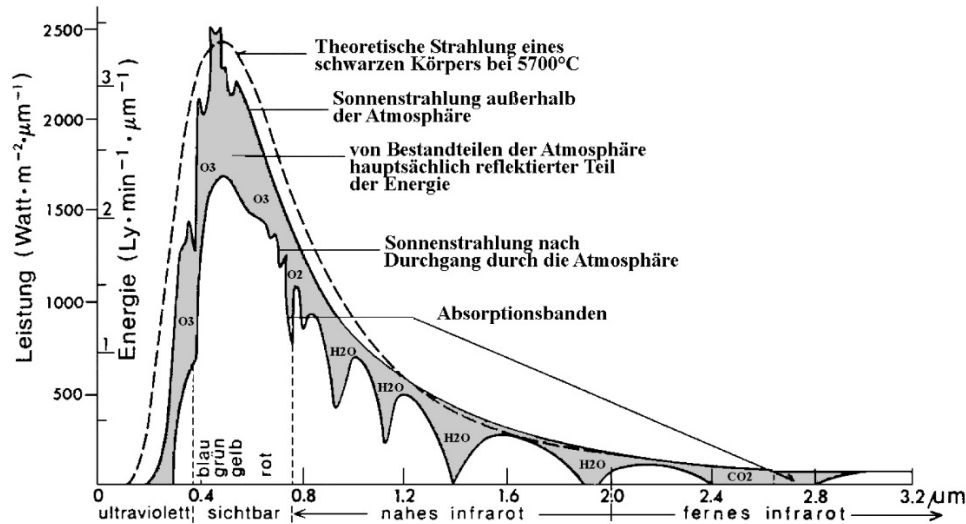


Abbildung 2-9 - Extraterrestrisches und terrestrisches Spektrum der elektromagnetischen Strahlungsleistung der Sonne (Fistic, 2004)

2.4.2. Globalstrahlung

Die im Jahresdurchschnitt senkrecht auf eine gedachte, außerhalb der Erdatmosphäre liegende, Ebene treffende Strahlungsintensität beträgt 1367 W m^{-2} (auch bekannt als Solarkonstante; hier I_s). Dieser experimentell ermittelte Wert stellt den Summenparameter über den gesamten Wellenlängenbereich dar. Eine Aufschlüsselung und Typisierung der Spektralbereiche liefert Tabelle 2-3. Unterhalb von 380 nm, also im ultravioletten (UV) Bereich, liegen 6,4 % der Gesamtintensität vor, der Anteil im sichtbaren Bereich (VIS) und im infraroten (IR) Bereich ist nahezu gleichverteilt bei 48 bzw. 45,6 %.

Tabelle 2-3 - Aufteilung des extraterrestrischen elektromagnetischen Strahlungsspektrums (Duffie and Beckman, 2013; Eicker, 2012)

	Spektralbereich	Prozentualer Anteil	Energetischer Anteil
	[nm]	[%]	[W m^{-2}]
UV	0 - 380	6,4	87
VIS	380 - 780	48,0	656
IR	780 - ∞	45,6	623

Die in Tabelle 2-3 aufgezeigten Werte und die Solarkonstante als Summenparameter stellen die solare Einstrahlung außerhalb der Atmosphäre und senkrecht zur Strahlungsrichtung dar. In Abhängigkeit der Position zur Sonne ergibt sich, in Bezug auf einen Beobachterpunkt, ein

definierter Einfallswinkel (Zenitwinkel) zwischen der Normalenebene und der Beobachter-Ebene (Horizontalebene), um den sich die einfallende elektromagnetische Strahlung durch das Lambert'sche Gesetz (auch Kosinus-Effekt genannt) verringert (s. Abbildung 2-10). Somit ergibt sich eine Strahlungsintensität ($I_{S,h}$), welche in Abhängigkeit des Zenitwinkels (ζ) verringert wird bzw. maximal den Wert der Solarkonstanten annimmt:

$$I_{S,h} = I_S * \cos \zeta$$

Gl. 2-7

Ausgehend vom extraterrestrischen Strahlungsspektrum, welches dem Strahlungsverhalten eines schwarzen Körpers ähnelt, werden beim Gang durch die Atmosphäre bestimmte Wellenlängenbereiche abgeschwächt, d.h. reflektiert bzw. absorbiert und gestreut. Gasmoleküle wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon, Methan und Stickoxide aber auch Aerosole absorbieren und emittieren elektromagnetische Strahlung wellenlängenspezifisch.

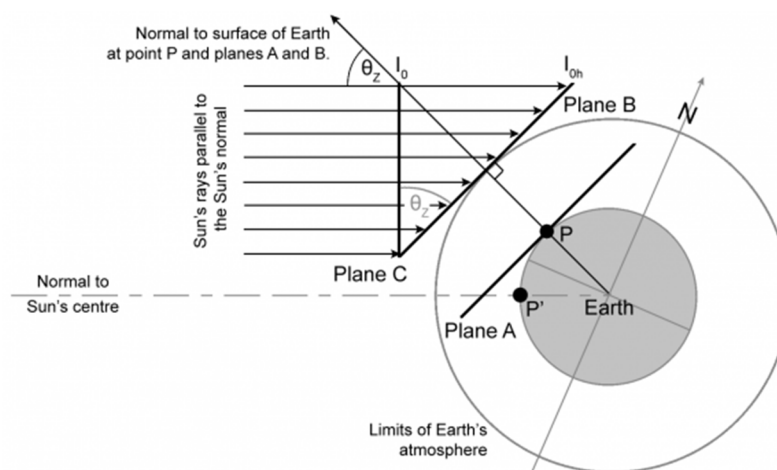


Abbildung 2-10 -Verhalten extraterrestrischer elektromagnetischer Strahlung und Kosinus-Effekt

(<http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-2-solar-energy-reaching-the-earths-surface/>)

Durch selektive Absorption (z.B. UV-Strahlung durch Ozon) und diffuser Reflexion an Gasen, Aerosolen und Wolken bzw. Dunst kommt es zu einer Veränderung der spektralen Strahlungsverteilung (Kappas, 2009). Diffuse Reflexionsprozesse sind in ihrer Art und Stärke von der Größe der jeweils beteiligten Partikel abhängig. Demnach wird zwischen sogenannter Rayleigh-Streuung an Partikeln mit geringerer Größe (z.B. Luftmoleküle) und Mie-Streuung an größeren Partikeln (z.B. Aerosol), jeweils in Bezug zur Wellenlänge des Lichtes, unterschieden (Duffie and Beckman, 2013; Kappas, 2009).

Um vergleichende Einstrahlungsspektren angeben zu können, wurde die dimensionslose Größe der Luftmasse (Air Mass – AM) eingeführt, welche die Länge des Strahlenganges durch die Atmosphäre in Bezug auf den senkrechten (also kürzesten) Weg angibt (vgl. Abbildung 2-11). Dabei stellt AM0 die Aufnahme des Spektrums als Basiswert außerhalb der Atmosphäre

dar, AM1 wiederum die Aufnahme an der Erdoberfläche senkrecht zur Sonneneinstrahlung. In Abbildung 2-9 ist, neben der extraterrestrischen Einstrahlung (AM0), die spektrale Verteilung einer terrestrischen Einstrahlung bei einer Luftmasse von 1,5 dargestellt, was einem Zenitwinkel von 48,2 Grad entspricht und besagt, dass die Sonnenstrahlung die 1,5-fache Weglänge in Bezug zu AM1 durch die Erdatmosphäre zurücklegen muss. Dieser Wert ist für Zentraleuropa festgelegt und findet vor allem im Bereich der solaren Energietechnik Anwendung (Eicker, 2012; Zahoransky, 2009). Auch für die Berechnung von AM wird das Lambertsche Gesetz angewandt, jedoch mit dem Reziproken in Anlehnung an Gl. 2-7.

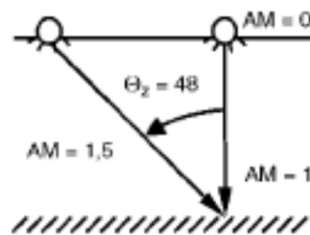


Abbildung 2-11 -Darstellung verschiedener Weglängen der Einstrahlung durch die Atmosphäre (nach Zahoransky, 2009))

Die einfallende Sonnenstrahlung (Globalstrahlung) wird in ihrer Intensität neben den oben genannten atmosphärischen Beeinträchtigungen (Gasmoleküle) auch durch Wettererscheinungen wie Nebel und Wolken beeinflusst. In Abbildung 2-12 ist das Strahlungsverhalten sowie die zahlenmäßige Beeinträchtigung der Intensität der eintreffenden Sonnenstrahlen beim Durchtreten der Atmosphäre dargestellt. Unterschiedliche Zusammensetzungen der Atmosphäre sowie Wetterbedingungen führen zu teilweise stark schwankenden und nicht unmittelbar vorhersehbaren Beeinträchtigungen der auf die Erdoberfläche treffenden Globalstrahlung (33 bis 83 % der extraterrestrischen Strahlung, vgl. Abbildung 2-12).

Anhand der verschiedenen Strahlengänge wird die Globalstrahlung in Direktstrahlung und Diffusstrahlung unterteilt. Die Direktstrahlung beinhaltet dabei jegliche solare Strahlung, welche ungehindert an der Erdoberfläche auftrifft. Als Diffusstrahlung, meist auch Himmelsstrahlung, wird der Anteil betrachtet, welcher anhand oben genannter Effekte über indirekten Wegen, also ungerichtet, auf die Erdoberfläche trifft.

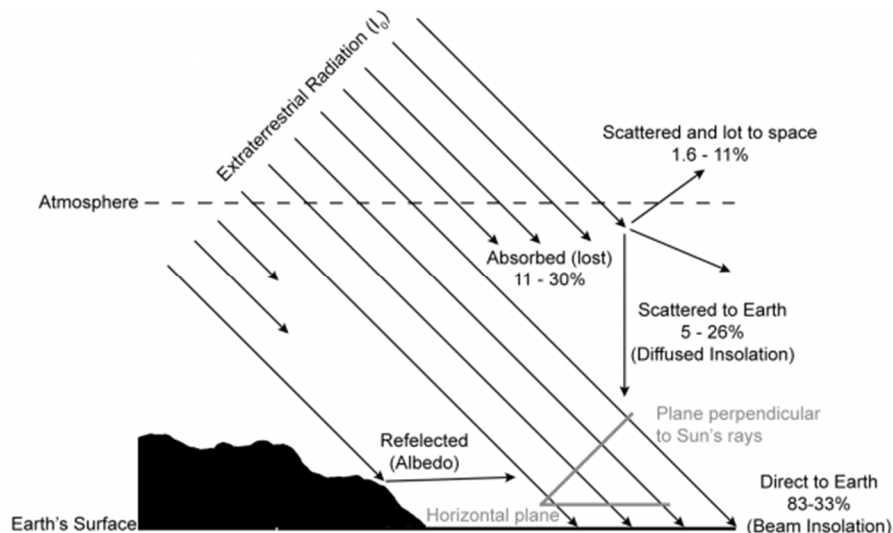


Abbildung 2-12 -Strahlungsverhalten nach dem Eintreten in die Atmosphäre bis zur Erdoberfläche

(<http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-2-solar-energy-reaching-the-earths-surface/>)

In Anbetracht der Bezugsfläche wird die Globalstrahlung auf die Erdoberfläche, oder Horizontalebene, bezogen (engl.: Global Horizontal Irradiance, GHI), die Direktstrahlung im Regelfall auf die Normalebene bzgl. des Sonnenstandes (engl.: Direct Normal Irradiance, DNI) und die Diffusstrahlung ebenfalls auf die Horizontalebene (engl.: Diffuse Horizontal Irradiance, DHI). In Anlehnung an Abbildung 2-10 ergibt sich Gl. 2-8:

$$GHI = DNI + DHI * \cos \zeta + RG \quad \text{Gl. 2-8}$$

Ebenfalls einen Beitrag zur Globalstrahlung trägt der vom Boden reflektierte Anteil (RG) bei. Dieser wird jedoch in einigen praktischen Anwendungen, in Bezug zur Messung horizontal zur Erdoberfläche, vernachlässigt. Die Globalstrahlung ($W \text{ m}^{-2}$) wird üblicherweise als Summenparameter über eine definierte Zeitspanne angegeben (z.B. $kWh \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Die Messung erfolgt mittels eines Pyranometers mit dessen Hilfe die gesamte GHI erfasst wird.

Die Strahlungsdaten werden weltweit aufgezeichnet und stehen für Deutschland und Europa zum Beispiel beim Deutschen Wetterdienst (Climate Data Center) und dem CM SAF (Satellite Application Facility on Climate Monitoring; <http://www.cmsaf.eu>) sowie weltweit vor allem in der Klimadatenbank des Atmospheric Science Data Center der NASA (Stackhouse Jr., 2017) zur Verfügung.

In Abbildung 2-13 sind die jährlichen Durchschnittswerte der Globalstrahlung weltweit über einen Zeitraum von 22 Jahren (Juli 1985 bis Juni 2005) dargestellt. In farbigen Abstufungen von Rot nach Gelb nimmt die eintreffende Globalstrahlung von den beiden Polen hin zum Äquator zu. Innerhalb des Messzeitraumes wurden auf der Erde maximal $6,98 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (entspricht 291 W m^{-2}) und minimal $1,51 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (entspricht 63 W m^{-2}), bezogen auf

durchschnittliche Tagessummen pro Jahr, gemessen. Mit diesen Daten kann gezielt abgeschätzt werden, wie hoch das Strahlungsangebot an einem beliebigen Standort weltweit zu erwarten ist. Ohne den Einfluss der Erdatmosphäre und geographischer Gegebenheiten würde die Verteilung des Strahlungsangebotes linear zu den geografischen Breitengraden verlaufen. Aufgrund der Atmosphärenbeschaffenheit, des Weltklimas, regionaler Wettererscheinungen und geographischer Besonderheiten wird das Strahlungsangebot auf die Erdoberfläche vor allem bzgl. des diffusen Anteils beeinflusst (Kappas, 2009). Dadurch entstehen Verteilungsmuster wie in Abbildung 2-13 dargestellt. Die Maximalwerte des monatlichen Mittels der Globalstrahlung treten im Bereich der Wendekreise des 23. Breitengrades der nördlichen und südlichen Erdhalbkugel, jeweils über Landfläche, auf und betragen teilweise mehr als 300 W m^{-2} bis zu 340 W m^{-2} – Südafrika, Chile, Australien, asiatisches Hochland (Duffie and Beckman, 2013; Kappas, 2009).

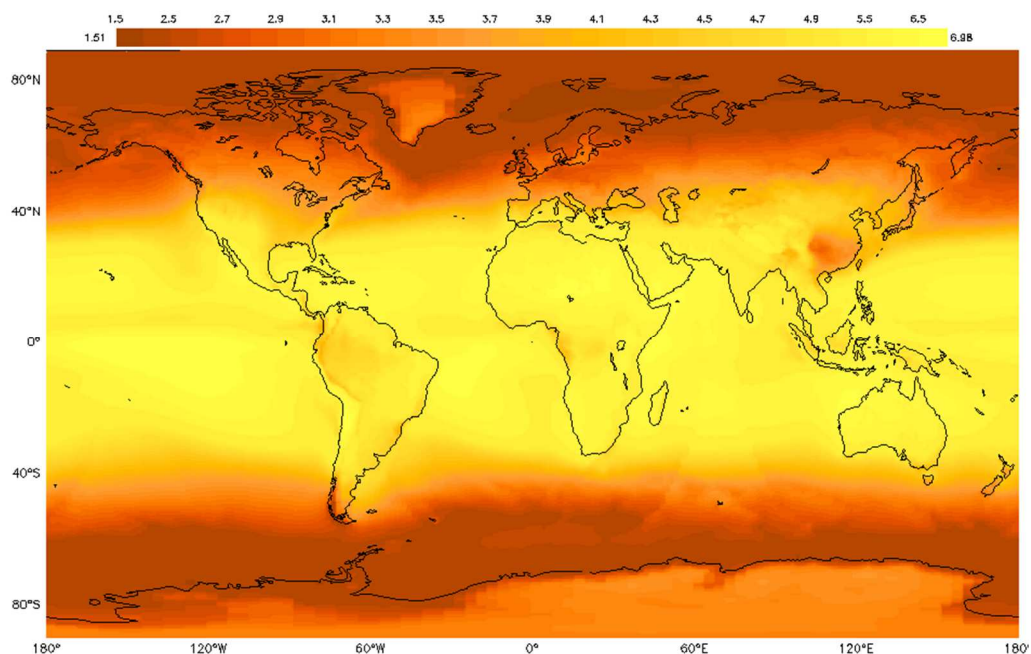


Abbildung 2-13 -Annual Climatology Global Horizontal Radiation (SSE Release 6) ($\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$) Juli 1983 – Juni 2005 (www.mynasadata.com)

Bei den in Abbildung 2-13 aufgetragenen Werten zur Globalstrahlung handelt es sich um Jahresmittelwerte in Abhängigkeit von geographischer Länge und Breite. Eine monatliche Aufschlüsselung des Strahlungseintrages ist für die Bewertung des Jahresganges notwendig. Dabei führt eine Berechnung der Mittelwerte der Globalstrahlung aller Längengrade von -180 bis $+179$ Grad pro jeweiligen Breitengrad zu einer Eliminierung der Beziehung zur geographischen Länge und führt zu einer Begutachtung des Strahlungseintrages weltweit in Abhängigkeit der geographischen Breite (Abbildung 2-14). Der linke Konturplot zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der mittleren monatlichen Globalstrahlung in Abhängigkeit des Breitengrades in $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$. In einer Zone zwischen ca. 20 Grad nördlicher und südlicher

Breite entlang des Deklinationswinkels der Sonne entsteht ein jahreszeitlich gleichmäßig hohes Niveau der Strahlungsintensität oberhalb von $5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (grüne bis gelbe Bereiche in Abbildung 2-14, links). Höhere einzelne monatliche Strahlungsniveaus werden nur an den jeweiligen Polen im Juni in der Nordpolarregion und insbesondere im Dezember und Januar in der Antarktis südlich von 80 Grad südlicher Breite erreicht. Aufgrund von verschwindend geringen Gehalten an Wasserdampf, in Folge niedriger Temperaturen und geringer Anteile an Staubpartikeln in der Atmosphäre, kommt es in diesen Regionen in den benannten Zeiträumen zu starken Direktstrahlungen (Liljequist and Cehak, 1983).

Bezogen auf einen konstanten Breitengrad stellt die Äquatorregion die Zone mit einer gleichmäßigen jährlichen Verteilung der Globalstrahlung dar (s. Abbildung 2-14, rechts).

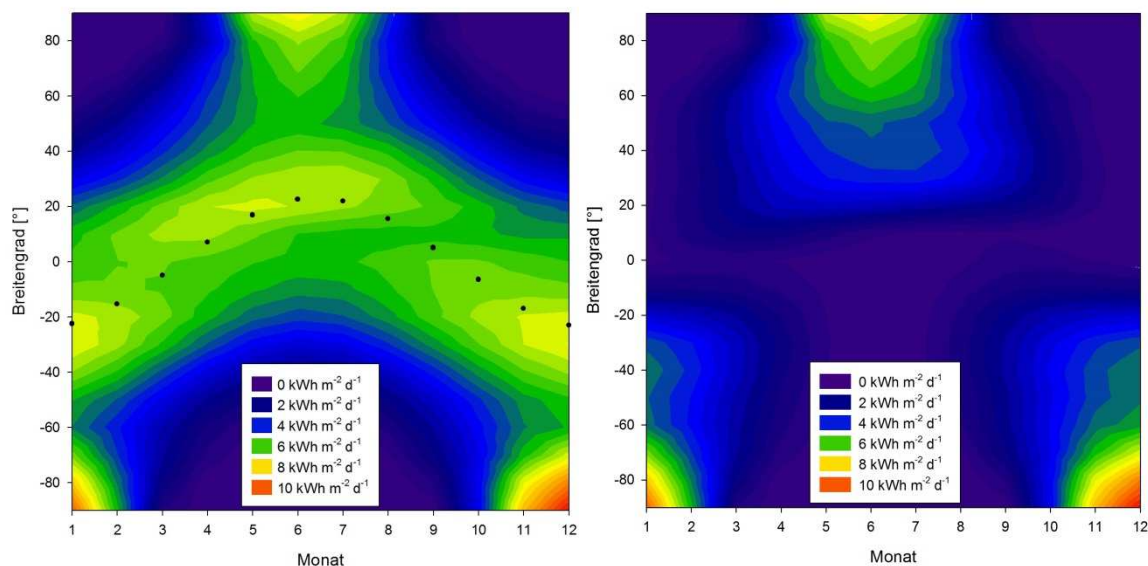


Abbildung 2-14 -Monatsmittel der Globalstrahlung in Abhängigkeit von Breitengrad (Werte bzgl. Längengrad gemittelt), Konturplot erstellt basierend auf Quelle: SSE Release 6.0; Jul 1983-Jun2005 (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>), links: erweitert um Deklination der Sonne im Jahresverlauf (schwarze Punkte); rechts: Verteilung der monatlichen Differenz der Globalstrahlung pro Breitengrad

Die Jahressummen der Globalstrahlung in Deutschland betragen zwischen 950 und 1260 kWh m^{-2} bzw. als Tagesmittel $2,6$ und $3,5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Huld et al., 2012; Šúri et al., 2007; Zahoransky, 2009). Konvertiert in Bestrahlungsstärke ergeben sich als Durchschnittswerte 100 bis 140 W m^{-2} . Abbildung 9-1 in Anhang A-1 gibt, gemittelt als durchschnittliche Jahressummen von 1981 bis 2010, einen grafischen Überblick über das solare Strahlungsangebot in Deutschland.

Detaillierte Angaben zum Standort der Mikroalgenplattform sind in Abschnitt 3.2 zusammengetragen.

2.4.3. Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR)

Der für die Photosynthese energetisch wichtige Spektralbereich liegt zwischen 400 und 700/740 nm (vgl. Abbildung 2-15) und somit innerhalb des sichtbaren Spektrums von 380 bis 780 nm (vgl. auch Tabelle 2-3). In diesem Bereich, der auch als photosynthetisch aktive Strahlung (engl.: *photosynthetically active radiation*, PAR) bezeichnet wird, absorbieren die an der Photosynthese beteiligten Chlorophylle und akzessorischen Pigmente (Carotinoide und Phycobiline). Die PAR ist dementsprechend ein Summenparameter bzgl. des angegebenen Spektralbereiches und wird, wie die Bestrahlungsstärke, in W m^{-2} angegeben. Eine weitere Möglichkeit ist die Angabe als photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (engl.: *photosynthetically active photon flux density*, PPF) in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Hierbei handelt es sich um die Angabe bzgl. absorbierter/gemessener Photonen. Da der Spektralbereich der PAR teilweise unterschiedlich angegeben bzw. definiert wird, wie bspw. von 400 bis 700 nm (CIE 106/8, 1993; Melis, 2009) oder 400 bis 740 nm (Zhu et al., 2008), sollte bei energetischen Betrachtungen der verwendete Bereich angegeben werden.

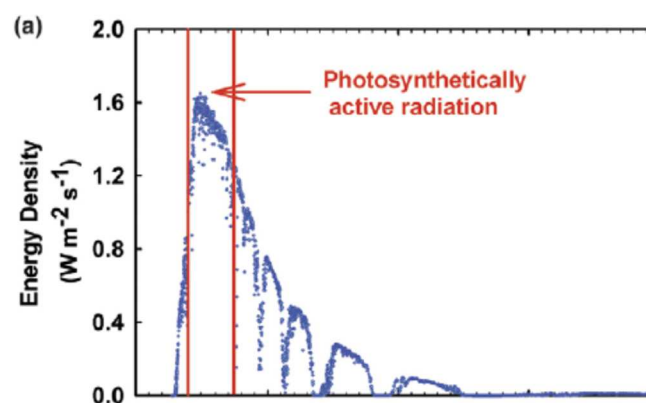


Abbildung 2-15 -Anteil PAR an solarem Spektrum (hier: 400 bis 740 nm), bzgl. Verteilung der Energiedichte [$\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bzw. J m^{-2}] (Zhu et al., 2008)

Der energetische Anteil der PAR am gesamten solaren Strahlungsspektrum beträgt extraterrestrisch ca. 48 % (s. Tabelle 2-3). An der Erdoberfläche kann, global betrachtet, der Anteil je nach Witterung, Atmosphärenzusammensetzung und Sonnenstand zwischen 30 und 60 Prozent schwanken (Bendix et al., 2010; Escobedo et al., 2011; Landsberg and Sands, 2010; Reitmayer, 2000; Schwank, 1984; Tsubo and Walker, 2005). In einigen älteren Betrachtungen wird der Wellenlängenbereich zwischen 300 und 700 nm als Grundlage für die Berechnung des PAR-Anteils verwendet, was zu leicht höheren Werten für den Anteil der PAR (teilweise über 50 %) am solaren Spektrum führt (Tsubo and Walker, 2005). Das solare Spektrum verhält sich wellenlängenspezifisch hinsichtlich Reflexions- und Absorptionsverhalten in der Atmosphäre (s. Abschnitt 2.4.2), was einerseits den orts- und tageszeitlich verändernden Charakter, andererseits eine Variation hinsichtlich sich verändernder klimatischer Bedingungen (z.B. Bewölkungsgrad) erklärt.

3. Theoretische Grundlagen zur Modellbildung

3.1. Berechnung der Koordinatenbeziehungen zwischen Sonne und Erde

Um den realen Strahlungseintrag an einem definierten Ort (hier am Beispiel des Tannenbaumreaktors in Köthen) berechnen zu können, ist es notwendig, den Tagesgang der Sonne ortsspezifisch mathematisch zu beschreiben. Der tageszeitlich abhängige Sonnenstand erlaubt die Berechnung des Sonneneinfallwinkels anhand von Sonnenhöhe und Sonnenazimut. Mit Hilfe dessen kann die Fläche der Gesamtbestrahlung in Abhängigkeit der Tageszeit berechnet werden.

Die Berechnung des Sonnenstandes an einem beliebigen Standort auf der Erde erfolgt in Abhängigkeit der zugehörigen geografischen Koordinaten (Längen- und Breitengrad). Die Reaktoren am Standort Köthen befinden sich $51,755234^\circ$ nördlicher Breite und $11,95823^\circ$ östlicher Länge (N $51^\circ 45' 18,83''$, E $11^\circ 57' 29,52''$).

Zunächst muss die geozentrische Position der Sonne, also die Stellung der Sonne im Bezug zur Erde, ermittelt werden. Dabei wird der Zeitraum (Z), ausgehend vom Julianischen Datum bezogen auf den 01.01.2000 12 Uhr UT (J2000.0), die mittlere (L) und wahre (τ) ekliptische Länge sowie die mittlere Anomalie der Sonne (M) und die mittlere Schräge der Ekliptik des Erdorbits (ϵ_0) ermittelt (Meeus, 1998):

$$Z = \frac{JD - 2451545,0}{36525} \quad \text{Gl. 3-1}$$

$$L_e = 280^\circ,46646 + 36000^\circ,76983 * Z + 0^\circ,0003032 * Z^2 \quad \text{Gl. 3-2}$$

$$M = 357^\circ,52911 + 35999^\circ,05029 * Z - 0^\circ,0001537 * Z^2 \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$\tau = L_e + 1^\circ,914602 * \sin M + 0^\circ,019993 * \sin(2 * M) \quad \text{Gl. 3-4}$$

$$\epsilon_0 = 23^\circ 26' 21'',448 - 46'',8150 * Z - 0'',00059 * Z^2 + 0'',001813 * Z^3 \quad \text{Gl. 3-5}$$

Weiter wird die Deklination der Sonne, also der Winkel zwischen Sonnenrichtung und Äquatorialebene, bestimmt zu (nach Meeus 1998):

$$\delta_S = \sin^{-1}(\sin \epsilon_0 * \sin \tau) \quad \text{Gl. 3-6}$$

Eine vereinfachte Berechnung der Deklination der Sonne bezieht lediglich die Tageszahl (n) des jeweiligen Jahres ein (nach Eicker 2012):

$$\delta_S = 23,45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + n)\right) \quad \text{Gl. 3-7}$$

Neben der Deklination bildet der Stundenwinkel (ω) die zweite benötigte Komponente der Äquatorialkoordinaten, mit Hilfe dessen im Anschluss die Sonnenhöhe und Sonnenazimut berechnet werden können. Hierfür wird zunächst mit Hilfe der Zeitgleichung (ZG) die wahre Sonnenzeit (WOZ) aus der lokalen Ortszeit ermittelt. Dabei muss zusätzlich eine Längengradkorrektur (L_K) beachtet werden um den Bezug zum tatsächlichen Standort zu wahren (hier: $L_{\text{Gewächshaus}}$ des Standortes des Gewächshauses):

$$ZG = 4 * \tan^{-1} \left(\frac{\tan L_e - \tan \tau * \cos \epsilon_0}{1 + \tan L_e * \tan \tau * \cos \epsilon_0} \right) \quad \text{Gl. 3-8}$$

$$L_K = \frac{4 \frac{\text{min}}{\circ} * (15^\circ - L_{\text{Gewächshaus}})}{60 \text{ min}} \quad \text{Gl. 3-9}$$

$$WOZ = MEZ - L_K + ZG \quad \text{Gl. 3-10}$$

$$\omega = (WOZ - 12 \text{ h}) * \frac{15^\circ}{\text{h}} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Schließlich wird der Sonnenstand, anhand von Sonnenhöhe (θ) und Sonnenazimut (Az_θ) in Abhängigkeit der geographischen Koordinaten des Standortes sowie der zu einem spezifischen Zeitpunkt definierten geozentrischen Position der Sonne (Deklination, Stundenwinkel), berechnet:

$$\theta = \sin^{-1}(\sin B_{\text{Gewächshaus}} * \sin \delta_S + \cos B_{\text{Gewächshaus}} * \cos \delta_S * \cos \omega) \quad \text{Gl. 3-12}$$

Bei der Berechnung des Sonnenazimuts ist die Umrechnung in den korrekten Quadranten erforderlich, vgl. Tabelle 3-1 (hier definiert: Norden 0°):

$$Az_\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \omega}{\cos \omega * \sin B_{\text{Gewächshaus}} - \tan \delta_S * \cos B_{\text{Gewächshaus}}} \right) \quad \text{Gl. 3-13}$$

Tabelle 3-1 - Quadrantenumrechnung des Sonnenazimutes

Bedingung		Azimut Az
ω	Az_θ	
0	0	180 °
≤ 0	≥ 0	Gl. 3-13
≤ 0	≤ 0	180 °+ Gl. 3-13
≥ 0	≤ 0	360 °+ Gl. 3-13
≥ 0	≥ 0	180 °+ Gl. 3-13

3.2. Strahlungsangebot und PAR-Anteil

In Anlehnung an Abschnitt 2.4.3 ist eine Ermittlung des PAR-Anteils der Globalstrahlung für die Bewertung des Strahlungseintrages anhand des zu erstellenden Modells erforderlich. Hierzu können die Strahlungsdaten, hier durchgeführt am Beispiel des Standortes der Mikroalgenplattform (genähert N 52°, E 12°), aus den verfügbaren Datensätzen der Klimadatenbank der NASA zusammengetragen und mit Hilfe einer Näherungsgleichung die mittleren PAR-Anteile berechnet werden – vgl. Abbildung 3-1 (Tsubo and Walker, 2005). Die Berechnung basiert auf der Bestimmung des sogenannten Klarheitsfaktors (engl.: *clearness factor*). Hierzu werden die Daten der Tageswerte der extraterrestrischen Strahlung in Bezug zu denen an der Erdoberfläche eintreffenden horizontalen Globalstrahlung gesetzt. Da die Messung der Globalstrahlung für den Standort der Mikroalgenplattform innerhalb des Gewächshauses erfolgt und somit ein direkter Bezug zur extraterrestrischen Strahlung fehlerbehaftet ist, wird für die Bestimmung des PAR-Anteils auf den oben genannten Datensatz zur mittleren Strahlung am Standort über einen Zeitraum von 22 Jahren zurückgegriffen.

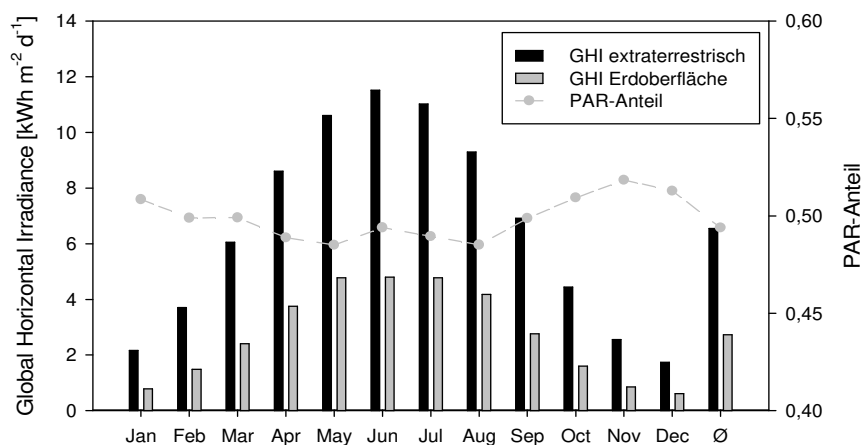


Abbildung 3-1 - Globalstrahlung (GHI) am Standort des Gewächshauses, genähert (N 52°, E 12°); erstellt basierend auf Rohdaten von: SSE Release 6.0; Jul 1983-Jun2005 (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)

In Abbildung 3-1 ist erkennbar, dass die anhand der Näherungsgleichung ermittelten Werte des PAR-Anteils im Jahresverlauf leicht zwischen 0,485 (im Sommer) und 0,518 (Winter) schwanken. Als mittlerer Jahreswert ergibt sich 0,494. In den fortlaufenden Berechnungen und als Eingangsparameter für das zu erstellende Modell zum Lichteintrag wird mit dem Jahresmittelwert als konstanten Faktor gearbeitet.

Eine graphische Übersicht zum Globalstrahlungsangebot in Deutschland als mittlere Jahressumme (Zeitraum 1981 – 2010) vom Deutschen Wetterdienst ist in Anhang A-1 dargestellt.

3.3. Strahlungsverhalten an Silikonschichten

In Fortführung zum Strahlungsangebot an der Erdoberfläche ist es erforderlich das Strahlungsverhalten an der Grenzfläche des Lichtkollektors (Luft-Wandmaterial PBR, hier: Silikon) zu bewerten. Wie in Kapitel 2.4.1 dargelegt, erfolgt die Beschreibung der Ausbreitung solarer Strahlung als elektromagnetische Welle. Trifft diese auf eine Grenzschicht eines anderen Mediums, dann wird die Strahlung, je nach Beschaffenheit der Oberfläche, unterschiedlich reflektiert (vgl. Abbildung 3-2).

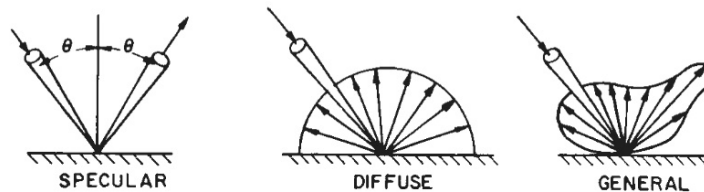


Abbildung 3-2 - Arten der Reflexion an Oberflächen (Duffie and Beckman, 2013)

Unter Annahme einer ideal glatten Oberfläche findet das nach Snellius benannte Brechungsgesetz Anwendung (Gl. 3-14). Es definiert die Winkelbeziehung zwischen einfallendem und reflektierten Strahl in Abhängigkeit der beteiligten Medien und der medienspezifischen Brechungsindizes $n_1, 2$. Darauf aufbauend wird mit Hilfe der Fresnel-Formeln die unpolarisierte solare Strahlung in senkrechte und parallele Anteile polarisiert und anschließend aus den ermittelten Reflexionsfaktoren ψ_{rs} und ψ_{rp} (Gl. 3-15 - Gl. 3-16) der Reflexionsgrad an der Grenzschicht Ψ_r nach Gl. 3-19 ermittelt (Duffie and Beckman, 2013; Eicker, 2012; Pedrotti et al., 2005; Poprawe, 2005):

$$n_1 * \sin \gamma_1 = n_2 * \sin \gamma_2 \quad \text{Gl. 3-14}$$

$$\psi_{rs} = \frac{n_1 * \cos \gamma_1 - \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} * n_2 * \cos \gamma_2}{n_1 * \cos \gamma_1 + \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} * n_2 * \cos \gamma_2} \quad \text{Gl. 3-15}$$

$$\psi_{rp} = \frac{n_2 * \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} * \cos \gamma_1 - n_1 * \cos \gamma_2}{n_2 * \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} * \cos \gamma_1 + n_1 * \cos \gamma_2} \quad \text{Gl. 3-16}$$

$$\Psi_{rs} = |\psi_{rs}|^2 \quad \text{Gl. 3-17}$$

$$\Psi_{rp} = |\psi_{rp}|^2 \quad \text{Gl. 3-18}$$

$$\Psi_r = \frac{\Psi_{rs} + \Psi_{rp}}{2} \quad \text{Gl. 3-19}$$

Für die Bewertung des Verhaltens der unpolarisierten Sonnenstrahlung an der Grenzfläche ist die Kenntnis verschiedener Stoffparameter erforderlich um oben aufgeführte Gleichungen

anwenden zu können. Neben den jeweiligen Brechungsindizes sind dies die ebenfalls medienspezifischen Werte zur magnetischen Permeabilität. Die Beschreibung erfolgt anhand der sogenannten Maxwell-Relation (Pedrotti et al., 2005):

$$n_{1/2} = \sqrt{\mu_{r,1/2} * \varepsilon_{r,1/2}} \quad \text{Gl. 3-20}$$

Für die Berechnung der Transmission müssen die Vorgänge beim Durchtreten des Materials berücksichtigt werden. Hierbei kann es aufgrund von Streuungs- und Absorptionseffekten zu einer weiteren Beeinträchtigung der Strahlung kommen. Um den Anteil transmittierter Strahlung nach dem Durchdringen einer absorbierenden Schicht ermitteln zu können, müssen die Schichtdicke des zu durchdringenden Mediums (u) sowie der materialabhängige Extinktionskoeffizient (K) bekannt sein. Damit lässt sich der Transmissionsgrad t_a des Materials nach Bouguer's Gesetz bestimmen zu (Duffie and Beckman, 2013)

$$t_a = e^{\left(-K * \frac{u}{\cos \gamma_2}\right)} \quad \text{Gl. 3-21}$$

und weiterhin die Gesamtreflexion nach Gl. 3-19 mit den spezifischen Reflexionsgraden an der äußeren und inneren Mediengrenze:

$$\Psi_{rs} = \psi_{rs} + \frac{\psi_{rs} * (1 - \psi_{rs})^2 * t_a^2}{1 - (\psi_{rs} * t_a)^2} \quad \text{Gl. 3-22}$$

$$\Psi_{rp} = \psi_{rp} + \frac{\psi_{rp} * (1 - \psi_{rp})^2 * t_a^2}{1 - (\psi_{rp} * t_a)^2} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung von Reflexions- und Extinktionsverlusten der Gesamttransmissionsgrad (Ψ_t) und weiter mit Hilfe von Gl. 3-19 und Gl. 3-26 der Anteil der Extinktion (Ψ_e) als:

$$\Psi_{ts} = \frac{t_a * (1 - \Psi_{rs})^2}{1 - (\Psi_{rs} * t_a)^2} \quad \text{Gl. 3-24}$$

$$\Psi_{tp} = \frac{t_a * (1 - \Psi_{rp})^2}{1 - (\Psi_{rp} * t_a)^2} \quad \text{Gl. 3-25}$$

$$\Psi_t = \frac{\Psi_{ts} + \Psi_{tp}}{2} \quad \text{Gl. 3-26}$$

$$\Psi_e = 1 - \Psi_r - \Psi_t \quad \text{Gl. 3-27}$$

Dabei ist die Extinktion die Summe aus absorbiertem und gestreuter Strahlung. Der Extinktionskoeffizient (K) wird innerhalb des solaren Spektrums häufig als konstant angenommen (Duffie and Beckman, 2013).

3.4. Wärmeübertragung

Im Zuge der Aufstellung der Wärmebilanz ist hinsichtlich der Zusammenstellung der konvektiven Wärmeströme die Berechnung mehrerer Hilfsgrößen erforderlich (vgl. Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3). Diese sind in der Regel abhängig von geometrischen Beziehungen und müssen dementsprechend für das spezifische Grundkonzept des Lichtkollektors ausgelegt werden. Das umgebende Medium der Photobioreaktoren ist Luft unter atmosphärischen Bedingungen, so dass dementsprechend die Stoffdaten verwendet werden.

Tabelle 3-2 - Zusammenstellung von Gleichungen und Stoffdaten für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (VDI e. V., 2013)

Bedingungen	Gleichung
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_K = \frac{Nu * \eta}{l_{ch}}$
charakteristische Überstromlänge	$l_{ch} = \frac{\pi}{2} * D$
spezifische Wärmekapazität von Wasser	$c_{p,H_2O} = 4,182 \frac{kJ}{kg * K}, \text{ (bei } 20 \text{ } ^\circ\text{C)}$
Prandl-Zahl (Luft)	$Pr = 0,7$
Wärmeleitkoeffizient (Luft)	$\eta = 0,026 \frac{W}{m * K}$
Rayleigh-Zahl (mit Gr = Grashof-Zahl)	$Ra = Gr * Pr = \frac{\beta * g * l_{ch}^3 * \Delta\vartheta }{\nu^2} * Pr$

Die allgemeine Beziehung zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (α_K) wird durch die entsprechende charakteristische Überstromlänge (l_{ch}), welche die Referenzfläche des konvektiven Wärmeüberganges bildet, spezifiziert. Diese wiederum wird ebenso zur Bestimmung der mittleren Nusselt-Zahl benötigt (s. Tabelle 3-3). Die Rayleigh-Zahl (Ra) setzt sich zusammen aus der Grashof-Zahl (Gr) und der Prandl-Zahl (Pr) und ist somit ein Maß für die Auftriebskraft der Strömung. Zur Berechnung von Ra ist, unter anderem, der isobare thermische Volumenausdehnungskoeffizient erforderlich. Dieser Wert ist temperaturabhängig und kann für Luft, betrachtet als reales Fluid, aus Stofftabellen entnommen werden. Die Temperaturabhängigkeit lässt sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Umgebungstemperatur mit Hilfe einer Regressionsvorschrift zuordnen (siehe Anhang A-2). Weitere Größen für Ra sind die Fallbeschleunigung (g) und die kinematische Viskosität (ν , Luft $0,0001513 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Das entscheidende Maß für die Rayleigh-Zahl ist die Temperaturdifferenz zwischen der Wandtemperatur und des umströmenden Mediums.

In Tabelle 3-3 erfolgt die Zusammenstellung der für den jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten benötigten Nusselt-Zahlen. Die Bestimmung der Nu-Korrelationen basiert auf empirisch ermittelten Grundzusammenhängen geometrischer Grundkonzepte und erfolgt in aller Regel als mittlere Nu-Zahl (Gnielinski, 2013a). Für die Anwendung auf den tubulären Lichtkollektor werden die Grundgleichungen zum horizontalen Zylinder angewandt. Für freie Konvektion gilt allgemein, dass sie nur durch Temperaturunterschiede zwischen den betreffenden Medien hervorgerufen wird (Stephan and Stephan, 2014). Entsprechend erfolgt die Berechnung für Nu_{frei} anhand der angegebenen Gleichung. Bei der Berechnung der erzwungenen Konvektion ist der Einfluss von laminarer und turbulenter Medienströmung anhand der Reynolds-Zahl (Re_o) zu beachten. Hierfür ist die Windgeschwindigkeit (ω_w) maßgebend. o stellt den Hohlraumanteil der Rohrreihe dar und wird mit Hilfe des Querteilungsverhältnisses ermittelt (Gnielinski, 2013b).

Beim Auftreten beider Formen wird nach Gnielinski die Mischform der Nu-Zahl (Nu_{Misch}) gebildet.

Tabelle 3-3 - Gleichungen zur mittleren Nusselt-Zahl

Bedingungen	Nusselt-Gleichung	Referenz
freie Konvektion um waagerechte Zylinder	$Nu_{frei} = \left(0,752 + 0,387 * (Ra * f_3(Pr))^{1/6}\right)^2$ $f_3(Pr) = \left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{16}{9}}$	(Churchill and Chu, 1975)
erzwungene Konvektion um angeströmtes Rohr, einzelne Rohrreihe	$Nu_{erzw} = 0,3 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}$ $Nu_{lam} = 0,664 * \sqrt{Re_{o,l}} * \sqrt[3]{Pr}$ $Nu_{turb} = \frac{0,037 * Re_{o,l}^{0,8} * Pr}{1 + 2,443 * Re_{o,l}^{-0,1} * (Pr^{2/3} - 1)}$ $o = 1 - \frac{\pi}{4 * a}$ $Re_o = \frac{\omega_w * l_{ch}}{o * \nu}$	(Gnielinski, 2013a, 2013b; von Böckh and Wetzels, 2014)
Mischkonvektion (gleichgerichtet)	$Nu_{Misch} = \sqrt[3]{Nu_{erzw}^3 + Nu_{frei}^3}$	(Klan and Thess, 2013; Churchill, 1977)

4. Material und Methoden

4.1. Allgemeine Versuchs- und Prozessbeschreibung

Ableitend vom Ziel der Durchführung einer stabilen Langzeitkultivierung mit einer definierten und gleichbleibenden Zusammensetzung der Mikroalgenbiomasse ergeben sich verschiedene Randbedingungen und Einflussparameter. Ausgehend der in Abschnitt 2.3.4 dargestellten Einflussparameter auf die Mikroalgenkultivierung sollen folgende Kriterien untersucht werden:

- Globalstrahlung und Strahlungsverhalten am Lichtkollektor als Leitgröße
- Temperaturverhalten der Prozesslösung (am Beispiel Wasser)
- Versorgung mit sonstigen Medien (Nährstoffversorgung, CO₂/O₂)
- Kontaminationsdruck auf Produktionskultur

Wesentlich, weil nicht direkt steuerbar aufgrund schwankender Witterungsbedingungen, nimmt der Faktor Globalstrahlung Einfluss auf das Wachstum der Mikroalgen bei der Anwendung als phototrophe Kultivierung unter Freilandbedingungen. Vielmehr lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der durch die Zellen aufgenommenen PAR-Strahlung und der daraus gebildeten Biomasse ableiten (vgl. Abbildung 2-1). Dieser soll unter Freilandbedingungen praxisnah untersucht werden. Dafür ist es erforderlich, die Versorgung hinsichtlich weiterer Wachstumsparameter optimal zu gestalten um ein stabiles und definiertes Wachstum der Mikroalgenkultur unter vorherrschenden lokalen Freilandbedingungen näher untersuchen zu können. Als Voraussetzung für die Berechnung der Lichtaufnahme durch die Sonneneinstrahlung ist eine Modellierung hinsichtlich der verschiedenen Tagesgänge im Jahresverlauf sowie der spezifischen geometrischen Konzeption des Lichtkollektors erforderlich. Dazu sind im Vorhinein Untersuchungen zu grundlegenden Kennzahlen des verwendeten Silikonmaterials einerseits und strömungstechnische Charakteristika andererseits, durchzuführen.

Die Aufnahme der Strahlung erfolgt innerhalb eines Photobioreaktorsystems durch die Lichtkollektoren. Das detaillierte Set-Up des verwendeten Photobioreaktorsystems ist in Abschnitt 4.2.4 dargestellt. Für die Modellierung der Strahlungsaufnahme sind mehrere Einzelschritte erforderlich. Zum einen erfolgt die Aufstellung des Strahlenganges der Sonne in Bezug zum Standort der Mikroalgenplattform anhand tages- sowie jahreszeitlicher Veränderung des Sonnenhöhenwinkels. Weiterhin erfolgen die mathematische Formulierung der bestrahlten Fläche sowie der Transmission der Lichtkollektoren. Hierzu ist es erforderlich, das Strahlungsverhalten an der Grenzfläche der Lichtkollektoren (Luft : Silikon) zu

untersuchen. Dies wird u.a. anhand der unter 3.3 beschriebenen Fresnel-Gleichungen durchgeführt. Im Ergebnis soll die mathematische Beschreibung ausschließlich eine Abhängigkeit bezüglich des Sonnenhöhenwinkels enthalten, so dass die Formulierung für den gesamten Jahresverlauf Gültigkeit besitzt. In Kombination mit der zu messenden Globalstrahlung am Standort soll die durch die Lichtkollektoren aufgenommene Globalstrahlung zu berechnen sein. Anhand einer Wärmebilanz unter realen Bedingungen soll der Strahlungseintrag in das Photobioreaktorsystem anhand des Temperaturverhaltens der Prozesslösung verifiziert werden.

Die stabile Kultivierung von Mikroalgenbiomasse im Freiland erfordert eine hohe Steuerbarkeit des Kultivierungsprozesses hinsichtlich biologischer und prozesstechnischer Randparameter aufgrund nicht kontrollierbarer schwankender Umgebungsbedingungen. Hierzu sind hinsichtlich wesentlicher und beeinflussbarer Parameter Vorversuche durchzuführen um die Bedingungen für eine stabile Langzeitkultivierung, unter den hiesigen Bedingungen und Voraussetzungen, erarbeiten zu können. Einerseits zählen hierzu die Aufrechterhaltung idealer Wachstumsbedingungen hinsichtlich Nährstoffkonzentrationen sowie praktikabel umsetzbarer Arbeitskonzentrationen der Biotrockenmasse der Mikroalgen inklusive dafür notwendige zu ergreifende Maßnahmen (Reinigungszyklen etc.). Zusätzlich ist die Aufrechterhaltung der biologischen Zusammensetzung der Mikroalgenkultur hinsichtlich Fraßfeinden und weiteren Kontaminanten zu gewährleisten und gegebenenfalls Randbedingungen zu erarbeiten. Die Untersuchung potentiell auftretender Kontaminationen wird nicht systematisch untersucht, sondern vorrangig nach Effekten auf die Prozessstabilität der gezielten Mikroalgenkultivierung.

Die Kombination aus der Modellierung der aufgenommenen Globalstrahlung und stabil gebildeter Mikroalgenbiomasse soll die Einordnung der Lichtausnutzung der Mikroalgenkultur und somit die Effizienz des Lichtkollektors erlauben. Dabei soll die Fähigkeit zur stabilen Langzeitkultivierung von Mikroalgenbiomasse mit definierter Zusammensetzung unter Freilandbedingungen im Vordergrund stehen.

4.2. Phototrophe Kultivierung der Mikroalgen

4.2.1. Verwendete Mikroalgen

Die im Rahmen der Kultivierungsversuche im Freiland verwendeten Mikroalgen in Monokulturen waren *Scenedesmus vacuolatus* und *Chlorella kessleri*. Die zusammengesetzte Mischkultur zur Erarbeitung einer stabilen Langzeitkultur bestand aus in der nachfolgend aufgeführten Tabelle 4-1 aufgeführten Mikroalgenstämmen.

Tabelle 4-1 - Übersicht über die verwendeten Mikroalgen (SAG - Sammlung von Algenkulturen der Universität Göttingen, KASC – Köthener Algenstammsammlung/Köthener Algae Strain Collection der Hochschule Anhalt)

Mikroalgenspezies	taxonomische Zuordnung	Stammsammlung
Einzelkulturen		
<i>Scenedesmus vacuolatus</i>	SAG 211-8b	SAG
<i>Parachlorella kessleri</i>	SAG 10.80	SAG
Mischkultur		
<i>Scenedesmus obliquus</i>	SAG 276-1	SAG
<i>Scenedesmus vacuolatus</i>	SAG 211-8b	SAG
<i>Chlamydomonas noctigama</i>	SAG 35.72	SAG
<i>Parachlorella kessleri</i>	SAG 10.80	SAG
<i>Chlorella zofingiensis</i>	04-094	KASC
<i>Spongiochloris minor</i>	29-01	KASC
<i>Bractiacoccus</i>	M5-23	KASC

Die Stammhaltung der Einzelkulturen erfolgte im Labor mittels Inkubationsschüttler bei 20 °C und 100 rpm in 250 ml Erlenmeyerkolben in Setlik-Medium (siehe Abschnitt 4.2.2). Die erste Volumenvergrößerung der Mikroalgenkultur erfolgte in 2l-Blasensäulen. Dabei wurde die Kultur mit 2 % (v/v) CO₂-angereicherter Luft begast und bei 25 °C und 200 µmol m⁻² s⁻¹ kultiviert.

4.2.2. Kultivierungsmedien und Plattformmedium für semi-kontinuierlichen Betrieb (Arbeitskonzentrationsbereich)

Im Labormaßstab erfolgten einerseits die Stammhaltung der Einzelkulturen (siehe hierzu Abschnitt 4.2.1) und andererseits die vorbereitenden Untersuchungen zur Erarbeitung eines

Plattformmediums zur Verwendung im semi-kontinuierlichen Prozessbetrieb unter Freilandbedingungen.

Ausgehend von einem Vollmedium für Chlorophycean für batch-Kultivierungen im Labormaßstab (Setlik, 1968) wurde die Zusammensetzung bestimmter Makroelemente adaptiert. Hierbei handelt es sich zum einen um eine Anpassung der Phosphat-Quelle durch eine Kombination aus Kaliumhydrogen- und Kaliumdihydrogenphosphat, so dass der Ziel pH-Wert von 7 hinreichend genau erreicht wird und folglich bei einer gezielten Einstellung des pH-Wertes geringe Mengen von pH-Wert regulierenden Säuren bzw. Basen notwendig sind. Weiterhin ist eine Reduktion von Magnesiumsulphat gegenüber der Originalrezeptur erfolgt. Die Zusammensetzung ist in Anhang A-3 hinterlegt.

Die Nährmedien zur Verwendung von Laboruntersuchungen wurden, unter Verwendung von Reinstwasser, hergestellt. Der final zusammengesetzte Medienansatz wurde bei 121 °C für 21 Minuten autoklaviert. Als Basis für die Prozessmedien für die Freilandkultivierungen diente das vor Ort zur Verfügung stehende Leitungswasser mit der im Anhang A-3 dargestellten Zusammensetzung der enthaltenen Salzionen. Diese wurden bei der Zusammenstellung der Nährstoffionen berücksichtigt. Daraufhin erfolgte die Etablierung des Plattform-Mediums mit dem unter 5.3.1.2 beschriebenen entwickelten Arbeitsbereich des Nährstoffmilieus. Hierbei wurde auf die Verwendung des Phosphat-Puffers verzichtet, da es sich um einen CO₂-geregelten Kultivierungsprozess handelte.

4.2.3. Kultivierungsbedingungen in den Tannenbaum-Photobioreaktoren

Um das Kultivierungsverhalten von Mikroalgenkulturen für phototrophes Wachstum in den Tannenbaum-Photobioreaktoren bewerten zu können, wurden zunächst Einzelkultivierungen von *Chlorella kesslerii* und *Scenedesmus vacuolatus* (Tabelle 4-1) durchgeführt. Das Kultivierungssetup bestand aus 1 Lichtkollektor mit 300 L photoaktivem Volumen und einem Mischbehälter in Kreislauffahrweise. Weitere Informationen zum verwendeten Versuchsaufbau sind in Abschnitt 4.2.4 zu finden. Die anhand der Versuche ermittelten optimalen spezifischen Kultivierungsbedingungen sollten zu einem Praxisversuch zur Langzeitkultivierung führen, indem die Mikroalgenzusammensetzung zum Zwecke eines Versuchsansatzes von selbststabilisierenden Leitkulturen adaptiert wurde.

Die Ernte der Mikroalgenbiomasse erfolgte mit Hilfe von Tellerseparatoren der Firma GEA. Die zentrifugierte Biomasse wurde entweder im Labor für Analysenzwecke aufbereitet oder für die Lagerung in geeigneter Form bei -18 °C tiefgefroren. Dabei erfolgte die kurzzeitige Unterbrechung der Umwälzung der Kulturlösung um das gewünschte Volumen zur Ernte aus dem Kreislauf entnehmen zu können. Durch Auffüllen von Leitungswasser und Zugabe definierter Nährstoffe konnte die Kultivierung fortgeführt werden.

4.2.4. Mikroalgenplattform/verwendetes Setup der Photobioreaktoren

Die in den Versuchen genutzte Mikroalgenplattform besteht zusätzlich zu den in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 dargestellten Lichtkollektoren und peripheren Einrichtung weiterhin aus einem gekoppelten Heiz-Kühlaggregat sowie einem softwareseitigen Prozessleitsystem. Das Foliengewächshaus, in welchem das Photobioreaktorsystem untergebracht ist, besteht aus einer mit Luft gefüllten Doppelfolie als Dachabdeckung. Die Seitenwände können heruntergelassen werden und sind in den Frühjahr- und Sommermonaten geöffnet gewesen.



Abbildung 4-1 – Darstellung der 4 Lichtkollektoren (jeweils 2 Lichtkollektoren – sowohl vordere zwei und hintere 2 – konnten zu jeweils einer Teilanlage zusammengefasst werden)

Die in Abbildung 4-2 links gezeigte Ansicht der Mikroalgenplattform gibt eine Übersicht zur peripheren Einrichtung des Photobioreaktorsystems, bestehend aus 2 Mischbehältern á 300 l in Hochbauweise (zum Zweck der Entlüftung) und der Sensor- und Verteilerstation, bestehend aus, pro Teilanlage, je einem Sensor für die Messung des pH-Wertes (Einstabmesskette von Sensortechnik Meinsberg, Typ EGA133), des Anlagendruckes (Endress+Hauser Cerabar T PMP131), der Medientemperatur (Endress+Hauser Thermophant T TTR31), der optischen Dichte (Optek AS56-05) sowie des Medienvolumenstromes (Endress+Hauser Promag 10D40). Für die Umwälzung der Mikroalgensuspension standen gängige Kreiselpumpen der Firmen Lowara bzw. Linn mit einer Leistungsaufnahme von 0,37 bis 0,55 kW zur Verfügung (siehe Abbildung 4-2 unten rechts). Die Aufnahme der Globalstrahlung erfolgte mit Hilfe eines Pyranometers (Kipp&Zonen CMP3) als Festinstallation innerhalb des Gewächshauses (siehe

Abbildung 4-2 oben rechts). Ebenso als Festinstallation innerhalb des Gewächshauses stand ein PAR-Sensor mit einem Spektralbereich von 400 bis 700 nm für die Erfassung der Photonenflussdichte zur Verfügung (Kipp&Zonen PQS 1).



**Abbildung 4-2 - Darstellung der Anlagenperipherie mit Mischbehälter (1 Hochbehälter je Teilanlage) sowie Sensor- und Verteilerstation (links)
oben rechts: Pyranometer (Kipp & Zonen CMP3) zur Erfassung der Globalstrahlung
unten rechts: Kreiselpumpe zum Umwälzen der Mikroalgensuspension (Fa. Lowara bzw. Linn 0,37 bis 0,55 kW als Modell CEA und CO)**



Die geometrischen Daten, welche im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, sind teilweise aus den konzeptionellen Grunddaten entnommen und nicht exakt nachzumessen (z.B. α_L).

Standhöhe Lichtkollektor	2,2 m
Schlauchabstand s_0	0,035 m
Anzahl Windungen	22
Anstellwinkel α_L	15 °

Abbildung 4-3 - geometrische Grunddaten des Lichtkollektorerüstes

4.3. Analytische Methoden

Die Untersuchungen zu den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.3 sowie 4.3.7 konnten in der Arbeitsgruppe von Frau Prof. Griehl (Hochschule Anhalt, Fachbereich 7 – Bernburger Str. 55, 06366 Köthen) und die Untersuchungen in den Abschnitten 4.3.4 bis 4.3.6 in der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. Gottstein (Hochschule Anhalt, Fachbereich 1 - Strenzfelder Allee 28, 06406 Bernburg/Strenzfeld) durchgeführt werden.

4.3.1. Vorbehandlung des Probenmaterials zur Analytik

Die Entnahme von Algensuspension zur täglichen prozessbegleitenden Kontrolle und Analytik sowie Inhaltsstoffanalytik erfolgte in aller Regel in einem Rhythmus von 24 Stunden jeweils 8 Uhr unter Zuhilfenahme des Probenentnahmehahns im Verteilerkreis des Photobioreaktors an der Druckseite der Kreiselpumpe, um eine homogene Durchmischung der Suspension zu erzielen. Die Leitung des Probenentnahmehahns wurde vor jeder Probenentnahme hinreichend gespült und das entnommene Suspensionsvolumen verworfen. Im Anschluss erfolgte die eigentliche Probenentnahme von 50 ml im Falle der Biotrockenmassebestimmung und prozessbegleitenden Analytik bzw. von 1 Liter, wenn zusätzlich gezielte Inhaltsstoffe analysiert werden sollten.

Die mikroskopische Bewertung der Mikroalgen und die Biotrockenmassebestimmung erfolgten direkt anhand der entnommenen Suspension. Für die Analytik des Prozesswassers (bspw. hinsichtlich Nährstoffe) wurde die Biomasse mittels Zentrifugation (10.000 rpm) abgetrennt. In Vorbereitung der Inhaltsstoffanalytik erfolgte die Abtrennung zunächst mit Hilfe von 700 ml Zentrifugenbehältern bei 4.800 rpm unter Nutzung eines Schwingrotors. Anschließend wurde das Pellet in 50 ml Zentrifugenröhrchen 2x unter Nutzung von Reinstwasser gewaschen, so dass hauptsächlich im Prozesswasser und auch an der Biomasse haftende Salze entfernt werden konnten. Die Abtrennung des sich im Pellet befindlichen Wassers konnte mit Hilfe einer Gefriertrocknung durchgeführt werden. Nach erfolgter Trocknung ist durch Mörsern ein feines Pulver als Basis für weitere Inhaltsstoffanalysen vorbereitet worden.

4.3.2. Bestimmung der Konzentration und Produktivität der Biotrockenmasse

Die Bestimmung der Biotrockenmasse erfolgte durch Vakuumfiltration mit vorgetrockneten und ausgewogenen Glasfaserfiltern anhand einer Methode beschrieben durch *Moheimani* (Moheimani et al., 2013). Das auf die Filter aufgetragene Volumen wurde je nach Biotrockenmassekonzentration zwischen 2 und 5 ml gewählt um ein Verstopfen der Filter zu vermeiden. Die Biomasse wurde auf dem Filter mit 10 ml Reinstwasser gespült, um Nährsalze zu entfernen. Im Anschluss wurden die Filter bei 103 °C im Trockenschrank bis zur Trockne gelagert. Vor der gravimetrischen Bestimmung der Biomasse wurden die Filter im Exsikkator an die Umgebungsbedingungen adaptiert. Die Analyse erfolgte als Dreifachbestimmung. Die

Bestimmung der Konzentration ergab sich als Bezug zum eingesetzten Probenvolumen und Angabe in g l^{-1} , der weitere Bezug zum Zeitintervall der Probenentnahme ergibt die Produktivität in $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$.

4.3.3. Bestimmung des Lipidgehaltes (Rohlipid)

Die Bestimmung des Lipidgehaltes erfolgte gravimetrisch, angelehnt an die Methode von *Bligh & Dyer* (Bligh and Dyer, 1959). Die im Bereich der Lipidbestimmung von Mikroalgenbiomasse häufig angewandte Methode geht von feuchtem Probenmaterial aus (original: feuchtes Gewebe). Aufgrund des hohen TS-Gehaltes der getrockneten Mikroalgenbiomasse (> 95 %) kann der Wasseranteil in der Biomasse vernachlässigt werden. Dementsprechend wurde das Wasser direkt in das Lösungsmittelgemisch integriert und ein ternäres Gemisch bestehend aus Chloroform:Methanol:Wasser (1:2:0,8) zusammengesetzt um die nach *Bligh & Dyer* formulierten Extraktionsverhältnisse nachbilden zu können (1-Phasen-Gemisch). Im weiteren Extraktionsverlauf wurde die Lipidfracht durch Zugabe von Chloroform und Wasser und der damit verbundenen Entstehung eines 2-Phasen-Gemisches abgetrennt. Die vorrangig aus Chloroform bestehende untere Phase wurde getrocknet und anschließend das Gewicht gravimetrisch bestimmt. In Bezug auf die initial verwendete Biotrockenmasse wurde somit der Lipidgehalt ermittelt.

4.3.4. Bestimmung der elementaren Zusammensetzung hinsichtlich Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Schwefel (S) sowie Rückschluss auf den Proteingehalt

Die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Mikroalgen hinsichtlich Kohlenstoff (DIN 51721:2001-08, 2001), Stickstoff (DIN 51722-1:1990-07, 1990) und Schwefel (DIN 51724-1:2012-07, 2012) erfolgte als Direktbestimmung mittels Elementaranalyse (vario Max der Fa. Elementar). Hierzu wurden 80 bis 100 mg bei 950 °C verbrannt und die jeweiligen Gehalte als Massenprozent ermittelt. Aus dem Gesamtstickstoffgehalt wurde, unter Zuhilfenahme eines Umrechnungsfaktors (N-Prot-Faktor), welcher den Anteil proteinogenen Stickstoffes berücksichtigt, auf den Gesamtproteingehalt bzw. Rohproteingehalt rückgeschlossen. Es ist mit einem N-Prot-Faktor von 4,78 gerechnet worden (Laurens et al., 2012; González López et al., 2010; Lourenço et al., 2004). Dieses in der Lebens- und Futtermitteltechnologie übliche Verfahren zur Nutzung des N-Prot-Faktors ist auch in den Standardmethoden der *Algae Biomass Organization* (ABO) zur Bestimmung des Proteingehaltes in Mikroalgenbiomasse als primäre Bestimmungsmethode vorgeschlagen um eine robuste Analysenmethode ermöglichen zu können (Laurens et al., 2015).

4.3.5. Bestimmung der elementaren Zusammensetzung hinsichtlich Spurenelemente und Phosphor

Die Untersuchung der elementaren Zusammensetzung der Spurenelemente sowie Phosphor erfolgte nicht in regelmäßigen Abständen, sondern anhand charakteristischer Einzelproben. Dabei wurden die Proben zunächst mit Hilfe des Aufschlusses mit Königswasser behandelt und anschließend die jeweiligen Gehalte an Spurenelementen mittels AAS (Atomabsorptionsspektrometrie) bestimmt. Hierbei kam die Untersuchungsmethode A 2.4.3.1 zur „Bestimmung von Schwermetallen im Aufschluss mit Königswasser“ aus dem Methodenbuch I der VDLUFA zur Anwendung (DIN EN 13346:2001-04, 2001; VDLUFA Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, 1991).

Die Bestimmung des Phosphorgehaltes erfolgte als Gesamtphosphor nach dem Methodenbuch III der VDLUFA zur chemischen Untersuchung von Futtermitteln nach Methode 10.6.1 (Naumann et al., 1976).

4.3.6. Bestimmung des Brennwertes

Die Bestimmung des Brennwertes erfolgte unter Nutzung eines Bomben-Kalorimeters (DIN 51900:2000-04, 2000). Die Untersuchungen wurden im Laufe der Arbeit vom älteren IKA C4000 auf das aktuelle Modell (IKA C200) umgestellt und die gerätespezifischen Unterschiede in der Bestimmung des Brennwertes abgeglichen.

4.3.7. Bestimmung der Nährstoffkomponenten

Die Kontrolle der Nährstoffkomponenten ist anhand der Bestimmung der jeweiligen Nährsalzionen erfolgt. Der Verbrauch an Nährstoffen durch die Mikroalgen konnte durch tägliche Analyse ermittelt und anhand derer die gezielte Nährstoffzugabe angepasst werden. Das für die Analyse der Komponenten verwendete Ionenchromatographiesystem (ICS 1100 der Fa. Thermo Scientific) bestand aus separaten Teilanalgen zur Trennung und Quantifizierung von An- und Kationen, welche zeitlich simultan injiziert und analysiert werden konnten. Die Trennung der Anionen erfolgte mittels der analytischen Trennsäule IonPac AS23 (mit Vorsäule AG23; beides Thermo Scientific, vormals Dionex) und wässrigem Carbonatpuffer (4,5 mM Na_2CO_3 /0,8 mM NaHCO_3) als Eluenten. Für die Kationen wurde eine analytische Trennsäule IonPac CS12A (mit Vorsäule CG12A, beides Thermo Scientific, vormals Dionex) und ein Eluent bestehend aus 20 mM Methansulfonsäure verwendet. Bei Nährmedien für die photoautotrophe Kultivierung von Mikroalgen in Süßwasser ist in aller Regel die N-Quelle (hier Kaliumnitrat, entsprechend in wässriger Phase Kaliumionen, K^+ , und Nitrationen, NO_3^-) mit dem höchsten Konzentrationsbereich anzusetzen, sowohl zu Beginn als auch im Verlauf der Kultivierung. Die benötigte Verdünnung zur Analyse mittels Ionenchromatographie konnte demnach an die Konzentration der Nitrationen angepasst werden um die Bestimmungsgrenze der Systeme einhalten zu können (1 – 100 mg/l).

4.4. Verwendete Doppelschläuche

4.4.1. Geometriedaten und verfahrenstechnische Voruntersuchungen

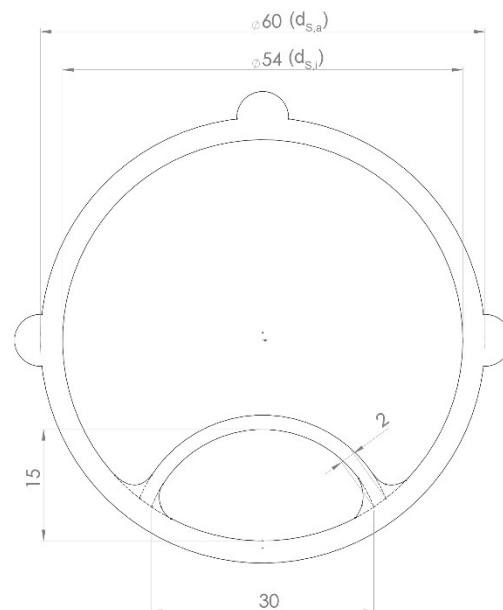
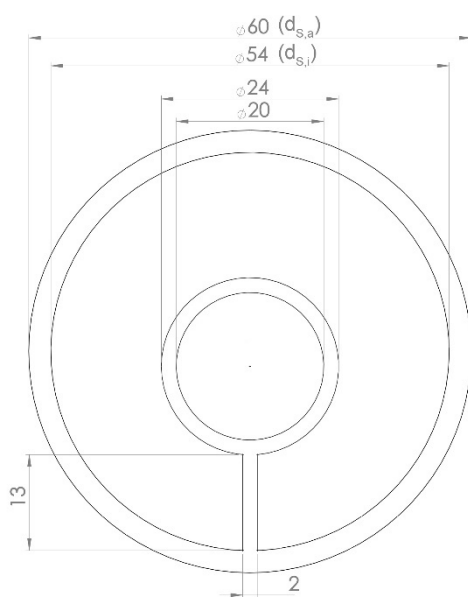


Abbildung 4-4 - Darstellung der verwendeten Geometrievarianten des Doppelschlauchsystems (links: Geometrie 3; rechts: Geometrie 4)

Es sind zunächst verfahrenstechnische Voruntersuchungen notwendig um ein Verständnis über die strömungsmechanische Charakteristik des Doppelschlauchsystems erlangen zu können und schließlich eine Prozessstabilität sicherstellen zu können. Aufgrund der Flexibilität des Doppelschlauchsystems ist das Dehnungsverhalten hinsichtlich radialer Ausdehnung zu untersuchen. Zum einen aus materialtechnischer Sicht zur Absicherung der Druckstabilität gegenüber des Anlagendruckes und zum anderen in Bezug auf das spezifische Füllvolumen in Abhängigkeit des Dehnungsverhaltens. Weiterhin ist die mindestens erforderliche

Strömungsgeschwindigkeit bezüglich der geometrischen Charakteristik der Suspensionskammer zu ermitteln. Hierzu ist eine theoretische Berechnung ausreichend.

Die experimentelle Ermittlung des Dehnungsverhaltens erfolgte im Hinblick auf die radiale Dehnung. Die axiale Dehnung wird vernachlässigt, da sie hinsichtlich Druckstabilität in den verwendeten Prozessbedingungen keine nennenswerte Beeinflussung ausübt. Bei dem Versuchsaufbau zur Bestimmung der radialen Dehnung handelt es sich nicht um einen klassischen Zugversuch sondern um die Bewertung des Arbeitsdruckes und des sicherheitsrelevanten Systemdruckes der Gesamtanlage. Aus diesem Grund wurden eine praxisnahe Versuchsanordnung und Durchführung angestrebt. Als Probenstücke dienten Doppelschlauchsegmente mit einer definierten Länge von 1 m. Diese wurden mit Hilfe von passenden Adaptern an ein Leitungssystem angeschlossen und in horizontaler Ausführung positioniert. Die Mess- und Steuervorrichtung sah vor, dass mit einem definierten Vordruck von 1,5 bar und einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 l h^{-1} das Probenstück befüllt werden konnte. Mit Hilfe eines Kugelhahns, welcher sich am Auslauf des Probenstückes befand, konnte zunächst eine blasenfreie Befüllung sichergestellt und durch Absperrern der Versuchsstart erfolgen. Die Messaufnahme ist einerseits für den Durchfluss und weiterhin für den daraus resultierenden Druckanstieg zu erfolgen. Mit Hilfe des eingefüllten Volumens ist über die mittlere Änderung des Querschnittes die mittlere radiale Dehnung zu bestimmen.

Die Ermittlung der kritischen Reynoldszahl ($Re_{S,krit}$) dient zum Nachweis und der Sicherstellung der Einhaltung turbulenter Strömungsverhältnisse um eine ausreichende Durchmischung der Suspension gewährleisten zu können (hier: anhand Geometrie 4). Die Grundlage für die Bestimmung erfolgt anhand einer Abstrahierung der Grundgeometrie des Lichtkollektors auf eine Rohrschlange. Laut VDI Wärmeatlas G3 lässt sich die kritische Reynoldszahl nach Gl. 4-1 ermitteln (Gnielinski, 2013c).

$$Re_{S,krit} = 2300 * \left[1 + 8,6 * \left(\frac{d_{S,i}}{D_{RW}} \right)^{0,45} \right] \quad \text{Gl. 4-1}$$

Aufgrund der geometrischen Spezifikation des Schlauchquerschnittes wird für den Innendurchmesser ($d_{S,i}$) der Rohrwendel in Gl. 4-1 der hydraulische Durchmesser des Suspensionssegmentes verwendet. Die Berechnung dessen erfolgt als Differenz aus theoretischer Fläche des Vollkreises ($A_{4,VK}$) abzüglich der Querschnittsflächen des Zwischenwandsegmentes ($A_{4,ST,W}$) und der Temperierkammer ($A_{4,T}$) (siehe Abbildung 4-4 unten rechts):

$$d_{Si,H} = 2 * \sqrt{\frac{(A_{4,VK} - A_{4,T} - A_{4,ST,W})}{\pi}}$$
Gl. 4-2

Damit ergibt sich die kritische Strömungsgeschwindigkeit zu:

$$v_{S,krit} = \frac{Re_{S,krit} * v}{d_{Si,H}}$$
Gl. 4-3

Die Versuche zur Bestimmung des realen photoaktiven Volumens im Lichtkollektor erfolgten unter definierten Strömungsverhältnissen sowohl im Suspensions- als auch Temperiersegment. Die Bestimmung des realen Volumens basiert auf der Differenzrechnung aus bekanntem Füllvolumen (unter Nutzung einer Wasseruhr) abzüglich definierter Teilvolumina der peripheren Einrichtung. Anhand des ausgeliterten Mischbehälters kann auf das sich im Suspensionssegment befindliche Flüssigkeitsvolumen unter vorherrschenden Druckverhältnissen zurückgeschlossen werden. Weitere detaillierte Versuchsbedingungen sind direkt in Abschnitt 5.1.2.3 beschrieben.

4.4.2. Bestimmung der Stoffdaten des Silikonmaterialies

Bestimmung der Brechzahl (Brechungsindex) n

Die Bestimmung der Brechzahl erfolgte mit Hilfe eines Abbe-Refraktometers mit einem Filter der Natrium-D-Linie, entsprechend bei 589 nm. Die Brechzahl ist innerhalb des visuellen Spektrums als konstant angenommen.

Die Brechzahl dient zur Ermittlung der Stoffdaten des Silikonschlauches und weiterführend zur Ermittlung des Transmissionsverhaltens. Auf Anfrage bei Herrn Prof. Zscheyge (Hochschule Anhalt, Fachbereich 6) konnte hierfür ein Abbe-Refraktometer genutzt werden (s. Abbildung 4-5).

Das Messprinzip eines Refraktometers beruht auf der Tatsache, dass der Grenzwinkel der Totalreflexion an einer Grenzfläche von der Brechzahl der beteiligten optischen Medien abhängt. Für die Messung werden geeignet zugeschnittene Probenstücke des Silikonschlauches an das Doppelprisma gedrückt und die Grenzfläche der Totalreflexion auf das Strichkreuz im Lichtfeld eingestellt (s. Abbildung 4-6). Bei der Wahl der Silikonproben ist darauf zu achten, dass die Oberflächen frei von sichtbaren Kratzern sind und das Material keine Einschlüsse, wie Blasen und Unreinheiten, aufweist, um ein reproduzierbares Messergebnis erhalten zu können. Im zweiten Lichtfeld kann nun der Brechungsindex abgelesen werden.



Abbildung 4-5 - Abbe-Refraktometer (HS Anhalt FB6, Prof. Zschebye)

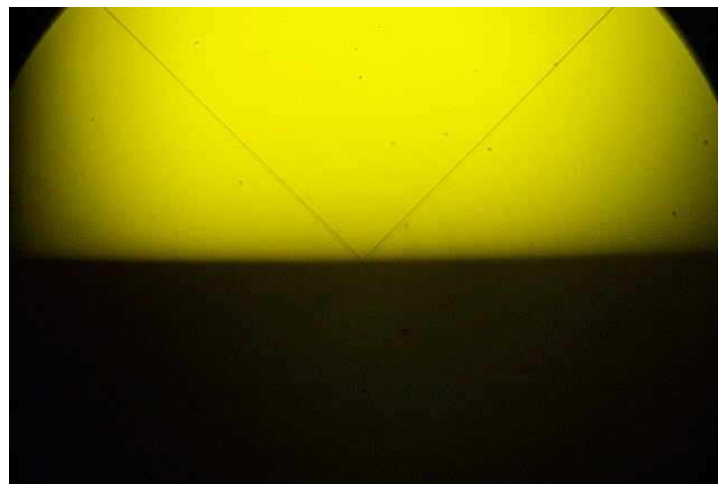


Abbildung 4-6 - Darstellung der Grenze der Totalreflexion auf dem Strichkreuz (Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Abbe-Refraktometer>)

Bestimmung der Dielektrizitätszahl (Permittivitätszahl) ϵ_r

Die Dielektrizitätszahl ϵ_r ist materialspezifisch und gibt den Unterschied zwischen der Kapazität eines Kondensators mit und ohne Dielektrikum an (Lindner, 2001). Die Bestimmung der Dielektrizitätszahl wird mit Hilfe eines Plattenkondensators im elektrischen Schwingkreis durchgeführt.

Die Bestimmung der Kapazität (C) des Kondensators mit Dielektrikum (Schlauchprobe) kann anhand nachfolgender Gleichung vorgenommen und anschließend die Permittivitätszahl berechnet werden (Lindner, 2001):

$$C = \epsilon_r * \epsilon_0 * \frac{A_K}{e_K}$$

Gl. 4-4

Dabei ist ε_0 die elektrische Feldkonstante ($8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$), e_K ist der Plattenabstand des Kondensators und entspricht der Dicke der Silikonproben und A_K ist die Kondensatorfläche.

Die Permittivitätszahl kann mit der magnetischen Permeabilität (μ_r) nach Gl. 4-5 verknüpft werden. Als Resultat entsteht die Brechzahl.

$$n = \sqrt{\varepsilon_r * \mu_r} \quad \text{Gl. 4-5}$$

Extinktionskoeffizient (κ):

Verwendete Schlauchproben bestanden aus Materialien der Geometrie 3 und Geometrie 4 mit Wandstärken von jeweils 3 mm. Daraus ergeben sich Schichtdicken von 3 mm, 6 mm und 9 mm.

Der theoretische Hintergrund ist Bouguer's Gesetz zu absorbierter Strahlung in Schichten (Duffie and Beckman, 2013):

$$dI = -I * K * dx \quad \text{Gl. 4-6}$$

Die Bestimmung des Extinktionskoeffizienten erfolgte mit Hilfe eines UV/VIS Spektralphotometers (HACH LANGE DR 6000).

Die Messungen erfolgten anhand eines Scans über einen Wellenlängenbereich von 200 bis 1100 nm mit Messintervallen von 5 nm. Die Daten der jeweiligen Extinktionen werden arithmetisch gemittelt und im Anschluss in Bezug zur Schichtdicke gesetzt.

5. Ergebnisse

5.1. Grunddatenermittlung zum Tannenbaum-Photobioreaktor

5.1.1. Systemgrenze Silikonschlauch

5.1.1.1. Ermittlung relevanter Stoffdaten für die Bewertung der Strahlungscharakteristika

Für die Modellierung des Strahlungsverhaltens der auf den Lichtkollektor eintreffenden solaren Strahlung ist vorbetrachtend die Ermittlung materialspezifischer Stoffdaten erforderlich. Hierzu zählen die Brechzahl (alt: Brechungsindex) sowie die Dielektrizitätszahl und im Weiteren die magnetische Permeabilität.

Vorbereitend zu den Untersuchungen sind aus den zu vermessenden Materialien Probenstücke definierter Größe herausgeschnitten worden (Abbildung 5-1).

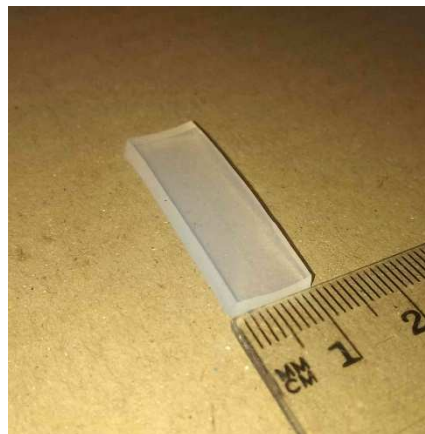


Abbildung 5-1 - Probenstück des Silikonmaterials (beispielhaft)

Die Ergebnisse der folgenden Untersuchungen sind in Tabelle 5-1 zusammenfassend dargestellt.

Brechzahl n

Die Bestimmung der Brechzahl erfolgte mit Hilfe eines Abbe-Refraktometers mit Doppelprisma. Beim Beachten oben genannter Anforderungen an das Probenmaterial und durch ein Andrücken der Silikonproben auf die Auflagefläche des Prismas konnten reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Hierbei konnte bei allen untersuchten Proben die gleiche Brechzahl von 1,417 bestimmt werden, was im Bereich der angegebenen Werte für RTV-Elastosil (raumtemperaturvernetzend) von 1,404 und 1,410 liegt (Wacker Silicone Produktkatalog Elastosil).

Dielektrizitätszahl (Permittivitätszahl) ϵ_r und magnetische Permeabilität μ_r

Die untersuchten Schlauchgeometrien wiesen unterschiedliche Dielektrizitätszahlen auf. Mit Hilfe von Gl. 4-4 (s. Abschnitt 4.4.2) wurde zunächst die Kapazität des Kondensators im Schwingkreis mit Silikonschlauchprobe bestimmt und anschließend die Dielektrizitätszahl ϵ_r ermittelt. Mit Hilfe der Maxwell-Relation (Gl. 3-20) erfolgt die Berechnung der magnetischen Permeabilität μ_r , unter Zuhilfenahme der zugehörigen Brechzahl. Für die Geometrie 3 konnte ϵ_r zu 3,004 und μ_r zu 0,667 und für Geometrie 4 ϵ_r zu 2,636 und μ_r zu 0,767 bestimmt werden.

Extinktionskoeffizient κ

Die Bestimmung des Extinktionskoeffizienten des Silikonmaterials (κ) ist erforderlich, um Absorptions- und Streueffekte in Bezug zum Strahlungsverhalten mathematisch bewerten zu können. In Anlehnung an die Gesetzmäßigkeit von Bouguer (vgl. Gl. 4-6) erfolgte die Vermessung der Extinktion in Abhängigkeit der Schichtdicke des Probenmaterials. Die Variabilität der Schichtdicke ist durch ein spalt- und luftfreies Aneinanderlegen einer unterschiedlichen Anzahl von Probenstücken gleichen Materials und definierter Schichtdicke durchgeführt worden. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise sind die Oberflächen der beiden Grenzflächen plan und parallel.

Im Ergebnis ist anhand von Abbildung 5-2 ein erwartungsgemäß lineares Verhalten zwischen Extinktion und Schichtdicke sichtbar. Anhand einer linearen Regressionsgeraden ($y=m*x+n$) konnte der, hinsichtlich der Wellenlänge, mittlere Extinktionskoeffizient anhand des Geradenanstieges m ermittelt werden.

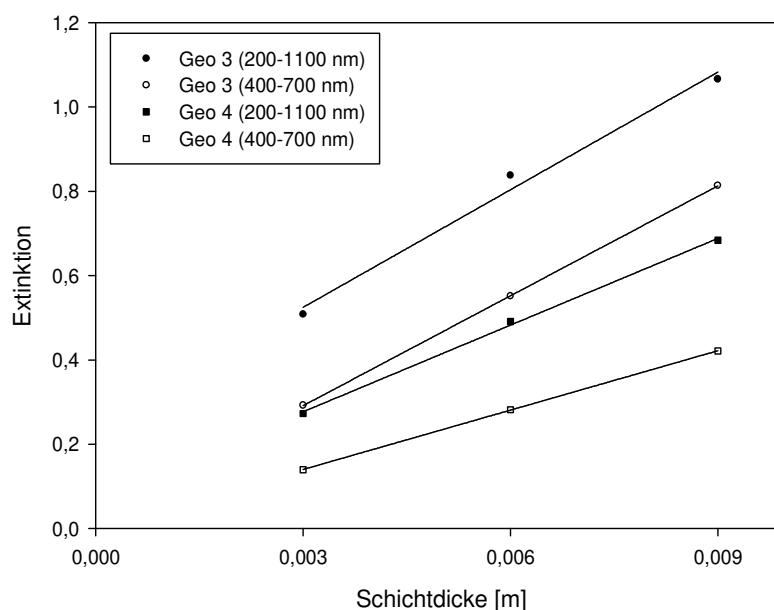


Abbildung 5-2 - Darstellung der mittleren Extinktionskoeffizienten der vermessenen Silikonmaterialien in Abhängigkeit der Gesamtschichtdicke

Die schwarzen Datenpunkte repräsentieren die mittleren Extinktionswerte für einen Wellenlängenbereich von 200 bis 1100 nm, die weißen Datenpunkte hingegen für einen Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. Letzteres entspricht dem PAR-Bereich. Sowohl bezogen auf den Gesamtwellenlängenbereich als auch den PAR-Bereich liegt der mittlere Extinktionskoeffizient für das Silikonmaterial der Geometrie 3 (runde Datenpunkte) deutlich über denen der Geometrie 4 (viereckige Datenpunkte), wie in Tabelle 5-1 dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass das Absorptionsverhalten des Silikons von Geometrie 3 über dem der Geometrie 4 liegt, was anhand von Abbildung 5-3 bereits makroskopisch sichtbar ist.



Abbildung 5-3 - vergleichende Darstellung der Trübung der verwendeten Silikonmaterialien Geometrie 3 (links) und 4 (rechts)

Um die Abhängigkeit von K in Bezug zur Wellenlänge ermitteln und darstellen zu können, fand eine lineare Modellbildung anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Anwendung (vgl. Gl. 5-1).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e}) * (\Psi_{e,i} - \bar{\Psi}_e)}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Jeweils für die verwendeten Materialien sind die Schichtdicken (e) sowie die dazugehörigen Extinktionswerte (Ψ_e) über den Wellenlängenbereich in Zusammenhang gebracht worden. Daraus ergibt sich ein funktioneller Zusammenhang zwischen Wellenlänge und K (Abbildung 5-4).

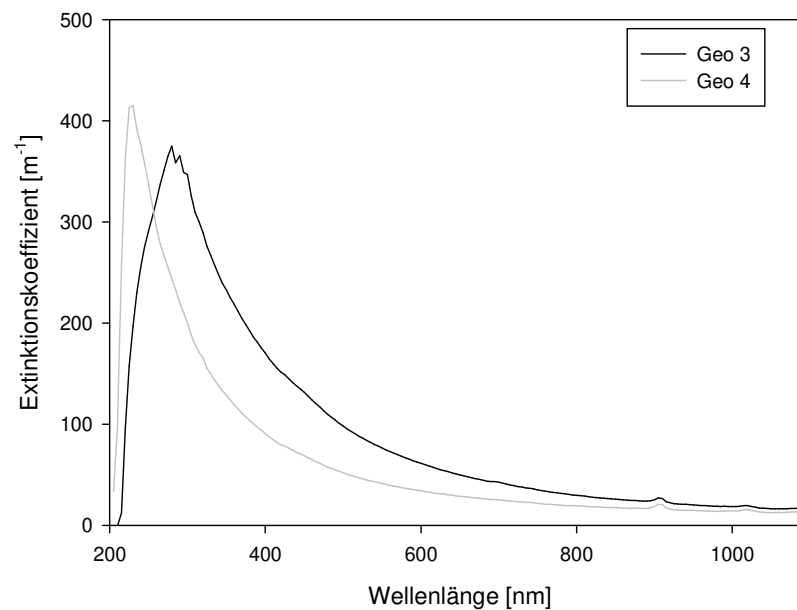


Abbildung 5-4 - wellenlängenabhängiger Extinktionskoeffizient nach Anwendung von Gl. 5-1

Beide Kurven, sowohl für Geometrie 3 (schwarze Kurve) als auch Geometrie 4 (graue Kurve), zeigen einen qualitativ vergleichbaren Verlauf einer potentiellen Abnahme mit zunehmender Wellenlänge. Der geringere Wert des mittleren K der Geometrie 4 spiegelt sich in der stärkeren Abnahme des Kurvenverlaufes wider.

Tabelle 5-1 - Übersicht zu den Ergebnissen der ermittelten Stoffdaten der untersuchten Silikonmaterialien

Schlauchgeometrie	Brechzahl	Dielektrizitätszahl	Extinktionskoeffizient	
	n [-]	ϵ_r [-]	$K_{200-1100nm}$ [m^{-1}]	$K_{400-700nm}$ [m^{-1}]
3	1,417	3,004	93,50	86,95
4	1,417	2,636	68,48	47,00

5.1.1.2. Strahlungsverhalten an der Phasengrenze Luft – Silikonschlauch

Die Anwendung der Fresnel'schen Formeln (Gl. 3-15 - Gl. 3-19) an der Phasengrenze Luft:Silikon sowie die Zuhilfenahme des Gesetzes von Bouguer zur Bewertung des Transmissionsverhaltens bei absorbierenden Materialien, in dem Fall der Silikonschicht, (Gl. 3-21) führt zur Ermittlung des Vermögens der untersuchten Silikonmaterialien zur Reflexion, Transmission und Extinktion (vgl. Gl. 3-19, Gl. 3-26, Gl. 3-27 und Abbildung 5-5). In Abhängigkeit des Einfallwinkels der Strahlung ist ersichtlich, dass die beiden untersuchten Materialien ein vergleichbares Verhalten aufweisen. Bei senkrechtem Einfall (Einfallwinkel ist 0°) an der Phasengrenze Luft-Silikon und dem Durchtreten des Silikonmaterials verteilt sich die Strahlung gemäß Reflexions-, Transmissions- und Extinktionsgrad zu 0,19, 0,59 sowie 0,22 bei Geometrie 3 und 0,15, 0,72 sowie 0,13 bei Geometrie 4. Bis zu einem Einfallwinkel von 60 (Geo3) bzw. 62 Grad (bei Geo 4) ist ein stabiles Niveau des Strahlungsverhaltens festzustellen und es kommt lediglich zu einer Veränderung von 10 % gegenüber dem senkrechten Einfall. Mit weiter zunehmendem Einfallwinkel sinkt die Transmission bei gleichzeitigem Anstieg des reflektierten Anteils. Bei Erreichen von 90 Grad liegen Phasengrenze und Strahlengang parallel und es erfolgt keine Transmission bzw. Extinktion – die Strahlung geht ins Unendliche, in der Praxis am Schlauch vorbei. In dem Modell wird dieser Fall mit einem Reflexionsgrad von 1 wiedergespiegelt.

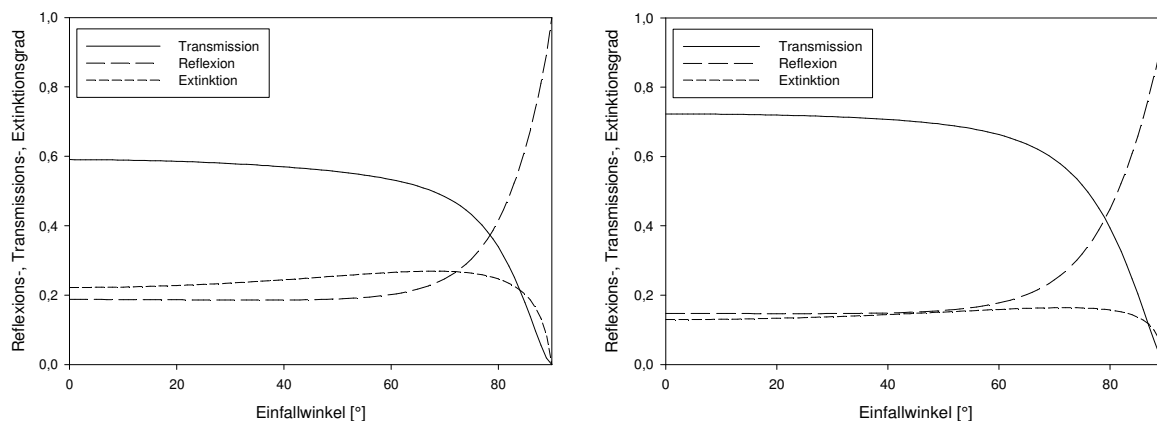


Abbildung 5-5 - Strahlungsverhalten nach Fresnel hinsichtlich Reflexion, Transmission und Extinktion in Abhängigkeit des Einfallwinkels (Geo 3 (links); Geo4 (rechts))

Die vergleichende Betrachtung beider Materialien hinsichtlich des Transmissionsgrades zeigt einen Unterschied bis zu einem Winkel von 62 Grad von 18,3 und 19,8 % (s. Abbildung 5-6). Der erhöhte Transmissionsgrad wird durch einen um 0,04 geringeren Reflexions- sowie um 0,09 geringeren Extinktionsgrad erreicht.

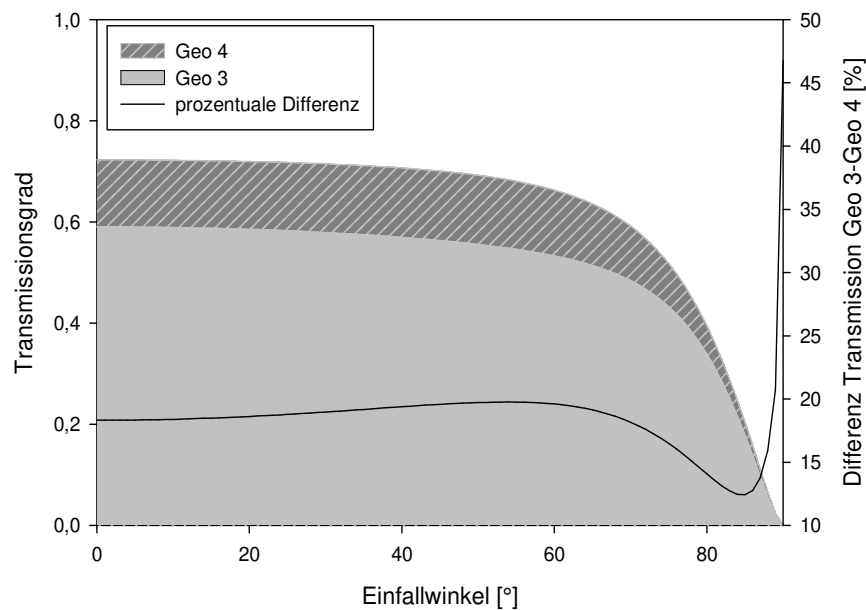


Abbildung 5-6 - Vergleich Gesamttransmissionsgrad Geometrie 3 und Geometrie 4 in Abhängigkeit des Einfallswinkels

Im Folgenden ist das Strahlungsverhalten bei senkrechtem Einfall in Abhängigkeit der Wellenlänge berechnet. Hierzu sind die mathematischen Gleichungen zum Strahlungsverhalten mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten angepasst worden (vgl. Abbildung 5-4). Damit lassen sich wellenlängen-spezifische Werte für Reflexions-, Transmissions- und Extinktionsgrade ermitteln – siehe Abbildung 5-7.

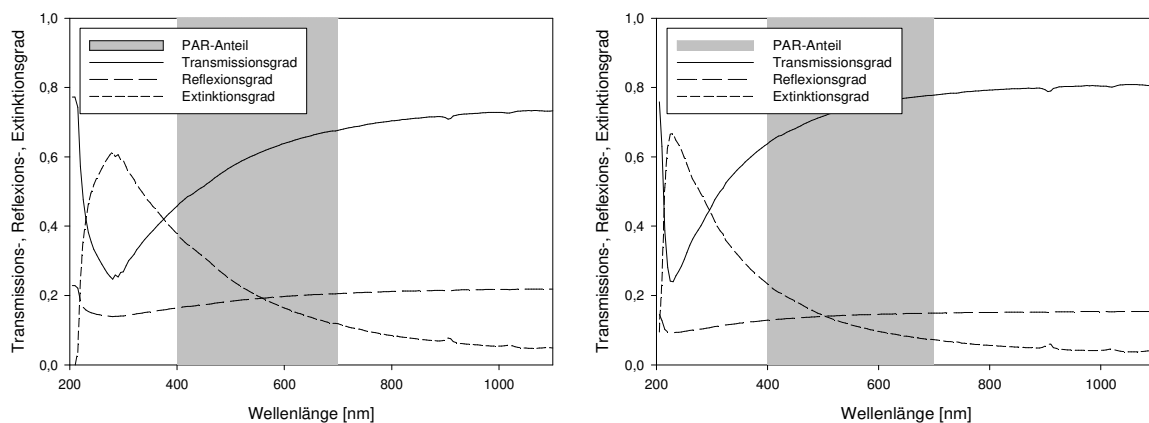


Abbildung 5-7 - berechnetes Strahlungsverhalten in Abhängigkeit von der Wellenlänge und K (PAR-Bereich von 400 bis 700 nm ist grau hinterlegt)

In einem Wellenlängenbereich von 200 bis 1100 nm ist das Strahlungsverhalten für die untersuchten Silikonmaterialien modelliert. Zur einfacheren Übersicht ist der PAR-Bereich farblich hervorgehoben (grau hinterlegt). Das Reflexionsverhalten zeigt sich bei beiden Materialien als vergleichsweise stabil bei 0,19 (Geo3) bzw. 0,14 bei Geometrie 4.

Transmissions- und Extinktionsverhalten zeigen ein gegenläufiges funktionales Verhalten, da sie maßgeblich vom Extinktionskoeffizienten beeinflusst werden. Aufgrund des Gesetzes von Bouguer ist dieses eng an κ gekoppelt und weist dementsprechend ein hinsichtlich κ vergleichbares Verhalten auf (vgl. Abbildung 5-4). Bei Geometrie 3 lagen die Werte im Mittel bei 0,22, über den gesamten Wellenlängenbereich 0,20, bei Geometrie 4 0,16 und 0,13 im PAR-Bereich. Hervorzuheben ist der Unterschied der Minima des Transmissionskoeffizienten bei gleichzeitigem dazugehörigem Maximum der Extinktion, bei Geometrie 4 gegenüber Geometrie 3, und zwar bei 230 gegenüber 280 nm. Weiterhin ist ein steilerer Anstieg im Transmissionsverhalten bei Geometrie 4 festzustellen. In Kombination mit dem Erreichen eines höheren Transmissionsgrades bei 1100 nm von 0,81 gegenüber 0,73 ist das höhere Gesamtverhalten des Transmissionsgrades von Geometrie 4 festzustellen. Im PAR-Bereich variiert der Unterschied mit zunehmender Wellenlänge von 28,2 bis 13,1 (9,1 % bei 1100 nm) - Abbildung 5-8.

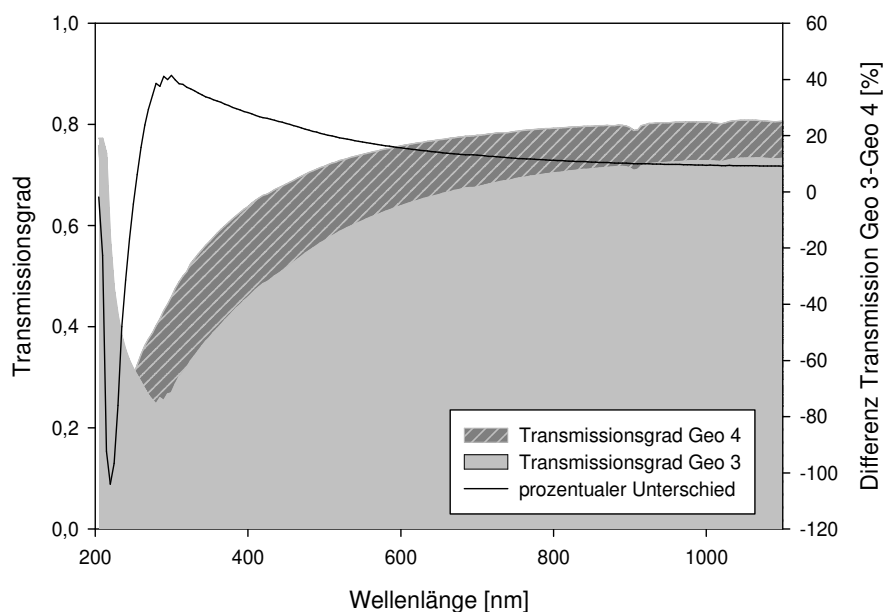


Abbildung 5-8 - Vergleich Gesamttransmissionsgrad Geometrie 3 und Geometrie 4 in Abhängigkeit der Wellenlänge

Zur Überprüfung des rechnerisch ermittelten Strahlungsverhaltens erfolgte eine experimentelle Bestimmung des Transmissionsgrades im Wellenlängenbereich mittels Spektralphotometer. Im Vergleich zu den jeweils berechneten Verläufen des Transmissionsgrades (durchgezogene Linie) sind die Photometer-Scans (gestrichelte Linie) im gesamten Wellenlängenbereich in Abbildung 5-9 dargestellt.

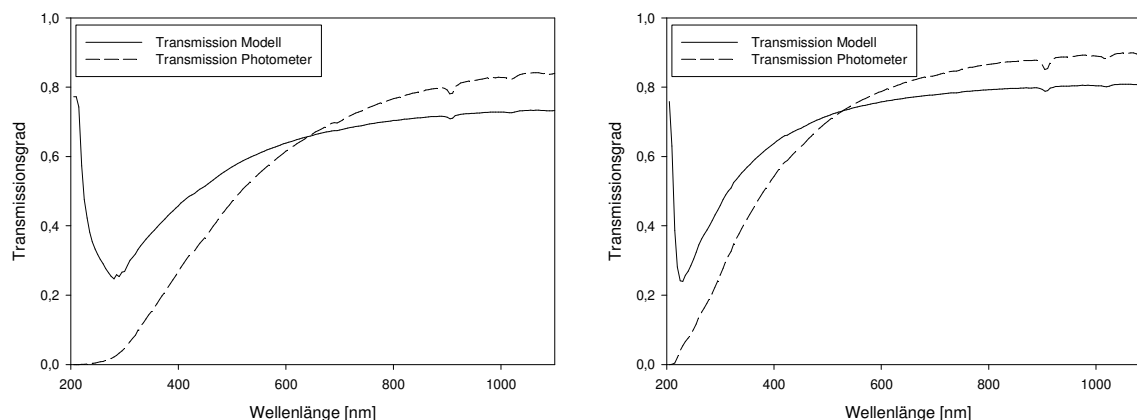


Abbildung 5-9 - Vergleich Modell mit Photometermessung links: Geo 3, rechts: Geo 4

Die vergleichende Betrachtung der jeweiligen Scans zeigt im Verlauf der Wellenlänge eine prinzipielle Vergleichbarkeit hinsichtlich des funktionalen Zusammenhanges. Jedoch kommt es bezüglich der wellenlängenspezifischen Transmissionsgrade bis zu einer Wellenlänge von 640 bzw. 530 nm zu einer Überbewertung, oberhalb der genannten Wellenlängenbereiche zu einer Unterbewertung des Transmissionsgrades. Der ermittelte Gesamttransmissionsgrad im untersuchten Wellenlängenbereich zeigt jedoch eine hinreichend gute Übereinstimmung. Für die Geometrie 3 liegen die prozentualen Abweichungen bei 8,8 % (200-1100 nm) und 11,4 % (400-700 nm), bei der Geometrie 4 in einem deutlich engeren Bereich von 1,5 % (200-1100 nm) und 0,9 % im PAR-Bereich (vgl. Tabelle 5-2). Die prozentual deutlich geringere Abweichung bei der Geometrie 4 spricht für eine bessere Messbarkeit des Probenmaterials, vermutlich verursacht durch stärkere Streueffekte bei Geometrie 3 und einer damit verbundenen größeren Fehlerbehaftung bei der Erfassung des Strahlenganges der Transmission.

Tabelle 5-2 - Gegenüberstellung des Strahlungsverhaltens bezüglich Transmission für Modell und Photometer für die Geometrien 3 und 4 bei senkrechtem Einfall (Anzahl Messungen Photometer n=3)

Bezeichnung	λ [nm]	Geometrie 3	Geometrie 4
Modell	400 – 700	0,59 (0,46 – 0,68)	0,73 (0,64 – 0,78)
	200 - 1100	0,60 (0,25 – 0,73)	0,70 (0,24 – 0,81)
Photometer	400 – 700	0,53	0,73
	200 - 1100	0,55	0,69

5.1.1.3. Transmissionsverhalten verschiedener Werkstoffe im Vergleich

Bei Lichtkollektoren von tubulären Photobioreaktorsystemen häufig zum Einsatz kommende Werkstoffe sind Glas (in der Regel Borosilikatglas) und Hart-PVC. Für einen Vergleich zu den silikon-basierten Werkstoffen ist Glas in Form einer planen Platte im Spektralphotometer unter den gleichen Bedingungen wie die Silikonproben untersucht worden. Für den Vergleich von Hart-PVC konnte das Transmissionsverhalten im sichtbaren Bereich anhand veröffentlichter Messdaten entnommen werden. Hierbei handelt es sich um das Hart-PVC Dekadur G „algae“ der Firma Georg Fischer, allerdings nicht um eigene Messdaten (Schuessler, 2015; Schuessler et al., 2012). Beide Werkstoffe sind dem Transmissionsverhalten der Geometrie 4 gegenübergestellt (siehe Abbildung 5-10). Gleichzeitig sollte ein möglicher Einfluss eines Gewächshauses mit einfachen Mitteln abstrahiert werden. Hierzu ist auf die Erklärungen und Transmissionsgrade aus Abschnitt 2.3.1 zurückgegriffen worden. Für Faktoren von 0,8 (gestrichelte Linien) und 0,9 (gestrichelt-gepunktete Linien), als representative Reduzierungen des Transmissionsverhaltens durch eine Aufstellung der Lichtkollektoren innerhalb eines Gewächshauses, ist der wellenlängenabhängige Transmissionsgrad neu bewertet worden.

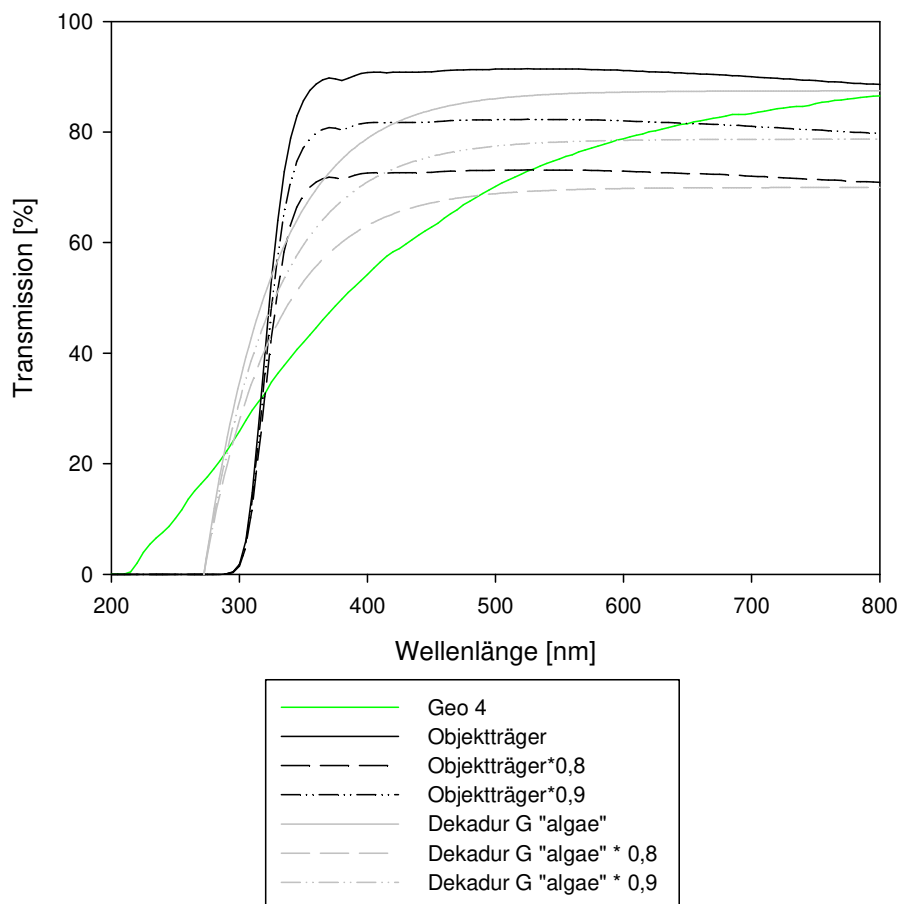


Abbildung 5-10 -Transmissionsverhalten verschiedener Werkstoffe (Silikon, Glas, Hart-PVC)

Im Zusammenhang mit Tabelle 5-3 lässt sich der potentielle Gesamttransmissionsgrad bewerten. Ab ca. 490 nm (bei Dekadur G „algae“) und 530 nm (bei Glas) liegt der Transmissionsgrad mit einer Abschwächung von 80 % unterhalb der des Doppelschlauchsystems. Der Vergleich des mittleren Transmissionsgrades innerhalb eines Spektrums von 400 bis 700 nm zeigt, dass die Transmissionseigenschaften gegenüber Dekadur G „algae“ mit 0,73 zu 0,69 einen höheren und mit dem untersuchten Glas den gleichen Wert annehmen. In dieser Betrachtung sind die Reduzierungen durch Trägerstrukturen oder Ähnliches nicht berücksichtigt, was zu einer weiteren Reduzierung des Gesamttransmissionsverhaltens von Lichtkollektoren innerhalb von Gewächshäusern führen würde.

Tabelle 5-3 - Transmissionsgrade verschiedener Werkstoffe ohne und unter Berücksichtigung von Verlusten (bsph.) eines Gewächshauses (Transmissionsgrad als Mittelwert zwischen 400 und 700 nm)

Werkstoff	Faktor Gewächshaus	Transmissionsgrad
Geo 4	1	0,73
Dekadur G „algae“	1	0,86
Dekadur G „algae“	0,9	0,77
Dekadur G „algae“	0,8	0,69
Glas	1	0,91
Glas	0,9	0,82
Glas	0,8	0,73

5.1.2. Untersuchungen zur strömungstechnischen Charakteristik des Doppelschlauchsystems

5.1.2.1. Berechnung der Schlauchlänge

Die äußere Mantelfläche des Doppelschlauches des Lichtkollektors bildet die photoaktive Fläche des Reaktorsystems. Zur Berechnung dieser Mantelfläche A_M werden der äußere Umfang d_A sowie die Länge des Schlauches L_S herangezogen.

$$A_M = \pi * d_{S,a} * L_S \quad \text{Gl. 5-2}$$

Die Schlauchlänge L_S kann anhand einer mathematischen Beschreibung einer kegelstumpfförmigen Helixstruktur ermittelt werden. Basierend auf einer archimedischen Spirale wird eine Raumkurve auf einer gedachten Mantelfläche eines Kegelstumpfes entwickelt (Gl. 5-3 bis Gl. 5-5). Als Eingangsgrößen dienen, wie in Abbildung 5-11 dargestellt, der untere Reaktorradius ($R_{PBR,unten}$), die Ganghöhe einer Schlauchwindung ($h_W = 91,77$ mm)

sowie die Anzahl der Windungen (n_W). Damit lässt sich die helikale Struktur in Abhängigkeit des Drehwinkels (φ) in Parameterform darstellen:

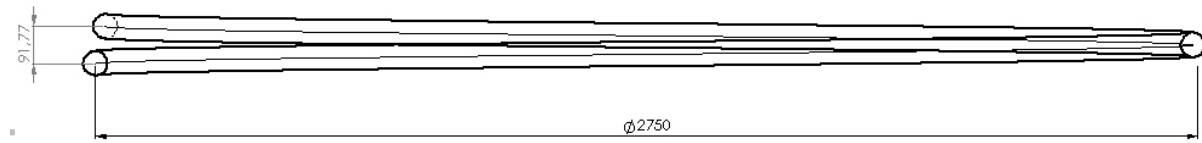


Abbildung 5-11 -Eingangsgrößen für die mathematische Beschreibung der helikalen Gerüststruktur des Lichtkollektors

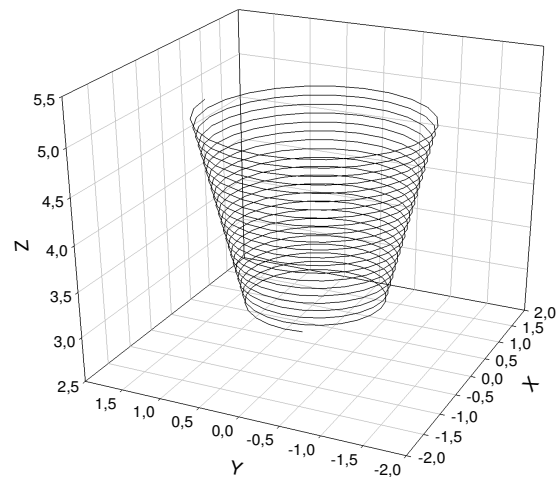
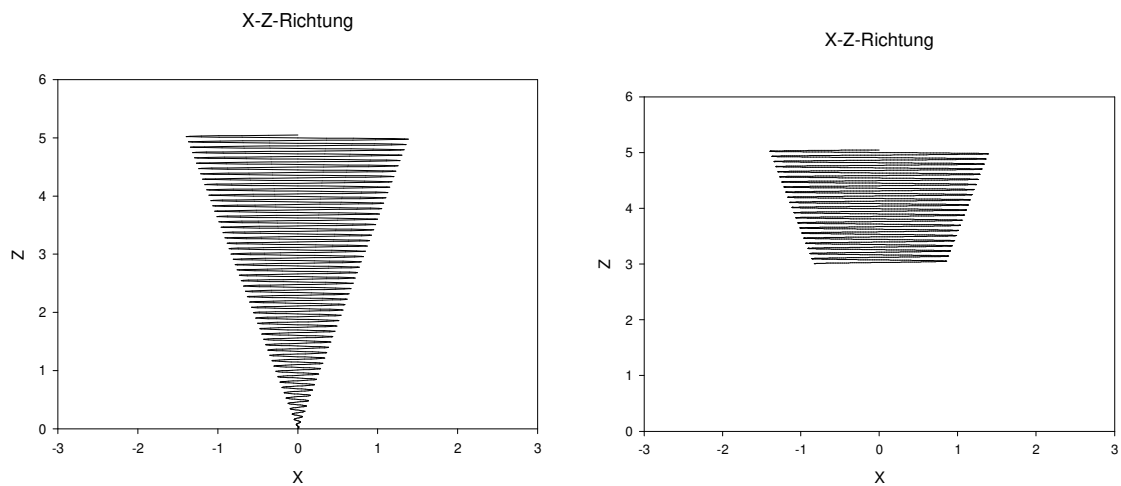


Abbildung 5-12 -Entwicklung der helikalen Gerüststruktur des Lichtkollektors; oben links: kegelförmige Abbildung nach Parameterbeschreibung; oben rechts: kegelstumpfförmige Darstellung unter Berücksichtigung der Reaktorhöhe; unten: Helix des Lichtkollektors mit Reaktorhöhe in x-y-z Ansicht

$$x(\varphi) = \frac{R_{PBR,unten}}{2 * \pi * n_W} * \varphi * \sin \varphi$$

Gl. 5-3

$$y(\varphi) = \frac{R_{PBR,unten}}{2 * \pi * n_W} * \varphi * \cos \varphi \quad \text{Gl. 5-4}$$

$$z(\varphi) = \frac{h_W}{2 * \pi} * \varphi \quad \text{Gl. 5-5}$$

Ausgehend von $\varphi = 0^\circ$ lässt sich die Helix in alle drei Raumrichtungen entwickeln bis der Reaktorradius in x-Richtung erreicht ist (vgl. Abbildung 5-12 oben links). Um die Kegelstumpfstruktur des Tannenbaumreaktors abbilden zu können, wird der untere Kegel bei der erforderlichen Höhe von 2 m „abgeschnitten“ (vgl. Abbildung 5-12 oben rechts).

Somit ergibt sich die Reaktorgeometrie als Helixstruktur mit den oben genannten Eingangsgrößen (Abbildung 5-12 unten).

Um aus dem Parametersystem die Schlauchlänge berechnen zu können, muss das Bogenelement bestimmt werden. Hierzu werden die Ableitungen ersten Grades der jeweiligen Richtungskomponente ermittelt und anschließend anhand folgender Grundgleichung zusammengefasst:

$$\left\| \frac{d\vec{x}}{d\varphi} \right\| = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\varphi}\right)^2} \quad \text{Gl. 5-6}$$

Anschließend kann durch Integration nach $d\varphi$ die Vorschrift für die Berechnung der Länge der Helix aufgestellt werden.

$$L_S = \frac{1}{2 * \pi} \int_{70,4 * \pi}^{114 * \pi} \sqrt{\frac{R_{PBR,unten}^2}{n_W^2} * (1 + \varphi^2) + h_W^2} \quad \text{Gl. 5-7}$$

Die Integrationsgrenzen müssen entgegengesetzt interpretiert werden, da die Helix, aufgrund der mathematischen Modellierung, „auf dem Kopf steht“ (vgl. Abbildung 5-12). Demnach entspricht die obere Integrationsgrenze von $114 * \pi$ der Reaktorhöhe $h_W = 0$ m und einer Windungszahl von $n_W = 0$. Die untere Integrationsgrenze von $70,42 * \pi$ entspricht einer Reaktorhöhe von 2 m und einer Windungszahl von 21,78 (Windungsanzahl n_W des Lichtkollektors wird in späteren Berechnungen als ganzzahliger Wert 22 fortgeführt). Die mit Hilfe von Gl. 5-7 berechnete Schlauchlänge für einen Lichtkollektor beträgt demnach (inkl. Reaktorzu- und abführung):

$$L_S = 155 \text{ m} \quad \text{Gl. 5-8}$$

Mit Hilfe von Gl. 5-2 kann die äußere Mantelfläche des Doppelschlauches eines Lichtkollektors berechnet werden zu:

$$A_M = \pi * d_{S,a} * L_S = \pi * 0,06 \text{ m} * 155 \text{ m} = 29,2 \text{ m}^2 \quad \text{Gl. 5-9}$$

5.1.2.2. Strömungstechnische Untersuchungen des Silikonschlauches

Im Kultivierungsbetrieb herrscht prozessbedingt aufgrund der kontinuierlichen Umwälzung der Mikroalgensuspension ein Überdruck im Silikonschlauch des Lichtkollektors. Im Hinblick darauf erfolgte die Untersuchung des Einflusses des vorherrschenden Anlagendruckes auf ein Dehnungsverhalten des Silikonmaterials. In axialer Richtung, was eine Längenänderung des Schlauches zur Folge hätte, kann dieser Effekt aufgrund der großen Länge von 155 m vernachlässigt werden. Das Dehnungsverhalten in radialer Richtung spiegelt sich in einer Veränderung des Querschnittes des Suspensionssegmentes wider und hat wiederum einen Einfluss auf das photoaktive Volumen. Im Hinblick auf die Anlagensicherheit sollte das elastische Verhalten des Silikonmaterials bis zum Bersten untersucht werden. Anhand des Versuchsaufbaus in Abschnitt 4.4.1 sind definierte Schlauchproben von 1 m Länge zunächst blasenfrei und drucklos mit Wasser befüllt worden. Mit Versuchsbeginn erfolgte die zeitliche Aufzeichnung sowohl des eingefüllten Volumens an Wasser sowie der damit einhergehenden Änderung des Systemdruckes der Messstrecke. Da diese bis auf das Silikonmaterial des Probenstückes als inkompressibel angesehen werden kann, konnte auf ein definiertes Druck-Dehnungs-Verhalten des Silikonmaterials zurückgeschlossen werden. Anhand von Abbildung 5-13 ist der typische Verlauf von verstrekbaren Kunststoffen ersichtlich, das heißt, dass die Streckspannung höher ist als die Bruchspannung, bei der das Material zerreißt. Im rechten Graphen ist der elastische Bereich als Ausschnitt bis zu einer radialen Dehnung von 15 mm dargestellt. Mit Hilfe der eingetragenen Hilfsgeraden (grau) kann ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen radialer Dehnung (8,2 mm) und Systemüberdruck (0,92 barÜ) abgelesen werden. Hierbei handelt es sich um den elastischen Bereich, in dem das Silikonmaterial ein reversibles Verhalten aufweist. Bei den hier durchgeführten Versuchen handelt es sich um Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur. Das bei Elastomeren ausgeprägte Kriechmodul wurde nicht bestimmt. Ebenso muss beachtet werden, dass es sich nicht um einen Zugversuch handelt und dementsprechend nicht das E-Modul anhand des linearen Anstieges berechnet werden kann. Vielmehr bilden die Versuchsbedingungen die unter Kultivierungsbedingungen auftretenden Belastungen als Praxisversuch ab.

Das Ziel für stabile Kultivierungsergebnisse ist die komplette Durchmischung innerhalb der Mikroalgensuspension. Das wiederum setzt turbulente Strömungsverhältnisse voraus. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über die kritische Reynoldszahl ($Re_{S,krit}$) notwendig, anhand dessen die mindestens erforderliche Strömungsgeschwindigkeit abgeleitet und, daraus folgend, der dabei vorhandene Anlagendruck ermittelt werden kann. Die Berechnung von $Re_{S,krit}$ erfolgt nach Gl. 4-1 in Anlehnung an eine Rohrschlange. Um einen Kegelstumpf nach zu empfinden, wird der Durchmesser D durch den mittleren Durchmesser des Lichtkollektors D_M ersetzt (Berechnung anhand Gl. 5-17).

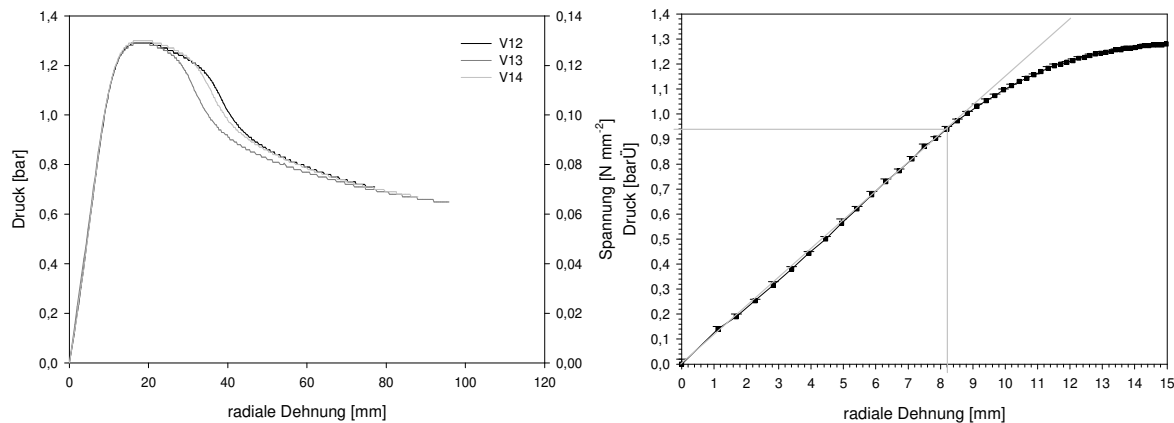


Abbildung 5-13 – Druck-Dehnungs-Verhalten des Silikonschlauches

Die damit errechnete kritische Reynoldszahl beträgt 5805. Mit Hilfe von Gl. 4-3 lässt sich damit die kritische Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Suspensionssegmentes berechnen. Das Ergebnis von $0,121 \text{ m s}^{-1}$ gibt die Mindestströmungsgeschwindigkeit der Mikroalgensuspension an, ab welcher turbulente Verhältnisse herrschen und folglich eine stoffliche und energetische Durchmischung stattfindet. Das heißt, ein Absetzen von Mikroalgenzellen infolge zu geringer Strömungsgeschwindigkeit wird verhindert, eine Durchmischung von Gasen und Flüssigkeiten kann stattfinden und ein definierter Wärmetransport ist gewährleistet. Für die Kultivierungen sollten dennoch $0,4 \text{ m s}^{-1}$ angestrebt werden, da es sich bei $v_{S,krit}$ lediglich um den Übergang zur turbulenten Strömung handelt.

5.1.2.3. Bestimmung des realen photoaktiven Volumens

Die Bestimmung des realen photoaktiven Volumens ist erforderlich, da es sich bei dem verwendeten Silikonmaterial um einen flexiblen Werkstoff handelt. Das Ausdehnungsverhalten konnte im vorigen Abschnitt bestimmt werden. Um das reale Volumen im Suspensionssegment ermitteln zu können, ist eine volumenmäßige Bestimmung des kompletten Anlagenvolumens erforderlich. Letzteres dient im Weiteren ebenso der Bestimmung der im Kultivierungssystem befindlichen realen Biomasse. Die verwendete Anlagenverschaltung setzt sich zusammen aus zwei Lichtkollektoren, einem Mischbehälter sowie deren peripheren Verbindungsschläuchen, des Pumpenvolumens und der Verteilungsstation (Möglichkeit der Verknüpfung zu weiteren Modulen). Die einzelnen Volumina wurden entweder direkt durch getrenntes Befüllen mit definierten Wasservolumina ausgelitert oder anhand geometrischer Berechnung (Spiralschläuche als verbindende Elemente zwischen Mischbehälter und Lichtkollektoren) ermittelt. Das aufsummierte periphere Volumen ergab 250 l.

Um das reale Volumen der Lichtkollektoren bestimmen zu können, erfolgte zunächst die Befüllung des Gesamtsystems mit einer definierten Menge an Wasser. Die im Kultivierungs-

betrieb zu verwendenden strömungstechnischen Parameter für die äußere Schlauchkammer liegen bei $0,4 \text{ m s}^{-1}$, was einem gemessenen Anlagendruck von $0,2 \text{ barÜ}$ entspricht. Gleichzeitig ist der Temperierkreislauf (innere Schlauchkammer) in Betrieb zu nehmen, um die Befüllung beider Kammern des Doppelschlauches während des Versuches gewährleisten zu können. Somit stellt sich eine definierte Aufteilung der Teilvolumina der Gesamtanlage ein und das sich im Lichtkollektor befindliche Flüssigkeitsvolumen konnte unter Ablesen des Füllstandes am Mischbehälter sowie abzüglich des peripheren Volumens berechnet werden und betrug 300 l .

Mit Hilfe der geometrischen Daten der Querschnittsfläche des äußeren Segmentes des Doppelschlauches von $18,17 \text{ cm}^2$ sowie der mit Hilfe von Gl. 5-7 berechneten Länge der Kollektorspirale konnte das theoretische Volumen im ungefüllten Zustand ermittelt werden und beträgt $281,6 \text{ l}$.

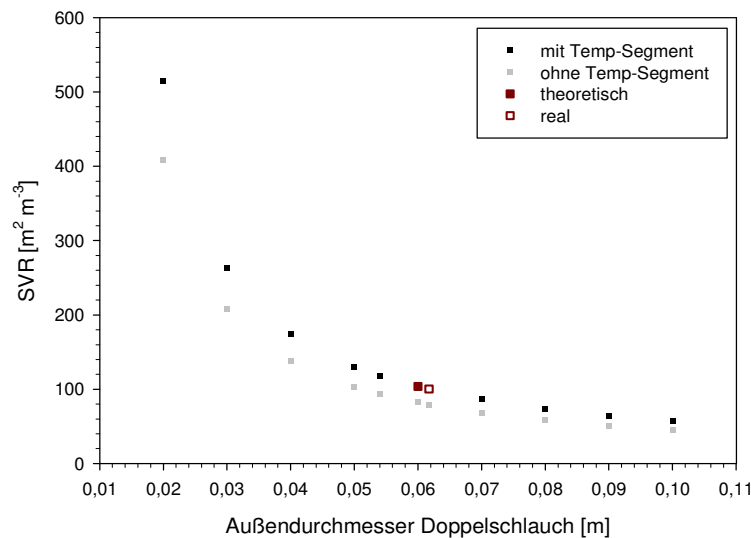


Abbildung 5-14 -Verhalten des Oberflächen-Volumen Verhältnisses (SVR) in Abhängigkeit des Schlauch-Außendurchmessers

Der im Versuchsaufbau auftretende Anlagen- und Systemdruck von ca. $0,2 \text{ barÜ}$ (inkl. Korrektur der Messstelle des Sensors in einer Höhe von $1,50 \text{ m}$), welcher durch den hydrostatischen Druck (offener Flüssigkeitsstand im Mischbehälter) und Reibungsverlusten entsteht, führt zu einer mittleren radialen Dehnung der Schlauchkammer von $1,75 \text{ mm}$ (siehe Abbildung 5-13). Diese wiederum führt zu einer Vergrößerung der Querschnittsfläche des Segmentes der Kultivierungskammer und folglich zu einer Volumenvergrößerung von ca. 20 l , was die Differenz zum theoretischen Volumen im überdruckfreien Zustand darstellt.

Anhand des photoaktiven Volumens und der photoaktiven Fläche kann das Oberflächen-Volumenverhältnis (SVR) des Doppelschlauches ermittelt werden. Dieses ist nur abhängig von Geometrieparametern des Schlauches selbst, d.h. eine Vergrößerung der Schlauchlänge

verändert nicht das SVR. In Abbildung 5-14 ist das SVR in Abhängigkeit des Außendurchmessers des Doppelschlauches angegeben. Es ist erkennbar, dass die Dehnung des Schlauches unter Kultivierungsbedingungen eine Verringerung des SVR von 104 (rotes gefülltes Quadrat, ohne Dehnung) auf 100 zur Folge hat (beide Werte ganzzahlig gerundet), jedoch mit 3,4 % gering ausfällt. Gleichzeitig ist die Berechnung für einen Einfachschlauch (ohne zweiten Innenschlauch zur Temperierung) ausgewiesen. Es ist erkennbar, dass, auch wenn es ohne Innenschlauch zu einer Vergrößerung des Volumens bezüglich der Stellfläche kommt, dies jedoch zu einer Verringerung bezüglich des SVR führen würde.

Da beide verwendeten Geometrien 3 und 4 eine flächenmäßig gleich große Querschnittsfläche des Kultivierungssegmentes aufweisen, sind die Werte für das Oberflächen-Volumen Verhältnis gleich groß.

5.2. Modellierung des Lichteintrages

Für die Betrachtung des Licht- und Wärmeeintrages werden Abstrahlungs- sowie Reflexionseffekte umliegender und benachbarter Körper, wie beispielsweise Gerüststangen des Gewächshauses, das Reaktorgestell, etc., in und um den Lichtkollektor vernachlässigt. Des Weiteren werden die Silikonschlauchwindungen innerhalb der helikalen Gerüststruktur als „autark“ hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung bezüglich des Wärmeeintrages betrachtet. Detaillierte Randbedingungen werden bei den jeweiligen Berechnungsvorgängen erörtert.

Die Berechnung des realen Strahlungseintrages in den Tannenbaumreaktor (I_T) kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$I_T = I_0 * \frac{A_M}{2} * \rho_{PAR/IR} * T(\theta) * Y(\theta) \quad \text{Gl. 5-10}$$

I_0 stellt hierbei den innerhalb des Gewächshauses gemessenen Wert der Globalstrahlung in $W \cdot m^{-2}$ dar. Der Strahlungseintrag erfolgt an der Mantelfläche des Lichtkollektors (A_M). In Abhängigkeit des Sonneneinfallwinkels (θ) ergeben sich ein Transmissionsgrad $T(\theta)$ sowie ein Bestrahlungsgrad $Y(\theta)$, um den Anteil der durchdringenden Mantelfläche in Abhängigkeit der Reaktorgeometrie zu erfassen. Für den Bezug zur PAR-Strahlung wird der Faktor ρ_{PAR} (0,494), für den Wärmeeintrag ρ_{IR} (0,456) verwendet.

5.2.1. Erarbeitung von Modellierungsparametern

5.2.1.1. Berechnung des Sonnenstandes am Reaktorstandort (Sonnenhöhenwinkel)

Mit den in Kapitel 3.1 aufgestellten Gleichungen zur Sonnenhöhe (Gl. 3-12) und dem Sonnenazimut (Gl. 3-13) lassen sich Tagesprofile für den Standort des Gewächshauses erstellen. Am Beispiel des 21.06.2015 ist in Abbildung 5-15 die Sonnenhöhe in Abhängigkeit der Tageszeit (links) bzw. des Sonnenazimuts (rechts) dargestellt. Anhand der Graphen lassen sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Sonnenstand in vertikaler (Sonnenhöhe) sowie in horizontaler (Sonnenazimut) Koordinate ablesen. Zum Zeitpunkt 12:15 Uhr MEZ befindet sich die Sonne am Höchststand von 62,0 Grad und einem Azimut von 180 Grad (Süden). Dieser Wert stellt den absoluten Jahreshöchststand der Sonne am Standort des Gewächshauses dar, da es sich um das Datum der Sommersonnenwende handelt, also der maximalen Deklination zwischen Erde und Sonne. Ebenfalls erkennbar sind Sonnenauf- (3:59 Uhr) und Sonnenuntergang (20:30 Uhr), jeweils abzulesen beim Über- bzw. Unterschreiten einer Sonnenhöhe von 0 Grad. Somit ergibt sich eine Tageslänge von 16 Stunden und 31 Minuten, der größten Tageslänge im Jahr.

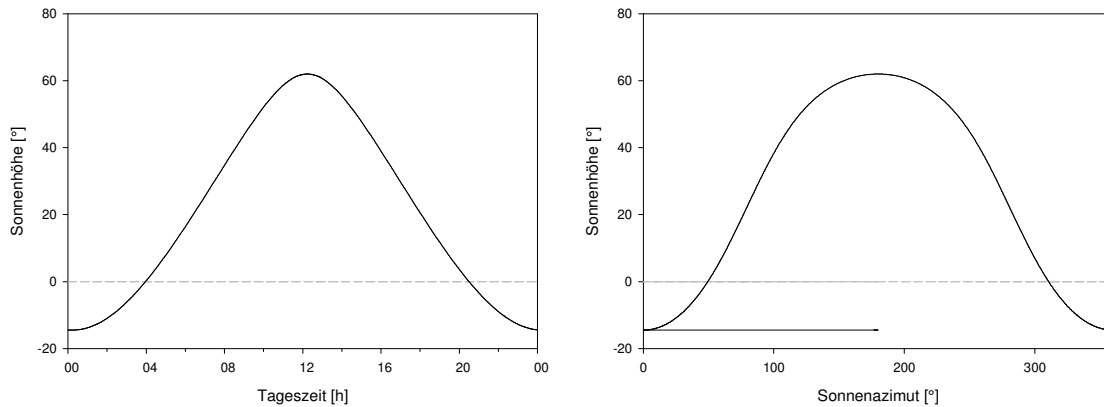


Abbildung 5-15 -Darstellung der Sonnenhöhe in Abhängigkeit der Tageszeit und des Sonnenazimutes am Beispiel des 21.06.2015

Zusammengetragen über den Jahresverlauf entstehen tagesspezifische Sonnenstandskurven (vgl. Abbildung 5-16). In Abhängigkeit des Positionsverhältnisses zwischen Erde und Sonne sowie der Neigung der Erdachse ergeben sich zum Stand der maximalen und minimalen Deklination von $23,5$ bzw. $-23,5$ ° entsprechende maximale und minimale Tagesverläufe bezogen auf die Sonnenhöhe. Diese Zeitverläufe sind zum einen die Sommersonnenwende am 21.06. (oberste fett markierte Kurve in Abbildung 5-16) und zum anderen die Wintersonnenwende am 22.12. (unterste fett markierte Kurve). Frühlings- sowie Herbstpunkt, die sogenannten Tag-Nacht-Gleiche, liegen nahezu übereinander (20.03 und 23.09.; fett markierte Kurven in der Mitte). Die Berechnung der lokalen Tageszeit beruht auf der Zeitgleichung und ist ebenfalls in Abbildung 5-16 eingetragen (gestrichelte Linien). Somit ist zu jeder beliebigen Uhrzeit der Sonnenstand abzulesen.

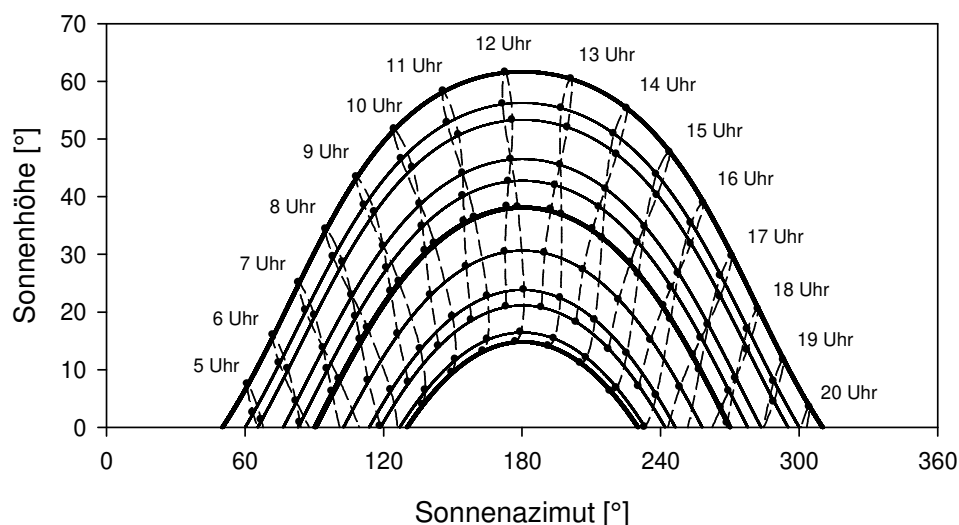


Abbildung 5-16 -Sonnenstandsdiagramm im Jahresverlauf 2015 am Standort des Gewächshauses
Tagesverläufe von oben nach unten: 21.06., 01.08., 01.05., 01.09., 01.04., 20.03., 23.09., 01.03., 01.11., 01.02., 01.12., 22.12.

Zur Bewertung der theoretischen täglichen maximalen Sonneneinstrahlung dient der maximale Sonnenhöhenwinkel. Am 21.06. 12:15 Uhr erreicht die Sonne ihren größten Höchststand im Jahresverlauf mit 62,0 Grad, mit 14,8 Grad zur gleichen Uhrzeit am 22.12. ihren tiefsten Höchststand (Abbildung 5-17).

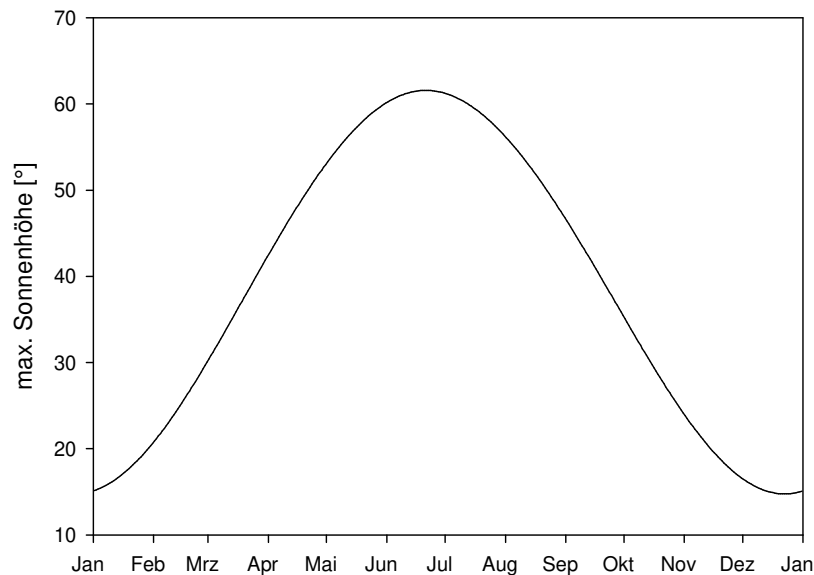


Abbildung 5-17 - maximale tägliche Sonnenhöhe im Jahresverlauf 2015

5.2.1.2. Bestrahlungs- und Transmissionsgrad

Vorbetrachtungen

Die Grundlage für die Berechnung des tatsächlichen Strahlungseintrages bildet die ermittelte Mantelfläche in Abschnitt 5.1.2.1 (Gl. 5-9). In Abhängigkeit des sich im Tagesverlauf verändernden Sonnenstandes und des damit einhergehenden Sonnenhöhenwinkels variiert die durch Direktstrahlung bestrahlte Fläche des Lichtkollektors. Die Mantelfläche wird durch Abschattungseffekte sowie winkelabhängiges Strahlungsverhalten an der Schlauchoberfläche, hervorgerufen von der Reaktorgeometrie und dem Sonnenhöhenwinkel, beeinflusst. Dadurch kommt es einerseits zu einer Reduzierung der bestrahlten Mantelfläche (Bestrahlungsgrad Y) und andererseits zu einem winkelabhängigen Transmissionsverhalten durch die Mantelfläche selbst (Transmissionsgrad T).

Aufgrund der komplexen mathematischen Struktur der Lichtkollektoreinheit werden Transmissions- und Bestrahlungsgrad unabhängig voneinander abstrahiert. Hierzu werden beide Faktoren jeweils in horizontale (X_H) und vertikale Komponenten (X_V) zerlegt und zu einer resultierenden Größe ($X(\theta)$) zusammengefasst (siehe Abbildung 5-18):

$$X(\theta) = \sqrt{X_V^2 * \sin^2 \theta + X_H^2 * \cos^2 \theta}$$

Gl. 5-11

X...Y für Bestrahlungsgrad

X...T für Transmissionsgrad

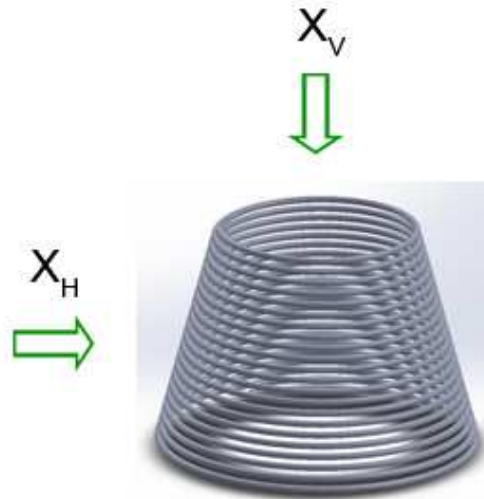


Abbildung 5-18 - Darstellung der Komponentenerlegung für horizontalen (X_H) und vertikalen (X_V) Anteil

In Abbildung 5-19 sind die für die Komponentenerlegung jeweils maßgebliche Draufsicht (für den vertikalen Anteil X_V (links)) und Seitenansicht (für den horizontalen Anteil X_H (rechts)) veranschaulicht.

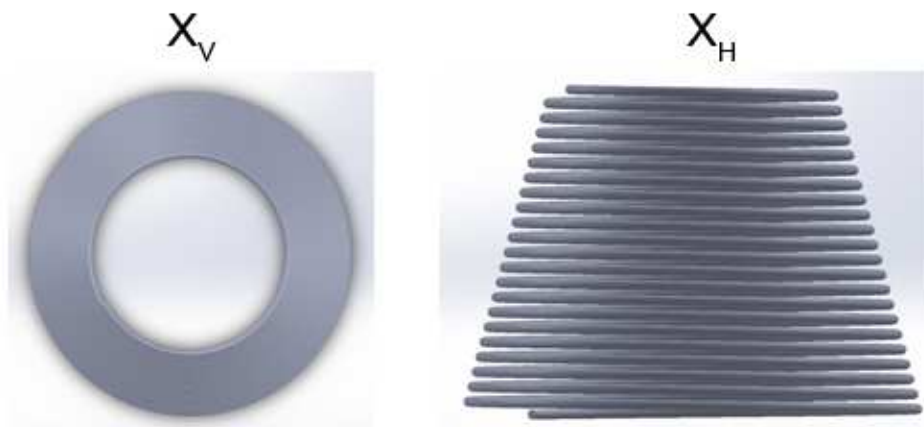


Abbildung 5-19 -Veranschaulichung der für die Komponentenerlegung maßgeblichen Draufsicht für den vertikalen (links) und Seitenansicht für den horizontalen (rechts) Anteil des Lichtkollektors

Der Reaktor wird als freistehend betrachtet, das heißt, Beschattungen, Strahlungs- und Reflexionseffekte von weiteren Reaktoren, Gebäuden oder Gebäudeteilen, wie der Gewächshausgerüststruktur, ebenso wie das Halterungssystem des betrachteten Reaktors selbst, werden vernachlässigt und finden bei der Berechnung keine Berücksichtigung. Weitere und gezielte Annahmen und Randbedingungen werden im Folgenden an den jeweiligen Stellen benannt.

Bestrahlungsgrad

Für den vertikalen Bestrahlungsgrad wird der Lichtkollektor senkrecht von oben betrachtet, was einem theoretischen Sonnenhöhenwinkel von 90° entspricht (vgl. Abbildung 5-19 links). In diesem Fall sind theoretisch 50 % der Mantelfläche (obere Hälfte des Schlauchumfangs) entlang der sich bildenden Raumspirale sichtbar. Aufgrund der Reaktorgeometrie kommt es zu einer konstanten Überlagerung der jeweils darunterliegenden Schlauchwindungen durch den jeweils darüberliegenden Schlauch (vgl. Abbildung 5-20), was zu einer Reduzierung der direkt bestrahlten Oberfläche führt. Lediglich die obere Windung wird auf einer Fläche von 180 Grad bestrahlt. Die entsprechende Berechnungsvorschrift kann anhand der Prinzipskizze in Abbildung 5-20 erstellt werden, der zwei übereinanderliegende Schlauchwindungen im Querschnitt als Seitenansicht zu Grunde liegen. Anhand dessen erfolgt die Berechnung des Überhanges x , mit dessen Hilfe die bestrahlte Bogenlänge b_s ermittelt werden kann.

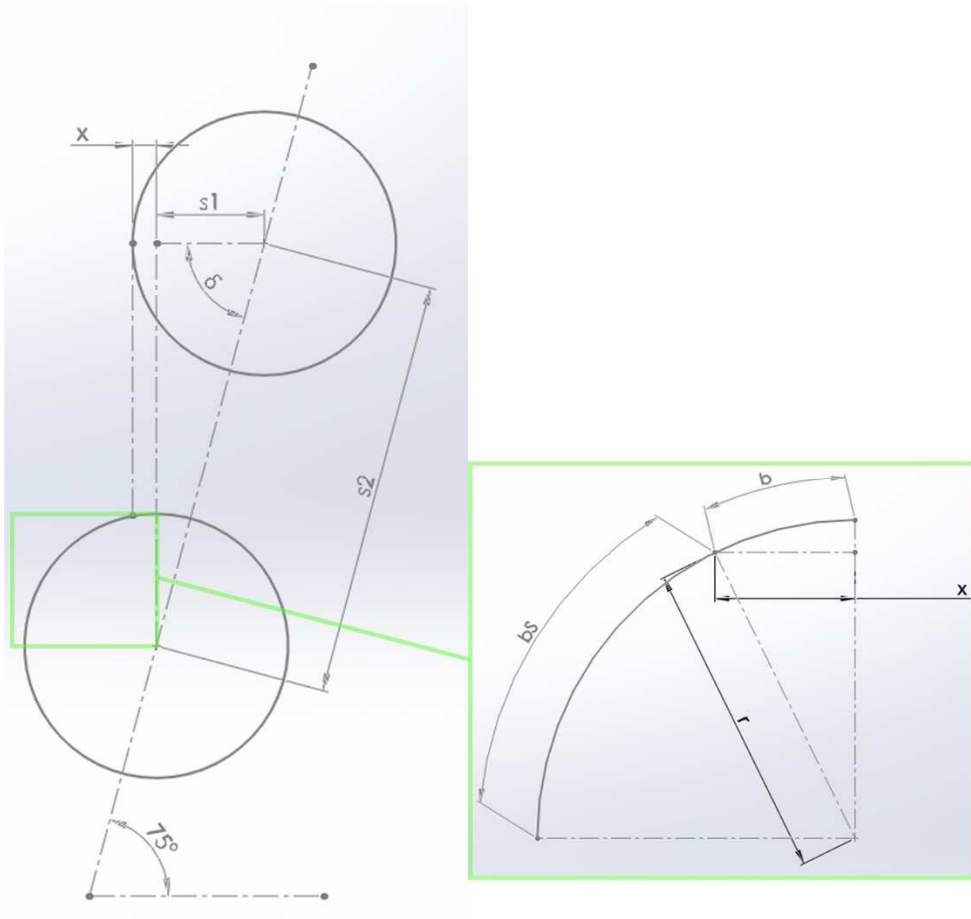


Abbildung 5-20 -Prinzipskizze zweier übereinanderliegender Schlauchwindungen als Seitenansicht zur Berechnung des seitlichen Überhanges (x).

In den nachfolgenden Gleichungen ist der Rechenweg zur Bestimmung des Bestrahlungsgrades aufgeführt.

$$s_1 = s_2 * \cos \delta \quad \text{Gl. 5-12}$$

$$x = r_{S,a} - s_2 \quad \text{Gl. 5-13}$$

$$b = r_{S,a} * \sin^{-1} \frac{x}{r_{S,a}} \quad \text{Gl. 5-14}$$

$$b_s = \frac{\pi}{2} * r_{S,a} - b \quad \text{allg.: } b_s = \begin{cases} \frac{\pi}{2} * r_{S,a} + b, & x < 0 \\ \frac{\pi}{2} * r_{S,a} - b, & x \geq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 5-15}$$

$$Y_V = \frac{b_s}{\pi * r_{S,a}} = 0,442 \quad \text{Gl. 5-16}$$

Mit Hilfe der trigonometrischen Funktion für rechtwinklige Dreiecke kann die Seitenlänge s_1 berechnet werden. Der Winkel δ ergibt sich als Wechselwinkel zum Anstellwinkel der Reaktorgerüstkonstruktion (75 Grad). Der seitliche Überhang x errechnet sich aus der Differenz von Schlauchradius $r_{S,a}$ und Seitenlänge s_1 zu 0,54 cm. Weiterhin wird die bestrahlte Bogenlänge b_s , nach Umrechnung des als Projektionsfläche dienenden seitlichen Überhanges x in die Bogenlänge b , mit Hilfe von Gl. 5-15 berechnet. Daraus ergibt sich ein Bestrahlungsgrad Y_V bezogen auf eine halbe Schlauchumrundung (180 Grad) von 0,442 (Gl. 5-16).

Aufgrund der Reaktorgeometrie kommt es in vertikaler Richtung zur Mehrfachabschattung, und zwar um den errechneten Wert von x (vgl. Abbildung 5-20). Im praktischen Betrieb spielt dieser Fall keine Rolle, da die Schläuche mit Algensuspension gefüllt sind und der Lichtpfad innerhalb der Algensuspension versiegt.

Für die Berechnung des horizontalen Bestrahlungsgrades wird die Reaktorkonstruktion vertikal in zwei Hälften zerlegt und getrennt voneinander betrachtet (vgl. Abbildung 5-21). Die linke Seite stellt dabei die vordere Ansicht (bzgl. Strahlenrichtung) dar, von der bei Frontalansicht (entspricht einem Sonnenhöhenwinkel von 0 Grad) 180 Grad des Schlauchumfangs und somit 50 % der Mantelfläche sichtbar sind (vgl. Abbildung 5-19 rechts). Von der Reaktorhälfte rechts in Abbildung 5-21 ist nur ein Teil der Mantelfläche bestrahlt. Es handelt sich um die Bereiche der inneren Kollektorfläche, welche beim Durchscheinen durch die Lücken der vorderen Hälfte bestrahlt werden. Dieser Teil ist in Abbildung 5-23 näher dargestellt.

Da der Schlauchabstand zwischen den Windungen konstant bleibt, muss der Schlauchanstieg mit zunehmender Reaktorhöhe größer werden, was veränderliche Flächenverhältnisse für die Berechnung zur Folge hat. Als Vereinfachung wird eine komplette Schlauchwindung bei halber

Reaktorhöhe herangezogen und die geometrischen Verhältnisse auf alle Weiteren abstrahiert. Somit ergibt sich nach Gl. 5-17 ein gedachter gerader Zylinder mit einem Kollektordurchmesser D_M , siehe Abbildung 5-22 (Messpunkte jeweils Schlauchmitte). Die Bewertung der Sichtbarkeit der hinteren Fläche wird nur für eine Windung berechnet und dann auf alle Weiteren übertragen.

$$D_M = \frac{D_{PBR,oben} + D_{PBR,unten}}{2}$$

Gl. 5-17

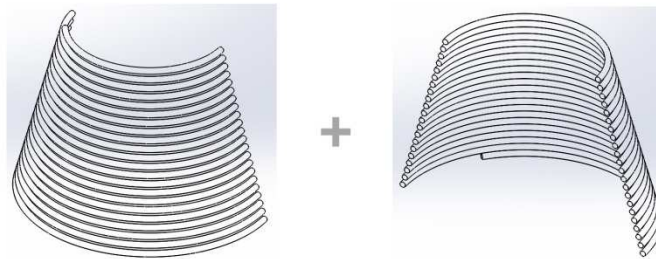


Abbildung 5-21 -Einteilung der Schlauchkonstruktion des Reaktors in vordere (links) und hintere (rechts) Reaktorhälfte

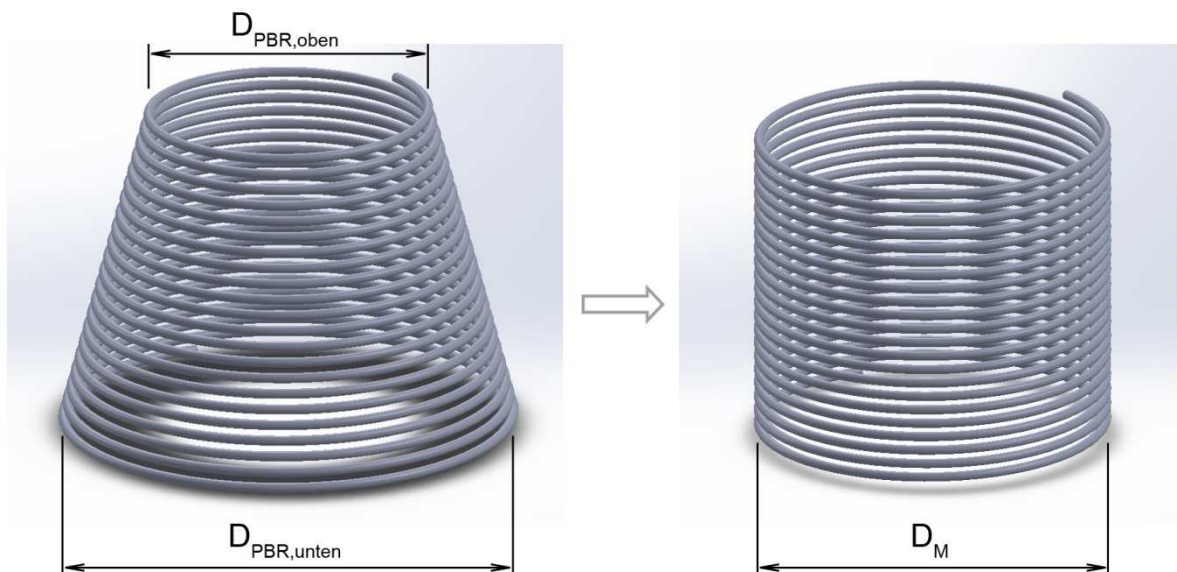


Abbildung 5-22 -Angleichung der unterschiedlichen Durchmesser des Reaktorkonus an einen mittleren Referenzdurchmesser (D_M von geradem Zylinder)

Für die Berechnung der horizontalen Referenzmantelfläche A_{RH} wird die innere Kollektorhälfte bezogen auf die geometrischen Abmessungen mit der äußeren Hälfte gleichgesetzt, da der Schlauchdurchmesser viel kleiner als der Reaktordurchmesser ist. Mit Abbildung 5-21 und der Windungszahl n_W ergibt sich A_{RH} zu:

$$A_{RH} = 2 * n_W * \frac{D_m * \pi}{2} * \pi * r_{S,a} = n_W * D_m * \pi^2 * r_{S,a} = 14,66 \text{ m}^2$$

Gl. 5-18

Die Referenzmantelfläche wird nun, aufgrund der helikalen Struktur, durch die sich verdeckenden Flächen der hinteren Schlauchbereiche auf der Innenseite des Reaktors reduziert. Zur Berechnung dieser Flächenelemente wird die Helix zunächst zweidimensional betrachtet (x-z-Ebene). Dadurch kommt es zur Entstehung von Dreiecken (rot) und Parallelogrammen (grün). Hierbei zeigen die zwei roten, rechtwinkligen und flächenmäßig gleichgroßen Dreiecke die nichtsichtbaren, das grüne Parallelogramm den sichtbaren Bereich der Innenseite des Lichtkollektors (Abbildung 5-23).

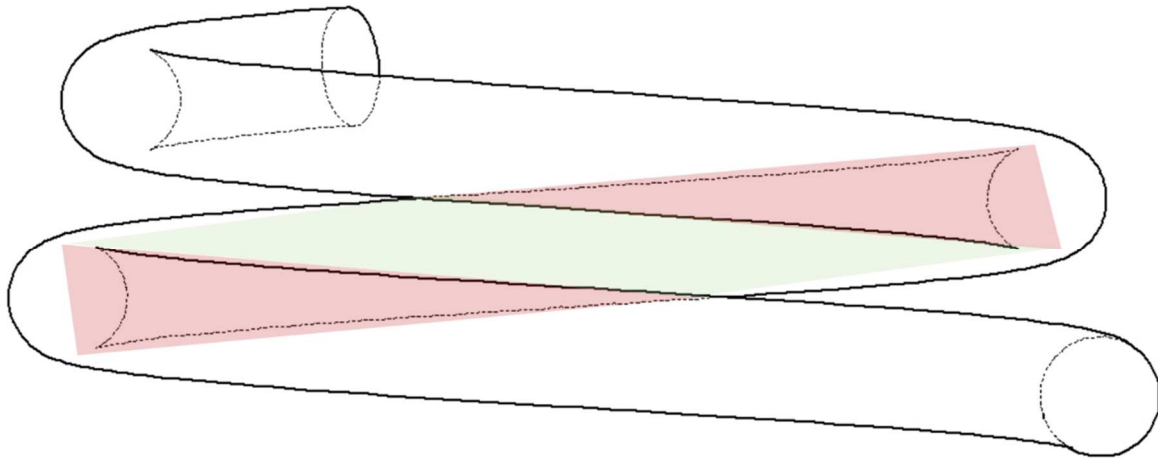


Abbildung 5-23 -Darstellung der sichtbaren (grünes Parallelogramm) und nicht sichtbaren (rote Dreiecke) Flächen in horizontaler Richtung pro Schlauchwindung

In Abbildung 5-24 sind die geometrischen Beziehungen der für die Berechnung der Fläche des Parallelogramms erforderlichen Größen dargestellt. Hierfür sind zwei Annahmen zu treffen:

- Der Reaktordurchmesser (D_m), beginnend vom Kreismittelpunkt einer Reaktorseite, bildet einen Schnittpunkt mit der vertikalen Höhendifferenz bei $h/2$ auf der gegenüberliegenden Seite (damit Bildung von β_L).
- Die Seitenhalbierende von $2^*r_{S,a}$ der roten Dreiecke liegt parallel zum Reaktordurchmesser. Somit besteht eine Beziehung als Stufenwinkel und β_L lässt sich im roten Dreieck wiederfinden.

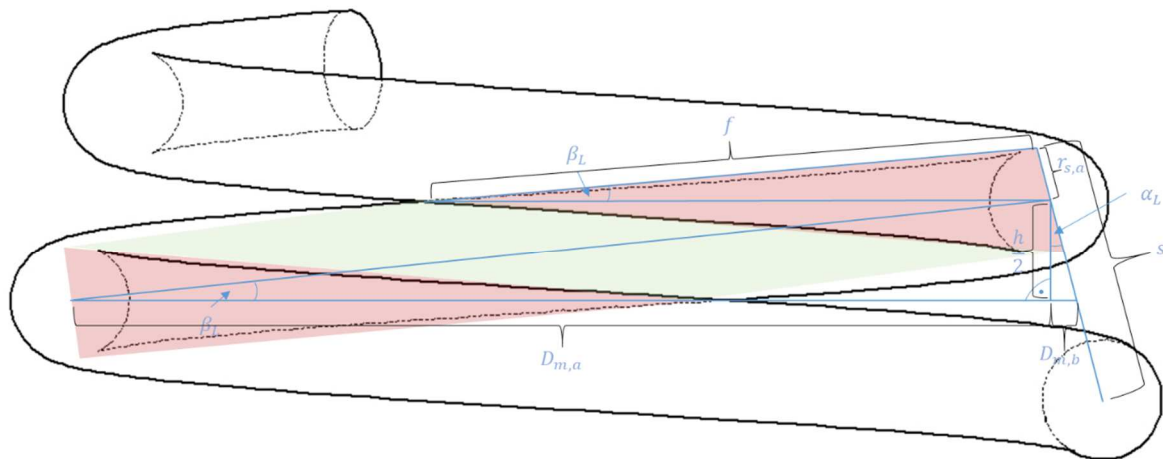


Abbildung 5-24 - Berechnungsgrößen für die Ermittlung der Parallelogrammfläche

In Anlehnung an Abbildung 5-24 ist anhand folgender Gleichungen die Berechnung der Hilfsgrößen aufgezeigt.

$$s = 2 * r_{s,a} + s_0 \quad \text{Gl. 5-19}$$

$$h = s * \cos \alpha_L \quad \text{Gl. 5-20}$$

$$D_{m,b} = \frac{h}{2} * \tan \alpha_L \quad \text{Gl. 5-21}$$

$$D_{m,a} = D_m - D_{m,b} \quad \text{Gl. 5-22}$$

$$\beta_L = \tan^{-1} \frac{\frac{h}{2}}{D_{m,a}} \quad \text{Gl. 5-23}$$

$$f = r_{s,a} * \frac{\sin(90 - \alpha_L)}{\sin \beta_L} \quad \text{Gl. 5-24}$$

Die Seitenlänge f des roten Dreieckes stellt gleichzeitig den Schnittpunkt zwischen vorderen, sichtbaren und hinteren, nicht sichtbaren Schlauch dar. Diese Länge wird für die Umrechnung der zweidimensionalen Fläche auf den Halbkreisbogen des hinteren Reaktorteiles projiziert, um die erforderliche Bogenlänge ermitteln zu können (vgl. Abbildung 5-25).

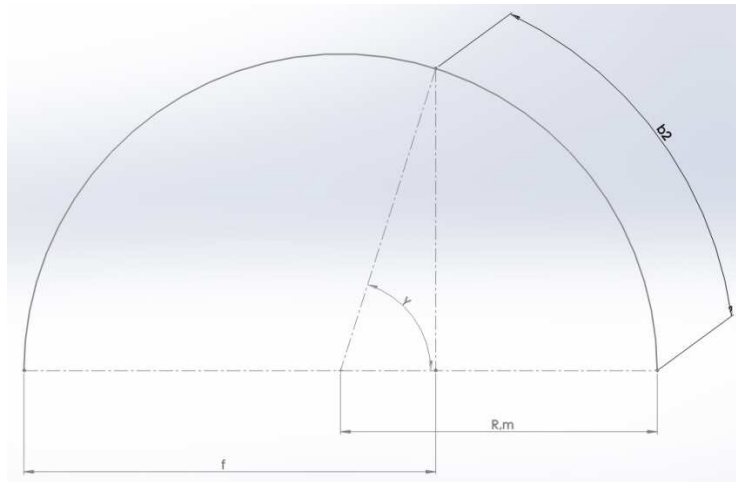


Abbildung 5-25 -Übertragung der zweidimensionalen Hilfsgrößen (f) auf das helikale Grundgerüst (b₂)

Mit Hilfe der Gl. 5-25 und Gl. 5-26 kann auf die Bogenlänge der bestrahlten Fläche geschlossen werden.

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{f - R_m}{R_m} \quad \text{Gl. 5-25}$$

$$b_2 = R_m * \gamma \quad \text{Gl. 5-26}$$

Anhand von Abbildung 5-26 wird nun die Fläche des Parallelogramms berechnet. Bei diesem Vorgehen wird zunächst der halbkreisförmige Schlauch als gerades Schlauchstück angenommen (a) und durch ein gedachtes Verschieben der Dreiecksflächen ein, in Bezug auf das Parallelogramm, flächenmäßig identisches Rechteck erzeugt (b-c).

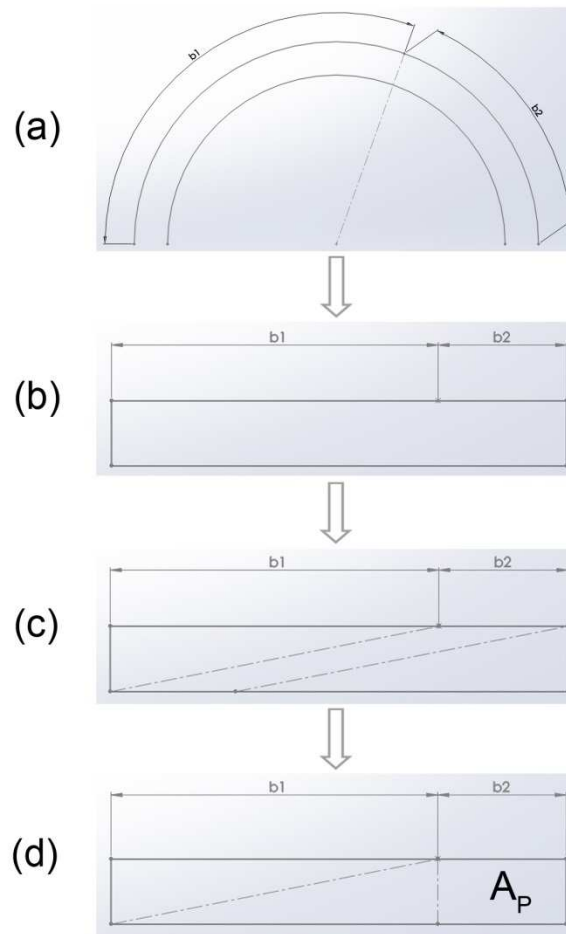


Abbildung 5-26 -schematische Herleitung der flächenbezogenen Referenzfläche des Parallelogramms

Die Berechnung der Fläche A_P wird durch Gl. 5-27 beschrieben und stellt den sichtbaren Anteil der hinteren Kollektorinnenseite je Schlauchwindung dar.

$$A_P = \pi * r_{S,a} * b_2 = 0,134 \text{ m}^2$$

Gl. 5-27

Aufgrund der Geometrie des Lichtkollektors verringert sich die Anzahl der sichtbaren Parallelogrammflächen mit steigendem Höhenwinkel ($n_P(\theta)$). Gleichzeitig beginnt die innere Reaktorfläche anhand einer steigenden Anzahl von sichtbaren Kollektorreihen ($n_I(\theta)$) mit steigendem Höhenwinkel zuzunehmen. Beide Verläufe sind in Abbildung 5-27 dargestellt.

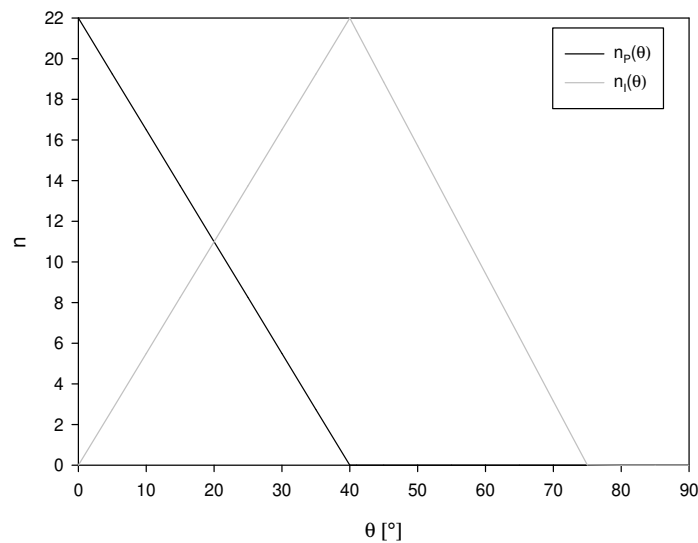


Abbildung 5-27 -Funktionsverlauf der Anzahl der sichtbaren Flächen der Parallelegramme $n_P(\theta)$ und sichtbarer Kollektorreihen auf der Innenseite $n_I(\theta)$ in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels θ

Mit Kenntnis der höhenwinkelabhängigen Anzahl sichtbarer Flächen der Parallelegramme und direkt sichtbarer Kollektorreihen der inneren Ansicht, kann die sichtbare Gesamtfläche $A_{S,H}$ ermittelt werden. In Kombination mit der vorderen sichtbaren Reaktorfläche (50 % A_{RH}) ergibt sich die gesamte sichtbare Fläche zu:

$$A_{S,H} = \frac{1}{2} * A_{RH} + n_P(\theta) * A_P + n_I(\theta) * \frac{1}{2} A_{RH} \quad \text{Gl. 5-28}$$

Der Quotient aus sichtbarer Mantelfläche (A_{SH}) und Referenzmantelfläche (A_{RH}) bildet den horizontalen Bestrahlungsgrad Y_H bei einem Höhenwinkel von 0 Grad:

$$Y_H = \frac{A_{SH}}{A_{RH}} = 0,701 \quad \text{Gl. 5-29}$$

In Anlehnung an Gl. 5-11 errechnet sich der Gesamtbestrahlungsgrad Y zu:

$$Y = \sqrt{Y_V^2 * \sin^2 \theta + Y_H^2 * \cos^2 \theta} \quad \text{Gl. 5-30}$$

Mit dieser Gleichung lässt sich der Gesamtbestrahlungsgrad in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels darstellen (s. Abbildung 5-28) und dient folglich der Ermittlung der gesamten bestrahlten Fläche in Bezug auf den Sonnenstand.

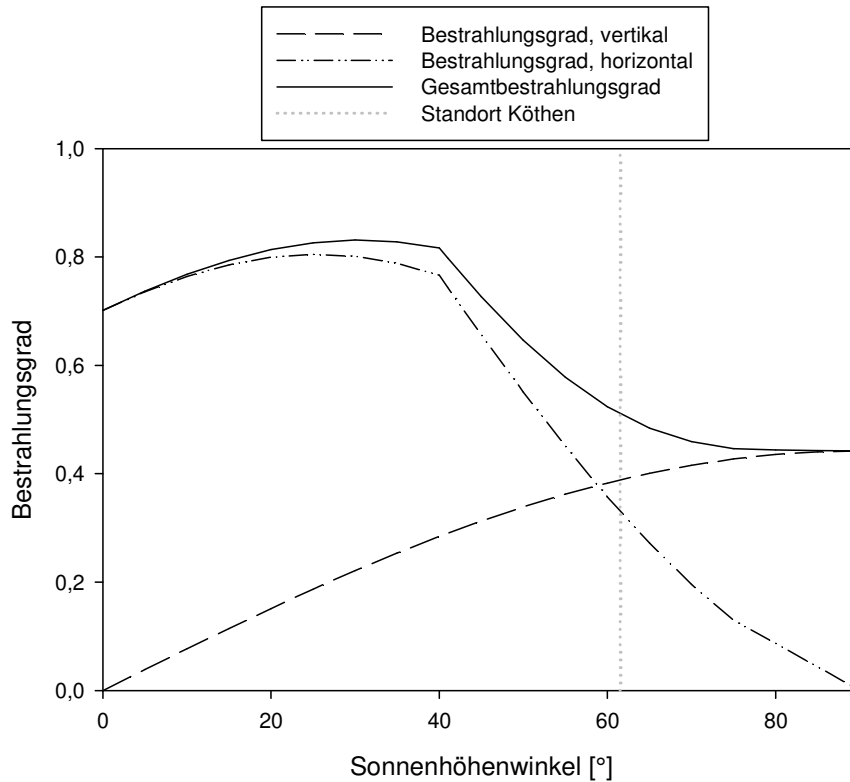


Abbildung 5-28 -Darstellung des horizontalen (Y_H), des vertikalen (Y_V) und des Gesamtbestrahlungsgrades (Y) in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels; gestrichelte Markierung des Standortes Köthen entspricht maximalem Sonnenstand am 21.06.

Mit ansteigendem Sonnenhöhenwinkel zeigen horizontaler und vertikaler Bestrahlungsgrad bis zu einem Höhenwinkel von 40 Grad ein ebenso ansteigendes Verhalten. Bis zu diesem Winkel erhöht sich der horizontale Bestrahlungsgrad, da mit sinkender Anzahl der Parallelogrammflächen die sichtbaren Kollektorreihen auf der Kollektorinnenseite ansteigen. Darüber hinaus sinkt der Flächenanteil mit steigendem Höhenwinkel. Bezogen auf die oben aufgeführten Berechnungsvorschriften ergeben sich für den horizontalen Bestrahlungsgrad 0,701 (bei 0 Grad) und für den vertikalen Bestrahlungsgrad 0,442 (bei 90 Grad). Maximal werden 83,1 % bezogen auf 50 % der Mantelfläche, entsprechend 41,7 % der gesamten Mantelfläche, direkt bestrahlt. Der Gesamtbestrahlungsgrad verläuft anhand der Funktion in Gl. 5-30. Am Standort des Gewächshauses existiert ein maximaler Sonnenhöhenwinkel von 61,68 Grad (21.06.). Folglich ist eine Bewertung hinsichtlich des Lichteintrages in den Reaktor nur bis zu diesem maximalen Sonnenstand sinnvoll. In diesem Bereich ergibt sich ein mittlerer Bestrahlungsgrad von 0,742.

Transmissionsgrad

In Bezug auf Abschnitt 0 (Strahlungsverhalten an der Phasengrenze Silikon Schlauch) wird das Transmissionsverhalten des Silikonmaterials bezogen auf den Einfallswinkel im Fall der Bestimmung des Transmissionsgrades auf den jeweiligen Sonneneinfallswinkel auf die Schlauchhelix übertragen. Dabei werden die winkelabhängigen Transmissionskurven an die entsprechende Blickrichtung abstrahiert. Somit kann durch Integration entlang der spezifischen Größe (z.B. Schlauchradius, Reaktorradius) das Transmissionsverhalten ermittelt werden. Im Zuge dessen wird die Bezeichnung des Transmissionsgrades von Ψ_t in $T_{r/R}$ geändert um die Adaption an Geometrie Größen zu verdeutlichen. In Abbildung 5-29 wird ersichtlich, dass das Transmissionsverhalten, ermittelt nach Fresnel, nicht der Form einer Ellipse folgt (grau gestrichelte Linie) und somit nicht mittels selbiger Funktionsgleichung beschrieben werden kann. Das Transmissionsverhalten zeigt entlang der Schlauchgeometrie, beginnend von der Schlauchmitte bis zum äußeren Punkt, zunächst einen größeren Transmissionsgrad gegenüber der Ellipsenform, was einer Unterbewertung von ca. 9 % entsprechen würde.

Das Übertragen des Transmissionsverhaltens auf die Schlauch- und Reaktorgeometrie erfordert die Umrechnung auf den Schlauchradius und mittleren Reaktorradius. In Anlehnung an Abbildung 5-29 erfolgt die Umrechnung anhand folgender Gleichung. Die Umrechnung für den Reaktorradius ist analog anzusetzen.

$$r = \frac{r_{S,a} * \alpha}{90}$$

Gl. 5-31

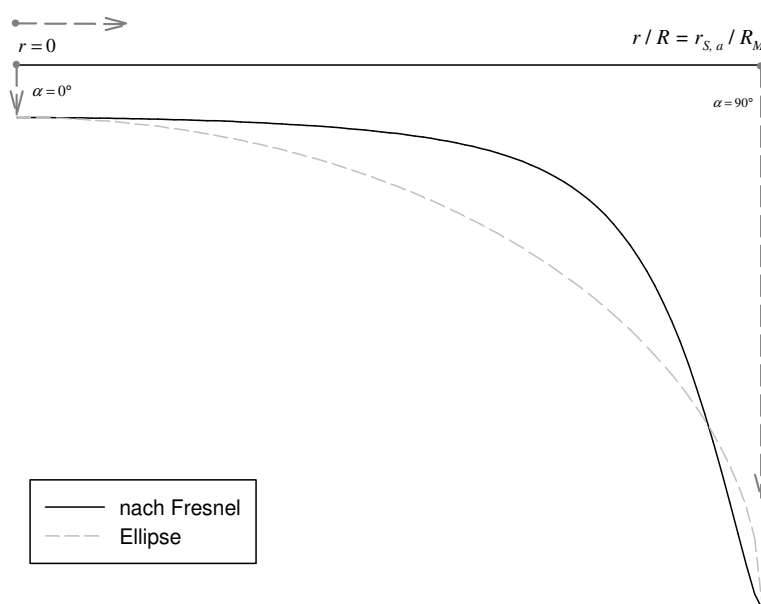


Abbildung 5-29 -Ansatz Übertragung Transmissionsgrad auf Schlauchgeometrie am Bsp. Geo 4

Der bei der verwendeten Geometrie 4 maximale Transmissionsgrad im sichtbaren Wellenlängenbereich beträgt 0,722, welcher bei einfallender Bestrahlung im Lot erreicht wird. Mit zunehmendem Einfallswinkel (hier: dargestellt als Längenmaß in Bezug auf Schlauchradius bzw. Reaktorradius) verringern sich die Transmissionseigenschaften anhand der in Abbildung 5-30 bis Abbildung 5-32 dargestellten Funktionen. In Kombination mit dem maximalen Transmissionsgrad bildet der dazugehörige Abszissenabschnitt eine Referenzfläche (begrenzt durch schwarze gestrichelte Linien in nachfolgenden betreffenden Abbildungen). Der jeweilige Biegungsverlauf des Transmissionsverhaltens begrenzt diejenige Fläche, welche zur Bestimmung des Transmissionsgrades maßgebend ist. Bezogen auf die ermittelte Referenzfläche ergibt sich der Transmissionsgrad.

An die errechneten Transmissionskurven ist eine Polynomfunktion 5. Grades angelegt ($T(r)$, $T(R_M)$, siehe Gl. 5-32 am Beispiel Schlauchradius r), um die Integration in Abhängigkeit der jeweiligen Ordinatengröße mathematisch darstellen zu können (s. graue Kurvenfunktion in Abbildung 5-30 bis Abbildung 5-32). In Bezug auf die dazugehörige Referenzfläche kann der jeweilige Transmissionsgrad bestimmt werden (siehe nachfolgende Gl. 5-33 bis Gl. 5-44).

$$T(r) = 0,7273 - 2,2208 * r + 935,9906 * r^2 - 154169,9306 * r^3 + 9371075,4777 * r^4 - 204178111,2276 * r^5 \quad \text{Gl. 5-32}$$

Für den vertikalen Transmissionsgrad ist der, im Abschnitt zur Berechnung des vertikalen Bestrahlungsgrades (Y_v) ermittelte, seitliche Überhang der übereinanderliegenden Schlauchwindungen (x) zu berücksichtigen (vgl. gestrichelte Linie in Abbildung 5-30) und dieser Bereich sowohl für die Referenzfläche als auch das ermittelte Transmissionsverhalten nicht zu bewerten.

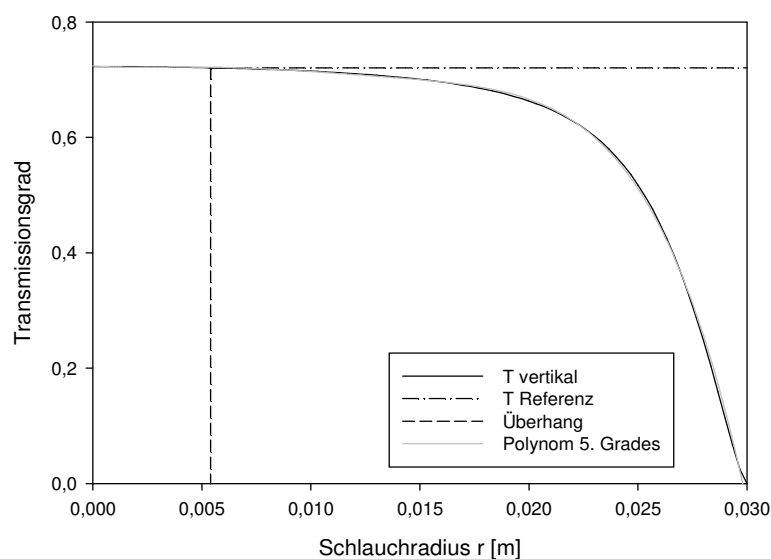


Abbildung 5-30 -Transmissionsverhalten (vertikal) entlang eines Viertel Schlauchumfangs, dargestellt als Laufvariable r unter Berücksichtigung des vertikalen Schlauchüberhanges x

Bezüglich der Referenzfläche ($A_{\text{Referenz},V}$) aus Gl. 5-33 ergibt sich innerhalb der Integrationsgrenzen von x bis $r_{S,a}$ (Schlauchradius) und unter Beachtung des vertikalen Überhanges x der Schlauchreihen (vgl. Abbildung 5-20) der vertikale Transmissionsgrad T_V zu 0,547.

$$A_{\text{Referenz},V} = T_{r=x} * (r_{S,a} - x) \quad x: \text{Schlauchüberhang} \quad \text{Gl. 5-33}$$

$$T_V = T_{r=x} * \frac{1}{A_{\text{Referenz},V}} * \int_x^{r_{S,a}} T(r) dr = \frac{1}{r_{S,a} - x} * \int_x^{r_{S,a}} T(r) dr \quad \text{Gl. 5-34}$$

$$T_V = 0,547 \quad \text{Gl. 5-35}$$

Die Bestimmung der horizontalen Transmissionseigenschaften wird anhand des in Abbildung 5-22 erstellten Referenzzylinders, mit den an dieser Stelle erwähnten geometrischen Parametern, vorgenommen. Da sich die Projektionsfläche der Strahlung sowohl in Richtung des Schlauchradius als auch in Abhängigkeit des Reaktorradius verteilt, werden diesbezüglich die, den genannten Koordinatenrichtungen, entsprechenden Integrationsgrenzen festgelegt. Nicht berücksichtigt wird der Schlauchanstieg pro Windung. Daraus ergeben sich zwei Berechnungsvorschriften – das Transmissionsverhalten entlang des Schlauchradius $T_{H,r}$ und des Reaktorradius auf mittlerer Reaktorhöhe $T_{H,RM}$.

Die Berechnungsvorschrift für $T_{H,r}$, entlang des Schlauchradius ist angelehnt an Gl. 5-34, unterscheidet sich jedoch anhand der unteren Integrationsgrenze, da es in horizontaler Ansicht zu keiner Überlagerung der Schlauchreihen kommt.

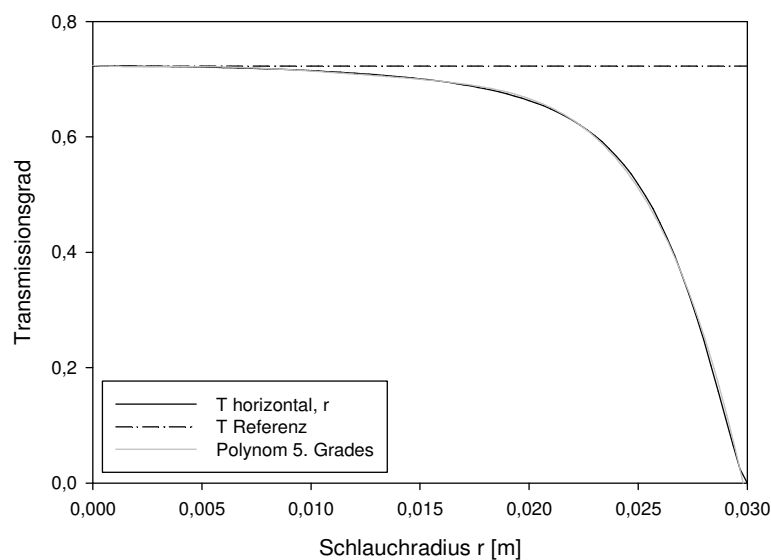


Abbildung 5-31 -Transmissionsverhalten (horizontal) entlang eines Viertel Schlauchumfanges, dargestellt als Laufvariable r

Für den ersten Teil des Transmissionsgrades in horizontaler Richtung ergibt sich $T_{H,r}$ für den Schlauchradius $r_{S,a}$ zu 0,579.

$$A_{Referenz,H,r} = T_0 * r_{S,a} \quad \text{Gl. 5-36}$$

$$T_{H,r} = T_0 * \frac{1}{A_{Referenz,H,r}} * \int_0^{r_{S,a}} T(r) dr = \frac{1}{r_{S,a}} * \int_0^{r_{S,a}} T(r) dr \quad \text{Gl. 5-37}$$

$$T_{H,r} = 0,579 \quad \text{Gl. 5-38}$$

Analog erfolgt die Berechnung des horizontalen Verhaltens der Transmission in Reaktorrichtung entsprechend Abbildung 5-32. Mit dem mittleren Reaktorradius von 1,15 m ergibt sich der Transmissionsgrad zu 0,622.

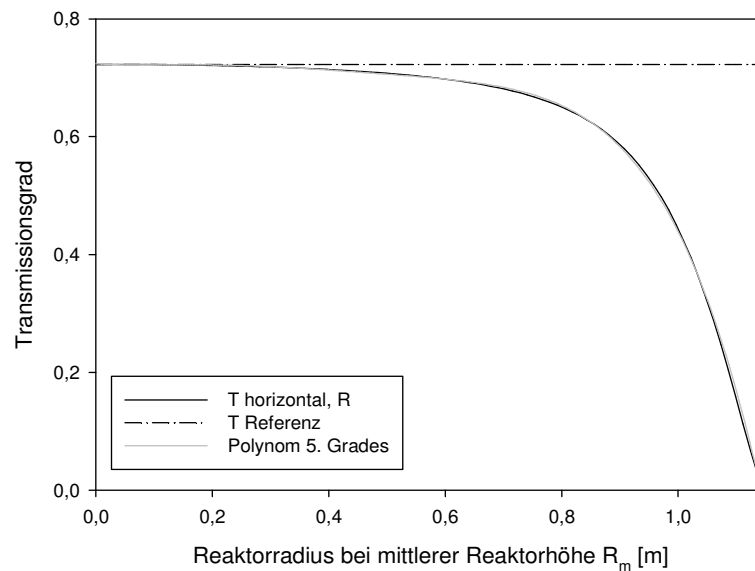


Abbildung 5-32 -Transmissionsverhalten (horizontal) entlang eines Viertel Reaktorumfangs, dargestellt als Laufvariable R_m

$$A_{Referenz,H,R_m} = T_0 * R_m \quad \text{Gl. 5-39}$$

$$T_{H,R_m} = T_0 * \frac{1}{A_{Referenz,H,R_m}} * \int_0^{R_m} T(R) dR = \frac{1}{R_m} * \int_0^{R_m} T(R) dR \quad \text{Gl. 5-40}$$

$$T_{H,R_m} = 0,622 \quad \text{Gl. 5-41}$$

Um einen gesamten Transmissionsgrad in horizontaler Blickrichtung abstrahieren zu können, werden $T_{H,r}$ und T_{H,R_m} anhand von Gl. 5-42 zusammengefasst.

$$T_H = T_{H,r} * T_{H,R_m} \quad \text{Gl. 5-42}$$

$$T_H = 0,360 \quad \text{Gl. 5-43}$$

Mit vorangegangener Gleichung ergibt sich damit für den horizontalen Transmissionsgrad 0,360. Die Anwendung von Gl. 5-11 führt in nachfolgender Gleichung zur Aufstellung der Transmissionsbeziehungen des Lichtkollektors in Abhängigkeit des Sonneneinfallwinkels unter Beachtung vorangegangener Bedingungen.

$$T = \sqrt{T_V^2 * \sin^2 \theta + T_H^2 * \cos^2 \theta} \quad \text{Gl. 5-44}$$

Somit lässt sich das Transmissionsverhalten des Lichtkollektors sowohl in horizontaler, vertikaler und als Kombination für beliebige Höhenwinkel bestimmen (Abbildung 5-33). Vergleichbar mit der Zusammenstellung des Bestrahlungsgrades ist eine Bewertung für weitere Berechnungen nur bis zu einem Höhenwinkel von 61,5 Grad sinnvoll, dem Jahreshöchststand am Standort Köthen.

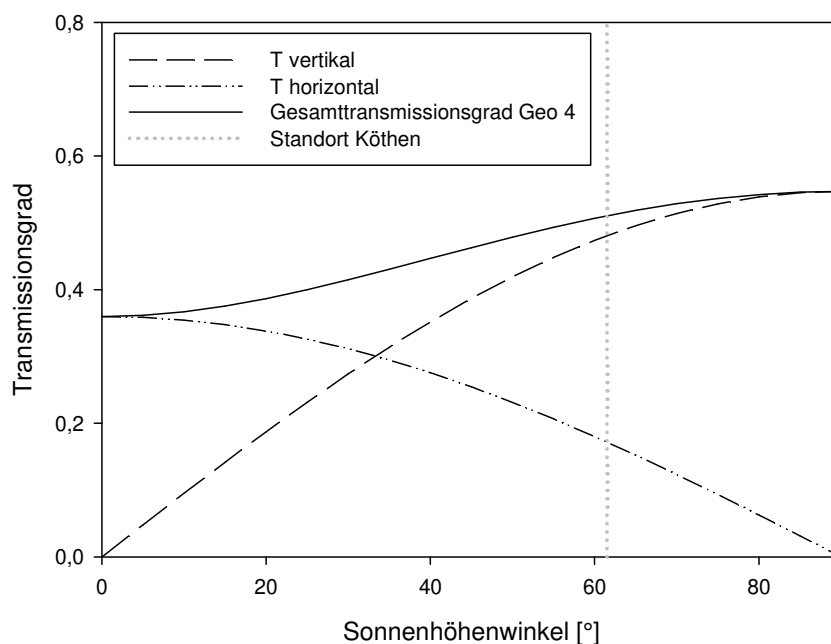


Abbildung 5-33 -Darstellung des horizontalen (T_H), des vertikalen (T_V) und des Gesamttransmissionsgrades (T) in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels

Die mathematische Formulierung des Bestrahlungsgrades $Y(\theta)$ in Abhängigkeit des Sonnenstandes ermöglicht nun die Berechnung der durch Direktstrahlung bestrahlten Mantelfläche des Lichtkollektors (dargestellt in Abbildung 5-28). Mit spezifischer Auslegung des Tagesganges der Sonne an einen definierten Ort kann die Beziehung zum Bestrahlungsgrad weltweit angewendet werden. Gleiches gilt für die Berechnung des Transmissionsgrades $T(\theta)$, siehe Abbildung 5-33.

5.2.2. Wärmebilanz

Anhand des Verlaufes der Suspensionstemperaturen parallel zum bilanzierten Lichteintrag sollte die Modellbildung des Strahlungseintrages überprüft werden. Hierfür wurden die einzelnen Wärmeströme im Tagesverlauf im 12-Minutenmittel berechnet und bezüglich des Wärmeeintrages in die äußere Doppelschlauchkammer (Suspensionsvolumen) bilanziert (\dot{Q}_{bil}) – einzelne Wärmeströme sind in Abbildung 5-34 definiert. Der Versuch erfolgte mit zwei Lichtkollektoren im Parallelbetrieb.

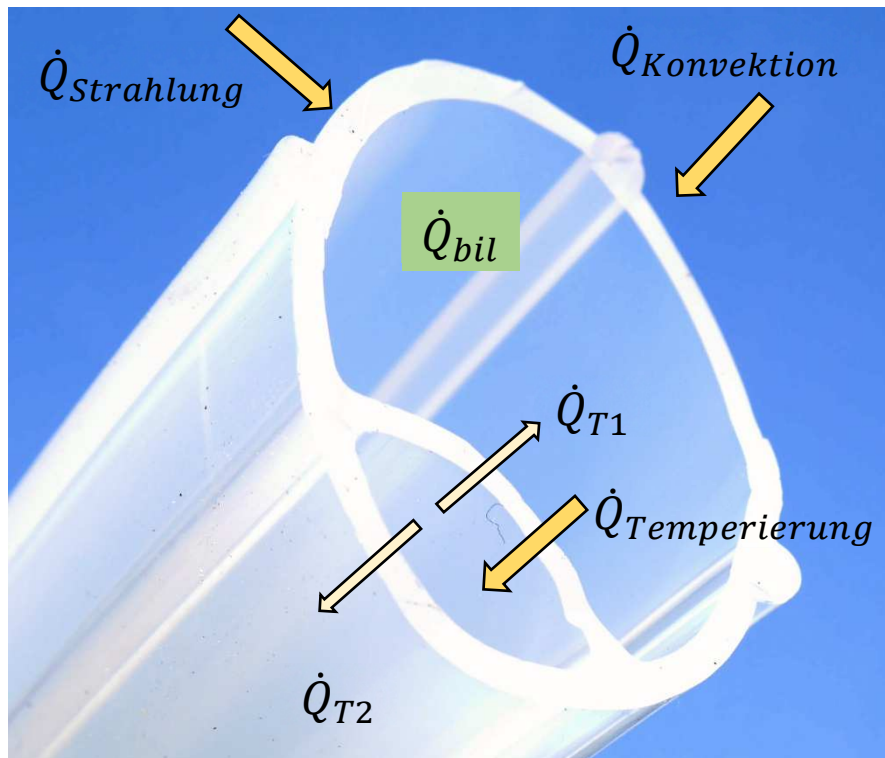


Abbildung 5-34 -Darstellung der prinzipiellen Wärmeströme im Hinblick auf die Wärmebilanz (Pfeilrichtung definiert Vorzeichen)

Im Folgenden ist die Berechnungsvorschrift für die Ermittlung der Austrittstemperatur der Suspension aufgeführt (Beispiel: Wasser):

$$\dot{Q}_{bil} = \dot{Q}_{Strahlung} + \dot{Q}_{Konvektion} - \dot{Q}_{Temperierung} - \dot{Q}_{T2} \quad \text{Gl. 5-45}$$

$$\dot{Q}_{Strahlung} = I_T = I_0 * \frac{A_M}{2} * \rho_{IR} * T(\theta) * Y(\theta) \quad \text{Gl. 5-46}$$

$$\dot{Q}_{Konvektion} = A_M * \alpha_K * (\vartheta_{Gewächshaus} - \vartheta_{Susp.}) \quad \text{Gl. 5-47}$$

$$\dot{Q}_{Temperierung} = \dot{m}_{Temp.} * c_{p,H_2O} * (\vartheta_{Temp.,Austritt} - \vartheta_{Temp.,Eintritt}) \quad \text{Gl. 5-48}$$

$$\dot{Q}_{Temperierung} = \dot{Q}_{T1} + \dot{Q}_{T2} \quad \text{Gl. 5-49}$$

$$\dot{Q}_{T2} = k * A_{M2} * (\overline{\vartheta_{Temp.}} - \vartheta_{Susp.}) \quad \text{Gl. 5-50}$$

$$\vartheta_{Susp.,t=i+1} = \frac{\dot{Q}_{bil}}{\dot{m}_{Susp.} * c_{p,H_2O}} + \vartheta_{Susp.,t=i} \quad \text{Gl. 5-51}$$

Die Berechnung des Wärmeeintrages aufgrund von Sonnenstrahlung ($\dot{Q}_{Strahlung}$) erfolgte in Anlehnung an Gl. 5-10 sowie der Erkenntnisse aus Abschnitt 5.2.1, jedoch unter Nutzung des IR-Anteils der Globalstrahlung (Gl. 5-46). Dieser wird mit 0,456 angenommen (vgl. Tabelle 2-3), als konstant über den Wellenlängenbereich der Globalstrahlung und unabhängig vom Sonnenhöhenwinkel. D.h. atmosphärische Änderungen und Einflüsse werden vernachlässigt. In Kombination mit dem Bestrahlungsgrad ($Y(\theta)$) wird die Mantelfläche zu 50 % in die Berechnung einbezogen. Dies folgt der Annahme, dass prinzipiell immer die Hälfte der Mantelfläche des Silikonschlauches des Lichtkollektors im Strahlengang der Direktstrahlung liegen kann (Halbkreis).

Der Wärmekapazitätsstrom $\dot{m}_{Temp.}$ wurde über den Messzeitraum konstant bei 5,1 l min⁻¹ geregelt. Somit konnte die Berechnung des Wärmestromes zwischen innerem (Temperierkreislauf) und äußerem Schlauchsegment mit Hilfe der gemessenen Temperaturen am Ein- und Austritt des Temperierkreislaufes kontinuierlich erfolgen. Aufgrund der geometrischen Konzeption des Doppelschlauches verfügt das Temperiersegment über eine definierte Mantelfläche zur Umgebung ($A_{M2} = 4,93 \text{ m}^2$), wodurch folglich ein Wärmeübergang erfolgt (\dot{Q}_{T2}). Der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient (k) konnte in Vorversuchen als Mittelwert zu 15 W m⁻² K⁻¹ bestimmt werden. Der daraus resultierende Verlustwärmestrom musste von dem Gesamtanteil subtrahiert werden (siehe Gl. 5-49), so dass der in die Suspensionskammer übergehende Wärmestrom (\dot{Q}_{T1}) berechnet werden konnte.

Der Berechnung der konvektiven Wärmeströme liegt die Beurteilung der Art der Konvektion zu Grunde. Hierbei gilt es zwischen freier und erzwungener Konvektion sowie der Mischform zu unterscheiden (vgl. Abschnitt 3.4). Aufgrund der Aufstellung der Lichtkollektoren im Gewächshaus mit geöffneten Seitenwänden ist der Ansatz einer gleichgerichteten Mischform verwendet worden. Demnach ist für die Berechnung der mittleren Nusselt-Zahl die den jeweiligen Bedingungen entsprechende Berechnungsvorschrift zu Grunde gelegt. Die für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K maßgebenden Nusselt-Zahlen sind in Abbildung 5-35 (links) dargestellt. Die mit einer Schwankungsbreite von 4,83 bis 12,92 (arithmetisches Mittel: 10,19) berechneten Nu-Zahlen für freie Konvektion liegen deutlich unterhalb derer für erzwungene Konvektion von 0,3 bis 214,7 (arithmetisches Mittel: 78,0). Für Letztere ist die Windgeschwindigkeit als vorherrschende Prozessgröße ausschlaggebend.

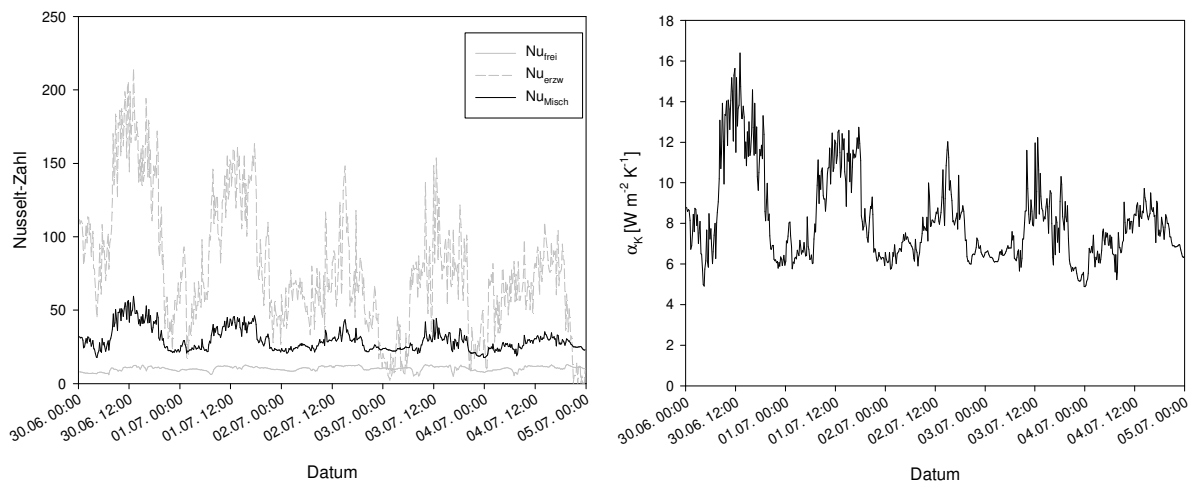


Abbildung 5-35 – links: Nusselt-Zahlen (Nu) über den Bilanzzeitraum 30.06. bis 04.07.2017 (grau durchgezogen: Nu für freie Konvektion; grau gestrichelt: Nu für erzwungene Konvektion; schwarz durchgezogen: Nu für Mischkonvektion mit faktorieller Wichtung) rechts: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient α_K (Mischform)

Die Gleichung zur Berechnung der Mischform aus freier und erzwungener Konvektion aus Tabelle 3-3 ist mit 2 Faktoren (a, b) ergänzt worden, um den örtlichen Begebenheiten (Parameter b) und der geometrischen Grundform (Parameter a) gerecht zu werden (Gl. 5-52). Die nach dem VDI Wärmeatlas gültigen empirischen Ansätze für die Nu-Zahlen gelten für freie, gerade horizontale Zylinder bzw. einer Rohrreihe. Die Lichtkollektoren basieren auf einem kegelstumpfförmigen Grundkonzept auf kreisförmiger Stellfläche. Aus diesem Grund ist die Nutzung der Parameteranpassung erfolgt, um die Angleichung der Temperaturprofile zu erreichen.

$$Nu_{Misch} = \sqrt[3]{(a * Nu_{frei})^3 + (b * Nu_{erzw})^3} \quad \text{Gl. 5-52}$$

Die Faktoren sind mit Hilfe einer Parameteranpassung (Excel-Solver) an die Sensordaten angelegt, sodass eine minimale Abweichung der zeitlichen Temperaturänderungen vorliegt. Der Anteil der freien Konvektion ist mit $a = 2,267$, der Anteil der erzwungenen Konvektion mit $b = 0,267$ bewertet. Daraus ergibt sich die Nusselt-Zahl der Mischform im zeitlichen Verlauf (schwarze durchgezogene Linie in Abbildung 5-35 links) und weiter der konvektive Wärmeübergangskoeffizient der Mischform in Abbildung 5-35 rechts (α_K von 4,88 bis 16,39 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$, arithmetisches Mittel 8,14 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$). Als Überstromlänge dient der Halbkreisbogen des Silikonschlauches.

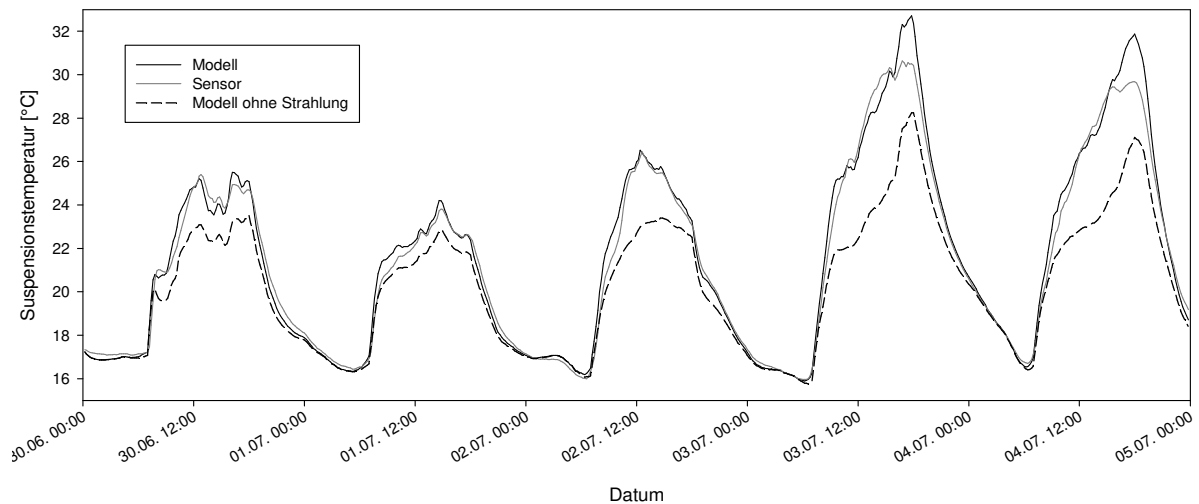


Abbildung 5-36 -Temperaturprofil der Suspensionskammer im Zeitraum vom 30.06. bis 04.07.2017

In Abbildung 5-36 ist das Temperaturprofil der Suspensionskammer (gefüllt mit Wasser) im Bilanzierungszeitraum vom 30.06. bis 04.07.2017 dargestellt. Der gemessene Sensorwert des Umlaufmediums ist als graue durchgezogene Linie aufgetragen. Das beschriebene Modell ist mit dem Messwert der Suspensionskammer zum Zeitpunkt 30.06. 0 Uhr (17,34 °C) als Startwert belegt ($\vartheta_{Susp.,t=0}$). Der sich daraus ergebende Temperaturverlauf ist als schwarze durchgezogene Linie abgebildet. Im Ergebnis liegen beide Temperaturprofile innerhalb eines 95% Vorhersageintervalls (s. Abbildung 5-37 links) – mit Ausnahme von drei zeitlich begrenzten Abschnitten von weniger als 6 % aller ermittelten Datenpunkte.

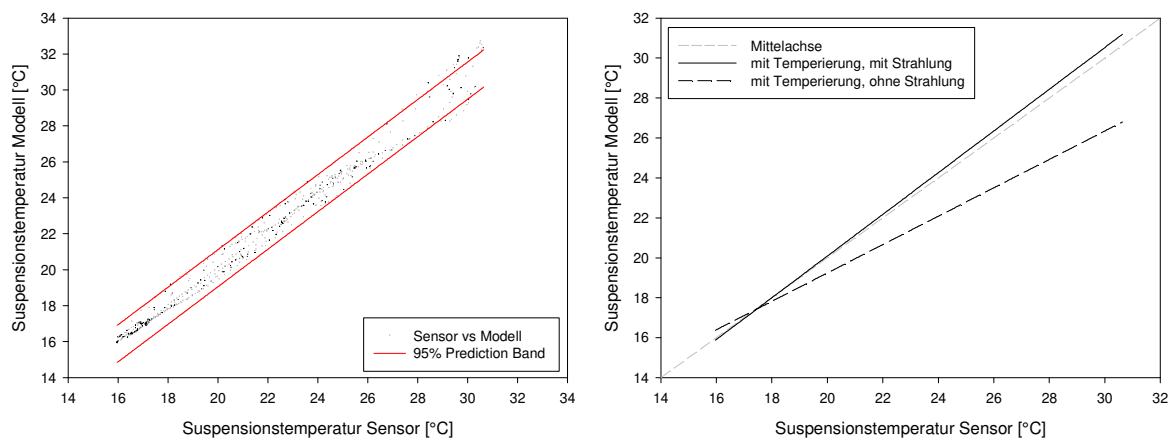


Abbildung 5-37 -Modell mit und ohne Strahlungsanteil

links: Zusammenstellung Temperaturpunkte nach Modell und Sensor (rote Linien 95 % Vorhersageintervall; $R^2 = 0,9854$)

rechts: Darstellung der Regressionsgeraden der Modellwerte mit (schwarz durchgezogen) und ohne (schwarz gestrichelt) Strahlungsanteil; als Vergleich Mittelachse (grau gestrichelt)

Das Temperaturprofil des Modells ohne direkte Bewertung des Strahlungseintrages ($\dot{Q}_{Strahlung} = 0$) ist anhand der gestrichelten Linie in Abbildung 5-36 dargestellt. Im Vergleich zum Verlauf der, anhand des Temperaturfühlers, aufgezeichneten Wassertemperatur, liegt die nach dem Modell berechnete Temperatur tagsüber mit teilweise mehr als 5 Kelvin deutlich niedriger. Bei einem Sonnenhöhenwinkel kleiner 0 liegt, wie zu erwarten war, kein Unterschied bei den Temperaturen vor. In Abbildung 5-37 rechts ist dieser Zusammenhang anhand der Regressionsgeraden, jeweils im Vergleich zur Sensortemperatur, übersichtlich dargestellt.

Das Modell nutzt als Lichteintrittsfläche die Mantelfläche des Lichtkollektors, quantitativ bewertet mit Hilfe des Bestrahlungs- und Transmissionsgrades. Unter Beachtung der Nichtberücksichtigung der örtlichen Begebenheiten und der damit zusammenhängenden Beeinflussung baulicher Komponenten, welche zu einer zusätzlichen Beschattung und Temperaturbeeinflussung beitragen, kann das Modell mit weiteren Ansätzen unter Verwendung unterschiedlicher Bezugsgrundflächen für den Strahlungseintrag auf Plausibilität überprüft werden.

Einerseits sollten die Stellfläche des Lichtkollektors sowie die durch den Lichtkollektor im Tagesverlauf hervorgerufene Schattenwurffläche in der Horizontalebene und andererseits eine Trapezfläche sowie ein abgerollter Halbkegelstumpf, angelehnt an die Geometriedaten des Lichtkollektors (Anstellwinkel 75 Grad) als Basisflächen herangezogen werden. Der Vergleich berücksichtigt folgende Grundbeziehungen: den IR-Anteil der Globalstrahlung, einen bezugsflächen-abhängigen Transmissionsgrad in Abhängigkeit des Einfallwinkels, analog zu Abbildung 5-5, sowie die Art und Berechnung der Bezugsgrundfläche selbst. Daraus ergab sich eine spezifische Bezugsgrundfläche inklusive genannter Faktoren.

Die Berechnung des jeweiligen Strahlungseintrages erfolgte anhand nachfolgender Gleichungen (für das Strahlungsmodell wurde Gl. 5-46 herangezogen). Die Berechnung für den jeweiligen Transmissionsgrad $T_S(\theta_x)$ erfolgte anhand von Abbildung 5-5 für jede der folgenden Gleichungen mit dem entsprechenden Bezugswinkel, als Variable jedoch stets auf den Sonnenhöhenwinkel bezogen.

Stellfläche:

$$I_{Stellfläche} = I_0 * \sin(\theta) * T_S(90 - \theta) * A_G * \rho_{IR} \quad \text{Gl. 5-53}$$

Schattenwurffläche (für $A_S(\theta)$ liegt die Berechnung der Schattenwurffläche in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels zu Grunde (siehe Anhang A-4):

$$I_{Schattenwurffläche} = I_0 * \sin(\theta) * T_S(90 - \theta) * A_S(\theta) * \rho_{IR} \quad \text{Gl. 5-54}$$

Trapez und Halbkegelstumpf, im Lot zum Sonnenazimut: für θ kleiner 15° gilt θ_1 ($90^\circ - 75^\circ - \theta$), für θ größer 15° gilt θ_2 ($75^\circ - (90^\circ - \theta)$):

$$I_{Trapez} = I_0 * \cos(\theta_1/\theta_2) * T_S(\theta_1/\theta_2) * A_T * \rho_{IR} \quad \text{Gl. 5-55}$$

$$I_{Halbkegelstumpf} = I_0 * \cos(\theta_1/\theta_2) * T_S(\theta_1/\theta_2) * A_{HKS} * \rho_{IR} \quad \text{Gl. 5-56}$$

Die in Abbildung 5-38 dargestellten Werte beziehen sich auf die Gleichungen Gl. 5-46 und Gl. 5-53 bis Gl. 5-56, jedoch auf I_0 normiert und für 2 Lichtkollektoren berechnet, um die Versuchsbedingungen nach zu empfinden. Bezüglich der verschiedenen Bezugsgrundflächen zeigten sich unterschiedliche Profile im Tagesverlauf, welche sich im Wesentlichen auf unterschiedliche Abhängigkeiten zum Sonnenhöhenwinkel beziehen. Als ein wesentlicher Unterschied lässt sich festhalten, dass die Grundflächen mit Bezug zur Stellfläche (Stellfläche, Schattenwurf) mit niedrigem Sonnenstand, also in den Morgen- und Abendstunden, niedrige Bezugswerte liefern, da der Einfallswinkel sehr flach ist, wohingegen, wie zu erwarten war, die vertikal ausgelegten Bezugsflächen beginnend mit Sonnenaufgang hohe Einstrahlwerte verzeichnen können (Modellansatz, Trapez und Halbkegelstumpf).

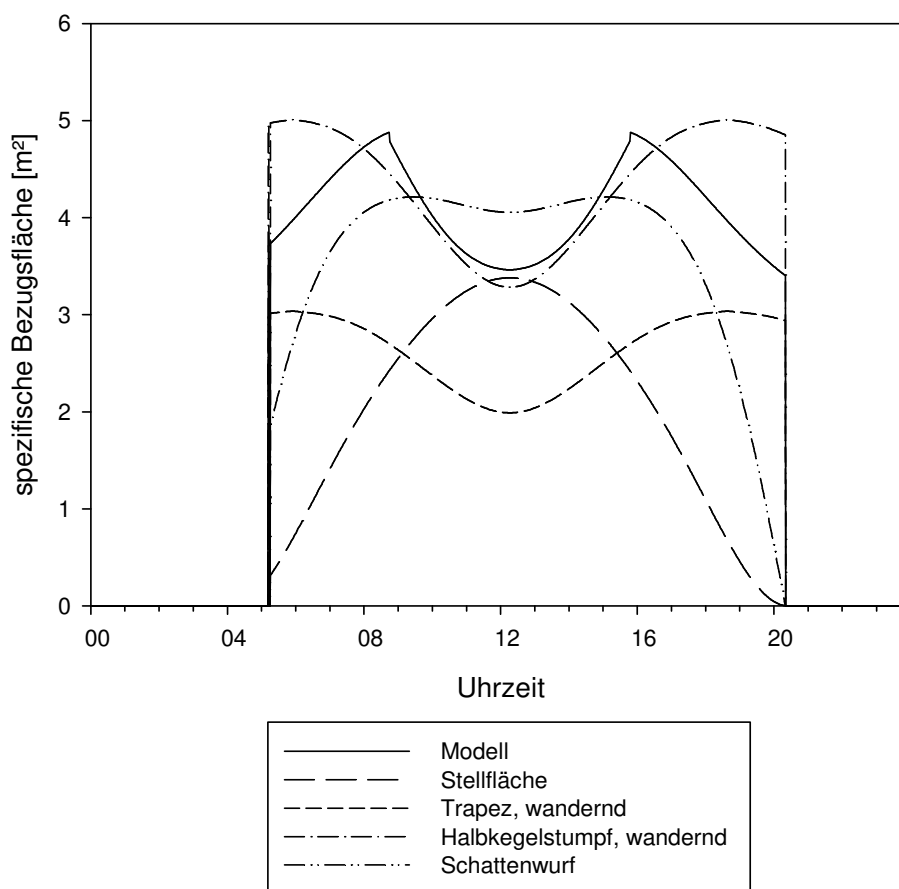


Abbildung 5-38 -Vergleich spezifischer Bezugsflächen (inkl. IR-Anteil, 0,456) als Basis für Wärmeeintrag (Beispiel: 30.06.2017, 2 Lichtkollektoren)

Für den Versuchszeitraum zur Wärmebilanzierung ergeben sich entsprechende Energiewerte für den täglichen Eintrag bezüglich IR von 16,9, 15,1, 16,5, 10,3 und 16,9 kWh pro Tag für die Ansätze des Modells, der Stellfläche, der Schattenwurffläche, des Trapezes sowie des Halbkegelstumpfes (in der Reihenfolge, arithmetische Mittelwerte). Modell und Halbkegelstumpf stimmen als Tagessumme überein, im Tagesverlauf sind jedoch Unterschiede feststellbar (siehe Abbildung 5-38). Es ist erkennbar, dass die Trapezfläche einen zu geringen Strahlungswert lieferte, da der Flächeninhalt dem wahren Wert des Lichtkollektors nicht entsprechen konnte. Ebenso lieferte ein Vergleich mit der reinen Stellfläche des Lichtkollektors zu geringe Werte. Die Abweichung im Bezug zur Schattenwurffläche lag bei ca. 2,4 % im Tagesverlauf.

Neben der Überprüfung des erstellten Modells zur Berechnung des Strahlungseintrages erlaubt die formulierte Wärmebilanz generell die Berechnung des Temperaturverlaufes der Suspension unter definierten Umgebungsbedingungen inklusive des Lichteintrages und kann für die Berechnung der Temperierung eingesetzt werden. Vordergründig stand die Verifizierung des Lichtmodells im Mittelpunkt.

5.3. Kultivierung im Tannenbaum-Photobioreaktorsystem

Mit der Modellierung des Strahlungseintrages in die Lichtkollektoren in Abschnitt 5.2 kann die Strahlungsaufnahme und das Temperaturverhalten der Tannenbaum-Photobioreaktoren bewertet werden. Um das Ziel einer stabilen Langzeitkultivierung umsetzen zu können, sind vorausgehende Untersuchungen zum Verfahrenskonzept der Freilandkultivierungen im Tannenbaum-Photobioreaktor zu untersuchen gewesen. Im Zuge dessen erfolgte die Betrachtung der weiteren Einflussparameter (siehe Abschnitt 4.1) hinsichtlich Arbeitskonzentration der Biotrockenmasse der Mikroalgenkultur, der Nährstoffversorgung sowie der Prozessstabilität bezüglich der Mikroalgenkultur selbst. Damit wurde die Grundvoraussetzung für eine stabile Langzeitkultivierung einerseits und die Auswertung bezüglich einer Effizienzbewertung des Biomassewachstums in Abhängigkeit der Globalstrahlung geschaffen.

5.3.1. Erarbeitung des Kultivierungsregimes als Grundlage für Langzeitkultivierungen

5.3.1.1. Bereich der Arbeitskonzentration der Biotrockenmasse im Kultivierungsverlauf

Zur Ermittlung des phototrophen Wachstumsverhaltens im Tannenbaum-Photobioreaktor sind einzelne Kultivierungen durchgeführt worden. Dabei kamen die Grünalgen *Chlorella kessleri* und *Scenedesmus vacuolatus* zum Einsatz, welche je nach Verfügbarkeit aus phototrophen als auch heterotrophen batch-Vorkulturen genutzt werden konnten, wobei die heterotrophen Vorkulturen zunächst keiner Adaption an Freilandbedingungen unterlagen. Als Startkonzentration zur Inokulation im Tannenbaum-PBR wurden $0,3 (\pm 0,1) \text{ g l}^{-1}$ angestrebt. Die Zusammensetzung der Nährstoffe wurde an das Setlik-Medium angelehnt. Anhand der täglichen Erfassung der Biotrockenmassekonzentration sowie der im Prozessmedium enthaltenen Nährstoffkonzentrationen erfolgte die Bewertung des phototrophen Wachstums unter Freilandbedingungen. Durch die Zugabe einzelner Nährstoffe konnte eine Limitation hinsichtlich sich verbrauchender Medienkomponenten verhindert werden. An dieser Stelle erfolgte noch keine detaillierte Optimierung hinsichtlich der Nährstoffzehrung.

Das Setup des Photobioreaktors bestand aus einem Lichtkollektormodul und einem Mischbehälter in Kreislauffahrweise. Das Gesamtkultivierungsvolumen betrug bei dieser Verschaltung ca. 450 Liter, davon 300 Liter als photoaktives Volumen (Lichtkollektor). In Abbildung 5-39 ist das Wachstumsverhalten anhand des Verlaufes der Biotrockenmassekonzentration der Einzelkultivierungen von *Scenedesmus vacuolatus* (a) und *Chlorella kessleri* (c) dargestellt. Grau unterlegt ist die jeweils eingefallene Tagessumme der Globalstrahlung. Die Aufzeichnung der GHI konnte erst ab dem 20.06.2013 erfolgen, so dass eine genaue Auswertung hinsichtlich des Strahlungseinfalls erst ab diesem Datum möglich war. Die jeweils

rechten Graphen (b) und (d) stellen die mittlere Suspensionstemperatur im Zeitraum von 7 bis 21 Uhr (schwarze ausgefüllte Kreise) mit den Tagesmaxima (oberer Balken) und Tagesminima (unterer Balken) dar. Letztere Werte weisen gleichzeitig auf die Tiefstwerte bei Nacht hin.

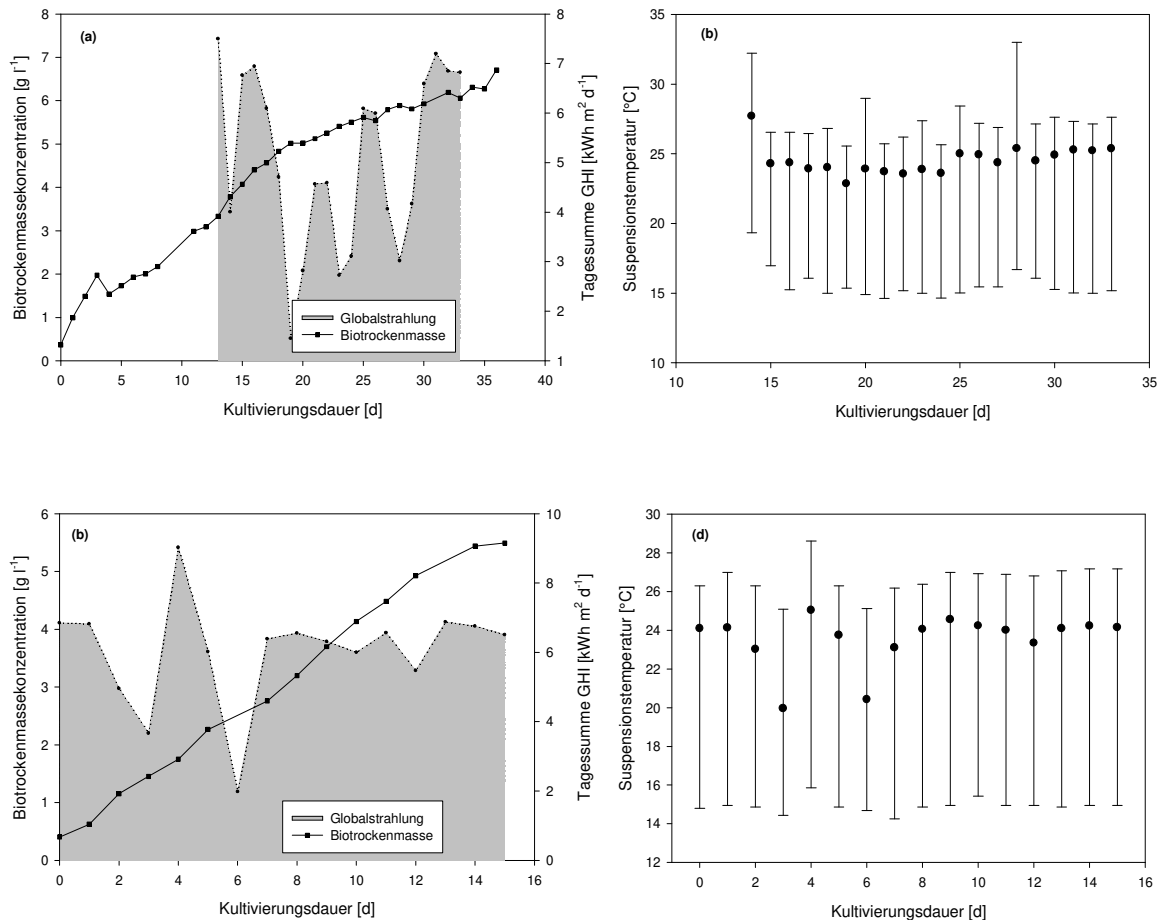


Abbildung 5-39 -Einzel-Kultivierungen im Tannenbaum-Photobioreaktor (Kultivierungsvolumen: 450 l)
oben: *Scenedesmus vacuolatus* (Zeitraum: 06.06.2013 – 12.07.2013)
unten: *Chlorella kessleri* (Zeitraum: 08.07.2013 – 23.07.2013)

Die Kultivierung von *Scenedesmus vacuolatus* erfolgte über einen Zeitraum von 36 Tagen. Die dabei maximal erreichte Biotrockenmasse betrug $6,71 \text{ g l}^{-1}$, was einer durchschnittlichen Biomasseproduktivität von $0,18 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ entspricht. Die maximal erzielte Biomasseproduktivität betrug $0,45 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. In Bezug auf einen Zeitraum von mehreren Tagen (hier: sechs Tage) konnte eine Biomasseproduktivität von $0,29 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ zwischen $3,09$ und $5,02 \text{ g l}^{-1}$ erzielt werden. Oberhalb davon verringerte sich die Produktivität auf durchschnittlich $0,11 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, was zu der oben genannten durchschnittlichen Produktivität führte. Allerdings trafen aufgrund von instabilen Wetterbedingungen teilweise weniger als 200 W m^{-2} pro Tag auf, so dass ein verringertes Wachstum zu erklären ist. Dennoch verlief der Zuwachs an Biomasse proportional der eintreffenden Globalstrahlung, so dass eine ausreichende Lichtverfügbarkeit gewährleistet werden konnte und das Wachstum nur bezüglich des Lichtes limitiert war (Vorgriff auf

Abbildung 5-40 links). Der Verlauf der Suspensionstemperatur unterstützt diese Annahme dahingehend, dass ein stabiler Verlauf der mittleren Suspensionstemperatur tagsüber sowie der Nachttemperaturen mit Hilfe der integrierten Temperierung geregelt werden konnte. Die mittlere Suspensionstemperatur zwischen 7 und 21 Uhr betrug 24,7 °C (zwischen 12 und 15 Uhr 26,4 °C). Maximal waren die Mikroalgen einer Temperatur von 32,9 °C an Kultivierungstag 28 ausgesetzt, was auf einen kurzzeitigen Ausfall der Steuerung aufgrund eines elektronischen Defektes zurückzuführen war. Nachts, zwischen 21 und 7 Uhr, wurde die Suspensionstemperatur aktiv herabgesetzt und erreichte 17,2 °C (Tiefstwert 14,6 °C), um den Biomasserückbau zu verringern und das Kontaminationsrisiko zu minimieren.

Die in Abbildung 5-39 dargestellte Kultivierung von *Chlorella kessleri* wurde am 08.07.2013 anhand einer Inokulation von im Labor heterotroph kultivierter Biomasse gestartet. Mit einer Biotrockenmassekonzentration von 0,41 g l⁻¹ zu Beginn konnte innerhalb von 15 Kultivierungstagen eine Konzentration von 5,49 g l⁻¹ erzielt werden, was einer durchschnittlichen Produktivität von 0,34 g l⁻¹ d⁻¹ entspricht. Maximal wurden 0,52 g l⁻¹ d⁻¹ erreicht. Zwischen 7 und 21 Uhr lag die mittlere Suspensionstemperatur bei 23,5 °C (24,8 °C zwischen 12 und 15 Uhr). An den Kultivierungstagen drei und sechs wurde die mittlere Suspensionstemperatur aufgrund von geringer Lichtintensität auf 20,0 bzw. 20,4 °C abgesenkt. In den Nachtabschnitten zwischen 21 und 7 Uhr lag die Suspensionstemperatur bei durchschnittlich 16,3 °C (Tiefstwerte nachts im Mittel bei 14,9 °C).

Bei beiden Wachstumskultivierungen sind weitestgehend stabile Parameter bezüglich des Biomassewachstums festzustellen gewesen. Um die ausreichende Lichtversorgung der Mikroalgen bewerten zu können, ist die Tagessumme der eingetroffenen Globalstrahlung (als kWh m⁻² d⁻¹) in Bezug zur jeweils im Reaktor befindlichen mittleren Biotrockenmassekonzentration (relative Lichtverfügbarkeit) zur in diesem Zeitraum erzielten Wachstumsrate (μ) sowie volumetrischen Biomasseproduktivität ermittelt worden – graphisch veranschaulicht in Abbildung 5-40. Bei dieser Interpretation muss berücksichtigt werden, dass es sich um durchschnittliche Werte für μ und Produktivität bezüglich der Schichtdicke des Lichtpfades der Algensuspension handelt (maximale Wachstumsrate μ_{\max} bei Schichtdicke 0). Bezüglich des Verlaufes der Biotrockenmasse ist festzustellen, dass für die Kultivierung von *Scenedesmus vacuolatus* (linker Graph) ein linearer Zusammenhang bis zu einer Biotrockenmassekonzentration von 5,93 g l⁻¹ zu verzeichnen war. Obwohl die Zunahme an Mikroalgen ab Tag 19 mit einem verringerten Anstieg verlief, lag die, bezüglich der eintreffenden Globalstrahlung, erzielte Wachstumsrate weiterhin im linearen Bereich. Grund hierfür ist eine aufgrund höheren Wolkenaufkommens niedrigere Lichtversorgung der Mikroalgen (vgl. dargestellte Globalstrahlung in Abbildung 5-39). Bei der Kultivierung von *Chlorella kessleri* bestand ein linearer Zusammenhang zwischen eintreffender Globalstrahlung pro Biotrockenmassekonzentration und täglicher Wachstumsrate bis zu einer

Konzentration von $5,44 \text{ g l}^{-1}$, also einem leicht geringeren erzielten Wert im Vergleich zu *Scenedesmus vacuolatus*. Aufgrund schwankender Strahlungsbedingungen im Freiland ist dieser Unterschied jedoch nicht als grundlegend zu verstehen. Mit zunehmender Biotrockenmassekonzentration (eingetragen als Datenpunktbeschriftung in Abbildung 5-40, bezogen auf arithmetisches Mittel zweier aufeinanderfolgender Tage, betreffend der Berechnung für μ) sinkt die relative Lichtverfügbarkeit innerhalb der Mikroalgensuspension. Folglich konnten, wie zu erwarten war, geringere Werte für die durchschnittliche Wachstumsrate beobachtet werden. Ebenso können geringe Werte für die relative Lichtverfügbarkeit bei hohem Strahlungseintrag und geringer Biotrockenmassekonzentration hervorgerufen werden. Da es sich hier jedoch um eine Satzkultivierung handelte, ist dieser Sachverhalt im Laufe der Kultivierung mit steigender Konzentration nicht zu beobachten gewesen.

Die auf Tagesbasis bewerteten Zusammenhänge weisen jedoch nicht über den kompletten Kultivierungsansatz einen linearen Zusammenhang auf. Zu Kultivierungsstart (bis Tag 4) kommt es zu Adaptionen an vorherrschende Lichtverhältnisse, sodass diese in der Betrachtung nicht angewandt wurden. Zwei Datenpunkte lieferten scheinbar negative Zuwachsraten und wurden aus der Bewertung entfernt (vgl. Abbildung 5-39). Dies ist evtl. auf eine fehlerhafte repräsentative Probenentnahme zurückzuführen. Die als grau dargestellten Datenpunkte sind ebenfalls nicht in der Berechnung der Regression integriert.

Der Datenpunkt oberhalb der Regressionsgeraden im linken oberen Graphen rührt von einer unvollständigen Datenaufzeichnung, und somit als vermutlich zu gering eingeschätzter Tagessumme der Globalstrahlung, her. Eine Erklärung für den zweiten grau dargestellten Datenpunkt konnte nicht auf technische Aspekte zurückgeführt werden. Im rechten oberen Graphen, welcher die Kultivierung von *Chlorella kessleri* verfolgt, wurde 1 Datenpunkt aus der Berechnung entfernt, da auch hier das PLS keine lückenlose Aufzeichnung zur Verfügung stellte und demnach die Berechnung nicht vollständig erfolgen konnte. Der hier in grau dargestellte Datenpunkt stellt den letzten Biomassezuwachs von $5,44$ zu $5,49 \text{ g l}^{-1}$ dar. Hier kam es bereits zu einem verringerten Wachstum aufgrund vermehrt auftretender Begleitmikroorganismen, so dass die errechnete Wachstumsrate auch hier nicht innerhalb eines linearen Zusammenhanges zu finden war.

Im beobachteten Verlauf konnte im Hinblick auf die erzielte volumetrische Produktivität im Zusammenhang mit der relativen Lichtverfügbarkeit bei *Scenedesmus vacuolatus* (linker unterer Graph in Abbildung 5-40) ebenso ein linearer Zusammenhang festgestellt werden, so dass sich die Kultur zu diesen Zeitpunkten im licht-limitierten Bereich befand. Bei der Betrachtung der Daten zur volumetrischen Produktivität von *Chlorella kessleri* ist ein größeres

Streuverhalten zu beobachten sowie ein möglicher Verlust an Photonen aufgrund der geringen Biotrockenmassekonzentration und somit hoher relativer Lichtverfügbarkeit.

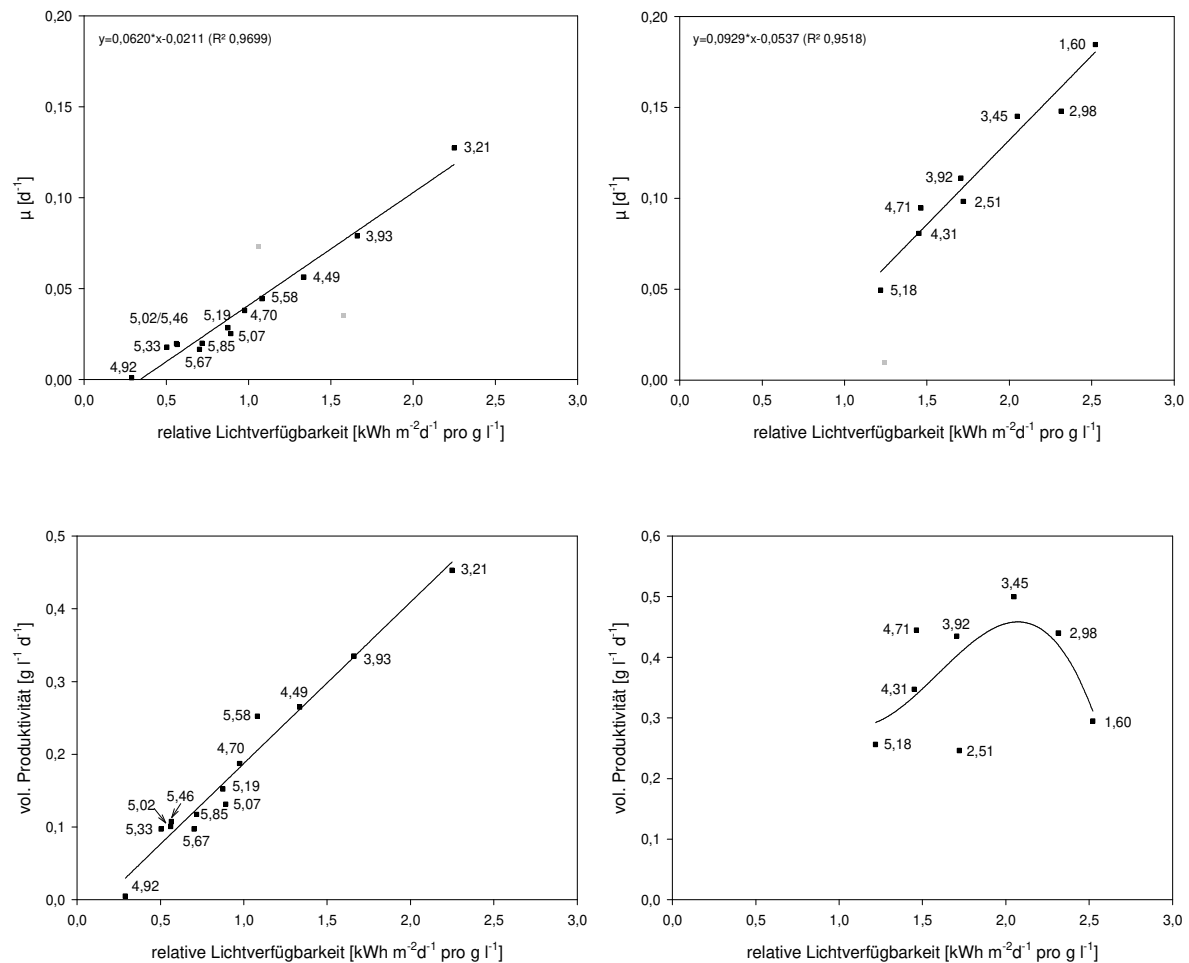


Abbildung 5-40 – mittlere Wachstumsrate und volumetrische Produktivität in Abhängigkeit zur relativen Lichtverfügbarkeit, dargestellt als Tagessumme der Globalstrahlung, normiert auf BTM links: *Scenedesmus vacuolatus*, 20.6. bis 06.07.2017 (2 Datenpunkte aus Kultivierungsverlauf entfernt) rechts: *Chlorella kessleri*, 12.7. bis 22.7.2017 (1 Datenpunkt aus Kultivierungsverlauf entfernt, aufgrund nicht kompletter Datenaufzeichnung durch das Prozessleitsystem)

Aufgrund der geringen Datendichte ist hier jedoch kein prinzipieller Unterschied zwischen beiden Kulturen und Versuchsansätzen vorzunehmen. Gleichwohl liegen die Maxima hinsichtlich der Produktivitäten bei beiden Kultivierungen während des Verlaufes im Bereich von max. $0,5 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Die Anstiege der Regressionsgeraden der lichtabhängigen Wachstumsrate lagen bei *Scenedesmus vacuolatus* bei 0,0620 und bei *Chlorella kessleri* bei 0,0929. Ab Tag 7 (bei *Chlorella kessleri*) herrschten hinsichtlich der Strahlungsintensität gleichbleibende Bedingungen bei hoher Globalstrahlung, so dass der höhere Anstieg und die damit verbundene höhere Wachstumsrate erklärbar sind. Ein Auftragen beider täglich erzielten Wachstumsraten

in Bezug zur relativen Lichtverfügbarkeit ergibt einen Anstieg von 0,0788 und lässt den linearen Charakter ebenso erkennen.

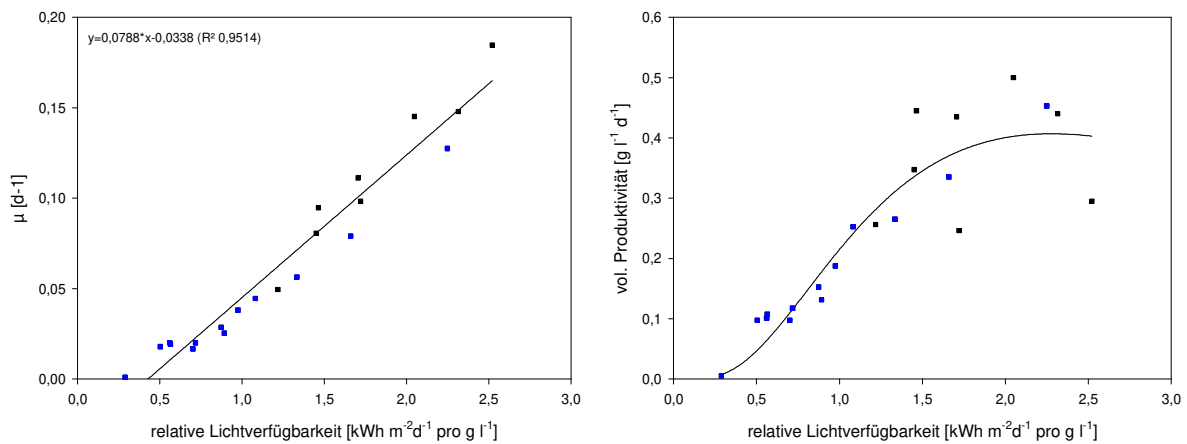


Abbildung 5-41 -gemeinsame Auftragung der täglich erzielten Wachstumsrate (links) und volumetrischen Biomasseproduktivität (rechts) während der Kultivierung von *Scenedesmus vacuolatus* (blaue Datenpunkte) und *Chlorella kessleri* (schwarze Datenpunkte) in Bezug zur relativen Lichtverfügbarkeit als Tagessumme der Globalstrahlung, normiert auf Biotrockenmasse

In Abbildung 5-41 rechts ist die volumetrische Biomasseproduktivität gegenüber der relativen Lichtverfügbarkeit dargestellt. Es zeigt sich ein größeres Streuverhalten ab ca. 1,5 kWh m⁻² d⁻¹ je g l⁻¹ BTM, was durch die Kultivierungsdaten von *Chlorella kessleri* hervorgerufen wird. Im Zusammenhang mit den Erklärungen zu Abbildung 5-40 lässt sich, anhand der gemeinsam aufgetragenen Daten zur volumetrischen Produktivität, ein mögliches Verlassen des rein lichtlimitierten Wachstums aufzeigen und beginnt in einem Bereich von 0,4 bis 0,5 g l⁻¹ d⁻¹.

Mit Hilfe der Anwendung der linearen Regression lassen sich die jeweiligen Lichtkompensationspunkte abschätzen, gleichwohl diese in diesem Ansatz lediglich auf die Tagessumme der Globalstrahlung basieren. Die Bestimmung des realen Lichtkompensationspunktes beruht hingegen auf einer Versuchsdurchführung mit gleichbleibender Biomassekonzentration und variierender Lichtintensität (vgl. Abschnitt 2.1), was im Freiland und im Bereich dieser Kultivierungsvolumina nicht zielgerichtet umsetzbar ist. Dennoch lassen sich Rückschlüsse auf die Lichtversorgung während des Kultivierungsverlaufes ziehen. Ab einer Tagessumme von 0,429 kWh m⁻² d⁻¹, bezogen auf die Biotrockenmasse, konnte in den Versuchen ein Biomassezuwachs festgestellt werden (Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Abszissenachse in Abbildung 5-41). Dies entspricht einer mittleren PPFD von 39,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Unter Beachtung des Transmissionsgrades von 0,6 bei senkrechter Einstrahlung bei der hier verwendeten Geometrie 3, ergibt sich eine mittlere momentane PPFD von 23,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Im weiteren Kultivierungsverlauf sollte überprüft werden, ob die durch Ernten einer Teilmenge und demnach einem Ausdünnen der im Photobioreaktor befindlichen Kulturlösung wieder mit vergleichbaren Wachstumsraten kultiviert werden kann. Dabei wurden die Konzentrationen der Kultur von *Chlorella kesslerii* von 5,49 g l⁻¹ auf 2,13 g l⁻¹ durch Abernten und Auffüllen mit frischem Prozessmedium und die Kultur von *Scenedesmus vacuolatus* durch Umsetzen in ein Doppelreaktorsystem (850 L Kultivierungsvolumen) und gleichzeitigem Ausdünnen auf 1,97 g l⁻¹ herabgesetzt. Anhand von Abbildung 5-42 ist erkennbar, dass beide Mikroalgenkulturen einen offenbar stetigen Verlust der Biotrockenmassekonzentration zu verzeichnen hatten.

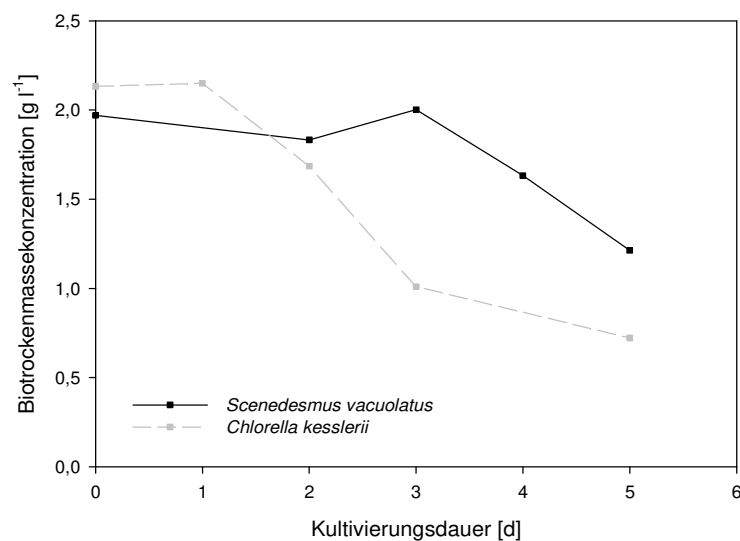


Abbildung 5-42 -Verlauf der Biotrockenmasse bei der Kultivierung von *Scenedesmus vacuolatus* (durchgezogene Linie) und *Chlorella kesslerii* (gestrichelte Linie) nach Ausdünnen der Biotrockenmassekonzentration

Eine Zunahme an Mikroalgen konnte nicht mehr erreicht werden. Jedoch kam es aufgrund verringerten Wachstums der Mikroalgen zu einem Anstieg von Bakterien, so dass die Populationsdynamik zu Gunsten kontaminierender Mikroorganismen gewechselt ist und somit keine „stabilen“ Wachstumsverhältnisse für die Mikroalgen vorherrschten. Nach jeweils 5 Kultivierungstagen wurden beide Versuche abgebrochen. Um das Ziel zur Erarbeitung eines effektiv umsetzbaren Konzentrationsbereiches unter Freilandbedingungen zu erzielen, sollte demnach die obere Grenze des Arbeitsbereiches der Biotrockenmassekonzentration unter Freilandbedingungen bei den verwendeten Mikroalgen und phototrophen Wachstumsbedingungen nicht oberhalb von 5 g l⁻¹ liegen.

5.3.1.2. Anpassung des Nährstoffmilieus

Das Hauptziel in Bezug auf die Nährstoffversorgung ist die Vermeidung limitierender Wachstumsbedingungen durch ein Versiegen einzelner Nährstoffkomponenten und damit der Sicherstellung stabiler Wachstumsbedingungen.

Die Basis der Kultivierungsmedien bei sämtlichen Arbeiten bei den Freilandversuchen stellte Leitungswasser dar. Die darin enthaltenen Salze wurden bei der Zusammenstellung der Kulturlösung berücksichtigt, um eine gezielte Zusammensetzung gewährleisten sowie Einsparpotentiale unter Verwendung des am Standort verfügbaren Wassers nutzen zu können. Eine detaillierte Darstellung der allgemeinen Parameter und Salzionenkonzentrationen des verwendeten Leitungswassers ist in Tabelle 9-2 im in Anhang A-3 zu finden.

Im Labormaßstab werden häufig sogenannte „Vollmedien“ für klassische batch-Kultivierungen verwendet, um eine ausreichende Versorgung mit Nährstoffen über den gesamten Kultivierungsverlauf sicherstellen zu können. Diese Medien sind in aller Regel im deutlichen Überschuss zusammengesetzt. Für die Umsetzung einer stabilen Langzeitproduktion mit regelmäßigen Ernten wird eine Anpassung der Nährsalzzusammensetzung benötigt, um möglichst gleichbleibende Bedingungen im Prozessmedium zu gewährleisten. Hierfür wurden im Labormaßstab zunächst zeitlich begrenzte Kultivierungen in 2 l Blasensäulen durchgeführt (CO₂-Zufuhr 2 % v/v). Hinsichtlich des Biomassewachstums erfolgten vergleichend Ansätze mit Vollmedium (hier: Setlik-Medium, siehe Abschnitt 4.2.2) und damit verbundenen hohen Gesamt-Salzkonzentrationen sowie ein Medienansatz mit reduziertem Anteil an Nährsalzionen, aber täglicher Dosierung der Nährstoffe. Der Kultivierungsverlauf ist für eine Dauer von 8 Tagen verfolgt worden. Ausgehend von einer Biomassekonzentration an Mikroalgen von 0,376 bzw. 0,333 g l⁻¹ ist ein vergleichbarer Verlauf der Biotrockenmasse erkennbar (vgl. Abbildung 5-43 links). Nach 8 Tagen lagen die Biotrockenmassekonzentrationen bei 2,476 und 2,532 g l⁻¹ mit einer durchschnittlichen Produktivität von 0,263 und 0,275 g l⁻¹ d⁻¹.

Um die im Prozessmedium verfügbare freie Konzentration an Nitrat-Ionen aufrecht zu erhalten, muss die verbrauchte Menge ausgeglichen werden. In Abbildung 5-43 rechts ist erkennbar, dass bis Tag 5 die Konzentration an Nitrationen leicht abnimmt, d.h. dass mehr Nitrat verbraucht als zugegeben wurde. Deshalb ist an Kultivierungstag 5 eine erhöhte Zugabe an Nährsalzen erfolgt. Gleichzeitig lässt sich, im Zuge der Nährstoffdosierung von Kaliumnitrat (KNO₃), eine Erhöhung der Kalium-Ionenkonzentration erkennen. Es kommt zu einer „Aufsalzung“ der komplementären Ionen. Am Beispiel KNO₃ lässt sich dieser Effekt veranschaulichen, da bei einem Einbau von Stickstoff in die Biomasse und einem damit verbundenen Verbrauch an Nitrat eine Erhöhung der Kalium-Konzentration im Prozessmedium durch ein Nachdosieren an KNO₃ erfolgt. Als Lösungsansatz können regelmäßige Teilernten und ein Austausch des Prozesswassers oder alternative Stickstoffquellen dienen. Da bei phototrophen Kulturmedien die Stickstoffquelle als Nährsalz den, bzgl. der einzusetzenden Konzentration, größten Anteil darstellt, ist diese als Beispiel hier herangezogen worden.

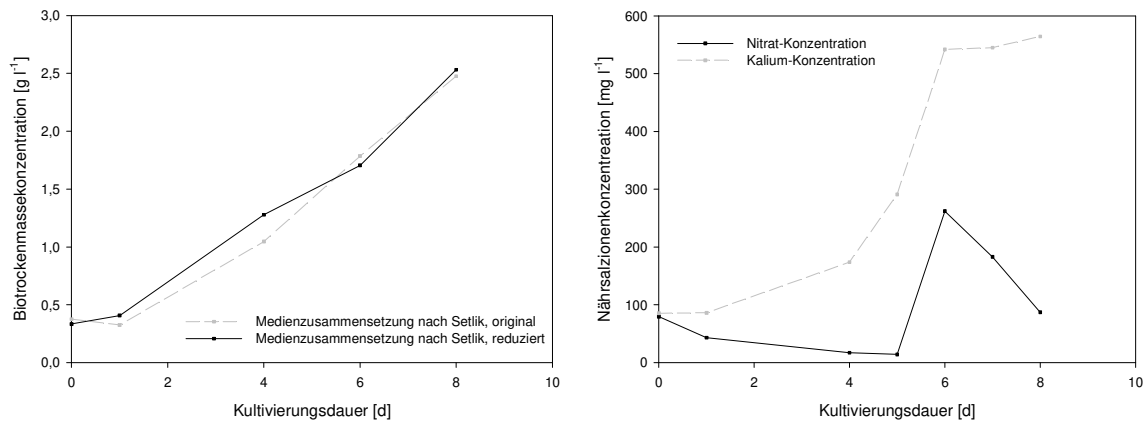


Abbildung 5-43 -Vergleich zur Medienzusammensetzung anhand von Kultivierungen von *Scenedesmus vacuolatus* in 2l-Blasensäulen (PPFD: 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), durchgeführt in 2-fach Ansatz links: Verlauf der Biotrockenmassekonzentration mit reduziertem Setlik-Medium (schwarze Kurve) und original zusammengesetztem Medium (graue Kurve) rechts: Verlauf der Nährsalzionenkonzentrationen von freiem Nitrat (schwarze Kurve) und Kalium (graue Kurve) bei der Kultivierung mit reduziertem Setlik-Medium und Nachdosierung

Zur Sicherstellung der Nährstoffversorgung im größeren Maßstab, hinsichtlich Kultivierungsvolumina und Freilandkultivierungen, wird die Versorgung der Nährsalzionen in höheren Konzentrationen angestrebt. In einem Bereich von 200 bis 400 (600) mg l^{-1} Nitrat-Ionen sollen die Freilandkultivierungen durchgeführt werden. Der Verlauf der Nährstoff-ionenkonzentration für die Kultivierung in den Tannenbaum-Photobioreaktoren ist in Abbildung 5-44 beispielhaft für Kaliumnitrat innerhalb von 100 Tagen dargestellt. Die Aufsatzung von Kalium ist anhand der rot-markierten Punkte, welche eine Zugabe an KNO_3 darstellen, ersichtlich. Während zwischen den Nährstoffzugaben die Konzentration an Nitrat im Prozesswasser aufgrund des Biomassewachstums abnimmt, bleibt die Kaliumkonzentration nahezu konstant. Mit einer erneuten Zugabe an KNO_3 wird der Verlust an Nitrat ausgeglichen und die Kaliumkonzentration steigt. Bis Kultivierungstag 70 erfolgte keine Ernte von Mikroalgenbiomasse, demzufolge wurde das Prozesswasser nicht ausgewechselt und das vorhandene Kalium konnte nicht entfernt werden. Erst mit einem teilweisen Austauschen des Prozesswassers (Tag 70 und Tag 77) wurde der Kaliumspiegel gesenkt.

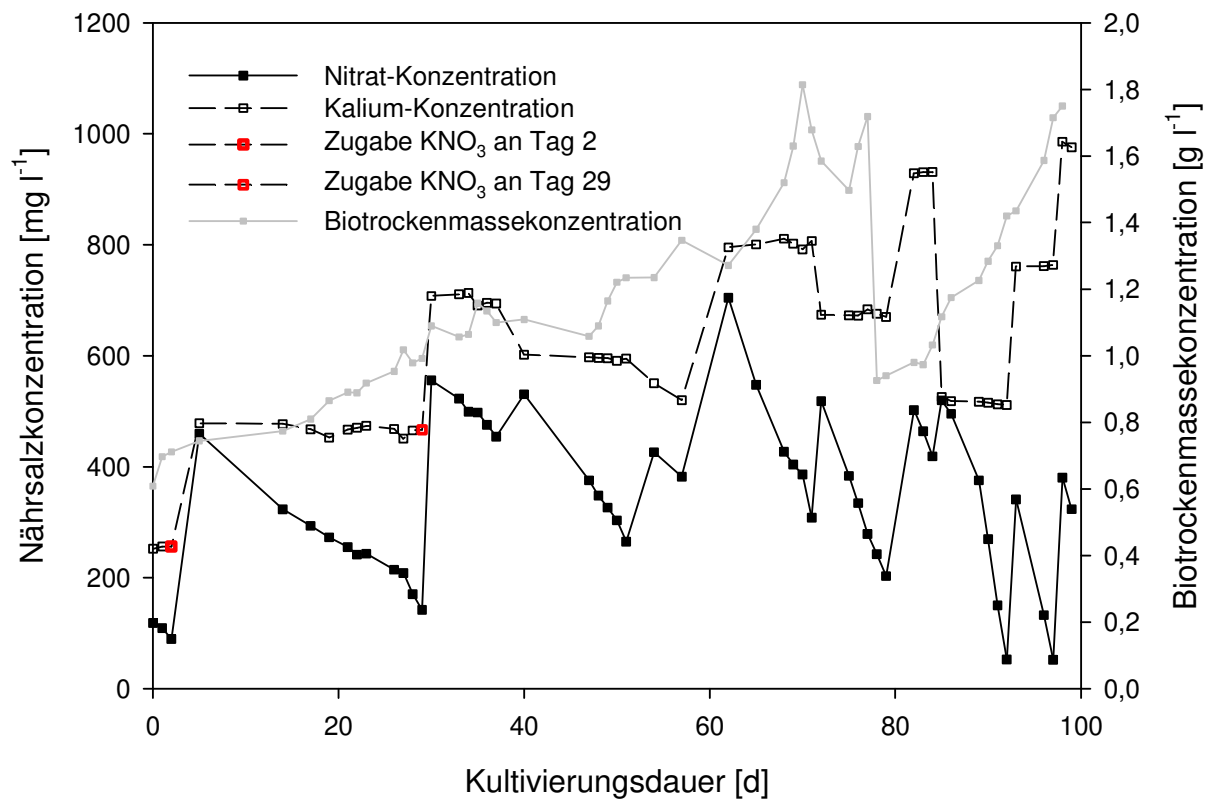


Abbildung 5-44 – Verlauf der Nährsalzkonzentration und „Aufsalz-Effekt“ im Zeitraum vom 17.12.14 bis 26.03.2015 in Teilanlage 1 (Reaktor 3 und 4, 850 l), rot-markierte Datenpunkte markieren beispielhaft eine Zugabe von KNO_3

Um den Effekt veranschaulichen zu können, ist der Kultivierungsbereich vom 17.12.2014 bis 26.03.2015 dargestellt. In diesem Zeitraum erfolgte aufgrund geringen Wachstums bei gleichzeitig niedrig gehaltener Biomassekonzentration im PBR-System die Ernte nur zu unregelmäßigen Abständen. Im gesamten Kultivierungsverlauf betrachtet, erwies sich die regelmäßige Absenkung der Kalium-Konzentration durch einen teilweisen Austausch des Prozesswassers als praktikabel.

5.3.1.3. Zum Ansatz von selbststabilisierenden Kulturen

Im Zuge der Kultivierungsversuche sind im Hinblick auf die Prozessstabilität der Mikroalgenkultur für Freilanduntersuchungen Anpassungen notwendig gewesen, da ein Auftreten von Fraßfeinden beobachtet werden konnte.

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, sind in der vegetativen Kultivierungsperiode 2013 zunächst Einzelkulturen von *Scenedesmus vacuolatus* und *Chlorella kessleri* als Grundlage für die Untersuchungen in den Tannenbaum-Photobioreaktoren im Freiland verwendet worden. Mit fortschreitender Nutzungsdauer und Jahreszeit konnte ab September 2013 ein Auftreten von Fremdorganismen beobachtet werden, welche das Wachstum der Mikroalgenkulturen konsequent beeinflusst haben. Hierbei schien es sich um einen

parasitären Wasserpilz, vermutlich einen Vertreter der Aphelidien (siehe Abschnitt 6.4), zu handeln.

In Abbildung 5-45 sind mikroskopische Aufnahmen einer *Scenedesmus vacuolatus* Kultur vom 27.09.2013 zu sehen. Einem zunächst auftretenden Befall von mobilen Schwärmerzellen folgt ein Andocken an die Mikroalgenzelle (Abbildung 5-45 oben links). Infolgedessen kommt es offenbar zu einer zystenartigen Penetration der schützenden Zellwand und –membran, so dass der Parasit in die Mikroalgenzelle eindringen kann. Das sich bildende Plasmodium nutzt die Zellorganellen der *Scenedesmus*-Zellen als Grundlage zur Weiterentwicklung, so dass es zu einer Rückbildung der Zellorganellen kommt (oben rechts). Die fortschreitende Rückbildung ist mikroskopisch anhand der schwindenden chlorophyll-haltigen Chloroplasten sichtbar (unten links). Einer Plasmodienfragmentierung (unten rechts) folgen offenbar ein Ausschleusen und ein Neubefall neuer Zellen als Schwärmerzellen.

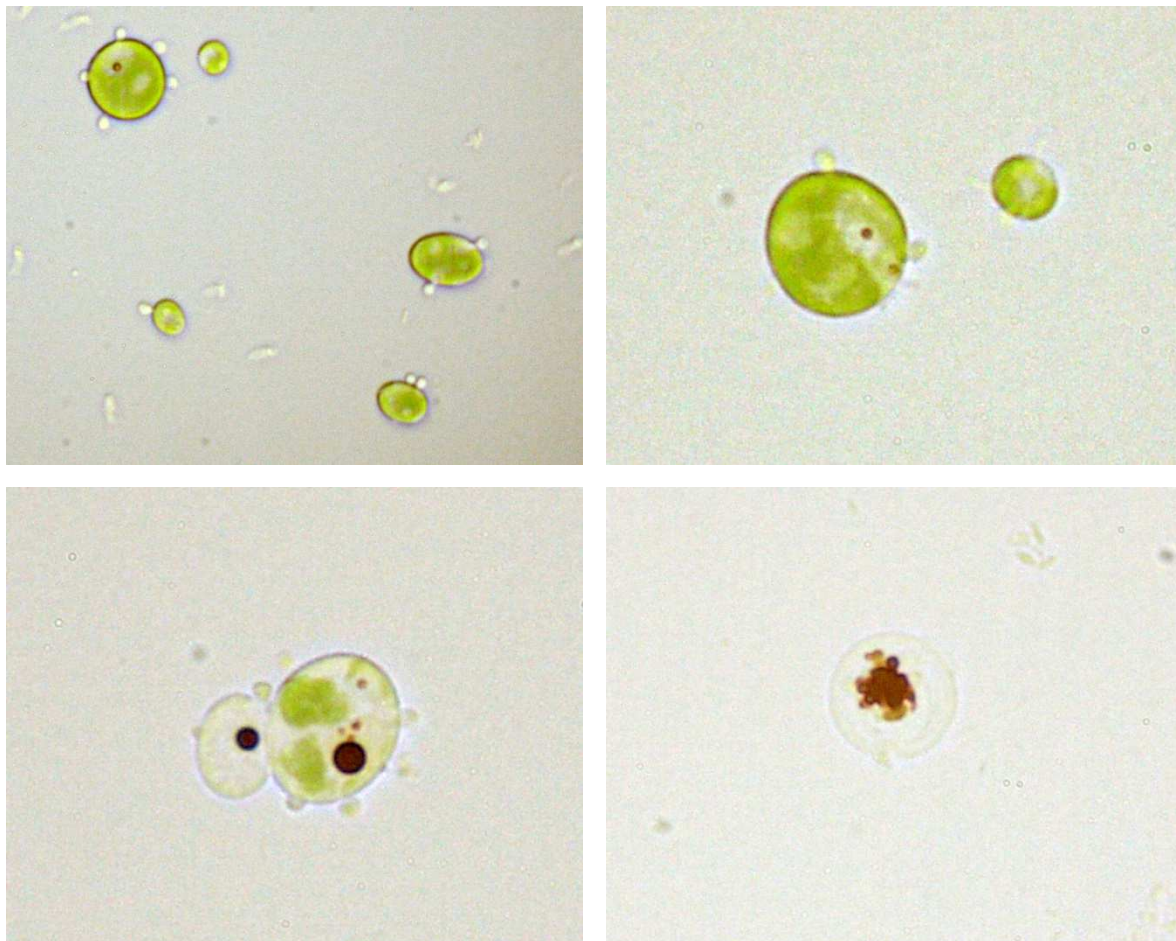


Abbildung 5-45 -infizierte *Scenedesmus vacuolatus* Kultur (Mikroskopie 27.09.2013)

oben links: amöboide Zellen, freischwimmend und zystenartige Penetration in *Scenedesmus*-Zellen

oben rechts: beginnende Ausbreitung und Rückbildung der Zellorganellen

unten links: sich weiter rückbildende Zellorganellen und sich entwickelnde Plasmodien

unten rechts: vermutlich beginnende Plasmodienfragmentierung

In Abbildung 5-46 ist die sich ausbreitende Infektion von vermutlich Aphelidien in einer *Scenedesmus vacuolatus* Kultur vom 02.10. – 14.10.2013 zu sehen. Nach einer Kultivierungsdauer von nur 7-9 Tagen, sind befallene Zellen von *Scenedesmus vacuolatus* im Mikroskop sichtbar gewesen. Innerhalb von weiteren 3 bis 5 Tagen breiteten sich die parasitären Wasserpilze stetig aus. Zu diesem Zeitpunkt ist die Kultur bereits nicht mehr gezielt in Richtung Mikroalgenwachstum steuerbar. Eine komplett infizierte Mikroalgenkultur mit Totalverlust ist in Abbildung 5-46 rechts dargestellt.

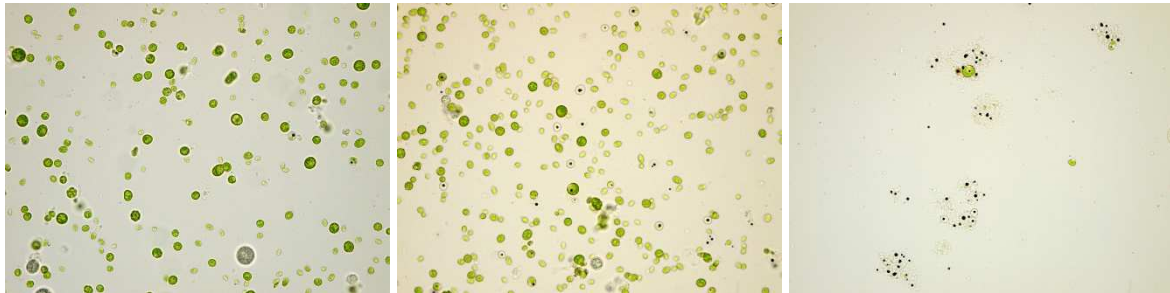


Abbildung 5-46 - infizierte *Scenedesmus vacuolatus* Kultur (02.10. – 14.10.2013)
links, Tag 9: beginnende Penetration und Ausbreitung
mitte, Tag 12: verstärktes parasitäres Verhalten und Rückdrängen der Mikroalgenkultur
rechts, Tag 28: Totalzusammenbruch der Mikroalgenkultur

Es war zu beobachten, dass, sobald die Parasiten eine gewisse „Grenzkonzentration“ überschreiten, die Algenkultur, teilweise über Nacht, komplett zusammenbricht und sich die Kulturlösung bräunlich färbt.

Hinsichtlich einer Spezifik bezüglich der Mikroalgenkulturen zeigte sich eine Tendenz dahingehend, dass ein Befall der *Scenedesmus vacuolatus* Kulturen am schnellsten in Erscheinung trat. Jedoch kam es auch bei *Chlorella kessleri* Kulturen zu einem Befall, sowohl bei einer Mischkultur aus beiden Mikroalgen als auch bei Monokulturansätzen. Allerdings war zu beobachten, dass *Chlorella kessleri* anscheinend nicht im selben Maße beeinflusst bzw. befallen wurde, was eine zeitliche Verlängerung der Kultivierung zur Folge hatte, jedoch ebenfalls unweigerlich zum Zusammenbruch führte. Es ist also zu vermuten, dass eine gewisse Spezifik hinsichtlich des Wirtverhaltens vorhanden ist.

Eine mögliche Bekämpfung des Parasiten lag zunächst in der Grundidee, benötigte Lebensbedingungen des Parasiten einzuschränken. Da es sich um einen aeroben Mikroorganismus handelt, ist das Vorkommen von Sauerstoff von obligater Bedeutung. Mit Hilfe einer Nachtabschaltung der Umwälzpumpen (sowohl seitens der Mikroalgensuspension als auch des Temperierkreislaufes), sowie durch die Zugabe von Glukose während des Nachtzyklus, wurde versucht, gezielt anaerobe Bereiche in der Prozessumgebung zu schaffen. Beide Varianten führten lediglich zu einer Verlangsamung des Infektionsverhaltens aufgrund von nur zeitlich beschränkter Inhibierung des Parasiten. Folglich ist lediglich eine Verlängerung der Kultivierungszeit um ca. 7 Tage möglich gewesen. Untersuchungen mit erhöhten Salzkonzentrationen (bspw. Kaliumnitrat), wie es bei der Bekämpfung von Chytridien

eingesetzt werden kann, brachten keinen nennenswerten Erfolg hinsichtlich einer inhibierenden Wirkung auf die parasitären Mikroorganismen.

Da eine Bekämpfungsstrategie im Bereich sauerstoff-generierender und –verbrauchender Metabolismen sich nicht als zielführend darstellte, wurde der oben beschriebene Ansatz des Einsatzes verschiedener Kulturen mit unterschiedlich starkem Infektionsrisiko gewählt. Hierzu sind die in Abschnitt 4.2.1 aufgelisteten Mikroalgen hinsichtlich ihrer Kultivierbarkeit untersucht worden. Es zeigte sich, dass sich innerhalb von wenigen Tagen die Kultur von *Scenedesmus obliquus* rasch als Leitkultur etablierte. Damit einhergehend konnte das Auftreten der bis dahin mit jedem Kultivierungsansatz wiederkehrenden parasitären Wasserpilze zurückgedrängt werden. Die weiteren Mikroalgenpezies konnten, bis auf die *Chlorella*-Vertreter, nicht mehr in nennenswerter Anzahl mikroskopisch nachgewiesen werden. Es etablierte sich innerhalb weniger Tage eine hinsichtlich Zusammensetzung, Wachstum und Inhaltsstoffen stabile Mikroalgenkultur (siehe Abschnitt 5.3.2). Dennoch ist der Ansatz einer selbststabilisierenden Kultur im Vergleich zu einer Einzelkultur von *Scenedesmus obliquus* in Bezug zum Infektionsrisiko gegenüber den parasitären Wasserpilzen als robuster einzuschätzen. Einzelkulturen von *Scenedesmus obliquus* wurden ebenfalls nach mehreren Tagen befallen.

Gezielte Abwehr- und Vermeidungsstrategien im Zuge der Nutzung von Einzelkulturen im Freiland sind nicht Gegenstand der hier dargestellten Versuche.

5.3.1.4. Vergleich Schlauchgeometrien hinsichtlich stabilen Kultivierungsverhaltens

Die zwei vorhandenen Basis-Konzepte des Doppelschlauches (Geometrie 3 und Geometrie 4) sind hinsichtlich ihrer Eignung zur stabilen Produktion von Mikroalgenbiomasse untersucht worden. Hierzu wurde der Zeitpunkt genutzt, als beide Doppelschlauchsysteme zeitgleich installiert auf den Lichtkollektormodulen vorlagen. Am 21.08.2014 konnten beide Systeme, bestehend aus jeweils 2 Lichtkollektoren und 1 Mischbehälter, mit Mischkultur inokuliert werden. Zu Versuchsstart erfolgte die Einstellung beider Teilanlagen auf die gleiche Ausgangskonzentration der Biomasse von ca. 1 g L^{-1} , indem die Kulturlösung aus Teilanlage 1 volumetrisch gleichwertig auf beide Teilanlagen aufgeteilt wurde (Abbildung 5-47). Die Kultivierung im System mit der molchbaren Geometrie (schwarze durchgezogene Linie) ist nur ein Ausschnitt aus der für die Langzeitkultivierung verwendeten stabilen Mischkultur im gleichen Zeitraum. Hier wurden im Abstand von 1 bis 3 Tagen die Schlauchsegmente der Algensuspension mit einem Molch 1x am Tag gereinigt, um die Lichteintrittsflächen frei von Biobelägen zu halten. Beide Reaktoreinheiten wurden mit Pulsation betrieben, d.h. simultan zur Förderung der Mikroalgensuspension erfolgte das Eintragen von zeitlich definierten Luftpulsen am Eintritt der einzelnen Kollektormodule, so dass zusätzliche Turbulenzen erzeugt werden konnten.

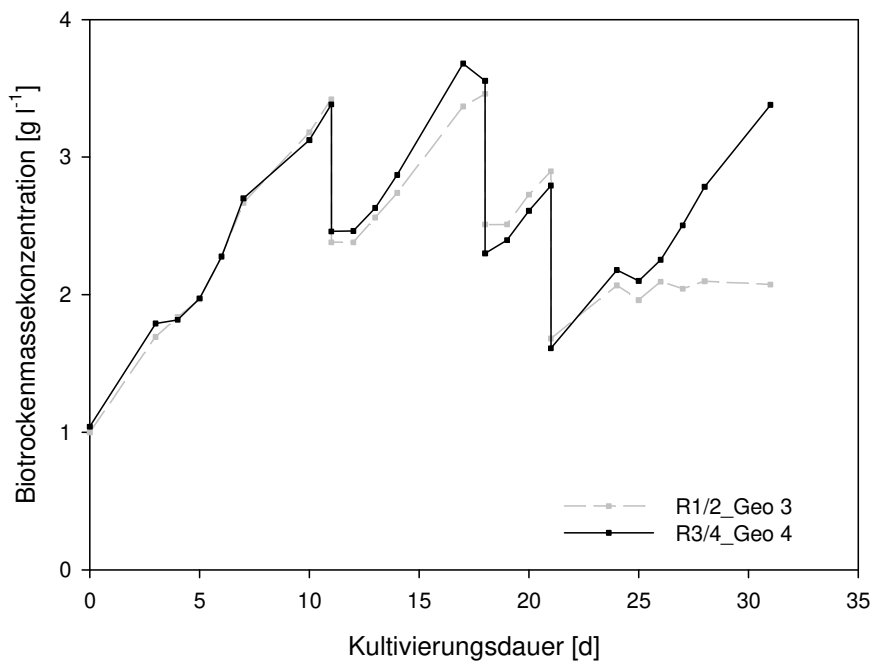


Abbildung 5-47 -Vergleichskultivierung der Mischkultur im Parallelbetrieb von R1/2 (mit Geometrie 3) und R3/4 (mit Geometrie 4) im Zeitraum vom 21.08.2014 bis 22.09.2014

Die in Abbildung 5-47 dargestellte Vergleichskultivierung der Mischkultur im Parallelbetrieb beider Teilanlagen (R1/2 und R3/4) erfolgte hinsichtlich der Prozessbedingungen gleichwertig. Das erarbeitete Regime zum Aufrechterhalten der Nährstoffionen sowie die pH-Wert-gesteuerte CO₂-Regelung (mittlerer pH-Wert 7,2 bei Teilanlage 1 und 7,6 bei Teilanlage 2) erfolgten ebenso für beide Anlagen wie auch die Temperierung der Mikroalgensuspension. Wie anhand Abbildung 5-47 zu beobachten ist, verliefen beide Mikroalgenkulturen hinsichtlich des Verlaufes der Biotrockenmassekonzentration annähernd gleichwertig. An den Kultivierungstagen 12, 19 und 22 erfolgten in beiden Systemen Teilernten. Dazwischen sind durchschnittliche Werte der Produktivität hinsichtlich der Biotrockenmasse von 0,22, 0,15, 0,13 und 0,04 g l⁻¹ d⁻¹ bei der Geometrie 3 und 0,22, 0,17, 0,16 und 0,18 g l⁻¹ d⁻¹ bei Geometrie 4 zu beobachten gewesen. Während innerhalb der ersten drei Wachstumsabschnitte ein zunächst vergleichbares Verhalten bezüglich des Biomassewachstums zu beobachten war, zeigte sich ab Kultivierungstag 25 eine Stagnation bei Geometrie 3. Anhand Abbildung 5-48 lässt sich erkennen, dass die Lichteintrittsflächen der Geometrie 3 (linkes Bild) aufgrund von Biofilmbildung komplett „blockiert“ waren, wohingegen die Geometrie 4 freie Lichteintrittsflächen aufwies, so dass die Kultivierung in diesem System fortgeführt werden konnte.

Die Kultivierung im System mit der nicht-molchbaren Geometrie (graue gestrichelte Linie) begann mit einer frisch gesäuberten und desinfizierten Anlage und wurde an Tag 31 beendet. Es konnte kein Wachstum mehr erzielt werden, da die Lichteintrittsflächen durch Biobelag

zugesetzt waren (s. Abbildung 5-48 links). Die Kultivierung im molchbaren System wurde nach Tag 33 weitergeführt, da die Lichteintrittsflächen aufgrund der Molchbarkeit nicht zugesetzt waren (s. Abbildung 5-48 rechts) und mündeten in die Langzeitkultivierung, welche in Abschnitt 5.3.2 beschrieben wird.



**Abbildung 5-48 -links: Geometrie 3 (freie Stelle per Hand Biofilm „abgedrückt“), Foto erstellt nach Ablassen der Teilanlage
rechts: Geometrie 4 (freie Stelle ist Pulsationsblase), Foto erstellt während Betrieb und Pulsation**

Die Lichtkollektoren der Geometrie 3 konnten während des Kultivierungsbetriebes nicht gereinigt werden. Aufgrund der geometrischen Anordnung des zentrierten Innenschlauches ist die Einführung eines Molches nicht praktikabel durchführbar, so dass eine Totalernte und Ausgliederung des Lichtmoduls und anschließende Entfernung des Biofilmes mit chemischen Reinigungsmitteln erfolgen musste.

In weiteren Versuchen zeigten sich vergleichbare Ergebnisse. Durch eine regelmäßige Nutzung eines Molches können die Lichteintrittsflächen weitestgehend frei von Biobelägen gehalten werden. Dadurch kann eine erhebliche Steigerung der Kultivierungsdauer gegenüber der Verwendung der Schlauchgeometrie mit zentriertem Innenschlauch erzielt werden. In Abbildung 5-49 sind hierfür beispielhaft die Lichtkollektorschläuche, welche während des Erntevorganges kurzzeitig (teilweise) geleert werden, beider Geometrien dargestellt.



Abbildung 5-49 -Vergleich zur Biobelagbildung an den Innenwänden des Schlauchsegmentes der Mikroalgenkultur (Datum: 16.12.2014; Ernte am selben Tag)
links: Schläuche der Geometrie 3 nach Kultivierungstag 65
rechts: Schläuche der Geometrie 4 nach Kultivierungstag 117 (fortlaufend)

Die Innenwände der nicht-molchbaren Geometrie 3 sind zu einem Großteil mit Biobelägen besetzt (Kultivierungstag 65), wohingegen die Biobelagbildung bei der molchbaren Geometrie deutlich vermindert ist, zumal es sich zum selben Tag in diesem Reaktormodul bereits um Kultivierungstag 117 handelt.

5.3.2. Stabile Langzeitkultivierung von Mikroalgenbiomasse mit gleichbleibender Zusammensetzung

Anhand der vorangegangenen Versuche in Abschnitt 5.3.1 konnte ein Kultivierungsregime erarbeitet werden, um das Ziel einer stabilen Langzeitkultur erreichen zu können. Neben konstruktiven Anpassungen und gezielten Maßnahmen zur Steigerung der Prozesshygiene, wie der Reduzierung von Totzonen im peripheren Verteilungssystem sowie der Nutzung von mechanischen Reinigungssystemen zur Nutzung als inline System, erfolgte im Hinblick auf die Schaffung und Aufrechterhaltung idealer Wachstumsbedingungen die Einführung von Kultivierungsalgorithmen. Hierzu sind Arbeitsbereiche als Hilfsgrößen der Biotrockenmassekonzentration sowie des Nährstoffmilieus eingeführt worden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Langzeitkultivierung dargestellt. Das Hauptaugenmerk lag bei einer stabilen Langzeitkultivierung durch Aufrechterhaltung idealer

Wachstumsbedingungen. Als „Messgrößen“ hierfür wurden festgelegt: die biologische Stabilität, bewertet nach täglicher mikroskopischer Begutachtung, die Produktivität sowie das Verhältnis der Inhaltsstoffe der Mikroalgenbiomasse.

Die Vorbereitung des Inokulates erfolgte zunächst in vier Blasensäulen im Labor (nach Bedingungen erwähnt in Abschnitt 4.2.1). Im Anschluss daran ist die Kulturlösung in einen Photobioreaktor im 100 Liter Maßstab im Gewächshaus überführt worden. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Abschluss der Versuche zur Langzeitkultivierung ist keine Frischinokulation aus dem Labor mehr nötig gewesen. Nach erfolgter Volumenvergrößerung und ersten Adaption an Freilandbedingungen erfolgte die Inokulation in das Plattformsystem der Photobioreaktoren (Teilanlage 2) am 15.04.2014, so dass der 16.04.2014 als Kultivierungstag „0“ festgelegt werden konnte.

Insgesamt konnte die Kultivierung der Mikroalgenkultur über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren bis zum 24.05.2016 (Kultivierungstag 769) durchgeführt werden (siehe Abbildung 5-50). Der gesamte dargestellte Kultivierungsverlauf ist mit Hilfe der vier Kollektormodule der Plattform in intelligenter Verschaltung umgesetzt worden. In Anlehnung an das Gesamtkultivierungsvolumen, dargestellt in Abbildung 5-54, ist die prinzipielle Verschaltung der einzelnen Lichtkollektormodule abzulesen. Ein Kultivierungsvolumen von 450 l entspricht dabei der Nutzung von 1 Modul (= 1 Lichtkollektor), 850 l der Nutzung von 2 Modulen, innerhalb einer Teilanlage. Insgesamt teilen sich 4 Module auf 2 Teilanlagen auf.

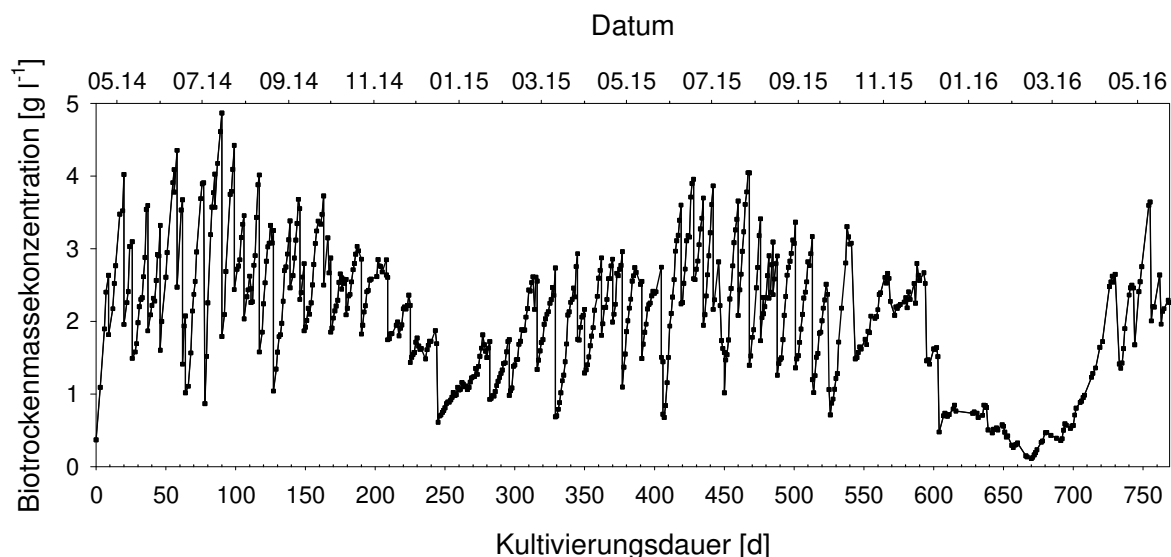


Abbildung 5-50 -Kultivierungsverlauf anhand der Biotrockenmassekonzentration über einen Zeitraum von mehr als 2 Jahren (16.04.2014 bis 24.05.2016)

Die biologische Stabilität konnte hinsichtlich auftretender Fremdorganismen nicht über den gesamten Kultivierungsverlauf aufrechterhalten werden, so dass eine Bewertung der Langzeitkultur nur für den Zeitbereich von 550 Tagen erfolgte, beginnend mit dem

Kultivierungsverlauf hinsichtlich der Biotrockenmasse in Abbildung 5-51. Im Winter 2015/2016 waren vergleichende Untersuchungen zum Vorjahreswinter (2014/2015) hinsichtlich der eingestellten Suspensionstemperatur geplant. Hierbei sollte eine höhere Suspensionstemperatur eingestellt und die erzielbare Produktivität hinsichtlich der Biomasse verglichen werden. Da sich die Kulturstabilität nicht aufrechterhalten ließ, konnten die Untersuchungen nicht zielführend durchgeführt werden.

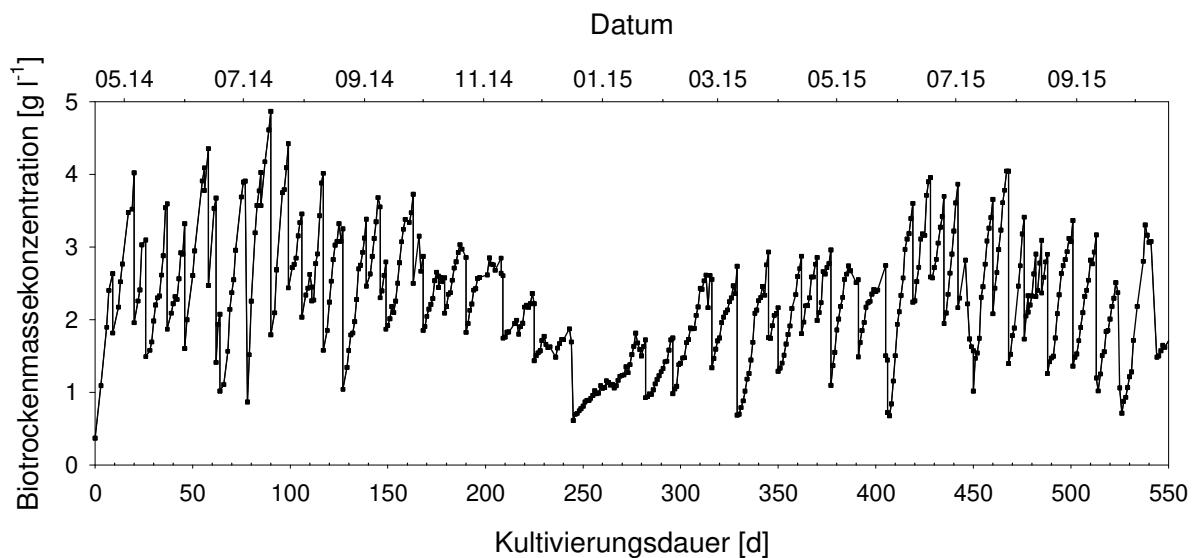


Abbildung 5-51 -Verlauf der Biotrockenmassekonzentration der Mischkultur im Zeitraum vom 16.04.2014 bis zum 18.10.2015

Der dargestellte Verlauf der Biotrockenmasse zeigt das Wachstum der Mikroalgenkultur anhand der Biotrockenmassekonzentration. Ein rapider Abfall der Konzentration stellt jeweils Erntezeitpunkte dar, anhand derer die Anpassung der Arbeitskonzentration aktiv gesteuert werden konnte. Hierbei erfolgte die Abtrennung eines Teilvolumens aus dem Kultivierungskreislauf und Auffüllung mit Frischwasser sowie der Zuführung von Nährsalzen, so dass zügig ein vollständiger Flüssigkeitskreislauf vorhanden war. Der Kultivierungsprozess war dementsprechend nur kurzzeitig unterbrochen, der Ernteprozess erfolgte diskontinuierlich. Die Abtrennung der Mikroalgenbiomasse vom ausgekreisten Erteevolumen erfolgte mittels eines diskontinuierlich arbeitenden Tellerseparators. Das überschüssige Prozesswasser wurde verworfen. Es wurde angestrebt, die Biotrockenmassekonzentration zu jeder Zeit oberhalb von 2 g l^{-1} zu halten, damit eine stabile Mikroalgenkultur im Prozessmedium vorhanden war. Ausnahmen davon stellten Zeitperioden mit geringem Strahlungseintrag aufgrund starker Bewölkung oder jahreszeitlich bedingt sowie ein Gegensteuern zu einem aufkommenden Kontaminationsdruck dar. Ein Erreichen hoher Biomassekonzentrationen oberhalb von 3 g l^{-1} gelang während Perioden von mehreren Tagen mit hohem Strahlungseintrag. So konnten Biotrockenmassekonzentrationen von $4,87 \text{ g l}^{-1}$ erzielt werden. Da das Hauptziel darin

bestand, eine stabile Langzeitkultur zu erreichen, wurde auf eine weitere Steigerung der Biotrockenmassekonzentration verzichtet (siehe Darstellung in Abschnitt 5.3.1.1).

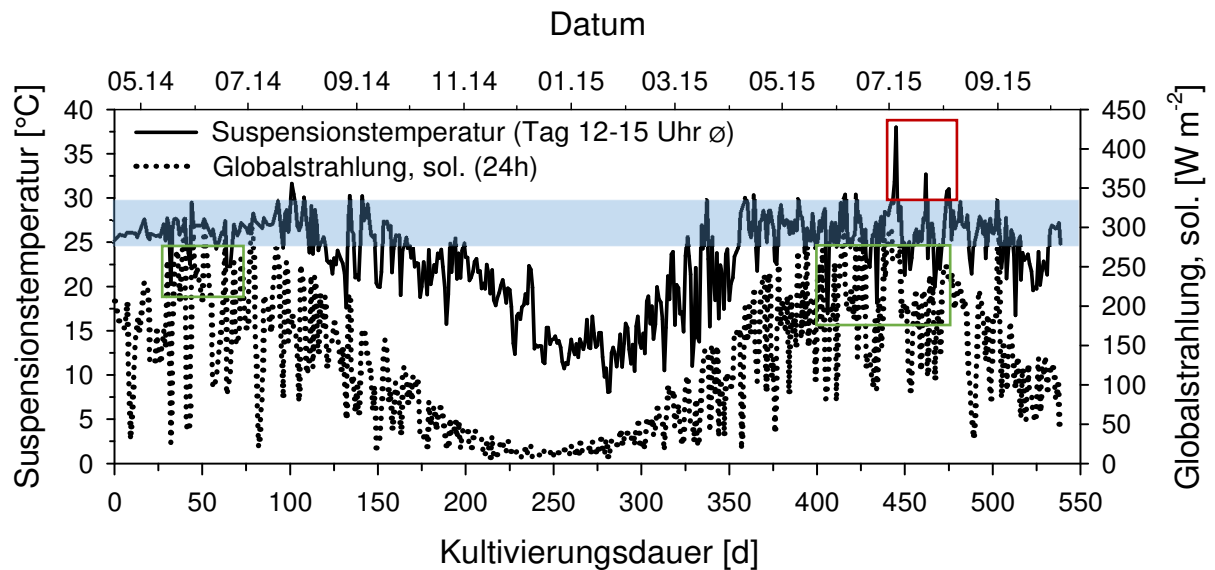


Abbildung 5-52 -Globalstrahlung (GHI), erfasst innerhalb des Gewächshauses, und Suspensionstemperatur (tagsüber 12 – 15 Uhr)

Der Jahresverlauf der eingefallenen solaren Globalstrahlung (GHI), eingetragen als Mittelwert über 24 Stunden, ist gemeinsam mit der durchschnittlichen Suspensionstemperatur zwischen 12 und 15 Uhr in Abbildung 5-52 dargestellt. Der gewählte Zeitbereich für die Ermittlung der Suspensionstemperatur beruht auf dem Ziel der Angabe eines stabilen Wertes, gleichzeitig in Betracht ziehend, dass im Regelfall während dieser Tageszeit die höchsten Umgebungstemperaturen herrschen. Demnach lagen die Werte der Suspensionstemperatur tagsüber im Regelfall zwischen 25 und 30 Grad in der hauptsächlich vegetativen Periode zwischen April und September des jeweiligen Kalenderjahres. Abweichungen nach unten wurden an Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung bewusst herbeigeführt (siehe grüne Quadrate). In seltenen Fällen ist die Temperatursteuerung aufgrund von technischen Ausfällen zum Erliegen gekommen. Aus diesem Grunde ist bspw. am 05.07.2015 die Suspensionstemperatur tagsüber auf bis zu 38 Grad gestiegen (vergleiche rotes Quadrat in Abbildung 5-52). Durch aktives Kühlen von außen mit Hilfe eines Wasserschlauches konnte mittels Verdunstungskühlung die Suspensionstemperatur wieder gesenkt und die Temperatursteuerung wieder gestartet werden. Grund für den technischen Ausfall waren vermutlich die hohen Umgebungstemperaturen von bis zu 38 Grad und zusätzlicher starker solarer Einstrahlung. Mit sinkender Globalstrahlung im Jahresverlauf wurde die Suspensionstemperatur der Mikroalgenkultur auf bis zu 15 Grad Celsius herabgesetzt.

Die anhand der täglichen Bestimmung der Biotrockenmasse ermittelte volumetrische Produktivität der Mikroalgenbiomasse ist in Abbildung 5-53 in monatlichen Abschnitten

dargestellt – einerseits als arithmetisches Monatsmittel (gefüllte Quadrate), andererseits als monatliche Maximalwerte (leere Quadrate). Innerhalb der ersten Kultivierungsmonate bis einschließlich Juli 2014 ist erkennbar, dass die durchschnittlich erzielten Produktivitäten bei 0,27 und 0,28 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ lagen. Im Mai 2014 lag der durchschnittliche Wert allerdings lediglich bei 0,23 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$. Der Grund hierfür lag in einem verringerten Mikroalgenwachstum aufgrund zunehmendem Biomassebelages an den Lichteintrittsflächen mit zunehmender Kultivierungsdauer im verwendeten Lichtkollektormodul (Nutzung Geometrie 3). Zum 01.06.2014 wurde das Kollektormodul gewechselt und die erzielten Werte der Biomasseproduktivität entsprachen wieder durchschnittlich den Werten aus dem April. Die maximal erreichten Werte der Biomasseproduktivität lagen bei bis zu 0,74 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ im Jahr 2014 und 0,56 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ im Jahr 2015. Die Maximalwerte stellen die, unter diesen äußeren und inneren Bedingungen und zu diesem Zeitpunkt, maximal erreichten volumetrischen Biomasseproduktivitäten dar.

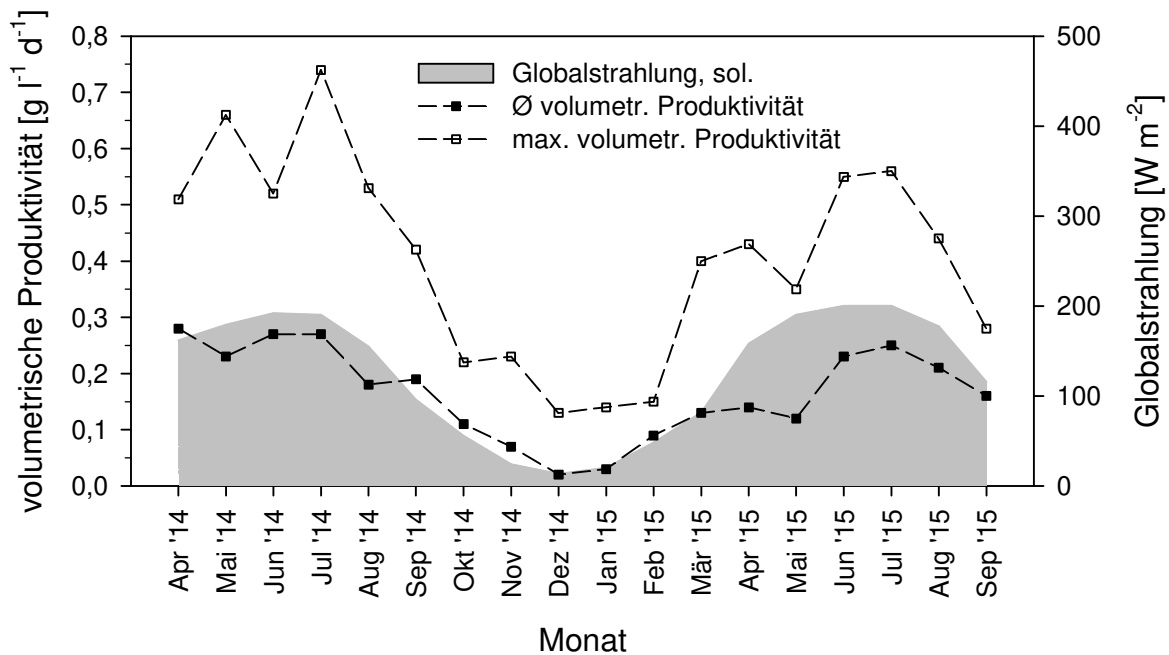


Abbildung 5-53 -volumetrische Produktivität (gefüllte Quadrate: arithmetisches Monatsmittel; leere Quadrate: monatliche Maximalwerte) im Kultivierungsverlauf

In den Wintermonaten von Dezember bis Februar sank die Produktivität auf unterhalb von durchschnittlich 0,1 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ auf bis zu 0,02 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$, gleichwohl einzelne Tagesmaxima von bis zu 0,15 $\text{g l}^{-1} \text{d}^{-1}$ möglich waren. In diesem Zeitraum ist, wie zu erwarten war, im Ergebnis ein sehr geringes Wachstum der Mikroalgen zu verzeichnen gewesen. Um insgesamt eine biologische Stabilität erzielen zu können, wurde die Suspensionstemperatur in diesem Zeitraum bewusst auf bis zu 15 Grad Celsius herabgesetzt (siehe oben), was ebenso zu einem verringerten Mikroalgenwachstum führte. Durch die niedrigen Temperaturen sollte der allgemeine Kontaminationsdruck niedrig gehalten werden, da optimale Temperaturprofile von

bspw. aeroben Bakterien oberhalb derer der kultivierten Mikroalgen liegen. Mit ansteigender Globalstrahlung im Jahresverlauf 2015 wurde die Suspensionstemperatur der Mikroalgenkultur wieder angehoben und ein stärkeres Wachstum konnte verzeichnet werden.

Von April bis einschließlich Mai 2015 ist es zu einer Stagnation des Biomassewachstums gekommen, obwohl die Globalstrahlung weiterhin angestiegen ist, wie anhand der grau unterlegten Fläche im Vergleich zur volumetrischen Biomasseproduktivität in Abbildung 5-53 zu sehen ist. Durch eine Anpassung des Reinigungsregimes konnte ab Juni 2015 wieder ein erhöhtes Mikroalgenwachstum festgestellt werden. Als Grund für das scheinbar geringere Wachstum konnte eine vermehrte Biobelagbildung in den Peripherieschläuchen gefunden werden. Die Molchbarkeit des Systems konnte nur am Doppelschlauch selbst ausgeführt werden. Durch eine Anpassung des Reinigungsprotokolles und einer zusätzlichen mechanischen Reinigung der Peripherieschläuche konnte das Wachstum in der Suspension wieder erhöht werden. Die Werte aus dem Vorjahr konnten dennoch nicht gänzlich erzielt werden. Aus diesem Grund ist dieser Zeitraum auch nicht mit in die Modellbildung zur Effizienzbewertung des phototrophen Wachstums hinsichtlich des Strahlungseintrages (siehe Abschnitt 5.3.3) aufgenommen. Dennoch lässt sich eine prinzipielle Abhängigkeit zwischen Biomasseproduktivität und Globalstrahlung erkennen, was zeigt, dass das Biomassewachstum anhand der volumetrischen Produktivität im Zusammenhang mit dem jahreszeitlichen Verlauf des Strahlungseintrages interpretiert werden kann.

Im Kultivierungszeitraum bis Oktober 2015 sind 69,3 kg Mikroalgenbiomasse bezogen auf Trockensubstanz in der in Abbildung 5-54 dargestellten Modulkonfiguration des Plattformsystems produziert worden. Ab 16.12.2014 erfolgte die Langzeitkultivierung in lediglich einem Teilsystem (entspricht 850 l Gesamtkultivierungsvolumen), da es aufgrund des inline-Reinigungssystems nicht mehr erforderlich war die Lichtkollektoren zu wechseln.

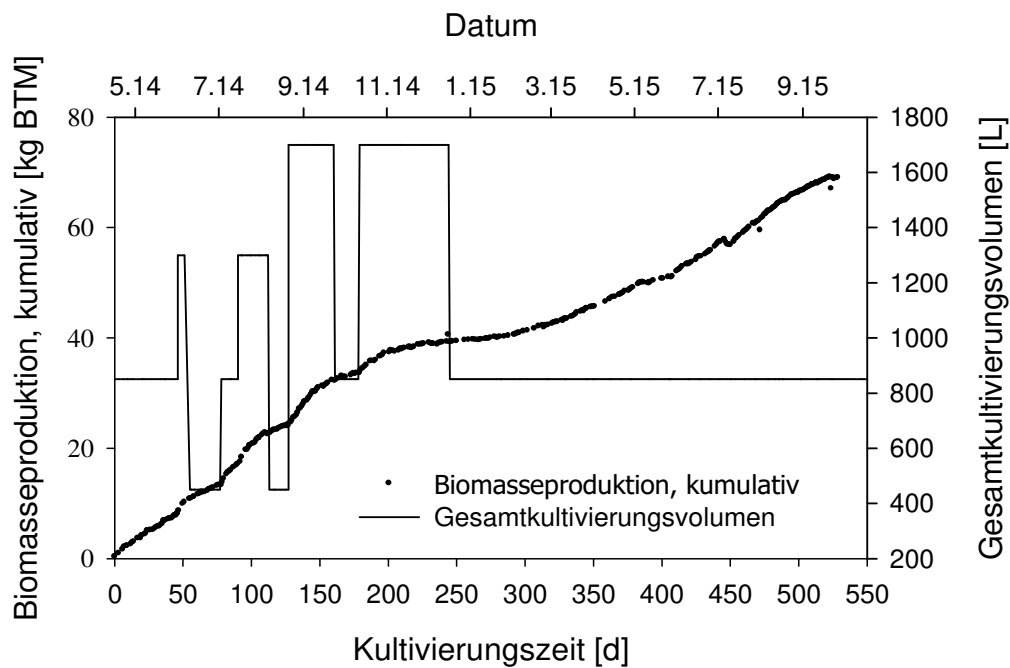


Abbildung 5-54 -Biomasseproduktion (kumulativ) im PBR-System und Gesamtkultivierungsvolumen

Zur Überwachung der Zusammensetzung der Mikroalgenbiomasse wurden einerseits die elementare Zusammensetzung und andererseits die biochemischen Hauptkomponenten hinsichtlich Lipid- und Proteingehalt analysiert. Weiterhin erfolgte die Bestimmung des Brennwertes, mit Hilfe dessen der PCE-Wert berechnet werden konnte (siehe Abschnitt 5.3.3). Die Zusammenstellungen in Abbildung 5-55 und Abbildung 5-56 geben einen Gesamtüberblick zu den Ergebnissen der analysierten Mikroalgeninhaltsstoffe. In Tabelle 5-4 ist die elementare Zusammensetzung hinsichtlich Makroelementen (C, N, P, S) sowie Spurenelementen aufgelistet.

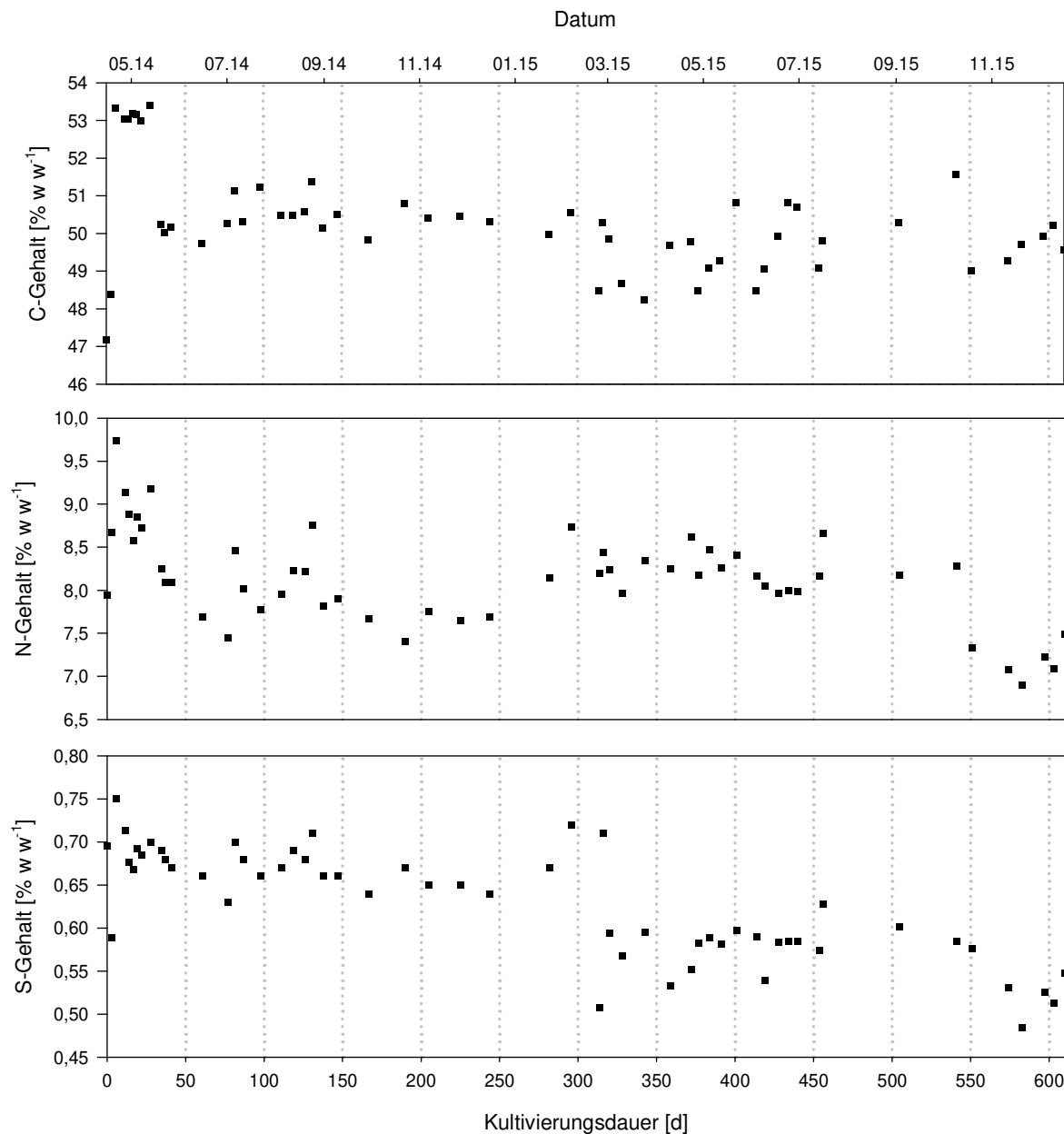


Abbildung 5-55 -elementare Zusammensetzung der Mikroalgenbiomasse im Kultivierungsverlauf
oben: Kohlenstoff-Gehalt (C-Gehalt); mitte: Stickstoff-Gehalt (N-Gehalt); unten: Schwefel-Gehalt (S-Gehalt)

Anhand des ermittelten elementaren Gehaltes an Stickstoff erfolgte die Umrechnung auf den Proteingehalt, welcher dadurch einer indirekten Bestimmungsmethode unterlag. Der verwendete Stickstoff-Protein Faktor (N-Prot-Faktor) von 4,78 basierte auf Literaturwerten und findet zahlreich Anwendung (siehe Abschnitt 4.3.4). Das Verhalten des Proteingehaltes entspricht demnach dem des Stickstoffgehaltes und lag bei durchschnittlich 38,9 % w/w. Der mittlere Lipidgehalt lag bei 19,6 % w/w und der durchschnittliche Brennwert bei 23,6 MJ kg⁻¹.

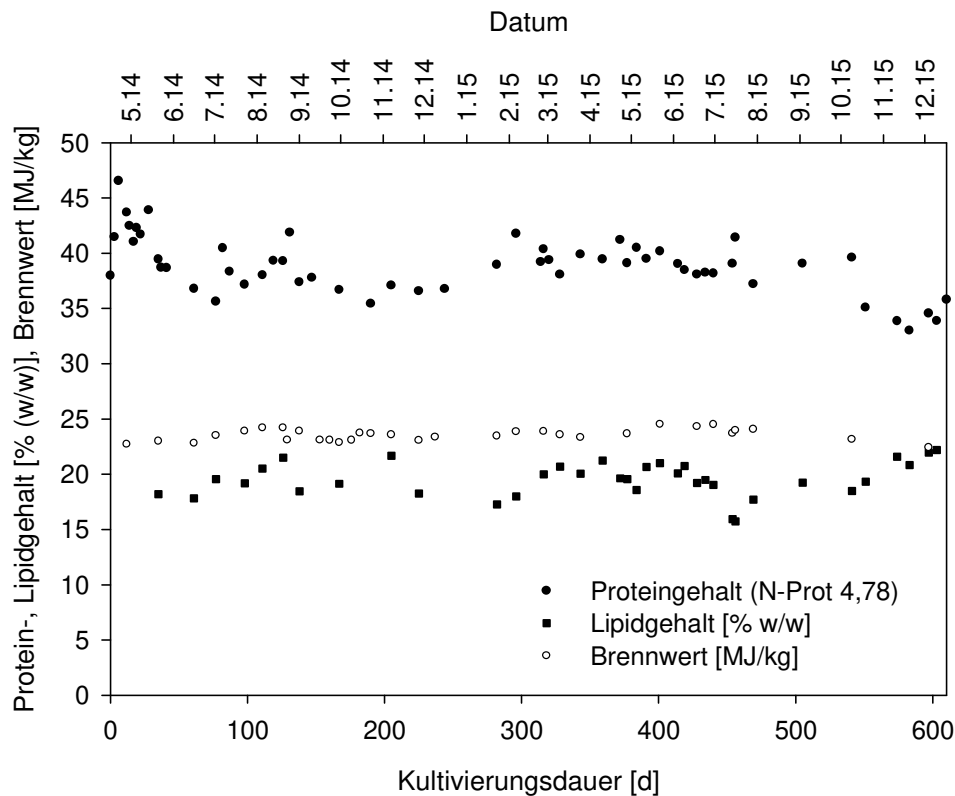


Abbildung 5-56 -Protein- und Lipidgehalt im Kultivierungsverlauf

Die Gehalte an Spurenelementen sowie Phosphor wurden charakteristisch für 6 Proben bestimmt. Somit konnte eine vollständige Zusammensetzung der wesentlichen Komponenten der kultivierten Mikroalgen untersucht und bestimmt werden.

Tabelle 5-4 - Zusammenstellung der elementaren Zusammensetzung der Mikroalgenbiomasse (Angaben als % w/w)

C	N	S	P	Fe	Zn	Cu	Co	Mn	Mg	K	Na
50,22	8,24	0,64	2,5	0,027	0,0004	0,007	0,0005	0,0019	0,516	1,966	0,038
Elementaranalyse			VDLUFA	AAS							

5.3.3. Effizienzbewertung des phototrophen Wachstums hinsichtlich Strahlungseintrag

Da das Licht als einzige nicht steuerbare Komponente das Mikroalgenwachstum im Freiland direkt beeinflusst, ist eine Auswertung hinsichtlich der Effizienzbewertung des phototrophen Wachstums in Bezug zum Lichteintrag erfolgt.

Das in Abschnitt 5.2 erarbeitete Modell zur Ermittlung des Strahlungseintrages in die Lichtkollektoren fand nun Anwendung in Bezug zum Versuch zur Langzeitkultivierung, um die

Strahlungsaufnahme durch den Photobioreaktor hinsichtlich photosynthetisch aktiver Strahlung zu bewerten. Dementsprechend wurde für ρ_{PAR} in Gl. 5-10 mit 0,494 gerechnet, um nur den PAR-Anteil der Globalstrahlung zu nutzen, welcher in Abschnitt 3.2 ermittelt wurde. Biomasseproduktivität und Lichteintrag wurden auf ein Zeitintervall von 24 Stunden bezogen. Folglich sind alle Tage, welche aufgrund prozesstechnischer Natur, wie beispielsweise Stillstandzeiten in Folge von Erntevorgängen (siehe auch Abbildung 5-51), kein Wachstum über 24 Stunden zuließen, nicht berücksichtigt. Die Berechnung des Lichteintrages erfolgte anhand des Modells für jeweilige Tagessummen mit Hilfe eines selbst programmierten Excel-Makros. Anschließend wurden die Werte, basierend auf einer Zeitspanne von 10 Tagen, zusammengefasst, um einheitliche Intervalle in der Art zu erhalten, dass zu jedem mittleren Strahlungseintrag von 10 Tagen, der mittlere Biomassezuwachs als μ^*c_x im selben Zeitraum zugeordnet werden kann. Die Aufbereitung und Auswertung der Daten erfolgten über einen Zeitraum vom 21.08.2014 bis zum 29.09.2015.

In Abbildung 5-57 ist die Biomasseproduktivität bezogen auf den durch die Lichtkollektoren aufgenommenen Strahlungseintrag dargestellt. Der Leistungseintrag ist hierbei in der Form *nach Pirt* als $\text{MJ l}^{-1} \text{d}^{-1}$ angegeben (siehe Gl. 2-4 in Abschnitt 2.3.3) und stellt demnach die Strahlungsaufnahme in Joule pro Liter Gesamtkultivierungsvolumen und Tag dar, welches durch die Lichtkollektoren aufgenommen wird und sich aufgrund der Umwälzung innerhalb der gesamten Mikroalgensuspension, das heißt im gesamten Kultivierungsvolumen, verteilt.

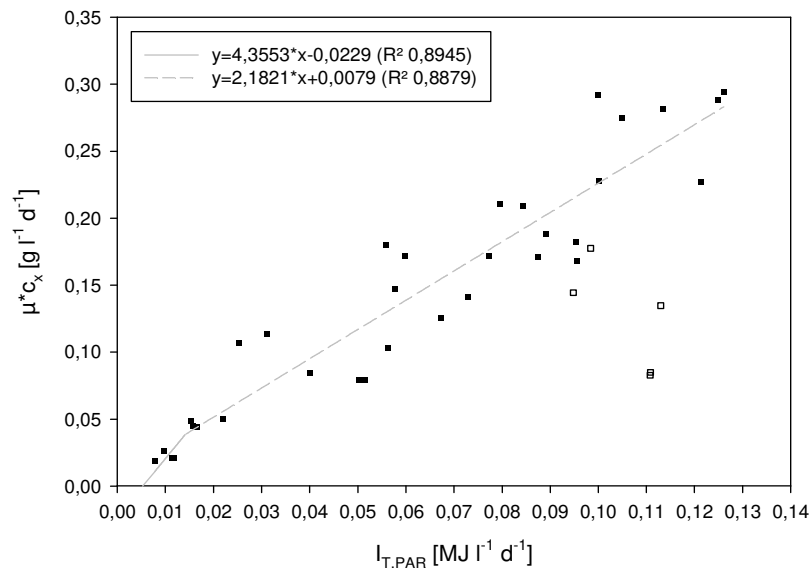


Abbildung 5-57 – Biomasseproduktivität in Bezug zum Strahlungseintrag $I_{\text{T,PAR}}$ (Darstellung *nach Pirt*) basierend auf Modellrechnung; Zeitraum zwischen Datenpunkten 10 Tage
gestrichelte Linie: lineare Regression der Daten vom 04.11.2014 – 14.02.2015
durchgezogene Linie: lineare Regression der Daten vom 21.08.2014 – 29.09.2015
leere Quadrate: nicht in Kalkulation integrierte Datenpunkte

Anhand der Datenpunkte in Abbildung 5-57 lassen sich mehrere Charakteristika erkennen. Zum einen lässt sich ein prinzipiell lineares Verhalten zwischen der aufgenommenen PAR-Strahlung und der gebildeten Mikroalgenbiomasse ableiten, wobei sich bis zu einem Lichteintrag von $0,0142 \text{ MJ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ein größerer Anstieg bei der Biomasseproduktivität bezüglich einer Steigerung des Lichteintrages zeigte. Die ermittelten Daten hierzu datieren vom Zeitraum zwischen dem 04.11.2014 und dem 14.02.2015, in welchem eine Globalstrahlung von täglich durchschnittlich $22,7 \text{ W m}^{-2}$ aufgetreten war (Sensormesswert). Darüber hinaus blieb der Anstieg von $\mu \cdot c_x$ im modellierten Bereich der Strahlungsaufnahme der Lichtkollektoren ebenso konstant, wenngleich geringer. Damit lassen sich 2 lineare Regressionen ableiten, dargestellt mit Hilfe der durchgezogenen und der gestrichelten grauen Linie in Abbildung 5-57. Der Geradenverlauf im Bereich bis $0,0142 \text{ MJ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ führt zu einem Schnittpunkt mit der Abszisse bei einem Wert von $5,26 \text{ kJ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Nach Abbildung 2-1 entspräche dieser Wert des Lichteintrages, auch wenn volumenspezifisch, dem Lichtkompensationspunkt der Mikroalgenkultur. Da es sich hier jedoch um eine Zusammenstellung von Tagessummen handelt und um einen Wachstumsversuch mit unterschiedlich konzentrierter Mikroalgenkultur sowohl im Tages- als auch Gesamtkultivierungsbereich, kann der reale Lichtkompensationspunkt hier nicht abgeleitet werden. Dennoch lässt sich eine Grundaussage dahingehend treffen, dass ab der genannten aufgenommenen volumetrischen Lichtmenge pro Tag ein Wachstum innerhalb des bilanzierten Zeitraumes zu verzeichnen war (siehe auch Ergebnisdarstellung in 5.3.1.1). Die leeren Quadrate in Abbildung 5-57 zeigen die Ergebnisse aus dem Zeitraum April und Mai 2015. Offenkundig liegen mehrere Datenpunkte unterhalb des zu erwartenden Bereiches der volumetrischen Biomasseproduktivität. Es handelt sich hierbei um denselben Zeitraum, welcher bereits im Ergebnisteil in Abschnitt 5.3.2 zu Abbildung 5-53 beschrieben ist. Zwei Datenpunkte aus dem erwähnten Zeitbereich, der 11.4.2015 und 2.5.2015, liegen im Bereich anderer Werte für die Biomasseproduktivität. Hier wurde die Peripherie der Zuleitungsschläuche mechanisch gereinigt, so dass Kristallisationskeime für Biobelagbildung minimiert werden konnten. Dennoch wurden die Datenpunkte vom 11.4. und 2.5. nicht mit in die Gesamtkalkulation aufgenommen.

Das Ziel der Dauerkultivierung bestand unter anderem darin, im semi-kontinuierlichen Betrieb nicht in inhibierende Bereiche hinsichtlich der Lichtversorgung der Mikroalgenkultur zu gelangen. Soweit dies anhand der Prozessführung durch Anpassung der Biotrockenmassekonzentration und demnach Einflussnahme auf die relative Lichtverfügbarkeit möglich war, konnte ein lineares Wachstumsverhalten sowohl bezüglich der Wachstumsrate, als auch der Produktivität beobachtet werden (siehe Abbildung 5-58). Das Arbeitsregime der Biotrockenmasse wurde im Jahresverlauf an die einfallende Solarstrahlung angepasst.

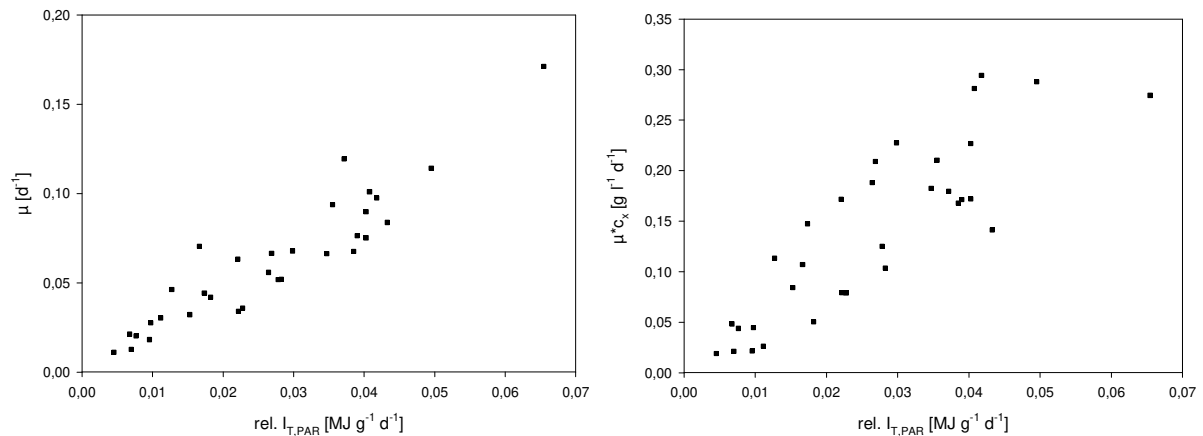


Abbildung 5-58 -Wachstumsrate (links) und Biomasseproduktivität (rechts) gegenüber relativer Lichtverfügbarkeit der, normiert auf BTM, aufgenommenen volumetrischen PAR-Strahlung

Die in Abbildung 5-59 dargestellte solare Globalstrahlung (GHI_{SOL}) ist die tägliche mittlere Globalstrahlung innerhalb des Gewächshauses, erfasst mit dem Strahlungssensor, bezogen auf denselben Zeitraum wie in Abbildung 5-57 vom 04.11.2014 bis 14.02.2015. Demnach kann sie als Grundlage für den an der sichtbaren Seite des Lichtkollektors auftreffenden Strahlungseintrag dienen. Der Wert für den Schnittpunkt mit der Abszisse kann ebenso anhand der ermittelten Geradengleichung berechnet werden und ergibt sich zu $7 W m^{-2}$. Bezogen auf einen senkrechten Strahlengang beträgt der Transmissionsgrad bei Geometrie 4 0,7 (siehe Abschnitt 0). Reduziert auf den PAR-Anteil der Globalstrahlung ergibt sich ein Wert für die transmittierte Globalstrahlung im Lot an der Vorderseite von $2,42 W m^{-2}$, was wiederum $11,06 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ als mittlere tägliche PPFD im 10-Tagesrhythmus entspricht.

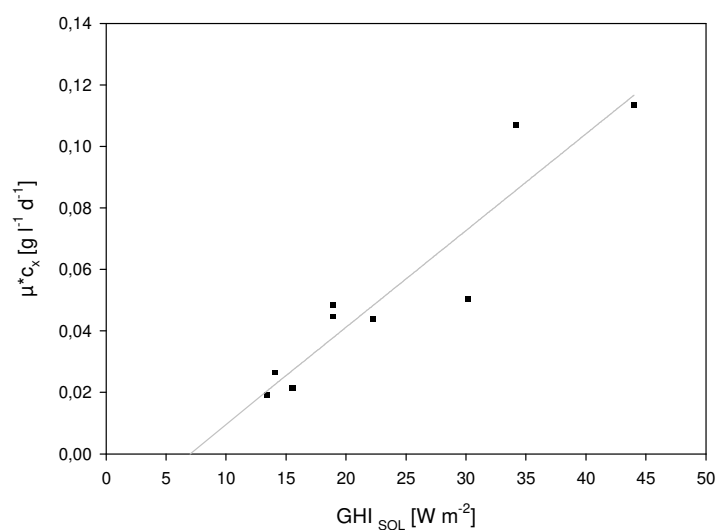


Abbildung 5-59 -Darstellung der Biomasseproduktivität in Bezug zur solaren Globalstrahlung (GHI_{SOL})

In Kombination mit der Darstellung der Biomasseproduktivität als Produkt aus Wachstumsrate und Biotrockenmassekonzentration $\mu \cdot c_x$ lässt sich auf den Biomasseertragskoeffizienten $Y_{X/I}$ rückschließen. Mit Hilfe der in Abbildung 5-57 gefundenen Geradengleichungen lässt sich, unter Zuhilfenahme Gl. 2-4, $Y_{X/I}$ anhand folgender Beziehungen berechnen:

$$Y_{X/I} = 4,3553 - \frac{0,0229}{I_{T,PAR}} \quad \text{mit} \quad I_{T,PAR} \leq 0,0142 \frac{MJ}{l * d} \quad \text{Gl. 5-57}$$

$$Y_{X/I} = 2,1821 + \frac{0,0079}{I_{T,PAR}} \quad \text{mit} \quad I_{T,PAR} \geq 0,0142 \frac{MJ}{l * d} \quad \text{Gl. 5-58}$$

Mit den Gleichungen Gl. 5-57 und Gl. 5-58 zeigt sich eine Abhängigkeit des Ertragskoeffizienten vom aufgenommenen Strahlungseintrag $I_{T,PAR}$. Mit steigendem $I_{T,PAR}$ verringert sich der Wert des hinteren Terms und der Einfluss des Lichtes am Ertragskoeffizienten sinkt. In Abbildung 5-60 sind einerseits die mit Hilfe von Gl. 2-4 errechneten Werte des Ertragskoeffizienten der Mikroalgenbiomasse dargestellt (schwarze Quadrate) als auch der Verlauf von $Y_{X/I}$ anhand der oben aufgestellten Gleichungen eingetragen (graue Quadrate mit durchgezogener Funktion).

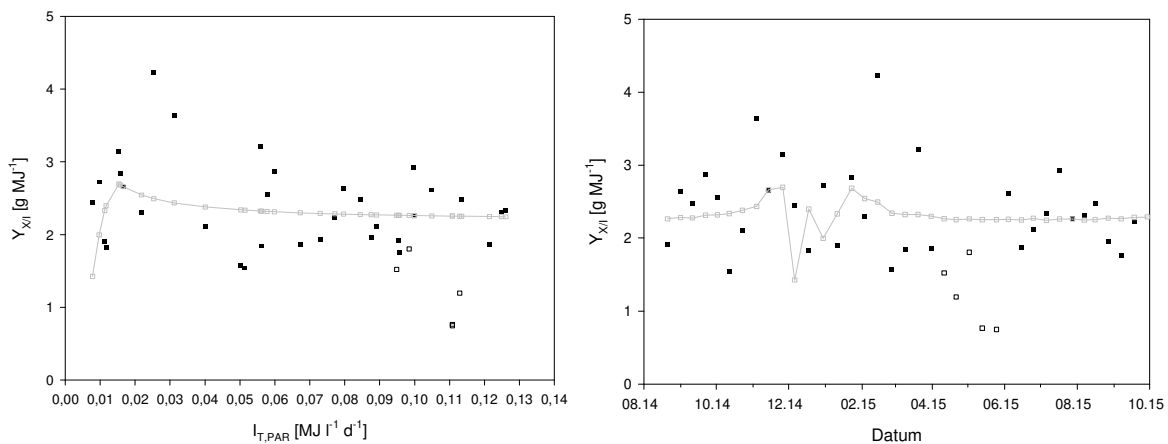


Abbildung 5-60 -Darstellung des Biomasseertragskoeffizienten nach Pirt ($Y_{X/I}$) in Bezug zum Strahlungseintrag (links) und im zeitlichen Verlauf der Kultivierung (rechts)

schwarze Quadrate: Datenpunkte von $Y_{X/I}$

weiße Quadrate: berechnete Werte für $Y_{X/I}$ nach Gl. 5-57 und Gl. 5-58

Anhand des Datensatzes (schwarze Quadrate) lässt sich ein generelles Verhalten des Biomasseertragskoeffizienten dahingehend erkennen, als dass, nach zunächst einem kurzen Anstieg von $Y_{X/I}$, mit steigender Strahlungsaufnahme der Biomasseertragskoeffizient sinkt und sich während der hauptsächlich vegetativen Kultivierungsperiode innerhalb eines Bereiches von 2 und 3 $g \cdot MJ^{-1}$ stabilisiert, bezogen auf den im Kultivierungsverlauf gemessenen volumetrischen Lichteintrag. Im Zusammenhang mit dem Verhalten der volumetrischen

Biomasseproduktivität in Abbildung 5-57 und dem darin abgeleiteten mathematischen Zusammenhang des Biomasseertragskoeffizienten lässt sich erkennen, dass bis zu einer Strahlungsaufnahme von $0,0142 \text{ MJ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ein Anstieg von $Y_{X/I}$ zu verzeichnen ist. Im Anschluss daran erfolgt eine asymptotische Annäherung an $2,18 \text{ g MJ}^{-1}$. Mit zunehmendem Lichteintrag würde schlussendlich mit Eintreten in den inhibierenden Bereich der Ertragskoeffizient (rapide auf den Wert 0) sinken. Dieser Fall ist hier, wie gezeigt werden kann, noch nicht erreicht. Die Darstellung des Ertragskoeffizienten im zeitlichen Verlauf (rechter Graph in Abbildung 5-60) zeigt, dass die höheren Werte für $Y_{X/I}$ tendenziell in den Wintermonaten zu verzeichnen waren, sich jedoch kein eindeutiger Zusammenhang erkennen lässt. Die absolute Produktivität der Mikroalgen ist in diesem Zeitraum gering, die Ausnutzung der aufgenommenen PAR-Strahlung läuft offenbar vergleichsweise effizienter ab. Auch hier ist der Bereich geringerer Produktivität im April und Mai 2015 anhand der weißen Quadrate ersichtlich. Der durchschnittliche Biomasseertragskoeffizient über den gesamten Kultivierungsverlauf betrachtet (ausschließlich der 5 Datenpunkte vom 11.04.2015 bis 02.05.2015) lag bei $2,40 \text{ g MJ}^{-1}$.

Mit Hilfe von $Y_{X/I}$ lässt sich unter Nutzung des Brennwertes H_s mit Gl. 2-5 der PCE-Wert berechnen. Damit ergeben sich die in Abbildung 5-61 dargestellten Werte, umgerechnet mit Hilfe des mittleren jährlichen PAR-Anteils ($0,494$), bezogen auf das gesamte solare Spektrum (PCE_{SOL}). Dabei basieren die schwarzen Datenpunkte auf der Berechnung von $Y_{X/I}$ mit Hilfe des erstellten Modells zur Lichtaufnahme und haben demnach einen volumetrischen Bezug zum Gesamtvolumen. Da die Berechnung des PCE-Wertes auf den, zur Berechnung des Biomasseertragskoeffizienten durchgeführten, Berechnungsalgorithmus beruht, ergibt sich ein vergleichbarer zeitlicher Verlauf in Bezug zu Abbildung 5-60 rechts. Der mittlere PCE-Wert für solare Strahlung lag im gesamten Kultivierungszeitraum bei $2,62 \%$ (entspricht $5,30 \%$ PCE_{PAR}) bzw., reduziert um die Datenpunkte vom 11.04.2015 bis zum 02.05.2015, $2,80 \%$ PCE_{SOL} ($5,70 \%$ PCE_{PAR}). Diese PCE-Werte beruhen auf der Ermittlung der realen Strahlungsaufnahme und beinhalten demnach geometrische Begebenheiten des Lichtkollektors und damit verbundene Verluste hinsichtlich Reflexion und Streuung. Ebenso wird die transmittierte Strahlung als Grundlage für die Effektivität der Bildung der Mikroalgenbiomasse genutzt.

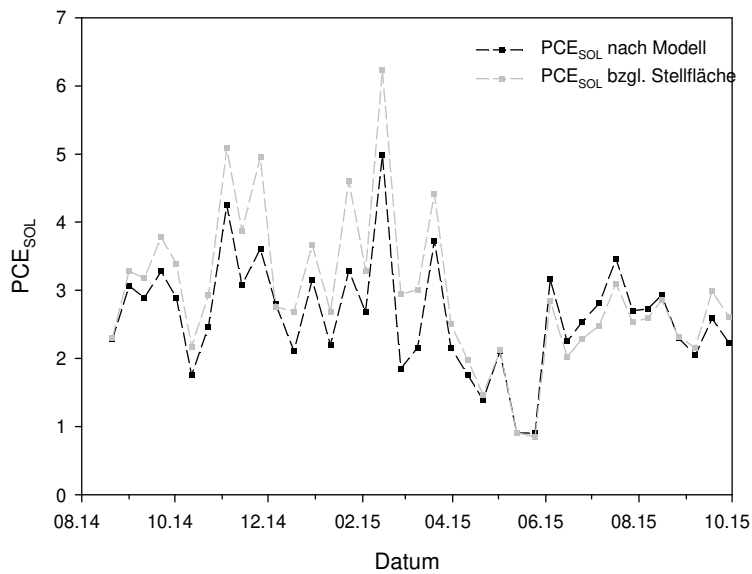


Abbildung 5-61 -Darstellung des PCE-Wertes basierend auf das solare Spektrum der Globalstrahlung; schwarze Datenpunkte zeigen die PCE bezüglich des Lichtmodells; graue Datenpunkte zeigen die PCE basierend auf gemessene GHI bzgl. Stellfläche

Der PCE-Wert gibt die Effizienz der Umwandlung der tatsächlich aufgenommenen Lichtmenge in Biomasse an, nicht jedoch, ob der Lichtkollektor bzw. der Photobioreaktor die maximal zur Verfügung stehende Lichtmenge aufnehmen. Aus diesem Grund wurde der PCE-Wert auch bezüglich der mit Hilfe des GHI-Sensors gemessenen und auf die Stellfläche der Lichtkollektoren bezogenen solaren Globalstrahlung berechnet. Der in grau dargestellte Datensatz bezieht sich auf die direkte Stellfläche der Lichtkollektoren (2 Module: 11,8 m²). Hierzu wurde die volumetrische Produktivität zunächst auf die Stellfläche bezogen. Die Ermittlung der Lichtmenge erfolgte auf Basis der gemessenen GHI des Sensors und wurde auf die Stellfläche der Lichtkollektoren übertragen. Es erfolgte keine Reduzierung um den Transmissionsgrad, somit ist dieser Parameter in der Betrachtung zur Effektivität inbegriffen. Folglich lässt sich ein PCE-Wert der Lichtkollektoren bezüglich der einfallenden verfügbaren Sonneneinstrahlung ermitteln. Dieser lag im Kultivierungsverlauf bei mittleren 2,94 % (PCE_{SOL}). Dies wiederum entspricht einem PCE bezüglich PAR-Anteil von 5,95 %. Ohne den zeitlichen Beitrag vom 11.04.2015 bis zum 02.05.2015 ergibt sich ein PCE_{SOL} von 3,17 % (6,41 % PCE_{PAR}).

6. Diskussion

6.1. Physiko-technische Charakteristika des Silikonmaterials im Hinblick auf das Strahlungsverhalten und verfahrenstechnische Parameter

Die phototrophe Kultivierung von Mikroalgen bedingt bei der Konzeption von Photobioreaktoren die Nutzung von Lichtkollektoren. Diese müssen in der Art gestaltet sein, dass die für die Photosynthese erforderliche Strahlung für die Zellen, nach Wellenlänge und Intensität innerhalb der für das Wachstum benötigten Bereiche, verfügbar ist. Dabei liegt die Anforderung an die Kollektoren zum einen an optischen Eigenschaften hinsichtlich der Transmission und zum anderen an mechanischen Eigenschaften als Voraussetzung effektiver Durchmischung (Druckfestigkeit). Die für Lichtkollektoren üblicherweise zum Einsatz kommenden Materialien bei Massenkulturen von Mikroalgen sind zunächst hinsichtlich baulich-relevanter Eigenschaften zu unterscheiden. Einerseits kommen harte und spröde, wie z.B. Glas, Hart-PVC und PMMA, sowie weiche und flexible Materialien wie Weich-PVC, PE und Silikone zum Einsatz und definieren aufgrund genannter Eigenschaften die Rahmenbedingungen potentieller Grundkonzepte hinsichtlich baulicher Ausführung und Aufstellung von Lichtkollektoren. Für harte Materialien, wie Glas und PMMA sowie Hart-PVC sind in aller Regel Gewächshäuser zum Schutz vor Witterung (z.B. Hagelschauer) notwendig, was zu Beeinflussungen hinsichtlich des Strahlungsverhaltens führt (Reduzierung photoaktiver Fläche und Transmissionsgrad).

Im Hinblick auf die optischen Eigenschaften ähneln sich die betrachteten Werkstoffe hinsichtlich ihrer Brechzahl im sichtbaren Bereich. Die untersuchten Proben des Silikonmaterials weisen mit einer Brechzahl von 1,417 einen vergleichbaren Wert zu Proben eines raumvernetzenden Elastosils, welches im sichtbaren Bereich mit steigender Wellenlänge von 1,4208 bis 1,4036 vermessen wurde (Mironova and Gradusova, 2012), auf. Borosilikatglas weist mit 1,473 (SCHOTT Northamerica Inc., 2017) einen leicht höheren Wert auf und liegt wiederum etwas niedriger im Vergleich zu 1,491/1,492 bei PMMA und 1,52 bis 1,54 bei PVC (Geier et al., 2012; Lechner, 2005). Die wesentlichen Unterschiede im Transmissionsverhalten hinsichtlich des Absorptions- und Streuungsverhaltens spiegeln sich im Extinktionskoeffizienten wieder. Hier weist Silikon vergleichsweise hohe Werte auf, was an den untersuchten Proben festgestellt werden konnte ($47,00 \text{ m}^{-1}$ bzw. $86,95 \text{ m}^{-1}$). Gleichfalls weisen die Werte der untersuchten Proben einen großen Unterschied auf, was anhand von Abbildung 5-3 bereits makroskopisch sichtbar gemacht werden konnte. Es handelt sich um Materialproben unterschiedlicher Entwicklungsstufen (seitens Wacker Chemie AG) der eingesetzten Werkstoffe für die Geometrievarianten der Doppelschläuche. Der ermittelte Extinktionskoeffizient von 47 mm^{-1} stellte dabei den Wert der Variante mit den besten Transmissionseigenschaften dar. Beim Extinktionsverhalten selbst handelt es sich offenbar

eher um ein Auftreten erhöhter Streueffekte und nicht um ein Absorptionsverhalten im Sinne eines energieaufnehmenden und somit sich erwärmenden Materials. Die Streueffekte führen zu einem „Ablenken“ des Strahlenganges, können wiederum aber auch dazu führen, dass die Strahlen schlussendlich durch das Silikonmaterial hindurchtreten und durch die Mikroalgenkultur aufgenommen und folglich verwertet werden können.

Bei der Berechnung des Strahlungsverhaltens wurde für die Berechnung des Reflexionsgrades mit einer mittleren Brechzahl gerechnet (Bestimmung mit Hilfe des Abbe-Refraktometers). Diese Annahme der Unabhängigkeit von der Wellenlänge ist im sichtbaren Bereich bei transparenten Materialien möglich, da der imaginäre Teil der Brechzahl hierbei vernachlässigt werden kann. Der Hauptschwerpunkt für die Unterschiede im Transmissionsverhalten ist in den Werten der materialabhängigen Extinktionskoeffizienten zu finden.

Der Extinktionskoeffizient (κ) für Glas variiert von 4 m^{-1} bis zu 32 m^{-1} (Duffie and Beckman, 2013), speziell für Borosilikatglas mit einer Wandstärke von 3,3 mm liegt κ bei $3,2 \text{ m}^{-1}$ (Whitman et al., 2002). Auch wenn dieser Wert in diesem Fall bei 351 nm bestimmt wurde, zeigt er doch, dass Borosilikatglas ein deutlich geringeres Extinktionsverhalten gegenüber dem verwendeten transparenten Silikonmaterial aufweist. Bei der Bewertung des Extinktionskoeffizienten spielt die Wandstärke des Materials im Hinblick auf das Transmissionsverhalten eine wesentliche Rolle. Mit sinkender Wandstärke sinkt ebenso das Extinktionsverhalten und der Anteil an transmittierter Strahlung steigt. Gleichzeitig sinkt aber auch die Festigkeit des Werkstoffes. Hersteller für Glas, wie bspw. Schott und Kavalier, verwenden traditionell eine Wandstärke von 3,2-3,3 mm für den Einsatz als tubuläres System in Lichtkollektoren. Mittlerweile werden tubuläre Systeme mit Wandstärken von 1,8 mm hergestellt (Broneske and Grewe, 2017; SCHOTT Northamerica Inc., 2017). Gleichzeitig sollen ovale Querschnitte verbesserte Transmissionseigenschaften im Bezug zum Sonnenstand aufweisen (Katsikis, 2014). Eine Erhöhung der Transmission und eine Reduzierung der Materialkosten nimmt eine Reduzierung der mechanischen Stabilität (z.B. Bruchgefahr) in Kauf. Für eine genaue Bewertung der optischen Eigenschaften sind die Untersuchungen am konkret eingesetzten Werkstoff zu ermitteln.

Entscheidend für den phototrophen Wachstumsprozess ist der Strahlungsanteil zwischen 400 und 700 nm (PAR-Bereich). Innerhalb dessen zeigten sich unterschiedliche mittlere Transmissionsgrade bei den untersuchten silikonbasierten Werkstoffe, die einerseits auf einen unterschiedlichen Anstieg als auch unterschiedliche Maxima mit steigenden Wellenlängen beruhen. Das mit steigender Wellenlänge ebenfalls ansteigende Transmissionsverhalten führt zu einer Verschiebung der spektralen Zusammensetzung der transmittierten gegenüber der einfallenden Strahlung, so dass ein verändertes Verhältnis des Blau-Rot-Anteils hin zum roten Bereich vorliegt (siehe exemplarisch Abbildung 5-7). Inwieweit dadurch eine Beeinflussung der sich im System kultivierten Mikroalgen vorlag, wurde nicht näher untersucht.

Im Vergleich des Transmissionsverhaltens gegenüber Glas sowie hartem PVC, weist das verwendete transparente Silikonmaterial ein zunächst schwächeres Transmissionsverhalten auf. Für Glas (im Speziellen Borosilikatglas) können Transmissionsgrade von 0,92 und höher erzielt werden (Broneske and Grewe, 2017; SCHOTT Northamerica Inc., 2017). Die Strahlungsverluste werden in der Praxisanwendung jedoch im Regelfall durch den Vorteil der realen Freilandaufstellung der flexiblen silikonbasierten Doppelschauchsysteme abgemindert. Bei harten und spröden Materialien, wie Glas und PMMA sowie Hart-PVC wird im Regelfall ein Gewächshaus unter anderem als Witterungsschutz verwendet, um der Anfälligkeit z.B. gegenüber Hagelschauern entgegenzuwirken. Als Gewächshausdächer bzw. -folien kommen sowohl Glas- als auch Kunststoffmaterialien unterschiedlicher Schichtdicke zum Einsatz, welche Transmissionsgrade zwischen 0,8 und 0,9 aufweisen. Die gezeigten Daten in Abbildung 5-10 und Tabelle 5-3 zeigen, dass das Gesamttransmissionsverhalten allein durch die materialbedingte Reduzierung der Gewächshausabdeckung in der Art beeinflusst wird, dass der zunächst höhere Transmissionsgrad durch die Aufstellungskonzeption verloren geht. Eine Abschwächung des Transmissionsverhaltens durch UV-Beeinflussung innerhalb von 48 Monaten ist, abhängig vom gewählten Material, durchaus möglich (Giacomelli and Roberts, 1993). Ältere Messungen am Gewächshausboden mit Einfachverglasung zeigen eine Gesamttransmission von teilweise nur 55 bis 60 % (Ting and Giacomelli, 1987). Zusätzlich zu den Abschwächungen aufgrund von Reflexions- und Streueffekten durch das verwendete Material der Gewächshausabdeckung kommt es durch die Trägerstruktur des Gewächshauses zu Einbußen der bestrahlten Fläche und somit zu Verlusten, die dem Strahlungseintrag der Lichtkollektoren vorgeschaltet sind. Die oben erwähnte Notwendigkeit von Gewächshäusern führt zu einer Beeinträchtigung des Strahlungsverhaltens hinsichtlich der Nutzung von Sonnenlicht unter Freilandbedingungen. In geeigneteren klimatischen Gegenden sind Glasröhrensysteme im Freiland installiert (z.B. Israel). Gleichwohl kommt es aufgrund der geringen Bruchfestigkeit zu höheren Gefahren der Zerstörung und somit Einbußen bezüglich der Standfestigkeit. Die erwähnte Betrachtungsweise spiegelt jedoch nicht die Nutzung von künstlicher Beleuchtung wieder, da in diesem Fall die Beleuchtungssysteme innerhalb des Gewächshauses installiert sind. Gleichwohl die Lichtkollektoren während der Kultivierungsversuche ebenfalls innerhalb eines Foliengewächshauses platziert und demnach einer Reduzierung der einfallenden Sonnenstrahlung ausgesetzt waren, sind die Reaktoren für den realen Freilandeinsatz konzipiert. Die Messwerte der Globalstrahlung erfolgten innerhalb des Gewächshauses und beinhalteten bereits den Verlust durch das Gewächshaus.

6.2. Strahlungsaufnahme der Lichtkollektoren

Die Bewertung des phototropen Wachstums beruht auf der Berechnung der durch die Lichtkollektoren tatsächlich aufgenommenen Globalstrahlung. Die Herausforderung und Aufgabenstellung bestand in der Ermittlung einer repräsentativen Bestrahlungsfläche unter Beachtung des Strahlungsverhaltens an der Grenzfläche und der Bezugnahme des im Tagesverlauf variierenden Sonnenstandes. Im Zuge dessen erfolgte die Einführung eines Bestrahlungs- und eines Transmissionsgrades des Lichtkollektors. Für beide Parameter sind sowohl die geometrischen Daten des Doppelschlauches als auch des Lichtkollektors selbst maßgebend. Für den Transmissionsgrad stellten materialtechnische Eigenschaften zusätzlich eine entscheidende Basis dar. Aufgrund der komplexen vertikalen Aufstellung des Lichtkollektors erfolgte die Aufteilung der zu ermittelnden bestrahlten Fläche anhand einer Komponentenerlegung. Mit Hilfe dieses Ansatzes konnte die mathematische Erfassung der sichtbaren geometrischen Flächen (Bestrahlungsgrad) und des Transmissionsverhaltens am Doppelschlauch des Lichtkollektors (Transmissionsgrad) separat, in horizontaler und vertikaler Ebene, umgesetzt werden.

Aufgrund der helikalen Anordnung des Doppelschlauchsystems mit konstantem Abstand zwischen den Windungen entstehen definierbare sichtbare Bereiche sowohl an der Vorder- als auch der hinteren Innenansicht, welche für die Berechnung der Lichteintrittsfläche durch Direktstrahlung von Bedeutung sind. Die Betrachtung an einem Modellzylinder anstatt des Kegelstumpfes als Vereinfachung ermöglichte die Einbeziehung der steigenden sichtbaren Fläche auf der Innenseite und sinkenden durchscheinenden Fläche an der Vorderseite mit steigendem Sonnenhöhenwinkel. Anhand dieser Betrachtung konnte eine maximale, für Direktstrahlung erreichbare Fläche von $12,2 \text{ m}^2$, entsprechend einem Bestrahlungsgrad von $41,8 \%$ bezüglich der gesamten Mantelfläche, ermittelt werden. Aufgrund der Geometrie des Kegelstumpfes wird die maximale Fläche nicht bei höchstem Sonnenstand, sondern bei einem Winkel von ca. 30 Grad erzielt. Bei maximalem Sonnenstand (am 21.6. mittags) stehen rechnerisch $7,7 \text{ m}^2$ (entspricht $63,1 \%$ der Mantelfläche von $12,2 \text{ m}^2$) als bestrahlte Mantelfläche zur Verfügung. Insgesamt zeigte sich ein verhältnismäßig gleichmäßiger Anteil des Bestrahlungsgrades im standortspezifischen Tagesverlauf. Gegenüber Plattenreaktoren bzw. serpentin förmigen tubulären Systemen besteht also neben dem Vorteil der azimutunabhängigen Einstrahlung und der damit verbundenen Unabhängigkeit der Aufstellung gegenüber der Himmelsrichtung, auch bezüglich des Höhenwinkels eine stabilere bzw. gleichmäßigere prozentuale Verteilung der Bestrahlungsfläche. Dies wird auch dadurch erreicht, dass Mehrfachabschattungen an der Vorderseite des Lichtkollektors aufgrund des gewählten Anstellwinkels des Kegelstumpfes (75 Grad) bis zu einem Sonnenhöhenwinkel von $65,8 \text{ Grad}$ nicht vorkommen. Der maximale Sonnenstand liegt am Standort bei $62,0 \text{ Grad}$.

Die Modellbildung des ermittelten Transmissionsverhaltens der untersuchten Silikonwerkstoffe zeigt jeweils ein spezifisches Verhalten, welches von denen einer ellipsen- oder kreisförmigen Beziehung um ca. 9 % abwich (siehe Abbildung 5-29). Aus diesem Grund war es erforderlich, das Strahlungsverhalten mit Hilfe der Fresnel-Formeln abzubilden. Dabei ergab die materialspezifische Transmission in radialer Richtung eine Erhöhung um 8,7 % gegenüber einem kreisförmigen Verhalten. Gleichzeitig lieferten die Beziehungen eine Aussage zum reflektierten sowie gestreuten Anteil der eintreffenden Strahlung. Die ermittelten Transmissionsverläufe in Abhängigkeit des Einfallswinkels konnten im Anschluss an die Reaktorgeometrie angepasst werden, so dass eine Gesamtaussage bezüglich des Transmissionsverhaltens entlang des Schlauchradius und Kollektorradius getroffen werden konnte. Somit ist es nun möglich, die Bestrahlungsstärke an einem beliebigen bestrahlten Punkt am Reaktor bewerten zu können.

Ab einem Sonnenhöhenwinkel von 41 Grad ergibt sich ein Verlust bezüglich eintreffender Globalstrahlung dahingehend, dass aufgrund der geometrischen Aufstellung des kegelmufförmigen Gerüsts ein Stellflächenbereich innerhalb des Lichtkollektors bestrahlt wird. Dieser Strahlungsanteil trifft, obwohl als Stellfläche des Lichtkollektors beziffert, nicht direkt das Doppelschlauchsystem. Jedoch wird durch Reflexion an der Stellfläche ein gewisser Anteil der Strahlung auf das Doppelschlauchsystem des Lichtkollektors geleitet. Die genaue Bezifferung gestaltete sich aufgrund einer Vielzahl von Freiheitsgraden des Strahlungsverhaltens als schwierig. Dennoch, innerhalb eines Zeitraumes vom 28.03. bis zum 15.09., erfolgt zunächst die direkte Bestrahlung der Stellfläche. Dies entspricht einem Großteil der vegetativen Periode. Allerdings kommt es aufgrund des sich verändernden Sonnenstandes bis zum 21.6. zu einem steigenden, danach zu einem sinkenden Flächenanteil. Maximal betroffen ist ein Bereich der Stellfläche von 2,03 m² (am 21.06. 12:14 Uhr), was zunächst als Verlustfläche anzusehen ist. Eine Ausnutzung des Direktstrahlungsanteiles kann zum einen durch die Nutzung des reflektierten Anteils an der Stellfläche erfolgen, ist jedoch abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Reflexionsvermögen des Bodens selbst bzw. einem auf der Stellfläche verteilten Material (z.B. heller Kies, Aluminiumfolie etc.). Eine weitere Möglichkeit der Ausnutzung der Globalstrahlung liegt in der Verringerung des oberen Kreisringes des Kegelmuffes, prinzipiell möglich einerseits durch eine Erhöhung der Windungsanzahl der helikalen Struktur, andererseits durch eine Veränderung des Anstellwinkels des Lichtkollektors selbst. Letzteres hätte einen Einfluss auf das gesamte Strahlungsverhalten und ist gerade für diesen Standort optimiert. Eine Erhöhung der Windungsanzahl hätte neben dem Effekt einer Verringerung der Verluststrahlung gleichzeitig den Vorteil der Erhöhung des stellflächenbezogenen Volumens, ist jedoch abhängig vom maximalen Biegeradius des zu verwendenden Doppelschlauchsystems.

Im Hinblick auf die Lichtversorgung ergab sich eine maximal bestrahlte Fläche der Kollektoren von 12,2 m² bezüglich der Direktstrahlung. Bei einer Stellfläche von 5,9 m² entspricht dies einer Lichtverdünnung von 2,07 gegenüber der Stellfläche, was wiederum einem Pond mit derselben Stellfläche entsprechen würde. Gleichwohl wird die Lichtverdünnung durch Diffusstrahlung sowie gestreute und reflektierte Strahlung, welche innerhalb der helikalen Anordnung verteilt wird, erhöht. Somit liegt die reale Lichtverdünnung noch deutlich höher. Das theoretische Maximum bezüglich der Stellfläche liegt bei 4,95 (Mantelfläche A_M 29,22 m²). Dieser Vorteil wird durch die vertikal-angeordnete helikale Grundstruktur „erkauft“. In Kombination mit einem tubulären System ergibt sich auch gegenüber horizontal angeordneten Röhrenreaktoren ein prinzipieller Vorteil der Lichtverdünnung. Bei vertikal aufgestellten Plattenmodulen weist die nominelle Stellfläche eines einzelnen Moduls sehr geringe Werte auf, allerdings findet eine Lichtverdünnung im Sinne einer Oberflächenvergrößerung der photoaktiven Fläche, wie bei tubulären Systemen, nicht statt. Es erfolgt lediglich aufgrund einer engeren Aufstellung mehrerer Modulreihen ein Wechselspiel aus gegenseitiger Abschattung und Aufnahme reflektierter Strahlung der gegenüberliegenden Reihen. Die Effektivität ist stark richtungsabhängig vom Sonnenstand.

Der für die Berechnung der Aufnahme der Globalstrahlung zu Grunde liegende Messwert basierte auf einer Erfassung der GHI innerhalb von 180 Grad. Dementsprechend wird ein gewisser Anteil an diffuser Strahlung miterfasst. In Kombination mit der bestrahlten Fläche des Lichtmodells besteht demnach die Gefahr einer Überbewertung der Direktstrahlung in Bezug zur Strahlungsrichtung. Eine Optimierung der Erfassung der Direktstrahlung erfordert eine entsprechend genormte Messvorrichtung mit stetiger Ausrichtung des Sensors zur Position der Sonne. Eine derartige Vorrichtung stand nicht zur Verfügung. Weiterhin liegt in der Erfassung der Globalstrahlung auf einer Basis von 180 Grad ein Vorteil der Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen wie baulicher Besonderheiten etc. Dennoch würde eine detailliertere Aufteilung der Globalstrahlung in Direkt- und Diffusstrahlung eine exaktere Bewertung des Lichteintrages durch die Lichtkollektoren ermöglichen.

6.3. Wärmebilanzierung der Lichtkollektoren unter Berücksichtigung von Freilandbedingungen

Die einzige praktikable Möglichkeit den Strahlungseintrag in ein geschlossenes System zu messen, ist die Verwendung der Temperatur als Zustandsgröße. Um Strahlungseintrag und Medientemperatur (in diesem Fall Wasser) in einen mathematisch-physikalischen Zusammenhang zu bringen, war es erforderlich, eine Wärmebilanz aufzustellen. Diese beinhaltete die Komponenten des Wärmeeintrages durch die Globalstrahlung, durch freie sowie erzwungene Konvektion und durch die aktive Temperierung über den Innenschlauch. Vernachlässigung fand der Einfluss von Wärmestrahlung durch beispielsweise umgebende Körper. Die Versuche und Messungen wurden im Freiland unter praktischen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Demnach waren schwankende Umwelteinflüsse hinsichtlich Globalstrahlung, Wind und Temperatur zu verzeichnen.

Die exakte Messung der Lufttemperatur im Freiland nach Normbedingungen bedarf einiger Anforderungen, welche nicht ideal am Versuchsstand des Gewächshauses umgesetzt werden konnten. Demnach ist es erforderlich eine ausreichende Luftbewegung zu gewährleisten, um einen Wärmestau zu vermeiden. Diesem Umstand konnte bei geöffneten Seitenwänden Rechnung getragen werden. Weiterhin muss die genormte Messung in einer Höhe von 2 m über dem Boden und strahlungsgeschützt erfolgen. Letzteres betrifft einerseits den Schutz vor direkter Sonnenstrahlung und andererseits die Wärmestrahlung von Gebäudeteilen (Kuner, 2015). Diese Kombination konnte nicht hinreichend genug erreicht werden, so dass teilweise, unter Umständen, zu hohe Werte der Umgebungstemperatur erfasst wurden.

Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Verwendung der Geometrie 4 mit innen-anliegendem Schlauch. Die äußere Kontaktfläche des Temperiersegmentes des Doppelschlauchsystems war stets nach innen und in Richtung Boden auf das Gerüst des Lichtkollektors gewickelt, so dass der Einfluss bezüglich des Wärmeeintrages durch die Globalstrahlung vernachlässigt werden konnte. Gleiches galt für die Berechnung des konvektiven Wärmeeintrages. Im Zuge der Berechnung des Wärmeeintrages aufgrund der Temperierung des Innenschlauches ergibt sich aufgrund des Querschnittes des Doppelschlauchsystems ein Verlustwärmestrom, welcher zunächst berechnet und vom Gesamtwärmestrom des Temperiersegmentes abgezogen werden musste. Hierzu war es erforderlich, den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten zu ermitteln. Dieser stellt eine Näherung dar und unterscheidet sich im Detail vom wahren, örtlichen Wärmedurchgangskoeffizienten (Roetzel and Spang, 2013a), was an dieser Stelle für eine Abschätzung der Verlustwärme des Temperiersegmentes als ausreichend eingeschätzt wurde. Der experimentell bestimmte Wert von k (ca. $15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) lag im Bereich von gängigen

Doppelrohr-Wärmeübertragern gegenüber Gasen, was dem hier vorliegenden Fall hinreichend genau entspricht (Roetzel and Spang, 2013b).

Im Vergleich zu Geometrie 3 mit zentriertem Innenschlauch lässt sich aufgrund des vorhandenen Verlustwärmestromes bezüglich der Kontaktfläche zur Umgebung eine weniger effektive Temperierung ableiten. Gleichwohl die Querschnittsflächen der Suspensionskammern beider Geometrien gleich groß sind, so ergibt sich diesbezüglich ein Nachteil, welcher im Hinblick auf eine mechanische Reinigung aufgrund einer zusammenhängenden Querschnittsfläche bei Geometrie 4 in Kauf genommen werden muss.

Die Berechnung des Wärmestromes für Konvektion beruhte auf den getroffenen Annahmen in Abschnitt 3.4. Unter anderem wurde aufgrund der Freilandaufstellung und dem Vorkommen nennenswerter Windgeschwindigkeiten die Mischform für freie und erzwungene Konvektion angewendet (Klan and Thess, 2013; Churchill, 1977). Im Allgemeinen basiert die Formulierung der Gleichungen zur Bestimmung der Nusselt-Zahlen auf empirisch ermittelten Zusammenhängen geometrischer Grundformen (Platte, Zylinder, etc.) und –konzepte (Rohrbündel). Um eine exakte Bewertung der Nusselt-Korrelationen zu erhalten, müssten Messungen am Grundkonzept des Lichtkollektors unter normierten Bedingungen durchgeführt werden. Da dies jedoch nur unter idealen und exakten Messbedingungen durchführbar ist, werden ähnliche Grundkonzepte genutzt – hier horizontale Zylinder und einzeln angeströmte Rohrreihen (Gnielinski, 2013a, 2013b). Die Nutzung der Anordnung als Rohrbündel mit 2 Reihen (idealisierte Ansicht von vorn) ließ sich aufgrund des dann zu großen Abstandes zwischen beiden Reihen nicht sinnvoll anwenden (Stephan and Stephan, 2014). Die Angleichung der Formulierung der Nu-Zahl an die geometrische Grundkonzeption und die praktischen Umgebungsbedingungen erfolgte mit Hilfe einer Parameteranpassung (Gl. 5-52). Im Ergebnis konnte der konvektive Wärmeübergangskoeffizient im Mittel zu $8,14 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ bestimmt werden. Grundlegende bzw. richtungsweisende Werte für freie Konvektion von Gasen liegen zwischen $3 \text{ und } 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, für erzwungene Konvektion zwischen $10 \text{ und } 100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Stephan and Stephan, 2014; Glück, 1990), so dass festgestellt werden kann, dass der vorrangig vorherrschende konvektive Wärmestrom im Bereich freier und leicht erzwungener Form vorlag, was sich anhand von Abbildung 5-35 gut erkennen lässt. In idealer Freilandaufstellung, das heißt, ohne Gewächshaus und ohne umgebende Gebäude und Gegenstände würde der Einfluss des Windes und damit des Wärmestromes aufgrund erzwungener Konvektion deutlich größer sein.

Der Vergleich zu anderen Bezugsgrundflächen zeigt, dass der Modellansatz das Tagesprofil des Strahlungseintrages am Realistischsten abbildet. Dennoch können anhand des Halbkegelstumpfes, aber auch der Schattenwurffläche einfachere Beziehungen herangezogen werden um den Strahlungseintrag als Ganzes abzuschätzen. Die Verwendung der

Stellfläche als Bezugsgrundfläche für einzelne Lichtkollektoren unterrepräsentiert den Strahlungseintrag wie zu erwarten in den Morgen- und Abendstunden. Mit einer größer werdenden Anzahl an Lichtkollektoren wird dieser Einfluss der vertikalen Komponente jedoch minimiert und in Kombination mit der Beachtung von Infrastrukturflächen wird die Stellfläche häufig als Grundlage des Licht- und Wärmeeintrages herangezogen und für Großanlagen in der Gesamtheit bewertet (Tredici, 2004).

Die Globalstrahlung, welche auf die Stellfläche bzw. Schattenwurffläche trifft, wird also auf der Mantelfläche des Lichtkollektors verteilt, was sich im hohen SVR von 100 (siehe Abschnitt 5.1.2.3) als Leistungskriterium für Photobioreaktoren widerspiegelt (Tredici, 2004; Posten, 2009; Ogbonna and Tanaka, 2000).

6.4. Langzeitkultivierung von Mikroalgenbiomasse im technischen Maßstab unter Freilandbedingungen

6.4.1. Einflussparameter zur Prozessstabilität

Die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung stabiler und idealer Kultivierungsbedingungen in Gegenwart sich verändernder Umgebungsbedingungen setzt verschiedene Kenntnisse zur Prozesskontrolle sowohl in biologischer als auch prozesstechnischer Sicht voraus. Unter Einhaltung von, aus technischer Sicht, steuerbaren Parametern, wie Suspensionstemperatur und Nährstoffkonzentration, erfolgte die Kultivierung ausgewählter Einzelkulturen von *Scenedesmus vacuolatus* und *Chlorella kessleri* im Tannenbaum-PBR. Die dabei erreichten Biotrockenmassekonzentrationen innerhalb des stabilen Wachstumsverlaufes im Hinblick auf den Lichteintrag (siehe Abbildung 5-39 bis Abbildung 5-41) lagen bei $6,71 \text{ g l}^{-1}$ für *Scenedesmus vacuolatus* und $5,49 \text{ g l}^{-1}$ für *Chlorella kessleri*. Dies zeigte, dass innerhalb dieser Konzentrationsbereiche ausreichend Licht für die Mikroalgen zur Verfügung stand und limitierend wirkte, d.h. das weitere Wachstumparameter in mindestens ausreichender Menge und Konzentration zur Verfügung standen. Dennoch wurde die obere Grenze für die Arbeitskonzentration der Biotrockenmasse für die angetriebenen Langzeitkultivierungsversuche etwas reduziert und bei 5 g l^{-1} festgelegt, um einen gewissen Sicherheitspuffer zu erhalten, da ein stabiles Wachstumsverhalten der Mikroalgen auch einer gewissen Schwankungsbreite und weiteren Randbedingungen unterliegt. Eine Kombination aus großer Verweilzeit des Prozessmediums im Photobioreaktor und hoher Biotrockenmassekonzentration der Mikroalgen führte zu Problemen beim erneuten Wachstumsstart nach Ernte (siehe Abbildung 5-42). Aus diesem Grund waren regelmäßige Teilernten und engere Konzentrationsbereiche (Zick-Zack-Kurve der Biotrockenmassekonzentration) anzustreben.

Massenkultivierungen im Freiland haben das Ziel einer stabilen und langen Kultivierungsperiode. Dementsprechend lassen sich vergleichbare Arbeitsbereiche wiederfinden, die sich in diesem Punkt nur auf tubuläre Systeme beziehen sollen. Im ganzjährigen Kultivierungsbetrieb von *Scenedesmus almeriensis* im Glasröhrensystem (Durchmesser 0,09 m) in Almería wurde innerhalb eines Konzentrationsbereiches von $0,7$ bis 2 g l^{-1} im ganzjährigen Betrieb von Winter bis Sommer kultiviert (Acién et al., 2012). Die Kultivierung von *Arthrospira platensis* in vertikal-zylinderförmigen tubulären Photobioreaktoren wird bis zu einer Konzentration von 4 g l^{-1} beschrieben (Tredici and Zittelli, 1998). Im Westen von England wurde *Scenedesmus obliquus* im Glasröhrensystem (Durchmesser 0,028 m) innerhalb von $1,5$ bis $3,5 \text{ g l}^{-1}$ über einen Zeitraum von April bis August kultiviert (Hulatt and Thomas, 2011). Entscheidend ist die Sicherstellung einer ausreichenden Lichtversorgung aller sich in der Kulturlösung befindlichen Mikroalgen. Hinzu kommt die Verweilzeit im Photobioreaktor, denn mit zunehmender Kultivierungsdauer ohne Ernte steigt in aller Regel das Kontaminationsrisiko. Ebenso ist mit

zunehmenden Aufsalzeffekten aufgrund korrespondierender Ionen (bspw. K⁺-Anreicherung bei Verbrauch von NO₃⁻-Ionen und regelmäßiger Zugabe von KNO₃) zu rechnen (siehe Abbildung 5-44). Weiterhin muss auf schwankende Witterungsbedingungen reagiert werden können. In Mitteleuropa bzw. ähnlichen Breitengraden kann bei starker Bewölkung eine durchschnittliche Globalstrahlung von unter 50 W m⁻², ohne Reduzierung der Verluste am Lichtkollektor, herrschen (bei starkem Niederschlag wird zusätzlich die Diffusstrahlung unter Umständen komplett absorbiert), so dass die Konzentration der Biotrockenmasse dementsprechend angepasst und reduziert werden muss, um eine ausreichende Lichtversorgung sicherstellen zu können. Bei zu hohen Konzentrationen am „Limit“ bzw. Maximum erhöht sich das Risiko eines „Zusammenbruchs“ der Kultur (siehe Diskussion oben). Gleichwohl höhere BTM-Konzentrationen angestrebt werden können, so ist es doch im Hinblick auf stabile Wachstumsbedingungen üblich, mit Arbeitskonzentrationen zwischen 2 und 5 g l⁻¹ zu arbeiten. Bei höheren BTM-Konzentrationen ist eine intensivere Durchmischung erforderlich. Je höher wiederum der Arbeitsbereich der Biotrockenmassekonzentration gewählt wird, desto geringer ist der spezifische Energieaufwand zur Entfernung des Wassers bei der Ernte, sowohl bezüglich benötigter Umwälzpumpen als auch der Erntevorrichtung selbst (z.B. Zentrifugen). Bei offenen Kultivierungssystemen, zum Vergleich, werden maximal bis zu 0,5 und 1 g l⁻¹ Biotrockenmassekonzentration erreicht (Chisti, 2016).

Die Gewährleistung der Prozessstabilität im Hinblick auf ein stabiles Wachstum der Zielkultur der Mikroalgenbiomasse setzt eine stabile Zusammensetzung der Mikrobiözönose innerhalb der Kulturlösung des Prozessmediums voraus, und zwar in der Art, dass zu jeder Zeit favorisierende Wachstumsbedingungen für den Zielorganismus, der definierten Mikroalgenart, vorherrschen. Diese Notwendigkeit sowie potentielle Fraßfeinde und Kontaminanten wurden bereits in den 60er Jahren bei Untersuchungen zu Massenkulturen im Freiland beschrieben (Soeder, 1971; Kraut and Meffert, 1966) und sind der wesentliche Faktor für die stabile Produktion und stellen eine entscheidende Herausforderung für die großtechnische Produktion im Freiland dar (Ecke et al., 2014). Es lassen sich Berichte über schwerwiegende Kontaminationen von Mikroalgenkulturen durch Wasserpilze in kommerziellen großtechnischen Produktionen in der Literatur finden, so z.B. von Sapphire Energy (Letcher et al., 2013) oder auch Earthrise Nutritionals (Benemann, 2015). Beides sind Betreiber offener Produktionsanlagen für Massenkulturen. Auch wenn geschlossene Photobioreaktorsysteme ein erheblich geringeres Kontaminationsrisiko im Vergleich zu offenen Kultivierungseinheiten aufweisen, so erfolgt der Betrieb im Freiland dennoch nicht unter sterilen Bedingungen. Vielmehr muss das Ziel darin bestehen, den Kontaminationsdruck, welcher aufgrund von beispielsweise Pollenflügen jahreszeitlich oder auch durch sich verändernden Luftdruck witterungsbedingt in seiner Intensität schwankt, auf die Mikroalgenkultur zu minimieren. Eine keimarme Kulturlösung kann ermöglicht werden durch Schaffung favorisierender Bedingungen

der Zielkultur. Bei phototrophen Wachstumsprozessen bedeutet dies, etwaige C-Quellen im Prozessmedium zu vermeiden. Hierin liegt auch die im vorigen Abschnitt erwähnte Notwendigkeit regelmäßiger Teilernten und gegebenenfalls einem Austausch von Prozesswasser.

Im Zusammenhang mit der Kultivierung von Einzel- bzw. Monokulturen im Photobioreaktor zeigte sich im Verlauf der vegetativen Perioden von 2012-2014, dass unabhängig von Reinigungszyklen und -methoden, ein steigender Kontaminationsdruck mit zunehmender Anzahl von saisonal-übergreifender Nutzung zu beobachten war. Auftretende Fraßfeinde, wie Rädertierchen und Ciliaten, stellen häufig Folgeerscheinungen von Erstinfektionen anderer Kontaminanten (z.B. Bakterien) dar. Bei der in Abschnitt 5.3.1.3 beschriebenen Erstinfektion der Einzelkulturen 2013 schien es sich jedoch um einen Vertreter der Wasserpilze zu handeln (Letcher et al., 2013; Pinevich et al., 1997; Sparrow Jr., 1960), welche häufig artspezifisch in Erscheinung treten und in diesem Fall die Kulturen von *Scenedesmus vacuolatus* (später auch die *Chlorella*-Kulturen) infizierten. Das, während der Kultivierungsversuche, mikroskopisch festgestellte Verhalten des Wasserpilzes wies offensichtlich parasitäre Strukturen auf und ähnelte dem Lebenszyklus von Aphelidien (siehe Anhang A-5). Das Auftreten, das Verhalten und die Wirkung auf die befallene Mikroalgenkultur kann verglichen werden mit dem Befall von Chytridien, welche bei *Chlorella*-Vertretern in Massenkulturen beobachtet werden konnten und innerhalb von 24 Stunden zum totalen Absterben der Mikroalgenkultur führen kann (Ecke et al., 2014).

Die untersuchten Gegenmaßnahmen zur Bekämpfung der Wasserpilze konnten das Wachstum derer lediglich eindämmen und verlangsamen, jedoch nicht verhindern. Aus diesem Grund wurde der Ansatz selbststabilisierender Kulturen, mit dem Ziel, eine Leitkultur von *Scenedesmus obliquus* zu schützen, angewandt. Bereits in den 50er Jahren wurde *Scenedesmus obliquus* in Massenkultur gebracht und, nach Aussage von Carl Soeder, einem frühen Pionier in der Mikroalgenkultivierung von Massenkulturen im Freiland, als ernährungsphysiologisch unbedenklich eingestuft, (Benemann, 2015).

Ein entscheidender Faktor bei der Kultivierung stabiler Freilandkulturen stellt die Aufrechterhaltung der Prozesshygiene dar. Mit Hilfe der weiterentwickelten Geometrie (Geometrie 4) konnten mechanische Reinigungsalgorithmen etabliert und während der Kultivierung durchgeführt werden (siehe Abbildung 5-49). Dadurch war es möglich, die Lichteintrittsflächen weitestgehend frei von Biobelägen zu halten und dem Auftreten potentieller Kontaminationskeime vorzubeugen. Im Zusammenhang mit dem Ansatz der selbststabilisierenden Kultur mit *Scenedesmus obliquus* als Leitorganismus konnte eine saisonal-übergreifende stabile Langzeitkultivierung im Freiland erfolgreich umgesetzt werden.

Die Temperaturstabilität der zu produzierenden Mikroalgenkultur ist ein entscheidender Wachstumsparameter und unter Freilandbedingungen ein kritischer Regelparameter. Mit Hilfe des geschlossenen Temperierkreislaufes der Tannenbaum-Photobioreaktoren ist die Entfernung überschüssiger Wärme jederzeit erfolgreich möglich gewesen (Ausnahme: temporärer kurzzeitiger Ausfall aufgrund elektrischer Störung). Die in Abschnitt 2.3.4 beschriebene Problematik bei der Nutzung der Verdunstungskühlung wurde anhand eines Vergleichsversuches mit einem Glasröhren-Photobioreaktor durchgeführt. Die Sprühnebeldüsen waren direkt über dem Lichtkollektor installiert. Da das für das Aufsprühen verwendete Wasser nicht entmineralisiert wurde, entstanden innerhalb von 24 Stunden diese aus Kalkablagerungen bestehenden Beläge (Abbildung 6-1) und reduzierten die Transmissionskapazität der Glasröhren erheblich. Ein Entmineralisieren jeglichen Wassers zur Nutzung der Verdunstungskühlung verhindert diese Ablagerungen, ist jedoch sehr energieintensiv und erfordert eine zusätzliche Infrastruktur (Davis et al., 2011). In Gegenden mit hoher Luftfeuchte funktioniert dieses Prinzip nicht.



Abbildung 6-1 - mineralische Ablagerungen in Folge von Verdunstung nach Kühlung mit temperaturgesteuerter Verneblungsschläuchen; Testkultivierung mit TBR100, bestehend aus Glasröhren (Aufnahmedatum: 16.09.2016)

6.4.2. Langzeitkultivierung im saisonal-übergreifenden Betrieb

Die erzielten Ergebnisse basieren auf phototropen Wachstumsprozessen. Dementsprechend liegt ein Hauptaugenmerk bezüglich der Vergleichbarkeit bei der tatsächlich eintreffenden Globalstrahlung als nicht direkt-steuerbare Eingangsgröße. Regionale charakteristische Unterschiede wie beispielsweise die Intensität, die Beeinträchtigung durch Witterungsbedingungen, die Tageslänge und jahreszeitliche Schwankungen sowie Verteilungen sind diesbezüglich zu berücksichtigen. Im Regelfall sind in der Literatur vorrangig durchschnittliche Verteilungen der Globalstrahlung hinsichtlich Tages- oder Monatsprofile angegeben, womit eine Vergleichbarkeit nur hinsichtlich entsprechender Werte sinnvoll erscheint. Hinsichtlich der Biomasseproduktivität ist eine Vielzahl von Literaturwerten verfügbar, häufig jedoch ohne den Versuchsansatz einer stabilen Langzeitkultivierung unter realen Freilandbedingungen. Ausgehend von phototropen Kultivierungen im Freiland, unter Berücksichtigung des Breitengrades, sind weitere vergleichende Parameter wie die Kultivierungslänge sowie das Kultivierungsvolumen und die verwendeten Mikroalgenkulturen selbst zu betrachten. Basierend darauf wurden Versuchsdaten von *Scenedesmus* und *Chlorella* mit einem Mindestvolumen von 100 L im Freiland verglichen. Vor allen Dingen die stabile Langzeitkultivierung über mehrere Monate steht bei vielen in der Literatur beschriebenen Werten nicht im Vordergrund, stellt aber im Hinblick auf eine mögliche großtechnische Anwendung ein entscheidendes Kriterium dar.

Ausgehend von der Kultivierungslänge bezüglich der erfolgreich durchgeführten durchgehenden Ganzjahreskultivierung in den Tannenbaum-Photobioreaktoren von mindestens 365 Tagen sind vorrangig Vergleichsdaten aus Breitengraden mit einer größeren Strahlungsintensität und Jahresverteilung der Globalstrahlung zu finden. Es sind keine gesicherten Literaturangaben für saisonal-übergreifende Freilandkultivierungen in vergleichbaren Breitengraden und entsprechendem Kultivierungsmaßstab verfügbar. Klimatisch geeignetere Gegenden bezüglich der Intensität und jährlichen Verteilung der Globalstrahlung sind in geographischer Nähe zu den Wendekreisen zu suchen. Installierte tubuläre Systeme in Almería in Südspanien und in Perth, gelegen im westlichen Australien, bieten sowohl aufgrund ihrer technologischen Ausrichtung als auch der verwendeten Mikroalgen eine geeignete Vergleichgrundlage (Acién et al., 2012; Borowitzka, 1997). Die Grundlage für den Vergleich der jeweils örtlich vorherrschenden Globalstrahlung bildete der Datensatz der NASA, verwendet in Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14. Anhand der zusammengestellten Daten in Abbildung 6-2 lassen sich zwei wesentliche Unterschiede erkennen. Einerseits liegen die Jahresprofile der GHI von Almería und Perth, auch wenn qualitativ vergleichbar, deutlich höher als am Standort der Tannenbaum-PBR. Andererseits zeigt sich, dass der Unterschied im Jahresverlauf zwischen dem Faktor 2 in den Sommermonaten und dem Faktor 4 in den

Wintermonaten schwankt. Hierin liegt der Unterschied in der Differenz bezüglich der jährlichen Biomasseproduktivität hauptsächlich begründet.

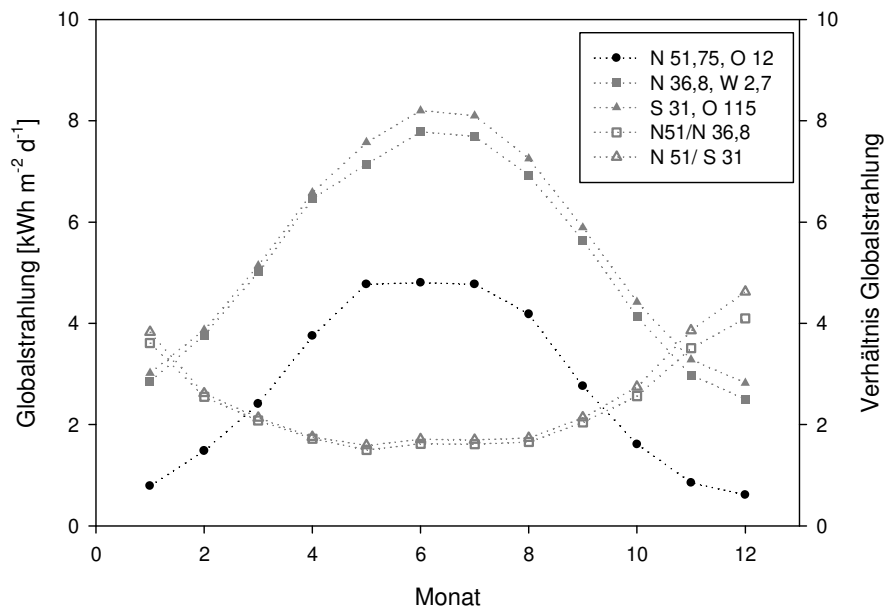


Abbildung 6-2 - Jahresprofile der Globalstrahlung in Köthen, Almería und Perth, basierend auf der Auswertung der Daten aus Abbildung 2-13 und Abbildung 2-14 (SSE Release 6) (kWh m⁻² d⁻¹) Juli 1983 – Juni 2005 (www.mynasadata.com)

Eine Ganzjahreskultivierung am Standort der Tannenbaum-PBR ist, unter der Nutzung des beheizbaren Doppelschlauchsystems, möglich, eine effektive Produktion von Mikroalgenbiomasse in den Wintermonaten ist mit durchschnittlichen Flächenproduktivitäten von unter 5 g m⁻² d⁻¹ aber nicht sinnvoll. Im Vergleich dazu lagen die erzielten monatlichen Biomasseproduktivitäten in der Hauptvegetationsperiode bei bis zu 20,4 g m⁻² d⁻¹. Diese wiederum lägen bei der Einstrahlung im selben Jahreszeitraum beispielsweise in Almería bei bis zu 32,5 g m⁻² d⁻¹. Laut Angaben der Forschungsanlage in Almería sind Produktivitäten von 35 bis 45 g m⁻² d⁻¹ erzielt worden (Acién et al., 2012). Die Versuche zur Kultivierung erfolgten mit einer täglichen Verdünnungsrate von 0,34 bei Arbeitskonzentrationen der Biotrockenmasse, in Bezug zum Profil der Globalstrahlung vergleichsweise niedrigen Werten, von 0,7 bis 2 g l⁻¹, vermutlich gewählt auch aufgrund des großen tubulären Durchmessers von 9 cm, was mit einem hohen Wasserverbrauch einhergeht. Gleichzeitig ist eine hohe Strömungsgeschwindigkeit von 0,9 m s⁻¹ eingesetzt worden, was höhere Wachstumsraten aufgrund intensiverer Durchmischung, und damit erhöhter Reynoldszahl, erlaubt (Broneske and Grewe, 2017), allerdings auch mit einem erheblichen Mehraufwand bezüglich Energieeintrag verbunden ist. Dennoch wäre laut den getroffenen Angaben eine Erhöhung der Produktivität der Tannenbaum-PBR am Standort Almería, aufgrund des verändernden Strahlungsprofils, um 60 % möglich. Ebenso ist der Langzeitversuch der Tannenbaum-PBR an die Gewinnung

der Mikroalgenbiomasse gekoppelt gewesen. Die zur Verfügung stehenden Tellerseparatoren sind bezüglich einer kapazitiv erforderlichen Mindesterntemenge nicht an eine tägliche Verdünnungsrate koppelbar gewesen. Dies hat Einfluss auf die maximal erzielbaren Wachstumsraten, nicht jedoch unmittelbar auf die Stabilität der Kultivierung.

Durch die Steuerbarkeit der Wachstumsbedingungen im geschlossenen Kreislauf und damit der Möglichkeit aktiv zu heizen und zu kühlen, konnte gezeigt werden, dass der Produktivitätsgang in qualitativer Hinsicht, trotz des relativen Unterschiedes des Jahresprofils der jeweils vorherrschenden Globalstrahlung (leere Quadrate in Abbildung 6-2), mit dem in Almería vergleichbar ist.

Ganzjahreskultivierungen für vergleichbare Einstrahlungsprofile in ähnlichen geographischen Zonen sind nicht bekannt. Bezüglich der erreichten Produktivitäten innerhalb der vegetativen Periode von März/April bis September/Okttober lassen sich beispielhaft aufzeigen. In einem tubulären 500 l Photobioreaktor (Anglessey, westliches England, N 53°), bestehend aus Glasröhren mit einem Durchmesser von 2,8 cm, wurde *Scenedesmus obliquus* mit einer durchschnittlichen Biomasseproduktivität von 0,14 g l⁻¹ d⁻¹, entsprechend einer Flächenproduktivität von 11,3 g m⁻² d⁻¹ (Höchstwert für Juni 14,3 g m⁻² d⁻¹), kultiviert (Hulatt and Thomas, 2011). Mit Flat-Panel-Airlift Reaktoren (siehe Tabelle 2-1), als Vertreter der Platten-PBR, sind Freilandkultivierungen mit *Chlorella sorokiniana* am Standort des Fraunhofer CBP in Leuna (N 51,3°, O 12°) durchgeführt worden (Holdmann et al., 2016). Im dargestellten Versuchszeitraum von Juni bis Oktober wurden durchschnittliche Wachstumsraten zwischen 0,1 und 0,4 g l⁻¹ d⁻¹, entsprechend einer angegebenen Flächenproduktivität von 4 bis 16 g m⁻² d⁻¹, erzielt. Die höchsten Biomassekonzentrationen vor Ernten während der Versuchsreihe lagen zwischen 5 und 6 g l⁻¹. Die Kultivierungsdauer wurde mit einer variierenden Anzahl von Modulen á 180 l erreicht.

In der Literatur lassen sich intensive Recherchen über Angaben zu Produktivitäten von Mikroalgenbiomasse finden (Isdepsky, 2015; Graziella C. Zittelli et al., 2013; Becker, 1994) – sowohl für offene als auch geschlossene Photobioreaktorsysteme mit unterschiedlichen Mikroalgen und verschiedensten Applikationen.

Die prozessbegleitende Analytik zur Bestimmung der elementaren Hauptbestandteile der Mikroalgenbiomasse (siehe Abbildung 5-55, Abbildung 5-56 und Tabelle 5-4) zeigt die stabile Zusammensetzung der Biomasse hinsichtlich der analysierten Komponenten. In Bezug zum Redfield-Verhältnis ergibt sich ein stöchiometrisches C:N:P Verhältnis von 51,9 : 7,3 : 1. Die sich daraus ergebenden Verhältnisse für C:N (7,1) und N:P (7,3) liegen im Bereich derer für im ausreichenden Maße mit Nährstoffen versorgtes Phytoplankton, was zeigt, dass die Mikroalgenkulturen nicht unter gestressten Bedingungen hinsichtlich ihrer Nährstoffversorgung kultiviert wurden (Geider and Roche, 2002). Die elementare Zusammensetzung

der Spurenelemente lag im Bereich von für *Scenedesmus*-Kulturen bekannten Verteilung (Krauss et al., 1956).

6.4.3. Effizienzbewertung des phototropen Wachstums im Freiland

Im Rahmen der Effizienzbewertung phototropher Wachstumsprozesse diente das erstellte Lichtmodell der Berechnung der durch die Lichtkollektoren aufgenommenen PAR-Strahlung. Mit Hilfe von Gl. 2-4 in Abschnitt 2.3.3 (Ansatz *nach Pirt*) konnten die Daten mit der im selben Zeitraum gebildeten Mikroalgenbiomasse in Relation gesetzt werden (siehe Abbildung 5-57). Der Bezug zur Produktivität und somit der Berücksichtigung der Biomassekonzentration in der Suspension anstatt der Wachstumsrate war wichtig, da die Konzentration während der Kultivierung nicht konstant gehalten wurde (siehe Abbildung 5-51). Durch die Aufrechterhaltung und Überschreitung der Mindesströmungsgeschwindigkeit der Kulturlösung zur Sicherstellung turbulenter Strömungsverhältnisse konnte von einer ausreichenden Durchmischung und folglich gleichverteilten Lichtversorgung pro Algenzelle ausgegangen werden (siehe Abschnitt 5.1.2.2). Ideal konstante Bedingungen sind unter Freilandbedingungen nicht realisierbar. Im Hinblick auf große Kulturvolumina (im Versuchsaufbau gesamt 850 l) und schwankende Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur und Strahlung ist festzuhalten, dass eine Steuerung der Wachstumsbedingungen einer gewissen Trägheit unterliegt. Aus diesem Grund liegen die Produktivitätswerte dementsprechend niedriger als bei den unter konstanten Bedingungen durchgeführten Laborversuchen (Wolf et al., 2016). Die unter den genannten Bedingungen erzielte Korrelation zwischen aufgenommener PAR-Strahlung und Biomasseproduktivität stellt den Zeitraum vom 21.08.2014 bis zum 29.09.2015 dar und beinhaltet Sommer wie Winter. Das lineare Verhalten zeigt die erfolgreiche Aufrechterhaltung effektiver Wachstumsbedingungen gegenüber schwankenden Umgebungsbedingungen und die erfolgreiche Prozesssteuerung mit Hilfe der Tannenbaum-PBR. Vergleichende Auswertungen des prinzipiellen Zusammenhanges unter ähnlichen Randbedingungen sind nur für deutlich kürzere Untersuchungszeiträume verfügbar und bestätigen, dass eine mathematisch enger gefasste Korrelation bezüglich der einzelnen Datenpunkte nicht zielgerichtet realisierbar und vielmehr eine Auswertung als linearer Zusammenhang als problematisch darstellt (Schreiber et al., 2017; Schmid-Staiger et al., 2016; Hulatt and Thomas, 2011; Treddici and Zittelli, 1998).

Der linear ansteigende Verlauf in Abbildung 5-57 lässt sich in zwei Abschnitte einteilen, jedoch in Bezug zu Abbildung 2-1 nicht einem der Bereiche lichtlimitiert oder lichtgesättigt zuordnen. Hierzu wären weitere Randbedingungen und charakteristische Kurveninformationen, beispielsweise der Bereich zur Lichtinhibierung, erforderlich. Dieser Bereich wurde, zumindest basierend auf den mittleren Tageswerten, nicht erreicht. Gleichwohl lässt sich ableiten, dass die Lichtverdünnung und -verteilung der Lichtkollektoren gut bewerkstelligt wird. Eine

inhibierende Wirkung, also ein Verlust an Photonen durch ein zu intensives Eintragen von solarer Strahlung bei gleichzeitig geringer Biomassekonzentration im Lichtkollektor, kann anhand eines funktionalen Zusammenhanges beim Auftragen von Biomasseproduktivität in Bezug zur relativen Lichtverfügbarkeit überprüft werden. Freilandversuche mit flat panel airlift Photobioreaktoren deuten auf eine photoinhibierende Wirkung, gleichwohl die angegebene betreffende relative Lichtverfügbarkeit von ca. $2 \mu\text{mol g}^{-1} \text{d}^{-1}$ die gemessene PAR-Strahlung außerhalb der Lichtkollektoren darstellt und somit nicht hinreichend vergleichbar ist (Brandt, 2015). Dennoch ist ein Absinken der Biomasseproduktivität während des Langzeitversuches in den Tannenbaum Lichtkollektoren mit zunehmender relativer Lichtverfügbarkeit nicht eindeutig sichtbar (siehe Abbildung 5-57, Abbildung 5-58). Im Anhang A-6 sind die tagesbasierten Produktivitätswerte in Relation zur relativen Lichtverfügbarkeit aufgetragen. Gleichwohl in der unteren Abbildung ab ca. $0,06 \text{ MJ g}^{-1} \text{d}^{-1}$ (bezüglich PAR) eine Tendenz zur Verringerung der Produktivität erklärbar ist, so ist die Anzahl der Datenpunkte doch zu gering, um einen funktionalen Zusammenhang abzuleiten. Für reine Freilandkultivierungen, vor allen Dingen im größeren Maßstab, ist eine generelle Heterogenität des Zusammenhanges zwischen Produktivität und eingestrahelter GHI beim alleinigen Betrachten der Rohdaten festzustellen (de Vree, 2016; Brandt, 2015). Verantwortlich hierfür sind schwankende Umgebungsbedingungen und die Trägheit des Gesamtsystems. Grundsätzlich bestand das Ziel in der Aufrechterhaltung effektiver Wachstumsbedingungen hinsichtlich Lichtverfügbarkeit, so dass das Arbeitsregime der Biotrockenmasse den Lichtverhältnissen aktiv angepasst wurde. Um einen definierten funktionalen Zusammenhang zur Photoinhibition feststellen zu können, wäre es notwendig gewesen, die Mikroalgenkultur gezielt diesen Bedingungen durch drastisches Ausdünnen bei gleichzeitig hoher PAR-Strahlung auszusetzen. Dies jedoch hätte das Hauptziel der Langzeitkultivierung gefährden können.

Die leeren Quadrate in Abbildung 5-57 weisen das Funktionieren des Modelles und der Auswertung *nach Pirt* aus. Die Werte gehören zum Kultivierungsverlauf im Zeitraum April/Mai 2015 und lagen unterhalb der, basierend auf dem PAR-Strahlungseintrag, zu erwartenden Biomasseproduktivität (siehe Ergebnisdarstellung in Abschnitt 5.3.3). Die Bewertung des phototrophen Wachstums erlaubt eine Abschätzung der zu erwartenden Biomasseproduktivität unter den aufgezeigten Kultivierungsbedingungen.

Die Darstellung bezüglich der Lichtintensität erlaubte eine Beurteilung über den mindest-erforderlichen Lichteintrag um ein Biomassewachstum erzielen zu können. Es ist nicht direkt vergleichbar mit dem Lichtkompensationspunkt, da dessen Bestimmung unter konstanten Bedingungen bezüglich Einstrahlungsintensität bei jeweils verschiedenen Werten ermittelt wird und damit eine Aussage über die Netto-Photosyntheseleistung zwischen Biomasseauf- und -abbau trifft (Chisti, 2012; Lloyd et al., 1977). Dennoch ist eine Bewertung dahingehend zulässig, dass unter den verwendeten Versuchsbedingungen im Freiland ab der oben

beschriebenen Photonenflussdichte ein Biomassewachstum der untersuchten Mikroalgenkulturen erfolgte. Im Rahmen der Langzeitkultivierung ergab sich eine kritische Lichtintensität (basierend auf 24 Stunden) von $11,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, basierend auf transmittierte Strahlung (pauschal bewertet für senkrechten Einfall an der Phasengrenzfläche). Die entsprechenden Werte stammen, wie zu erwarten, aus dem Zeitraum mit der geringsten Globalstrahlung zwischen November und Februar. Basierend auf den Versuchen der Einzelkultivierungen von *Scenedesmus vacuolatus* und *Chlorella kessleri* ist eine kritische Lichtintensität von $23,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bestimmt worden. Beide Werte zur mindesterforderlichen Lichtintensität konnten bezüglich vergleichbarer Mikroalgenkulturen in konkreten Versuchen hinsichtlich detaillierter Laborbedingungen für *Scenedesmus dimorphus* mit $12,5 \pm 3,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (J. Wang et al., 2015) und $7,65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Ogbonna et al., 1995) und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Lloyd et al., 1977) für *Chlorella pyrenoidosa* experimentell ermittelt werden. Grundsätzlich liegen die scheinbaren Werte für die Lichtkompensation bei den Freilandversuchen im Vergleich zu gezielten Labortests (Durchführung häufig in kleinem Maßstab und unter Nutzung definierter Versuchsanordnungen) höher, da die Effektivität zur Nutzung der Photonen geringer ist. Aufgrund vorhandener prozessimmanenter Dunkelanteile kommt es zur Entstehung von Lichtgradienten und Veratmungsverlusten.

Eine weitere Auswertung der Darstellung in Abbildung 5-57 führte zur Bewertung und Berechnung des Biomasseertragskoeffizienten bezüglich des Lichtes ($Y_{X/L}$) anhand Gl. 5-57 und Gl. 5-58. Entsprechend der Verteilung in Abbildung 5-60 zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen schwankender Lichtintensität und Biomassewachstum keine eindeutige Beziehung aufweist. Die Werte für $Y_{X/L}$ können nicht isoliert betrachtet werden. Aus diesem Grund wurden die ermittelten Gleichungen angewendet und zeigen, dass die mittleren Ertragskoeffizienten in der vegetativen Periode zwischen 2 und 3 g MJ^{-1} lagen und sich asymptotisch an einen theoretischen Wert von $2,18 \text{ g MJ}^{-1}$ annähern. Der maximal erreichte Biomasseertragskoeffizient im Kultivierungszeitraum lag bei $2,7 \text{ g MJ}^{-1}$ und ist beim Schnittpunkt der in Abbildung 5-57 dargestellten Geraden zu finden (Pirt et al., 1983). Als Mittelwert während der gesamten Versuchsperiode ergaben sich $2,4 \text{ g MJ}^{-1}$. Die Werte liegen einem Bezug von 24 Stunden zu Grunde. Unter definierten Laborbedingungen mit konstanter Beleuchtung und Optimierung der Biomassekonzentration können Ertragskoeffizienten für *Chlorella sorokiniana* von ca. 20 g MJ^{-1} erzielt werden (Pirt et al., 1980). Hierbei handelte es sich zwar um kontinuierlich betriebene Kultivierungen (Chemostat), dennoch gibt es einen Hinweis auf das Wachstumspotential, gleichwohl diese Werte unter Freilandbedingungen über einen stabilen Zeitraum nicht realisierbar sind. Bilanzierungswerte im Stundentakt weisen teilweise Werte für $Y_{X/L}$ von $23,6 \text{ g MJ}^{-1}$ auf – durchschnittlich über den Versuchszeitraum von 9 bis 17 Uhr ergibt sich jedoch ein Wert von $10,9 \text{ g MJ}^{-1}$ (Lee and Low, 1993, 1991).

Im Zusammenhang mit dem Brennwert der Biomasse erfolgte die Berechnung der Photo-konversionseffizienz (PCE), anhand des für den Standort der Photobioreaktoren ermittelten durchschnittlichen PAR-Anteils von 0,494 einerseits als PCE_{SOL} (bezüglich solarer Globalstrahlung) und PCE_{PAR} (bezüglich PAR-Anteil der GHI). Der Flächenbezug erfolgte bezüglich der Stellfläche und der modellierten Lichtaufnahme der Kollektoren. Innerhalb des gesamten Kultivierungszeitraums vom 21.08.2014 bis 29.09.2015 (reduziert um die Werte von April/Mai 2015) konnte ein durchschnittlicher PCE_{SOL} Wert von 3,14 bezüglich der Stellfläche und 2,80 bezüglich der modellierten Strahlungsaufnahme, entsprechend 6,36 % bzw. 5,67 % PCE_{PAR} , berechnet werden. Im Februar 2015 (Zeitraum vom 03.02.2015 bis 14.02.2015) konnte eine maximale Photosynthesekonversionseffizienz von 4,98 % (PCE_{SOL}) erzielt werden. Die Nutzung des Glasröhrensystems in Almería führte zu einem vergleichbaren PCE-Wert bezüglich solarer Strahlung, bezogen auf die Stellfläche, von durchschnittlich 3,4 % (Ación et al., 2012). Ein direkter Vergleich zwischen tubulärem System in zylindrischer und horizontal-gerader Ausführung und Plattensystem mit unterschiedlicher Himmelsausrichtung führte zu der Erkenntnis, dass die zylindrische Anordnung den höchsten PCE-Wert von 6,6 (bzgl. PAR-Strahlung) gegenüber 5,6 % mit dem horizontalem System und 4,6 und 6,0 für die Plattenreaktoren erreichte (Tredici and Zittelli, 1998). Diese Werte beziehen sich auf transmittierte Strahlung der jeweiligen Mantelfläche des PBR-Typs für Sommermonate. Allerdings wurden die Versuche mit *Arthrospira platensis* durchgeführt. Kurzzeit-Kultivierungsversuche über 5 Tage mit ebenfalls *Arthrospira platensis* in einem kegelförmigen Lichtkollektor (photoaktives Volumen 6,23 l) zeigten einen PCE_{PAR} -Wert von 6,83 % bezüglich der Stellfläche von 1 m² (Watanabe and Hall, 1996). Im gleichen Photobioreaktorsystem konnte mit *Chlorella sorokiniana* bei einer Kultivierung mit CO₂-angereicherter Begasung über 6 Tage ein maximaler Wert für PCE_{PAR} von 8,67 % erzielt werden (Morita et al., 2000), allerdings wurde im Rahmen dieser Versuche eine künstliche Beleuchtungsquelle zur Simulation von Freilandbedingungen verwendet. Über kurze Zeiträume sind PCE-Werte bezüglich solarer Strahlung von über 5 % erreichbar, was auch im Rahmen der eigenen Versuchsergebnisse beobachtet werden konnte. Über einen längeren Zeitraum konnten diese Werte im Freiland jedoch noch nicht beobachtet werden (Masojídek et al., 2013). In Pond-Systemen sind maximal 2,7 % PCE_{SOL} beschrieben (Chisti, 2012).

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die großtechnische Produktion von Mikroalgenbiomasse unter Freilandbedingungen unterliegt trotz ihres enormen Potentials nach wie vor einem Nischendasein im Markt der hochwertigen Biomasse. Diese Arbeit zeigt auf, dass eine stabile Kultivierung von Mikroalgenbiomasse unter Freilandbedingungen in Mitteleuropa (und potenziell ähnlicher Breitengrade) effektiv durchführbar ist. Es ist zu vermuten, dass an Orten näher der Wendekreise eine aufgrund höherer Globalstrahlungsprofile ebenso höhere Biomasseproduktivität ermöglicht werden könnte. Die erzielten PCE-Werte zeigen, dass die Effektivität der verwendeten Lichtkollektoren zum Einsammeln von Sonnenlicht, einem entscheidenden Einsatzkriterium bei der Durchführung phototropher Wachstumsprozesse, ganzjährig stabil ist und die Biomassezusammensetzung eine definierte und ebenso stabile Zusammensetzung im Jahresverlauf aufweist. Vergleichbare Daten sind in diesem Zusammenhang nicht verfügbar. Vergleichende Untersuchungen über Kurzzeitkultivierungen zeigen, dass die Leistungsfähigkeit des Tannenbaum-Photobioreaktors bezüglich der erzielten Parameter am installierten Standort, hinsichtlich der Produktivität der Mikroalgenbiomasse gesteigert werden kann. Im Rahmen der Versuche zur Langzeitkultivierung lag die maximal erzielbare Biomasseproduktivität jedoch nicht im Vordergrund. Vielmehr führten die Untersuchungen zum Verständnis einer gesicherten Prozessstabilität unter Anwendung der Steuermöglichkeit des Doppelschlauchsystems zur Temperierung und Aufrechterhaltung des erforderlichen Nährstoffniveaus und weiterer Wachstumsbedingungen. Die Molchbarkeit während der Kultivierung, d.h. ohne den Kultivierungsalgorithmus unterbrechen zu müssen, ermöglichte das Freihalten der Lichteintrittsflächen einerseits sowie eine Minimierung des Kontaminationsdruckes durch aufkeimenden Biobelag andererseits. Inwieweit eine Automatisierung des mechanischen Reinigungsprinzips, vor allen Dingen im Hinblick auf eine Vielzahl von Lichtkollektoren im großtechnischen Maßstab, möglich und praktikabel umsetzbar ist, sollte in zukünftigen Versuchsplänen Berücksichtigung finden.

Die erzielten Wachstumsraten in den Wintermonaten zeigen auf, dass eine Kultivierung an diesem Standort und in diesem Zeitraum nur mit natürlicher Lichtquelle und rein phototrophem Wachstum erfolgreich durchführbar, aber nicht effektiv im Sinne eines signifikanten Biomasseertrages realisierbar scheint. Der Hauptgrund hierfür liegt vor allen Dingen in den kurzen Tageslängen von teilweise weniger als 7,5 Stunden (am Standort der PBR). Demgegenüber steht eine Nachtphase, in diesem Fall, von 16,5 Stunden, in denen kein phototrophes Wachstum stattfindet. Aber auch das geringere Strahlungsniveau aufgrund der geringen Sonnenhöhe trägt zu niedrigen Lichtintensitäten, und folglich geringen Wachstumsraten, bei.

Eine stabile Nutzung der Photobioreaktoren über längere Zeiträume erfordert das Verständnis der Gesamtheit des Kultivierungssystems als Solches im Zusammenhang mit der unmittelbaren Umgebung. Aufgrund von äußeren Einflüssen wie schwankenden Luftdrücken, Niederschlag, Wind und weiterer Umwelteinflüsse kommt es grundsätzlich und unweigerlich zu wiederkehrenden und schwankenden Kontaminationsdrücken. Dieses Auftreten von Fremdorganismen bis hin zu Fraßfeinden bei der Verwendung von Monokulturen unter Freilandbedingungen über einen längeren Zeitraum ist in der Literatur hinlänglich bekannt. Es handelt sich hier vergleichsweise um die Herausforderung einer „Intensivlandwirtschaft“. Andere Ansätze, als den hier verwendeten zur Nutzung selbst-stabilisierender Kulturen, könnte die Nutzung einer Fruchtfolge, in diesem Fall Sortenfolge, vergleichbar mit dem Prinzip der traditionellen 3-Felderwirtschaft in der konventionellen Landwirtschaft, sein. Mit Hilfe des Ansatzes zu selbststabilisierenden Mikroalgenkulturen ist es in den durchgeführten Versuchen erfolgreich gelungen, eine Leitkultur von *Scenedesmus obliquus* stabil über einen Zeitraum von fast 2 Jahren zu kultivieren.

Es konnte aufgezeigt werden, dass eine erhebliche Steigerung der Biomasseproduktivität bezüglich rein phototrophen Wachstums an geographischen Standorten deutlich näher zu den Wendekreisen zu erwarten ist. Vor allen Dingen eine gleichmäßigere Verteilung der Globalstrahlung und dementsprechend um den Faktor 4 größere Globalstrahlungsintensität in den Wintermonaten gegenüber dem Standort der Reaktoren würde eine stabile Produktion von Mikroalgenbiomasse über 365 Tage erlauben. Zusammen mit den umgesetzten Maßnahmen im Zuge der Langzeitversuche an den Tannenbaum-PBR würde eine ganzjährige Standzeit bei stabiler Produktion durchführbar sein. Die erfolgreich umgesetzte saisonal-übergreifende Kultivierung mit Hilfe der Tannenbaum-Photobioreaktoren zeigt die Steuerbarkeit der Wachstumsbedingungen gegenüber den klimatischen Bedingungen am Standort eindeutig auf.

Abstract

Despite of its huge potential in the market of high value biomass, the large-scale production of microalgae at outdoor conditions still leads a niche existence. This work shows, that a stable cultivation of microalgae biomass at outdoor conditions in Central Europe (and potentially comparable latitudes) is practicable in an efficient way. Nevertheless, locations, which are closer to the tropics offer the potential for even higher biomass productivities because of higher occurring radiation profiles. The efficiency of capturing sun light of the light collectors is a crucial challenge in phototrophic growth processes. It has been shown, that, using the truncated cone of the the “Christmas tree” photobioreactor, is consistent light capture is ensured year-round, which is also demonstrated by the PCE values as well as the stable and defined biomass composition. There is no comparable data available in the literature. Comparative studies of short-term cultivations show the potential of increased biomass productivities of the “Christmas tree” photobioreactor at the installed location. Nevertheless, looking at the overall goal of stable growth conditions for a long-term cultivation, maximum values of productivity have not been focused on in the first place. In fact, the cultivation tests led to an understanding of an assured process stability by means of using the double wall tubing system for temperature control and maintaining of required nutrient levels as well as additional growth parameters. The use of the piggability of the microalgae suspension hose during the cultivation without having to interrupt the process, allowed the prevention of biofilms at light entry surfaces on the one hand as well as minimizing contamination pressure on the other hand. In future design of experiments, it should be focused on automation of the mechanical cleaning procedure, especially when it comes to a numbering-up of light collectors.

The achieved results on growth rates during winter months indicate, that a cultivation using natural light source and, thus, pure phototrophic growth, at this location is successfully feasible, but not effectively realizable in terms of significant biomass output. The main reason for this can be found in short day lengths of sometimes less than 7.5 hours (at location of the PBR) and long night times of, in this case, 16.5 hours with no phototrophic growth. Also, low radiation intensities because of low solar elevation lead to low growth rates.

The stable use of photobioreactors on a long-term basis requires the throughout understanding of the cultivation systems in combination with the immediate environment. Contamination pressure is occurring inevitably and recurring, because of environmental factors, like unstable air pressure, rainfall, wind and others. This occurrence of foreign organisms and predators, when using mono cultures at outdoor conditions over a long period, is well known in the literature. The overall process is basically dealing with the challenges of intensive agriculture. Other approaches, then the one dealing with self-stabilizing mixed cultures used here, could use a defined way of species rotation like the principle of three-field crop rotation

in conventional agriculture. Here, by means of using the approach of self-stabilizing microalgae cultures, it was possible to consistently cultivate a dominant culture of *Scenedesmus obliquus* over a period of almost 2 years.

It has been shown, that a tremendous increase in biomass productivity of phototrophic growth can be reached at geographic locations closer to the tropics. A more consistent distribution of solar radiation and a four times higher radiation intensity in winter months, compared to the location of the used reactors, would allow for a stable year-round production of microalgae biomass. In combination with the implemented measures at the “Christmas tree” PBR during long-term trials a stable year-round operation and stable production would be feasible. The successfully conducted seasonal-round cultivation by means of the “Christmas tree”-PBR shows the effective control of growth parameters with respect to environmental conditions.

8. Literaturverzeichnis

Abdulqader, G., Barsanti, L. and Tredici, M. R. (2000) 'Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu', *Journal of Applied Phycology*, 12(3–5), 493–498.

Acién Fernández, F.G., Fernández Sevilla, J.M., Molina Grima, E., 2012. Principles of photobioreactor design, in: Posten, C., Walter, C. (Eds.), *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. De Gruyter, Berlin, Boston, pp. 151–180.

Acién, F.G., Fernández, J.M., Magán, J.J., Molina, E., 2012. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances*, Special issue on ACB 2011 30, 1344–1353. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>

Adesanya, V.O., Davey, M.P., Scott, S.A., Smith, A.G., 2014. Kinetic modelling of growth and storage molecule production in microalgae under mixotrophic and autotrophic conditions. *Bioresource Technology* 157, 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.032>

Adl, S.M., Simpson, A.G.B., Farmer, M.A., Andersen, R.A., Anderson, O.R., Barta, J.R., Bowser, S.S., Brugerolle, G., Fensome, R.A., Fredericq, S., James, T.Y., Karpov, S., Kugrens, P., Krug, J., Lane, C.E., Lewis, L.A., Lodge, J., Lynn, D.H., Mann, D.G., McCourt, R.M., Mendoza, L., Moestrup, O., Mozley-Standridge, S.E., Nerad, T.A., Shearer, C.A., Smirnov, A.V., Spiegel, F.W., Taylor, M.F.J.R., 2005. The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *J. Eukaryot. Microbiol* 52, 399–451. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.2005.00053.x>

Adl, S.M., Simpson, A.G.B., Lane, C.E., Lukeš, J., Bass, D., Bowser, S.S., Brown, M.W., Burki, F., Dunthorn, M., Hampl, V., Heiss, A., Hoppenrath, M., Lara, E., le Gall, L., Lynn, D.H., McManus, H., Mitchell, E.A.D., Mozley-Stanridge, S.E., Parfrey, L.W., Pawlowski, J., Rueckert, S., Shadwick, L., Schoch, C.L., Smirnov, A., Spiegel, F.W., 2012. The Revised Classification of Eukaryotes. *J. Eukaryot. Microbiol.* 59, 429–514. <https://doi.org/10.1111/j.1550-7408.2012.00644.x>

Ahmed, A.B.A., Adel, M., Karimi, P., Peidayesh, M., 2014. Pharmaceutical, Cosmeceutical, and Traditional Applications of Marine Carbohydrates, in: Kim, S.-K. (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research, Marine Carbohydrates: Fundamentals and Applications, Part B*. Academic Press, London, pp. 197–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00010-X>

Barsanti, L., Gualtieri, P., 2014. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*, Second Edition. CRC Press.

Barsanti, L., Gualtieri, P., 2006. *Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL.

Batello, C., Marzot, M., Toure, A.H., 2004. The future is an ancient lake. FAO Interdepartmental working group on biological diversity for food and agriculture, Rom.

Beardall, J., Raven, J.A., 2013. Limits to Phototrophic Growth in Dense Culture: CO₂ Supply and Light, in: Borowitzka, M.A., Moheimani, N.R. (Eds.), *Algae for Biofuels and Energy, Developments in Applied Phycology*. Springer Netherlands, pp. 91–97.

Becker, E.W., 2013. Microalgae for Human and Animal Nutrition, in: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 461–503. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch25>

Becker, E.W., 2003. Microalgae for Aquaculture: The Nutritional Value of Microalgae for Aquaculture, in: Richmond, A. (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, pp. 380–391. <https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch21>

Becker, E.W., 1994. *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Bendix, J., Silva, B., Roos, K., Göttlicher, D.O., Rollenbeck, R., Nauß, T., Beck, E., 2010. Model parameterization to simulate and compare the PAR absorption potential of two competing plant species. *Int J Biometeorol* 54, 283–295. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0279-3>

Benemann, J. R., 2015. Open Algal Cultivation Systems for High Value Products and Biofuels: Historical and Current Developments. Vortrag. 8. Bundesalgenstammtisch der Dechema e.V. Garching (München): 07.09.2015

Benemann, J.R., 2013. Microalgae for Biofuels and Animal Feeds. *Energies* 6, 5869–5886. <https://doi.org/10.3390/en6115869>

Bernard, O., 2011. Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production. *Journal of Process Control, Special Issue: Selected Papers From Two Joint IFAC Conferences: 9th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems and the 11th International Symposium on Computer Applications in Biotechnology*, Leuven, Belgium, July 5–9, 2010. 21, 1378–1389. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.07.012>

Bernard, O., Rémond, B., 2012. Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth. *Bioresource Technology* 123, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.022>

BfR, 2016a. Anträge auf Zulassung neuartiger Lebensmittel gemäß Artikel 4 der Verordnung (EG) Nr. 258/97. Bundesinstitut für Risikobewertung. Stand: 30.08.2016

BfR, 2016b. Notifizierungen neuartiger Lebensmittel gemäß Artikel 5 der Verordnung (EG) Nr. 258/97. Bundesinstitut für Risikobewertung. Stand: 30.08.2016

Bligh, E.G., Dyer, W.J., 1959. A Rapid Method of Total Lipid Extraction and Purification. *Can. J. Biochem. Physiol.* 37, 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>

BMEL, 2012. Leitfaden zur Kennzeichnung von Einzelfuttermitteln und Mischfuttermitteln (nach Verordnung (EG) Nr. 767/2009), 2. Auflage, 24.04.2012 (No. 2. Auflage). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

Bolton, J.R., Hall, D.O., 1991. The maximum efficiency of photosynthesis. *Photochemistry and Photobiology* 53, 545–548. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1991.tb03668.x>

Borowitzka, M.A., 2016a. Systematics, Taxonomy and Species Names: Do They Matter?, in: Borowitzka, M.A., Beardall, J., Raven, J.A. (Eds.), *The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 655–681. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_24

Borowitzka, M.A., 2016b. Algal Physiology and Large-Scale Outdoor Cultures of Microalgae, in: Borowitzka, M.A., Beardall, J., Raven, J.A. (Eds.), *The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 601–652. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_23

- Borowitzka, M.A., 2013. High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *J Appl Phycol* 25, 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Borowitzka, M.A., 2005. Culturing Microalgae in Outdoor Ponds, in: Andersen, R.A. (Ed.), *Algal Culturing Techniques*. Elsevier Academic Press, Burlington, pp. 205–218.
- Borowitzka, M.A., 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* 70, 313–321. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8)
- Borowitzka, M.A., 1997. Microalgae for aquaculture: Opportunities and constraints. *Journal of Applied Phycology* 9, 393–401. <https://doi.org/10.1023/A:1007921728300>
- Borowitzka, M.A., Moheimani, Navid Reza, 2013. Open Pond Culture Systems, in: Borowitzka, M.A., Moheimani, Navid R. (Eds.), *Algae for Biofuels and Energy, Developments in Applied Phycology*. Springer Netherlands, Dordrecht ; New York, pp. 133–152.
- Brandt, S., 2015. Outdoor cultivation of *Chlorella vulgaris* - Assessment of yield influencing parameters and application as biogas substrate (Dissertation). Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- Brennan, L., Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae--A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Broneske, J., Grewe, C., 2017. 15 Jahre Glasrohr-Photobioreaktorentwicklung im industriellen Maßstab. Vortrag. 10. Bundesalgenstammtisch der DECHEMA e.V. Merseburg: 11.09.2017
- Burlew, J.S., 1953. *Algal culture: from laboratory to pilot plant*. Carnegie Institution of Washington Publication, Washington D.C.
- Butterwick, C., Heaney, S.I., Talling, J.F., 2005. Diversity in the influence of temperature on the growth rates of freshwater algae, and its ecological relevance. *Freshwater Biology* 50, 291–300. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01317.x>
- Cameron Coates, R., Trentacoste, E., Gerwick, W.H., 2013. Bioactive and Novel Chemicals from Microalgae, in: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 504–531. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch26>
- Carle, R., Schweiggert, R., 2016. *Handbook on Natural Pigments in Food and Beverages: Industrial Applications for Improving Food Color*. Woodhead Publishing, Duxford, UK.
- Carvalho, A.P., Meireles, L.A., Malcata, F.X., 2006. Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. *Biotechnol. Prog* 22, 1490–1506. <https://doi.org/10.1021/bp060065r>
- Carvalho, A.P., Silva, S.O., Baptista, J.M., Malcata, F.X., 2011. Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. *Appl Microbiol Biotechnol* 89, 1275–1288. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-3047-8>
- Carvalho, J.C.M., Matsudo, M.C., Bezerra, R.P., Ferreira-Camargo, L.S., Sato, S., 2014. Microalgae Bioreactors, in: Bajpai, R., Prokop, A., Zappi, M. (Eds.), *Algal Biorefineries*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 83–126. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7494-0_4
- Cheng-Wu, Z., Zmora, O., Kopel, R., Richmond, A., 2001. An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae). *Aquaculture* 195, 35–49.

- Chisti, Y., 2016. Large-Scale Production of Algal Biomass: Raceway Ponds, in: Bux, F., Chisti, Y. (Eds.), *Algae Biotechnology, Green Energy and Technology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 21–40. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12334-9_2
- Chisti, Y., 2012. Raceways-based Production of Algal Crude Oil, in: Posten, C., Walter, C. (Eds.), *Microalgal Biotechnology: Potential and Production*. DE GRUYTER, Berlin, Boston, pp. 113–144.
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294–306. <https://doi.org/doi: DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chmiel, H. (Ed.), 2011a. *Bioprozesstechnik*, 3. Auflage. ed. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Chmiel, H., 2011b. Bioreaktoren, in: Chmiel, H. (Ed.), *Bioprozesstechnik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, pp. 197–236. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2477-8_7
- Churchill, S.W., 1977. A comprehensive correlating equation for laminar, assisting, forced and free convection. *AIChE J.* 23, 10–16. <https://doi.org/10.1002/aic.690230103>
- Churchill, S.W., Chu, H.H.S., 1975. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18, 1049–1053. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90222-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90222-7)
- CIE 106/8 (Ed.), 1993. Terminology for photosynthetically active radiation for plants. Commission Internationale de l'éclairage (CIE), pp. 42–46.
- Credence Research, 2016. Beta Carotene Market Size, Share, Trend, Growth And Forecast To 2022 (No. 57751- 03–16). Credence Research.
- Critten, D.L., Bailey, B.J., 2002. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology* 112, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00057-6)
- Darzins, A., Pienkos, P., Edey, L., 2010. Current Status and Potential for Algal Biofuels Production (No. T39–T2). Golden.
- Davis, R., Aden, A., Pienkos, P.T., 2011. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy, Special Issue of Energy from algae: Current status and future trends* 88, 3524–3531. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.018>
- De Clerck, O., Guiry, M.D., Leliaert, F., Samyn, Y., Verbruggen, H., 2013. Algal taxonomy: a road to nowhere? *Journal of Phycology* 49, 215–225. <https://doi.org/10.1111/jpy.12020>
- de Vree, J.H., 2016. Outdoor production of microalgae (Dissertation). Wageningen Universität, Wageningen.
- Del Campo, J.A., Garc a-Gonz lez, M., Guerrero, M.G., 2007. Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 74, 1163–1174. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-0844-9>
- DIN 51721:2001-08, 2001. Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an Kohlenstoff und Wasserstoff.
- DIN 51722-1:1990-07, 1990. Prüfung fester Brennstoffe; Bestimmung des Stickstoffgehaltes; Halbmikro-Kjeldahl-Verfahren.

- DIN 51724-1:2012-07, 2012. Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Schwefelgehaltes - Teil 1: Gesamtschwefel.
- DIN 51900:2000-04, 2000. Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe - Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes.
- DIN EN 13346:2001-04, 2001. Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung von Spurenelementen und Phosphor - Extraktionsverfahren mit Königswasser.
- Dobrinski, P., Krakau, G., Vogel, A., 2010. Physik für Ingenieure. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- Dominguez, H., 2013. Functional Ingredients from Algae for Foods and Nutraceuticals. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition. ed. John Wiley and Sons Ltd, Hoboken.
- Dyhrman, S.T., 2016. Nutrients and Their Acquisition: Phosphorus Physiology in Microalgae, in: The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology. Springer, Cham, pp. 155–183. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_8
- EC, 2013. Guidance notes on the classification of food extracts with colouring properties, Version 1, 29.11.2013, 1-18.
- Ecke, M., Matthes, S., Salisch, M., Kleinert, C., Griehl, C., 2014. Kontaminationen in Mikroalgen-Massenkulturen. Vortrag. 7. Bundesalgenstammtisch der Dechema e.V. Köthen (Anhalt): 03.06.2014
- EFSA, 2012. Scientific Opinion on the re-evaluation of mixed carotenes (E 160a (i)) and beta-carotene (E 160a (ii)) as a food additive. EFSA Journal 10, 2593–2660. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2593>
- EG, 2017a. Applications under Regulation (EC) N° 258/97 of the European Parliament and of the Council.
- EG, 2017b. Notifications pursuant to Article 5 of regulation (EC) N° 258/97 of the European Parliament and the Council.
- EG, 2009a. Verordnung (EG) Nr. 767/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juli 2009 über das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln, L 229, 1-28, L 229.
- EG, 2009b. Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel, L 342, 59-209, L 342.
- EG, 2008. Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Lebensmittelzusatzstoffe, L 354, 16-33, L 354.
- EG, 2006. Verordnung (EG) Nr. 1924/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 2006 über nährwert- und gesundheitsbezogene Angaben über Lebensmittel, L 12, 1-16, L 12/3.
- EG, 2003. Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über Zusatzstoffe zur Verwendung in der Tierernährung, L 268, 29-43, L 268.

- EG, 2002. Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit, L 31, 1-24, L31.
- EG, 1997. Verordnung (EG) Nr. 258/97 des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 1997 über neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten, L 43, 1-7, L 43.
- Eicker, U., 2012. Solare Technologien für Gebäude. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Emig, G., Klemm, E., 2017. Chemische Reaktionstechnik, Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49268-0>
- Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M., Sijtsma, L., 2014. Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Escobedo, J.F., Gomes, E.N., Oliveira, A.P., Soares, J., 2011. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 36, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.018>
- EU, 2019a. European Union Register of Feed Additives pursuant to Regulation (EC) No 1831/2003 Annex I: List of additives, 10/2019 (276), 22.10.2019, 1-274.
- EU, 2019b. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2015/1415 of 20 August 2015 concerning the authorisation of astaxanthin as a feed additive for fish, crustaceans and ornamental fish, L 220/7, 21.8.2015.
- EU, 2013. Verordnung (EU) Nr. 68/2013 Der Kommission vom 16. Januar 2013 zum Katalog der Einzelfuttermittel, L 29, 1-64, L 29/1.
- European Chemicals Agency (ECHA), 2019. Triphenylphosphine - Substance Information - ECHA [WWW Document]. URL <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.009.124> (accessed 10.29.19).
- European Commission, 2016. Food Improvement Agents - EU Rules [WWW Document]. Food Safety - European Commission. URL https://ec.europa.eu/food/safety/food_improvement_agents/additives/eu_rules_en (accessed 10.20.19).
- European Medicines Agency, 2018. Adcetris [WWW Document]. European Medicines Agency. URL <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/adcetris> (accessed 10.29.19).
- FEFAC, 2017. Feed Materials Register (European Feed Manufacturers' Federation) [WWW Document]. URL <http://www.feedmaterialsregister.eu/index.php?page=Accueil> (accessed 2.22.17).
- Fernández, F.G.A., Sevilla, J.M.F., Grima, E.M., 2013. Photobioreactors for the production of microalgae. *Rev Environ Sci Biotechnol* 12, 131–151. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9307-6>
- Finkel, Z.V., Follows, M.J., Liefer, J.D., Brown, C.M., Benner, I., Irwin, A.J., 2016. Phylogenetic Diversity in the Macromolecular Composition of Microalgae. *PLOS ONE* 11, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155977>

- Fistric, S., 2004. Die Bestimmung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) für heterogene atmosphärische Bedingungen (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Fresewinkel, M., Rosello, R., Wilhelm, C., Kruse, O., Hankamer, B., Posten, C., 2014. Integration in microalgal bioprocess development: Design of efficient, sustainable, and economic processes. *Eng. Life Sci.* 14, 560–573. <https://doi.org/10.1002/elsc.201300153>
- FuttMV, 2016. Futtermittelverordnung. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Stand: 29.08.2016
- Geider, R., Roche, J.L., 2002. Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. *European Journal of Phycology* 37, 1–17. <https://doi.org/10.1017/S0967026201003456>
- Geier, S., Schmitz, H., Göschel, U., Eyerer, P., Ostrowicki, A., Woicke, N., Ulrich, C., Lutz, W., Eschl, J., Rüb, G., Keuerleber, M., Diemert, J., Hauk, J., Stieneker, A., Woidasky, J., Fischer, I., Kretschmer, K., Ober, L., Kohlert, C., Ganslmeier, S., Schlade, C., Schüle, H., Kurz, K., Tönnies, K.U., Elsner, P., Protte, R., Liebing, D., Rodríguez, A., Raisch, S.R., Dern, H.-J., Schlünken, S., Bräuning, R., König, A., 2012. Synthetische Kunststoffe, in: Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T. (Eds.), *Kunststoffe*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 115–1201.
- Giacomelli, G.A., Roberts, W.J., 1993. Greenhouse Covering Systems. *HortTechnology* 3, 50–58.
- Giordano, M., Prioretti, L., 2016. Sulphur and Algae: Metabolism, Ecology and Evolution, in: *The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology*. Springer, Cham, pp. 185–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_9
- Global Market Insights Inc., 2016a. Astaxanthin Market Size, Analysis | Industry Report, 2023 (No. GMI202). Global Market Insights Inc.
- Global Market Insights Inc., 2016b. Carotenoids Market Size, Share, Industry Forecast Report 2024 (No. GMI855). Global Market Insights Inc.
- Glück, B., 1990. Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. ed. Verlag Bauwesen, Berlin.
- Gnielinski, V., 2013a. G6 Querumströmte einzelne Rohre, Drähte und Profilylinder, in: VDI e. V. (Ed.), *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 817–818. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_47
- Gnielinski, V., 2013b. G7 Querumströmte einzelne Rohrreihen und Rohrbündel, in: VDI e. V. (Ed.), *VDI-Wärmeatlas*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 819–824. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_48
- Gnielinski, V., 2013c. G3 Durchströmte Rohrwendeln, in: *VDI-Wärmeatlas, VDI-Buch*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 801–804. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_44
- González López, C.V., García, M. del C.C., Fernández, F.G.A., Bustos, C.S., Chisti, Y., Sevilla, J.M.F., 2010. Protein measurements of microalgal and cyanobacterial biomass. *Bioresource Technology* 101, 7587–7591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.077>
- Grand View Research Inc., 2016. Beta-Carotene Market Size Projected To Reach USD 621 Million By 2024. Grand View Research Inc., San Francisco.

Grewe, C., 2019. Mikroalgenbiotechnologie - Stand und Perspektiven.

Grima, E.M., Camacho, F.G., Pérez, J.A.S., Fernández, F.G.A., Sevilla, J.M.F., 1996. Growth yield determination in a chemostat culture of the marine microalga *Isochrysis galbana*. *J Appl Phycol* 8, 529–534.

Guedes, A.C., Amaro, H.M., Malcata, F.X., 2011. Microalgae as Sources of Carotenoids. *Marine Drugs* 9, 625–644. <https://doi.org/10.3390/md9040625>

Guedes, A.C., Malcata, F.X., 2012. Nutritional value and uses of microalgae in aquaculture. *Aquaculture* 10, 59–78.

Guiry, M.D., 2012. How Many Species of Algae Are There? *J. Phycol.* 48, 1057–1063. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x>

Guiry, M.D., Guiry, G.M., 2011. Algaebase [WWW Document]. URL <http://www.algaebase.org/> (accessed 9.10.09).

Habib, M.A.B., Parvin, M., Huntington, T.C., Hasan, M.R., 2008. A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. No. 1034 (No. 1034), FAO Fisheries and Aquaculture Circular. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.

Hall, D.O., Fernández, A., G, F., Guerrero, E.C., Rao, K.K., Grima, E.M., 2003. Outdoor helical tubular photobioreactors for microalgal production: Modeling of fluid-dynamics and mass transfer and assessment of biomass productivity. *Biotechnology and Bioengineering* 82, 62–73. <https://doi.org/10.1002/bit.10543>, [10.1002/bit.10543](https://doi.org/10.1002/bit.10543)

Hall, D.O., Rao, K., 1999. Photosynthesis, 6th ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Hariskos, I., Posten, C., 2014. Biorefinery of microalgae – opportunities and constraints for different production scenarios. *Biotechnology Journal* 9, 739–752. <https://doi.org/10.1002/biot.201300142>

Harten, U., 2014. Physik, Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Hecky, R.E., Campbell, P., Hendzel, L.L., 1993. The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans. *Limnology and Oceanography* 38, 709–724. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.4.0709>

Hering, E., Martin, R., Stohrer, M., 2012. Physik für Ingenieure, Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Hinkens, D., 2013. Gravity flow tubular photobioreactor and photobioreactor farm. US20130023043 A1.

Holdmann, C., Schmidt-Staiger, U., Brinitzer, G., Frick, K., Hering, C., Hirth, T., 2016. Scale-up of a production process for starch-rich algal biomass. Vortrag. 20th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology NAROSSA. Magdeburg: 13.06.2016

Hulatt, C.J., Thomas, D.N., 2011. Energy efficiency of an outdoor microalgal photobioreactor sited at mid-temperate latitude. *Bioresource Technology* 102, 6687–6695. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.098>

- Huld, T., Müller, R., Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy* 86, 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>
- Isdepsky, A., 2015. Saline microalgae for biofuels: Outdoor culture from small-scale to pilot scale (Dissertation). Murdoch University, Murdoch.
- Jacobi, A., Lehr, F., Posten, C., Rosello, R., Steinweg, C., 2011. Photobioreaktor. DE102010021154 A1.
- JX Nippon ANCI, 2019. About Panaferd-AX [WWW Document]. JX Panaferd. URL <https://www.panaferd.com/about/> (accessed 10.28.19).
- Kappas, M., 2009. *Klimatologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Katsikis, N., 2014. Boost for light utilization in tubular PBR via optimized tube design. Vortrag. Algae Biomass Summit. San Diego: 01.10.2014
- Kirk, G., 2004. *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Kittas, C., Baille, A., 1998. Determination of the Spectral Properties of Several Greenhouse Cover Materials and Evaluation of Specific Parameters Related to Plant Response. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71, 193–202. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0310>
- Klan, H., Thess, A., 2013. F2 Wärmeübertragung durch freie Konvektion: Außenströmung, in: V, V. e (Ed.), *VDI-Wärmeatlas, VDI-Buch*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 757–764. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_38
- Koller, M., 2015. Design of Closed Photobioreactors for Algal Cultivation, in: Prokop, A., Bajpai, R.K., Zappi, M.E. (Eds.), *Algal Biorefineries*. Springer International Publishing, Cham, pp. 133–186. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_4
- Krauss, R.W., Palmer, C.Mervin., Oswald, W.J., Gataas, H.B., 1956. Photosynthesis in the Algae. *Ind. Eng. Chem.* 48, 1449–1458. <https://doi.org/10.1021/ie51400a025>
- Kraut, H., Meffert, M.-E., 1966. Über unsterile Großkulturen von *Scenedesmus obliquus*, *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen*. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.
- Kretzschmar, H.-J., Kraft, I., 2011. *Kleine Formelsammlung Technische Thermodynamik*, 4th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. <https://doi.org/10.3139/9783446428904>
- Kroumov, A., Gacheva, G., Iliev, I., Alexandrov, S., Pilarski, P., Petkov, G., 2013. Analysis of Sf/V Ratio of Photobioreactors Linked With Algal Physiology. *Genetics and Plant Physiology* 3, 55–64.
- Krull, R., Haarstrick, A., Hempel, D.C., 2014. Bioverfahrenstechnik, in: Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Eds.), *Dubbel*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 972–992. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0_90
- Kübler, M., Müller, A.K., 2014. Kunststoffe, in: Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Eds.), *Dubbel*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 281–296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0_37
- Kumar, K., Mishra, S.K., Choi, G.-G., Yang, J.-W., 2015. CO₂ Sequestration Through Algal Biomass Production, in: Das, D. (Ed.), *Algal Biorefinery: An Integrated Approach*. Springer International Publishing, Cham, pp. 35–57. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6_2

- Kuner, R., 2015. BEOBACHTERHANDBUCH (BHB) für Wettermeldestellen des synoptisch-klimatologischen Mess- und Beobachtungsnetzes (No. VuB 3 BHB), Vorschriften und Betriebsunterlagen Nr. 3. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Landsberg, J.J., Sands, P., 2010. *Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models*, 1st ed. Academic Press, London, UK.
- Laurens, L.M.L., 2017. State of Technology Review – Algae Bioenergy (No. 39). IEA Bioenergy, Golden.
- Laurens, L.M.L., Cooksey, K.E., Sears, J., Edwards, M., Lundquist, T., Behnke, C., Schultz, N., Howell, S., Clapper, G., Gardner, R., Slaby, E., Olivares, J., McCormick, R., Cattolico, R.A., 2015. *Industrial Algae Measurements* (No. Version 7). Algae Biomass Organization, Preston.
- Laurens, L.M.L., Dempster, T.A., Jones, H.D.T., Wolfrum, E.J., Van Wychen, S., McAllister, J.S.P., Rencenberger, M., Parchert, K.J., Gloe, L.M., 2012. Algal Biomass Constituent Analysis: Method Uncertainties and Investigation of the Underlying Measuring Chemistries. *Anal. Chem.* 84, 1879–1887. <https://doi.org/10.1021/ac202668c>
- Lechner, M.D., 2005. Polymers, in: Martiensen, W., Warlimont, H. (Eds.), *Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data*. Springer, Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 477–522. https://doi.org/10.1007/3-540-30437-1_7
- Lee, R.E., 2008. *Phycology*, 4th ed. Cambridge University Press, New York.
- Lee, Y.-K., Low, C.-S., 1993. Productivity of outdoor algal cultures in unstable weather conditions. *Biotechnol. Bioeng.* 41, 1003–1006. <https://doi.org/10.1002/bit.260411012>
- Lee, Y.-K., Low, C.-S., 1991. Effect of photobioreactor inclination on the biomass productivity of an outdoor algal culture. *Biotechnol. Bioeng.* 38, 995–1000. <https://doi.org/10.1002/bit.260380906>
- Lehr, F., Morweiser, M., Rosello Sastre, R., Kruse, O., Posten, C., 2012. Process development for hydrogen production with *Chlamydomonas reinhardtii* based on growth and product formation kinetics. *Journal of Biotechnology*, Photosynthetic microorganisms for bio-fuel production from sun light 162, 89–96.
- Letcher, P.M., Lopez, S., Schmieder, R., Lee, P.A., Behnke, C., Powell, M.J., McBride, R.C., 2013. Characterization of *Amoebophilidium protococcarum*, an Algal Parasite New to the Cryptomycota Isolated from an Outdoor Algal Pond Used for the Production of Biofuel. *PLoS ONE* 8, e56232.
- LFGB, 2016. *Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB)*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Stand: 24.11.2016
- Li, J., Zhu, D., Niu, J., Shen, S., Wang, G., 2011. An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnology Advances* 29, 568–574.
- Liljequist, G.H., Cihak, K., 1983. *Allgemeine Meteorologie*, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Lin, L.P., 2005. *Chlorella: Its Ecology, Structure, Cultivation, Bioprocess and Application*. Yi Hsien Publishing Company, Taipei, Taiwan.
- Lindner, H., 2001. *Physik für Ingenieure*, 16th ed. Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig.

- Liu, J., Chen, F., 2014. Biology and Industrial Applications of *Chlorella*: Advances and Prospects, in: Posten, C., Chen, S.F. (Eds.), *Microalgae Biotechnology, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer International Publishing, pp. 1–35.
- Lloyd, N.D.H., Canvin, D.T., Culver, D.A., 1977. Photosynthesis and Photorespiration in Algae. *PLANT PHYSIOLOGY* 59, 936–940. <https://doi.org/10.1104/pp.59.5.936>
- Lourenço, S., Barbarino, E., Lavín, P., Lanfer Marquez, U., Aidar, E., 2004. Distribution of intracellular nitrogen in marine microalgae: Calculation of new nitrogen-to-protein conversion factors. *European Journal of Phycology* 39, 17–32. <https://doi.org/10.1080/0967026032000157156>
- Lundquist, T., Woertz, I., Quinn, N., Benemann, J., 2010. A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production. University of California, Berkeley.
- Masojídek, J., Torzillo, G., Koblížek, M., 2013. Photosynthesis in Microalgae, in: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 21–36. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch2>
- Mata, T.M., Martins, A.A., Caetano, Nidia.S., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Matthes, S., Matschke, M., Cotta, F., Grossmann, J., Griehl, C., 2015. Reliable production of microalgae biomass using a novel microalgae platform. *J Appl Phycol* 27, 1755–1762. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0502-4>
- Meeus, J., 1998. *Astronomical Algorithms*, 2nd ed. Atlantic Books, Richmond, Va.
- Melis, A., 2009. Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. *Plant Science* 177, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.06.005>
- Milledge, J.J., 2012. Microalgae - commercial potential for fuel, food and feed. *Food Science & Technology* 26, 28–30.
- Milledge, J.J., 2011. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 10, 31–41. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9214-7>
- Mironova, L.N., Gradusova, S.A., 2012. Measurements of the refractometric characteristics of optical materials in the 248–5000-nm spectral region. *J. Opt. Technol., JOT* 79, 112–115. <https://doi.org/10.1364/JOT.79.000112>
- Mishra, S.R., 2004. *Photosynthesis in Plants*. Discovery Publishing House, New Dehli, India.
- Moheimani, N. R., Borowitzka, M.A., Isdepsky, A., Sing, S.F., 2013. Standard Methods for Measuring Growth of Algae and Their Composition, in: Borowitzka, M.A., Moheimani, Navid R. (Eds.), *Algae for Biofuels and Energy, Developments in Applied Phycology*. Springer Netherlands, Cham, pp. 265–284.
- Molina, E., Fernández, J., Ación, F.G., Chisti, Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology* 92, 113–131. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00353-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00353-4)
- Molina Grima, E., Fernández, F.G.A., Camacho, F.G., Rubio, F.C., Chisti, Y., 2000. Scale-up of tubular photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 12, 355–368. <https://doi.org/10.1023/A:1008110819338>

- Molina Grima, E., Sánchez Pérez, J., Garcia Camacho, F., Garcia Sanchez, J., Ación Fernández, F., López Alonso, D., 1994. Outdoor culture of *Isochrysis galbana* ALII-4 in a closed tubular photobioreactor. *Journal of biotechnology* 37, 159–166.
- Morita, M., Watanabe, Y., Saiki, H., 2000. High photosynthetic productivity of green microalga *Chlorella sorokiniana*. *Appl Biochem Biotechnol* 87, 203–218.
- Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., Posten, C., 2010. Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production. *Applied Microbiology and Biotechnology* 87, 1291–1301. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2697-x>
- Mueller-Rees, C., Pfaller, R., Walter, C., Cotta, F., 2011. Tubular photobioreactor. WO2011048108 A2.
- Mussgnug, J.H., Klassen, V., Schlüter, A., Kruse, O., 2010. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of Biotechnology* 150, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.07.030>
- Naumann, C., Bassler, R., Seibold, R., Barth, C., 1976. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln (Band III), in: *Das VDLUFA Methodenbuch*. VDLUFA Verlag, Darmstadt, p. 2190.
- Ogbonna, J.C., Tanaka, H., 2000. Light requirement and photosynthetic cell cultivation – Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 12, 207–218. <https://doi.org/10.1023/A:1008194627239>
- Ogbonna, J.C., Yada, H., Tanaka, H., 1995. Light supply coefficient: A new engineering parameter for photobioreactor design. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 80, 369–376. [https://doi.org/10.1016/0922-338X\(95\)94206-7](https://doi.org/10.1016/0922-338X(95)94206-7)
- Olaizola, M., 2000. Commercial production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using 25,000-liter outdoor photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 12, 499–506.
- Onwudili, J.A., Lea-Langton, A.R., Ross, A.B., Williams, P.T., 2013. Catalytic hydrothermal gasification of algae for hydrogen production: composition of reaction products and potential for nutrient recycling. *Bioresour. Technol.* 127, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.020>
- Panis, G., Carreon, J.R., 2016. Commercial astaxanthin production derived by green alga *Haematococcus pluvialis*: A microalgae process model and a techno-economic assessment all through production line. *Algal Research* 18, 175–190.
- Parlevliet, D., Moheimani, N.R., 2014. Efficient conversion of solar energy to biomass and electricity. *Aquat Biosyst* 10, 4. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-4>
- Paterson, R., Lima, N. (Eds.), 2017. *Bioprospecting: Success, Potential and Constraints, Topics in Biodiversity and Conservation*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47935-4>
- Pearson, S., Wheldon, A.E., Hadley, P., 1995. Radiation Transmission and Fluorescence of Nine Greenhouse Cladding Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 62, 61–69. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1063>
- Pedrotti, F., Predrotti, L., Bausch, W., Schmidt, H., 2005. *Optik für Ingenieure*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Pessarakli, M., Mohammad, P., Pessarakli, P., 2005. *Handbook of Photosynthesis, Second Edition, 2. Auflage*. ed. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Pinevich, A., Gromov, B., Mamkaeva, K., Nasonova, E., 1997. Study of Molecular Karyotypes in *Amoebophilidium protococcarum*, the Endotrophic Parasite of Chlorophycean alga *Scenedesmus*. *Curr Microbiol* 34, 122–126.
- Pirt, S.J., 1982. Microbial photosynthesis in the harnessing of solar energy. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 32, 198–202. <https://doi.org/10.1002/jctb.5030320124>
- Pirt, S.J., Lee, Y.-K., Richmond, A., Pirt, M.W., 1980. The photosynthetic efficiency of *Chlorella* biomass growth with reference to solar energy utilisation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 30, 25–34.
- Pirt, S.J., Lee, Y.K., Walach, M.R., Pirt, M.W., Balyuzi, H.H.M., Bazin, M.J., 1983. A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 33, 35–58. <https://doi.org/10.1002/jctb.280330105>
- Pisanello, D., 2014. EU Regulations on Chemicals in Foods. Springer International Publishing, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03434-8_2
- Pollet, I.V., Pieters, J.G., 2000. SE—Structures and Environment: Condensation and Radiation Transmittance of Greenhouse Cladding Materials, Part 3: Results for Glass Plates and Plastic Films. *Journal of Agricultural Engineering Research* 77, 419–428. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0628>
- Poprawe, R., 2005. Lasertechnik für die Fertigung, VDI-Buch. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Posten, C., 2018. Fotobioreaktoren, in: Chmiel, H., Weuster-Botz, D. (Eds.), *Bioprozesstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 188–196. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54042-8_6
- Posten, C., 2016. Mikroalgen-Biotechnologie Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele. Vortrag. DECHEMA-Frühjahrstagung der Biotechnologen. Frankfurt: 01.03.2016
- Posten, C., 2012. Design and Performance Parameters of Photobioreactors. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 38–45.
- Posten, C., 2011. Photobioreaktoren, in: Chmiel, H. (Ed.), *Bioprozesstechnik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, pp. 217–222. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2477-8_7
- Posten, C., 2009. Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences* 9, 165–177. <https://doi.org/10.1002/elsc.200900003>
- Posten, C., Wilhelm, C., 2016. Aquatische Biomasse, in: Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Eds.), *Energie aus Biomasse*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 249–272. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47438-9_5
- Pulz, O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology* 57, 287–293. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>
- Pulz, O., Broneske, J., Waldeck, P., 2013. IGV GmbH Experience Report, Industrial Production of Microalgae Under Controlled Conditions: Innovative Prospects, in: Richmond, A., Qiang Hu (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 445–460. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch24>
- Pulz, O., Gross, W., 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol* 65, 635–648. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1647-x>

- Quinn, J.C., Turner, C.W., Bradley, T.H., 2012a. Scale-Up of flat plate photobioreactors considering diffuse and direct light characteristics. *Biotechnology and Bioengineering* 109, 363–370. <https://doi.org/10.1002/bit.23324>, 10.1002/bit.23324
- Quinn, J.C., Yates, T., Douglas, N., Weyer, K., Butler, J., Bradley, T.H., Lammers, P.J., 2012b. *Nannochloropsis* production metrics in a scalable outdoor photobioreactor for commercial applications. *Bioresource Technology* 117, 164–171.
- Raes, E.J., Isdepsky, A., Muylaert, K., Borowitzka, M.A., Moheimani, N.R., 2014. Comparison of growth of *Tetraselmis* in a tubular photobioreactor (Biocoil) and a raceway pond. *J Appl Phycol* 26, 247–255.
- Raven, John A., Giordano, M., 2016. Combined Nitrogen, in: Borowitzka, M.A., Beardall, J., Raven, J. A. (Eds.), *The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology*. Springer, Cham, pp. 143–154. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_7
- Redfield, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water, in: Hill, M.N. (Ed.), *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. Wiley Interscience, New York, pp. 26–77.
- Reitmayer, H., 2000. Quantifizierung des spektralen Angebotes photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) innerhalb eines Fichten - Buchen - Mischbestandes (Dissertation). Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Richardson, K., Beardall, J., Raven, J.A., 1983. Adaptation of Unicellular Algae to Irradiance: An Analysis of Strategies. *New Phytologist* 93, 157–191. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1983.tb03422.x>
- Richmond, A., 2013. Biological Principles of Mass Cultivation of Photoautotrophic Microalgae, in: Richmond, A., Qiang Hu (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 169–204. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch11>
- Richmond, A., Boussiba, S., Vonshak, A., Kopel, R., 1993. A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *J Appl Phycol* 5, 327–332. <https://doi.org/10.1007/BF02186235>
- Robinson, L.F., Morrison, A.W., Bamforth, M.R., 1988. Improvements relating to biosynthesis. EP 0261872 A2.
- Roetzel, W., Spang, B., 2013a. C2 Wärmedurchgang, in: *VDI-Wärmeatlas, VDI-Buch*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 75–84. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_6
- Roetzel, W., Spang, B., 2013b. C3 Typische Werte von Wärmedurchgangskoeffizienten, in: V, V. e (Ed.), *VDI-Wärmeatlas, VDI-Buch*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 85–90.
- Roquette Klötze GmbH & Co. KG, 2017. 100% *Chlorella vulgaris* | CHLORELLA Pulver [WWW Document]. URL http://www.algomed.de/shop/product_info.php/info/p8_CHLORELLA-Pulver.html (accessed 3.2.17).
- Rosales-Mendoza, S., 2016. *Algae-Based Biopharmaceuticals*. Springer International Publishing, Cham.
- Rosello Sastre, R., Posten, C., 2010. Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1925–1939. <https://doi.org/10.1002/cite.201000124>

- Rubio, F.C., Fernández, F.G.A., Pérez, J.A.S., Camacho, F.G., Grima, E.M., 1999. Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnol. Bioeng.* 62, 71–86. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990105\)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990105)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T)
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2015. Hochtransparente Weißgläser in Forschungsgewächshäusern optimieren das Pflanzenwachstum - Der Sonne entgegen (Pressemitteilung). Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, Stolberg. Stand: Mai 2015
- Satyanarayana, K.G., Mariano, A.B., Vargas, J.V.C., 2011. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. *Int. J. Energy Res.* 35, 291–311. <https://doi.org/10.1002/er.1695>
- Schirmer, M., Posten, C., 2016. Chapter Three - Modeling of Microalgae Bioprocesses, in: Legrand, J. (Ed.), *Advances in Chemical Engineering, Photobioreaction Engineering*. Academic Press, pp. 151–184. <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.12.001>
- Schmid-Staiger, U., Schließmann, U., Derwenskus, F., 2016. Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von Algenprodukten. Vortrag. 9. Bundesalgenstammtisch der Dechema e.V. Jülich: 27.09.2016
- SCHOTT Northamerica Inc. (Ed.), 2017. Tubular Glass Photobioreactors. 21Aus01.10.2017KW
- Schreiber, C., Behrendt, D., Huber, G., Pfaff, C., Widzowski, J., Ackermann, B., Müller, A., Zachleder, V., Moudříková, Š., Mojzeš, P., Schurr, U., Grobbelaar, J., Nedbal, L., 2017. Growth of algal biomass in laboratory and in large-scale algal photobioreactors in the temperate climate of western Germany. *Bioresource Technology* 234, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.028>
- Schuessler, S., 2015. How transparent PVC-U turns green to produce food and fuel. Vortrag. TEPPFA Forum 2015. Brüssel. 2015
- Schuessler, S., Gaul, I., Kuppelmaier, H., Proper, G., 2012. Polymer composition for photobioreactors. US20120184027A1.
- Schügerl, K., Sittig, W., 1994. Bioreaktoren, in: Präve, P., Faust, U., Sittig, W., Sukatsch, D.A. (Eds.), *Handbuch Der Biotechnologie*. R. Oldenbourg Verlag, München, pp. 251–306.
- Schwank, O.F., 1984. Einfluss von Strahlung und Temperatur auf das Wachstum von Weissklee (*Trifolium repens* L.) in verschiedenen bewirtschafteten Naturwiesen. Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- Scotter, M.J., 2015. *Colour Additives for Foods and Beverages*. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Setlik, I., 1968. Growth and photosynthetic characteristics of algae, in: Necas, J., Lhotský, O. (Eds.), *Annual report of the Laboratory of Experimental Algology and Department of Applied Algology for the Year 1967*. Trebon, pp. 71–128.
- Sierra, E., Acién, F.G., Fernández, J.M., García, J.L., González, C., Molina, E., 2008. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal* 138, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.004>
- Silva, T.L. da, Reis, A., 2015. Scale-up Problems for the Large Scale Production of Algae, in: Das, D. (Ed.), *Algal Biorefinery: An Integrated Approach*. Springer International Publishing, Cham, pp. 125–149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6_6

- Slocombe, S., Benemann, J.R. (Eds.), 2016. *Microalgal Production for Biomass and High-Value Products*. CRC Press, New York, NY. <https://doi.org/10.1201/b19464>
- Soeder, C.J., 1971. Mikroalgenkultur im technischen Maßstab. *Biologie in unserer Zeit* 1, 133–142. <https://doi.org/10.1002/biuz.19710010502>
- Sparrow Jr., F.K., 1960. *Aquatic Phycomycetes*, 2. Auflage. ed. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Spiegel, M., Noordam, M.Y., Fels-Klerx, H.J., 2013. Safety of Novel Protein Sources (Insects, Microalgae, Seaweed, Duckweed, and Rapeseed) and Legislative Aspects for Their Application in Food and Feed Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12, 662–678. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12032>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A., 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 101, 87–96. <https://doi.org/doi:DOI:10.1263/jbb.101.87>
- Stackhouse Jr., P.W., 2017. Atmospheric Science Data Center NASA [WWW Document]. NASA Surface meteorology and Solar Energy: Global Data Sets. URL <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/global.cgi> (accessed 1.5.17).
- Stephan, P., Stephan, K., 2014. Wärmeübertragung, in: Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Eds.), *Dubbel*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 184–191. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38891-0_32
- Sterner, R.W., Andersen, T., Elser, J.J., Hessen, D.O., Hood, J.M., McCauley, E., Urabe, J., 2008. Scale-dependent carbon:nitrogen:phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography* 53, 1169–1180. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.1169>
- Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy* 81, 1295–1305. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>
- Tamiya, H., 1957. Mass Culture of Algae. *Annual Review of Plant Physiology* 8, 309–334. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.08.060157.001521>
- They, N.H., Amado, A.M., Cotner, J.B., 2017. Redfield Ratios in Inland Waters: Higher Biological Control of C:N:P Ratios in Tropical Semi-arid High Water Residence Time Lakes. *Front Microbiol* 8, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01505>
- Ting, K.C., Giacomelli, G.A., 1987. Solar photosynthetically active radiation transmission through greenhouse glazings. *Energy in Agriculture* 6, 121–132. [https://doi.org/10.1016/0167-5826\(87\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0167-5826(87)90010-6)
- Tipler, P.A., Mosca, G., 2015. *Physik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Torzillo, G., Zittelli, G.C., 2015. Tubular Photobioreactors, in: Prokop, A., Bajpai, R.K., Zappi, M.E. (Eds.), *Algal Biorefineries*. Springer International Publishing, pp. 187–212. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_5
- Tredici, M., Rodolfi, L., 2004. Reactor for industrial culture of photosynthetic micro-organisms. WO 2004074423 A2.
- Tredici, M.R., 2004. Mass Production of Microalgae: Photobioreactors, in: Richmond, A. (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, pp. 178–214.

- Tredici, M.R., Zittelli, G.C., 1998. Efficiency of sunlight utilization: Tubular versus flat photobioreactors. *Biotechnol. Bioeng.* 57, 187–197. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980120\)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980120)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J)
- Tsubo, M., Walker, S., 2005. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at Bloemfontein, South Africa. *Theor. Appl. Climatol.* 80, 17–25. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0080-5>
- VDI e. V. (Ed.), 2013. VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage. ed. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3>
- VDLUFA Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, 1991. Die Untersuchung von Böden (Band I), in: Das VDLUFA Methodenbuch. VDLUFA Verlag, Darmstadt, p. 1655.
- Verdelho Viera, V., 2015. Overview of production of value added products, Markets and producers in the EU. Vortrag. 8. Bundesalgenstammtisch der DECHEMA e.V. Pullach (München): 07.09.2015
- Vigani, M., Parisi, C., Rodríguez-Cerezo, E., Barbosa, M.J., Sijtsma, L., Ploeg, M., Enzing, C., 2015. Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU. *Trends in Food Science & Technology* 42, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.004>
- von Böckh, P., Wetzal, T., 2014. Wärmeübertragung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37731-0>
- von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, Chr., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., 2000. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75, 1–16. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0502>
- Voort, M.P.J. van der, Vulsteke, E., Visser, C.L.M. de, 2015. Macro-economics of algae products : Output WP2A7.02. EnAlgae Swansea University.
- Wagner, I., Braun, M., Slenzka, K., Posten, C., 2015. Photobioreactors in Life Support Systems, in: Posten, C., Chen, S.F. (Eds.), *Microalgae Biotechnology, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 143–184.
- Walker, D.A., 2009. Biofuels, facts, fantasy, and feasibility. *J Appl Phycol* 21, 509–517. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9446-5>
- Wang, H.-M.D., Chen, C.-C., Huynh, P., Chang, J.-S., 2015. Exploring the potential of using algae in cosmetics. *Bioresource Technology, Advances in biofuels and chemicals from algae* 184, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.001>
- Wang, J., Liu, J., Liu, T., 2015. The difference in effective light penetration may explain the superiority in photosynthetic efficiency of attached cultivation over the conventional open pond for microalgae. *Biotechnol Biofuels* 8. 49
- Watanabe, Y., de la Noüe, J., Hall, D.O., 1995. Photosynthetic performance of a helical tubular photobioreactor incorporating the cyanobacterium *Spirulina platensis*. *Biotechnol. Bioeng.* 47, 261–269.
- Watanabe, Y., Hall, D.O., 1996. Photosynthetic CO₂ conversion technologies using a photobioreactor incorporating microalgae - energy and material balances -. *Energy Conversion*

and Management, Proceedings of the International Energy Agency Greenhouse Gases: Mitigation Options Conference 37, 1321–1326. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00340-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00340-1)

Weißbach, W., 2012. Werkstoffkunde. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8318-6>

Whitman, P., E. Hahn, D., Soules, T., A. Norton, M., Dixit, S., E. Donohue, E., A. Folta, J., G. Hollingsworth, W., Maienschein-Cline, M., 2002. Performance of thin borosilicate glass sheets at 351 nm. *Proc SPIE* 5647. <https://doi.org/10.1117/12.585946>

Wolf, J., Stephens, E., Steinbusch, S., Yarnold, J., Ross, I.L., Steinweg, C., Doebbe, A., Krolovitsch, C., Müller, S., Jakob, G., Kruse, O., Posten, C., Hankamer, B., 2016. Multifactorial comparison of photobioreactor geometries in parallel microalgae cultivations. *Algal Research* 15, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.018>

Zachleder, V., Bišová, K., Vítová, M., 2016. The Cell Cycle of Microalgae, in: Borowitzka, M.A., Beardall, J., Raven, J.A. (Eds.), *The Physiology of Microalgae, Developments in Applied Phycology*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24945-2_1

Zahoransky, R.A., 2009. *Energietechnik*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

ZDL, 2014. Positivliste für Einzelfuttermittel, Normenkommission für Einzelfuttermittel im Zentrallausschuss der deutschen Landwirtschaft (No. 11). Berlin. August 2014

Zhu, X.-G., Long, S.P., Ort, D.R., 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology* 19, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>

Zittelli, Graziella C., Biondi, N., Rodolfi, L., Tredici, M.R., 2013. Photobioreactors for Mass Production of Microalgae, in: Richmond, A.R., Qiang Hu (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture*. Wiley-Blackwell, Somerset, GB, pp. 225–266.

Zittelli, Graziella Chini, Rodolfi, L., Bassi, N., Biondi, N., Tredici, M.R., 2013. Photobioreactors for Microalgal Biofuel Production, in: Borowitzka, M.A., Moheimani, N.R. (Eds.), *Algae for Biofuels and Energy, Developments in Applied Phycology*. Springer Netherlands, Cham, pp. 115–131.

9. Anhang

A-1 Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland (1981 – 2010)

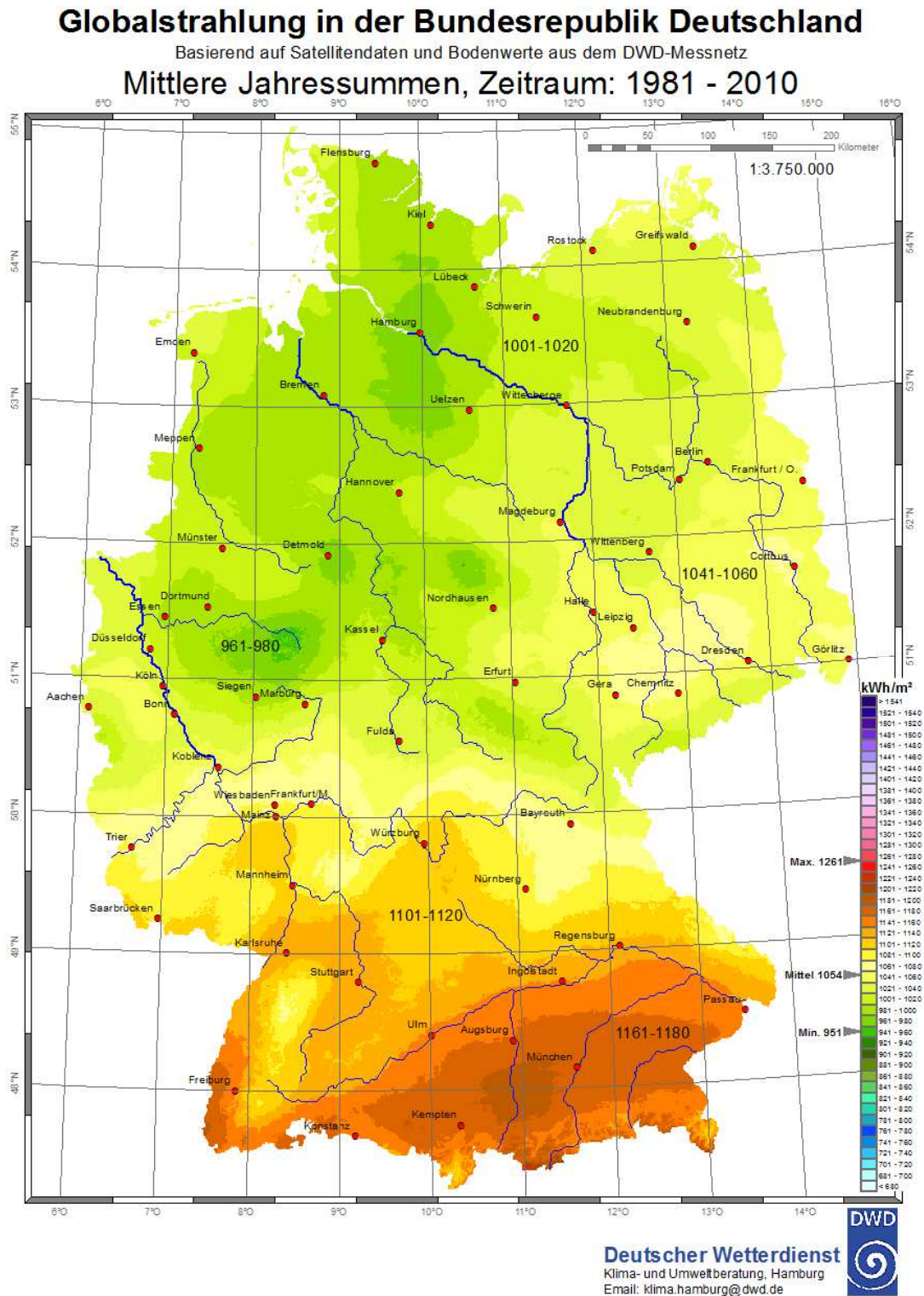


Abbildung 9-1 - GHI Deutschland DWD

(http://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html?nn=16102)

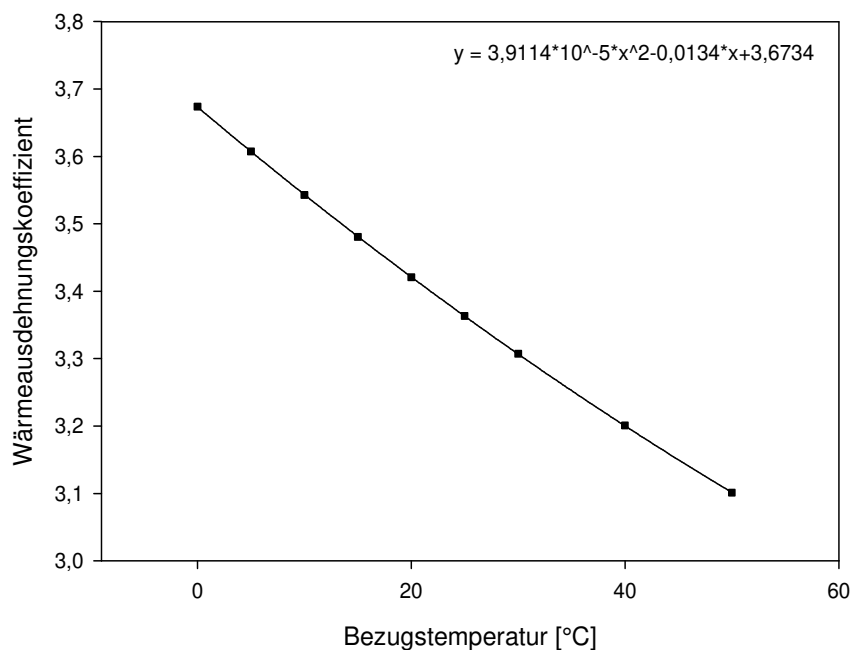
A-2 Berechnungsgrößen für Wärmeübertragung

Isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient β (als reales Fluid) zur Berechnung der Rayleigh-Zahl

Zur Vereinfachung erfolgt die Berechnung anstatt der Wandtemperatur mit der Suspensionstemperatur der äußeren Doppelschlauchkammer.

Tabelle 9-1 - Auszug zur Temperaturabhängigkeit für β bei atmosphärischem Druck (Kretschmar and Kraft, 2011)

Bezugstemperatur [°C]	β
0	3,67396
5	3,60725
10	3,54293
15	3,48088
20	3,42099
25	3,36313
30	3,30721
40	3,2008
50	3,10107



Die Temperaturabhängigkeit der Rayleigh-Zahl wird durch Nutzung der quadratischen Gleichung umgesetzt.

A-3 Übersicht Trinkwasserqualität Köthen (Trinkwasserquelle: Wasserwerk Köthen-Süd) und Medienzusammensetzung Labor

Tabelle 9-2 - Jahresmittelwerte allgemeiner Parameter der Trinkwasserqualität (Quelle: MIDEWA (<https://www.midewa.de/trinkwasserqualitaet/>), letzte Spalte: eigene Analytik des direkten Leitungsanschlusses mittels Ionenchromatographie)

Parameter	Einheit	2010	2011	2012	Trinkwasser (Leitung) 04.10.2012
Gesamthärte	°dH	19,6	22,6	21,4	
Härtebereich	-	hart	hart	hart	
pH	-	7,44	7,46	7,44	
Magnesium	mg l ⁻¹	21,8	23,8	24,8	26,9
Kalium	mg l ⁻¹	2,8	2	1,9	2,4
Natrium	mg l ⁻¹	19,7	19,4	19,3	20,3
Calcium	mg l ⁻¹	103,7	121,8	111,6	117,6
Chlorid	mg l ⁻¹	45,3	49,3	49,2	55,2
Nitrat	mg l ⁻¹	16,3	18,3	16,7	15,7
Sulphat	mg l ⁻¹	189	215	194	230,7

Tabelle 9-3 - Übersicht zur Zusammensetzung des Setlik-Mediums für Labor-Kultivierungen (angepasst an (Setlik, 1968))

Parameter	finale Konzentration [mg l ⁻¹]
KNO ₃	2.020,00
MgSO ₄ * 7H ₂ O	86,60
KH ₂ PO ₄	106,70
K ₂ HPO ₄	91,00
Ammoniumeisen-(III)-citrat	14,15
Ca(NO ₃) ₂ * 4 H ₂ O	10,00

H_3BO_3	3,09
$\text{MnSO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	1,20
$\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	2,35
$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	1,24
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	1,43
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	1,84

A-4 Berechnung der Schattenwurffläche $A_S(\theta)$ in Abhängigkeit des Sonnenhöhenwinkels θ

$$A_S(\theta) = A_{S1} + A_{S2}(\theta) + A_{S3} \quad \text{Gl. 9-1}$$

$$A_{S1} = \frac{1}{2} * \frac{\pi}{4} * D_{PBR,oben}^2 \quad \text{Gl. 9-2}$$

$$A_{S2}(\theta) = \frac{1}{2} * l_S(\theta) * (D_{PBR,oben} + D_{PBR,unten}) \quad \text{Gl. 9-3}$$

$$l_S(\theta) = l_{S1}(\theta) + l_{S2} \quad \text{Gl. 9-4}$$

$$l_{S1}(\theta) = \frac{h_{PBR}}{\tan \theta} - \frac{D_{PBR,oben}}{2} \quad \text{Gl. 9-5}$$

$$l_{S2} = \frac{D_{PBR,oben}}{2} \quad \text{Gl. 9-6}$$

$$A_{S3} = \frac{1}{2} * \frac{\pi}{4} * D_{PBR,unten}^2 \quad \text{Gl. 9-7}$$

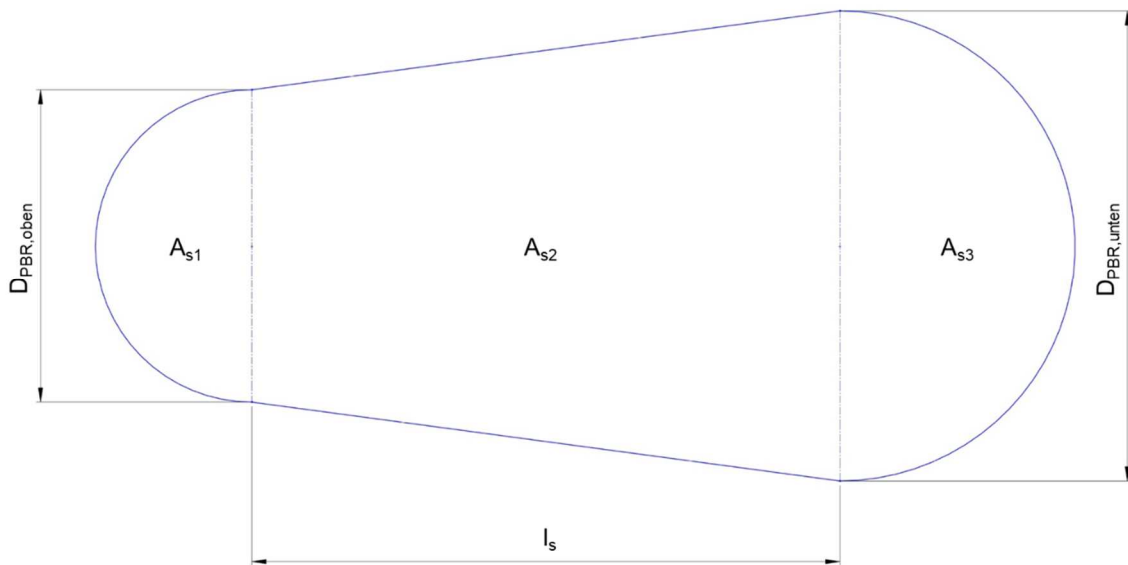


Abbildung 9-2 - Draufsicht der abstrahierten Schattenwurffläche des Tannenbaum-Lichtkollektors und Bezeichnung der Berechnungshilfsgrößen

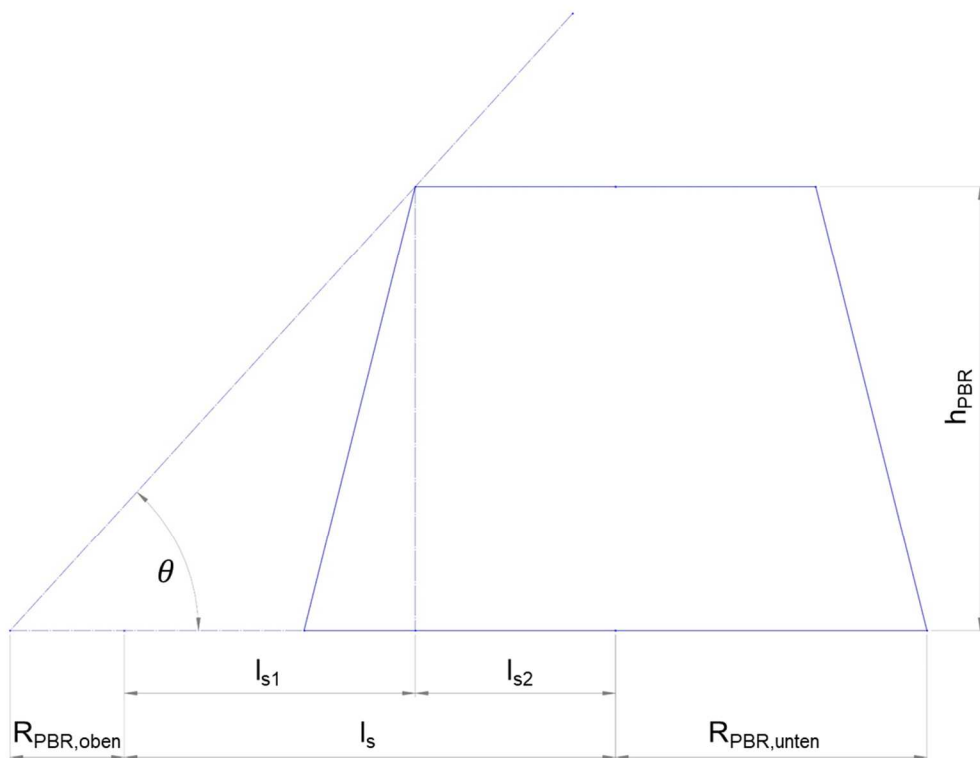
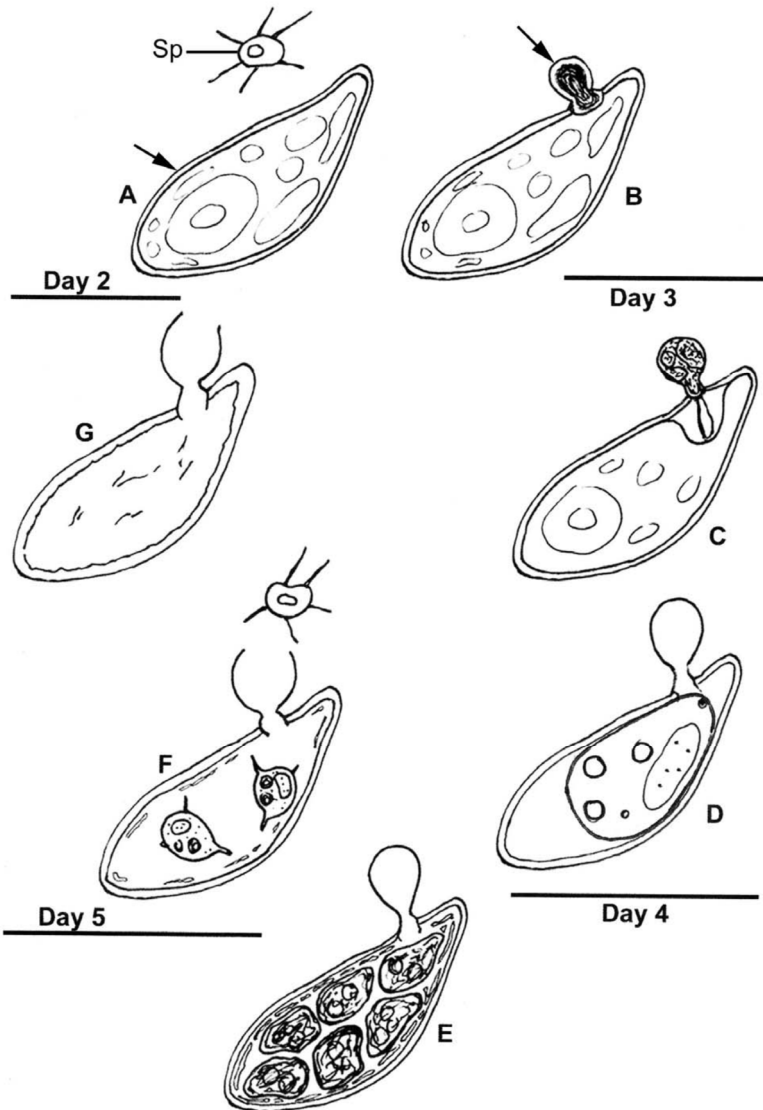
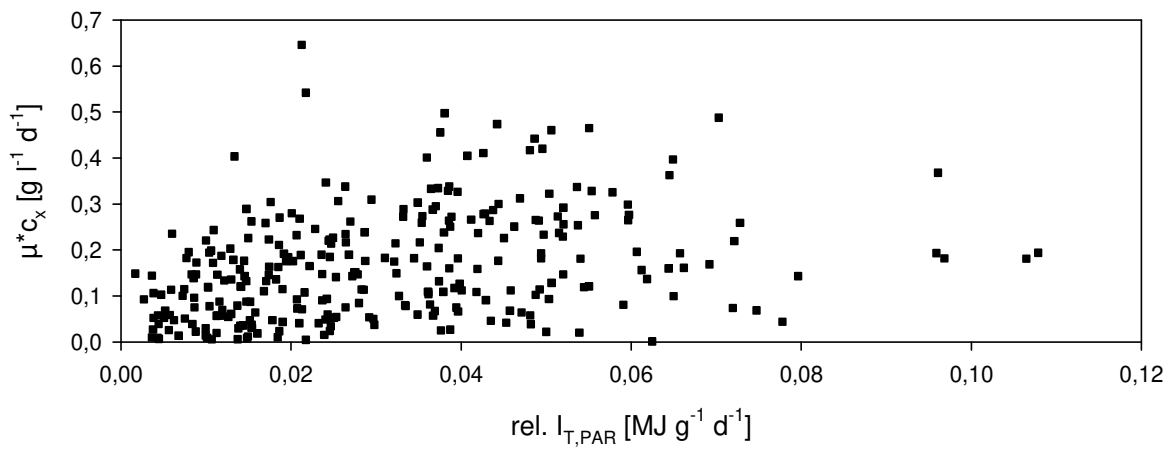
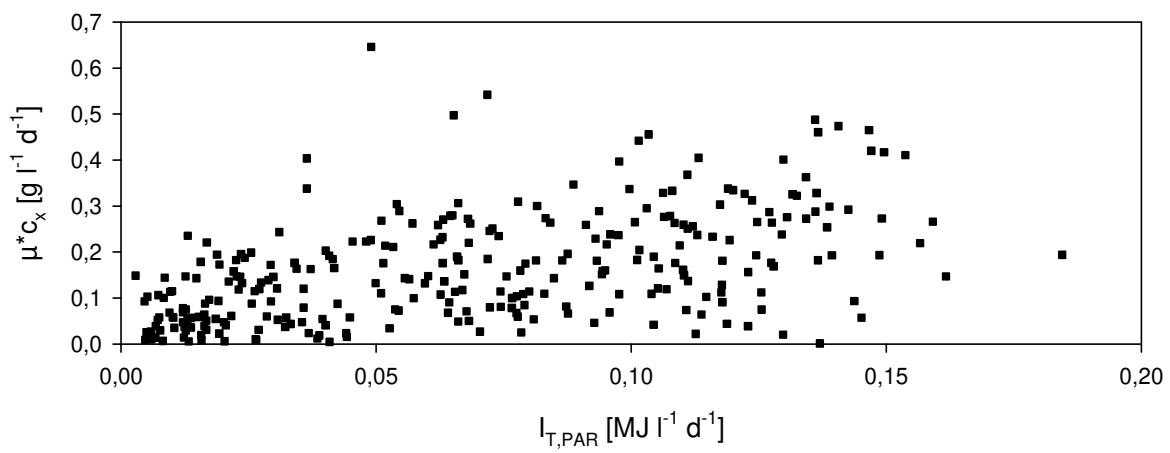
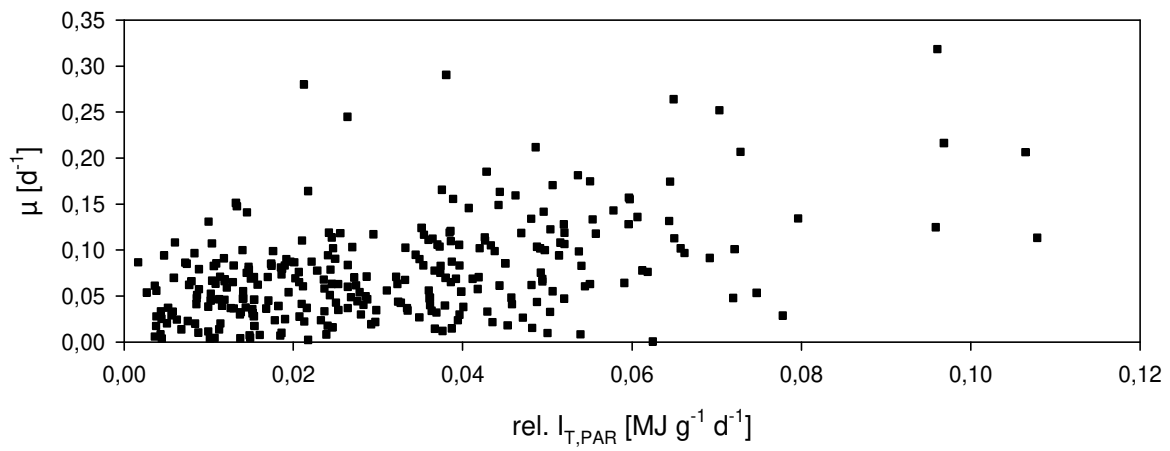


Abbildung 9-3 - Seitenansicht der abstrahierten Schattenwurffläche des Tannenbaum-Lichtkollektors und Bezeichnung der Berechnungshilfsgrößen

A-5 Lebenszyklus Aphelidium (Letcher et al., 2013)










A-6 Ergänzung Effizienzbewertung phototrophes Wachstum (Einzeldaten)











A-7 Übersicht zur kommerziellen phototropen Produktion von Mikroalgenbiomasse (Auswahl: weltweit)




Tabelle 9-4 - Übersicht zur kommerziellen phototropen Produktion von Mikroalgenbiomasse (Auswahl, weltweit); die Abbildungen sind den jeweiligen Quellen entnommen





Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Earthrise Nutritional LLC (DIC LIFETEC)	Sonoran Desert Kalifornien/USA	Raceway Ponds 185,000 m ²	<i>Arthrospira</i> 450 t/a		earthrise.com
Cyanotech	Kona, Hawaii/USA	Raceway Ponds 300,000 m ²	<i>Arthrospira</i> (300 t/a)/ Haematococcus (60 t/a)		cyanotech.com
Kanembu („Naturvolk“)	Lake Kossorom (Lake Chad), Chad	Natürliches Gewässer	<i>Arthrospira</i> 40 t/a		Beachhousekitchen.com


Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Myanmar Pharmaceutical Factory	Lake Harvest Myanmar	Natürliche Gewässer + Raceway Ponds	<i>Arthrospira</i> 200 t/a		spirulinasource.com
Hainan DIC microalgae (DIC LIFETEC)	Hainan, China	Raceway Ponds	<i>Arthrospira</i> 350 t/a		dlt-spl.co.jp
Parry Nutraceuticals Ltd. (Murugappa Group)	Oonaiyur, Indien	Raceway Ponds 52 ha	<i>Arthrospira</i> 180 t/a <i>Dunaliella</i> sp.		parrynutraceuticals.com
Arthrospira Viva	San Miguel de Allende Mexiko	Raceway Ponds 300 m ²	<i>Arthrospira</i> (kleine Mengen)		Arthrospiraviva.org

Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Yunnan Spirin Biotechnology Co., Ltd.	Yunnan, China	Natürliches Gewässer	<i>Arthrospira</i> 1000 t/a		Made-in-china.com
Aurospirul	Auroville, India	Einfache Tanks 450 m ²	<i>Arthrospira</i> 4t/a		Aurospirul.com
TAAU Australia Pty Ltd	Darwin, Australia	Raceway Ponds 5 ha	<i>Arthrospira</i> 50 t/a		Australianspirulina.com
Green Diamond Co., Ltd.	Boonsom farm Chiang Mai, Thailand	Raceway Ponds 40000 m ²	<i>Arthrospira</i>		Boonsomfarm.com

Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Innovalg	Bouin, Frankreich	Raceway Ponds	Verschiedene (<i>Odontella aurita</i> , <i>Phaeodactylum tricornutum</i>)		
Power Organics	Upper Klamath Lake, USA	Natürliches Gewässer	<i>Aphanizomenon Flos-Aqua</i> (AFA- Alge)		Klamathbluegreen.com
Yaeyama Shokusan Co., Ltd.	Ishigaki Island, Japan	Center-Pivot Ponds 27000 m ³	<i>Chlorella</i> sp. 35 t/m		Yaeyamachlorella.com
Sun Chlorella	Taiwan	Center-Pivot Ponds	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>		Sunchlorella.com
HealthForce	South-Korea	Fermentation (heterotroph)	<i>Chlorella vulgaris</i> (Chlorella Manna™)	k.A.	Healthforce.com

Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Taiwan Chlorella Manufacturing Co., Ltd.	Taipei, Taiwan	Center-Pivot Ponds	<i>Chlorella vulgaris</i> 330 t/a		Taiwanchlorella.com
	Hainan, China	Center-Pivot Ponds	<i>Chlorella vulgaris</i> 300 t/a	k.A.	
Bio+ Sources	Japan	Center-Pivot Ponds	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	k.A.	Bio-sources.com
Roquette Klötze GmbH & Co. KG	Klötze, Deutschland	Glasröhren 700 m ³	<i>Chlorella vulgaris</i> 50-100 t/a		Algomed.de
Salata GmbH	Ritschenhausen, Deutschland	Glasröhren, bis zu 25 m ³ Module	u.a. <i>Nannochloopsis</i>	k.A.	k.A.
Algatechnologies Ltd.	Arava desert, Israel	Glasröhren (300 km)	<i>Haematococcus pluvialis</i>		algatech.com

Produzent	Standort	Reaktortyp/-größe	Alge	Foto	Quelle
Astavita (Fuji Chemical Industry Co., Ltd.)	Maui, Hawaii USA	BioDome™	<i>Haematococcus pluvialis</i>		Astavita.com
	Gustavsberg, Schweden	Indoor-PBR	<i>Haematococcus pluvialis</i>		
Betatene Ltd. (Cognis Health and Nutrition/BASF)	Hutt Lagoon/Hutt River Australien	Extensive Open Ponds Ca. 500 ha	<i>Dunaliella salina</i> 1300 t/a		k.A.
Nature Beta Technologies Ltd. (früher Seambiotic)	Eilat, Israel	Raceway Ponds 10 ha	<i>Dunaliella salina</i> 70 t/a (3-4 t/a beta-car.)		nikken-miho.com
Tianjin Lantai Biotechnology	Tianjin, China	Raceway Ponds	<i>Dunaliella</i> sp.		

Produzent	Standort	Reaktortyp/- größe	Alge	Foto	Quelle
Inner Mongolia Lantai Industrial Co. Ltd.	Inner Mongolia, China	Raceway Ponds, Jilantai-See	<i>Dunaliella</i> sp.		k.A.
