

Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik

Simulation und Optimierung von offenen Algenponds

Andreas Thomas Rarrek

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremling

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Harald Klein
2. Prof. Dr.-Ing. Dirk Weuster-Botz

Die Dissertation wurde am 26.10.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 06.06.2018 angenommen.

„Das kann doch nicht so schwer sein.“

Anonymer unerfahrener wissenschaftlicher Mitarbeiter

„Doch, anscheinend schon.“

Derselbe anonyme, jedoch mittlerweile erfahrene, wissenschaftliche Mitarbeiter

Teile der vorgelegten Dissertation sind in folgenden Publikationen erschienen:

Rarrek, Andreas; Mostertz, Mathias; Kistenmacher, Hans; Rehfeldt, Sebastian; Klein, Harald (2016): *Simulation and optimization of large open algae ponds*. In Chemical Engineering Research and Design 114, pp. 220–235.

DOI: 10.1016/j.cherd.2016.08.018.

Rarrek, Andreas; Rehfeldt, Sebastian; Klein, Harald (2017): *Evaluation of the performance of a simulation model for open algae ponds and investigation of the operating behavior of open algae ponds over a one-year period for different locations*. In Chemical Engineering Research and Design 125, pp. 523–537.

DOI: 10.1016/j.cherd.2017.07.013.

Rarrek, Andreas; Rehfeldt, Sebastian; Klein, Harald (2018): *Evaluation of CO₂ gas supply of large open algae ponds*. In Chemical Engineering Science 187, pp. 432–443.

DOI: 10.1016/j.ces.2018.04.050.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik der Technischen Universität München. Während und außerhalb meiner Zeit am Lehrstuhl haben viele Personen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. All diesen sage ich hiermit von ganzem Herzen: Danke.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Klein, für das Vertrauen in mich dieses, für einen Verfahrenstechniker zwar recht ungewöhnliche, jedoch sehr interessante, Themengebiet bearbeiten zu dürfen. Während der gesamten Arbeit stand er mir immer mit konstruktiven Ratschlägen zur Seite und hat zu ihrem Gelingen maßgeblich beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Weuster-Botz danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremling bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei Dr. Mathias Mostertz und Prof. Hans Kistenmacher möchte ich mich für die vielen interessanten und ergebnisreichen Diskussionen bei den Projekttreffen bedanken. Mein Dank gilt ebenso Dr. Stefan Dullstein und Joost van de Ven, die immer ein offenes Ohr hatten und mich mit ihrem Fachwissen mit Rat und Tag unterstützt haben.

Zum Erfolg der Arbeit haben ebenso viele Studentinnen und Studenten mit ihren Forschungspraktika, Studienarbeiten und Abschlussarbeiten beigetragen, bei denen ich mich hiermit bedanke.

Bei meinen Kollegen bedanke ich mich für das tolle Arbeitsklima am Lehrstuhl, die vielen Diskussionen und die Aktivitäten während und auch nach der Arbeitszeit. Ein besonderer Dank geht an meine Kolleginnen Dr.-Ing. Regina Deschermeier und Dr.-Ing. Anna Reif sowie an meine Kollegen Florian Hanuš, M.Sc., Fabian Höhler, M.Sc., Dr.-Ing. Sebastian Rehfeldt, Dr.-Ing. Tobias Sachsenhauser und Johannes Sundberg, M.Sc..

Ein großer Dank gilt meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben und es mir dadurch ermöglicht haben diese Arbeit anzufertigen.

Dir liebe Yola: Vielen Dank für die gemeinsame Zeit, möge noch viel davon kommen.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das Betriebsverhalten und der Ertrag von offenen kanalförmigen Algenponds untersucht. In den Algenponds wachsen Algen, die zu Biokraftstoffen weiterverarbeitet werden. Für die großindustrielle Produktion von Algen werden sehr große Algenponds benötigt, bei denen entlang des Kanals das von den Algen für das Wachstum benötigte CO_2 nicht gleichmäßig verteilt ist. Ein besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen liegt deshalb in der Versorgung von sehr großen Algenponds mit ausreichend CO_2 .

Um die Untersuchungen durchzuführen, wird ein Simulationsmodell erstellt, das das stationäre Verhalten von Algenponds abbildet. Dieses Modell kann den Ertrag von Algenponds an verschiedenen Orten und für verschiedene Betriebsperioden sowohl für den kontinuierlichen als auch den batchweisen Betrieb berechnen. Um die Verteilung von CO_2 entlang des Kanals zu berücksichtigen, wird der Kanal im Modell entlang der Strömungsrichtung diskretisiert. Das Simulationsmodell berücksichtigt die Umwelteinflüsse am jeweiligen Standort des Algenponds mit Hilfe aufgezeichneter Wetterdaten. Das Wachstumsverhalten der Alge wird durch ein Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* beschrieben, dessen Parameter an experimentelle Untersuchungen angepasst sind.

Der Ertrag der untersuchten kontinuierlich betriebenen Algenponds wird maßgeblich von der Wassertiefe des Algenponds, dem pH -Wert und der Ernterate beeinflusst. Die diskontinuierlichen betriebenen Algenponds zeigen ebenfalls einen deutlichen Einfluss von der Wassertiefe und dem pH -Wert sowie der Startkonzentration der Alge. Die C-Fixierungseffizienz ist bei beiden Betriebsweisen stark von der Effizienz der CO_2 Zufuhr abhängig, die wiederum von der Wassertiefe, dem pH -Wert und der Alkalinität abhängt.

Die Untersuchung der CO_2 Zufuhr von großen offenen Algenponds zeigt, dass diese bei Verwendung einer eher langsam wachsenden Alge mit einem relativ einfachen Aufbau mit ausreichend CO_2 versorgt werden können. Größere Algenponds mit einem längeren Kanal benötigen mehrere Einspeisepunkte, an denen dem Pond CO_2 zugeführt wird um den pH -Wert im Betriebsbereich der Alge zu halten. Werden die Algenponds mit einer schneller wachsenden Alge betrieben, ist die Einhaltung eines bestimmten pH -Bereichs deutlich anspruchsvoller und in manchen der untersuchten Fälle nicht möglich.

Abstract

In this thesis, the behavior and yield of open channel-type algae ponds is investigated. In these ponds algae are grown, which are then processed to biofuels. To produce algae at an industrial scale the algae ponds have to be very large, which results in an unbalanced distribution of CO₂ along the channel of the pond. However, CO₂ is vital for the growth of algae and therefore, one focus of this thesis is to evaluate the CO₂ supply of very large open algae ponds.

The investigations are done with a simulation model, which is created as a part of this thesis. This model can be used to simulate the dynamic behavior of open algae ponds, which are operated continuously or in batch mode. The simulation model can calculate the yield of algae ponds for different locations and operating periods. The channel of the pond is discretized along the flow direction to consider the effects of an unbalanced distribution of CO₂. The influence of the environment on the algae pond is considered by the use of recorded weather data for the specific location and operating time. The growth behavior of the algae is described by an algae growth model for *Spirulina platensis* whose parameters are adjusted to experimental data.

The yield of the continuously operated algae ponds depends strongly on the water depth, the *pH* value and the harvest rate. The algae ponds which are operated in batch mode are also strongly influenced by the water depth and the *pH* value as well as by the concentration of the algae at the start of the batch operation. The carbon fixation efficiency is determined mostly by the efficiency of the CO₂ gas supply, which depends mainly on the water depth, the *pH* value and the alkalinity of the pond water.

The investigations of the CO₂ supply of large open algae ponds show that these algae ponds can be supplied with enough CO₂ by a simple setup of the CO₂ gas supply if the algae ponds are operated with a rather slow growing algae. Algae ponds which are larger and therefore have a higher channel length need more injection points of CO₂ to keep the *pH* value in the operating range of the algae. If the algae ponds are operated with faster growing algae it is more challenging to keep the *pH* value in a certain operating range and for some cases it is not possible at all.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
2 Motivation und Zielsetzung	3
3 Stand der Technik	5
4 Theoretische Grundlagen	9
4.1 Aufbau eines Algenponds	9
4.2 Chemisches Gleichgewicht	11
4.3 Physikalische Eigenschaften von Brack- und Meerwasser	13
4.4 Beschreibung der Lichtintensität im Pondwasser	14
4.5 Stoff- und Energieaustausch zwischen Flüssig- und Gasphase	16
4.5.1 Gas-Flüssig-Gleichgewicht	16
4.5.2 Stoffaustausch von flüchtigen Komponenten zwischen Pondwasser und Umgebungsluft	18
4.5.3 Begasung des Pondwassers mit Schläuchen und Tellerbelüftern .	20
4.5.4 Stoff- und Energieaustausch durch Kondensation und Verdunstung von Wasser	22
4.5.5 Energieaustausch durch Strahlung und konvektivem Wärmeüber- gang	22
4.6 Algenwachstum	23
4.6.1 Generisches Algenwachstumsmodell	23
4.6.2 Algenwachstumsmodell für <i>Spirulina platensis</i>	25
4.6.3 Optimale Konzentration der Alge	26
5 Modellbildung	31
5.1 Allgemeiner Aufbau des Simulationsmodells	31
5.2 Örtliche Diskretisierung	32
5.3 Zeitliche Diskretisierung	34
5.4 Implementierung in MATLAB	36
5.4.1 Einführung in die objekt-orientierten Programmierung	36
5.4.2 Programmierung	38
5.5 Durchführung und Auswertung einer Simulation	40
5.6 Anpassung und Validierung des Modells	41
5.6.1 Experimentelle Untersuchungen in Malaga	41
5.6.2 Nachrechnen des Experiments	42

5.6.3	Ergebnisse und Diskussion	43
5.6.4	Schlussfolgerung	48
6	Untersuchung des Verhaltens von offenen Algenponds	49
6.1	Generelles Vorgehen	49
6.1.1	Vorstudien	50
6.1.2	Simulation und Auswertung der Ergebnisse	52
6.2	Untersuchte Fälle	54
6.2.1	Basis-Fall	54
6.2.2	Variation von Standort und Betriebsmonat	57
6.2.3	Variation der Betriebsparameter	57
6.3	Ergebnisse und Diskussion	58
6.3.1	Einfluss von Standort und Betriebsperiode	60
6.3.2	Einfluss der Betriebsparameter	63
6.4	Optimierung der Betriebsparameter	75
6.5	Zusammenfassung	77
7	Untersuchung der CO₂ Zufuhr von großen offenen Algenponds	79
7.1	Anwendung des Simulationsmodells auf die Studie von Davis	79
7.1.1	Standort und Betriebsperiode	80
7.1.2	Pondgeometrie und Betriebsparameter	81
7.1.3	Bestimmung der Ernterate	82
7.1.4	Diskretisierung des Algenponds durch CSTRs	83
7.1.5	CO ₂ Zufuhr	83
7.2	Untersuchte Fälle	86
7.3	Ergebnisse und Diskussion	88
7.3.1	Standard-Fall	90
7.3.2	Engerer Betriebsbereich des <i>pH</i> -Wertes	92
7.3.3	Niedrigerer Betriebsbereich des <i>pH</i> -Wertes	94
7.3.4	Standard-Fall mit <i>pH</i> -abhängigem Algenwachstum	96
7.4	Zusammenfassung	99
8	Ausblick	101
A	Herleitung der optimalen Algenkonzentration	103
	Tabellenverzeichnis	106
	Abbildungsverzeichnis	107
	Literatur	109

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

A	Fläche	m^2
A_T	Alkalinität	$\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$
B	Parameter in Zeitgleichung	o
c_i	molare Konzentration der Komponente i	$\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$
Δc_i	Konzentrationsdifferenz der Komponente i	$\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$
C_{Alge}	Konzentration der Alge	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
C_{Bio}	Konzentration der Biomasse	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
C_D	Widerstandsbeiwert	-
C_p	spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
CFE	C-Fixierungseffizienz	-
Co	Courant-Zahl	-
d	Durchmesser	m
D_i	Diffusionskoeffizient der Komponente i	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
f	Frequenz	$\frac{1}{\text{s}}$
F	Einflussfaktor	-
g	Fallbeschleunigung	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
h	spezifische Enthalpie	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
H	Enthalpie	J
\dot{H}	Enthalpiestrom	W
$\Delta \bar{H}_{Solv,i}$	molare Lösungsenthalpie der Komponente i	$\frac{\text{J}}{\text{kmol}}$
$\Delta \bar{H}_V$	molare Verdampfungsenthalpie	$\frac{\text{J}}{\text{kmol}}$
He,i	Henry-Koeffizient der Komponente i	$\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{Pa}}$
HR	Ernterate	$\frac{1}{\text{d}}$
I	Lichtintensität	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
I_0	Lichtintensität an der Wasseroberfläche	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
I_{Global}	einfallende Lichtintensität	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
I_k	Lichtabhängigkeit	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

k	Stoffübergangskoeffizient	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
K	Gleichgewichtskonstante	-
K_{e1}	Extinktionskoeffizient	$\frac{1}{\text{m}}$
K_{e2}	Extinktionskoeffizient	$\frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$
K_H	dimensionsloser Henry-Koeffizient	-
$K_{s,i}$	Setschenow-Konstante der Komponente i	-
K_{Si}^\emptyset	Konstante	-
l	Länge, Höhe, Tiefe	m
LAT	Breitengrad	°
LON	Längengrad	°
LZ	lokale Zeit	h
m_i	spezifische Partialstoffmenge der Komponente i	$\frac{\text{kmol}}{\text{kg}}$
\dot{m}	Massenstromdichte	$\frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$
M	Masse	kg
\dot{M}	Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
\bar{M}	molare Masse	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
n	Brechungswinkel	°
n	Anzahl	-
N	Stoffmenge	kmol
ΔN	Stoffmengendifferenz	kmol
\dot{n}	Stoffmengenstromdichte	$\frac{\text{kmol}}{\text{s m}^2}$
\dot{N}	Stoffmengenstrom	$\frac{\text{kmol}}{\text{s}}$
p	Druck	Pa
PS	Parametersatz	-
pH	pH -Wert	-
p_i	Partialdruck der Komponente i	Pa
\dot{q}	Wärmestromdichte	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$\dot{q}_{Verd/Kond}$	Wärmestromdichte der Verdampfung/Kondensation	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	Reflexionsgrad	-
\bar{R}	ideale Gaskonstante	$\frac{\text{J}}{\text{kmol K}}$

S	Salinität, Salzgehalt	Massen- ‰
SZ	solare Zeit	h
t	Zeit, Zeitpunkt	s
Δt	Zeitschrittweite	s
T	Temperatur	K
T_{amb}	Temperatur der Umgebungsluft	K
T_{Sky}	Temperatur des Himmels	K
T_{TP}	Temperatur am Taupunkt	K
v	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
v^*	Windparameter	$\frac{m}{s}$
$V_{b,i}$	molares Volumen der Komponente i am Siedepunkt	-
y	Molanteil in der Gasphase	-
Y	Ertrag	$\frac{g}{m^2 d}$
ΔY	Differenz des Ertrags zwischen Simulation und Experiment	$\frac{g}{m^2 d}$
ZG	Zeitgleichung	h
ZZ	Zeitzone	h

Griechische Formelzeichen

δ	Deklination	°
η	dynamische Viskosität	$\frac{kg}{m s}$
ϵ	Emissionsgrad	-
κ	Karman-Konstante	-
μ	Wachstumsrate	$\frac{1}{s}$
μ_{Death}	Sterberate	$\frac{1}{s}$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W^2}{m K^4}$
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
τ	Verweilzeit	s
θ	Einfallswinkel	°
ω	Stundenwinkel	°

Indizes

1	von Komponente 1
2	von Komponente 2
<i>abs</i>	absolut
<i>Abs</i>	der Absorption
<i>Beg</i>	der Begasung
<i>Blase</i>	der Blase
<i>Breite</i>	Breite des Kanals
<i>dep</i>	der Abhängigkeit
<i>Fl</i>	Flüssigkeit
<i>g</i>	in der Gasphase
<i>i</i>	der Komponente <i>i</i>
<i>Kanal</i>	Länge des Kanals
<i>Konv</i>	der Konvektion
<i>Licht</i>	des Lichts
<i>l</i>	in der Flüssigphase
<i>max</i>	Maximum, maximal
<i>n</i>	von/in Element <i>n</i>
<i>opt</i>	Optimum, optimal
<i>p</i>	linear parallel
<i>pH</i>	des <i>pH</i> -Werts
<i>Pond</i>	des Ponds
<i>Strömung</i>	der Strömung
<i>Quelle</i>	der Quelle
<i>ref</i>	beim Referenzzustand
<i>rel</i>	relativ
<i>s</i>	linear senkrecht
<i>t</i>	zum Zeitpunkt <i>t</i>
Δt	im Zeitschritt Δt
$t + \Delta t$	zum Zeitpunkt $t + \Delta t$
<i>Temp</i>	der Temperatur
<i>Tiefe</i>	der Wassertiefe
<i>W</i>	des Wassers

Dimensionslose Kennzahlen

Re	Reynolds-Zahl	-
Sc	Schmidt-Zahl	-
Sc_{600}	Schmidt-Zahl 600	-

Komponenten

Cl^-	Chlor-Ion
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_3^{2-}	Bicarbonat-Ion
H^+	Proton (Hydron)
H_2O	Wasser
HCO_3^-	Hydrogencarbonat-Ion
N_2	Stickstoff
$NaCl$	Natriumchlorid
Na^+	Natrium-Ion
O_2	Sauerstoff
OH^-	Hydroxid-Ion

Abkürzungen

CCS	Carbon Capture and Storage
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSTR	Continuously Stirred Tank Reactor
DGL	Differentialgleichung
diskont.	diskontinuierlich
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kont.	kontinuierlich
LOO-CV	leave-one-out cross-validation
OG	oberer Grenzwert
PAR	Photosynthetisch Aktiver Bereich
SW	Sollwert
UG	unterer Grenzwert

1 Einleitung

Eines der größten gesellschaftlichen Probleme im 21. Jahrhundert ist die Emission von Treibhausgasen und die damit verbundene globale Erderwärmung. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht in seinem mittlerweile 5. Zustandsbericht [PACHAURI & MAYER 2015] davon aus, dass eine unveränderte Emission von Treibhausgasen zu einer weiteren Erderwärmung und Veränderungen im Klimasystem führen wird. Die Konsequenzen dieser Entwicklung betreffen nicht nur die Menschheit, sondern das gesamte Ökosystem der Erde. Die Folgen dieses Klimawandels sind immer häufiger auftretende extreme Wetterbedingungen und ein Anstieg des Meeresspiegels. Um die Risiken des stattfindenden Klimawandels zu mindern, muss die Emission von Treibhausgasen nachhaltig und drastisch reduziert werden.

Das in der Atmosphäre vorhandene Kohlenstoffdioxid (CO_2) hat nach Berechnungen von KIEHL & TRENBERTH 1997 einen Anteil von bis zu 26 % am Treibhauseffekt und ist damit neben Wasserdampf einer der Haupttreiber der Erderwärmung. Die Verminderung der CO_2 -Emissionen ist deshalb eine Notwendigkeit, zu der sich viele Staaten auf der Kyoto-Konferenz verpflichtet haben [UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE SECRETARIAT 1997]. Der größte Teil der CO_2 -Emissionen fällt in Deutschland im Energie- und Transportsektor an, wenn fossile Brennstoffe zur Bereitstellung von Strom und Wärme sowie zur Bewegung von Menschen und Waren verbrannt werden [UMWELTBUNDESAMT 2016]. Für den Energiesektor gibt es mehrere Möglichkeiten die Emission von CO_2 zu verringern oder ganz zu vermeiden. Der produzierte Strom stammt zu einem immer größeren Anteil aus sog. regenerativen Energien wie Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft, die insgesamt deutlich niedrigere CO_2 -Emissionen als herkömmliche Kraftwerke aufweisen. Eine Möglichkeit, die CO_2 -Emissionen von herkömmlichen Kraftwerken zu verringern, ist diese mit einer Technologie zur CO_2 -Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) auszustatten. Dabei wird das bei der Verbrennung anfallende CO_2 aus dem Rauchgas ausgewaschen und dann in einer geeigneten Lagerstätte langfristig gespeichert [SCHERER ET AL. 2012].

Im Transportsektor ist die Substitution von fossilen Brennstoffen noch nicht soweit fortgeschritten, da es momentan keine sinnvolle Alternative zu Kraftstoffen gibt, die ihre Energie chemisch speichern. Alternative Konzepte zum herkömmlichen Verbrennungsmotor sind elektrisch angetriebenen Fahrzeuge, die ihre Energie in Akkus speichern, sowie mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge, bei denen der Wasserstoff in einer Brennstoffzelle zu Strom umgewandelt wird. Mit Ausnahme von elektrisch angetriebenen PKWs, mit meist kurzer Reichweite, hat sich bis jetzt keine Alternative zum Verbrennungsmotor im Markt behaupten können.

Die Eigenschaften von Flüssigkraftstoffen in den Bereichen Energiedichte, Handhabbarkeit und Lagerfähigkeit sind alternativen Konzepten noch immer deutlich überlegen. Dies gilt in besonderem Maße für Flugzeuge, die auf einen Energiespeicher mit einer hohen Energiedichte angewiesen sind. Folglich ist davon auszugehen, dass der Transportsektor noch für längere Zeit auf flüssige Kraftstoffe angewiesen ist. Um in diesem Bereich trotzdem die Emissionen von CO_2 zu verringern können, die aus dem fossilen Energieträger Öl gewonnen, Kraftstoffe durch sog. Biokraftstoffe (engl. Biofuels) ersetzt werden. Biokraftstoffe sind Kraftstoffe, die aus regenerativen Quellen stammen und deren CO_2 -Bilanz deswegen sehr günstig ausfällt, da ein Großteil des bei der Produktion und Verbrennung freigesetzten CO_2 vorher aufgenommen wurde. Ausgangsstoffe für die Produktion von Biokraftstoffe sind pflanzliche Erzeugnisse wie Raps, Zuckerrohr und Palmöl, aber auch im Wasser lebende photosynthetische Organismen, die unter dem Sammelbegriff Algen zusammengefasst werden.

Vergleicht man diese Ausgangsstoffe untereinander so weisen die Algen gegenüber den momentan verbreiteten pflanzlichen Ausgangsstoffen eine Reihe von Vorteilen auf. Der Flächenertrag von Algen ist schon bei einem konservativ geschätzten Ertrag von $10 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ um das 12-fache höher als von Raps und um das 6-fache höher als von Palmöl [BENEMANN & OSWALD 1996]. Zudem können Algen in Gebieten kultiviert werden in denen konventionelle Landwirtschaft ohnehin nicht möglich ist und stehen damit nicht in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln (sog. „Tank oder Teller“-Problem). Da bei der Kultivierung der Algen ohnehin eine zusätzlich Zufuhr an CO_2 nötig ist, kann zuvor in Kraftwerken oder Fabriken abgetrenntes CO_2 wieder verwendet werden.

Die kommerzielle Kultivierung von Algen zur Energiegewinnung ist, verglichen mit dem seit Jahrtausenden durchgeführten Anbau von Landpflanzen, eine sehr junge Disziplin. BOROWITZKA & MOHEIMANI 2013 geben einen umfangreichen Überblick über die historische Entwicklung und die maßgeblichen Programme, die die Kultivierung vorangetrieben haben. Das großtechnische Produktionssystem für Algen, die sog. Algenanlage, umfasst in der Regel die Kultivierung der Algen in offenen Ponds, das Abernten und Entwässern der Biomasse sowie die Umwandlung eben dieser in das gewünschte Endprodukt. Das Entwässern der Biomasse erfolgt meist in einem 2-stufigen Prozess durch Flokkulation und einer nachgeschalteten Zentrifugation. Für die Umwandlung der getrockneten Biomasse in Kraftstoffe ist die hydrothermale Verflüssigung das momentan erfolversprechendste Verfahren. [MOHEIMANI ET AL. 2015]

Die Kultivierung von Algen und Weiterverarbeitung zu Biokraftstoffen weist ein großes Potential auf flüssige Kraftstoffe, gerade im Transportsektor, weiter zu verwenden und trotzdem die Emission von CO_2 deutlich zu reduzieren. Die Möglichkeit diese Biokraftstoffe wie konventionelle Kraftstoffe zu verwenden ist ein großer Vorteil, da langjährig entwickelte und ausgereifte Technologien weiterverwendet werden können. Auf dem Gebiet der kommerziellen und damit großflächigen Kultivierung von Algen sind noch viele Fragen ungelöst oder noch gar nicht gestellt. Mit dieser Arbeit soll dazu beigetragen werden diesen Bereich besser zu verstehen.

2 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation hinter dieser Arbeit liegt darin ein besseres Verständnis für den Betrieb von kommerziellen Algenponds zur Produktion von Biokraftstoffen zu entwickeln. Zwar wurden schon eine Vielzahl an Algenponds gebaut und auch teilweise über mehrere Jahre betrieben, jedoch fand dies meist im experimentellen Maßstab statt. Der Bau und Betrieb von Algenponds in einer Größe, die für eine wirtschaftliche Produktion von Biokraftstoffen notwendig ist, ist in der Praxis ein noch recht unerforschtes Feld. Um die dabei auftretenden Fragen zu klären, benötigt man ein Simulationsmodell, das sowohl für die Planungsphase als auch den späteren Betrieb, eine systematische Untersuchung der Einflussgrößen auf Algenponds erlaubt. Mit einem solchen Modell ist es möglich, vorab den an bestimmten Standorten für eine bestimmte Algenart zu erwarteten Ertrag vorherzusagen und dadurch besonders geeignete Standorte zu identifizieren. Zudem können die Auswirkungen verschiedener Pondabmessungen evaluiert und die Auslegung des Algenponds dadurch optimiert werden. Durch Simulationen kann die optimale Fahrweise des Algenponds und die optimale Wahl der Betriebsparameter bestimmt werden. Insgesamt ermöglicht es ein Simulationsmodell, den Bau und Betrieb von Algenponds zu optimieren und damit eine wirtschaftliche Produktion von Biokraftstoffen zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist zum einen die Erstellung eines Simulationsmodells, das das Verhalten von offenen kanalartigen Algenponds beschreibt, und zum anderen eine damit durchgeführte systematische Untersuchung von solchen Algenponds. Das Simulationsmodell muss in der Lage sein das instationäre Verhalten eines Algenponds zu beschreiben und die externen Umwelteinflüsse durch das Wetter am jeweiligen Standortes zu berücksichtigen.

Die Pondgeometrie muss in Strömungsrichtung diskretisiert sein, da besonders für große Algenponds eine homogene Durchmischung des Pondwassers nicht zu erwarten ist. Den Algenponds wird CO_2 gasförmig als Kohlenstoffquelle für die Algen, sowohl in reiner Form als auch verdünnt als Rauchgas, zugeführt. Der dabei auftretende Stoffübergang zwischen dem zugeführten Gasgemisch und dem Pondwasser ist im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Um den Stoffübergang zwischen dem Algenpond und der Umgebung sowie die Begasung mit einem Gasgemisch physikalisch korrekt abzubilden muss das Pondwasser als eine Mischung unterschiedlicher Komponenten modelliert werden. Diese Komponenten stehen miteinander im chemischen Gleichgewicht und können sich einzeln an Stoffaustauschprozessen beteiligen. Das Pondwasser in Algenponds weist einen Salzgehalt auf, der zwischen dem von Süßwasser und Meerwasser liegt. Die Temperatur des Pondwassers ist abhängig vom Standort und der Wassertiefe und über den Tag oft großen Schwankungen unterworfen. Folglich ist der Salzgehalt wie auch die Temperatur

bei der Berechnung des chemischen Gleichgewichts und den physikalischen Eigenschaften des Pondwassers zu berücksichtigen.

Das Algenwachstum ist durch ein geeignetes Modell zu beschreiben, das von denen in der Simulation zur Verfügung stehenden Größen abhängt. Eine der Haupteinflussgrößen auf das Algenwachstum ist die zur Verfügung stehende Lichtintensität. Diese nimmt entlang der Wassertiefe ab, da sowohl das Pondwasser als auch die darin enthaltene Alge das Licht absorbieren. Aus diesem Grund muss auch die von der Wassertiefe abhängige Lichtintensität modelliert werden, auch wenn die übrigen Größen als von der Wassertiefe unabhängig betrachtet werden können. Insgesamt soll das Simulationsmodell in der Lage sein alle relevanten Effekte, die den Betrieb eines offenen kanalartigen Algenponds beeinflussen, zu berücksichtigen. Damit können dann quantitative Aussagen über den zu erwarteten Ertrag und die dafür benötigte Menge an CO_2 bei bestimmten Betriebsbedingungen getroffen werden.

In den Untersuchungen, die mit dem entwickelten Simulationsmodell durchgeführten werden, soll der realistisch zu erwartende Ertrag von Algenponds berechnet werden. Außerdem ist zu untersuchen, wie sich die Wahl verschiedener Betriebsparameter, z. B. der Ernterate, auf das Betriebsverhalten auswirken. Es sollen dabei explizit sehr große Algenponds untersucht werden, da für diese keine praktische Erfahrung vorliegt, ihr Einsatz für die kommerzielle Produktion von Biokraftstoffen jedoch notwendig ist. Diese Algenponds haben sehr lange Kanäle, für die Inhomogenitäten entlang der Fließrichtung zu erwarten sind, die mit dem Simulationsmodell abgebildet werden können.

3 Stand der Technik

In der Literatur ist eine Vielzahl an Modellen zu finden, die das Wachstum von Algen beschreiben. Die Detailtiefe, mit der diese Modelle das Algenwachstum abbilden, ist dabei sehr unterschiedlich. Bei vielen Modellen ist das Algenwachstum nur von einigen wenigen Einflussgrößen abhängig und es ist nur eine geringe Anzahl an Parametern notwendig. Bei diesen Modellen werden die Parameter meist an die Ergebnisse von Experimenten angepasst, bei denen leicht zugängliche Größen wie die Konzentration der Alge gemessen werden. Diese Art von Algenwachstumsmodellen ist für die Verwendung in einem Simulationsmodell, das einen gesamten Algenpond beschreibt, gut geeignet, da sie einen einfachen Aufbau haben und mit wenigen Parametern das Verhalten der Alge hinreichend genau beschreiben.

Neben den eher einfachen Algenwachstumsmodellen existieren auch deutlich komplexere Modelle, die selbst die in der Alge selbst ablaufenden Vorgänge berücksichtigen. Diese Modelle sind zwar gut geeignet um die Stoffwechselprozesse einer Alge nachzuvollziehen, für die Simulation eines Algenponds jedoch eher ungeeignet.

Neben den reinen Algenwachstumsmodellen existieren auch Simulationsmodelle, die das Verhalten eines gesamten Algenponds beschreiben. Bei diesen werden nicht nur das Algenwachstum sondern, je nach Modell, auch die Einflüsse der Umwelt sowie die Fluidodynamik und Wasserchemie des Pondwassers berücksichtigt. Ein Überblick an Simulationsmodellen ist BERNARD ET AL. 2016 zu entnehmen.

Die Simulationsmodelle von BUHR & MILLER 1983 und YANG 2011 beschreiben das Verhalten eines gesamten Algenponds und berücksichtigen dabei sowohl externe Umwelteinflüsse als auch im Pondwasser stattfindende Gleichgewichtsreaktionen. JAMES & BORIAH 2010 koppeln eine dreidimensionale Fluidodynamiksimulation mit einem Algenwachstumsmodell und berücksichtigten damit das Strömungsverhalten eines offenen Algenponds ohne weitere Vereinfachungen. In der Arbeit von YADALA & CREMASCHI 2016 wird ein Modell entwickelt mit, dem die Algenproduktion im Batchbetrieb beschrieben werden kann. Mit diesem Modell wird für zwei verschiedene Spezies und vier Standorte die Pondgeometrie optimiert. JAYARAMAN & RHINEHART 2015 benützen ein Algenwachstumsmodell, das an experimentelle Daten angepasst ist, um optimale Pondparameter zu bestimmen. Von MALEK ET AL. 2016 stammt ein Modell, mit dem sowohl ein Algenpond als auch die Zufuhr von CO_2 simuliert werden kann. Dieses Modell wurde mit experimentellen Daten aus Spanien validiert und dann für die Simulation von Algenponds in den USA benutzt. In der Arbeit von HUESEMANN ET AL. 2016 wird ein Algenwachstumsmodell vorgestellt, das für sehr kleine experimentellen Algenponds validiert wurde.

In dieser Arbeit wird ein Simulationsmodell entwickelt, das das Verhalten eines offenen kanalförmigen Algenponds beschreibt. Dieses Modell ist in der Lage das instationäre Verhalten von Algenponds an verschiedenen Standorten und zu verschiedenen Zeiten zu berechnen. Dabei werden die entscheidenden externen Einflüsse und die im Algenpond ablaufenden physikalischen und biologischen Prozesse berücksichtigt. Im Folgenden wird das Simulationsmodell dieser Arbeit mit den in der Literatur veröffentlichten Modellen im Hinblick auf die berücksichtigten Aspekte verglichen und aufgeführt, warum eine Berücksichtigung des jeweiligen Aspekts für die Simulation eines Algenponds notwendig ist.

Das in in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell verwendet reale gemessene Wetterdaten um den Einfluss verschiedener Standorte und Zeitperioden zu berücksichtigen. Die zeitliche Auflösung der Wetterdaten variiert je nach Quelle und erlaubt es mitunter den Einfluss bestimmter Tage auf das Verhalten eines Algenponds in der Simulation abzubilden. Gemessene Wetterdaten werden auch von anderen Forschern wie JAMES & BORIAH 2010, YADALA & CREMASCHI 2016, MALEK ET AL. 2016 und HUESEMANN ET AL. 2016 in ihren Berechnungen verwendet, um die Wettereinflüsse in Abhängigkeit vom Standort adäquat zu beschreiben.

Die meisten Modelle von Algenponds lösen das fluiddynamische Verhalten im Pond nicht vollständig auf und erreichen nicht den Detaillierungsgrad einer CFD-Simulation. In dieser Arbeit wird die Fluiddynamik des Algenponds durch eine Serie von in Reihe geschalteten idealen Rührkesseln angenähert (sog. Multi-Kompartiment-Modell). Der Algenpond wird dadurch eindimensional entlang der Strömungsrichtung diskretisiert. Dieser Ansatz wird auch von anderen Autoren wie BUHR & MILLER 1983, YANG 2011 und MALEK ET AL. 2016 verfolgt und ist für die Beschreibung der Strömungseigenschaften ausreichend. Für einige Größen, wie der Lichtintensität im Pondwasser und dem Stoffübergang der CO_2 -Zufuhr, muss der Einfluss der Wassertiefe jedoch explizit berücksichtigt werden. Deren Verhalten wird in Abhängigkeit von der Höhe beschrieben, so dass das Modell in diesem Hinblick (pseudo)zweidimensional ist.

Um das Wachstumsverhalten der Algen zu beschreiben werden meist Modelle verwendet, die die Wachstumsrate in Abhängigkeit der Lichtintensität und der Temperatur des Pondwassers berechnen. Manche Modelle berücksichtigen zusätzlich die chemische Zusammensetzung des Pondwassers und den davon beeinflussten pH -Wert oder die Verfügbarkeit von bestimmten Nährstoffen. Die in dieser Arbeit verwendeten Algenwachstumsmodelle berücksichtigen ebenfalls solche Zusammenhänge und stehen damit in einer Reihe mit Modellen von anderen Autoren wie BUHR & MILLER 1983, JAMES & BORIAH 2010, YANG 2011, JAYARAMAN & RHINEHART 2015, YADALA & CREMASCHI 2016, MALEK ET AL. 2016 und HUESEMANN ET AL. 2016.

Die physikalischen Eigenschaften des Pondwassers, wie z. B. die Dichte oder Wärmekapazität, sind Funktionen der Zusammensetzung und Temperatur. Der bei der Zufuhr von CO_2 stattfindende Stoffaustausch zwischen Gas- und Flüssigphase wird ebenfalls von der Zusammensetzung und Temperatur des Pondwassers bestimmt. Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell betrachtet das Pondwasser als ein Gemisch

aus verschiedenen Komponenten und berücksichtigt die im Pondwasser stattfindenden Gleichgewichtsreaktionen. Diese Art der Modellierung erlaubt eine hohe Flexibilität bei der Beschreibung der physikalischen Vorgänge im Algenpond, da die Konzentrationen der einzelnen Komponenten im Pondwasser in der Simulation direkt zur Verfügung stehen und in diesem Hinblick keine Vereinfachungen getroffen werden müssen. Die Effizienz der CO_2 -Zufuhr hängt maßgeblich von der Konzentration an CO_2 im Pondwasser ab, da der Konzentrationsunterschied von CO_2 zwischen dem Pondwasser und den durch die Begasung eingebrachten Gasblasen die Triebkraft des Stoffübergangs darstellt.

Die tatsächliche Konzentration an CO_2 sowie der anderen kohlenstoffhaltigen Komponenten HCO_3^- und CO_3^{2-} wird durch chemische Gleichgewichte bestimmt. Die Berücksichtigung des chemischen Gleichgewichte erlaubt es die Auswirkungen von einer Zufuhr an CO_2 , z. B. durch die Begasung, und auch einer Abnahme von CO_2 , z. B. durch den Konsum der Alge, für den gesamten Algenpond physikalisch korrekt zu beschreiben. Da die tatsächliche Zusammensetzung des Pondwassers in der Simulation bekannt ist, können davon abhängige Größen, wie z. B. der *pH*-Wert oder die Alkalinität, problemlos als Einflussgrößen benutzt werden. Obwohl die chemischen Gleichgewichte einen bedeutenden Einfluss auf viele in einem Algenpond ablaufenden Prozesse haben, werden diese nur in wenigen Arbeiten, wie denen von BUHR & MILLER 1983, JAMES & BORIAH 2010 und YANG 2011, berücksichtigt.

YANG 2011 berücksichtigt in seiner Arbeit die Zudosierung von gasförmigen CO_2 zum Algenpond, welches von den Algen dann verstoffwechselt wird. Die dort verwendete relativ physikalische Herangehensweise, den Stoffübergang zwischen den aufsteigenden Gasblasen und dem Pondwasser zu beschreiben, ist dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ansatz sehr ähnlich. In der Arbeit von MALEK ET AL. 2016 wird die Zufuhr von gasförmigen CO_2 ebenfalls berücksichtigt, jedoch durch einen eher empirischen Ansatz.

Das Ziel dieser Arbeit besteht unter anderem darin ein Simulationsmodell zu entwickeln, dass alle Aspekte, die zur vollumfänglichen Beschreibung eines Algenponds notwendig sind, abdeckt. Tabelle 3.1 zeigt einen Überblick der veröffentlichten Simulationsmodelle und die von diesen berücksichtigten Aspekte.

Tabelle 3.1: Überblick der veröffentlichten Simulationsmodelle und die von diesen berücksichtigten Aspekte

Legende: ✓ Aspekt ist berücksichtigt; ✗ Aspekt ist nicht berücksichtigt;

1D CSTR: eindimensionales Multi-Kompartiment-Modell; 3D CFD: dreidimensionales CFD Modell

Veröffentlichung	Fluiddynamik Pond	Algenwachstum	Wetterdaten	Chemisches Gleichgewichtssystem	CO ₂ -Gaszufuhr
Diese Arbeit	✓ (1D CSTR)	✓	✓	✓	✓
BUHR & MILLER 1983	✓ (1D CSTR)	✓	✗	✓	✗
JAMES & BORIAH 2010	✓ (3D CFD)	✓	✓	✓	✗
YANG 2011	✓ (1D CSTR)	✓	✗	✓	✓
JAYARAMAN & RHINEHART 2015	✗	✓	✗	✗	✗
YADALA & CREMASCHI 2016	✗	✓	✓	✗	✗
MALEK ET AL. 2016	✓ (1D CSTR)	✓	✓	✗	✓
HUESEMANN ET AL. 2016	✗	✓	✓	✗	✗

4 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen, die zur Simulation eines offenen Algenponds benötigt werden. Die hier gezeigten Modelle und Gleichungen sind im Simulationsmodell programmiert und werden während der Simulation dynamisch mit den jeweils in der Simulation herrschenden Werten ausgewertet.

Der allgemeine Aufbau von offenen Algenponds, die in dieser Arbeit untersucht werden, ist in Abschnitt 4.1 beschrieben.

In Abschnitt 4.2 werden die Beziehungen dargestellt, mit denen das chemische System im Wasser von Algenponds beschrieben wird. Das Pondwasser besteht dabei aus mehreren Komponenten, die miteinander im chemischen Gleichgewicht vorliegen.

Abschnitt 4.3 beschreibt die physikalischen Eigenschaften des Pondwassers. Diese werden mit Temperatur und Salzgehalt spezifischen Gleichungen für Meerwasser beschrieben.

In Abschnitt 4.4 wird auf die in das Pondwasser eintretende Lichtintensität sowie die Abschwächung der Lichtintensität entlang der Wassertiefe näher eingegangen.

Abschnitt 4.5 umfasst alle Modelle, die den Stoff- und Energieaustausch zwischen der Flüssig- und Gasphase beschreiben. Die Modelle berücksichtigen dabei den Stoffaustausch von flüchtigen Komponenten zwischen der Atmosphäre und dem Pondwasser sowie die Begasung des Pondwassers mit Schläuchen oder Tellerbelüftern. Die Beschreibung von Verdunstung und Kondensation von Wasser sowie der Energieaustausch zwischen Algenpond und Umgebung, auf Grund von Strahlung und Konvektion, wird ebenfalls in Abschnitt 4.5 aufgeführt.

Die in dieser Arbeit verwendeten Modelle zur Beschreibung des Algenwachstums sind in Abschnitt 4.6 aufgeführt.

4.1 Aufbau eines Algenponds

In dieser Arbeit werden offene Algenponds untersucht, die eine kanalartige Geometrie aufweisen. Diese Algenponds bestehen aus einem flachen Kanal, der auf der Oberseite nicht von der Umgebung abgetrennt ist. Der Kanal ist mit Pondwasser gefüllt in dem die Algen als Suspension vorliegen. Dem Pondwasser wird eine Strömung aufgezwungen um die Algen in Schwebelage zu halten und eine ausreichende Durchmischung zu gewährleisten. Für die Kanalführung gibt es mehrere Möglichkeiten von der im Folgenden zwei Bedeutende näher erläutert werden:

Raceway-Pond Der Kanalverlauf des Raceway-Ponds wird zweimal oder öfters um jeweils 180° umgelenkt. Das Pondwasser wird meist durch ein Schaufelrad angetrieben und strömt im Kreis.

Serpentinen-Pond Der Kanal dieser Pondbauweise schlängelt sich serpentinenartig ein Gefälle hinab. Am tiefsten Punkt des Gefälles ist das Ende des Kanals erreicht und das Pondwasser wird wieder zum Beginn des Kanals hochgepumpt. Die Strömung des Wassers ist letztendlich eine Folge der Höhendifferenz zwischen dem Beginn und dem Ende des Kanals.

Algenponds werden in der Regel mit CO_2 -haltigem Gas begast um die Kohlenstoffnachfrage der Algen zu decken. In den Kanal eines Algenponds können ein oder mehrere Sümpfe eingebaut werden, um die Effizienz der Begasung zu erhöhen. Ein Sumpf ist eine Vertiefung in der Kanalgeometrie auf dessen Boden Gasverteiler, z. B. Tellerbelüfter, installiert werden, die das Gas in Blasen dispergieren. Die auf Grund der größeren Tiefe des Sumpfes längere Blasenaufstiegszeit führt zu einem höheren Stoffaustausch zwischen der Flüssigphase des Pondwassers und der Gasphase, der durch die Begasung eingebrachten Blasen.

In der Regel kann einem Algenpond an einer oder mehreren Stellen ein Teil des Pondwassers zur Ernte entnommen werden. Aus diesem Erntestrom werden dann die Algen abgetrennt und weiterverarbeitet. Zusätzlich wird einem Algenpond an einer oder mehreren Stellen wieder frisches oder vom Erntestrom zurückgewonnenes Wasser zugeführt. Dieser Makeup-Strom gleicht Verluste durch die Umwelteinflüsse und die Ernte aus und dient auch der Zugabe von Nährstoffen.

Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft einen Raceway-Algenpond mit einem Sumpf und einem Schaufelrad. Die Dimensionen des Algenponds, insbesondere das Verhältnis zwischen Pondoberfläche und Wassertiefe, sind nicht typisch und nur zwecks einer besseren Darstellbarkeit so gewählt. Normalerweise ist sowohl die Kanalbreite als auch die Kanallänge um ein Vielfaches größer als die Wassertiefe.

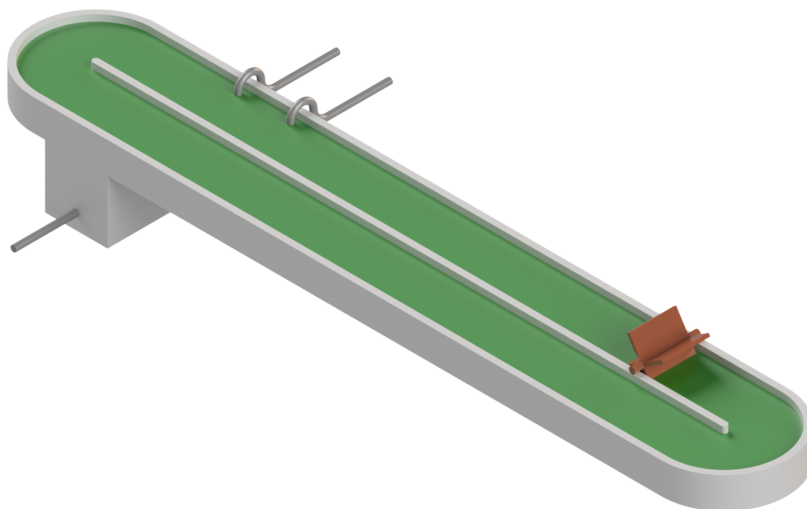


Abbildung 4.1: Beispiel eines Algenponds

In Abbildung 4.2 ist die Geometrie des Algenponds mit den in dieser Arbeit verwendeten Maßen dargestellt.

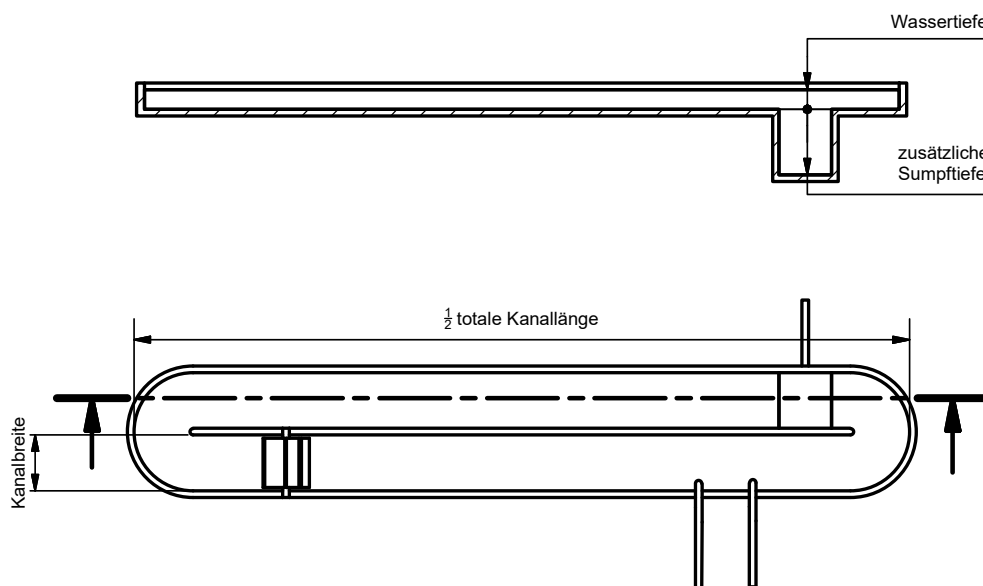


Abbildung 4.2: Abmessungen eines Algenponds

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell und die damit durchgeführten Untersuchungen sind für offene Algenponds gültig, die die oben beschriebene kanalartige Geometrie aufweisen. Raceway-Ponds werden in sehr unterschiedlichen Größen betrieben. HUESEMANN ET AL. 2016 verwendete bei seinen Versuchen Algenponds mit einem Wasservolumen von 0.8 m^3 und einer Oberfläche von 3 m^2 . Der Versuchspond von JIMÉNEZ ET AL. 2003a und JIMÉNEZ ET AL. 2003b hatte ein Wasservolumen von 135 m^3 und eine Oberfläche von 450 m^2 . In der Studie von DAVIS ET AL. 2016 werden für die kommerzielle Anwendung Raceway-Ponds mit einem Wasservolumen von 2052 m^3 und einer Oberfläche von 8924 m^2 (2.2 acre-Pond) als realistisch erachtet. Dieselbe Studie führt als ebenfalls realisierbare Version einen Serpentina-Pond mit einem Wasservolumen von 9246 m^3 und einer Oberfläche von $40\,200 \text{ m}^2$ (10 acre-Pond) auf. In einer großindustriellen Produktionsanlage sind die Algenponds dann zu einem Gesamtsystem zusammengeschlossen, so dass die gesamte Wasseroberfläche aller Algenponds für einen Standort im Bereich von 2000 ha (5000 acre) liegt.

4.2 Chemisches Gleichgewicht

Das Wasser eines Algenponds ist die Nährlösung der Algen und enthält alle für das Wachstum notwendigen Stoffe. Im Allgemeinen besteht das Pondwasser aus einer Vielzahl von Komponenten, die zum einen gewollt zugegeben werden, um die Nährstoffbedürfnisse der Algen zu erfüllen und zum anderen durch Umwelteinflüsse, wie z. B. Regen, ungewollt in das Pondwasser gelangen. Typische Nährlösungen für Algen, die

bei experimentellen Untersuchungen des Wachstumsverhaltens verwendet werden, sind die Medien von SCHLÖSSER 1982 und ZARROUK ET AL. 1968. Für die Produktion von Algen im industriellen Maßstab sind diese auf Grund vieler und teurer Zusatzstoffe nicht geeignet, weshalb dort mit weniger komplexen und dadurch günstigeren Nährlösungen gearbeitet werden muss [RAOOF ET AL. 2006].

Für das Simulationsmodell des Algenponds wird angenommen, dass das Pondwasser aus den Komponenten H_2O , H^+ , OH^- , Na^+ , Cl^- , CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} besteht¹.

Der Einfluss von Phosphaten und Aminen wird folglich nicht berücksichtigt. Dies ist gerechtfertigt, da sich diese Arbeit vereinfacht auf das generelle Verhalten eines Algenponds mit dem Schwerpunkt der Einbringungen und Verwertung von CO_2 konzentriert und davon ausgegangen wird, dass andere als die aufgezählten Komponenten keinen Einfluss ausüben.

Die Komponenten im Pondwasser sind nach ZEEBE & WOLF-GLADROW 2001 Teil folgender chemischer Gleichgewichtsreaktionen:



Die Beschreibung der chemischen Gleichgewichte erfolgt durch empirische scheinbare Gleichgewichtskonstanten², die von der Temperatur T und der Salinität³ S abhängen. Die spezifische Partialstoffmenge m_i ist die Stoffmenge einer Komponente i bezogen auf die Gesamtmasse der Flüssigkeit. Die Salinität S ist der Massenanteil der Summe aller ionischen Spezies (ausgenommen OH^- und H^+) in der Flüssigkeit. Die spezifische Partialstoffmenge von H_2O ist bereits der Gleichgewichtskonstante K_W enthalten. Die Berechnungsgleichungen für die Gleichgewichtskonstanten sind DICKSON ET AL. 2007 entnommen. Die Gleichgewichtskonstante K_W wird dabei nach MILLERO 1995 berechnet und die Konstanten K_1 und K_2 werden nach LUEKER ET AL. 2000 berechnet:

$$\begin{aligned} K_W &= m_{\text{H}^+} \cdot m_{\text{OH}^-} \\ \ln \frac{K_W}{(k_0)^2} &= \frac{-13847.26}{T} + 148.9652 - 23.6521 \cdot \ln T \dots \\ &+ \left(\frac{118.67}{T} - 5.977 + 1.0495 \cdot \ln T \right) \cdot S^{\frac{1}{2}} - 0.01615 \cdot S \end{aligned} \quad (4.4)$$

T in K; S in Massen-%; $k_0 = \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{FI}}}$

¹ In dieser Arbeit bezeichnet CO_2 die Summe aus physikalisch gelöstem CO_2 und Kohlensäure H_2CO_3 .

² Scheinbare Gleichgewichtskonstanten werden üblicherweise mit Konzentrationsmaßen formuliert. In dieser Arbeit werden spezifischen Partialstoffmengen m_i verwendet.

³ auch Salzgehalt

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{m_{\text{H}^+} \cdot m_{\text{HCO}_3^-}}{m_{\text{CO}_2}} \\
\log_{10} \frac{K_1}{k_0} &= \frac{-3633.86}{T} + 61.2172 - 9.67770 \cdot \ln T + 0.911555 \cdot S - 0.0001152 \cdot S^2 \\
T \text{ in K; } S \text{ in Massen-}\% &; k_0 = \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{FI}}}
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
K_2 &= \frac{m_{\text{H}^+} \cdot m_{\text{CO}_3^{2-}}}{m_{\text{HCO}_3^-}} \\
\log_{10} \frac{K_2}{k_0} &= \frac{-471.78}{T} - 25.9290 + 3.16967 \cdot \ln T + 0.01781 \cdot S - 0.0001122 \cdot S^2 \\
T \text{ in K; } S \text{ in Massen-}\% &; k_0 = \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{FI}}} .
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Die Alkalinität A_T wird in dieser Arbeit nach folgender Definition verwendet:

$$A_T = c_{\text{HCO}_3^-} + 2 \cdot c_{\text{CO}_3^{2-}} + c_{\text{OH}^-} - c_{\text{H}^+}, \tag{4.7}$$

wobei $c_{\text{HCO}_3^-}$, $c_{\text{CO}_3^{2-}}$, c_{OH^-} und c_{H^+} die molaren Konzentrationen der Komponenten HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- und H^+ in der Einheit $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$ sind.

4.3 Physikalische Eigenschaften von Brack- und Meerwasser

Die physikalischen Eigenschaften von Flüssigkeiten sind allgemein von deren Zusammensetzung sowie dem vorherrschenden Druck p und der Temperatur T abhängig. In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass die physikalischen Eigenschaften des Pondwassers nur von der Temperatur T sowie der Salinität S abhängen. Folglich wird davon ausgegangen, dass die Salinität ausreichend ist um den Einfluss der Zusammensetzung auf die physikalischen Eigenschaften abzubilden.

Für die Beschreibung der physikalischen Eigenschaften des Pondwassers werden die empirischen Gleichungen von SHARQAWY ET AL. 2010 verwendet. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Salinität der in Arbeit untersuchten Fälle so wie im Brack- oder Meerwasser durch NaCl dominiert wird. Die verwendeten Gleichungen sind für einen atmosphärischen Druck von 1×10^5 Pa ausgelegt. Da sich der Luftdruck an den betrachteten Standorten der Algenponds nicht signifikant von diesem Druck unterscheidet, ist ein Verzicht auf eine druckabhängige Berechnung der physikalischen

Eigenschaften gerechtfertigt. Ein Großteil der Gleichungen ist für einen Temperaturbereich $10^\circ\text{C} < T < 120^\circ\text{C}$ und Salinitätsbereich $0\% < S < 12\%$ gültig. Bei der Berechnung der Algenponds treten teilweise Temperaturwerte $0^\circ\text{C} < T < 10^\circ\text{C}$ außerhalb dieses Gültigkeitsbereichs auf. Auf Grund des geringen Unterschieds zum relativ großen Gültigkeitsbereich wird davon ausgegangen, dass die Gleichungen trotzdem mit ausreichender Genauigkeit verwendet werden können.

Ein alternativer Satz an empirischen Gleichungen stammt von NAYAR ET AL. 2016, wobei dieser auch eine Druckabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften von bis zu 120 bar berücksichtigt. Ein alternatives Modell zur Berechnung ist die *Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010* von IOC ET AL. 2010. In diesem Model werden von einer fundamentalen Gibbsfunktion alle Eigenschaften abgeleitet.

4.4 Beschreibung der Lichtintensität im Pondwasser

Die Lichtintensität im Pondwasser ist ein wichtiger Einflussfaktor auf das Wachstum der Algen und wird deshalb in Abhängigkeit von der Wassertiefe beschrieben. Licht, das von der Umgebung auf eine Wasseroberfläche trifft, wird zum Teil reflektiert. Der nicht-reflektierte Anteil tritt in das Wasser ein und wird entlang der Wassertiefe absorbiert. Dies führt zu einer Abnahme der Lichtintensität mit zunehmender Wassertiefe.

Die Lichtintensität I_0 an der Wasseroberfläche ist von der einfallenden Lichtintensität I_{Global} , den Brechungswinkeln n_1 und n_2 des Wassers und der Luft sowie dem Einfallswinkel θ der Lichtstrahlen und somit vom Stand der Sonne abhängig.

Der Anteil an Licht, der nicht reflektiert wird und somit als Lichtintensität I_0 an der Oberfläche in das Wasser Eintritt, wird mit den Fresnelschen Formeln für unpolarisiertes Licht berechnet [HECHT 1987]:

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cdot \cos \theta - n_2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta\right)^2}}{n_1 \cdot \cos \theta + n_2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta\right)^2}} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$R_p = \left(\frac{n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta\right)^2} - n_2 \cdot \cos \theta}{n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \theta\right)^2} + n_2 \cdot \cos \theta} \right)^2 \quad (4.9)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot (R_s + R_p) \quad (4.10)$$

$$I_0 = (1 - R) \cdot I_{Global}. \quad (4.11)$$

Der Einfallswinkel θ ist vom Standort des Algenponds und der dort lokalen Zeit LZ abhängig. Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen von DUFFIE & BECKMAN 1980 und BAKIRCI 2009.

Der Einfallswinkel θ ist eine Funktion der Deklination δ , des Breitengrads LAT und des Stundenwinkels ω :

$$\theta = \cos^{-1} (\cos \delta \cdot \cos LAT \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin LAT) . \quad (4.12)$$

Die Deklination δ ist abhängig von der Anzahl D an Tagen, die im aktuellen Jahr seit dem 1. Januar vergangen sind, und wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \frac{360^\circ \cdot (D + 284 \text{ d})}{365 \text{ d}} . \quad (4.13)$$

Der Stundenwinkel ω wird aus der solaren Zeit SZ berechnet:

$$\omega = \frac{15^\circ}{\text{h}} \cdot (12 \text{ h} - SZ) . \quad (4.14)$$

Die solare Zeit SZ erhält man durch Korrektur der lokalen Zeit LZ in h um den Wert ZG der Zeitgleichung und den Abstand zwischen dem Meridian der Zeitzone ZZ und dem tatsächlichen Längengrad LON des Standorts.

$$B = \frac{360^\circ \cdot (D - 81 \text{ d})}{365 \text{ d}} \quad (4.15)$$

$$ZG = 9.87 \text{ h} \cdot \sin(2 \cdot B) - 7.53 \text{ h} \cdot \cos B - 1.5 \text{ h} \cdot \sin B \quad (4.16)$$

$$SZ = LZ + \left(\frac{LON}{\frac{15^\circ}{\text{h}}} - ZZ \right) + \frac{ZG}{60} . \quad (4.17)$$

Das Licht, das an der Wasseroberfläche mit der Lichtintensität I_0 eintritt, wird im Wasser absorbiert. Diese Absorption erfolgt hauptsächlich durch die im Wasser vorhandene Biomasse der Alge und führt zu einer Abnahme der Lichtintensität mit zunehmender Wassertiefe. Die Lichtintensität I in einer bestimmten Wassertiefe ist abhängig von der Lichtintensität I_0 an der Wasseroberfläche, der Länge l des Weges, die das Licht zu dieser Tiefe im Algenpond zurück gelegt hat, und der Biomassekonzentration C_{Bio} im Pond. Der Einfluss der Absorption wird durch ein Lambert-Beer Gesetz von JUPSIN ET AL. 2003 beschrieben, das die zwei Extinktionskoeffizienten K_{e1} und K_{e2} enthält:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(K_{e1} + C_{Bio} \cdot K_{e2}) \cdot l} . \quad (4.18)$$

Für die Berechnung der Absorption im Wasser wird der Einfallswinkel des Lichts nicht berücksichtigt. Die gesamte Weglänge des Lichts ist damit identisch zur jeweiligen Wassertiefe.

Ein alternativer Ansatz, der neben der Lichtabsorption auch Streueffekte berücksichtigt, ist das Modell von CORNET ET AL. 1992a, CORNET ET AL. 1992b und CORNET ET AL. 1994.

4.5 Stoff- und Energieaustausch zwischen Flüssig- und Gasphase

Für die Beschreibung des Algenponds werden drei Phasen berücksichtigt:

- die Flüssigphase im Algenpond (Pondwasser),
- die Gasphase der Umgebung (Umgebungsluft), die im Kontakt mit der Oberfläche des Pondwassers steht und
- die Gasphase, die als dispers verteilte Blasen in der Flüssigphase vorliegt und durch die Begasung mit Tellerbelüftern oder Schläuchen eingebracht wird.

Zwischen dem Pondwasser und der Umgebungsluft sowie zwischen dem Pondwasser und der Gasphase der Begasung findet Stoff- und Energieaustausch statt, der in den folgenden Abschnitten näher betrachtet wird. Die Beschreibung stützt sich dabei auf Grund der verschiedenen physikalischen Vorgänge, die für den Austausch ursächlich sind, auf mehrere, meist empirische, Ansätze.

Prinzipiell kann jede Komponente, die in irgendeiner der drei Phasen vorhanden ist, am Stoffaustausch teilnehmen. In dieser Arbeit wird jedoch davon ausgegangen, dass nur die flüchtigen Komponenten CO_2 , N_2 und O_2 zwischen Gas- und Flüssigphase ausgetauscht werden. Der Stoffaustausch zwischen dem Pondwasser und der Umgebungsluft wird in Abschnitt 4.5.2 und zwischen Pondwasser und der Gasphase der Begasung in Abschnitt 4.5.3 näher betrachtet. Für die Beschreibung dieser Vorgänge wird der Zusammenhang zwischen den Konzentrationen in Gas- und Flüssigphase im Gleichgewicht benötigt. Dieser wird durch das Henrysche Gesetz beschrieben, das in Abschnitt 4.5.1 näher erläutert wird.

Neben den flüchtigen Komponenten wird zusätzlich der Stoffaustausch von H_2O zwischen dem Pondwasser und der Umgebungsluft auf Grund von Kondensations- und Verdunstungsvorgängen berücksichtigt. Der empirische Ansatz dafür wird in Abschnitt 4.5.4 erläutert.

Der Eintrag von Energie in das Pondwasser durch Sonnenstrahlung und der konvektive sowie durch Strahlung verursachte Energieaustausch zwischen Pondwasser und Umgebung wird in Abschnitt 4.5.5 erläutert.

Der Energieaustausch zwischen dem Pondwasser und dem Untergrund sowie dem Pondwasser und der Gasphase der Begasung wird nicht berücksichtigt.

4.5.1 Gas-Flüssig-Gleichgewicht

Die Beschreibung des Gas-Flüssig-Gleichgewichts erfolgt durch das Henrysche Gesetz, das den Zusammenhang zwischen dem Partialdruck p_i der Komponente i im Gas mit deren Konzentration c_i^l in der Flüssigkeit durch den Henry-Koeffizienten He_i beschreibt. Dabei wird angenommen, dass sich die Gasphase als ideales Gas verhält und die Komponente i im Zustand unendlicher Verdünnung in der Flüssigkeit vorliegen. Der

Partialdruck p_i kann auch mit dem Molanteil y_i im Gas und dem Gesamtdruck p im Gas ausgedrückt werden [SANDER 2015]:

$$c_i^l = He_i \cdot p_i = He_i \cdot y_i \cdot p. \quad (4.19)$$

In dieser Arbeit werden die Komponenten CO_2 , N_2 und O_2 als flüchtig betrachtet und mit dem Henryschen-Gesetz beschrieben. Die übrigen Komponenten, mit Ausnahme von H_2O , dessen Stoffaustausch rein empirisch beschrieben wird, nehmen nicht am Stoffaustausch zwischen zwei Phasen teil.

Zwischen CO_2^g in der Gasphase und CO_2 in der Flüssigphase herrscht ein Gleichgewicht, das mit folgender Gleichgewichtsreaktion beschrieben werden kann:



Zur Berechnung des Henry-Koeffizienten He_{CO_2} für CO_2 wird zuerst die von der Temperatur T und der Salinität S der Flüssigkeit abhängige scheinbare Gleichgewichtskonstante K für diese Gleichgewichtsreaktion mit einer empirischen Gleichung nach DICKSON ET AL. 2007 und WEISS 1974 berechnet:

$$\begin{aligned} \ln \frac{K}{k_0} = & 93.4517 \cdot \left(\frac{100}{T} \right) - 60.2409 + 23.3585 \cdot \ln \frac{T}{100} \dots \\ & + S \cdot \left(0.023517 - 0.023656 \cdot \left(\frac{T}{100} \right) + 0.0047036 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

T in K; S in Massen-‰; $k_0 = \frac{\text{mol}}{\text{kg}_{\text{Fl}}}$.

Mit Hilfe der Gleichgewichtskonstante K kann dann der Henry-Koeffizient He_{CO_2} für CO_2 berechnet werden:

$$He_{\text{CO}_2} = K \cdot \frac{\varrho^l}{1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}} \quad He \text{ in } \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \text{ Pa}}; \quad \varrho^l \text{ in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (4.22)$$

Zur Berechnung der Henry-Koeffizienten für N_2 und O_2 werden die Werte für die Henry-Koeffizienten $He_i(T_{\text{ref}}, S_{\text{ref}})$ beim Referenzzustand von reinem Wasser bei $T_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$ und $S_{\text{ref}} = 0\text{‰}$ dem Tabellenwerk von SANDER 2015 entnommen und an die jeweilige Temperatur T und Salinität S der Flüssigkeit angepasst. Der Einfluss der Temperatur wird über die molare Lösungsenthalpie $\Delta\bar{H}_{\text{Solv},i}$ der Komponente i in der Flüssigkeit berücksichtigt:

$$He_i(T, S_{\text{ref}}) = He_i(T_{\text{ref}}, S_{\text{ref}}) \cdot \exp \left(-\frac{\Delta\bar{H}_{\text{Solv},i}}{\bar{R}} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \right). \quad (4.23)$$

Der Einfluss der Salinität auf den Henry-Koeffizienten wird mit dem Schema von JOHNSON 2010 berücksichtigt. In diesem wird die komponentenspezifische Setschenow-

Konstante K_{Si} verwendet, mit der die Veränderung des Henry-Koeffizienten auf Grund der Salinität S berücksichtigt werden kann:

$$He_i(T, S) = He_i(T, S_{ref}) \cdot 10^{(K_{Si} S)}. \quad (4.24)$$

Der Setschenow-Konstante K_{Si} wird dabei aus dem molaren Volumen V_{bi} der Komponenten i am Siedepunkt und der Konstante K_{Si}^\emptyset berechnet:

$$\begin{aligned} \theta &= 7.33532 \times 10^{-4} + 3.39615 \times 10^{-5} \cdot \ln K_{Si}^\emptyset \\ &\quad - 2.40888 \times 10^{-6} \cdot (\ln K_{Si}^\emptyset)^2 + 1.57114 \times 10^{-7} \cdot (\ln K_{Si}^\emptyset)^3 \\ K_{Si} &= \theta \cdot \ln V_{bi}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Das molaren Volumen V_{bi} der Komponenten i am Siedepunkt kann mit der Additionsmethode von Schrödinger berechnet werden [PARTINGTON 1949]. K_{Si}^\emptyset ist eine Konstante, die einem Henry-Koeffizient der Komponente i in reinem Wasser und bei einer Temperatur $T = 25^\circ\text{C}$ entspricht. Für K_{Si}^\emptyset werden die Werte von JOHNSON 2010 verwendet.

4.5.2 Stoffaustausch von flüchtigen Komponenten zwischen Pondwasser und Umgebungsluft

Der Stoffaustausch der flüchtigen Komponenten CO_2 , N_2 und O_2 zwischen dem Pondwasser und der Umgebungsluft wird mit dem Schema von JOHNSON 2010 beschrieben. Hier wird ein Ansatz gewählt, der den Stoffübergangswiderstand modellmäßig vollständig in die Flüssigphase legt (Overall Liquid Konzept) und diesen durch den flüssigkeitsseitigen Stoffübergangskoeffizienten k^l und den gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten k^g ausdrückt. Es wird angenommen, dass an der Phasengrenze zwischen der Konzentration c_i^l der Komponente i in der Flüssigkeit und dem Molanteil y_i in der Gasphase Gleichgewicht vorliegt und dass dieses mit dem Henryschen-Gesetz und dem Henry-Koeffizienten He_i beschrieben werden kann. Der zwischen den Phasen übertragene Stoffmengenstrom \dot{N}_i der Komponente i berechnet sich dann nach

$$\dot{N}_i = \left(\frac{1}{k^l} + \frac{1}{k^g \cdot K_{Hi}} \right)^{-1} \cdot (y_i \cdot p \cdot He_i - c_i^l). \quad (4.26)$$

Der dimensionslose Henry-Koeffizient K_{Hi} wird nach folgender Formel berechnet:

$$K_{Hi} = \frac{12.2}{\left[\frac{He_i}{\frac{\text{mol}}{\text{Pa}}} \right] \cdot 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}}. \quad (4.27)$$

Der flüssigkeitsseitige Stoffübergangskoeffizienten k^l ist eine Funktion der Schmidt-Zahl Sc_i^l und der Windgeschwindigkeit v_{wind} . Die Schmidt-Zahl Sc_i^l der Komponente i

in der Flüssigkeit ist abhängig von der dynamischen Viskosität η^l und der Dichte ϱ^l der Flüssigkeit sowie dem Diffusionskoeffizienten D_i^l der Komponente i in der Flüssigkeit:

$$Sc_i^l = \frac{\eta^l}{\varrho^l \cdot D_i^l} \quad (4.28)$$

$$Sc_{600} = 600 \quad (4.29)$$

$$\left[\frac{k^l}{\frac{\text{cm}}{\text{h}}} \right] = \left(0.222 \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right]^2 + 0.333 \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] \right) \cdot \left(\frac{Sc_i^l}{Sc_{600}} \right)^{-0.5} \quad (4.30)$$

Um den Diffusionskoeffizient $D_i^l(T, S)$ der Komponenten i in der Flüssigkeit für eine bestimmte Temperatur T und Salinität S zu berechnen, wird der Diffusionskoeffizient $D_i^l(T_{ref}, S_{ref})$ beim Referenzzustand mit Hilfe der Stokes-Einstein-Gleichung an die jeweiligen Bedingungen von T und S angepasst:

$$D_i^l(T, S) = D_i^l(T_{ref}, S_{ref}) \cdot \frac{\eta^l(T_{ref}, S_{ref})}{\eta^l(T, S)} \cdot \frac{T}{T_{ref}} \quad (4.31)$$

Die Anpassung des Diffusionskoeffizienten an die tatsächlichen Werte von T und S erfolgt mit Hilfe der Verhältnisse der Viskositäten und Temperaturen der Flüssigkeit im Referenzzustand und tatsächlichen Zustand. Der Referenzzustand ist reines Wasser mit einer Temperatur $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ und einer Salinität $S_{ref} = 0\text{‰}$ wobei die Komponente i im Zustand unendlicher Verdünnung vorliegt.

Der gaseitige Stoffübergangskoeffizient k^g wird aus der Schmidt-Zahl Sc_i^g , der Windgeschwindigkeit v_{Wind} , dem Windparameter v_* sowie der Karman-Konstante κ berechnet. Die Schmidt-Zahl Sc_i^g der Komponente i in der Gasphase ist abhängig von der dynamischen Viskosität η^g und der Dichte ϱ^g des Gases sowie des Diffusionskoeffizienten D_i^g der Komponente i in der Gasphase. Der Widerstandsbeiwert C_D wird mit einer empirischen Funktion in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v_{Wind} ermittelt:

$$Sc^g = \frac{\eta^g}{\varrho^g \cdot D_i^g} \quad (4.32)$$

$$\left[\frac{v_*}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] = \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] \cdot \sqrt{6.1 \times 10^{-4} + 6.3 \times 10^{-5} \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right]} \quad (4.33)$$

$$C_D = 1 \times 10^{-3} \cdot \left(0.61 + 0.063 \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] \right) \quad (4.34)$$

$$\left[\frac{k^g}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] = 1 \times 10^{-3} + \left[\frac{v_*}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] \cdot \frac{1}{13.3 \cdot (Sc^g)^{0.5} + (C_D)^{-0.5} - 5 + \frac{\ln Sc^g}{2 \cdot \kappa}} \quad (4.35)$$

4.5.3 Begasung des Pondwassers mit Schläuchen und Tellerbelüftern

Das Pondwasser wird mit einem beliebig zusammengesetztem Gemisch aus CO_2 , N_2 und O_2 mit Hilfe von Schläuchen oder Tellerbelüftern begast. Dabei wird das Gasgemisch in der Wassertiefe l_{Beg} des Schlauches oder Belüfters in das Pondwasser als disperse Phase aus Blasen eingebracht. Die Blasen steigen dann auf und tauschen mit der kontinuierlichen Flüssigphase, dem Pondwasser, die Komponenten CO_2 , N_2 und O_2 aus. Der Stoffaustausch kommt zum Erliegen, wenn die Blasen vollständig gelöst sind oder sie die Flüssigphase an der Wasseroberfläche verlassen. Es wird angenommen, dass die Gasphase einer Blase und die Flüssigphase jeweils über die Wassertiefe homogen durchmischt sind und im thermischen Gleichgewicht stehen. Der Druck in der Gasblase ist identisch mit dem Druck in der Flüssigkeit in der jeweiligen Tiefe.

Der Stoffmengenstrom $\dot{N}_{Beg,i}$ einer Komponente i , der bei diesem Vorgang zwischen der gesamten Gas- und Flüssigphase ausgetauscht wird, berechnet sich aus der Stoffmenge $\Delta N_{Blase,i}$, die zwischen einer Gasblase und dem Pondwasser beim Aufstieg einer Blase ausgetauscht wird, und der Frequenz f mit der die Blasen in der Tiefe l gebildet werden:

$$\dot{N}_{Beg,i} = f \cdot \Delta N_{Blase,i}. \quad (4.36)$$

Um die ausgetauschten Stoffmenge $\Delta N_{Blase,i}$ zu bestimmen, wird die Änderung $\frac{dN_{Blase,i}}{dl}$ der Stoffmenge einer Blase über die Wassertiefe l von der Tiefe l_{Beg} der Begasung bis zur Wasseroberfläche, $l = 0$, integriert:

$$\Delta N_{Blase,i} = \int_{l_{Beg}}^0 \frac{1}{v_{Blase}} \cdot k_i \cdot d_{Blase}^2 \cdot \pi \cdot \Delta c_i \, dl. \quad (4.37)$$

Die differentielle Änderung $\frac{dN_{Blase,i}}{dl}$ ist dabei abhängig von der Aufstiegs geschwindigkeit v_{Blase} und dem Durchmesser d_{Blase} der Blase sowie dem Stoffdurchgangskoeffizienten k_i und der treibenden Konzentrationsdifferenz Δc_i der Komponente i .

$$\frac{dN_{Blase,i}}{dl} = \frac{1}{v_{Blase}} \cdot k_i \cdot d_{Blase}^2 \cdot \pi \cdot \Delta c_i. \quad (4.38)$$

Gleichzeitig wird auch die Änderung $\frac{dp}{dl}$ des Drucks über die Wassertiefe integriert, da der Druck für die zuvor genannte Integration eine notwendige Größe darstellt und dafür der in einer bestimmten Wassertiefe l herrschende Druck $p(l)$ bekannt sein muss.

$$\frac{dp}{dl} = \varrho^l \cdot g \quad (4.39)$$

$$p(l) = p(l_{Beg}) + \int_{l_{Beg}}^l \varrho^l \cdot g \, dl. \quad (4.40)$$

Die Blasenauftiegs geschwindigkeit v_{Blase} wird mit der Gleichung von SHANG ET AL. 2010 berechnet. Diese Berechnungsmethode verwendet einen Widerstandsbeiwert C_D , der von der Reynolds-Zahl Re abhängt. Die Reynolds-Zahl wird dabei aus dem Blasen Durchmesser d_{Blase} , der Aufstiegs geschwindigkeit v_{Blase} der Blase sowie der Dichte ϱ^l und der dynamischen Viskosität η^l der flüssigen Phase um die Blase berechnet:

$$Re = \frac{\varrho^l \cdot d_{Blase} \cdot v_{Blase}}{\eta^l} \quad (4.41)$$

$$C_D(Re) = \begin{cases} \frac{18.5}{Re^{0.6}} & \text{für } 1 < Re < 1000 \\ 0.44 \cdot Re & \text{für } Re \geq 1000 \end{cases} \quad (4.42)$$

$$v_{Blase} = \frac{4 \cdot d_{Blase} \cdot g}{3 \cdot C_D}. \quad (4.43)$$

Der Stoffdurchgangskoeffizient k_i für die Komponente i wird nach ZHANG ET AL. 2007 berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass der Stoffübergangswiderstand allein in der Flüssigphase liegt und die Gasphase homogen durchmischt ist. Die Berechnung des Diffusionskoeffizienten D_i^l erfolgt nach Gleichung (4.31).

$$Sc^l = \frac{\eta^l}{\varrho^l \cdot D_i^l} \quad (4.44)$$

$$k_i = \frac{D_i^l \left(2 + 0.015 \cdot Re^{0.89} \cdot (Sc^l)^{0.7} \right)}{d_{Blase}}. \quad (4.45)$$

Das thermische Verhalten der Gasblase wird mit dem idealen Gasgesetz beschrieben. Das Blasen volumen V_{Blase} und daraus dann der Blasen Durchmesser d_{Blase} wird aus der Temperatur T , dem Druck p und der Gesamtstoffmenge N_{Blase} der Blase berechnet:

$$V_{Blase} = \frac{N_{Blase} \cdot \bar{R} \cdot T}{p} \quad (4.46)$$

$$d_{Blase} = \left(\frac{6 \cdot V_{Blase}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (4.47)$$

Die für den Stoffaustausch treibende Kraft ist die Konzentrationsdifferenz Δc_i an der Phasengrenze zwischen Flüssig- und Gasphase. Diese ist die Differenz zwischen der Konzentration c_i^l der Komponente i in der Flüssigphase und der Gleichgewichtskonzentration an der Phasengrenze auf der Gasseite, welche mit dem Henryschen Gesetz nach Gleichung (4.19) beschrieben wird.

$$\Delta c_i = He_i \cdot p_i - c_i^l = He_i \cdot p \cdot y_i - c_i^l. \quad (4.48)$$

4.5.4 Stoff- und Energieaustausch durch Kondensation und Verdunstung von Wasser

Die Kondensation und Verdunstung von Wasser wird mit dem Ansatz von SARTORI 1996 erfasst. Dabei wird zuerst eine Wärmestromdichte \dot{q} berechnet und diese dann auf die am Austausch beteiligte Wasseroberfläche A_{Pond} des Algenponds zum Wärmestrom \dot{Q} skaliert. Die Berechnung des absoluten Stoffmengenstroms \dot{N} erfolgt analog mit der Stoffmengenstromdichte \dot{n} :

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A_{Pond} \quad (4.49)$$

$$\dot{N} = \dot{n} \cdot A_{Pond}. \quad (4.50)$$

Die Wärmestromdichte $\dot{q}_{Verd/Kond}$, die bei der Verdampfung oder Kondensation des Wassers von oder an der Wasseroberfläche auftritt, wird nach Gleichung (4.51) berechnet. In diese Gleichung fließt sowohl die Windgeschwindigkeit v_{Wind} und der Druck p als auch der Sättigungsdampfdruck p_{s,H_2O} von Wasser bei der aktuellen Temperatur T des Pondwassers und am Taupunkt der Umgebungsluft T_{TP} ein.

$$\left[\frac{\dot{q}_{Verd/Kond}}{\frac{W}{m^2}} \right] = 26.639 \times 10^{-1} \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{m}{s}} \right]^{0.5} \cdot \left(\frac{p_{s,H_2O}(T) - p_{s,H_2O}(T_{TP})}{p} \right). \quad (4.51)$$

Sobald die Wärmestromdichte $\dot{q}_{Verd/Kond}$ bekannt ist, kann aus dieser mit Hilfe der molaren Verdampfungsenthalpie $\Delta\bar{H}_{V,H_2O}$ von Wasser die Stoffmengenstromdichte $\dot{n}_{Verd/Kond}$ der Verdampfung oder Kondensation berechnet werden:

$$\dot{n}_{Verd/Kond} = \frac{\dot{q}_{Verd/Kond}}{\Delta\bar{H}_{V,H_2O}}. \quad (4.52)$$

4.5.5 Energieaustausch durch Strahlung und konvektivem Wärmeübergang

Der Energieaustausch zwischen der Wasseroberfläche des Algenponds und der Umgebung durch Strahlung und konvektivem Wärmeübergang wird mit den Gleichungen von SARTORI 1996 berechnet. Die Umrechnung von Wärme- und Stoffmengenstromdichten in die tatsächlich auftretenden Ströme erfolgt mit den Gleichungen (4.49) und (4.50).

Die durch Konvektion verursachte Wärmestromdichte \dot{q}_{Konv} ist abhängig von der Windgeschwindigkeit v_{Wind} sowie der Temperatur T des Pondwassers und der Temperatur T_{Amb} der Umgebungsluft:

$$\left[\frac{\dot{q}_{Konv}}{\frac{W}{m^2}} \right] = 39.183 \times 10^{-1} \cdot \left[\frac{v_{Wind}}{\frac{m}{s}} \right]^{0.5} \cdot \left[\frac{T - T_{Amb}}{K} \right]. \quad (4.53)$$

Der Energieaustausch durch Strahlung zwischen der Wasseroberfläche und der Umgebung wird mit den Gleichungen (4.54) und (4.55) beschrieben. Dabei wird zuerst die Temperatur T_{Sky} des Himmels mit Hilfe der Taupunkttemperatur T_{TP} der Umgebungsluft nach DUFFIE & BECKMAN 1980 berechnet. Aus dem Unterschied der Temperatur T des Pondwassers und der Temperatur T_{Sky} des Himmels sowie dem Emissionsgrad ϵ_{H_2O} kann dann die Wärmestromdichte \dot{q}_{Str} aufgrund von Strahlung berechnet werden:

$$T_{Sky} = T_{Amb} \cdot \left(\frac{T_{TP} - 73.15}{250} \right)^{\frac{1}{4}} \quad T_{Sky}, T_{Amb} \text{ und } T_{TP} \text{ in K} \quad (4.54)$$

$$\left[\frac{\dot{q}_{Str}}{\frac{W}{m^2}} \right] = \epsilon_{H_2O} \cdot \sigma \cdot \left(\left[\frac{T^4}{K} \right] - \left[\frac{T_{Sky}^4}{K} \right] \right). \quad (4.55)$$

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass jegliche nicht reflektierte Sonnenstrahlung vollständig vom Pondwasser absorbiert wird. Mit der Lichtintensität I_0 an der Wasseroberfläche aus Abschnitt 4.4 führt dies zu folgender Beschreibung der Wärmestromdichte \dot{q}_{Abs} aufgrund von Lichtabsorption:

$$\dot{q}_{Abs} = I_0. \quad (4.56)$$

4.6 Algenwachstum

Nachfolgend werden zwei verschiedene Algenwachstumsmodelle beschrieben. In Abschnitt 4.6.1 wird ein generisches Algenwachstumsmodell vorgestellt, das das Verhalten einer fiktiven Alge beschreibt. Abschnitt 4.6.2 behandelt das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis*. Dieses Modell ist eine modifizierte Form des generischen Algenwachstumsmodell, wobei die Parameter an experimentelle Daten angepasst sind. In Abschnitt 4.6.3 wird die optimale Konzentration der Alge mit dem Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* diskutiert.

4.6.1 Generisches Algenwachstumsmodell

In dieser Arbeit wird zunächst ein generisches Algenwachstumsmodell verwendet, um die Wachstumsrate μ der Algen zu berechnen. Die Wachstumsrate μ ist dabei abhängig vom verfügbaren Licht, der Temperatur und dem pH -Wert des Pondwassers:

$$\mu = \mu_{max} \cdot F_{Licht} \cdot F_{pH} \cdot F_{Temp} - \mu_{Death}. \quad (4.57)$$

Es wird angenommen, dass die Alge bei optimalen Bedingungen mit einer maximalen Wachstumsrate μ_{max} wächst und dass gleichzeitig ein Anteil der Alge mit einer konstanten Sterberate μ_{Death} abstirbt. Um die tatsächlichen, meist nicht optimalen, Bedingungen beim Algenwachstum zu berücksichtigen, wird die maximale Wachstumsrate μ_{max} durch sog. Einflussfaktoren F limitiert. Dadurch wird die Abweichung der

tatsächlichen Temperatur T von der für das Wachstum optimalen Temperatur T_{opt} , die Abweichung des tatsächlichen pH -Wertes von dem für das Wachstum optimalen pH -Wert pH_{opt} und die Limitierung des Wachstums auf Grund von unzureichender Lichtintensität I berücksichtigt.

Der Faktor F_{Licht} ist nach folgender Formel abhängig von der Lichtintensität I_{PAR} in der jeweiligen Tiefe des Pondwassers und der Lichtabhängigkeit I_k der Alge [KURANO & MIYACHI 2005]:

$$F_{Licht} = \tanh \frac{I_{PAR}}{I_k}. \quad (4.58)$$

Die Alge verwertet dabei nicht das komplette Spektrum der Lichtintensität I , sondern nur den Anteil I_{PAR} des Lichts, der im photosynthetisch aktivem Bereich (PAR) liegt. Dieser wird zu $I_{PAR} = 0.5 \cdot I$ abgeschätzt. Daraus folgt:

$$F_{Licht} = \tanh \frac{0.5 \cdot I}{I_k}. \quad (4.59)$$

Es wird angenommen, dass die Alge bei hohen Lichtintensitäten mit Licht gesättigt ist und dass das Wachstum trotz Steigerung der Lichtintensität nicht weiter zunimmt. Inhibierungseffekte auf Grund von sehr hohen Lichtintensitäten und die Auswirkung von schnell wechselnde Hell-Dunkel-Zyklen (Flashing Light Effect) werden nicht berücksichtigt.

Der Einfluss des pH -Wertes wird mit dem Faktor F_{pH} beschrieben. Dieser Faktor beschreibt die Auswirkung der Abweichung des tatsächlichen pH -Wertes vom optimalen pH -Wert pH_{opt} durch eine symmetrische Dreiecksfunktion mit der Steigung pH_{dep} :

$$F_{pH} = 1 - |pH - pH_{opt}| \cdot pH_{dep}. \quad (4.60)$$

Der Temperatureinfluss auf das Algenwachstum wird durch den Faktor F_{Temp} beschrieben. Dieser Faktor beschreibt die Auswirkung der Abweichung der tatsächlichen Temperatur T zur optimalen Temperatur T_{opt} durch eine symmetrische Dreiecksfunktion mit der Steigung T_{dep} [CHAPRA 2008, c1997]:

$$F_{Temp} = 1 - |T - T_{opt}| \cdot T_{dep}. \quad (4.61)$$

Die Einflussfaktoren F können minimal einen Wert gleich null und maximal einen Wert gleich eins annehmen. Falls rechnerisch ein Wert kleiner null für F bestimmt wird, dann wird F gleich null gesetzt. Größere Werte als eins sind für F mathematisch nicht möglich:

$$F = \begin{cases} 0 & \text{für } F < 0 \\ F & \text{für } 0 \leq F \leq 1 \end{cases}. \quad (4.62)$$

Der Massenstrom \dot{M}_{Alge} der Alge, der durch das Wachstum entsteht oder durch das Absterben verschwindet, wird durch Integration über die Tiefe l_{Tiefe} des Algenponds bestimmt:

$$\dot{M}_{Alge} = \int_{l_{Tiefe}}^0 \mu \cdot A_{Pond} \cdot C_{Alge} dl_{Tiefe}. \quad (4.63)$$

Die Integration ist notwendig, da die Lichtintensität von der Wassertiefe abhängt und eine Einflussgröße für das Algenwachstum darstellt.

Wenn die Alge wächst, das heißt, wenn der Ausdruck im Integral von Gleichung (4.63) größer null ist, wird CO_2 und H_2O aus dem Pondwasser von der Alge verbraucht und O_2 in das Pondwasser abgegeben. Wenn die Alge stirbt, also wenn der Ausdruck im Integral kleiner null ist, wird von der Alge CO_2 und H_2O in das Pondwasser freigesetzt und O_2 verbraucht. Die Masse von jeder Komponente, die beim Prozess des Algenwachstums oder -sterbens verbraucht oder freigesetzt wird, ist abhängig vom Massenstrom \dot{M}_{Alge} und komponentenspezifischen Umwandlungsfaktoren. Die Umwandlungsfaktoren von H_2O und O_2 sind für Wachstum und Sterben der Alge identisch. Der Umwandlungsfaktor für CO_2 ist in manchen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen für das Algenwachstum größer als für das Algensterben. Damit wird berücksichtigt, dass CO_2 nicht komplett zurückgewonnen wird, sondern ein Teil unwiederbringlich für weiteres Wachstum verloren geht. Auf Grund der Ungleichheit der Umwandlungsfaktoren von CO_2 muss die Berechnung der umgesetzten Menge an CO_2 im Zuge der Integration des Massenstroms \dot{M}_{Alge} erfolgen.

4.6.2 Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis*

Für die Beschreibung der Algenspezies *Spirulina platensis* wird eine modifizierte Form des generischen Algenwachstumsmodells verwendet. Die Wachstumsrate μ von *Spirulina platensis* ist dabei von der Temperatur des Pondwassers und der verfügbaren Lichtintensität abhängig und wird wie folgt beschrieben:

$$\mu = \mu_{max} \cdot F_{Licht} \cdot F_{Temp} - \mu_{Death}. \quad (4.64)$$

Die Berechnung der limitierenden Faktoren F_{Licht} und F_{Temp} erfolgt auf die selbe Weise wie beim generischen Algenwachstumsmodell.

Die Sterberate μ_{Death} ist dagegen kein fester Parameter, sondern sowohl von der Temperatur als auch vom Wert von μ_{max} abhängig:

$$\mu_{Death} = \begin{cases} 0.035 \cdot \mu_{max} \cdot \frac{T-10^\circ\text{C}}{45^\circ\text{C}-10^\circ\text{C}} & \text{für } 10^\circ\text{C} \leq T \leq 45^\circ\text{C} \\ 0 & \text{für } T < 10^\circ\text{C} . \end{cases} \quad (4.65)$$

Es wird angenommen, dass die Alge bei Temperaturen unter $T = 10^\circ\text{C}$ inaktiv ist und bei Temperaturen zwischen $T = 10^\circ\text{C}$ und $T = 45^\circ\text{C}$ einen linearen Anstieg der Sterberate mit der Temperatur aufweist. Die maximale Sterberate wird bei $T = 45^\circ\text{C}$ erreicht und beträgt dann 3.5% der maximalen Wachstumsrate μ_{max} . Die Idee hinter dieser Formulierung basiert auf der Darstellung der Algenaktivität bei der Dunkelatmung von VONSHAK 1997.

Die Werte der Extinktionskoeffizienten K_{e1} und K_{e2} in Gleichung (4.18) sind von der Algenart abhängig und haben auf die berechnete Lichtintensität im Pondwasser einen maßgeblichen Einfluss. Diese berechnete Lichtintensität bestimmt in Abhängigkeit der Lichtabhängigkeit I_k das lichtabhängige Wachstumsverhalten der Alge. Für das Experiment, dessen Datenbasis zur Anpassung dieses Algenwachstumsmodells verwendet wird, ist nur die Lichtintensität an der Wasseroberfläche, jedoch nicht das Absorptionsverhalten der Alge bekannt. Folglich können die Extinktionskoeffizienten K_{e1} und K_{e2} und die Lichtabhängigkeit I_k nicht unabhängig von einander ermittelt werden. Der erste Extinktionskoeffizient hat keinen signifikanten Einfluss auf die Absorption des Lichts und wird zu $K_{e1} = 0$ gesetzt. Für den zweiten Extinktionskoeffizienten wird der von LEDUY & THERIEN 1977 ermittelte Wert für eine *Spirulina* Alge von $K_{e2} = 66.7 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ verwendet.

Das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* benötigt somit nur vier Anpassungsparameter: die maximale Wachstumsrate μ_{max} , die Lichtabhängigkeit I_k , die optimale Temperatur T_{opt} und die Temperaturabhängigkeit T_{dep} . Die Idee hinter dieser Modellformulierung ist, mit möglichst wenigen anpassbaren Parametern das Wachstumsverhalten zu beschreiben. Dabei wird angenommen, dass es ausreicht den Einfluss von Temperatur und Licht auf die Wachstumsrate zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass alle nicht berücksichtigten Einflussgrößen das Algenwachstum nicht (signifikant) limitieren. Im Bezug auf den nicht berücksichtigten pH -Wert wird davon ausgegangen, dass die Alge stets in ihrem optimalen pH -Bereich von 9.5 – 10.5 [JIMÉNEZ ET AL. 2003b] betrieben wird.

4.6.3 Optimale Konzentration der Alge

Die Wachstumsrate der Alge hängt beim Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* von der Konzentration C_{Alge} der Alge, der Temperatur T des Pondwassers und der Lichtintensität I_0 an der Wasseroberfläche ab. Die Konzentration der Alge ist davon die einzige Größe, die während des Betriebs in sinnvollerweise angepasst werden kann. Diese Anpassung geschieht durch die Wahl der jeweiligen Ernterate bzw. abgeernteten Masse an Alge, wodurch die Konzentration der Alge gezielt gesenkt werden kann. Eine gezielte Erhöhung der Algenkonzentration ist nur indirekt möglich, indem weniger Algenmasse abgeerntet wird als nachwächst. Es ist erstrebenswert den Algenpond bei der sog. optimalen Konzentration C_{Alge}^{opt} der Alge zu betreiben, bei der die Wachstumsrate und damit auch der Ertrag maximal sind. Diese optimale Konzentration kann mit dem Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* bestimmt werden.

Die Konzentration der Alge ist optimal, wenn die Wachstumsrate μ am Boden des Algenponds gerade den Wert null erreicht und am Umschlagspunkt von einer positiven auf eine negative Wachstumsrate liegt. Eine niedrigere Konzentration würde dazu führen, dass am Boden des Algenponds das verfügbare Licht und damit das Wachstumspotential nicht vollständig ausgeschöpft ist. Eine höhere Konzentration würde zu einer Wachstumsrate führen, die schon oberhalb des Bodens negativ wird, da die tieferen Schichten im Algenpond nicht ausreichend Licht bekommen und somit absterben.

Das Umstellen von Gleichung (4.64) unter der Bedingung, dass am Boden des Algenponds $l = l_{Tiefe}$ die Wachstumsrate μ zu null wird, führt zu

$$0 = \mu_{max} \cdot F_{Licht} \cdot F_{Temp} - \mu_{Death}. \quad (4.66)$$

Mit Gleichung (4.59) und (4.18) mit $K_{e1} = 0$ folgt daraus

$$0 = \mu_{max} \cdot \tanh\left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge}^{opt} \cdot l_{Tiefe}}\right) \cdot F_{Temp} - \mu_{Death}, \quad (4.67)$$

so dass

$$C_{Alge}^{opt} = -\frac{\ln\left(\frac{I_k}{0.5 \cdot I_0} \cdot \operatorname{atanh}\frac{\mu_{Death}}{F_{Temp} \cdot \mu_{max}}\right)}{K_e \cdot l_{Tiefe}}. \quad (4.68)$$

Die optimale Konzentration C_{Alge}^{opt} der Alge ist somit von der Lichtintensität I_0 an der Wasseroberfläche und der Temperatur T des Pondwassers abhängig. Weitere, nicht von der Umwelt abhängige, Einflussgrößen sind die Parameter μ_{max} , I_k , K_{e2} , T_{opt} und T_{dep} des Algenwachstumsmodells sowie die Wassertiefe l_{Tiefe} . Eine streng mathematische Herleitung der optimalen Konzentration C_{Alge}^{opt} der Alge ist im Anhang A aufgeführt.

Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der Wachstumsrate der Algen am Boden des Algenponds und der gesamten Wachstumsrate der Alge aufgetragen über die Konzentration der Alge C_{Alge} . Im Regelfall wird in Abbildungen nur die gesamte Wachstumsrate einer Alge gezeigt, die sich auf die gesamte Wassertiefe bezieht, und dann einfach nur Wachstumsrate genannt wird. Hier wird zusätzlich die Wachstumsrate am Boden des Algenponds gezeigt um den Umschlag von einer positiven zu einer negativen Wachstumsrate am Boden des Algenponds bei einer optimalen Konzentration C_{Alge}^{opt} der Alge zu verdeutlichen.

Die Wachstumsraten sind beispielhaft für zwei verschiedene Lichtintensitäten $I_0 = 250 \frac{W}{m^2}$ und $I_0 = 750 \frac{W}{m^2}$ an der Wasseroberfläche aufgetragen. Die Temperatur $T = 30^\circ C$ des Pondwassers und der Wassertiefe $l_{Tiefe} = 0.3 m$ sind konstant. Abbildung 4.3 wurde mit dem Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* und den in Tabelle 5.3 aufgeführten angepassten Parametern erstellt.

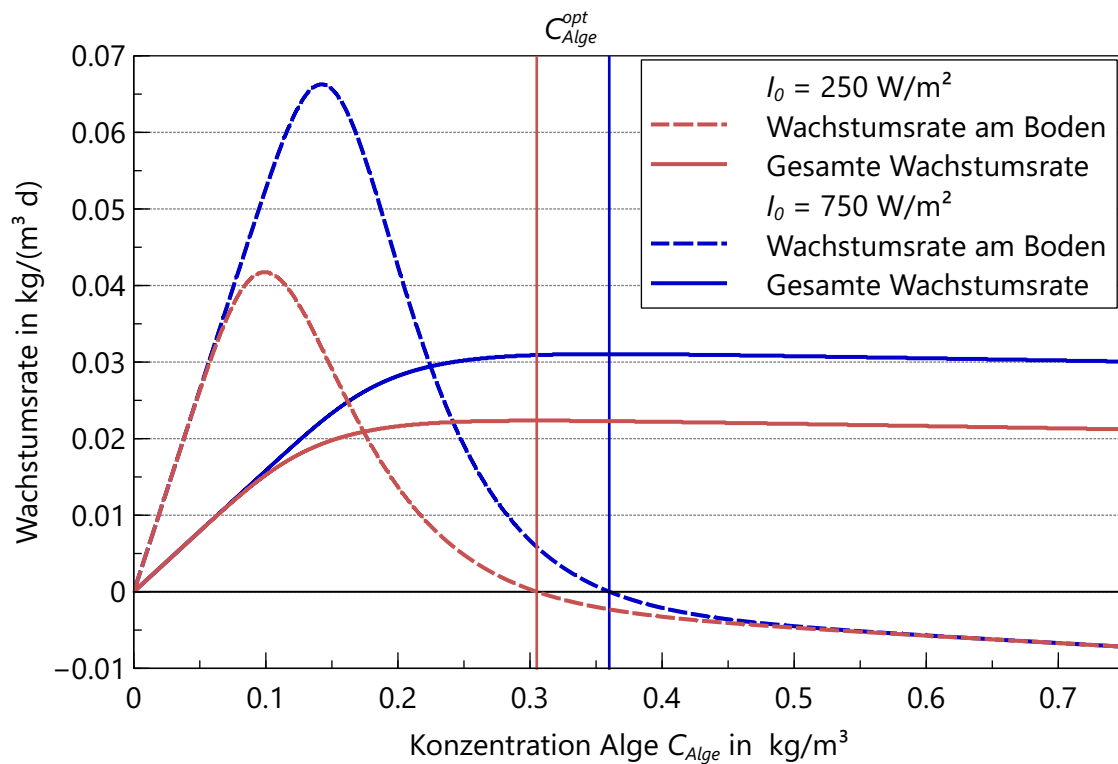


Abbildung 4.3: Einfluss der Konzentration der Alge auf die gesamte Wachstumsrate der Alge und die Wachstumsrate am Boden für zwei verschiedene Lichtintensitäten $I_0 = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und $I_0 = 750 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ an der Wasseroberfläche, Temperatur $T = 30^\circ\text{C}$, Wassertiefe $l_{\text{Tiefe}} = 0.3 \text{ m}$

Wenn die Konzentration C_{Alge} der Alge ihren optimalen Wert C_{Alge}^{opt} erreicht, durchschreitet die gesamte Wachstumsrate ihr Maximum, während die Wachstumsrate am Boden bei einem Wert von null einen Vorzeichenwechsel aufweist. Für die höhere Lichtintensität $I_0 = 750 \frac{W}{m^2}$ weist auch die optimale Konzentration der Alge einen höheren Wert auf, da auch bei höheren Konzentrationen der Alge am Boden des Algenponds ausreichend Licht zur Verfügung steht. Die gesamte Wachstumsrate fällt erwartungsgemäß bei einer höheren Lichtintensität ebenfalls höher aus. Konzentrationen der Alge, die unter der optimalen Konzentration liegen, führen zu einer deutlich verringerten gesamten Wachstumsrate verglichen mit der maximal möglichen Wachstumsrate. In diesen Fällen wird das verfügbare Licht nicht vollständig ausgenutzt und dadurch die mögliche Produktivität des Algenponds nicht erreicht. Für Konzentrationen, die dagegen deutlich größer sind als die optimale Konzentration der Alge, ist die gesamte Wachstumsrate dagegen nur unwesentlich kleiner als die Maximale. Dafür ist die Sterberate μ_{Death} verantwortlich, deren Anteil, verglichen mit dem Wachstumsterm, sehr gering ausfällt.

Zusammengefasst zeigt sich, dass die Konzentration C_{Alge} der Alge eine wichtige Einflussgröße auf die Wachstumsrate der Alge und damit die Produktivität eines Algenponds darstellt. Ein Einstellen dieser Konzentration, z.B. durch geschickte Anpassung der Ernterate, ermöglicht eine maximale Produktivität des Algenponds. In der Realität wird das Einstellen der optimalen Konzentration jedoch nahezu unmöglich sein, da allein über den Verlauf eines Tages die Temperatur T des Pondwassers und in besonderem Maße die Lichtintensität I_0 sehr stark schwankt und dadurch zu einem sich stetig änderndem Wert von C_{Alge}^{opt} führt. Ein Einstellen der Konzentration der Alge in ähnlicher Geschwindigkeit ist kaum durchführbar, da durch Abernten die Algenkonzentration nur vergleichbar langsam gesenkt werden kann und zudem eine gezielte Erhöhung der Algenkonzentration praktisch nicht möglich ist. Folglich wird man einen kontinuierlichen betriebenen Algenpond bei einer Konzentration der Alge betreiben, die in der dunklen Nacht einen zu großen und am Tag, zum Zeitpunkt der höchsten solaren Strahlung, einen zu niedrigen Wert hat.

Der Verlauf der Wachstumsrate in Abbildung 4.3 zeigt, dass der Betrieb eines Algenponds bei einer eher zu hohen Konzentration C_{Alge} der Alge zu bevorzugen ist, da eine zu hohe Konzentration zu weniger Einbußen im Wachstum führt als eine zu niedrige Konzentration. Abschließend muss noch erwähnt werden, dass die hier durchgeführten Betrachtungen streng genommen nur für das hier vorgestellte Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* mit den verwendeten Parametern gültig sind. Sofern eine Alge durch ein ähnliches Modell beschrieben werden kann, ist jedoch davon auszugehen, dass die hier erarbeiteten Schlussfolgerungen auch für diese Alge gelten.

5 Modellbildung

Die Modellierung von offenen Algenponds erfolgt mit einem in der Programmiersprache MATLAB geschriebenen Simulationsmodell. Neben der eigentlichen Untersuchung des Verhaltens von offenen Algenponds mit Hilfe des Simulationsmodells hatte die Erstellung ebendieses Simulationsmodells einen großen Anteil an der gesamten Arbeit.

Der Aufbau des Simulationsmodells wird in Abschnitt 5.1 näher erläutert. In den Abschnitten 5.3 und 5.2 werden die verwendeten zeitlichen und örtlichen Diskretisierungsmethoden vorgestellt. Abschnitt 5.4 beschreibt die Implementierung des Simulationsmodells in MATLAB. Die Durchführung und Auswertung einer Simulation wird in Abschnitt 5.5 näher erläutert. Die Anpassung und Validierung des Simulationsmodells anhand von Dateien einer experimentellen Untersuchung eines Algenponds in Spanien wird in Abschnitt 5.6 behandelt.

Im Folgenden ist mit Simulationsmodell stets das Gesamtmodell gemeint, das zur Simulation eines Algenponds verwendet wird. Das Simulationsmodell selbst besteht aus verschiedenen einzelnen Modellen und der zur Verknüpfung der einzelnen Modelle erforderlichen Programmierung.

5.1 Allgemeiner Aufbau des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell umfasst mehrere Modelle, die zur Beschreibung der einzelnen auftretenden physikalischen Vorgänge verwendet werden. Diese Modelle bestehen aus den in Kapitel 4 vorgestellten Modellen und Gleichungen. Zusätzlich besitzt das Simulationsmodell eine Datenbank mit aufgezeichneten Wetterdaten für verschiedene Standorte und Zeiträume.

Das Modell sowie die Wetterdaten sind miteinander verknüpft, um die gegenseitige Einflussnahme der in den Modellen auftretenden Größen zu berücksichtigen. Die gegenseitige Verknüpfung erfolgt über passive und aktive Abhängigkeiten. Bei passiven Abhängigkeiten stellt die Größe eines Modells eine Einflussgröße für ein anderes Modell dar. Die Temperatur des Pondwassers ist z. B. eine Einflussgröße für das Algenwachstum. Bei aktiven Abhängigkeiten stehen die Modelle in direkter Beziehung zueinander. So überträgt z. B. das Begasungsmodell einen Massenstrom an das Pondwasser, wobei die dabei übertragene Masse den Blasen der Begasung verloren geht. Insgesamt führen diese Verknüpfungen zu einem System, das interne Rückkopplungen aufweist und in dem die Veränderung einer Größe an verschiedenen Stellen Auswirkungen zeigt.

Abbildung 5.1 zeigt schematisch einen Überblick über das Simulationsmodell und die wichtigsten Abhängigkeiten der Modelle voneinander. Am Beispiel des Einflusses

der Umgebung auf den Algenpond wird die gegenseitige Verknüpfung deutlich: Die Umgebung beeinflusst das Pondwasser mit den bei der Verdunstung und Kondensation sowie dem Strahlungsaustausch auftretenden Massen- und Energieströmen. Zusätzlich wird über die solare Strahlung auch die Wachstumsrate der Alge und dadurch die Masse an Algen im Algenpond beeinflusst.

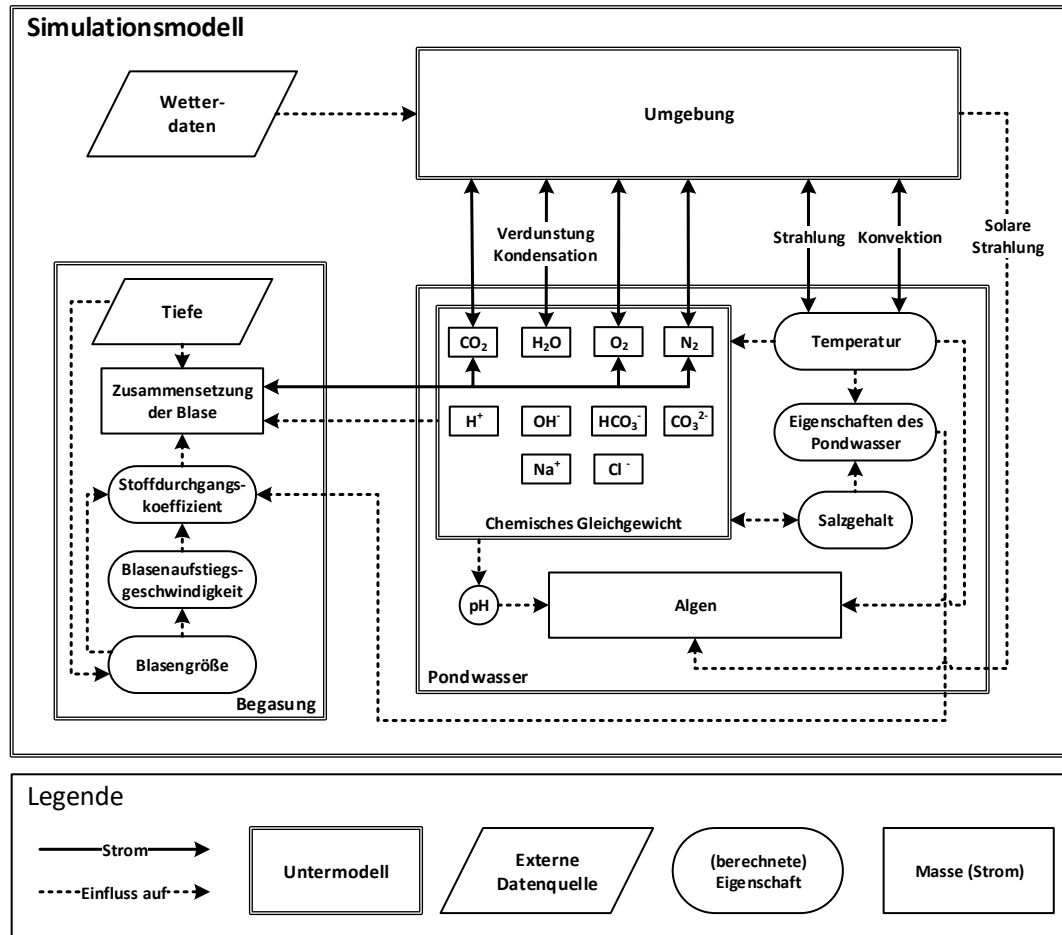


Abbildung 5.1: Schema des Simulationsmodells

5.2 Örtliche Diskretisierung

Die Geometrie des Algenponds wird im Modell durch eine Rührkesselkaskade aus gleichgroßen und kontinuierlich gerührten Rührkesseln (CSTRs) abgebildet. Die Experimente von EL OUARGHI ET AL. 2000 und MILLER & BUHR 1981 zeigen, dass diese Art der örtlichen Diskretisierung das hydrodynamische Verhalten von offenen Algenponds wiedergeben kann. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft einen Algenpond, der durch eine Rührkesselkaskade abgebildet wird. Die Rührkessel sind von 1 bis 12 durchnummeriert. Es wird angenommen, dass die Rührkessel ideal durchmischt sind. Diese Art der Diskretisierung führt zu einer eindimensionalen Auflösung des Kanals entlang der Hauptfließrichtung und wird in der Literatur auch als Multi-Kompartiment-Modell

bezeichnet. Veränderungen und Effekte entlang der Kanaltiefe und Kanalbreite wie z. B. Konzentrationsgradienten oder Temperaturschichtungen werden folglich nicht berücksichtigt. Eine veränderte Geometrie des Kanals auf Grund von Sümpfen wird in der örtlichen Diskretisierung ebenfalls nicht berücksichtigt.

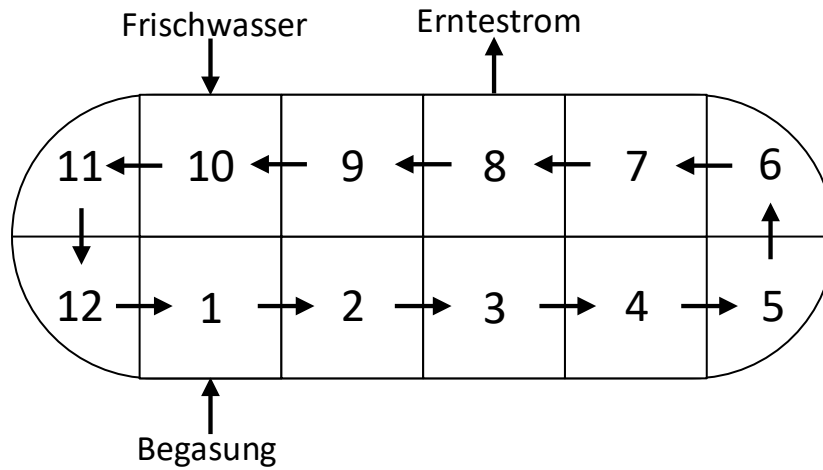


Abbildung 5.2: Örtliche Diskretisierung eines Algenponds mit 12 CSTRs

Während der Simulation strömt das Pondwasser und dadurch die im Pondwasser enthaltenen Komponenten entlang der Rührkesselkaskade von einem CSTR zum nächsten CSTR. Dieser Stoffaustausch führt weiterhin zu einem Energietransport entlang der Kaskade. Zusätzlich treten in jedem CSTR interne und externe Quellen und Senken¹ auf, die die Veränderungen im Pondwasser selbst sowie die Einflüsse von außen beschreiben. Die internen Quellen sind in jedem CSTR vorhanden und beschreiben die Änderungen durch die Einstellung des chemischen Gleichgewichts. Die externen Quellen können in zwei Kategorien unterteilt werden: Zum einen gibt es Quellen, die in jedem CSTR auftreten und durch Umwelteinflüsse verursacht werden, die auf den gesamten Algenpond einwirken. Dies umfasst alle Stoff- und Energieaustauschprozesse des Algenponds mit der Umgebung. Zum anderen können jedem CSTR mehrere externe Quellen zugeordnet werden, die nur an einem bestimmten Ort des Algenponds wirken, wie z. B. Ernte- und Frischwasserströme oder die Begasung des Pondwassers. In Abbildung 5.2 sind beispielhaft drei externe Quellen dargestellt, deren örtliche Position mit Hilfe der Zuordnung zu verschiedenen CSTR berücksichtigt wird: CSTR Nr. 1 wird eine Begasung, CSTR Nr. 8 wird der Erntestrom und CSTR Nr. 10 wird der Frischwasserstrom zugeordnet.

Die zeitliche Änderung der Masse $M_{n,i}$ einer Komponente i im Rührkessel n ist abhängig von den Massenströmen $\dot{M}_{n-1,i}^{\Delta t}$ und $\dot{M}_{n,i}^{\Delta t}$ der Strömung im Kanal, die vom vorherigen CSTR $n - 1$ in diesen Rührkessel und von diesem Rührkessel in den nächsten CSTR fließt. Der Term $\dot{M}_{n,i,Quelle}$ berücksichtigt alle Quellen, die die Masse von Komponente i beeinflussen:

$$\frac{dM_{n,i}}{dt} = \dot{M}_{n-1,i}^{\Delta t} - \dot{M}_{n,i}^{\Delta t} + \dot{M}_{n,i,Quelle}. \quad (5.1)$$

¹ Im Folgenden wird zur Vereinfachung nur noch von Quellen gesprochen. Senken sind mathematisch nichts anderes als Quellen mit einem negativen Zahlenwert.

Die Energie, die mit der Strömung von einem CSTR in den nächsten transportiert wird, kann durch einer Energiebilanz berücksichtigt werden. Die zeitliche Änderung der Enthalpie H_n im Rührkessel n ist abhängig von den durch die ein- und austretenden Massenströmen transportierten Enthalpien $\dot{M}_{n-1}^{\Delta t} \cdot h_{n-1}$ und $\dot{M}_n^{\Delta t} \cdot h_n$. Die Enthalpien werden dabei mit Hilfe der Massenströme \dot{M} und den spezifischen Enthalpien h ausgedrückt. Der Term $\dot{H}_{n,Quelle}^t$ berücksichtigt alle Quellen, die die Energiebilanz von CSTR n beeinflussen.

$$\frac{dH_n}{dt} = \dot{M}_{n-1}^{\Delta t} \cdot h_{n-1} - \dot{M}_n^{\Delta t} \cdot h_n + \dot{H}_{n,Quelle}^t. \quad (5.2)$$

Die spezifische Enthalpie h des Pondwassers wird mit einer empirischen kalorischen Zustandsgleichung als Funktion $h = h(T, S)$ der Temperatur T und der Salinität S des Pondwassers beschrieben.

Während der Simulation werden zu jedem Zeitschritt die Massen- und Enthalpieströme der Strömung im Algenpond sowie der Quellen berechnet. Für jeden CSTR wird dann die Änderung der Massen der einzelnen Komponenten sowie der Temperatur bestimmt und dann daraus der neue Zustand des Algenponds berechnet.

5.3 Zeitliche Diskretisierung

Das Verhalten des Algenponds kann durch ein Differentialgleichungssystem (DGL-System) 1. Ordnung beschrieben werden. Für diese Art von DGL-System stellt MATLAB mehrere Lösungsverfahren (DGL-Löser) bereit, die ausgehend von Startwerten das DGL-System durch Integration über die Zeit lösen. Als Alternative dazu kann das explizite Euler-Verfahren verwendet werden, für das kein DGL-System aufgestellt werden muss.

Es wurden beide Ansätze implementiert und gegeneinander validiert. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird das explizite Euler-Verfahren verwendet, da es sich als das robustere und schnellere Verfahren beim Lösen des Simulationsmodells erwies [RARREK ET AL. 2016]. Während die Robustheit auf Grund des expliziten Verfahrens zu erwarten war, bedarf der Geschwindigkeitsvorteil gegenüber den implementierten Algorithmen einer Erklärung. Die implementierten DGL-Löser sind darauf optimiert möglichst wenige Zeitschritte zu berechnen und dadurch die benötigte Rechenzeit zur Lösung des DGL-Systems zu minimieren. Die Algorithmen versuchen für jeden diskreten Integrationsschritt den Zeitschritt so zu wählen, dass dieser möglichst groß ist und dass die dabei erhaltene Lösung des DGL-Systems noch innerhalb der geforderten Genauigkeit liegt. Um eine zum Euler-Verfahren vergleichbar genaue Lösung zu erhalten, müssen die DGL-Löser so viele Iterationen ausführen, dass ihr eigentlich vorhandener methodischer Geschwindigkeitsvorteil negiert wird. Dieses Erkenntnis ist jedoch nicht allgemein gültig, sondern gilt nur für die im Rahmen dieser Arbeit behandelten Probleme und verwendeten Konfigurationen für die DGL-Löser.

Die zeitliche Diskretisierung mit dem expliziten Euler-Verfahren verwendet einen festen Zeitschritt Δt . Während dieses Zeitschrittes wird von jedem CSTR eine bestimmte Masse jeder Komponente in den jeweils nächsten CSTR in der Kaskade übertragen. Äquivalent dazu wird durch den Massentransfer von jedem CSTR eine bestimmte Energiemenge zum jeweils nächsten CSTR mitübertragen. Der Anteil an Masse und Energie, der von einem CSTR zum jeweils nächsten CSTR übertragen wird, ist abhängig von der Länge l_{CSTR} des CSTRs und der Strömungsgeschwindigkeit $v_{Strömung}$ und können mit Hilfe der Verweilzeit τ bestimmt werden:

$$\tau = \frac{l_{CSTR}}{v_{Strömung}}. \quad (5.3)$$

Die Verweilzeit τ ist für alle CSTR gleich, da die Strömungsgeschwindigkeit konstant ist und alle CSTR identische Abmessungen haben.

Die Masse $M_{n,i}^{\Delta t}$ der Komponente i , die während eines Zeitschrittes Δt von CSTR n in CSTR $n + 1$ strömt, ist abhängig von der Verweilzeit τ und der absoluten Masse $M_{n,i}$ der Komponente i in CSTR n :

$$M_{n,i}^{\Delta t} = \frac{\Delta t}{\tau} \cdot M_{n,i}. \quad (5.4)$$

Für die Masse $M_{n,i}^{t+\Delta t}$ einer Komponente i in CSTR n nach der Berechnung eines Zeitschrittes ergibt sich dann unter Verwendung von Gleichung (5.1) und der zeitlichen Diskretisierung:

$$M_{n,i}^{t+\Delta t} = M_{n,i}^t + M_{n-1,i}^{\Delta t} - M_{n,i}^{\Delta t} + M_{n,i,Quelle}^t. \quad (5.5)$$

Die Energie, die mit der Strömung von einem CSTR in den nächsten transportiert wird, kann durch eine Energiebilanz berücksichtigt werden. Die Enthalpie in einem CSTR nach einem Zeitschritt berechnet sich aus der gesamten Masse $M_{n,i}^{t+\Delta t}$ und der spezifischen Enthalpie des Pondwassers $h_{n,i}^{t+\Delta t}$ in diesem CSTR. Diese Enthalpie ist die Summe der vorher im CSTR vorliegenden Enthalpie, der durch die Strömung zu- und abgeführten Enthalpie sowie der durch externe Quellen übertragenen Enthalpien. Die zeitliche Diskretisierung von Gleichung (5.2) führt zu folgender Form:

$$M_n^{t+\Delta t} \cdot h_n^{t+\Delta t} = M_n^t \cdot h_n^t + M_{n-1}^{\Delta t} \cdot h_{n-1}^t - M_n^{\Delta t} \cdot h_n^t + H_{n,Quelle}^t. \quad (5.6)$$

Die korrekte Wahl des Zeitschrittes Δt ist für den Simulationsablauf und das daraus erhaltene Ergebnis von großer Bedeutung. Um die Simulation mit möglichst wenig Rechenaufwand zu berechnen, sollte der Zeitschritt so groß wie möglich gewählt werden. Dazu wird an einem repräsentativen Simulationsfall eine Studie durchgeführt, mit welchem Zeitschritt die geforderte Genauigkeit erreicht werden kann. Der dabei erhaltene Zeitschritt ist nur für vergleichbare Simulationsfälle gültig. Generell muss der Zeitschritt Δt die im Folgenden aufgeführten Bedingungen erfüllen.

Courant-Zahl Die Courant-Zahl Co ist eine Kenngröße, mit der die Stabilität und Genauigkeit der Simulation wiedergegeben werden kann. Die Definition der Courant-Zahl Co ist

$$Co = \frac{v_{Strömung} \cdot \Delta t}{l_{CSTR}} \quad (5.7)$$

mit der Länge l_{CSTR} eines CSTRs entlang der Strömungsrichtung und dem Zeitschritt Δt . Da die Simulation ein explizites Euler-Verfahren zur Lösung verwendet, muss Co kleiner als 1 sein, um eine stabile Lösung zu erhalten [COURANT ET AL. 1928].

Erfassung der zeitlichen Veränderung von externen Quellen Der Zeitschritt muss so klein sein, dass die zeitliche Veränderung der externen Quellen ausreichend erfasst werden. Ein Beispiel dafür sind die Wetterdaten, die je nach Quelle über ein bestimmtes Zeitfenster gemittelt und in diesem dann konstant sind. Der gewählte Zeitschritt darf maximal genauso groß wie das Zeitfenster der Wetterdaten sein, da ansonsten diese bei der Simulation übersprungen werden und dadurch die Änderung des Wetters nicht ausreichend erfasst wird.

Externe Quellen Die an die CSTRs angeschlossenen externen Quellen geben ebenfalls Grenzen für die Wahl des Zeitschrittes vor. Zwar reagiert der Algenpond relativ träge, was prinzipiell unter Beachtung der Courant-Zahl einen großen Zeitschritt zulässt, es muss jedoch sichergestellt werden, dass die zeitliche Änderung der externen Quellen ebenfalls berücksichtigt wird.

5.4 Implementierung in MATLAB

Das Simulationsmodell ist in der Programmiersprache und -umgebung MATLAB implementiert. Die Programmierung erfolgte dabei objekt-orientiert um eine maximale Flexibilität im Bezug auf Änderungen oder Erweiterungen des Simulationsmodells zu ermöglichen.

5.4.1 Einführung in die objekt-orientierten Programmierung

In der objekt-orientierten Programmierung werden die in der realen Welt vorhandenen Dinge durch Objekte repräsentiert. Diese Objekte sind Abbildungen ihrer realen Vorbilder und stellen Funktionen und Attribute (Variablen) bereit, die für die Programmausführung notwendig sind. Ein Vorteil gegenüber der herkömmlichen prozeduralen Programmierweise ist die Zusammenführung von Funktionen und Attributen in einem Objekt. Ein weiterer Vorteil ist die leichte Austauschbarkeit eines Objekts gegen ein anderes Objekt, solange dieses die selbe Funktionalität zur Verfügung stellt.

Ein verfahrenstechnisches Beispiel dafür ist ein Objekt, das den Reinstoff Wasser repräsentiert. Dieses Wasser-Objekt stellt als Funktionen z. B. die Berechnung des Sät-

tigungsdampfdruckes und der Verdampfungsenthalpie zur Verfügung. Weiterhin besitzt das Wasser-Objekt Attribute, wie z. B. die kritische Temperatur und den kritischen Druck oder auch die Parameter, die zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes verwendet werden. Soll während des Programmablauf statt mit Wasser mit Ethanol gerechnet werden, so wird im Programm lediglich das Wasser-Objekt durch ein entsprechendes Ethanol-Objekt, das Ethanol repräsentiert, ausgetauscht. Das Ethanol-Objekt stellt die selbe Funktionalität wie das Wasser-Objekt zur Verfügung, besitzt aber natürlich andere Attribute also z. B. andere Werte für die stoffspezifischen Parameter. Bis auf den Austausch der Objekte muss die Programmierung nicht geändert werden, was zu einer starken Vereinfachung des Programmieraufwands führt.

Die Funktionalität, die ein Objekt besitzt, also die von ihm bereitgestellten Funktionen und Attribute, sind in der zugehörigen Klasse definiert. Eine Klasse ist eine Vorlage aus der beliebig viele Objekte erzeugt werden können. Das Erzeugen der Objekte geschieht während des Programmablaufs und wird als Instanziierung bezeichnet. Angeknüpft an das vorherige Beispiel gibt es eine Klasse, die allgemein das Verhalten eines Reinstoffes beschreibt. In dieser Reinstoff-Klasse wird z. B. festgelegt nach welcher Gleichung der Sättigungsdampfdruck zu berechnen ist oder welche Parameter als Attribute vorhanden sind. Wenn dann im Programmablauf ein Objekt von dieser Klasse instanziiert wird, werden die Attribute mit den für dieses Objekt gültigen Werte belegt. Beim Instanzieren des Wasser-Objekts von der Reinstoff-Klasse werden z. B. die Attribute für die kritische Temperatur und den kritischen Druck und die Parameter mit den stoffspezifischen Werten für Wasser belegt. Im weiteren Programmablauf rechnet dann das Wasser-Objekt, mit den passenden Werten für Wasser.

Ein weiteres wichtiges Konzept in der objekt-orientierten Programmierung ist die Vererbung. Vererbung bedeutet, dass eine Klasse von einer anderen Klasse abgeleitet wird und dabei die abgeleitete Kind-Klasse alle Funktionen und Attribute der übergeordneten Mutter-Klasse erbt. Die Kind-Klasse kann dann, je nach den spezifischen Anforderungen, um weitere Funktionen und Attribute erweitert werden. Durch das Prinzip der Vererbung ist es möglich, die Programmierung hierarchisch zu gliedern sowie Funktionen und Attribute, die in verschiedenen Klassen benötigt werden, nur an einer Stelle zu programmieren. Als Beispiel zur Erklärung wird wieder die Reinstoff-Klasse verwendet. Von dieser Reinstoff-Klasse können zwei weitere Klassen abgeleitet werden, die das Verhalten des Reinstoffes in der Gasphase entweder als ideales Gas oder als reales Gas beschreiben. Beide Klassen erben von der Reinstoff-Klasse die dort definierten Funktionen und Attribute, wie z. B. die kritische Temperatur und den kritischen Druck, implementieren aber unterschiedlich programmierte Funktionen zur Berechnung des thermischen Verhaltens.

Die objekt-orientierte Programmierung weist noch eine Vielzahl weiterer Funktionalitäten auf, die in der Programmierung des Simulationsmodells verwendet wurden, aber deren Erklärung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Dem interessierten Leser wird eines der zahlreichen Bücher zur objekt-orientierten Programmierung empfohlen.

5.4.2 Programmierung

Das Simulationsmodell besteht als Ganzes aus einer Vielzahl von Klassen, deren instanziierte Objekte während der Laufzeit der Simulation alle Berechnungen durchführen. Die Schnittstellen der Klassen sind so aufeinander abgestimmt, dass jede Klasse gegen eine andere Klasse mit gleicher Funktionalität ausgetauscht werden kann. Dies erlaubt es letztendlich im Simulationsmodell verschiedene Modelle zur Beschreibung des gleichen physikalischen Vorganges zu implementieren und das für die jeweilige Simulation geeignete Modell auszuwählen. Das generische Algenwachstumsmodell von Abschnitt 4.6.1 ist z. B. eine Klasse, deren Aufgabe es ist, das Algenwachstum zu berechnen. Diese Klasse kann, ohne dass dafür an einer anderen Stelle in der Programmierung etwas geändert werden muss, gegen eine andere Klasse, z. B. das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* aus Abschnitt 4.6.2, ausgetauscht werden.

Für den eigentlichen Ablauf einer Simulation ist eine eigene Klasse zuständig, die alle nötigen Objekt instanziiert, die örtliche und zeitliche Diskretisierung umsetzt und die berechneten Ergebnisse abspeichert. Die Ergebnisse der Simulation werden wiederum in Objekten abgelegt und können dann nach Ablauf der Simulation in einem weiter verwertbaren Format abgespeichert werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten verwendeten Klassen aufgeführt und ihre Funktionalitäten erläutert. Für die Auflistung werden die im Programmquelltext englischen Klassennamen verwendet. Obwohl nur von Klassen gesprochen wird, muss klargestellt werden, dass im Programmablauf von jeder verwendeten Klasse die benötigte Anzahl an Objekten instanziiert wird und dass diese die eigentliche Arbeit durchführen.

Simulation-Klasse Die Aufgabe der *Simulation*-Klasse ist die Durchführung einer Pondsimulation. Diese Klassen instanziiert und initialisiert die anderen Klassen und stellt die zusätzlich für den Ablauf der Simulation nötigen Funktionen bereit. In dieser Klasse wird festgelegt welche Klasse und folglich welches Modell, z. B. welches Algenwachstumsmodell, zur Beschreibung eines bestimmten physikalischen Phänomens verwendet wird. In der *Simulation*-Klasse wird auch die Geometrie des Algenponds festgelegt, da sie für die Verknüpfung der *Vessel*-Klasse, die letztendlich ein Teil des Algenponds repräsentiert, zuständig ist.

Environment-Klassen Die *Environment*-Klassen sind von der Mutter-Klasse *Environment* abgeleitet und repräsentieren die Umgebung des Algenponds. Diese Klassen stellen orts- und zeitspezifische Werte der Umgebung, wie z. B. die Temperatur und die solare Strahlung, bereit.

Fluid-Klassen Die *Fluid*-Klassen repräsentieren flüssige oder gasförmige Gemische mit einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck. Die Zusammensetzung des Gemisches wird durch die Stoffmenge jeder Komponente im Gemisch definiert. Alle *Fluid*-Klassen sind von der Mutter-Klasse *generalFluid* abgeleitet. Klassen, die real existierende Fluide, wie etwa Seewasser oder ein ideales Gas, repräsentieren sind Kind-Klassen der *realFluid*-Klasse. Diese Klassen berechnen die Eigenschaften der Fluide in Abhängigkeit von deren Zusammensetzung, Druck

und Temperatur. Weiterhin gibt es Klassen die Fluide beschreiben, die nicht real existieren. Ein Beispiel dafür ist die Klasse *fluidEnvironmentRecordedAir*. Diese Klasse repräsentiert die Wetterdaten der Luft, deren Werte von der aktuell Zeit in der Simulation abhängig sind.

ReactionSystem-Klasse Diese Klasse stellt die notwendigen Funktionen und Attribute zur Verfügung um die Zusammensetzung im chemischen Gleichgewicht zu berechnen. Zur Berechnung wird ein Objekt einer *Fluid*-Klasse übergeben, von dem dann die Zusammensetzung im chemischen Gleichgewicht berechnet wird.

SourcesSinks-Klassen Jeder Algenpond hat verschiedene Arten von Quellen. Alle Klassen, die diese Quellen beschreiben, sind von der Überklasse *SourcesSinks* abgeleitet. Diese Klassen implementieren die Modelle mit denen die Massen- oder Molenströme berechnet werden, die auf den Algenpond einwirken. In diese Kategorie fallen z. B. die Algenwachstumsmodelle und die Klasse *MassTransferAeration*, die den Stoffübergang der Begasung berechnet.

Vessel-Klasse Die *Vessel*-Klasse repräsentiert einen diskretisierten Teil (CSTR) des Algenponds und stellt alle Funktionalitäten, die die Geometrie betreffen, bereit.

Spezielle Klassen Zusätzlich zu den oben aufgeführten Klassen sind noch folgende Klassen erwähnenswert:

Die Klasse *GlobalSimulationProperties* ist eine Singleton-Klasse², die während des Ablaufs einer Simulation von vielen anderen Objekten verwendet wird. Diese Klasse stellt z. B. die notwendigen Funktionen bereit um den Ablauf der simulierten Zeit zu erfassen.

Die Aufgaben der Klasse *simResults* umfasst das Speichern der während der Simulation berechneten Daten sowie die Umwandlung der Daten nach der Simulation in ein weiter verwertbares Dateiformat.

Gleichungen, die von mehreren Klassen verwendet werden, sind in die Klasse *PropAndModelDB* ausgelagert. Diese Klasse ist ebenfalls eine Singleton-Klasse und Bestandteil vieler anderer Klassen. Die *PropAndModelDB*-Klasse stellt z. B. die Molgewichte der Komponenten und die Berechnungsgleichungen nach dem idealen Gasgesetz zur Verfügung.

Aufbauend auf diesem Gerüst ist es möglich das Simulationsmodell zu erweitern und dadurch weitere physikalische und chemische Phänomene zu berücksichtigen. Die gezeigten hierarchischen Beziehungen der Klassen untereinander erleichtert dabei die Arbeit des Programmierens, da häufig verwendete Funktionen bereits in Mutter-Klassen implementiert sind und dadurch in den von ihnen abgeleiteten Klassen zur Verfügung stehen.

² Von einer Singleton-Klasse kann während des Programmablaufs nur ein Objekt instanziiert werden. Die Singleton-Klasse stellt eine Funktion zur Verfügung, die das Objekt der Klasse zurück gibt. Beim erstmaligen Aufruf dieser Funktion wird das Objekt der Klasse einmalig instanziiert und der Verweis auf das Objekt zurückgegeben und gespeichert. Bei den weiteren Aufrufen wird dann der Verweis auf das bereits vorhandene Objekt zurück gegeben.

5.5 Durchführung und Auswertung einer Simulation

Im Folgenden wird der Ablauf einer Simulation von der Eingabe der Randbedingungen bis zum Abspeichern der Berechnungsergebnisse dargestellt.

Die Randbedingungen für die Berechnung des Algenponds werden von der Simulation eingelesen und falls nötig daraus die für das Erstellen der Simulation notwendigen Werte berechnet. Im nächsten Schritt werden die für den Ablauf der Simulation notwendigen Objekte instanziiert und mit den zugehörigen Werten aus den Randbedingungen belegt. Nachdem alle vorbereitenden Schritte erfolgt sind, startet die eigentliche Simulation des Algenponds. Dafür wechselt das Programm in eine Schleife, in der bei jedem Durchlauf die Änderungen über einen Zeitschritt berechnet werden. Die Schleife wird solange durchlaufen bis die vorher festgelegte Endzeit der Simulation erreicht ist.

Während eines Durchlaufs finden folgende Berechnungsschritte statt:

- 1.) Berechnung des chemischen Gleichgewichts der Fluide in den diskretisierten Teilen (CSTRs) des Algenponds.
- 2.) Berechnung der Stoff- und Energieströme von Quellen.
- 3.) Berechnung der Ableitungen $\frac{d}{dt}$ der Massen und Temperaturen in den CSTRs mit den vorher berechneten Ströme.
- 4.) Speichern des aktuellen Zustands des Algenponds.
- 5.) Berechnung der neuen Werte der Massen und Temperaturen in den CSTRs mit den Ergebnissen von Schritt 3.
- 6.) Erhöhung der Zeit in der Simulation um den Zeitschritt.
- 7.) Überprüfung, ob die Bedingungen zur Beendigung der Simulation erfüllt sind, falls nicht ...
- 8.) ... Durchlauf der Schleife beginnt von vorne.

Nachdem die Berechnung beendet ist, werden die Ergebnisse teilweise durch das Simulationsmodell vorab ausgewertet und dann abgespeichert. Grundsätzlich wird nicht für jeden berechneten Zeitschritt der komplette Zustand des Algenponds abgespeichert, sondern nur in einem vorher festgelegten sinnvollem Intervall. Einige berechnete Größen, wie z. B. die Wachstumsrate der Alge oder der pH -Wert, die für die spätere Auswertung von besonderem Interesse sind, werden für jeden Zeitschritt abgespeichert und dann über den jeweils festgelegten Zeitraum gemittelt. Dadurch entsteht bei Verwendung dieser gemittelten Größen kein zusätzlicher Fehler in der Auswertung. Die dann folgende Verwertung der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe von MATLAB und Excel.

5.6 Anpassung und Validierung des Modells

Das Simulationsmodell wird mit experimentellen Daten eines Algenponds in Spanien validiert. Die dafür verwendeten Daten stammen aus der Machbarkeitsstudie über die industrielle Algenproduktion von JIMÉNEZ ET AL. 2003a und JIMÉNEZ ET AL. 2003b. Der im Experiment untersuchte Algenpond wird mit dem Simulationsmodell nachgerechnet. Die Ergebnisse der Simulation werden mit den Messwerten des Experiments verglichen. Im Zuge der Validierung werden die am Anfang noch unbekanntenen vier freien Anpassungsparameter

- maximale Wachstumsrate μ_{max} ,
- Lichtabhängigkeit I_k ,
- optimale Temperatur T_{opt} und
- Temperaturabhängigkeit T_{dep}

des Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* bestimmt.

5.6.1 Experimentelle Untersuchungen in Malaga

Zur Anpassung und Validierung des Simulationsmodells werden die experimentellen Daten eines Raceway-Ponds in Malaga (Spanien, 36°42'N, 4°28'W) mit einer Oberfläche von 450 m² verwendet. Das Verhältnis von Länge zu Breite betrug etwa 4 – 4.2 : 1. Das Pondwasser war 30 cm tief und strömte, angetrieben durch ein Schaufelrad, mit 30 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Der Algenpond wurde für 10 Monate im Zeitraum von Oktober 1997 bis Juli 1998 mit der Alge *Spirulina platensis* (Laporte M132-1) betrieben.

Die Konzentration der Alge beim Start des Experiments am 23. September 1997 betrug 0.05 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Das Experiment wurde am 29. Juli 1998 beendet. Es wurde dabei ab dem 7. Oktober 1997 kontinuierlich Biomasse abgeerntet, mit Ausnahme einer zweiwöchigen Periode im Februar, in der auf Grund starker Regenfälle keine Ernte stattfand. Die Ernterate war nicht konstant, sondern wurde variiert, um die Konzentration der Alge im Algenpond zu regulieren.

Tabelle 5.1 zeigt die Eigenschaften des experimentellen Algenponds. Das im Experiment verwendete Pondwasser ähnelte einer vereinfachten Nährlösung nach ZARROUK ET AL. 1968. Laut den veröffentlichten Informationen wurde zwar kein CO₂ zugegeben, jedoch die Nährstoffkonzentration nach den Regenfällen im Februar angepasst. Die genaue Zusammensetzung des Pondwassers ist nicht bekannt, und auf Grund der verfügbaren Informationen wird für die Simulation davon ausgegangen, dass die Salinität $S = 20 \text{ ‰}$ und die Alkalinität $A_T = 200 \frac{\text{mmol}}{\text{l}}$ beträgt. Der pH -Wert lag während des Experiments im Bereich von 9.5 – 10.5. Dies ist der optimale pH -Bereich für die verwendete Alge. [JIMÉNEZ ET AL. 2003a und JIMÉNEZ ET AL. 2003b]

Der durch das Ernten der Biomasse erreichte monatliche Ertrag des Algenponds ist den Veröffentlichungen von JIMÉNEZ ET AL. 2003a und JIMÉNEZ ET AL. 2003b zu

Tabelle 5.1: Standort und Eigenschaften des experimentellen Algenponds

Eigenschaft	Wert
Breitengrad LAT	36.72°
Längengrad LON	-4.42°
Zeitzone ZZ	+1 h
Gesamte Pondoberfläche	450 m^2
Wassertiefe l_{Tiefe}	0.3 m
Strömungsgeschwindigkeit $v_{Strömung}$	$0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Startkonzentration Alge	$0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Zusammensetzung des Pondwassers	„Zarrouks Medium“

entnehmen. Weiterhin sind die täglich um 12:00 Uhr gemessene Werte für die Temperatur des Pondwassers, den pH -Wert, die Leitfähigkeit, die Konzentration der Alge, die Konzentration an O_2 und der Ertrag als Diagramme verfügbar.

5.6.2 Nachrechnen des Experiments

Der experimentelle Algenpond sowie der Ablauf des Experiments wird mit dem Simulationsmodell abgebildet. Die Abmessungen des Algenponds und die Eigenschaften des Pondwassers entsprechen dem experimentellen Aufbau. Die Startzeit der Simulation ist 12:00 Uhr am 23. September 1997. Die Startkonzentration der Alge in der Simulation entspricht der Startkonzentration im Experiment. Das Pondwasser hat bei Simulationsstart dieselbe Temperatur wie die Umgebungsluft. Das Algenwachstum wird mit dem in Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* berechnet. Folglich ist das Algenwachstum nur von der Temperatur des Pondwassers und der verfügbaren Lichtintensität abhängig. Es wird angenommen, dass die Alge in ihrem optimalen pH -Bereich betrieben wird, so wie es auch im Experiment der Fall war. Weiterhin wird angenommen, dass keine Nährstofflimitierung vorliegt.

Die für die Simulation verwendeten Wetterdaten sind die täglichen Durchschnittswerte für die Umgebungstemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit des Flughafens in Malaga und stammen vom TUTIEMPO NETWORK 2016. Die solare Strahlung wird mit Daten von SATEL-LIGHT 2016 berücksichtigt, das für jeden Monat stündliche Mittelwerte zur Verfügung stellt.

Die in der Simulation verwendete Ernterate entspricht der Ernterate im Experiment. Die ersten zwei Wochen zu Beginn des Experiments und zwei Wochen im Februar findet keine Ernte statt. Im übrigen Zeitraum wird für jeden Monat eine konstante Ernterate verwendet. Diese monatliche Ernterate wird aus den Daten des Experiments berechnet, indem aus den veröffentlichten Diagrammen die täglichen Erträge und Algenkonzentrationen ausgelesen werden, daraus die täglichen Ernteraten berechnet und davon der Median des Monats gebildet wird. Der monatliche Ertrag Y_{Sim} der Simulation

wird bestimmt, indem die im jeweiligen Monat geerntet Masse an Algen aufsummiert wird.

Tabelle 5.2 zeigt die festen Parameter des Algenwachstumsmodells.

Tabelle 5.2: Feste Parameter des Algenwachstumsmodells [RARREK ET AL. 2016]

Parameter	Wert
Extinktionskoeffizient K_e	$66.7 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$
Umwandlungsfaktor CO_2 für Algenwachstum	$1.8 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{Alge}}$
Umwandlungsfaktor CO_2 für Algensterben	$1.47 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{Alge}}$
Umwandlungsfaktor H_2O	$0.6 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{Alge}}$
Umwandlungsfaktor O_2	$1.07 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{Alge}}$

Zur Bestimmung der vier freien Anpassungsparameter μ_{max} , I_k , T_{opt} und T_{dep} des Algenwachstumsmodells wird ein nicht-lineares Optimierungsproblem gelöst. Dabei werden die freien Parameter so angepasst, dass die Summe der Fehlerquadrate minimiert wird. Die Fehler sind die Unterschiede zwischen dem simulierten monatlichen Ertrag Y_{Sim} und dem monatlichen Ertrag Y_{Exp} des Experiments. Die Lösung des Optimierungsproblems wird mit der *MATLAB* Funktion *lsqnonlin* durchgeführt, die den Algorithmus „trust-region-reflective“ verwendet, um die Summe der Fehlerquadrate zu minimieren. Im Zuge der Optimierung wird die Simulation, die den experimentellen Algenpond nachrechnet, mehrfach mit anderen Werten für die freien Parameter aufgerufen, bis ein Minimum gefunden ist. Die vom Algorithmus gewählten Werte der freien Parameter, die zu diesem Minimum führen, sind die gesuchten Werte. Die Startwerte für die freien Parameter müssen in einem sinnvollen Bereich liegen und werden der Veröffentlichung von VONSHAK 1997 entnommen. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist ein Parametersatz *PS* mit Werten für μ_{max} , I_k , T_{opt} und T_{dep} . Dieser Parametersatz *PS* ist dann zusammen mit dem Algenwachstumsmodell für die im Experiment verwendete Alge gültig.

5.6.3 Ergebnisse und Diskussion

Bevor die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zum Experiment dargestellt und diskutiert werden, muss auf die Genauigkeit der verwendeten Wetterdaten eingegangen werden. Die Wetterdaten stammen aus zwei verschiedenen Quellen und haben eine unterschiedliche zeitliche Auflösung. Die Daten der solaren Strahlung bestehen aus stündlichen Mittelwerten über den Tag, wobei für jeden Monat ein für diesen Monat gültiger Satz aus 24 Werten verwendet wird. Die Daten für Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte sind über den Tag gemittelte Werte. Aufgrund dieser Datenlage sind nicht alle Wettereffekte, die in der Realität auftreten und den Algenpond potentiell beeinflussen, abgebildet.

Den größten Einfluss auf den Ertrag des Algenponds hat die solare Strahlung und die Umgebungstemperatur, da beide stark mit den im Algenwachstumsmodell wichtigen

Größen verfügbare Strahlung und Temperatur des Pondwassers verknüpft sind. Einzelne Tage mit besonders hoher oder besonders niedriger solarer Strahlung können durch die monatliche Mitteilung der Stundenwerte nicht aufgelöst werden. Eine über den Tag variierende Lufttemperatur wird wegen der Mittelung ebenfalls nicht berücksichtigt und es wird nur der Mittelwert des jeweiligen Tages verwendet. Trotzdem wird auch die Veränderung der Temperatur des Pondwassers über den Tag abgebildet, da dessen Temperatur nicht nur von der (konstanten) Umgebungstemperatur abhängt, sondern auch von der (über den Tag nicht konstanten) solaren Strahlung. Generell führt die Verwendung der gemittelten Wetterdaten zu einem nicht vermeidbaren Fehler bei der Nachrechnung des Experiments mit dem Simulationsmodell. Es wird angenommen, dass dieser Fehler zwar vorhanden ist, aber in Anbetracht der ohnehin getroffenen Vereinfachungen des Simulationsmodells nicht weiter berücksichtigt werden muss. Folglich können diese Wetterdaten verwendet werden, um das Experiment nachzurechnen und damit das Simulationsmodell zu validieren.

Tabelle 5.3 zeigt die angepassten Parameter des Algenwachstumsmodells. Die ermittelten Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie die Werte von anderen Autoren für die Alge *Spirulina platensis* und stellen damit einen vernünftigen Parametersatz dar. Mit Hilfe dieses Parametersatzes kann die im Experiment verwendete Alge durch das Algenwachstumsmodell beschrieben werden.

Tabelle 5.3: Angepasste Parameter des Algenwachstumsmodells für *Spirulina platensis*

Parameter	Wert	Literaturwerte		
		VONSHAK 1997 ³	OLIVEIRA ET AL. 1999 ⁴	OGBONDA ET AL. 2007
μ_{max} in $\frac{1}{d}$	0.6298	1.0320 – 1.1520	0.64	-
T_{opt} in °C	27.34	32 ⁵	35	30
T_{dep} in $\frac{1}{K}$	0.05794	0.1 ⁶	0.03	0.06 – 0.08 ⁷
I_k in $\frac{W}{m^2}$	13.95	25.00 – 35.87 ⁸	-	-

In Abbildung 5.3 werden der Ertrag Y_{Exp} des Experiments mit dem durch die Simulation berechneten Ertrag Y_{Sim} verglichen. Die Simulation kann den Ertrag des Experiments sowohl in den absoluten monatlichen Werten als auch im Verlauf gut wiedergeben. Generell berechnet die Simulation für die erste Hälfte des Experiments einen zu niedrigen Ertrag und für die zweite Hälfte des Experiments einen zu hohen Ertrag. Der maximale absolute Unterschied zwischen dem simulierten und tatsächlichen Ertrag beträgt $\Delta_{abs}^{max}Y = -1.93 \frac{g}{m^2 d}$ im November und der maximale relative Unterschied beträgt $\Delta_{rel}^{max}Y = -60.1\%$ im Februar. Der Unterschied zwischen dem über die Betriebszeit

³ Werte für verschiedene Algenstränge.

⁴ Eigene Berechnung basierend auf veröffentlichten Daten.

⁵ Algenstrang *DA*.

⁶ Eigene Berechnung für Algenstrang *DA* basierend auf veröffentlichten Daten.

⁷ Eigene Berechnung basierend auf Fig. 1 der Veröffentlichung

⁸ $\frac{\mu mol E}{m^2 s}$ umgerechnet in $\frac{W}{m^2}$ durch Division mit 4.6.

gemittelten⁹ Ertrag der Simulation von $7.19 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ und des Experiments von $7.56 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ ist -4.89% .

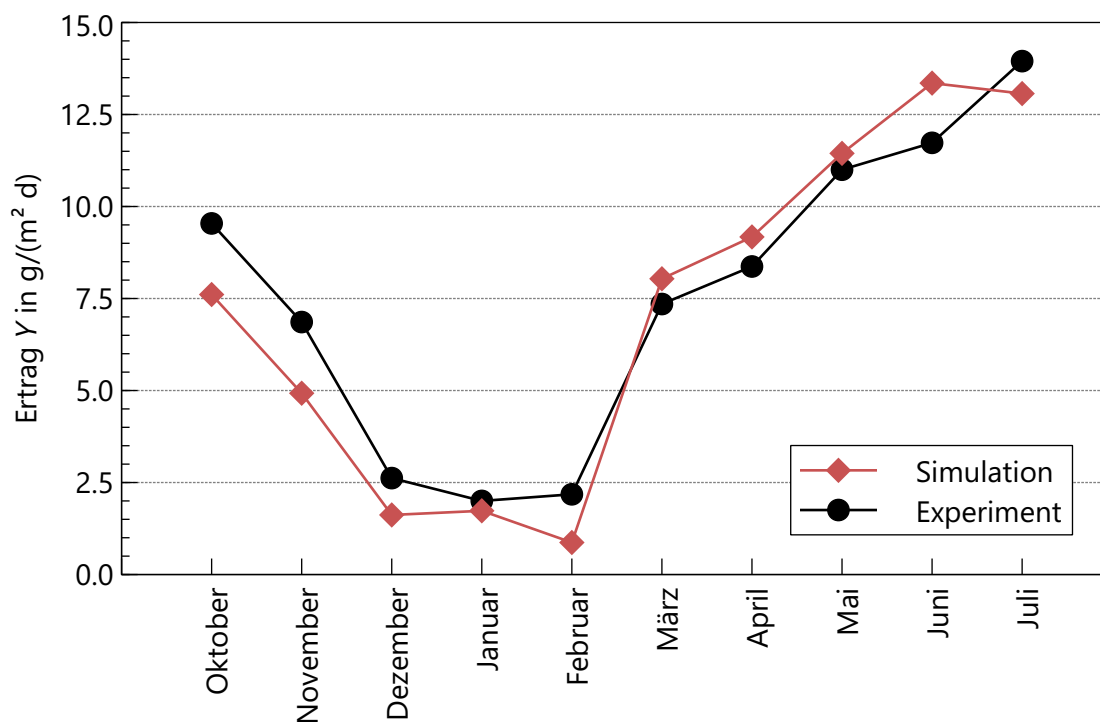


Abbildung 5.3: Vergleich des Ertrags der Simulation und im Experiments von JIMÉNEZ ET AL. 2003b von Oktober 1997 bis Juli 1998

Bei der Lösung des Optimierungsproblems werden aus dem Experiment alle verfügbaren monatlichen Erträge verwendet um den Parametersatz PS des Algenwachstumsmodells anzupassen. Die Verwendung aller verfügbaren Messwerte (in diesem Fall die monatlichen Erträge) als Trainingssatz für die Modellanpassung führt im Allgemeinen zu einer Überanpassung des Modells und einer zu optimistischen Einschätzung dessen Vorhersagegenauigkeit. Die Aufteilung der Messwerte in einen Datensatz zum Training des Modells und in einen Datensatz zur Validierung des angepassten Modells ist keine sinnvolle Option, da die Anzahl an verfügbaren Messwerten sehr klein ist. Um trotzdem beurteilen zu können, wie gut die Vorhersagegenauigkeit das angepassten Modells bei einem unabhängigen Datensatz ist, wird eine Leave-One-Out Cross-Validation (LOO-CV) durchgeführt [WITTEN ET AL. 2011].

Im Zuge der LOO-CV wird das gleiche Optimierungsproblem wie oben beschrieben gelöst und dadurch die Parameter des Algenwachstumsmodells angepasst, wobei jedoch jeweils der Ertrag eines Monats unberücksichtigt gelassen wird. Dies führt zu insgesamt zehn verschiedenen Parametersätzen PS_n für das Algenwachstumsmodell. Jeder Parametersatz PS_n ist ein Ergebnis einer eigenständigen Anpassung der Parameter, bei der gerade der monatliche Ertrag des Monats n in der Optimierung nicht berück-

⁹ Bei der Berechnung des gemittelten Ertrags wird die unterschiedliche Anzahl an Tagen pro Monat berücksichtigt.

sichtigt wurde. Anhand der Vorhersagegenauigkeit des jeweiligen LOO-CV-Modells für den monatlichen Ertrag im Monat n unter Verwendung des Parametersatzes PS_n , bei dem der monatliche Ertrag von genau diesem vorherzusagendem Monat n nicht in der Optimierung berücksichtigt wurde, kann beurteilt werden wie gut die Modellvorhersage bei einem unabhängigen Datensatz ausfallen würde.

Der absolute Unterschied des Ertrags $\Delta_{abs}Y_{LOOCV,n}$ des Monats n zwischen der Simulation mit dem LOO-CV-Modell und dem Experiment ist eine Funktion des monatlichen Ertrags $Y_{Exp,n}$ im Experiment und dem durch das Modell mit dem Parametersatz PS_n vorhergesagten Ertrag $Y_{LOOCV,n}(PS_n)$:

$$\Delta_{abs}Y_{LOOCV,n} = Y_{LOOCV,n}(PS_n) - Y_{Exp,n}. \quad (5.8)$$

Der maximale absolute Unterschied zwischen dem mit dem LOO-CV-Modell simulierten Ertrag und dem tatsächlichen Ertrag ist $\Delta_{abs}^{max}Y_{LOOCV} = -3.03 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ im Juli und der maximale relative Unterschied ist $\Delta_{rel}^{max}Y_{LOOCV} = -62.6\%$ im Februar. Der Unterschied des über die Betriebszeit gemittelten Ertrags zwischen der Vorhersage der Simulation mit den LOO-CV-Modellen und dem tatsächlichen Ertrag im Experiment beträgt -5.17% . Für die Berechnung des gemittelten Ertrags der Simulation wird dabei der vom jeweiligen LOO-CV-Modell für das Monat n vorhergesagtem Ertrag $Y_{LOOCV,n}$ verwendet. Die Abweichungen $\Delta Y_{LOOCV,n}$ der LOO-CV-Modelle mit den Parametersätzen PS_n zu den experimentellen Werten sind dabei größer als die Abweichungen ΔY des Modells, dessen Parametersatz PS unter Verwendung aller Daten, also aller monatlicher Erträge des Experiments, angepasst wurde. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da der Ertrag für den Monat n gerade mit dem LOO-CV-Modell berechnet wird, bei dessen Anpassung der Monat n nicht berücksichtigt wurde. Die Vorhersagegenauigkeit der LOO-CV Modelle ist vergleichbar mit der Vorhersagegenauigkeit des Modells mit dem Parametersatz PS und es wird der Schluss gezogen, dass das Algenwachstumsmodell mit dem Parametersatz PS zur Vorhersage des Ertrags verwendet werden kann.

Abbildung 5.4 zeigt den Vergleich zwischen der Konzentration C_{Alge} der Alge in der Simulation und im Experiment. Beide zeigen einen starken Anstieg zu Beginn des Experiments und dann eine Abnahme über die Wintermonate. Beim Aussetzen des Erntens im Februar nimmt die Konzentration zu und bleibt dann bis zum Ende des Experiments relativ konstant. Die Simulation gibt den experimentellen Verlauf größtenteils gut wieder, berechnet jedoch für die erste Hälfte des Experiments zu niedrige und für die zweite Hälfte des Experiments zu hohe Konzentrationen der Alge.

Abbildung 5.5 zeigt den Vergleich der Temperatur des Pondwassers in der Simulation und im Experiment. Die Simulation kann den Temperaturverlauf über die gesamte Dauer des Experiments sehr gut wiedergeben. Sowohl der generelle Trend über das Jahr als auch auffällig niedrige oder hohe Temperaturen an bestimmten Tagen werden von der Simulation beschrieben.

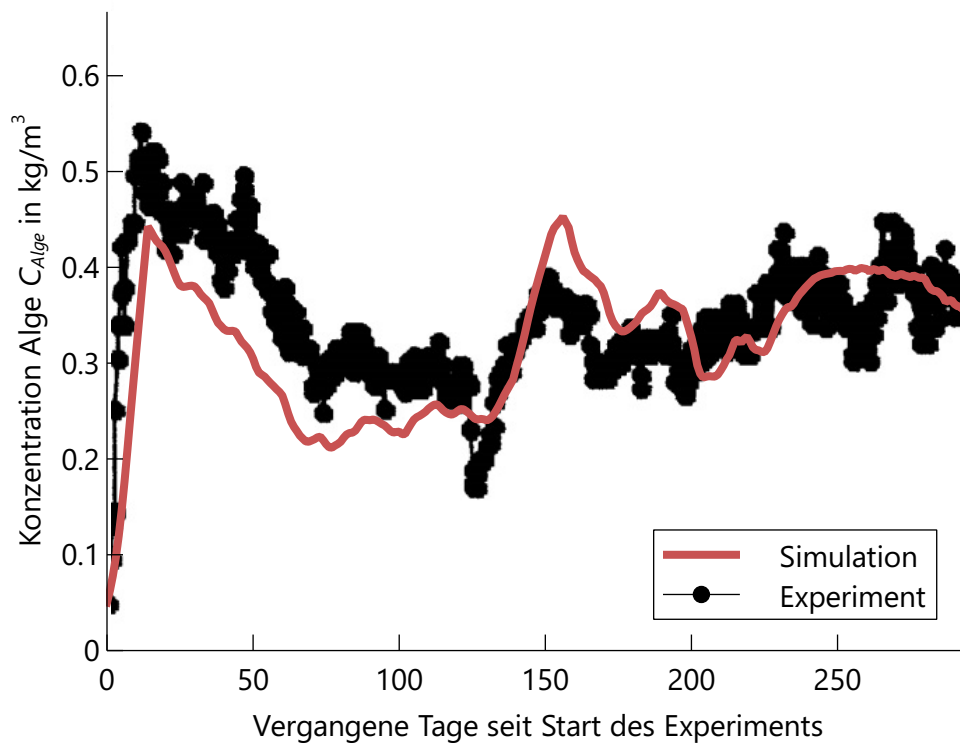


Abbildung 5.4: Vergleich der Konzentration der Alge der Simulation und im Experiment von JIMÉNEZ ET AL. 2003b

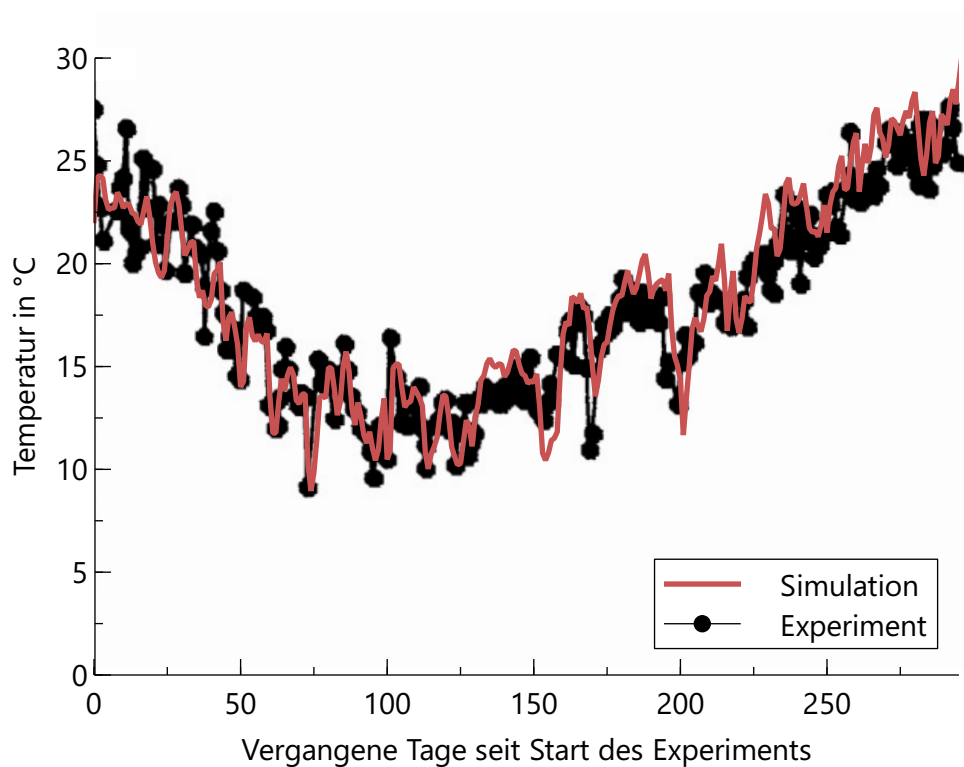


Abbildung 5.5: Vergleich der Temperatur des Pondwassers der Simulation und im Experiment von JIMÉNEZ ET AL. 2003b

Grundsätzlich ist das Simulationsmodell in der Lage den Ertrag des experimentellen Algenponds zu berechnen. Die vom Modell berechneten Werte für den monatlichen Ertrag fallen in der ersten Hälfte des Betriebs zu niedrig und in der zweiten Hälfte zu hoch aus. Die Ursache dafür ist die Konzentration der Alge, da die anfallende Ernte proportional von dieser abhängt. Diese Konzentration fällt ebenfalls am Anfang des Betriebs zu niedrig und am Ende zu hoch aus. Der deutliche Anstieg der Konzentration der Alge beim Start des Algenponds, als noch nicht geerntet wird, und beim Aussetzen der Ernte im Februar wird vom Simulationsmodell wiedergegeben. Der Wert, auf den die Konzentration der Alge ansteigt, wird zu Betriebsstart unterschätzt und wird um etwa $0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ zu niedrig berechnet. Die Höhe des Anstiegs im Februar wird richtig berechnet, da die Startkonzentration des Anstiegs in der Simulation um etwa $0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ höher ist als im Experiment, liegt auch die Endkonzentration um etwa $0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ zu hoch.

Die vom Modell berechneten Werte der Temperatur des Pondwassers decken sich sehr gut mit den gemessenen Werten. Das Simulationsmodell kann den Temperaturverlauf über die gesamte Betriebsdauer korrekt wiedergeben. Tage mit besonders niedrigen oder hohen Temperaturen werden ebenfalls in der Simulation berücksichtigt. Folglich sind die im Simulationsmodell implementierten Gleichungen geeignet den Energieaustausch zwischen Algenpond und Umwelt zu berücksichtigen. Die verwendeten Wetterdaten sowie die Art, wie diese in der Simulation eingebunden werden, sind in der Lage das Wetter am Standort des Algenponds zu beschreiben.

5.6.4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell in der Lage ist, das Verhalten des experimentellen Algenponds zu beschreiben und damit dessen Ertrag korrekt vorherzusagen. Die Werte der Anpassungsparameter maximale Wachstumsrate μ_{max} , Lichtabhängigkeit I_k , optimale Temperatur T_{opt} und Temperaturabhängigkeit T_{dep} werden im Zuge der Modellvalidierung bestimmt. Damit steht eine mathematische Beschreibung der im Experiment verwendeten Alge zur Verfügung. Das Modell ist validiert und kann für die Simulation von offenen Algenponds verwendet werden

6 Untersuchung des Verhaltens von offenen Algenponds

In diesem Teil der Arbeit wird der Einfluss des Standorts, des Betriebsmonats und der Betriebsdauer sowie der Betriebsparameter auf die Leistungsfähigkeit von Algenponds untersucht. Es werden dabei kontinuierlich betriebene Algenponds als auch diskontinuierliche betriebene Algenponds im Batchbetrieb untersucht. Die Leistungsfähigkeit wird dabei mit Hilfe von zwei Kennzahlen gemessen:

Y Der Ertrag Y ist die Zu- oder Abnahme der Masse der Alge im Algenpond pro Tag bezogen auf die Pondoberfläche. Der Ertrag ist im Gegensatz zur Wachstumsrate der Alge keine Momentaufnahme, sondern wird jeweils für einen bestimmten Zeitraum, z. B. die Betriebsdauer eines Algenponds, berechnet. Der Ertrag gibt die Produktivität des Algenponds wieder und ermöglicht es in seiner hier verwendeten Form Algenponds mit unterschiedlichen Größen und Betriebsdauern miteinander zu vergleichen.

CFE Die C-Fixierungseffizienz ist der Anteil an Kohlenstoff, der in die Biomasse des Algenponds eingebaut wird, bezogen auf die Masse an CO_2 , die extern über die Begasung zugeführt wird.

6.1 Generelles Vorgehen

Im Folgenden wird das generelle Vorgehen für die Untersuchung des Verhaltens von offenen Algenponds erläutert. Abschnitt 6.1.1 beschreibt die durchgeführten Vorstudien mit denen die notwendige zeitliche und örtliche Diskretisierung ermittelt wird. In Abschnitt 6.1.2 wird das allgemeine Vorgehen bei der Durchführung und Auswertung der Ergebnisse einer Simulation erläutert.

Für das Aufsetzen der Simulationen wird ein sog. Basis-Fall verwendet, der als Vorlage für alle Simulationen dient. Für jede Simulation werden dann nur die Randbedingungen des Basis-Falls geändert, die für die jeweilige Untersuchung relevant sind. Soll z. B. der Einfluss der Wassertiefe untersucht werden, wird nur die Wassertiefe geändert, die restlichen Randbedingungen aber unverändert gelassen. Für die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen gibt es insgesamt zwei Basis-Fälle, einen für den kontinuierlichen betriebenen und einen für den diskontinuierlichen betriebenen Algenpond.

6.1.1 Vorstudien

Im Folgenden wird der Einfluss des Zeitschritts und der Anzahl an CSTRs, die zur Diskretisierung der Pondgeometrie verwendet werden, auf den Ertrag Y und die C-Fixierungseffizienz CFE untersucht. Dafür wird der Basis-Fall des kontinuierlich betriebenen Algenponds verwendet, der in Abschnitt 6.2.1 beschrieben ist. Der Algenpond wird mit jeweils 1, 2 und 5 CSTRs diskretisiert. Die Werte für den Zeitschritt werden so gewählt, dass die Courant-Zahl Co der untersuchten Fälle nach Gleichung 5.7 bei 0.125, 0.25 und 0.5 liegt. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung.

Tabelle 6.1: Einfluss der Anzahl ans CSTRs und des Zeitschritts auf den Ertrag Y und die C-Fixierungseffizienz CFE (Werte gemittelt über den Monat)

Anzahl an CSTRs	Zeitschritt Δt / sec	Co	Y / $\frac{g}{m^2 d}$	CFE / %
1	100	0.25	14.22	76.92
2	50	0.25	14.24	77.05
5	20	0.25	14.25	76.79
1	50	0.125	14.24	76.89
1	200	0.5	14.22	77.03

Prinzipiell ist das Simulationsmodell in der Lage den Kanal des Algenponds mit einer beliebigen Anzahl an CSTRs abzubilden. Die Werte für den Ertrag Y und die C-Fixierungseffizienz CFE in Tabelle 6.1 zeigen jedoch für diesen Algenpond keine signifikanten Unterschiede zwischen der Diskretisierung mit 1, 2 oder 5 CSTRs. Der Grund dafür ist, dass im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit $v_{Strömung}$ relativ langsame Wachstum der Alge. Dadurch ergeben sich entlang der Strömungsrichtung, die durch die Diskretisierung in mehrere CSTRs aufgelöst wird, keine signifikanten Gradienten und dadurch letztendlich kein Einfluss auf Algenwachstum durch z. B. einen veränderten pH -Wert. Folglich wird bei den Simulationen in diesem Kapitel der Algenpond mit einem CSTR angenähert. Diese Vereinfachung ist natürlich nur gültig für den hier untersuchten 0.2 ha Algenpond mit der festgelegten Geometrie und Strömungsgeschwindigkeit.

Alle untersuchten Zeitschritte erfüllen das für eine stabile Durchführung der Simulation notwendige Kriterium $Co < 1$. Die Ergebnisse der Vorstudie in Tabelle 6.1 zeigen, dass Zeitschritte, deren Courant-Zahl kleiner als 0.25 ist, zu keiner signifikanten Änderung der Berechnungsergebnisse führen. Folglich wird für die folgenden Pondsimulationen ein Zeitschritt von $\Delta t = 100$ s gewählt, so dass bei der örtlichen Auflösung des Algenponds mit einem CSTR $Co = 0.25$ gilt.

Aus den Vorstudien ist weiterhin ersichtlich, dass auch Zeitschritte verwendet werden können, die größer als $\Delta t = 100$ s sind. Trotzdem wird ein kleinerer Zeitschritt verwendet, da diese Vorstudien nur den Basis-Fall behandeln und deshalb ein Zeitschritt, der kleiner als nötig ist, einen gewissen Sicherheitsabstand für Fälle bietet, bei denen der größere

Zeitschritt eventuell zu signifikanten Unterschieden in den Berechnungsergebnissen führt.

Abbildung 6.1 zeigt das dynamische Verhalten des Algenponds für verschiedene Startwerte der Konzentration der Alge C_{Alge} . Die Simulation verwendet Wetterdaten, die am Standort Las Cruces (USA) im April 2013 gemessen wurden. Das Messintervall der Wetterdaten ist 5 min.

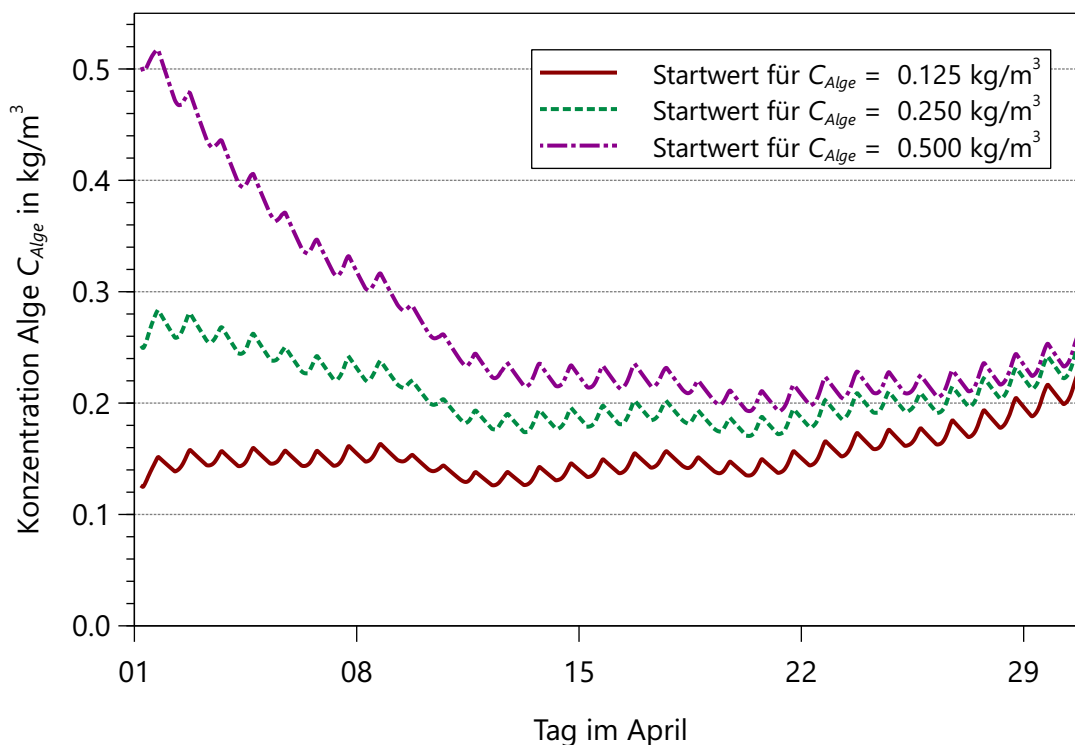


Abbildung 6.1: Einfluss verschiedener Startwerte der Konzentration der Alge auf die Simulation eines Algenponds in Las Cruces (USA) für April 2013 (Werte gemittelt über 15 min)

Für den Start der Simulation am 1. April werden drei unterschiedliche Werte für C_{Alge} als Startwert festgelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Simulationsmodell das dynamische Verhalten des Algenponds über einen Tag wiedergeben kann. Weiterhin ist die Algenkonzentration von Tag zu Tag unterschiedlich, da auch die Wetterdaten für jeden Tag anders sind. Es ist auch ersichtlich, dass die Ergebnisse einer Pondsimulation von der Wahl der Startwerte abhängen.

Für alle simulierten Startwerte steigt die Algenkonzentration am Tag und sinkt in der Nacht. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da am Tag mehr Algen und in der Nacht weniger Algen wachsen als geerntet werden. Die Werte der Algenkonzentration sind von den Startwerten beim Beginn der Simulation abhängig. Die in Abbildung 6.1 gezeigten Kurven für verschiedene Startwerte der Algenkonzentration legen die Vermutung nahe, dass der Unterschied zwischen den Kurven nach einer bestimmten Zeitdauer ganz verschwindet. Die dafür nötige Zeitdauer ist wahrscheinlich für jeden simulierten Fall anders. Um Einflüsse unterschiedlicher Startwerte auf die Ergebnisse der Pondsimulation

nen auszuschließen wird die Leistungsfähigkeit eines Algenponds an einem bestimmten Ort und für eine bestimmte Betriebsperiode mit Wetterdaten eines typischen Tages bestimmt. Die Berechnung der Wetterdaten für den typischen Tag eines Monats sowie deren Verwendung in der Simulation wird in Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

6.1.2 Simulation und Auswertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen in diesem Abschnitt sind in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil wird der Ertrag von offenen Algenponds für drei verschiedene Standorte und den Monaten April bis September 2013 bestimmt. Die Kombination aus Standort und Betriebsmonat, die den größten Ertrag aufweist, wird dann als Basis-Fall für den zweiten Teil der Untersuchungen verwendet. Im zweiten Teil wird der Einfluss der Betriebsparameter auf den Ertrag von Algenponds untersucht, indem ausgehend vom Basis-Fall einzelne Parameter variiert werden. Die Untersuchungen der ersten beiden Teile wird sowohl für kontinuierlich betriebene Algenponds als auch für diskontinuierliche betriebene Algenponds im Batchbetrieb durchgeführt. Als Abschluss werden im dritten Teil die Betriebsparameter des Basis-Falls auf einen maximalen Ertrag hin optimiert.

Das Vorgehen bei der Untersuchung von kontinuierlich und diskontinuierlich betriebenen Algenponds ist nicht in allen Punkten gleich. Im Folgenden werden die gemeinsamen und unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Simulation und Auswertung erläutert.

6.1.2.1 Kontinuierlicher Betrieb und Batchbetrieb

Begasung Ob dem Algenpond durch die Begasung CO_2 zugeführt wird, ist abhängig vom pH -Wert des Pondwassers. Die Begasung wird aktiviert, wenn der pH -Wert ein festgesetztes oberes pH -Limit übersteigt, und deaktiviert, wenn der pH -Wert ein festgesetztes unteres pH -Limit unterschreitet.

Wetterdaten Für die Simulation werden nicht die täglichen Wetterdaten verwendet, die sowohl über den Tag als auch von Tag zu Tag variieren, sondern die Wetterdaten eines typischen Tags für einen bestimmten Monat. Folglich ändern sich die Wetterdaten der Simulation über einen Tag (24 h Periode) und repräsentieren das typische Wetter eines Tages im jeweiligen Monat und am jeweiligen Ort. Dieses Vorgehen ermöglicht es, dass die Simulationsergebnisse des kontinuierlich betriebenen Algenponds von den Startwerten unabhängig sind und der Algenpond nach einigen simulierten Tagen einen stabilen Betriebsmodus erreicht. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Betriebsmodi zu gewährleisten, werden auch für den Algenpond im Batchbetrieb die Wetterdaten des jeweils typischen Tags verwendet.

Die Wetterdaten des typischen Tags eines Monats sind in 5 min Intervalle aufgelöst. Der Wert für ein Intervall wird berechnet, indem über die zugehörigen Intervalle aller Tag im jeweiligen Monat gemittelt wird.

Vergleichbarkeit der Ergebnisse Die nach diesem Vorgehen berechneten Ergebnisse eines Monats sind nicht vom Vormonat abhängig. Das Verhalten des Algenponds über mehrere Monate kann folglich nicht abgebildet werden. Die Ergebnisse sind repräsentativ für den jeweiligen Monat und Standort und können verwendet werden, um eben diese miteinander zu vergleichen und die Auswirkungen von veränderten Betriebsparametern zu untersuchen.

6.1.2.2 Kontinuierlicher Betrieb

Ernterate Um verwertbare Ergebnisse zu erhalten, muss kontinuierlich ein Teil der Algen, die im Algenpond wachsen, entfernt werden. Dies wird in der Simulation durch einen Erntestrom erreicht, der dem Algenpond entzogen, von den Algen befreit und dann wieder zurückgeführt wird. Der Volumenstrom des Erntestroms ist das Produkt aus der sog. Ernterate HR und dem totalen Pondvolumen. Die Ernterate HR ist der Anteil am Pondvolumen, der an einem Tag geerntet wird. Zusätzlich wird dem Algenpond ein Makeup-Strom zugeführt, der die Verluste oder Überschüsse an Wasser durch Verdunstungs- oder Kondensationsvorgänge kompensiert.

Ertrag Für die untersuchten Fälle ist es nicht möglich eine sog. periodisch stationäre Lösung zu finden, die sich alle 24h wiederholt. Diese Lösung hätte am Ende einer 24h Periode dieselben Werte der simulierten Größen wie am Beginn der 24h Periode. Um den Ertrag eines Algenponds für einen bestimmten Monat und Standort zu berechnen werden 300 Tage mit den Wetterdaten des jeweiligen typischen Tags simuliert und dann über die letzten berechneten 30 Tage gemittelt. Somit wird dem Algenpond genug Zeit gegeben, um einen stabilen Betriebszustand zu erreichen, der zwar nicht die periodisch stationäre Lösung darstellt, jedoch aussagekräftige Werte für den typischen Tag liefert.

6.1.2.3 Batchbetrieb

Ernterate Während der Betriebszeit wird der Algenpond im Batchbetrieb nicht geerntet.

Ertrag Bei der Berechnung des Ertrags wird unterstellt, dass generell die in einer Algenanlage verfügbaren Algenponds möglichst optimal genutzt werden sollen. Die Algenponds werden dann optimal genutzt, wenn der in einem Algenpond erreichte Ertrag maximiert wird. Der Ertrag eines diskontinuierlich betriebenen Algenponds ist abhängig von der Zunahme der Masse der Alge und der dafür nötigen Betriebsdauer. Für die Ergebnisse wird der Ertrag bei der optimalen Betriebsdauer berechnet. Die optimale Betriebsdauer ist der Zeitraum vom Beginn bis zum Ende des Batchbetriebs, in dem der Ertrag, bezogen auf diesen Zeitraum, am größten ist. Folglich wird der Betrieb des Algenponds dann beendet, wenn das Maximum des, auf die Betriebsdauer bezogenen, Ertrags erreicht ist. Dies ist

dann der Fall, wenn beim weiteren Betrieb des Algenponds die Masse der Alge nicht stärker zunimmt als vorher.

Bei der Berechnung der optimalen Betriebsdauer wird die zum erneuten Ansetzen eines Batch benötigte Rüstzeit berücksichtigt. Die Rüstzeit wird bei der Berechnung des Ertrags zur Betriebsdauer hinzugerechnet, da auch in dieser Zeit der Algenponds nicht verwendet werden kann.

Vor und während der Simulation ist die optimale Betriebsdauer noch nicht bekannt, weshalb zunächst eine ausreichende Anzahl an Tagen simuliert werden muss und dann im Anschluss an die Simulation die optimale Betriebsdauer bestimmt wird.

6.2 Untersuchte Fälle

Die untersuchten Fälle unterscheiden sich in den Betriebsarten der Algenponds:

- kontinuierlich betriebene Algenponds und
- diskontinuierlich betriebene Algenponds (Batchbetrieb).

Eine Vielzahl der Randbedingungen ist für alle untersuchten Fälle gleich. Aus diesem Grund wird für jede Betriebsart ein Basis-Fall definiert, dessen Randbedingungen für jede Untersuchung so modifiziert werden, dass der zu untersuchende Einfluss erfasst werden kann. Die restlichen Randbedingungen des Basis-Falls bleiben unverändert. Der Hauptunterschied der Basis-Fälle der beiden Betriebsarten ist die Ernterate, die im Batchbetrieb gleich null ist, da hier die Algen erst am Ende der Betriebsdauer geerntet werden.

6.2.1 Basis-Fall

In den Tabellen 6.2-6.5 sind die Eigenschaften und Werte der Simulation für den Basis-Fall aufgelistet. Für Eigenschaften, deren Werte für den kontinuierlichen (Abk. „kont.“) und diskontinuierlichen (Abk. „diskont.“) unterschiedlich sind, werden in den Tabellen beide Werte angegeben. In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden nur die Unterschiede zum Basis-Fall erwähnt.

Der Standort des Basis-Falls ist Las Cruces (New Mexico, USA). Der Betriebsmonat ist Juni im Jahr 2013.

Tabelle 6.2 zeigt die numerischen Einstellungen der Simulation. Für den kontinuierlichen Fall werden die Ergebnisse für die spätere Auswertung alle 15 simulierten Minuten gespeichert, für den diskontinuierlichen Falle jede simulierte Minute. Davon gibt es eine Ausnahme: Die für die Berechnung des Ertrags Y und der C-Fixierungseffizienz CFE notwendigen Werte werden für den kontinuierlichen Fall zu jedem berechneten Zeitschritt gespeichert.

Die Pondgeometrie sowie die Eigenschaften der Strömung und des Pondwassers sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Der offene Algenpond hat eine gesamte Kanallänge von

Tabelle 6.2: Numerische Einstellungen

Eigenschaft	Wert
Anzahl simulierter Tage (kont./diskont.)	300 / 100
Zeitschritt Δt	100 s
Intervall der gespeicherten Ergebnisse (kont./diskont.)	15 min / 1 min

$l_{Kanal} = 200$ m und Kanalbreite von $l_{Breite} = 10$ m. Die Strömungsgeschwindigkeit hat den konstanten Wert $v_{Strömung} = 0.5 \frac{m}{s}$. Die Wassertiefe des Algenponds beträgt $l_{Tiefe} = 0.3$ m. Die Eigenschaften des Pondwassers sind ähnlich zu denen von Brackwasser. Die für die Simulationen gewählte Alkalinität A_T wird durch die Zugabe der passenden Menge an $NaHCO_3$ und Na_2CO_3 zum Pondwasser erreicht. Die gewünschte Salinität S wird durch die Zugabe von $NaCl$ eingestellt. Die Ernterate HR beträgt für den kontinuierlich betriebenen Algenpond $HR = 1/7 \frac{1}{d}$ und für den diskontinuierlich betriebenen Algenpond $HR = 0 \frac{1}{d}$. Die Startkonzentration der Alge ist nur für den diskontinuierlichen Betrieb relevant und beträgt dort $0.05 \frac{kg}{m^3}$. Die Rüstzeit, die benötigt wird, um im diskontinuierlichen Betrieb im selben Algenponds einen neuen Batch anzusetzen, ist 12 h.

Tabelle 6.3: Pondgeometrie, Eigenschaften der Strömung und Eigenschaften des Pondwassers

Eigenschaft	Wert
Gesamte Kanallänge l_{Kanal}	200 m
Kanalbreite l_{Breite}	10 m
Gesamte Pondoberfläche	0.2 ha (0.5 acre)
Wassertiefe l_{Tiefe}	0.3 m
Strömungsgeschwindigkeit $v_{Strömung}$	$0.5 \frac{m}{s}$
Salinität S	10 ‰
Alkalinität A_T	$2 \frac{mmol}{l}$
Ernterate HR (kont./diskont.)	$1/7 \frac{1}{d} / 0 \frac{1}{d}$
Startkonzentration Alge (diskont.)	$0.05 \frac{kg}{m^3}$
Rüstzeit(diskont.)	12 h

Tabelle 6.4 listet die Eigenschaften der Begasung auf. Das Gas wird in einer zusätzlichen Sumpftiefe von 0.5 m eingebracht. Die tatsächliche Wassertiefe der Begasung ist folglich $0.3 \text{ m} + 0.5 \text{ m} = 0.8 \text{ m}$. Die zusätzliche Sumpftiefe hat keinen Einfluss auf die Geometrie oder die Strömungseigenschaften des Algenponds und wird nur für die Berechnung des Stoffübergangs auf Grund der Begasung verwendet. Die Begasung wird aktiviert, sobald der pH -Wert das untere pH Limit erreicht und deaktiviert, sobald der pH Wert das obere pH Limit erreicht. Im Zeitraum von 18:00 h bis 6:00 h ist die Begasung immer deaktiviert.

Das für die Begasung verwendete Gas besteht aus 5 % CO₂ und 95 % N₂. Diese Zusammensetzung ist typisch für Rauchgase aus mit Erdgas befeuerten Kraftwerken. Der Volumenstrom der Begasung beträgt $100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.¹ Der Blasendurchmesser beim Austritt des Gases im Sumpf des Algenpönds ist 3 mm.

Tabelle 6.4: Eigenschaften der Begasung

Eigenschaft	Wert
Zusammensetzung Gas	5 % CO ₂ / 95 % N ₂
Volumenstrom Gas	$100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
Zusätzliche Sumpftiefe	0.5 m
Blasendurchmesser am Austritt	3 mm
unteres <i>pH</i> Limit	8.25
oberes <i>pH</i> Limit	8.75

Für die in diesem Abschnitt durchgeführten Untersuchungen wird das generische Algenwachstumsmodell aus Abschnitt 4.6.1 verwendet. Die verwendeten Werte für die Parameter des generischen Algenwachstumsmodells sind in Tabelle 6.5 aufgeführt. Diese Werte basieren auf eigenen Abschätzungen und experimentellen Ergebnissen von WATSON 2009, XIN ET AL. 2011 und BARTOSH & BANKS 2007.

Tabelle 6.5: Parameter des generischen Algenwachstumsmodells

Parameter	Wert
Maximale Wachstumsrate μ_{max}	$0.03 \frac{1}{\text{h}}$
Sterberate μ_{Death}	$0.0015 \frac{1}{\text{h}}$
<i>pH</i> Optimum pH_{opt}	8.5
<i>pH</i> Gradient pH_{dep}	0.3
Temperatur Optimum T_{opt}	25 °C
Temperatur Gradient T_{dep}	$0.05 \frac{1}{\text{K}}$
Lichtabhängigkeit I_k	$10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
Extinktionskoeffizient K_{e1}	$2 \frac{1}{\text{m}}$
Extinktionskoeffizient K_{e2}	$60 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$
Umwandlungsfaktor CO ₂ für Algenwachstum	1.8 kg/kg _{Alge}
Umwandlungsfaktor CO ₂ für Algensterben	1.47 kg/kg _{Alge}
Umwandlungsfaktor H ₂ O	0.6 kg/kg _{Alge}
Umwandlungsfaktor O ₂	1.07 kg/kg _{Alge}

¹ Die Einheit $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ entspricht $1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ bei $T = 273.15 \text{ K}$ und $p = 1.01325 \text{ bar}$, DIN1342. Häufig wird diese Einheit auch als Normkubikmeter bezeichnet.

6.2.2 Variation von Standort und Betriebsmonat

Die Simulationen werden mit den Wetterdaten eines typischen Tages des jeweils untersuchten Monats durchgeführt. Die folgenden Monate im Jahr 2013 werden dabei berücksichtigt: April, Mai, Juni, Juli, August und September. Die untersuchten Standorte sind in Tabelle 6.6 aufgelistet. Die Wetterdaten stammen vom U.S. Climate Reference Network [U.S. CLIMATE REFERENCE NETWORK 2016-02-02] und DIAMOND ET AL. 2013].

Tabelle 6.6: Untersuchte Standorte

Standort	Breitengrad LAT	Längengrad LON	Zeitzone ZZ
Austin (TX, USA)	30.25°	-97.75°	-6 h
Everglades City (FL, USA)	25.86°	-81.38°	-5 h
Las Cruces (NM, USA), Basis-Fall	32.31°	-106.78°	-7 h

6.2.3 Variation der Betriebsparameter

In diesem Abschnitt wird aufgeführt, welche Betriebsparameter für die Untersuchungen variiert werden und in welchen Grenzen dies stattfindet. Die Variation der Ernterate wird nur für den kontinuierlichen Betrieb durchgeführt. Die Variation der Startkonzentration der Alge eines Batches wird nur für den diskontinuierlichen Betrieb durchgeführt. Die übrigen Betriebsparameter werden für beide Betriebsarten in gleicher Weise variiert.

Wassertiefe Die Wassertiefe des Algenponds wird von $l_{Tiefe} = 0.1$ m bis $l_{Tiefe} = 0.5$ m variiert. Bezogen auf den Basis-Fall mit einer Wassertiefe $l_{Tiefe} = 0.3$ m entspricht das einer relativen Änderung von -67% bis +67%. Das Gas der Begasung wird in der Wassertiefe des Algenponds plus der Sumpftiefe von 0.5 m eingebracht.

pH Der Ziel-pH-Wert des Pondbetriebs wird von $pH = 7$ bis $pH = 10$ variiert. Die Einstellung des pH-Werts im Algenpond wird dadurch erreicht, dass das untere und obere pH Limit der Begasung auf einen Wert eingestellt wird, der 0.25 kleiner und größer ist als der Ziel-pH-Wert.

Alkalinität Jeweils zwei Simulationen des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betriebs werden mit einer veränderten Alkalinität von $A_T = 20 \frac{\text{mmol}}{\text{l}}$ und $A_T = 200 \text{ mmol}$ durchgeführt. Dies entspricht einer um das 10 und 100 fachen höheren Alkalinität als der des Basis-Falls mit $A_T = 2 \frac{\text{mmol}}{\text{l}}$.

Ernterate (kontinuierlicher Betrieb) Die Ernterate wird von $HR = 0.0714 \frac{1}{\text{d}}$ bis $HR = 0.2143 \frac{1}{\text{d}}$ variiert. Dies entspricht einer Änderung der Ernterate des Basis-Falls mit $HR = 1/7 \frac{1}{\text{d}}$ um $\pm 50\%$.

Startkonzentration Alge (diskontinuierlicher Betrieb) Die Startkonzentration der Alge zu Beginn eines Batches wird von $C_{Alge} = 0.01 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ bis $C_{Alge} = 0.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ vari-

iert. Dies entspricht einer Änderung der Startkonzentration des Basisfalls mit $C_{Alge} = 0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ von -80% bis $+300\%$.

Rüstzeit (diskontinuierlicher Betrieb) Die Rüstzeit beträgt für den Basisfall 12 h. Dies ist gleichzeitig der kleinstmögliche sinnvolle Abstand zwischen dem Ende und erneuten Start eines Batch. Wie in Abschnitt 6.1.2.3 erläutert, wird der Batchbetrieb am Maximum des gemittelten Ertrags gestoppt. Die Betriebsdauer, nach der dieses Maximum auftritt, ist zwar für jeden Fall unterschiedlich, die Uhrzeit beträgt aber immer ca. 18:00 Uhr. Dies liegt daran, dass auf Grund nachlassender solarer Strahlung nach 18:00 Uhr der gemittelte Ertrag wieder abnimmt und somit ein weiterer Betrieb des Batches nicht zur optimalen Ausnutzung des Algenponds führt. Der Start des Batches ist jeweils um 6:00 Uhr, um die vollständige solare Strahlung des ersten Tages auszunutzen. Bei der Variation der Rüstzeit wird der Wert des Basis-Falls um jeweils ein vielfaches von 24 h erhöht. Die untersuchten Rüstzeiten sind 12 h, 36 h, 60 h und 84 h.

6.3 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Simulationen vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb werden wenn möglich zusammen präsentiert um Gemeinsamkeiten und Unterschiede auf Grund der Betriebsarten besser darstellen zu können.

Bevor auf die einzelnen Ergebnisse eingegangen wird soll das dynamische Verhalten der Algenponds anhand eines Ausschnitts des Betriebszeitraums gezeigt werden.

Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der Wachstumsrate der Alge, des CO_2 -Feedstroms und des pH -Werts über 24 h für den kontinuierlichen Basis-Fall. Die Wachstumsrate der Alge ist in der Nacht zwischen 19:00 Uhr und 5:00 Uhr negativ. Das bedeutet, dass in diesem Zeitraum mehr Algen sterben als wachsen und die Masse an Algen dadurch insgesamt abnimmt. Die höchste Wachstumsrate wird in der Mittagszeit um 11:00 Uhr erreicht. Der Verlauf der Wachstumsrate der Alge ist sehr ähnlich zum (nicht gezeigten) Verlauf der solaren Einstrahlung. Dies ist zu erwarten, da die Wachstumsrate durch die zur Verfügung stehende Lichtintensität maßgeblich beeinflusst ist.

Der pH -Wert wird durch die Wachstumsrate der Alge und das CO_2 -Feed der Begasung bestimmt. Wenn die Algen wachsen wird von diesen CO_2 konsumiert, was zu einer Erhöhung des pH -Werts führt. Die Erniedrigung des pH -Wertes erfolgt hauptsächlich durch die Zufuhr von CO_2 . Diese Zufuhr startet für den gezeigten Fall bei einem Wert von $pH = 8.75$ und stoppt bei $pH = 8.25$. Die Werte am Ende der gezeigten 24 h Periode sind nicht identisch zu den Werten am Anfang, da der Algenpond keine periodisch stationäre Lösung über einen Tag hat.

Abbildung 6.3 zeigt den Ertrag und die Konzentration der Alge für den diskontinuierlichen Basis-Fall. Die Werte sind für eine Betriebsdauer von 0 – 30 d aufgetragen. Innerhalb eines Tages nimmt die Konzentration der Alge zuerst zu und dann wieder

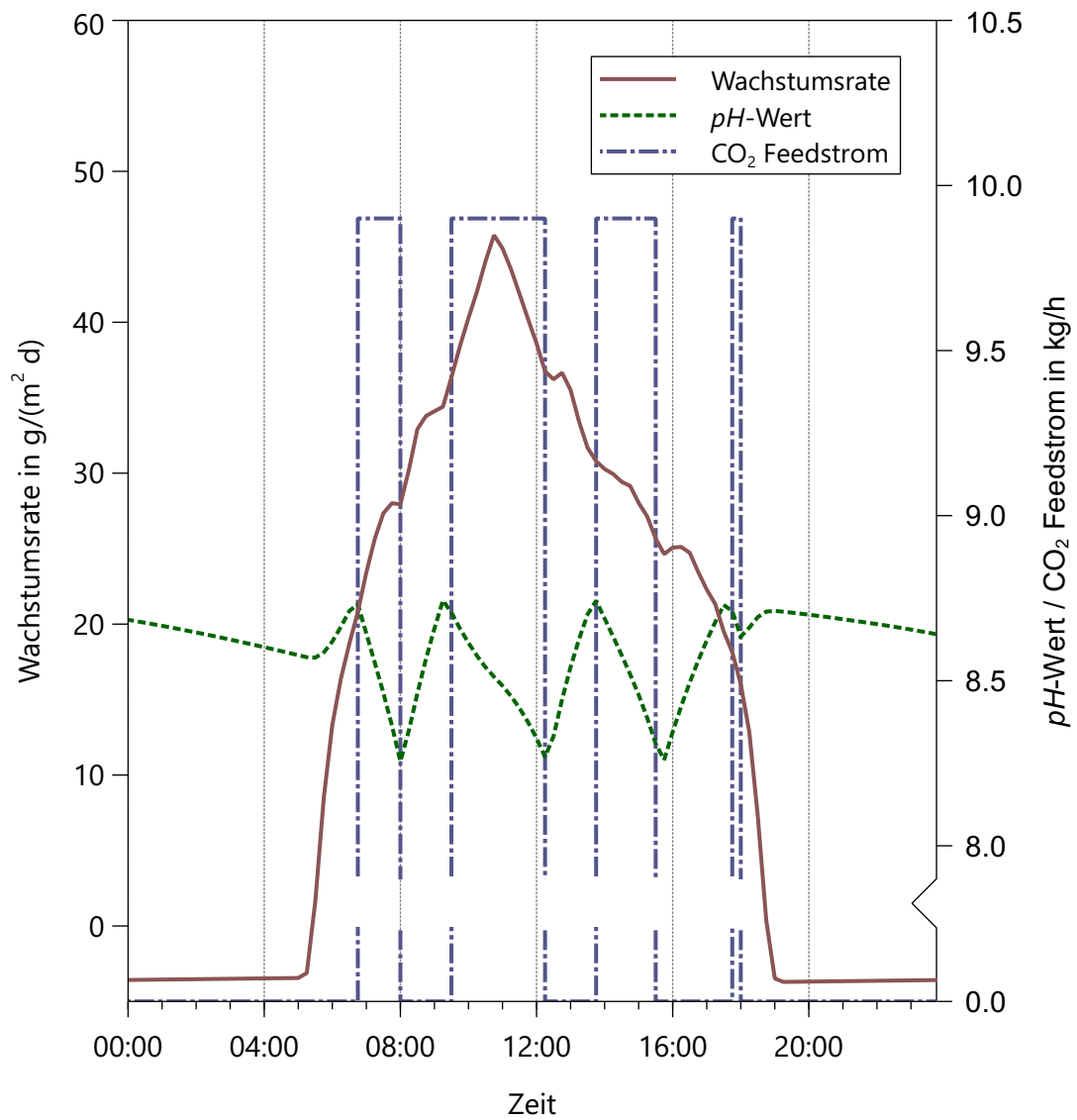


Abbildung 6.2: Verlauf von Wachstumsrate der Alge, CO₂-Feedstrom und pH-Wert über 24 h für den kontinuierlichen Basisfall (Werte gemittelt über 15 min)

ab, wobei jedes Mal der Wert vom Vortag überschritten wird. Die Konzentration der Alge folgt damit, wie schon vorher für den kontinuierlichen Betriebsfall beschrieben, dem Verlauf der solaren Einstrahlung. Die Abnahme der Konzentration ist durch das Sterben der Algen in der Nacht begründet. Die Konzentration der Alge zeigt eine stetige Zunahme über die Tage, deren Steigung nach einer Anlaufphase in den ersten Tagen mit jedem weiteren Tag abnimmt. Der Ertrag des Algenpools weist starke Schwankungen auf, die mit der Konzentration der Alge gekoppelt sind. Der Grund dafür ist die Berechnung des Ertrags, die sich aus der bis zu diesem Tag produzierten Algenmasse ergibt, und der Tatsache, dass die produzierte Algenmasse proportional zur Konzentration der Algen ist. Das Maximum des Ertrags wird bei einer Betriebsdauer von 16,5 d erreicht. Dies ist der optimale Zeitpunkt um, bei optimaler Ausnutzung der Algenpools, den Betrieb zu stoppen, die Algen abzuernten und einen neuen Batch anzusetzen. Würde man den Algenpool länger betreiben, dann sinkt der auf die Betriebsdauer bezogene Ertrag wieder ab.

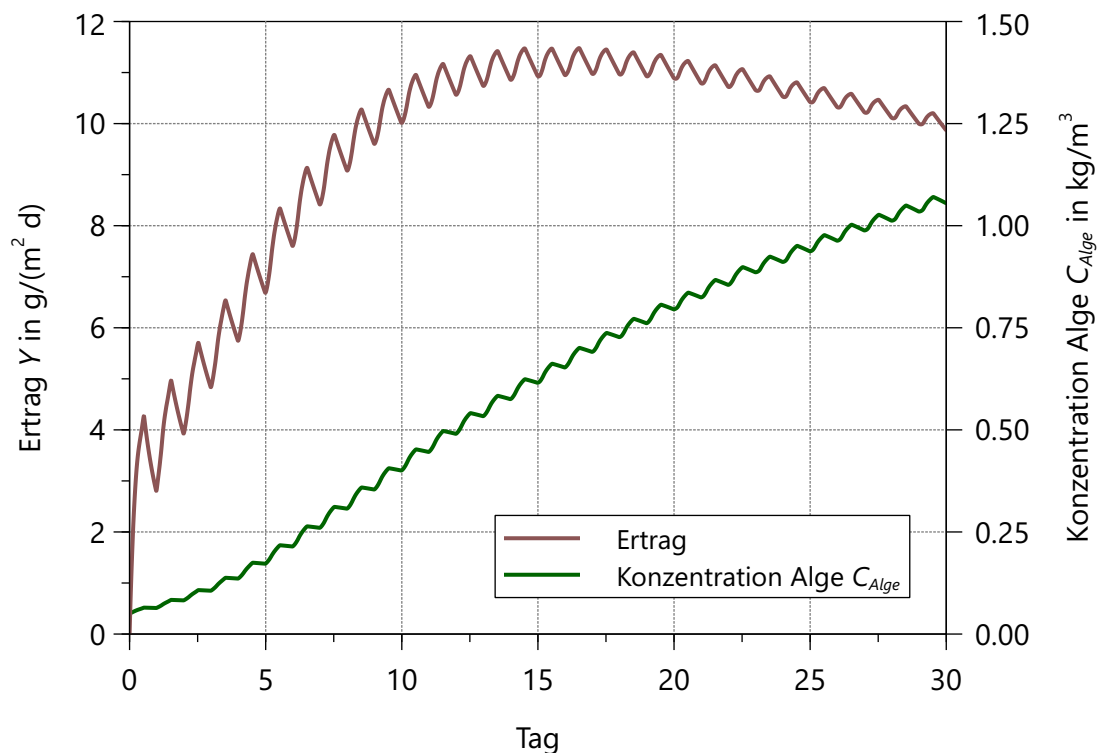


Abbildung 6.3: Verlauf von Ertrag und Konzentration der Algen über die ersten 30 Tage des diskontinuierlichen Basisfalls

6.3.1 Einfluss von Standort und Betriebsperiode

Abbildung 6.4 zeigt die Erträge der Algenpools an den drei Standorten in den Betriebsmonaten von April bis September. Die Werte für den kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb sind gemeinsam abgebildet. Bei beiden Betriebsarten wird der höchste Ertrag in Las Cruces im Juni erreicht mit Werten von $Y = 14.2 \frac{g}{m^2 d}$ für den kontinuierlichen Betrieb und $Y = 11.5 \frac{g}{m^2 d}$ für den diskontinuierlichen Betrieb. Den

niedrigsten Ertrag zeigt der Standort Everglades City im August mit einem Wert von $Y = 5.4 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ im diskontinuierlichen Betrieb.

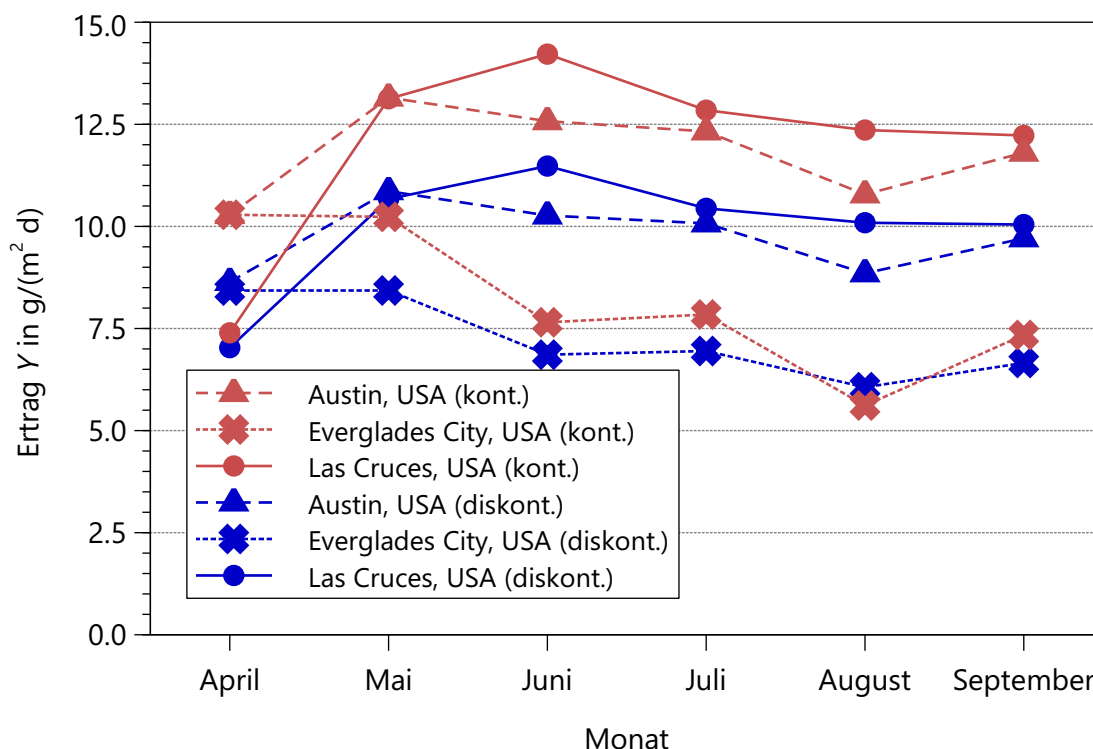


Abbildung 6.4: Ertrag des Algenponds in Abhängigkeit von Standort und Betriebsmonat; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Vergleicht man die Standorte und auch die Betriebsarten untereinander, so sind folgende Zusammenhänge zu erkennen: Generell weist Las Cruces die höchsten Erträge auf, gefolgt von Austin und Everglades City. Im kontinuierlichen Betrieb sind deutlich höhere Erträge zu erzielen als im diskontinuierlichen Betrieb. Der Verlauf des Ertrags eines Standorts über die Betriebsmonate ist sehr ähnlich zwischen den beiden Betriebsarten. Für Las Cruces und Austin sind diese fast parallel zueinander, für Everglades City ist dies mit Ausnahme vom Monat August auch der Fall.

Die C-Fixierungseffizienz in Abhängigkeit von Standort und Betriebsmonat ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Die größte Fixierungseffizienz wird mit dem kontinuierlich betriebenen Algenpond in Las Cruces im April mit $CFE = 79.7\%$ erreicht. Den geringsten Wert zeigt der diskontinuierlich betriebene Algenpond in Everglades City im Juni mit $CFE = 71.8\%$.

Ausgehend vom April nehmen die Werte der C-Fixierungseffizienz für alle Standorte über die Zeit ab. Wie auch schon bei den Erträgen in Abbildung 6.4 zeigen die kontinuierlich betriebenen Algenponds höhere Werte als die diskontinuierlich betriebenen Algenponds. Der Verlauf für einen Standort ist dagegen für beide Betriebsarten wieder sehr ähnlich und parallel verschoben. Der Algenpond in Las Cruces erreicht in den unterschiedlichen

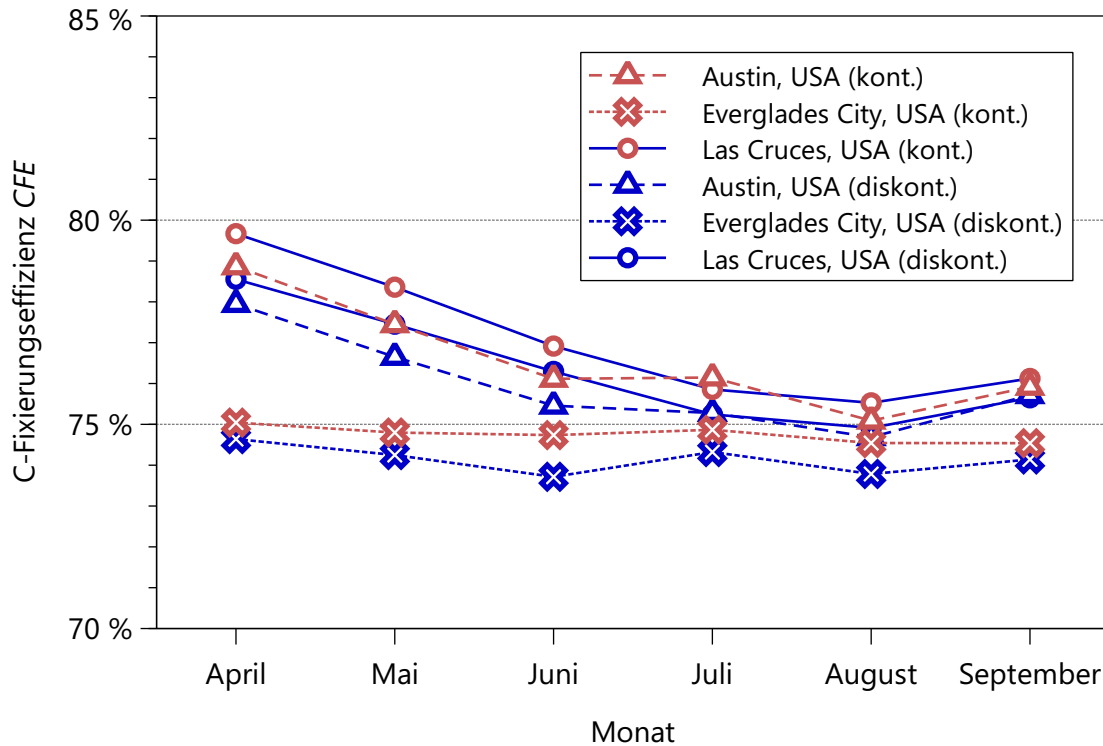


Abbildung 6.5: C-Fixierungseffizienz des Algenpools in Abhängigkeit von Standort und Betriebsmonat; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Betriebsmonaten die jeweils höchsten Werte für *CFE*, gefolgt von den Algenpools in Austin und Everglades City.

Der im Vergleich höchste Ertrag in Las Cruces im Juni kann durch zwei wetterbedingte Einflussfaktoren erklärt werden: Zum einen hat dieser Fall die höchste mittlere solare Einstrahlung mit $330 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Zum anderen beträgt die durchschnittliche Temperatur im kontinuierlichen Algenpond 25.4°C und liegt damit nahe der optimalen Wachstumstemperatur der Algen. Beide Faktoren begünstigen das Algenwachstum und führen zum erreichten Ertrag. Das Ertragsminimum vom Algenpond in Everglades City im August lässt sich mit denselben Einflussfaktoren erklären. Die mittlere solare Einstrahlung ist mit $212 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ relativ niedrig, zudem liegt die durchschnittliche Temperatur im (kont.) Algenpond bei 32.7°C und damit deutlich entfernt von der optimalen Wachstumstemperatur.

Der Vergleich der Erträge der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betriebsweisen zeigt, dass in beiden Fällen dieselben Einflussfaktoren relevant sind. Der Verlauf der Erträge ist für beide Fahrweisen sehr ähnlich und unterscheidet sich lediglich in den Werten der Erträge nicht jedoch im Trend an sich. Folglich ist ein Standort entweder für beide Betriebsarten geeignet oder für keine. Die durchgängig niedrigere Erträge der diskontinuierlichen Fahrweise ist hauptsächlich auf nicht optimale Wachstumsbedingungen zurückzuführen. Zu Beginn des Batchbetriebs ist die Konzentration an Algen zu niedrig, weshalb das zur Verfügung stehende Sonnenlicht nicht vollständig ausgenutzt

wird. Da keine Ernte stattfindet wächst diese Konzentration zwar mit der Zeit an, beim kontinuierlich betriebenen Algenpond ist die Konzentration dagegen dauerhaft auf einem höheren Wert und der Ertrag dadurch größer. Die Betriebsdauer des diskont. Algenponds in Las Cruces im Juni beträgt 16.5 d, was bei einer Rüstzeit von 12 h bedeutet, dass dieser Algenpond zu 97 % ausgelastet wird und die Rüstzeit in diesem Fall keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag hat.

Der Einfluss von Standort und Betriebsmonat auf die C-Fixierungseffizienz ist nicht so groß wie auf den Ertrag. Die *CFE* wird, wie in den späteren Abschnitt zu sehen ist, hauptsächlich durch die Wahl der Betriebsbedingungen beeinflusst. Trotzdem gibt es einen Zusammenhang zwischen der *CFE* und der Umgebung mit der sich z. B. das Maximum für Las Cruces im Monat April erklären lässt. Im April liegt die gemittelte Pondtemperatur bei 16 °C, was zwar einerseits zu einem niedrigen Ertrag, andererseits aber auch zu einer höheren *CFE* führt, da weniger CO₂ bei der Begasung verloren geht.

Vergleicht man in Abbildung 6.5 die C-Fixierungseffizienzen der kontinuierlich betriebenen Algenponds mit denen der diskontinuierlich betriebenen ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den Ertrag. Der Verlauf ist für beide Betriebsweisen ähnlich, die absoluten Werte sind für den diskont. Betrieb jedoch geringer. Der Grund dafür liegt einerseits in den Umwelteinflüssen, die den Verlauf bestimmen und für beiden Betriebsarten identisch sind. Andererseits ist die Ausnutzung des durch die Begasung zugeführten CO₂ im Batchbetrieb offensichtlich geringer. Eine Erklärung dafür sind die im Batchbetrieb gerade am Ende großen Konzentrationen der Alge und die damit verbundenen stark schwankenden *pH*-Werte, die keine optimale Begasung ermöglichen.

6.3.2 Einfluss der Betriebsparameter

In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss der Betriebsparameter auf kontinuierlich und diskontinuierlich betriebene Algenponds untersucht. Dafür wird jeweils der Wert eines Betriebsparameters ausgehend vom jeweiligen Wert im Basis-Fall variiert. Der Ertrag und die C-Fixierungseffizienz des diskontinuierlich betriebenen Algenponds ist bei vergleichbaren Randbedingungen in den betrachteten Fällen immer niedriger als die Werte des kontinuierlich betriebenen Algenponds. Diese Unterschiede werden in Abschnitt 6.3.1 behandelt und deshalb im Folgenden nicht diskutiert.

6.3.2.1 Wassertiefe

Der Ertrag und die C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Wassertiefe wird in Abbildung 6.6 gezeigt. Bei beiden Betriebsarten steigt der Ertrag mit zunehmender Wassertiefe. Niedrige Wassertiefen führen zu niedrigen Erträgen wobei eine große Wassertiefe, zumindest beim kontinuierlich betriebenen Algenpond, ein Sättigungsverhalten zeigt. Für den diskontinuierlich betriebenen Algenpond ist ein solches Verhalten im betrachteten Bereich nicht erkennbar. Auch die C-Fixierungseffizienz ist

stark von der Wassertiefe abhängig und nimmt für beide Betriebsarten mit zunehmender Wassertiefe zu. Ein Sättigungseffekt ist für die C-Fixierungseffizienz nicht zu beobachten.

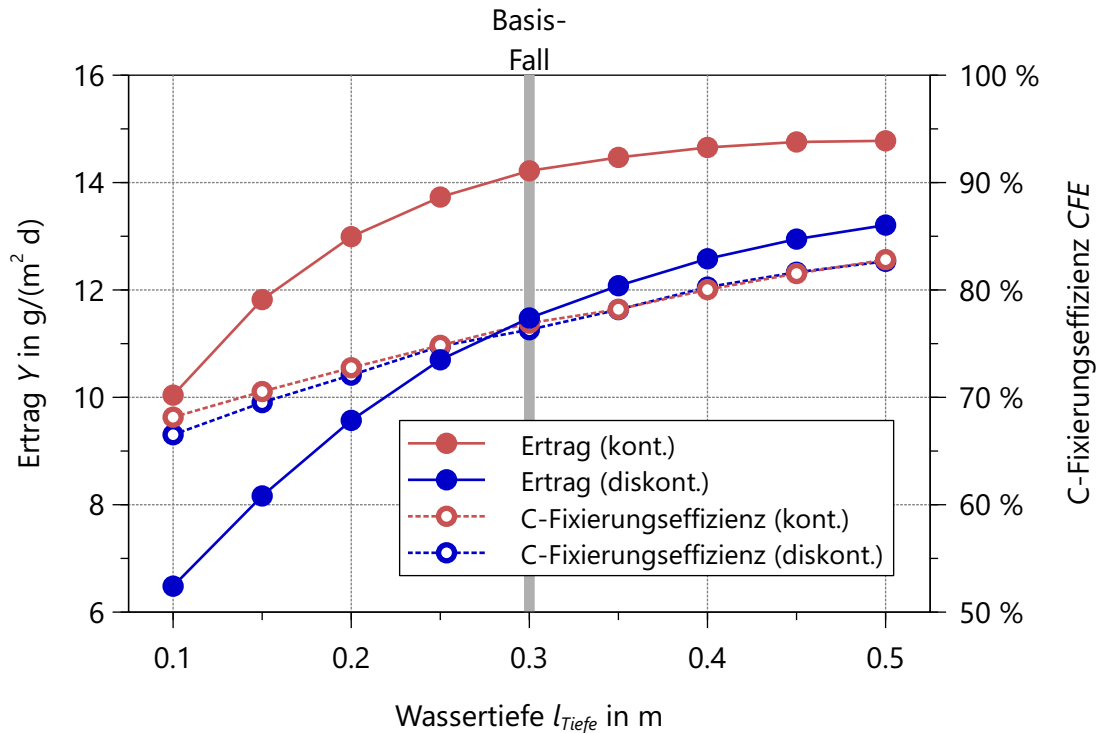


Abbildung 6.6: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Wassertiefe; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Abbildung 6.7 zeigt in Abhängigkeit von der Wassertiefe die gemittelte Konzentration der Alge im kontinuierlichen Betrieb sowie die Konzentration am Ende des diskontinuierlichen Betriebs. Beide Werte sind stark mit der Wassertiefe korreliert und nehmen mit zunehmender Wassertiefe ab. Die Endkonzentration im Batchbetrieb liegt dabei immer über der gemittelten Konzentration des kontinuierlichen Betriebs.

Die Konzentration der Alge ist von der Wassertiefe im Algenpond abhängig. Für jede Kombination aus solarer Einstrahlung und Wassertiefe gibt es einen optimalen Wert für die Konzentration der Alge. Wenn die Konzentration der Alge zu niedrig ist wird die solare Einstrahlung nicht voll ausgenutzt und wenn die Konzentration der Alge zu groß ist bekommen nicht alle Algen genügend Licht und sterben teilweise ab anstatt zu wachsen. Die solare Einstrahlung variiert über den Tag und mit ihr die optimale Konzentration der Alge. Das Algenwachstum ist im Vergleich dazu relativ träge, so dass sich für den kontinuierlich betriebenen Algenpond für jede Wassertiefe eine Algenkonzentration einstellt, die über den Tag annähernd konstant bleibt.

Beim diskontinuierlichen Algenpond beeinflusst die Wassertiefe die Konzentration der Alge am Ende des Batchbetriebs. Bei höheren Wassertiefen ist die optimale Algenkonzentration niedriger als bei niedrigeren Tiefen, da das Licht, analog zum kontinuierlich

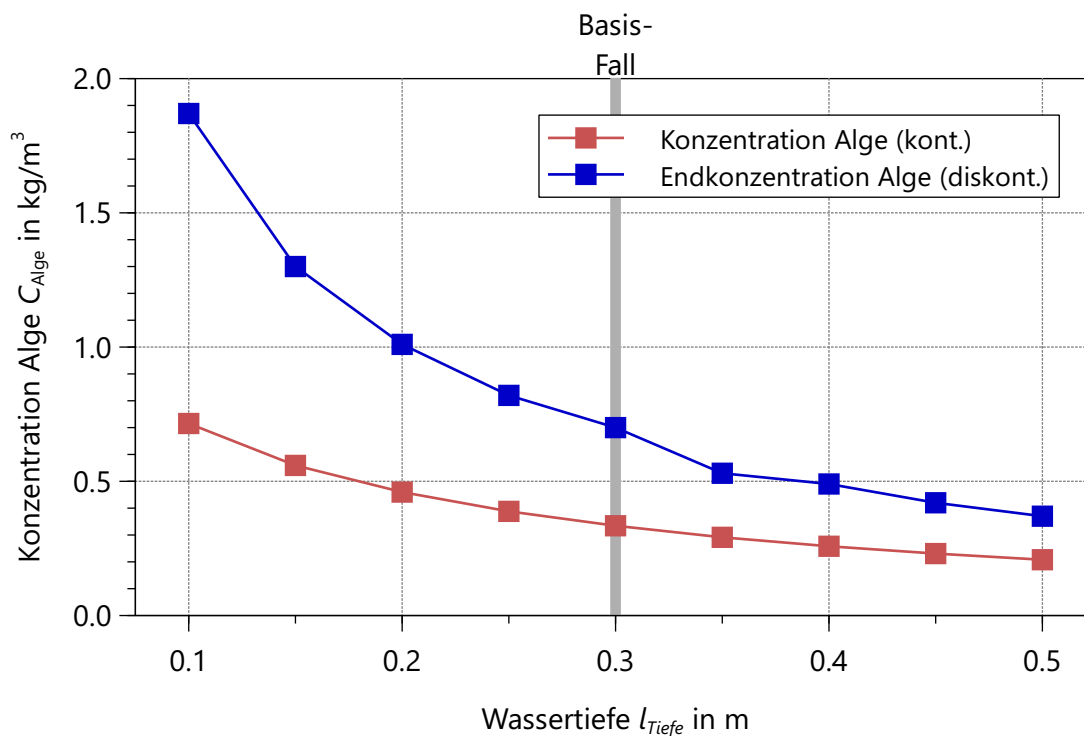


Abbildung 6.7: Konzentration der Alge in Abhängigkeit von der Wassertiefe; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

betriebebenen Algenpond, mehr Weglänge zur Verfügung hat und auch bei niedrigeren Konzentrationen voll ausgenutzt wird.

Die Konzentration der Alge am Ende beim diskontinuierlich betriebenen Algenpond ist in allen Fällen höher als die durchschnittliche Konzentration beim kontinuierlich betriebenen Algenpond. Der Grund dafür ist das stetige Abernten der Algen beim kontinuierlichen Algenpond, das die Konzentration der Alge auf einem konstanten Niveau hält. Beim diskontinuierlich betriebenen Algenpond wird dagegen nicht geerntet, so dass die Konzentration der Alge über die Tage stetig bis zum Ende des Batchbetriebs zunimmt. Aus den Ergebnissen kann weiterhin gefolgert werden, dass die Abweichung der Konzentration der Alge zum Optimalwert, der zum maximalen Ertrag führt, beim kontinuierlichen Betrieb über die Betriebsdauer geringer ist als beim diskontinuierlichen Betrieb. Beim diskontinuierlichen Betrieb wird der Optimalwert einmal durchlaufen, da die Konzentration der Alge von Tag zu Tag ansteigt, beim kontinuierlichen Betrieb kann durch die richtige Wahl der Ernterate die optimale Konzentration der Alge eingestellt werden.

Ein weiterer Grund für den größeren Ertrag bei größeren Wassertiefen ist die über den Tag schwankende Temperatur des Pondwassers. Bei größeren Wassertiefen fällt der Temperaturanstieg am Tag und der Temperaturabfall in der Nacht auf Grund des größeren Wasservolumens weniger stark aus als bei niedrigen Wassertiefen. Dadurch ist die Temperatur bei größeren Wassertiefen über den Tag näher an der optimalen

Temperatur, was zum beobachteten größeren Ertrag führt. Der pH -Wert ist bei größeren Wassertiefen ebenfalls über den Tag näher am optimalen Wert, was auch zu einem höheren Ertrag führt.

Es lässt sich festhalten, dass Algenponds mit einer größeren Wassertiefe und dem dadurch größeren Wasservolumen langsamer auf Änderungen der Umwelteinflüsse und den ebenfalls eher langsamen biologischen Prozessen im Algenpond reagieren. Solche Algenponds können über den Tag näher an optimalen Wachstumsbedingungen gehalten werden als flachere Algenponds mit einer niedrigeren Wassertiefe. Simulationen von Algenponds in anderen Arbeiten zeigen vergleichbare Zusammenhänge zwischen dem Ertrag und der Wassertiefe. Größere Wassertiefen führen zwar zu einem höheren Ertrag, zeigen aber keinen signifikanten Einfluss für Wassertiefen größer 0.3 – 0.4 m [YANG 2011 und JAYARAMAN & RHINEHART 2015].

Die Hauptursache für den starken Einfluss der Wassertiefe auf die C-Fixierungseffizienz ist die Effizienz der Begasung, die mit zunehmender Wassertiefe ansteigt. Der Grund dafür ist die Verweilzeit der aufsteigenden Blasen, die bei einer größeren Wassertiefe länger ist und dadurch zu einer größeren Menge an übertragenem CO_2 führt. Der Anteil des im Pondwasser vorhandenen CO_2 , der über die Wasseroberfläche verloren geht, beträgt weniger als 1 % des durch die Begasung zugeführten CO_2 .

6.3.2.2 pH -Wert

Der Einfluss verschiedener pH -Werte auf den Ertrag und die C-Fixierungseffizienz der Algenponds ist in Abbildung 6.8 gezeigt. Bei beiden Betriebsarten bedeutet eine Abweichung des pH -Werts vom pH -Wert 8.5 des Basis-Falls eine Verringerung des Ertrags. Der Ertrag des kontinuierlich betriebenen Algenponds ist bei sehr hohen und niedrigen pH -Werten sehr niedrig. Der diskontinuierliche Algenpond reagiert nicht so sensibel auf die Änderung des pH -Werts wie der kontinuierlich betriebene Algenpond. Die C-Fixierungseffizienz ist ebenfalls stark vom pH -Wert abhängig. Im Allgemeinen führt ein höherer pH -Wert zu einer größeren C-Fixierungseffizienz. Im Vergleich zum kontinuierlichen Algenpond ist die CFE des diskontinuierlichen Algenponds weniger sensibel auf die Änderung des pH -Wertes.

Der starke Einfluss des pH -Wertes auf den Ertrag der Algenponds liegt am verwendeten generischen Algenwachstumsmodell, das einen optimalen pH -Wert von $pH_{opt} = 8.5$ hat. pH -Werte, die von diesem optimalen Wert abweichen, führen zu einem verringerten Ertrag.

Der starke Einfluss des pH -Wertes auf die C-Fixierungseffizienz liegt zum einen an der Abhängigkeit des Algenwachstums vom pH -Wert zum anderen an der Abhängigkeit der CO_2 Konzentration in der Flüssigkeit vom pH -Wert. Das durch die Begasung eingebrachte CO_2 wird entweder durch das Wachstum der Alge verbraucht oder geht an die Umgebung verloren. Bei niedrigen pH -Werten wachsen die Algen nur langsam und es wird nur eine geringe Menge an CO_2 konsumiert. Zusätzlich ist die Konzentration von CO_2 in der Flüssigkeit groß, was zu hohen Verlusten des CO_2 an die Umgebung führt.

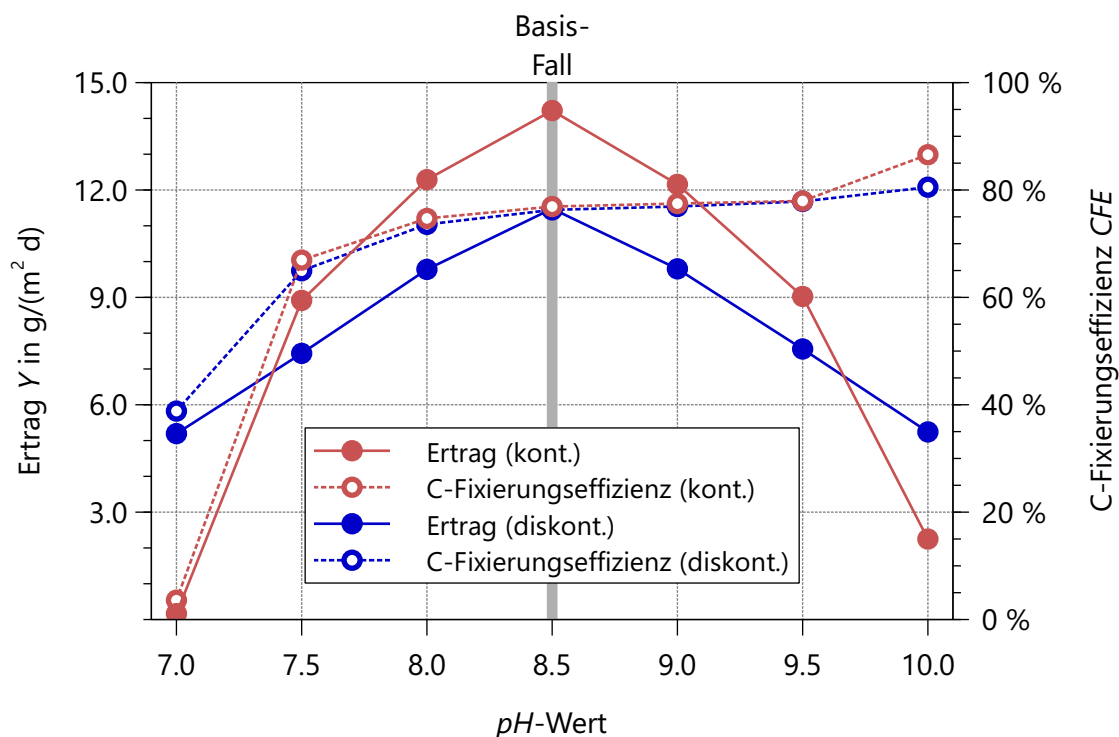


Abbildung 6.8: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit des pH -Wertes; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Insgesamt wird ein Großteil des eingebrachten CO_2 nicht von der Alge konsumiert, sondern geht an die Umgebung verloren, was folglich zu einer niedrigen C-Fixierungseffizienz führt. Bei großen pH -Werten ist das Algenwachstum zwar ebenfalls langsam, der Verlust des eingebrachten CO_2 ist jedoch gering. Dies führt dazu, dass ein Großteil des eingebrachten CO_2 von den Algen konsumiert wird und die C-Fixierungseffizienz einen hohen Wert aufweist.

6.3.2.3 Alkalinität

Abbildung 6.9 zeigt den Einfluss der Alkalinität des Pondwassers auf den Ertrag und die C-Fixierungseffizienz des Algenponds. Der Ertrag des Algenponds wird von der Alkalinität nicht signifikant beeinflusst. Für den kontinuierlich betriebenen Algenpond ist ein geringer Abfall des Ertrags bei einer Erhöhung der Alkalinität von $A_T = 2 \text{ mmol}$ und $A_T = 20 \text{ mmol}$ erkennbar. Eine weitere Erhöhung zeigt gar keine Auswirkung. Der Ertrag des diskontinuierlich betriebenen Algenponds ist völlig unabhängig von der Alkalinität.

Der Einfluss der Alkalinität auf die C-Fixierungseffizienz ist dagegen deutlich sichtbar. Die CFE des kontinuierlich betriebenen Algenponds nimmt fast linear mit der Alkalinität ab. Für den diskontinuierlich betriebenen Algenpond ist eine anfänglich deutliche Abnahme der CFE erkennbar, die bei einer weiteren Erhöhung der Alkalinität nachlässt.

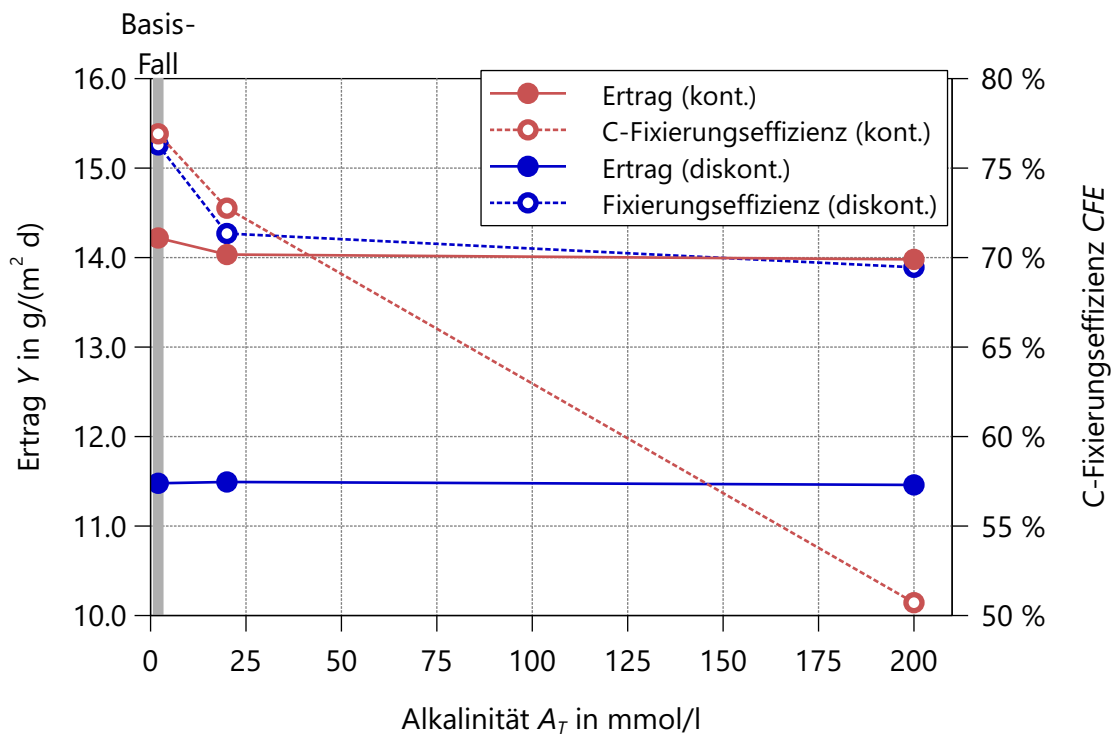


Abbildung 6.9: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Alkalinität; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Der nicht vorhandene Einfluss Alkalinität auf den Ertrag kann dadurch erklärt werden, dass das verwendete generische Algenwachstumsmodell keine direkte Abhängigkeit im Bezug auf die Alkalinität besitzt. Trotzdem wäre zumindest ein geringer Einfluss zu erwarten gewesen, da eine höhere Alkalinität auf Grund des größeren Puffervermögens des Pondwassers zu einem stabileren pH -Wert führt. Dieser stabilere pH -Wert sollte zu einem größeren Ertrag führen, da die Abweichung des pH -Werts zum optimalen pH -Wert geringer ist als bei einer niedrigeren Alkalinität. Diese indirekte Beziehung des Ertrags mit der Alkalinität kann jedoch nicht beobachtet werden.

Im Gegensatz zum Ertrag zeigt die C-Fixierungseffizienz eine große Abhängigkeit von der Alkalinität, da höhere Alkalinitäten auch zu höheren CO_2 -Verlusten an die Atmosphäre führen. Der Grund dafür liegt in der Konzentration an CO_2 in der Flüssigphase, die mit der Alkalinität ansteigt. Diese bei höherer Alkalinität höhere Konzentration hat zwei Auswirkungen: Die Begasung des Pondwassers mit CO_2 wird ineffizienter, da auf Grund der größeren CO_2 Konzentration im Pondwasser die treibende Konzentrationsdifferenz zwischen Gasblase und Pondwasser abnimmt, dadurch weniger CO_2 von den eingebrachten Gasblasen an das Pondwasser übertragen wird und letztendlich mehr CO_2 an die Atmosphäre verloren geht. Da die Gleichgewichtskonzentration von CO_2 im Pondwasser größer ist als in der Umgebungsluft, verliert der Algenpond zusätzlich über seine gesamte Oberfläche und nicht nur an der Stelle der Begasung CO_2 . Diese Konzentrationsdifferenz nimmt mit steigender Alkalinität weiter zu, was dann ebenfalls zu größeren Verlusten von CO_2 an die Atmosphäre führt.

Die C-Fixierungseffizienz des diskontinuierlich betriebenen Algenponds liegt für die höchste untersuchte Alkalinität, im Gegensatz zu den niedrigeren Werten, über der C-Fixierungseffizienz des kontinuierlich betriebenen Algenponds. Dies liegt daran, dass auf Grund der hohen Alkalinität zu Beginn des Batchbetriebs bereits eine große Menge an Kohlenstoff im System vorliegt. Ein Teil dieses Kohlenstoffs wird zwar von der Alge verbraucht, fließt aber nicht explizit in die Berechnung der CFE ein, da für die Berechnung der CFE nur der durch die Begasung zugeführte Kohlenstoff berücksichtigt wird. Dieser Effekt tritt jedoch nur bei diskontinuierlich betriebenen Algenponds auf und auch dort nur für die hier sehr hohe untersuchte Alkalinität. Beim kontinuierlichen Algenpond gibt es auf Grund der großen Anzahl an simulierten Tagen keinen Einfluss der im Algenpond beim Simulationsstart vorhandenen Menge an Kohlenstoff auf die Auswertung. Beim diskontinuierlich betriebenen Algenpond ist der Einfluss für die für alle anderen Fälle verwendete niedrige Alkalinität zu vernachlässigen.

Für diese untersuchten Fälle ist Folgendes zu beachten: Die Alkalinität wird zu Beginn der Simulation durch die Zugabe von NaHCO_3 und Na_2CO_3 zum Pondwasser eingestellt. Falls zur Einstellung der Alkalinität Stoffe verwendet werden, die nicht teil des Kohlenstoff-Reaktionssystems sind, sollte der Einfluss der Alkalinität auf die C-Fixierungseffizienz bedeutend geringer sein.

6.3.2.4 Ernterate

Der Einfluss der Ernterate auf den Ertrag des kontinuierlich betriebenen Algenponds zeigt Abbildung 6.10. Der Einfluss der Ernterate auf den Ertrag ist signifikant und zeigt ein Maximum bei einer optimalen Ernterate, die 10 % höher liegt als die Ernterate des Basis-Falls. Niedrigere und höhere Ernteraten als die optimale Ernterate führen zu einem geringeren Ertrag des Algenponds.

Die C-Fixierungseffizienz wird dagegen nicht so stark wie der Ertrag von der Ernterate beeinflusst. Generell steigt die C-Fixierungseffizienz mit zunehmender Ernterate fast linear und liegt für die untersuchten Ernteraten in einem Bereich von rund 73.5 – 77.5 %.

Abbildung 6.11 zeigt die Konzentration der Alge C_{Alge} in Abhängigkeit von der Ernterate für den kontinuierlich betriebenen Algenpond. Der Einfluss der Ernterate auf die Konzentration der Alge ist deutlich und führt mit zunehmender Ernterate zu einer stetigen Abnahme der sich im Algenpond einstellenden Konzentration und damit auch absoluten Menge an Alge. Bei einer für den Ertrag optimalen Ernterate von 10 % über dem Basis-Fall beträgt die Konzentration an Alge $C_{Alge} = 0.305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Der Grund für die Abnahme der Konzentration der Alge mit zunehmender Ernterate ist die kontinuierliche Entfernung der Algen aus dem Algenpond, die bei einer höheren Ernterate ebenfalls höher ausfällt.

Der Verlauf des Ertrags über die Ernterate in Abbildung 6.10 zeigt, dass es eine optimale Ernterate und folglich auch eine optimale Konzentration der Alge gibt, bei der der Ertrag des Algenponds maximal ist. Wenn die Konzentration der Alge größer als die

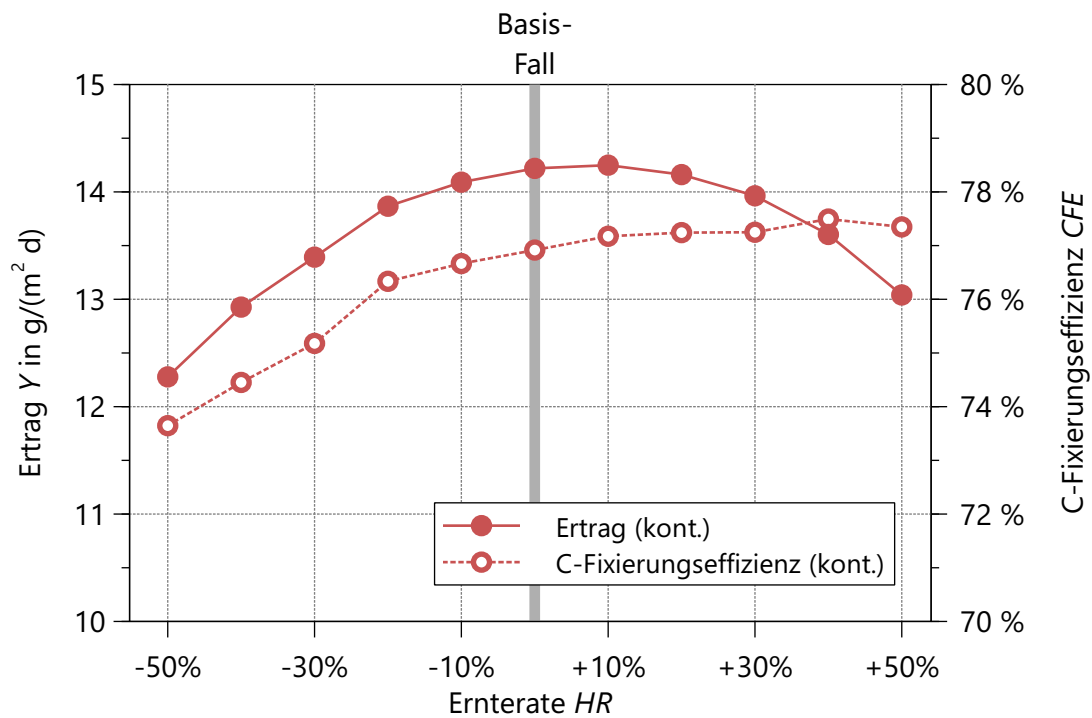


Abbildung 6.10: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Ernterate; Werte für den kontinuierlichen (kont.) Betrieb

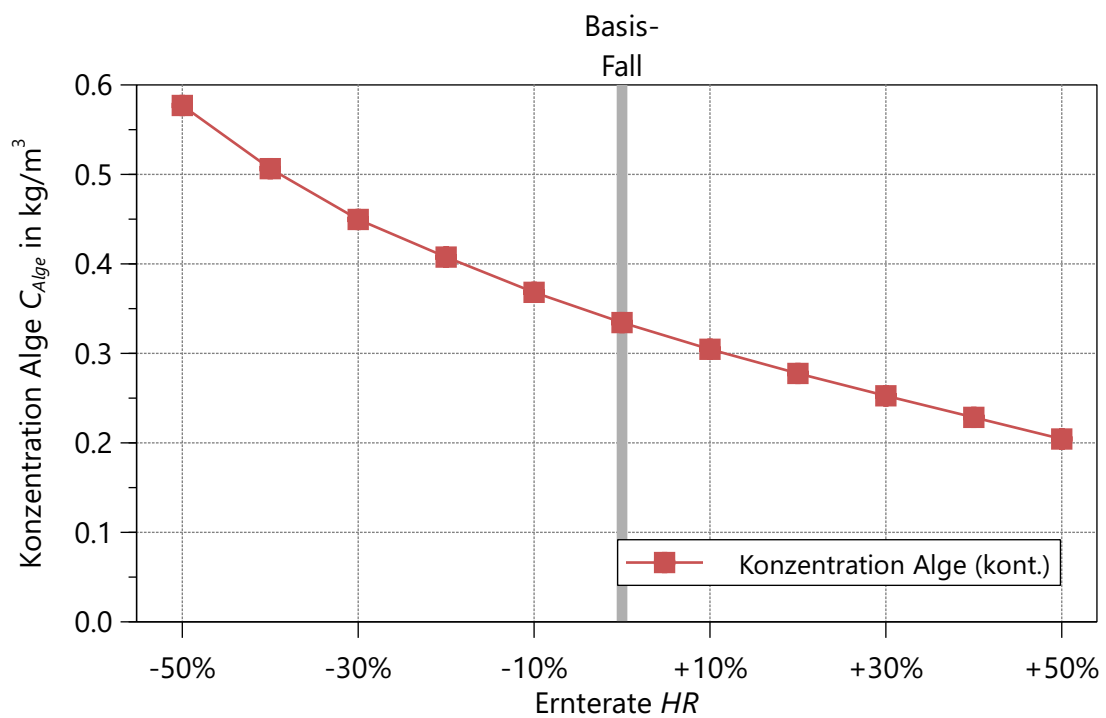


Abbildung 6.11: Konzentration der Alge in Abhängigkeit von der Ernterate; Werte für den kontinuierlichen (kont.) Betrieb

optimale Konzentration ist, dann ist die Lichtintensität in den tieferen Schichten des Pondwassers zu gering um das Algenwachstum zu ermöglichen und die Algen in diesen Schichten sterben selbst am Tag ab. Zusätzlich bedeutet eine hohe Konzentration der Alge auch eine große Algenmasse im Algenpond, die wiederum zu einem großen absoluten Verlust an Algenmasse über die Nacht führt. Wenn die Konzentration der Alge geringer als die optimale Konzentration ist, wird das Licht am Tag dagegen nicht vollständig ausgenutzt und der Ertrag des Algenponds fällt geringer aus als möglich.

In der Theorie gibt es nach den Betrachtungen in Abschnitt 4.6.3 eine optimale Konzentration der Alge, bei der der maximal mögliche Ertrag erzielt wird. Bei dieser Konzentration wächst die unterste Algenschicht am Boden des Algenponds gerade noch bzw. nicht mehr. In der Praxis ist es jedoch nicht möglich diese optimale Konzentration einzustellen, da die Einflussfaktoren auf die optimale Konzentration, allen voran die Lichtintensität, bedeutend schneller schwanken als die Konzentration der Alge reguliert werden könnte. YANG 2011 und MALEK ET AL. 2016 haben bei ihren Untersuchungen ebenfalls eine optimale Ernterate gefunden, wobei der konkrete Wert des Optimums abweichen, da diese von jeweiligen Alge und ihren Wachstumseigenschaften abhängig sind.

Die C-Fixierungseffizienz nimmt in Abbildung 6.10 mit steigender Ernterate ebenfalls zu, da bei einer höheren Ernterate die Konzentration der Algen im Algenpond geringer ist und dadurch in der Nacht weniger Algen absterben. Durch das Absterben der Algen wird CO_2 freigesetzt, was den pH -Wert im Algenpond und die Effizienz der Begasung verringert. Folglich führt eine höhere Ernterate mit der damit verbundenen niedrigeren Konzentration der Algen zu einer effizienteren Begasung und einer dadurch besseren C-Fixierungseffizienz.

6.3.2.5 Startkonzentration Algen

Abbildung 6.12 zeigt den Einfluss der Startkonzentration der Alge auf den Ertrag und die C-Fixierungseffizienz im Batchbetrieb. Mit zunehmender Startkonzentration steigt der Ertrag des Algenponds stark an, während dagegen die C-Fixierungseffizienz nur leicht ansteigt. Der Ertrag erreicht bei der im Vergleich zum Basis-Fall vierfachen Startkonzentration der Alge einen Wert von $AGR = 14.0 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$. Die CFE liegt bei niedrigen Startkonzentrationen bei 75 %, während sie bei der höchsten untersuchten Konzentration auf 78.5 % ansteigt.

Die Abhängigkeit der Betriebszeit und Endkonzentration von der Startkonzentration der Alge ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Beide Größen nehmen mit zunehmender Startkonzentration der Alge deutlich ab. Die Betriebszeit liegt beim Basisfall bei 16.5 d und sinkt für eine Startkonzentration der Alge von $0.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ auf 3.5 d. Der Verlauf der Endkonzentration der Alge ist nahezu identisch mit dem Verlauf der Betriebszeit. Für die höchste Startkonzentration wird eine Endkonzentration von $0.39 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ erreicht.

Die Abhängigkeit des Ertrags von der Startkonzentration der Alge in Abbildung 6.12 ist gekoppelt mit der zugehörigen Betriebszeit in Abbildung 6.13. Die Betriebszeit wird so

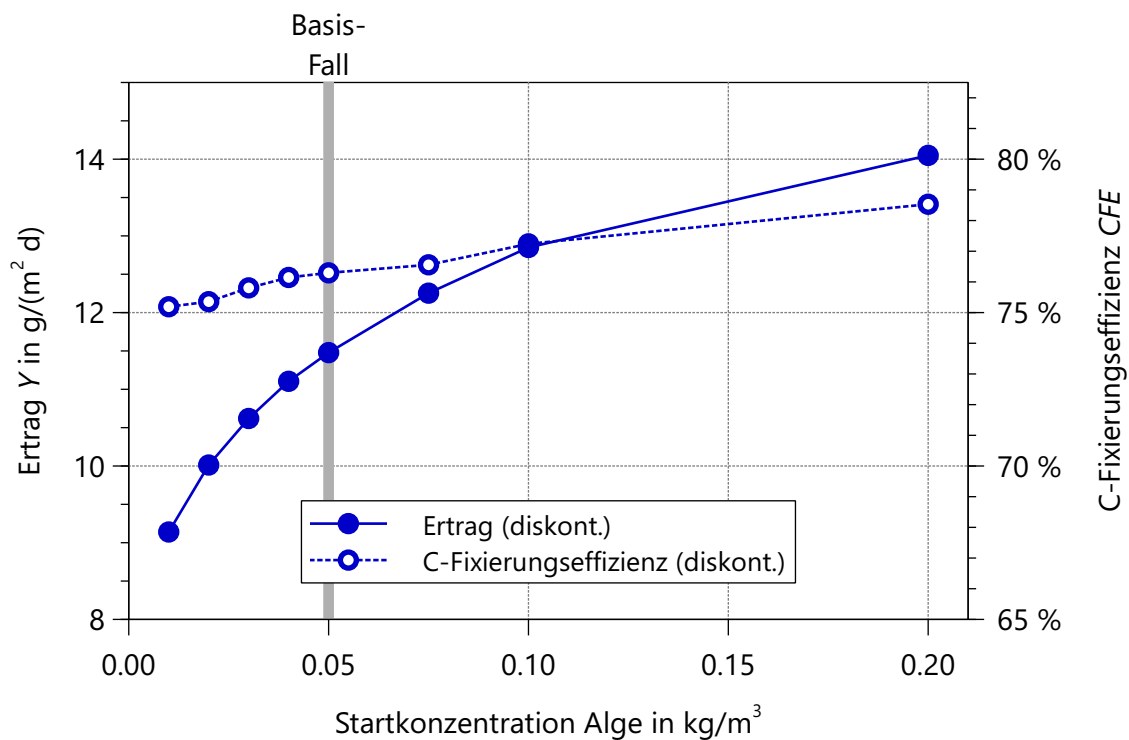


Abbildung 6.12: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Startkonzentration der Alge; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

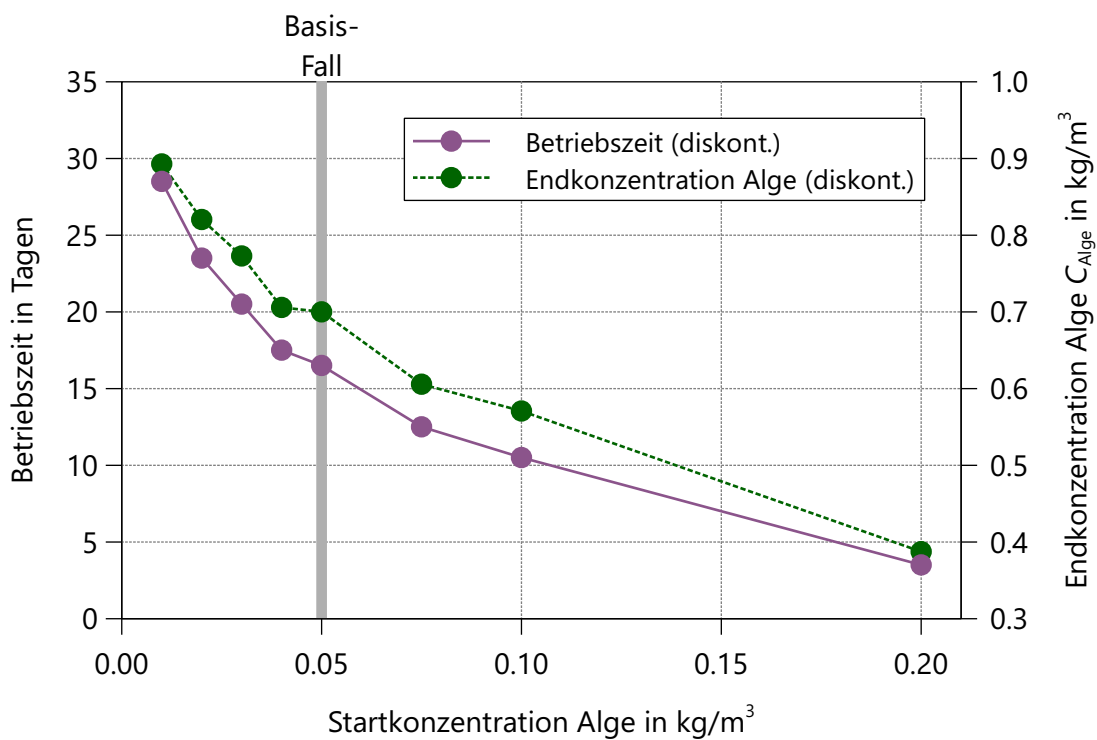


Abbildung 6.13: Betriebszeit und Endkonzentration der Alge in Abhängigkeit von der Startkonzentration der Alge; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

gewählt, dass der über die Betriebszeit gemittelte Ertrag maximiert wird. Bei geringen Startkonzentrationen der Alge ist anfangs das Wachstum relativ gering. Mit jedem weiteren Betriebstag nimmt sowohl die Konzentration der Alge als auch das Wachstum an diesem Tag zu. Der Betrieb des Algenponds wird dann gestoppt, wenn ein weiterer Betrieb zu einer Abnahme des über die Betriebszeit gemittelten Ertrags führt. Anders ausgedrückt: Der Betrieb wird dann gestoppt, wenn am darauffolgenden Tag weniger wächst als am vorherigen Tag.

Bei niedriger Startkonzentration ist die Betriebszeit im Vergleich zu hohen Startkonzentrationen relativ lange, da das anfängliche Algenwachstum und damit auch der Ertrag relativ gering ist. Infolge dessen lohnt es sich den Algenpond länger zu betreiben, da auch spätere Betriebstage noch den gesamten Ertrag erhöhen. Bei einer hohen Startkonzentration der Algen ist das Algenwachstum von Anfang an höher und der Zeitpunkt, ab dem ein weiterer Betrieb des Algenponds zu einer Abnahme des über die Betriebsdauer gemittelte Ertrags führt, wird früher erreicht. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch im Verlauf des Ertrags über die Startkonzentration wieder. Bei höheren Startkonzentrationen werden höhere Erträge erreicht, da der Algenpond bei diesen ab Beginn ein hohes Algenwachstum aufweist und die Betriebstage mit geringer Konzentration und folglich geringem Wachstum quasi übersprungen werden.

Ein möglicher Grund für die Zunahme der C-Fixierungseffizienz mit zunehmender Startkonzentration in Abbildung 6.12 ist die schon von Anfang an hohe Wachstumsrate der Alge. Dadurch wird auch während die Begasung mit CO_2 aktiv ist ein signifikanter Anteil des CO_2 im Pondwasser verbraucht. Dies führt während der Begasung zu einer niedrigeren CO_2 -Konzentration verglichen mit der Konzentration, die bei einer niedrigeren Wachstumsrate vorliegen würde, und damit zu einem effizienteren Stoffübergang.

Die Endkonzentration der Alge in Abbildung 6.13 ist eine direkte Folge der Betriebsdauer. Ein kürzerer Betrieb führt im Vergleich zu einem längeren Betrieb zu einer niedrigeren Endkonzentration der Alge. Die bei einer höheren Startkonzentration der Alge kürzere Betriebsdauer hat auf diesen Zusammenhang keinen Einfluss. Der Grund dafür liegt wiederum am vom Start weg größeren Algenwachstum bei der höheren Startkonzentration. Die Konzentration ist da schon fast optimal, so dass das Algenwachstum bei noch höheren Konzentrationen wieder abnimmt. Startet der Algenpond bei einer niedrigeren Konzentration, nimmt das Algenwachstum bei höheren Konzentrationen zwar ebenfalls wieder ab, ist dann aber immer noch größer als die anfängliche geringe Wachstumsrate und trägt somit zu einer Erhöhung des über die Betriebsdauer gemittelten Ertrags bei.

6.3.2.6 Rüstzeit

Die Abhängigkeit des Ertrags und der C-Fixierungseffizienz von der Rüstzeit ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Mit zunehmender Rüstzeit fällt der Ertrag des Algenponds sehr stark ab. Bei einer Verneunfachung der Rüstzeit von 12 h auf 108 h sinkt der Ertrag

von $Y = 11.5 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ auf $Y = 9.5 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$. Die C-Fixierungseffizienz zeigt einen vergleichbaren Trend und ist ebenfalls bei höheren Rüstzeiten niedriger.

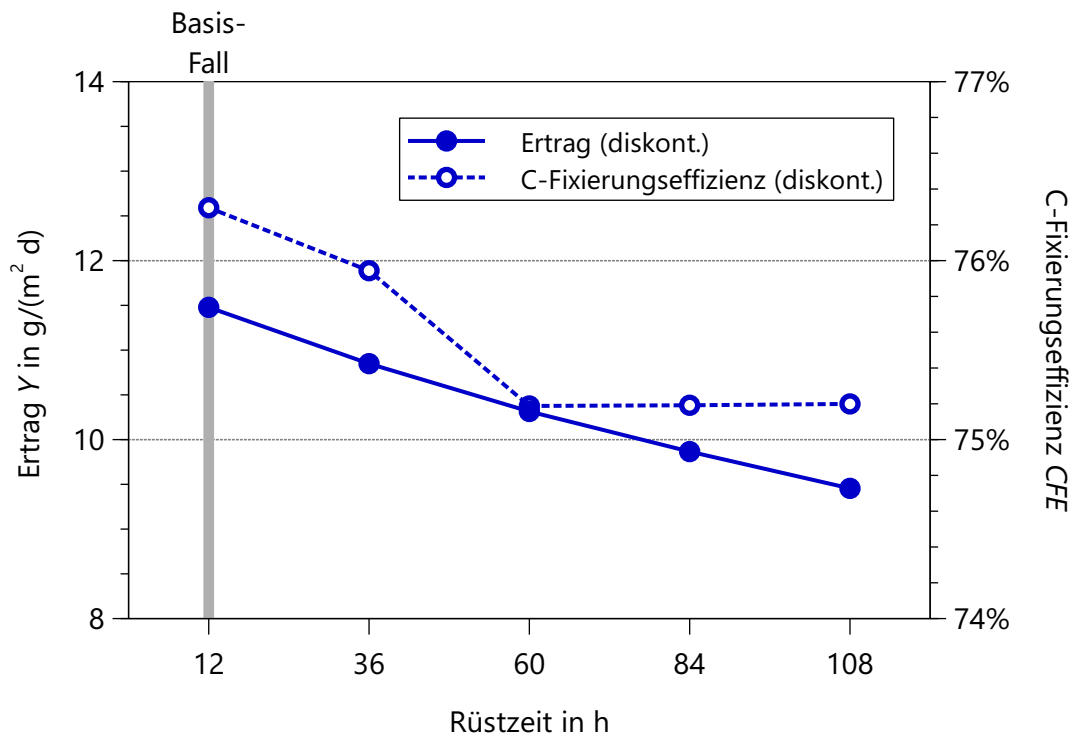


Abbildung 6.14: Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Rüstzeit; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Abbildung 6.15 zeigt die Betriebszeit und Endkonzentration der Alge in Abhängigkeit von der Rüstzeit. Beide Größen nehmen mit zunehmender Rüstzeit zu, zeigen jedoch ab einer Rüstzeit von 60 h keine weitere Veränderung und bleiben damit konstant. Bei diesen langen Rüstzeiten beträgt die Betriebszeit 19.5 Tage und die Endkonzentration der Alge erreicht $0.81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Die Abnahme des Ertrags bei einer Erhöhung der Rüstzeit in Abbildung 6.14 liegt primär darin begründet, dass während der Rüstzeit gar kein Algenwachstum stattfindet, aber die Rüstzeit natürlich in der Berechnung des Ertrags berücksichtigt wird. Bei längeren Rüstzeiten ist es sinnvoll, den Algenpond länger zu betreiben, um das Verhältnis zwischen Betriebszeit zu Rüstzeit zu erhöhen. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen in Abbildung 6.15 wieder. Eine längere Betriebszeit führt dann auch zu einer höheren Endkonzentration der Alge, da im Batchbetrieb nicht abgeerntet wird und sich die Masse der Alge somit über die Tage im Algenpond akkumuliert. Die längere Betriebszeit kann den Produktivitätsverlust der längeren Rüstzeit allerdings nicht kompensieren, da der Batchbetrieb zwar länger andauert, aber der Algenpond bei den dann vorliegenden hohen Konzentrationen der Alge nicht so produktiv ist wie bei geringeren Algenkonzentrationen.

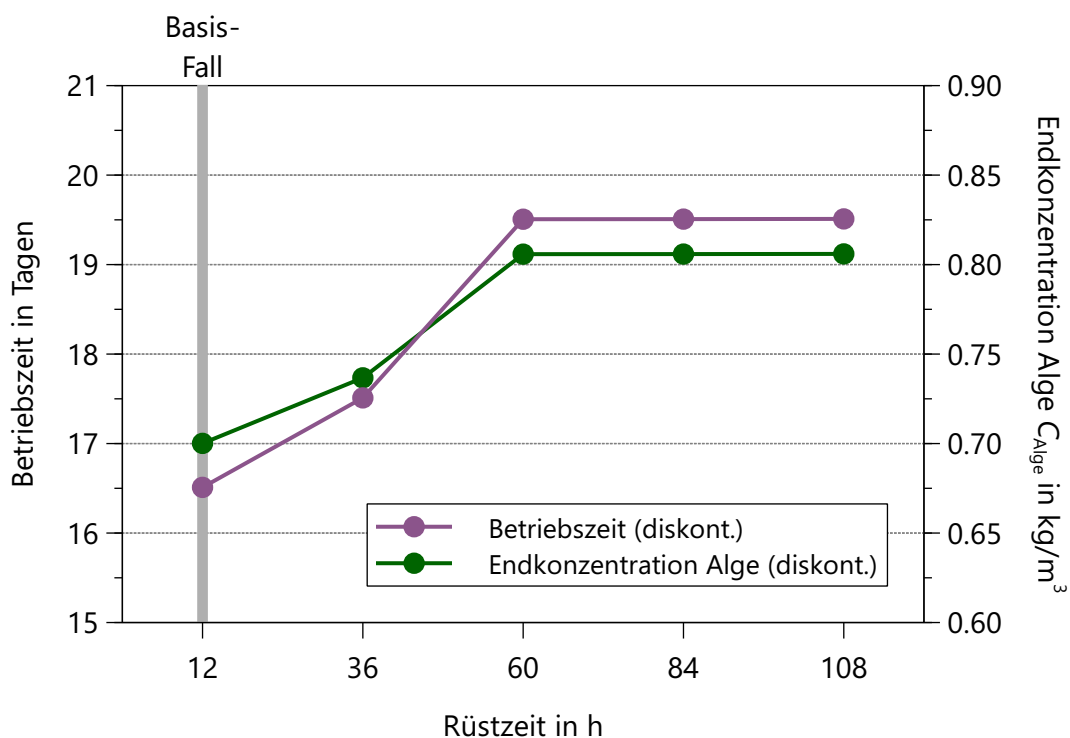


Abbildung 6.15: Betriebszeit und Endkonzentration der Alge in Abhängigkeit von der Rüstzeit; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb

Die Abnahme der C-Fixierungseffizienz bei Zunahme der Rüstzeit in Abbildung 6.14 wird ebenfalls durch die längere Betriebsdauer und der dann am Ende vorherrschenden hohen Konzentration der Alge verursacht. Das für diese Untersuchung verwendete Algenwachstumsmodell setzt beim Sterben der Algen weniger frei als beim Wachstum der Alge verbraucht wurde. Das Sterben von Algen stellt somit eine Senke für CO_2 dar. Bei einer hohen Konzentration der Alge sterben in der Nacht mehr Algen als bei einer niedrigen Konzentration, was zu einem ebenfalls höherem Verlust an CO_2 führt. Bei Zunahme der Rüstzeit ist die Algenkonzentration auf Grund der längeren Betriebszeit ebenfalls größer was zu einem größeren CO_2 -Verlust und damit zu einer niedrigeren C-Fixierungseffizienz führt.

6.4 Optimierung der Betriebsparameter

Zur Optimierung des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betriebs werden die Betriebsparameter so gewählt, wie sie in der vorangegangenen Untersuchung den höchsten Ertrag gezeigt haben. Es werden folgende Werte verwendet:

kontinuierlicher Betrieb

Die Wassertiefe wird von 0.3 m auf 0.5 m erhöht. Die Ernterate wird um 10 % auf $1.1 \cdot 1/7 \frac{1}{\text{d}}$ erhöht.

diskontinuierlicher Betrieb

Die Wassertiefe wird von 0.3 m auf 0.5 m erhöht. Die Startkonzentration der Alge wird von $0.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ auf $0.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ erhöht.

Die übrigen Parameter sind unverändert zum Basis-Fall bei kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb.

In Abbildung 6.16 ist der Ertrag und C-Fixierungseffizienz der Basis-Fälle und der optimierten Fälle gegenüber gestellt. Der Ertrag kann im kontinuierlichen Betrieb um 4.0 % auf $14.8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ gesteigert werden. Die C-Fixierungseffizienz wird durch die Optimierung um 8.1 % auf 83.1 % erhöht. Beim diskontinuierlichen Betrieb wird ein Anstieg des Ertrags um 32.3 % auf $15.2 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ erreicht. Die C-Fixierungseffizienz nimmt um 17.9 % auf 90.0 % zu.

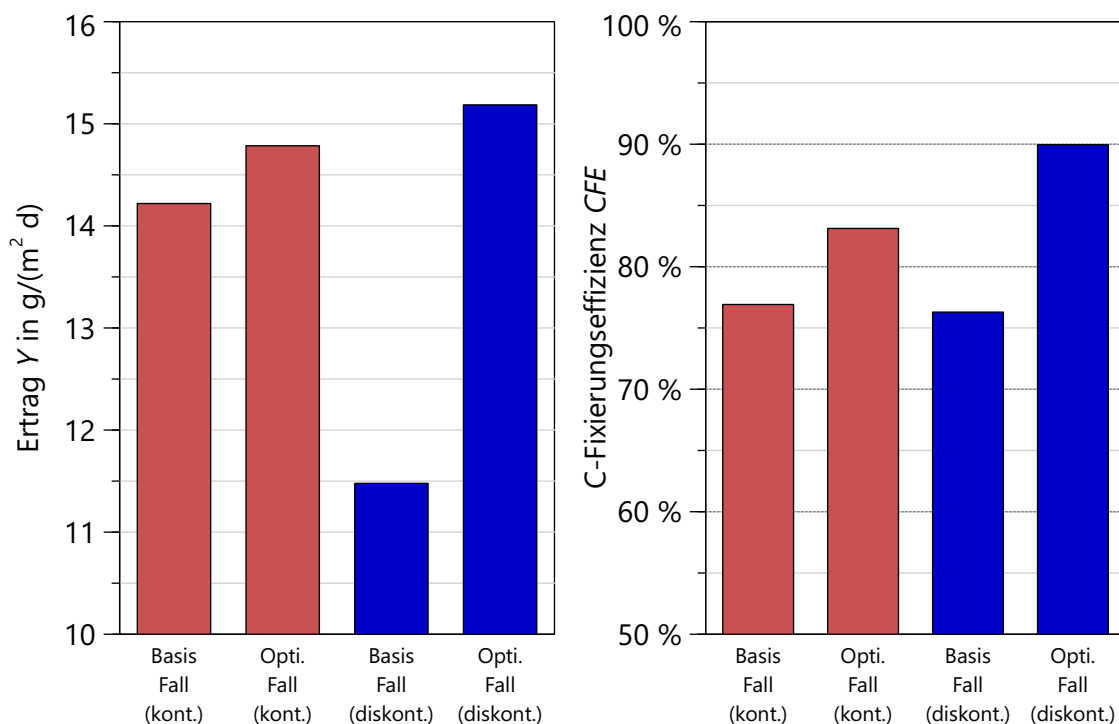


Abbildung 6.16: Ertrag und C-Fixierungseffizienz der Basis-Fälle und optimierten Fälle

Die Optimierung führt bei beiden Betriebsweisen zu einer Erhöhung des Ertrags und der C-Fixierungseffizienz. Die Gründe dafür werden im Einzelnen schon in den vorherigen Abschnitten diskutiert, trotzdem soll der große Unterschied zwischen dem Basis-Fall und dem optimierten Fall der diskontinuierlichen Betriebsweise hier noch diskutiert werden. Den größten Anteil an der Steigerung des Ertrags hat dabei die Erhöhung der Startkonzentration der Alge auf $0.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Dies führt zu einer optimalen Betriebsdauer von nur 12 h, nach der die Alge abgeerntet und der Batchbetrieb neu gestartet wird.

Rein rechnerisch ist diese kurze Betriebsdauer sinnvoll, da so der maximale Ertrag erreicht wird. Ob eine so kurze Betriebsdauer in der Praxis umsetzbar ist, muss bezweifelt werden. Dabei ist auch zu bedenken, dass die hier durchgeführten Berechnungen von

einer Rüstzeit von 12 h ausgehen. Fällt diese Rüstzeit größer aus so verlängert sich auch die optimale Betriebsdauer. Bei einer Rüstzeit von 36 h beträgt die Betriebsdauer für den optimierten diskontinuierlichen Fall 7.5 Tage bei einem Ertrag von $Y = 12.4 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$.

Diese kurze Betriebszeit des optimierten Falls führt auch zu einem Fehler in der Berechnung der C-Fixierungseffizienz, da ein Teil des von den Algen aufgenommenen CO_2 effektiv nicht aus dem zugegebenen Gas stammt, sondern aus der Menge an CO_2 , die beim Start des Batchbetriebs im Wasser bereits vorlag. Bei der Berechnung von *CFE* wird dieser Anteil jedoch nicht berücksichtigt und die C-Fixierungseffizienz damit überschätzt.

Insgesamt kann der Ertrag der Algenponds durch Optimierung der Betriebsparameter erhöht werden, so dass für einen Algenpond in Las Cruces im Monat Juni einen Ertrag von etwa $15 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ erreicht wird. Der dem Algenpond in Form von CO_2 zugegebene Kohlenstoff wird dabei zu über 80% ausgenutzt und von der Alge in ihre Biomasse eingebaut.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden kontinuierlich und diskontinuierlich betriebene Algenponds an drei Standorten in den USA - Austin, Everglades City und Las Cruces - für die Monate April bis September untersucht. Der offene Raceway-Pond hat eine gesamte Oberfläche von 2000 m^2 und kann als ideal vermischt betrachtet werden. Der Ertrag bei kontinuierlicher und diskontinuierlicher Betriebsweise wird für jeden Monat mit Hilfe der Wetterdaten eines typischen Tages für eben diesem Monat bestimmt. Diese Herangehensweise ermöglicht eine Vergleichbarkeit der einzelnen Monate und Betriebsweisen untereinander, da die Ergebnisse nicht von einem bestimmten Starttag im Monat abhängig sind.

Der größte Ertrag kann in Las Cruces im Monat Juni erzielt werden, weshalb diese Konfiguration als Basiskonfiguration für die weiteren Untersuchungen verwendet wird. Ausgehend vom Basisfall wird der Einfluss variierter Betriebsbedingungen auf das Verhalten des Algenponds ermittelt. Dabei werden die Wassertiefe, die Alkalinität, der *pH*-Wert, die Ernterate und die Startkonzentration der Alge variiert.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass es für die Betriebsparameter optimale Werte gibt und dass diese einen teilweise sehr großen Einfluss auf den Ertrag eines Algenponds haben. Der Ertrag des kontinuierliche betriebenen Algenponds wird von der Wassertiefe, dem *pH*-Wert und der Ernterate stark beeinflusst. Der diskontinuierlich betriebene Algenpond zeigt ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit von der Wassertiefe und dem *pH*-Wert sowie von der Startkonzentration der Alge. Mit optimierten Parametern kann im Monat Juni in Las Cruces (USA) bei kontinuierlicher Fahrweise ein Ertrag von $Y = 14.8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ und im Batchbetrieb ein Ertrag von $Y = 15.2 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ erreicht werden.

Die C-Fixierungseffizienz wird maßgeblich von der Effizienz der CO_2 -Zufuhr bestimmt und hängt bei beiden Betriebsweisen von der Wassertiefe, dem *pH*-Wert und der

Alkalinität des Pondwassers ab. Der dem Algenpond in Form von verdünntem CO_2 zugegebene Kohlenstoff landet in allen sinnvollen Pondkonfiguration zu über 80% in der Biomasse der Alge.

Die optimale Betriebsdauer im diskontinuierlichen Betrieb liegt in Abhängigkeit von der Rüstzeit im Bereich von 16 bis 20 Tagen. Um im Batchbetrieb einen Algenpond bestmöglich auszunutzen, muss dieses nach der optimalen Betriebsdauer abgeerntet und mit einer niedrigeren Startkonzentration der Alge wieder neu angesetzt werden. Bei Startkonzentrationen der Alge von $0.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und größer schafft der diskontinuierliche betriebene Algenpond ähnliche Erträge wie der kontinuierliche Algenpond. Die Betriebszeit sinkt dabei jedoch auf 10 Tage, was im Betrieb letztendlich zu einem größeren Arbeitsaufwand führt.

7 Untersuchung der CO₂ Zufuhr von großen offenen Algenponds

Um Algen im großindustriellen Maßstab zu kultivieren, müssen große Produktionsanlagen gebaut werden. Diese sog. Algenfarmen bestehen aus einer großen Anzahl an offenen Algenponds und den zum Betrieb notwendigen Hilfseinrichtungen. In der Studie von DAVIS ET AL. 2016 wird das Konzept einer solchen Algenfarm hinsichtlich des Prozessdesigns und Wirtschaftlichkeit untersucht. Die in der Studie verwendeten Algenponds sind offene Raceway-Ponds, die von einem zentralen Gasverteilungssystem mit dem für das Wachstum der Algen notwendigen CO₂ versorgt werden. Aus ökonomischen Gründen ist die Oberfläche eines einzelnen Algenponds sehr groß, weshalb der Kanal eines Algenponds sehr lang ist. Auf Grund der Kanallänge kann es zu einer ungleichmäßigen Verteilung von Nährstoffen wie CO₂ entlang der Strömungsrichtung kommen, die eine negative Auswirkung auf den Betrieb des Algenponds hat. Eine ausreichende Versorgung des Algenponds mit CO₂ entlang der gesamten Kanallänge ist wichtig um die Algen mit ausreichend Kohlenstoff zu versorgen und um den *pH*-Wert im Algenpond in einem gewünschten Bereich zu halten.

In diesem Teil der Arbeit wird untersucht, wie einem Algenpond CO₂ zugeführt werden muss, um diesen ausreichend zu versorgen. Für Algenponds mit sehr langen Kanälen ist die Verwendung eines einzelnen Einspeisepunkts entlang des Kanals, an dem CO₂ zugeführt wird, möglicherweise nicht ausreichend, da der *pH*-Wert nicht im gewünschten Bereich gehalten werden kann. Würde man an diesem einen Einspeisepunkt das gesamte vom Algenpond benötigte CO₂ zuführen sinkt der *pH*-Wert unter den Betriebsbereich. Folglich muss der CO₂ Bedarf des Algenponds mit mehreren Einspeisepunkten gedeckt werden, die zu einer gleichmäßigeren Verteilung der CO₂ Zufuhr führen. Im Folgenden wird untersucht, wie sich Algenponds mit langen Kanälen verhalten und wie viele Einspeisepunkte für den Betrieb notwendig sind.

7.1 Anwendung des Simulationsmodells auf die Studie von Davis

Die Grundlage für die Untersuchung sind die in der Studie von DAVIS ET AL. 2016 vorgestellten Geometrien der Algenponds sowie die dort angenommenen Betriebsbedingungen. In der Studie werden Algenponds mit drei unterschiedlichen Größen betrachtet: 2.2 acre (8924 m²), 10 acre (40 200 m²) und 48.4 acre (207 248 m²). In dieser Arbeit wer-

den 2.2 acre-Ponds und 10 acre-Ponds untersucht, da diese laut DAVIS ET AL. 2016 aktuell bzw. in naher Zukunft eine realistische Bauoption darstellen.

Der Standort der simulierten Algenponds ist Everglades City (FL, USA). Dies hat hauptsächlich zwei Gründe: Everglades City liegt an der Golfküste der USA, die auf Grund klimatisch günstiger Bedingungen als geeignet für den Bau einer Algenfarm gilt. Außerdem sind die für Everglades City verfügbaren Wetterdaten von hoher Qualität, da sie eine hohe zeitliche Auflösung haben.

Die Beschreibung des Algenwachstums erfolgt durch das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis*. Für dieses Algenwachstumsmodell ist der Parametersatz verfügbar, der in Abschnitt 5.6 aus den Daten des Experiments in Spanien bestimmt wurde. Die Verwendung des Algenwachstumsmodells mit diesem Parametersatz erlaubt zwar das reale Verhalten der im Experiment vorhandenen *Spirulina platensis* Alge auch unter den Bedingungen in diesem Teil der Arbeit zu beschreiben, führt jedoch zu einem jährlichen Ertrag von nur $8 \frac{g}{m^2 d}$. Dieser Ertrag ist damit deutlich niedriger als der in Studie von DAVIS ET AL. 2016 angenommene Ertrag von $25 \frac{g}{m^2 d}$. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen mit zwei verschiedenen Parametersätzen durchgeführt: Mit dem originalen Parametersatz, der zu einem jährlichen Ertrag von $8 \frac{g}{m^2 d}$ führt (sog. Spirulina-Alge), und mit einem modifizierten Parametersatz, der zu einem jährlichen Ertrag von $25 \frac{g}{m^2 d}$ (sog. Hohertrags-Alge) führt. Dabei wird angenommen, dass sich die fiktive Hohertrags-Alge ähnlich verhält wie die Spirulina-Alge und deshalb mit demselben Algenwachstumsmodell beschrieben werden kann.

Dem Algenpond wird kontinuierlich ein Erntestrom entnommen, aus dem die Algen entfernt werden und zum Ertrag des Algenponds beitragen. Der Erntestrom ergibt sich aus der Multiplikation der festen Ernterate HR und dem gesamten Volumen des Pondwassers. Zusätzlich wird dem Algenpond ein Makeup-Strom zugeführt, der den Verlust durch den Erntestrom sowie weitere Wasserverluste oder -überschüsse durch Kondensation oder Verdunstung ausgleicht. Dadurch wird das gesamte Volumen an Pondwasser konstant gehalten.

Abbildung 7.1 zeigt beispielhaft, wie ein Algenpond in der Simulation entlang des Kanals in 12 CSTR diskretisiert ist. In diesem Beispiel wird dem Algenpond CO_2 an zwei Einspeisestellen zugeführt, die sich im CSTR 2 und CSTR 8 befinden. Der pH -Wert, der den Volumenstrom der CO_2 Zufuhr an der jeweiligen Einspeisestelle beeinflusst, wird in CSTR 1 und CSTR 7 gemessen. Der Erntestrom wird aus CSTR 9 abgezogen und ein Makeup-Strom wird CSTR 10 zugeführt.

7.1.1 Standort und Betriebsperiode

Der Standort der simulierten Algenponds ist Everglades City in Florida in den USA. Die Betriebsperiode beginnt am 1. Januar 2013 und endet nach 365 Tagen. Die Betriebsdauer der Algenponds beträgt demnach ein volles Jahr. Die Wetterdaten für diesen Standort und diese Betriebsperiode stammen von U.S. CLIMATE REFERENCE NETWORK 2016-02-02, DIAMOND ET AL. 2013 und haben eine zeitliche Auflösung von 5 min.

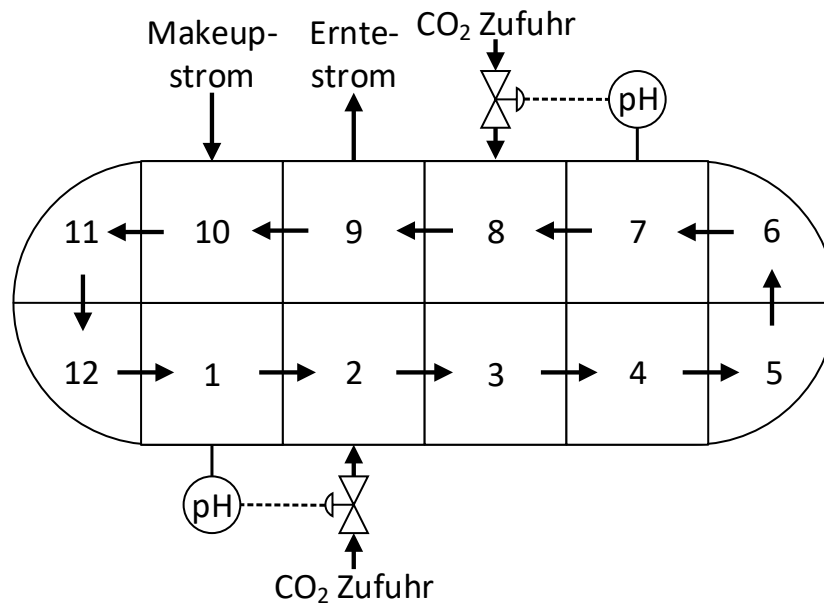


Abbildung 7.1: Örtliche Diskretisierung eines Algenponds mit 12 CSTRs und pH -Regelung

7.1.2 Pondgeometrie und Betriebsparameter

Die Geometrien des 2.2 acre-Ponds und des 10 acre-Ponds stammen aus der Studie von DAVIS ET AL. 2016 und wurden von Leidos Engineering entwickelt. Beides sind Raceway-Ponds, deren Strömung durch ein Schaufelrad angetrieben wird.

Der 2.2 acre-Pond hat eine gesamte Kanallänge von $l_{Kanal} = 834$ m und eine Kanalbreite von $l_{Breite} = 10.7$ m. Daraus ergibt sich für den 2.2 acre-Pond eine Pondoberfläche von $A_{Pond} = 8924 \text{ m}^2 = 2.2$ acre. Der 10 acre-Pond hat eine gesamte Kanallänge von $l_{Kanal} = 1340$ m und eine Kanalbreite von $l_{Breite} = 30$ m. Daraus ergibt sich für den 10 acre-Pond eine Pondoberfläche von $A_{Pond} = 40\,200 \text{ m}^2 = 10$ acre. Die Wassertiefe beträgt in beiden Algenpods $l_{Tiefe} = 0.23$ m und die Strömungsgeschwindigkeit ist $v_{Strömung} = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Algenpods besitzen einen oder mehrere Sümpfe an deren Boden CO_2 gasförmig dem Pondwasser zugeführt wird. Die tatsächliche Tiefe eines Sumpfes wird in der Studie von DAVIS ET AL. 2016 nicht erwähnt. In der bereits früher von LUNDQUIST ET AL. 2010 durchgeführten Machbarkeitsstudie zur Kultivierung von Algen wird für solche Sümpfe eine gesamte Wassertiefe von 1 m angegeben und dieser Werte wird für die weiteren Berechnungen verwendet. Für die Salinität des Pondwassers wird der Wert $S = 5 \text{ ‰}$ angenommen, da es laut DAVIS ET AL. 2016 als Brackwasser angesehen werden kann. Die Salinität des Pondwassers wird von DAVIS ET AL. 2016 nicht angegeben weshalb der von LUNDQUIST ET AL. 2010 angegebene Wert $A_T = 5 \frac{\text{mmol}}{\text{l}}$ verwendet wird.

Tabelle 7.1: Pöndgeometrien und Strömungseigenschaften

Eigenschaft	2.2 acre Pond	10 acre Pond
Gesamte Kanallänge l_{Kanal}	834 m	1340 m
Kanalbreite l_{Breite}	10.7 m	30 m
Gesamte Pöndoberfläche A_{Pond}	0.89 ha	4.0 ha
Wassertiefe l_{Tiefe}	0.23 m	
Wassertiefe im Sumpf	1.0 m	
Strömungsgeschwindigkeit $v_{Strömung}$	0.2 $\frac{m}{s}$	
Salinität S	5 ‰	
Alkalinität A_T	5 $\frac{mmol}{l}$	

7.1.3 Bestimmung der Ernterate

In der Studie von DAVIS ET AL. 2016 wird über die gesamte Betriebsperiode eine konstante Algenkonzentration von $C_{Alge} = 0.5 \frac{g}{l}$ angenommen. Die entsprechende Ernterate beträgt dabei $HR = 0.2 \frac{1}{d}$. Die Algenkonzentration der hier untersuchten Algenpönde ist dagegen kein fester Wert, sondern ein zeitlich veränderbares Ergebnis der Simulation, das von der Ernterate stark beeinflusst wird. Folglich sollte die Ernterate so gewählt werden, dass die daraus resultierende Algenkonzentration zu einem maximalen Ertrag führt. Die für die Untersuchung verwendete Ernterate wird bestimmt, indem mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus die Algenpönde über die gesamte Betriebsperiode mit verschiedenen Ernteraten simuliert werden. Die Ernterate, die zum maximalen Ertrag über das gesamte Jahr führt, wird in dieser Untersuchung verwendet. Es wird ebenfalls geprüft, ob die Verwendung von zwei verschiedenen Ernteraten über das Jahr, eine Ernterate für die Sommerperiode und eine Ernterate für die Winterperiode, zu einem höheren Ertrag als die Verwendung einer festen Ernterate führt. Die Verwendung von zwei verschiedenen Ernteraten, die ebenfalls mit einem Optimierungsalgorithmus bestimmt wurden, führt zu keiner signifikanten Erhöhung des Ertrags, weshalb für die weiteren Untersuchungen eine feste Ernterate über die gesamte Betriebsdauer verwendet wird.

Zu Beginn der Betriebsperiode werden die Algenpönde mit einer Konzentration von $C_{Alge} = 0.1 \frac{g}{l}$ angesetzt. In den ersten zwei Wochen findet keine Ernte statt, damit die anfänglich niedrige Algenkonzentration einen für den Betrieb sinnvollen Wert erreicht. Die Ernterate ist folglich in den ersten zwei Wochen $HR = 0$. In der restlichen Zeit ist die Ernterate der mit der Spirulina-Alge betriebenen Algenpönde $HR = 0.098 \frac{1}{d}$. Die Ernterate der mit der Hohertrags-Alge betriebenen Algenpönde ist $HR = 0.298 \frac{1}{d}$.

Die Ernterate der Algenpönde, die mit der Spirulina-Alge betrieben werden, ist niedriger als die Ernterate der Algenpönde, die mit der Hohertrags-Alge betrieben werden, da die Spirulina-Alge langsamer wächst und deshalb in einer bestimmten Zeit weniger Masse der Alge aus dem Algenpond entfernt werden muss um die Algenkonzentration

konstant zu halten. Die Ernterate der mit der Hohertrags-Alge betriebenen Algenponds ist größer als die Ernterate in der Studie von DAVIS ET AL. 2016 obwohl der Ertrag annähernd gleich ist. Der Grund dafür ist die Algenkonzentration, die in den hier durchgeführten Untersuchungen niedriger ist als in der Studie von DAVIS ET AL. 2016, und folglich muss, um einen ähnlichen Ertrag zu erreichen, die Ernterate größer sein.

7.1.4 Diskretisierung des Algenponds durch CSTRs

Das Simulationsmodell erlaubt es, den Kanal des Algenponds prinzipiell mit einer beliebigen Anzahl an CSTRs abzubilden. Um zu bestimmen, wie viele CSTRs tatsächlich notwendig sind, werden mehrere Simulationen mit einer jeweils anderen Anzahl an CSTRs durchgeführt. Bei diesen Simulationen wird dem Algenpond an nur einer Stelle CO_2 zugeführt und der Verlauf des pH -Wertes entlang des Kanals ausgewertet. Der maximale Unterschied des pH -Wertes entlang des Kanals wird als Maß dafür verwendet, ob die örtliche Auflösung des Kanals durch die CSTRs ausreichend hoch ist.

Die Verwendung von mehr als 10 CSTRs zeigt für den 2.2 acre-Pond keine signifikant bessere Abbildung im Vergleich zur Verwendung von 10 CSTRs. Trotzdem wird der 2.2 acre-Pond mit 12 CSTRs angenähert, da sich ein Einspeisepunkt für CO_2 immer an der Position des ihm zugehörigen CSTR befindet und die Anzahl an CSTRs folglich die möglichen Positionen der Einspeisepunkte bestimmt. Die Verwendung von 12 CSTRs erlaubt eine gleichmäßige Verteilung der Einspeisepunkte, wenn sowohl 1 Einspeisepunkt wie auch 2, 3, und 4 Einspeisepunkte verwendet werden.

Der Kanal des 10 acre-Ponds wird mit 24 CSTRs abgebildet. Diese Anzahl an CSTR ist zum einen groß genug um den Kanal des 10 acre-Ponds der 1.6-mal so lang ist wie der Kanal des 2.2 acre-Pond mit einer ausreichenden Genauigkeit abzubilden. Zum anderen erlaubt die Verwendung von 24 CSTRs wiederum die gleichmäßige Aufteilung von 1, 2, 3 und 4 Einspeisepunkten entlang des Kanals.

Bei den Simulationen des 2.2 acre-Ponds wird der Erntestrom CSTR 11 entnommen und der Makeup-Strom wird CSTR 12 zugeführt. Bei den Simulationen des 10 acre-Ponds wird der Erntestrom CSTR 23 entnommen und der Makeup-Strom wird CSTR 24 zugeführt.

7.1.5 CO_2 Zufuhr

Dem Algenpond wird CO_2 gasförmig an einem oder mehreren Einspeisepunkten zugeführt. Ein Einspeisepunkt befindet sich dabei jeweils an der Stelle eines der CSTRs, die den Kanal des Algenponds abbilden. Die Zufuhr des Gases erfolgt mit einem Blasen-durchmesser von 3 mm in einer Tiefe von 1 m. Tabelle 7.2 zeigt die Eigenschaften der CO_2 Zufuhr.

Der pH -Wert im Algenpond wird maßgeblich vom Wachstumsverhalten der Alge bestimmt. Wenn die Alge wächst und ihre Masse zunimmt wird CO_2 aus dem Pondwasser

Tabelle 7.2: Eigenschaften der CO₂ Zufuhr

Eigenschaft	Wert
Zusammensetzung Gas	100 % CO ₂
Blasendurchmesser am Austritt	3 mm
Sollwert pH^{SW}	10.0
obere pH Grenze pH^{OG}	10.5

verbraucht und der pH -Wert steigt. Wenn die Masse der Alge aufgrund der Dunkelatmung abnimmt, wird dagegen CO₂ freigesetzt und der pH -Wert sinkt. Der Zweck der CO₂ Zufuhr ist, den pH -Wert im gewünschten Bereich zwischen dem unteren Grenzwert $pH^{UG} = 9.5$ und dem oberen Grenzwert $pH^{OG} = 10.5$ zu halten. Dieser Bereich ist der Betriebsbereich der verwendeten Alge. Der Volumenstrom der CO₂ Zufuhr wird von einem Regelalgorithmus in Abhängigkeit vom pH -Wert eingestellt. Der pH -Wert kann willentlich nur gesenkt werden, da dem Algenpond aktiv nur zusätzliches CO₂ zugeführt werden kann, die Entnahme von CO₂ jedoch nicht möglich ist. Um einen ausreichenden Sicherheitsabstand des pH -Wertes zur oberen und unteren Grenze zu gewährleisten wird der Sollwert der Regelung auf den Mittelwert der Grenzen zu $pH^{SW} = 10.0$ gesetzt.

Der Volumenstrom \dot{V}_{CO_2} der CO₂ Zufuhr, der dem Algenpond an einem bestimmten Einspeisepunkt zugeführt wird, variiert zwischen $0 \frac{m^3}{h}$ und dem maximalen Volumenstrom $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$. Die Höhe des Volumenstroms wird von einem Proportional-Regler bestimmt, dessen Aufgabe es ist einen bestimmten pH -Wert einzustellen. Der Messwert des Reglers, der den Volumenstrom in CSTR n einstellt, ist der pH -Wert im vorherigen CSTR $n - 1$.

Im Beispiel in Abbildung 7.1 wird an zwei Einspeisepunkten CO₂ zugeführt. Für den Einspeisepunkt in CSTR 2 wird der pH -Wert in CSTR 1 herangezogen und für den Einspeisepunkt in CSTR 8 wird der pH -Wert in CSTR 7 herangezogen. Der tatsächlich zugeführte Volumenstrom $\dot{V}_{CO_2}(pH)$ wird wie folgt berechnet:

$$\dot{V}_{CO_2}(pH) = \begin{cases} 0 & \text{für } pH \leq pH^{SW} \\ \dot{V}_{CO_2}^{max} \cdot \frac{pH - pH^{SW}}{pH^{OG} - pH^{SW}} & \text{für } pH^{SW} < pH < pH^{OG} \\ \dot{V}_{CO_2}^{max} & \text{für } pH \geq pH^{OG} \end{cases} \quad (7.1)$$

Abbildung 7.2 zeigt graphisch den Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom \dot{V}_{CO_2} der CO₂ Zufuhr und dem pH -Wert.

Die Idee hinter dieser Art der Regelung ist ein System zu simulieren, bei dem der Volumenstrom der CO₂ Zufuhr an jedem Einspeisepunkt durch ein eigenes Ventil eingestellt werden kann. Wenn der pH -Wert vor dem Einspeisepunkt unter dem Sollwert pH^{SW} liegt, ist das Ventil komplett geschlossen, wenn der pH -Wert über dem oberen Grenzwert

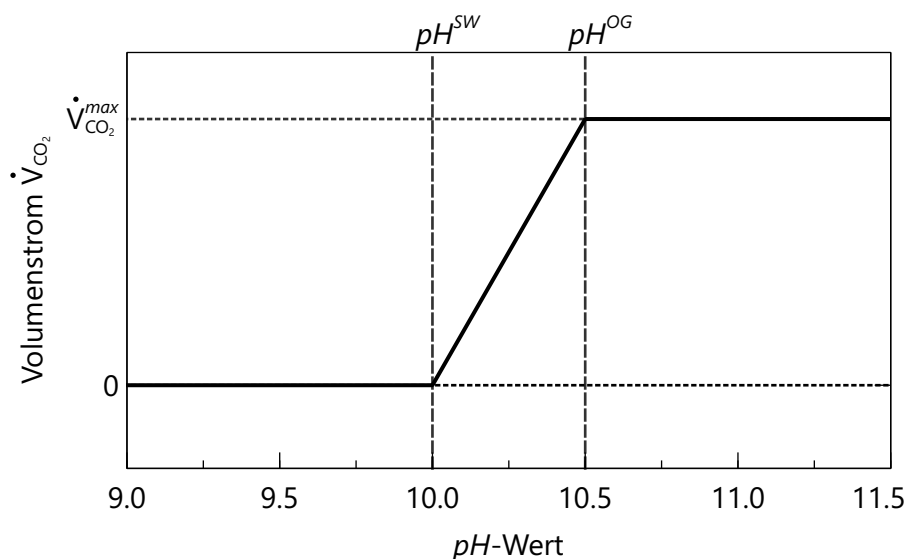


Abbildung 7.2: Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom \dot{V}_{CO_2} der CO_2 Zufuhr und dem pH -Wert

pH^{OG} liegt, ist das Ventil komplett geöffnet. Zwischen diesen beiden Grenzwerten wird das Ventil so geöffnet, dass der resultierende Volumenstrom an CO_2 linear mit dem Unterschied zwischen dem Sollwert pH^{SW} und dem tatsächlichen pH -Wert ansteigt.

Der Wert für den maximalen Volumenstrom $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ der CO_2 Zufuhr muss so gewählt werden, dass der Algenpond zu jedem Zeitpunkt mit ausreichend CO_2 versorgt werden kann. Der maximale Bedarf an CO_2 tritt dann auf, wenn der pH -Wert dem oberen Grenzwert pH^{OG} entspricht und die Wachstumsrate der Alge gleichzeitig maximal ist. Für diesen Fall muss das dem Pondwasser zugeführte CO_2 mindestens dem vom Algenwachstum verbrauchten CO_2 entsprechen um zu verhindern, dass der pH -Wert über den oberen Grenzwert steigt. Der konkrete Wert von $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ ist abhängig von der Pondgröße, der maximalen Wachstumsrate, die die Alge erreichen kann und der Effizienz der CO_2 Zufuhr. Der Wert des maximalen Volumenstroms $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ der CO_2 Zufuhr für den gesamten Algenpond wird für jede Kombination aus Pondgröße, 2.2 acre und 10 acre, und Alge, Spirulina-Alge und Hohertrags-Alge, bestimmt. Der maximale Volumenstrom $\dot{V}_{CO_2}^{max}$ an einem Einspeisepunkt ist dabei $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ geteilt durch die Gesamtzahl an Einspeisepunkten. Tabelle 7.3 zeigt den maximalen Volumenstrom $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ der CO_2 Zufuhr des Algenponds.

Tabelle 7.3: Maximaler Volumenstrom $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ der CO_2 Zufuhr des Algenponds

Alge	2.2 acre-Pond	10 acre-Pond
$\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ für Spirulina-Alge	$16 \frac{m^3}{h}$ ($\hat{=}$ $31.7 \frac{kg}{h}$)	$71 \frac{m^3}{h}$ ($\hat{=}$ $140.6 \frac{kg}{h}$)
$\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ für Hohertrags-Alge	$48 \frac{m^3}{h}$ ($\hat{=}$ $95.0 \frac{kg}{h}$)	$215 \frac{m^3}{h}$ ($\hat{=}$ $425.7 \frac{kg}{h}$)

7.2 Untersuchte Fälle

In dieser Studie wird der Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten, an denen dem Algenpond CO₂ zugeführt wird, untersucht. Außerdem wird bestimmt, wie viele Einspeisepunkte mindestens nötig sind um den Algenpond mit ausreichend CO₂ zu versorgen und den *pH*-Wert im gewünschten Betriebsbereich zu halten. Dazu wird der 2.2 acre-Pond und der 10 acre-Pond mit jeweils 1, 2, 3 und 4 Einspeisepunkten simuliert. Die Einspeisepunkte befinden sich entlang des Kanals des Algenpönds und besitzen zueinander den gleichen Abstand. Die Position der Einspeisepunkte ist davon abhängig mit wie vielen Einspeisepunkten ein Algenpond betrieben wird und mit wie vielen CSTRs der Kanal des Algenpönds abgebildet wird. Tabelle 7.4 zeigt die Position der Einspeisepunkte für den 2.2 acre-Pond und den 10 acre-Pond.

Tabelle 7.4: Position der Einspeisepunkte für den 2.2 acre-Pond und den 10 acre-Pond.

Anzahl der Einspeisepunkte	Position der Einspeisepunkte	
	2.2 acre-Pond	10 acre-Pond
1	1	1
2	1	13
3	1, 5, 9	1, 9, 17
4	1, 4, 7, 10	1, 7, 13, 19

Die Untersuchungen werden für vier Betriebsfälle durchgeführt, die im Folgenden näher beschrieben sind.

Standard-Fall Mit dem Standard-Fall wird untersucht, wie viele Einspeisepunkte nötig sind um den *pH*-Wert im Betriebsbereich zwischen dem unteren Grenzwert $pH^{UG} = 9.5$ und dem oberen Grenzwert $pH^{OG} = 10.5$ zu halten. Die Eigenschaften des Standard-Falls sind im Abschnitt 7.1 beschrieben.

Engerer Betriebsbereich des *pH*-Wertes Dieser Fall ist identisch zum Standard-Fall mit Ausnahme des Betriebsbereichs des *pH*-Wertes. Für diesen Fall wird angenommen, dass der Betriebsbereich nur halb so breit ist wie im Standard-Fall und von $pH^{UG} = 9.75$ bis $pH^{OG} = 10.25$ reicht. Damit soll untersucht werden wie viele Einspeisepunkte notwendig sind, wenn eine Alge verwendet wird, die empfindlicher auf den *pH*-Wert reagiert und deshalb einen engeren Betriebsbereich des *pH*-Wertes erfordert. Dies führt zu größeren Anforderungen an die CO₂ Zufuhr verglichen mit dem Standard-Fall. Abgesehen von den Grenzen der CO₂ Zufuhr sind die Eigenschaften identisch zum Standard-Fall.

Niedrigerer Betriebsbereich des *pH*-Wertes Dieser Fall ist ebenfalls weitestgehend identisch zum Standard-Fall. Der Betriebsbereich des *pH*-Wertes ist jedoch niedriger und reicht von $pH^{UG} = 7.5$ bis $pH^{OG} = 8.5$. Mit diesem Fall wird das Verhalten der Algenpönde untersucht, wenn eine Alge verwendet wird, die einen niedrigeren

pH -Wert bzw. Bereich für das Wachstum erfordert. Wenn ein niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes eingehalten werden soll, nimmt die Anzahl an notwendigen Einspeisepunkten vermutlich zu, da bei einem niedrigen pH -Wert die Zufuhr von CO_2 weniger effizient ist. Zudem weist das Pondwasser ein anderes Pufferverhalten auf, das die Stabilität des pH -Wertes beeinflusst. Abgesehen von den Grenzen der CO_2 Zufuhr und deren Sollwert von $pH^{SW} = 8.0$ sind die Eigenschaften identisch zum Standard-Fall.

Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum Für diesen Fall wird das Wachstumsmodell der Spirulina-Alge und der Hohertrags-Alge modifiziert um eine Abhängigkeit des Algenwachstums vom pH -Wert zu berücksichtigen. Dazu wird Gleichung (4.64) um den Einflussfaktor F_{pH} erweitert, der die Wachstumsrate bei einem nicht optimalen pH -Wert zusätzlich limitiert. Es ergibt sich folgende Beschreibung für die Wachstumsrate μ^1 .

$$\mu = \mu_{max} \cdot F_{Licht} \cdot F_{Temp} \cdot F_{pH} - \mu_{Death} \quad (7.2)$$

Für die Berechnung des Einflussfaktors F_{pH} wird die Gleichung (4.60) verwendet, die die Auswirkung der Abweichung des tatsächlichen pH -Wertes vom optimalen pH -Wert durch eine symmetrische Dreiecksfunktion beschreibt. Der optimale pH -Wert ist identisch mit dem Sollwert der CO_2 Zufuhr und beträgt $pH_{opt} = pH^{SW} = 10.0$. Wenn der pH -Wert an den Grenzen $pH^{UG} = 9.5$ und $pH^{OG} = 10.5$ liegt, beträgt die Wachstumsrate der Alge 77.5% bezogen auf die Wachstumsrate beim optimalen pH -Wert. Der Einflussfaktor für den pH -Wert hat dann den Wert $F_{pH} = 0.775$. Diese Abhängigkeit einer Alge vom pH -Wert basiert auf den Untersuchungen von OGBONDA ET AL. 2007. Mit diesem Fall wird untersucht, wie die Anzahl der Einspeisepunkte den Ertrag eines Algenponds beeinflussen, der mit einer Alge betrieben wird, deren Wachstumsrate signifikant vom pH -Wert abhängt. Die Verwendung von einer größeren Anzahl an Einspeisepunkten sollte zu einem pH -Wert des Algenponds führen, der über das Jahr näher am optimalen pH -Wert liegt woraus ein höherer Ertrag resultiert. Mit Ausnahme des Algenwachstumsmodells sind die Eigenschaften dieses Falls identisch zum Standard-Fall.

In Summe werden 64 unterschiedliche Simulationen durchgeführt, die sich aus den folgenden Variationen ergeben:

- 2 verschiedene Pondgrößen: 2.2 acre und 10 acre,
- 2 verschiedene Algen: Spirulina-Alge und Hohertrags-Alge,
- 4 verschiedene Variationen der Anzahl an Einspeisepunkten: 1, 2, 3, und 4,
- 4 verschiedene Fälle: Standard-Fall, Engerer Betriebsbereich des pH -Wertes, Niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes und Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum.

¹ Diese Gleichung ist identisch mit der Gleichung (4.57) für μ des generischen Algenwachstumsmodells.

7.3 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der untersuchten Fälle dargestellt und diskutiert. Durch die Untersuchung soll bestimmt werden, wie viele CO₂ Einspeisepunkte notwendig sind um den *pH*-Wert im Betriebsbereich zu halten. Dazu wird bei der Präsentation der Ergebnisse jeweils der minimale und maximale *pH*-Wert gezeigt, der während der einjährigen Betriebsperiode auftritt. Die Ergebnisse beziehen sich, sofern nichts anders vermerkt ist, auf die gesamte Betriebsperiode. Der dargestellte Ertrag ist damit über das Jahr gemittelt und ein Maß für die gesamte Produktivität der Algenponds.

Bevor auf die untersuchten Fälle im Detail eingegangen wird, werden zuerst die Mechanismen besprochen, die den *pH*-Wert maßgeblich beeinflussen. Der *pH*-Wert wird am stärksten von der Zugabe oder Entnahme von CO₂ in oder aus dem Pondwasser beeinflusst. Wenn dem Pondwasser CO₂ zugeführt wird, sinkt der *pH*-Wert ab, wird dagegen aus dem Pondwasser CO₂ entnommen, so steigt der *pH*-Wert an. Die Entnahme von CO₂ erfolgt hauptsächlich durch das Wachstum der Alge, die dabei CO₂ aus dem Pondwasser aufnimmt und in ihre eigene Biomasse einbaut. Die Aufnahme von CO₂ ist dabei direkt von der Wachstumsrate der Alge abhängig, so dass bei einer höheren Wachstumsrate auch der Einfluss auf den *pH*-Wert größer ausfällt. Die Zugabe von CO₂ erfolgt hauptsächlich durch die CO₂ Zufuhr an den Einspeisepunkten. Das dort zugeführte Gas wird teilweise im Pondwasser gelöst und erhöht dadurch die Menge an CO₂.

Die Dunkelatmung der Alge, die bei unzureichenden Lichtverhältnissen einsetzt, führt ebenfalls zu einer Zunahme an CO₂ im Pondwasser und damit zu einer Absenkung des *pH*-wertes. Der Einfluss der Hohertrags-Alge auf den *pH*-Wert ist generell größer als der Einfluss der Spirulina-Alge, da die Hohertrags-Alge bei sonst identischen Bedingungen eine betragsmäßig größere Wachstumsrate aufweist, die die Menge an CO₂ im Pondwasser und damit den *pH*-Wert beeinflusst.

Abbildung 7.3 zeigt beispielhaft den Verlauf des *pH*-Werts entlang des Kanals des Algenponds am 1. Juli 2013. Die Ergebnisse stammen von der Simulation des 10 acre-Ponds, der mit der Hohertrags-Alge und zwei Einspeisepunkten betrieben wird. Um die Verständlichkeit der Darstellung zu erhöhen, sind in der Abbildung die Ergebnisse der ersten sieben CSTRs wiederholt dargestellt. Anhand dieser Verläufe wird im Folgenden diskutiert, wie sich der *pH*-Wert im Algenpond an einem Tag sowohl zeitlich als auch örtlich ändert.

Der Verlauf des *pH*-Wert entlang des Kanals ist sowohl um Mitternacht (00:13 Uhr) als auch in der Früh (06:03 Uhr) relativ konstant. Zu diesen Zeiten wird dem Algenpond kein CO₂ an den Einspeisepunkten zugeführt, da der *pH*-Wert unter dem Sollwert $pH^{SW} = 10.0$ liegt. Trotzdem nimmt der *pH*-Wert von 00:13 Uhr bis 6:03 Uhr ab, da in der Nacht durch die Dunkelatmung der Alge CO₂ freigesetzt wird.

Zur Mittagszeit (11:53 Uhr) ändert sich der *pH*-Wert entlang des Kanals stark. Von CSTR 12 zu CSTR 13 und von CSTR 24 zu CSTR 1 fällt der *pH*-Wert deutlich,

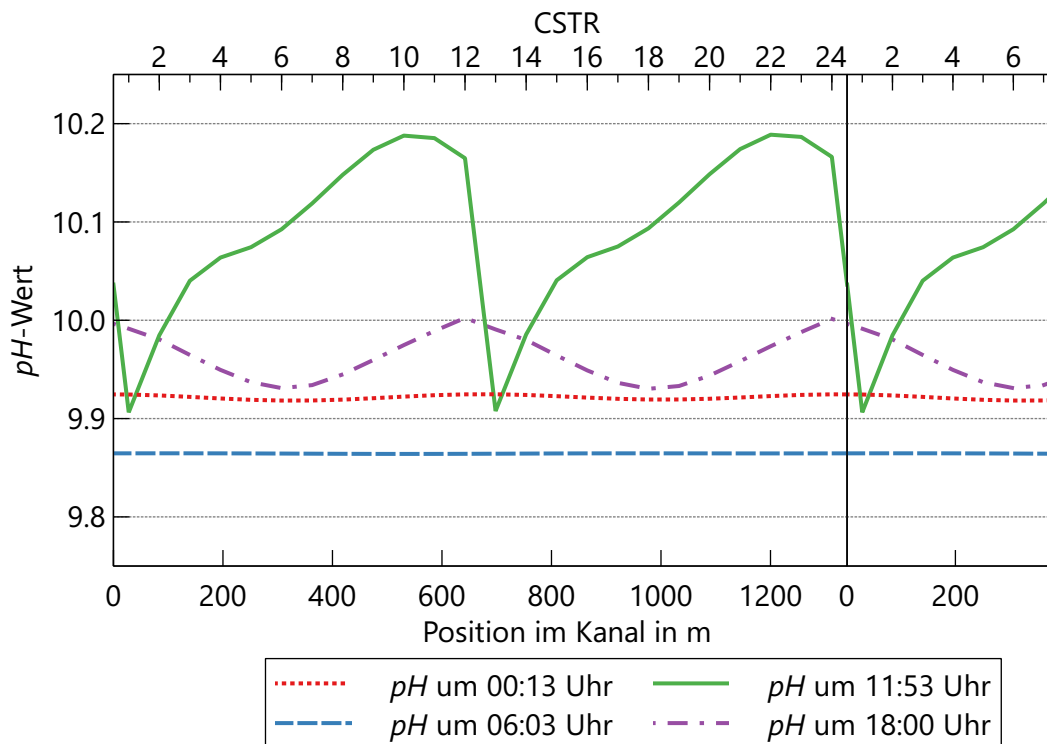


Abbildung 7.3: Verlauf des pH -Werts entlang des Kanals des Algenponds zu vier verschiedenen Zeiten; Ergebnisse des Standard-Falls 10 acre-Pond (Hohertrags-Alge, 2 Einspeisepunkte) für den 1. Juli 2013

dazwischen steigt der pH -Wert kontinuierlich an zeigt jedoch ein Plateau. Der Abfall des pH -Werts wird durch die Zufuhr von CO_2 verursacht, das an den Einspeisepunkten in CSTR 1 und CSTR 13 dem Algenpond zugegeben wird. Zwischen den Einspeisepunkten steigt der pH -Wert, da durch das Wachstum der Alge CO_2 verbraucht wird.

Am Abend (18:00 Uhr) sind die Schwankungen des pH -Werts entlang des Kanals geringer als zur Mittagszeit, da das Wachstum der Alge hauptsächlich auf Grund der geringeren solaren Einstrahlung schwächer ausfällt. Zu diesem Zeitpunkt gibt es keinen so deutlichen Abfall des pH -Wertes an den Einspeisepunkten wie zur Mittagszeit, da dort kein CO_2 zugeführt wird. Der Verlauf des pH -Wertes zeigt jedoch zwei lokale Maxima und Minima, deren Ursache die früher erfolgte CO_2 Zufuhr an den Einspeisepunkten ist. Dieses „Gedächtnis“ des pH -Wertes erklärt auch die zur Mittagszeit vorhanden Plateaus, die zu früheren Zeitpunkten lokale Minima waren und dann durch eine steigende Wachstumsrate der Alge zu Plateaus wurden.

Die hier beispielhaft gezeigten Ergebnisse für vier verschiedene Zeitpunkte an nur einem Tag zeigen, dass der aktuelle Verlauf des pH -Wertes von mehreren Einflüssen abhängt sowie vom Verlauf zu früheren Zeitpunkten.

7.3.1 Standard-Fall

Abbildung 7.4 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond, der mit der Spirulina-Alge und der Hohertrags-Alge betrieben wird. Der Betriebsbereich der Alge, der von $pH = 9.5$ bis $pH = 10.5$ reicht, ist durch zwei gestrichelte Linien gekennzeichnet. Der pH -Wert des Ponds, der mit der Spirulina-Alge betrieben wird, bleibt für jede beliebige Anzahl an Einspeisepunkten innerhalb des gewünschten Betriebsbereichs. Der minimale und maximale pH -Wert ist dabei nahezu unabhängig von der Anzahl an Einspeisepunkten.

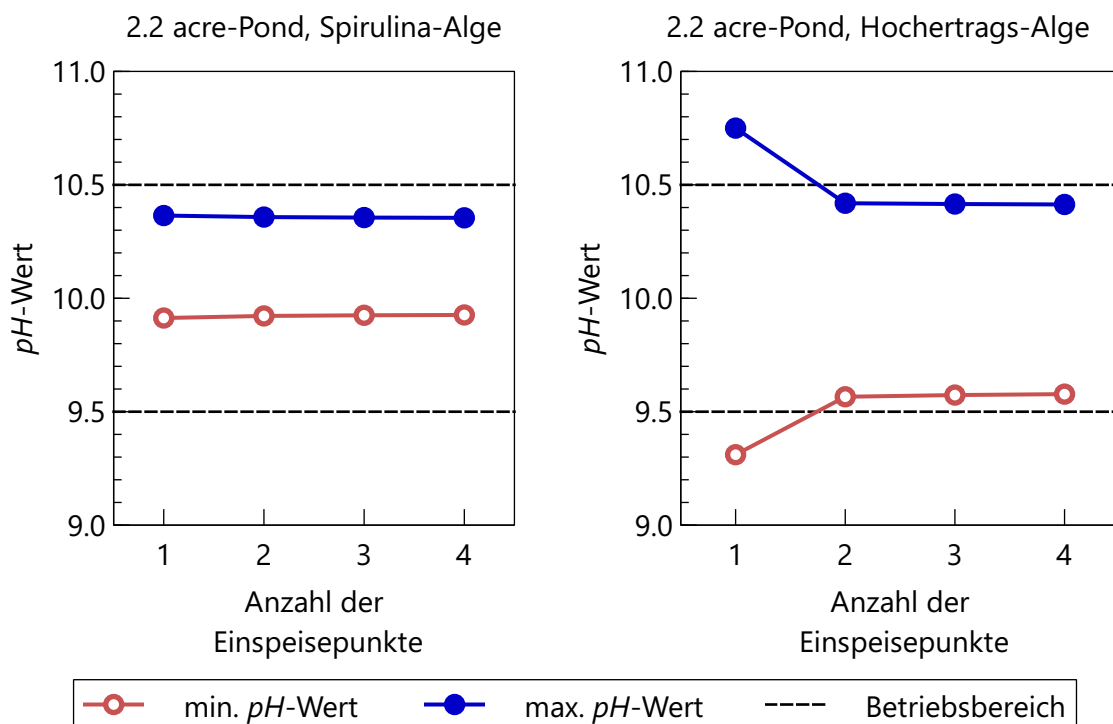


Abbildung 7.4: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (Standard-Fall)

Wird der Algenpond dagegen mit der Hohertrags-Alge betrieben, reicht ein Einspeisepunkt nicht mehr aus und es muss an mindestens zwei Einspeisepunkten CO_2 zugeführt werden, um die Grenzen des Betriebsbereichs nicht zu überschreiten. Ab zwei Einspeisepunkten bleiben die minimalen und maximalen pH -Werte wiederum nahezu konstant.

Abbildung 7.5 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond, der mit der Spirulina-Alge und der Hohertrags-Alge betrieben wird. Wie beim 2.2 acre-Pond ist für den mit der Spirulina-Alge betriebenen 10 acre-Pond die Verwendung nur eines Einspeisepunktes ausreichend. Werden stattdessen zwei Einspeisepunkte verwendet, nimmt der Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen pH -Wert etwas ab. Die Verwendung von noch mehr Einspeisepunkten zeigt dagegen keine weiteren Auswirkungen.

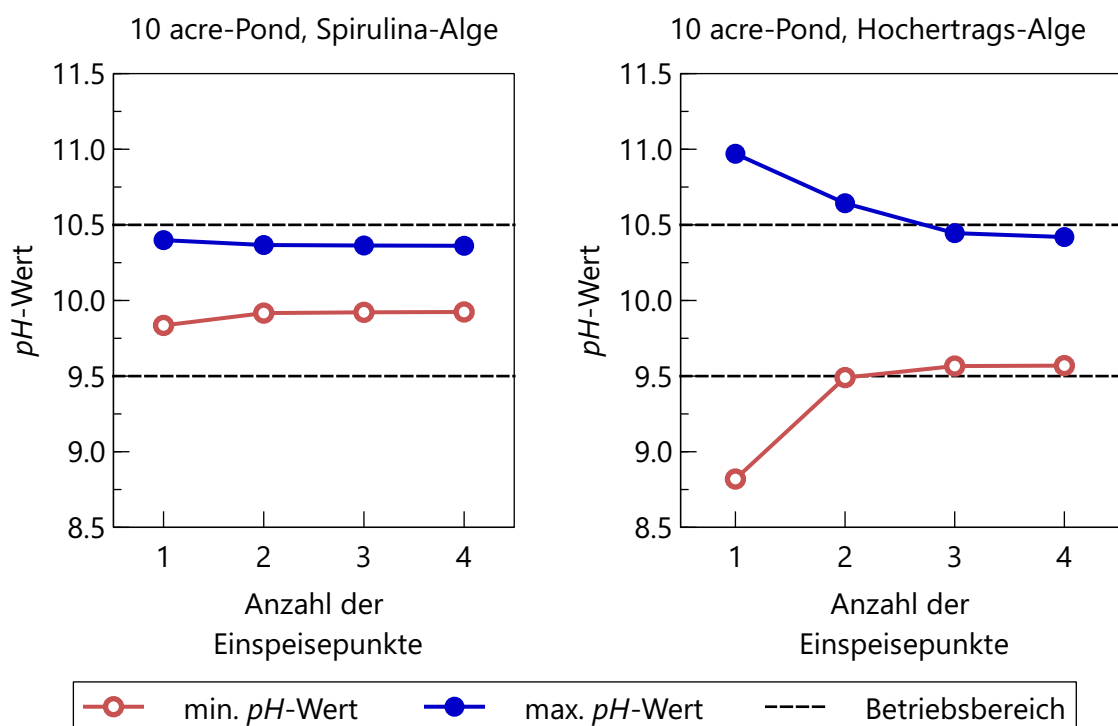


Abbildung 7.5: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (Standard-Fall)

Wenn der 10 acre-Pond mit der Hohertrags-Alge betrieben wird, sind mindestens drei Einspeisepunkte nötig, um den pH -Wert im Betriebsbereich zu halten. Bei der Erhöhung der Anzahl an Einspeisepunkten von drei auf vier bleibt der Abstand der Extrema zu den Grenzen des Betriebsbereichs nahezu unverändert klein.

Die Ergebnisse des Standard-Falls zeigen, dass die Anzahl der Einspeisepunkte sowohl den minimalen als auch den maximalen pH -Wert im Algenpond beeinflussen. Wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem Einspeisepunkt CO_2 zugeführt wird, dann ist der pH -Wert direkt vor diesem Einspeisepunkt am größten und direkt hinter diesem Einspeisepunkt am kleinsten. Wenn nur wenige Einspeisepunkte verwendet werden, dann ist die Veränderung des pH -Werts zwischen zwei Einspeisepunkten groß. Dies führt zu einem besonders hohen pH -Wert direkt vor einem Einspeisepunkt. Zusätzlich ist bei der Verwendung nur weniger Einspeisepunkte der Volumenstrom, der an einem Einspeisepunkt zugegeben wird, ebenfalls groß. Beides zusammen führt für den Fall, dass nur wenige Einspeisepunkte verwendet werden, zu einer starken Abnahme des pH -Werts am Einspeisepunkt. Werden dagegen mehr Einspeisepunkte verwendet, so fällt die Änderung des pH -Wertes zwischen zwei Einspeisepunkten bzw. am Einspeisepunkt nicht so stark aus, was zu einem geringeren Unterschied zwischen dem maximalen und dem minimalen pH -Wert führt.

Für beide Algenponds, die mit der Spirulina-Alge betrieben werden, ist ein Einspeisepunkt ausreichend. Dies liegt an der relativ geringen Wachstumsrate der Spirulina-Alge mit einem jährlichen Ertrag von $8 \frac{g}{m^2 d}$. Der Einfluss der Alge auf den pH -Wert ist so

gering, dass der pH -Wert mit nur einem Einspeisepunkt im Betriebsbereich gehalten werden kann. Die Algenponds, die mit der Hohertrags-Alge betrieben werden, benötigen dagegen mehr als nur einen Einspeisepunkt. Diese Alge erreicht einen höheren jährlichen Ertrag von $25 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ und ihr Wachstum hat einen größeren Einfluss auf den pH -Wert. Die maximale Distanz zwischen zwei Einspeisepunkten, bei der der pH -Wert noch im Betriebsbereich bleibt, beträgt 417 m für den 2.2 acre-Pond und 447 m für den 10 acre-Pond. Die Ähnlichkeit dieser Werte für beide Algenponds liegt daran, dass beide Algenponds unter denselben Bedingungen betrieben werden und dadurch die Änderung des pH -wertes des Pondwassers, das eine bestimmte Distanz vom Einspeisepunkt weg geströmt ist, ebenfalls ähnlich ausfällt.

Die Ergebnisse zeigen, dass umso mehr Einspeisepunkte benötigt werden, je stärker das Algenwachstum ausfällt oder je größer der Algenpond ist. Werden zu wenige Einspeisepunkte verwendet, dann ist die Änderung des pH -wertes zwischen den Einspeisepunkten zu groß und die Grenzen des Betriebsbereichs werden überschritten.

7.3.2 Engerer Betriebsbereich des pH -wertes

Abbildung 7.6 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -wert im 2.2 acre-Pond für einen engeren Betriebsbereich des pH -wertes. Dieser engere Betriebsbereich reicht von $pH = 9.75$ bis $pH = 10.25$ und ist mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Wird der 2.2 acre-Pond mit der Spirulina-Alge betrieben und nur ein Einspeisepunkt verwendet so ist der maximale pH -wert gerade noch im Betriebsbereich. Es sind zwei Einspeisepunkte notwendig um einen Sicherheitsabstand zwischen dem maximalen pH -wert und dem oberen Grenzwert des Betriebsbereichs zu erhalten.

Bei Verwendung der Hohertrags-Alge sind mindestens drei Einspeisepunkte notwendig, damit der maximale pH -wert die Grenzen des Betriebsbereichs einhält. Der minimale pH -wert liegt dagegen auch mit vier Einspeisepunkten nicht im Betriebsbereich. Der Verlauf des minimalen pH -wertes zeigt ein asymptotisches Verhalten, so dass auch mit mehr als vier Einspeisepunkten die Grenzen des Betriebsbereichs wahrscheinlich nicht eingehalten werden können.

Abbildung 7.7 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -wert im 10 acre-Pond für einen engeren Betriebsbereich des pH -wertes. Der mit der Spirulina-Alge betriebene 10 acre-Pond benötigt mindestens zwei Einspeisepunkte an denen CO_2 zugeführt wird. Die Verwendung von mehr als zwei Einspeisepunkten zeigt dagegen keine signifikante Auswirkung auf den minimalen und maximalen pH -wert.

Wird der Algenpond statt mit der Spirulina-Alge mit der Hohertrags-Alge betrieben kann, selbst mit vier Einspeisepunkten, der Betriebsbereich des pH -wertes nicht eingehalten werden. Sowohl der minimale wie auch der maximale pH -wert liegen für alle Fälle außerhalb der Grenzen. Mit der Zunahme der Anzahl an Einspeisepunkten nimmt der Unterschied zwischen dem minimalen und maximalen pH -wert ab.

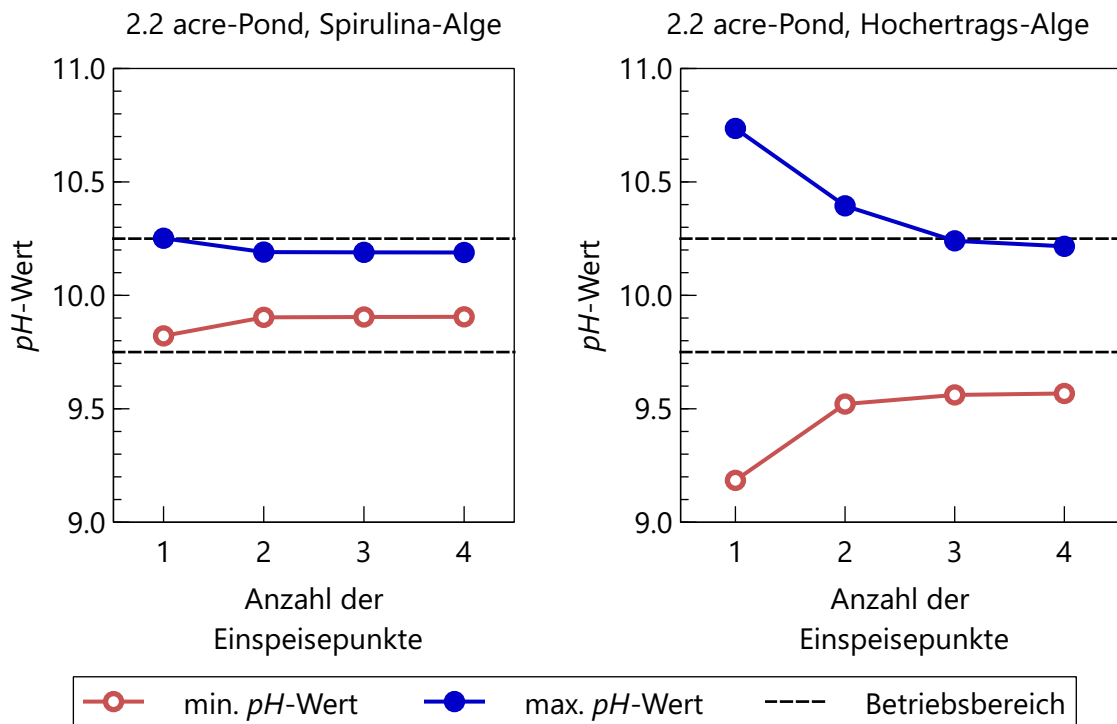


Abbildung 7.6: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (engerer Betriebsbereich des pH -Wertes)

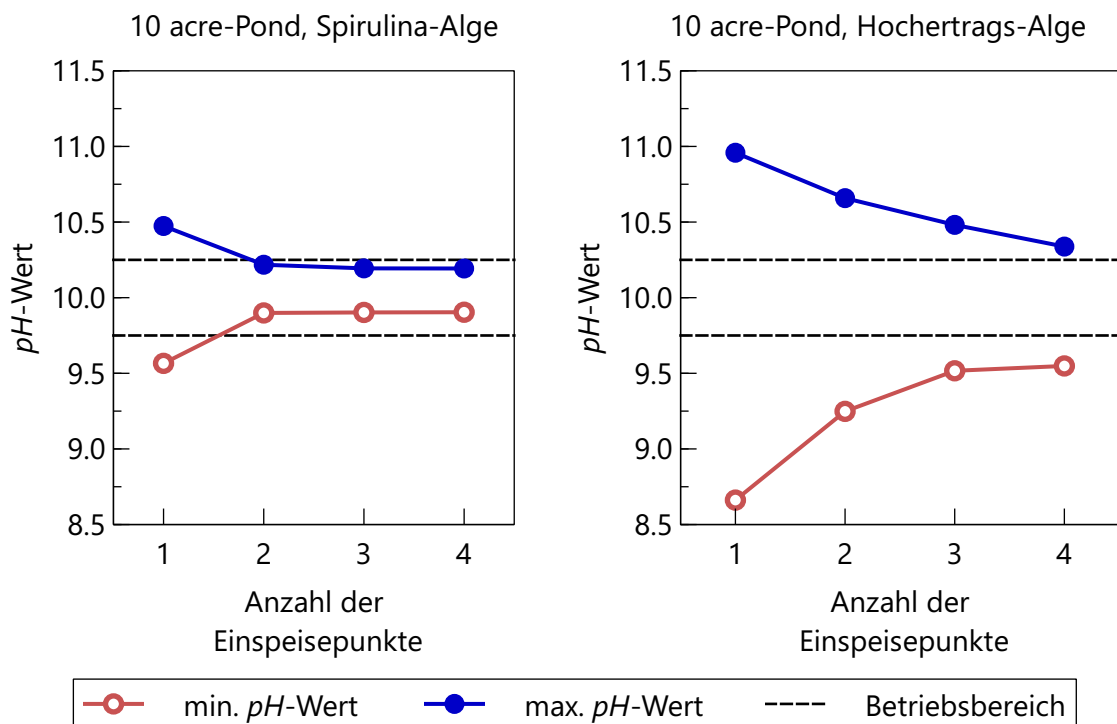


Abbildung 7.7: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (engerer Betriebsbereich des pH -Wertes)

Prinzipiell ist der Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten bei diesem untersuchten Fall ähnlich zum Standard-Fall. Der Unterschied zwischen dem maximalen und dem minimalen pH -Wert wird durch die Parameter pH^{OG} und pH^{SW} der CO₂ Zufuhr sowie der Anzahl der Einspeisepunkte bestimmt. In diesem Fall ist der obere Grenzwert pH^{OG} niedriger als im Standard-Fall, woraus ein geringer Abstand der Extrema des pH -Wertes resultiert. Die Herabsetzung des Parameters pH^{OG} reicht aus um den pH -Wert der Algenponds, die mit der Spirulina-Alge betrieben werden, im engeren Betriebsbereich zu halten. Das Einhalten des engeren Betriebsbereichs ist anspruchsvoller, was man daran sieht, dass der 10 acre-Pond zwei Einspeisepunkte benötigt im Standard-Fall jedoch ein Einspeisepunkt ausreicht.

Für die Algenponds, die mit der Hohertrags-Alge betrieben werden, ist es auch mit mehreren Einspeisepunkten nicht möglich den pH -Wert im engeren Betriebsbereich zu halten. Entscheidend ist dabei der untere Grenzwert, der vom minimalen pH -Wert unterschritten wird. Der obere Grenzwert kann im Regelfall immer eingehalten werden, da die CO₂ Zufuhr an einem Einspeisepunkt den pH -Wert aktiv und willentlich senkt. Somit kann bei Verwendung einer ausreichend hohen Anzahl an Einspeisepunkten der maximale pH -Wert immer unter dem oberen Grenzwert gehalten werden. Dies gilt nicht für den minimalen pH -Wert, da dieser nicht aktiv beeinflusst werden kann, sondern eine Folge des Algenwachstums und des pH -Verlaufs der Vergangenheit ist. Der Einfluss der Hohertrags-Alge ist dabei bedeutend größer als der Einfluss der Spirulina-Alge und führt zur Unterschreitung des unteren Grenzwerts durch den minimalen pH -Wert.

Die Untersuchungen zeigen, dass die CO₂ Zufuhr des Algenponds anspruchsvoller ausfällt, wenn die Alge einen engeren Betriebsbereich des pH -Wertes verlangt oder wenn ihr Einfluss auf den pH -Wert stärker ausfällt.

7.3.3 Niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes

Abbildung 7.8 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond für einen niedrigeren Betriebsbereich des pH -Wertes. Dieser niedrigere Betriebsbereich reicht von $pH = 7.5$ bis $pH = 8.5$ und ist mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Der pH -Wert, des mit der Spirulina-Alge betriebenen Algenponds, bleibt selbst mit nur einem Einspeisepunkt im Betriebsbereich. Eine Erhöhung der Anzahl an Einspeisepunkten zeigt keine Auswirkungen auf den minimalen und maximalen pH -Wert.

Wird der Algenpond dagegen mit der Hohertrags-Alge betrieben, kann der obere Grenzwert erst ab zwei Einspeisepunkten eingehalten werden. Der untere Grenzwert wird selbst mit vier Einspeisepunkten unterschritten. Ab einer Verwendung von zwei Einspeisepunkten ist keine Änderung der Extrema des pH -Wertes zu beobachten.

Abbildung 7.9 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond für einen niedrigeren Betriebsbereich des pH -Wertes. Beim 10 acre-Pond, der mit der Spirulina-Alge betriebene wird, kann der pH -Wert auch mit nur einem Einspeisepunkt im Betriebsbereich gehalten werden. Wie bei

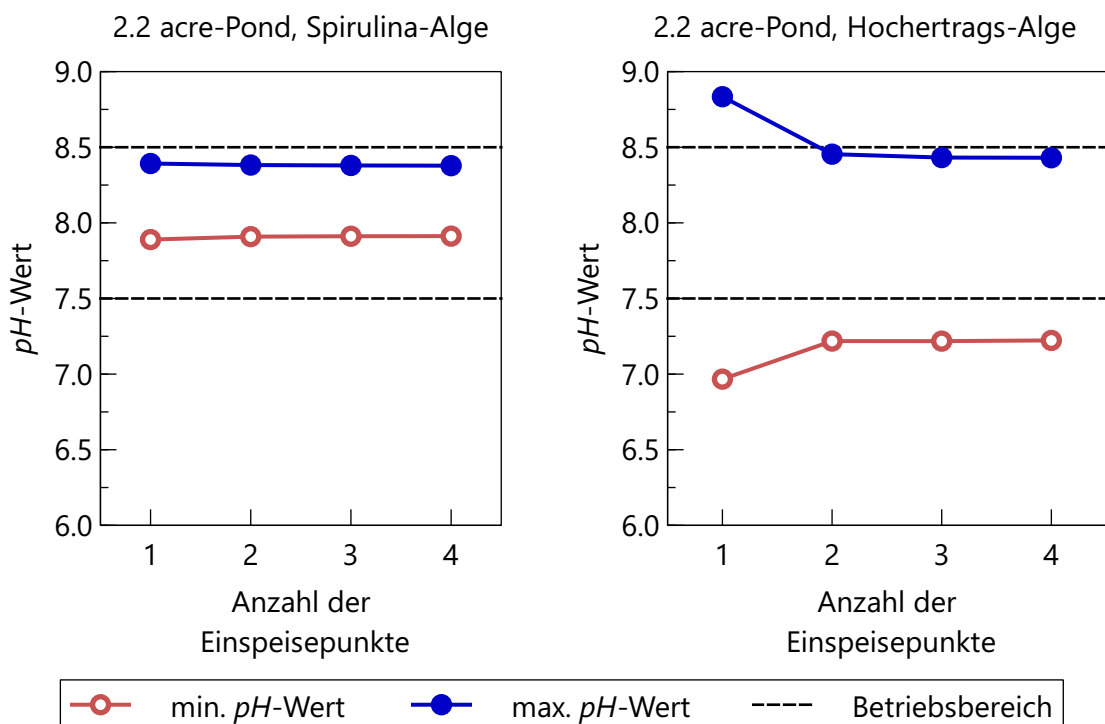


Abbildung 7.8: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (niedrigerer Betriebsbereich des pH -wertes)

den anderen untersuchten Fällen führt eine Erhöhung der Anzahl an Einspeisepunkten zu einer Verringerung des Abstands zwischen minimalen und maximalen pH -Wert.

Bei Verwendung der Hochertrags-Alge wird der obere Grenzwert erst bei Verwendung mit vier Einspeisepunkten eingehalten. Der untere Grenzwert kann dagegen selbst mit vier Einspeisepunkten nicht eingehalten werden. Folglich wird der Betriebsbereich des pH -Werts für jede Anzahl an Einspeisepunkten nicht eingehalten.

Für den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkte auf den pH -Wert sind prinzipiell dieselben Erklärungen gültig, die auch für den Standard-Fall gelten. Ein signifikanter Unterschied ist jedoch das Verhalten der Algenpools, die mit der Hochertrags-Alge betrieben. Bei diesen Algenpools reicht eine Erhöhung der Anzahl an Einspeisepunkten, im Gegensatz zum Standard-Fall, nicht aus um den minimalen pH -Wert über dem unteren Grenzwert und damit den pH -Wert im Betriebsbereich zu halten. Der Grund dafür ist der Unterschied zwischen dem minimalen und maximalen pH -Wert, der bei Verwendung der Hochertrags-Alge deutlich größer ist, als bei Verwendung der Spirulina-Alge oder bei den im Standard-Fall untersuchten vergleichbaren Algenpools. Eine Erklärung dafür ist das chemische Verhalten des Pondwassers, das bei dem hier vorliegenden niedrigeren pH -Wert anders ausfällt als bei den höheren pH -Werten der anderen Betriebsfälle. Das Pondwasser enthält unter anderem die Komponenten CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} (siehe dazu auch Abschnitt 4.2), die zueinander im chemischen Gleichgewicht stehen und zusammen mit Wasser ein Puffersystem bilden. Dieses Puffer-

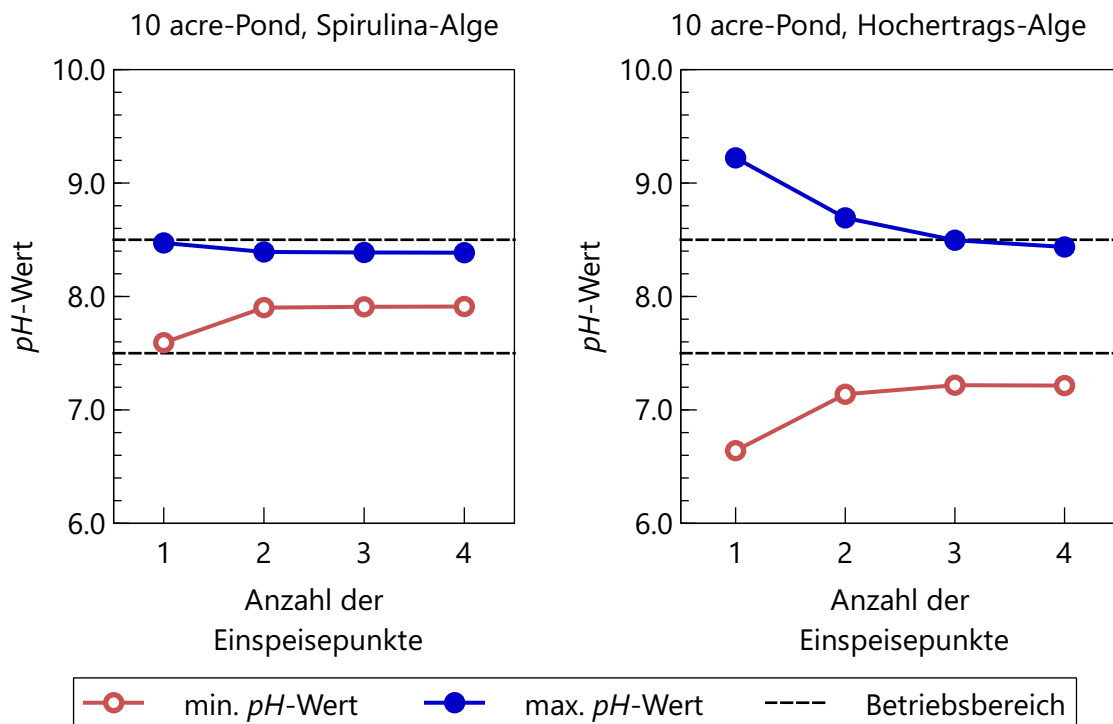


Abbildung 7.9: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes)

system sorgt dafür, dass der pH -Wert trotz Zugabe oder Entnahme von CO_2 in einem gewissen Bereich um den sog. Pufferpunkt relativ stabil bleibt. Der Pufferpunkt und damit die Lage der Bereiche in denen der pH -Wert durch das Puffersystem stabilisiert wird, ist von Gleichgewichtskonstanten der chemischen Reaktionen abhängig. Bei den hier untersuchten Fällen liegt der untere Pufferpunkt bei etwa $\text{pH} = 6.1$ und der obere Pufferpunkt bei etwa $\text{pH} = 9.5$. Die Pufferwirkung des Pondwassers ist bei dem hier untersuchten niedrigeren Betriebsbereich des pH -Wertes deutlich schwächer als bei einem höheren Betriebsbereich, wie z. B. beim Standard-Fall, da der Abstand zum (oberen) Pufferpunkt größer ist. Dies zeigt sich am deutlichsten beim minimalen pH -Wert, der bei Verwendung der Hohertrags-Alge durch die verminderte Pufferwirkung des Pondwassers den unteren Grenzwert auch bei Verwendung mehrere Einspeisepunkte unterschritten, obwohl dies beim Standard-Fall unter ansonsten identischen Bedingungen nicht der Fall ist.

7.3.4 Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum

Abbildung 7.10 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 2.2 acre-Pond. Der optimale pH -Wert, bei dem die Alge die größte Wachstumsrate zeigt, ist in den Abbildungen als gestrichelte Linie gekennzeichnet. Der mittlere pH -Wert, der in der Abbildung dargestellt ist, wird wie folgt berechnet: Für jeden berechneten Zeitpunkt der Simulation wird über alle pH -

Werte der einzelnen CSTRs, also über die gesamte Kanallänge gemittelt. Dieser mittlere pH -Wert des Algenponds wird dann über die gesamte Betriebsdauer gemittelt, um den hier dargestellten mittleren pH -Wert zu erhalten.

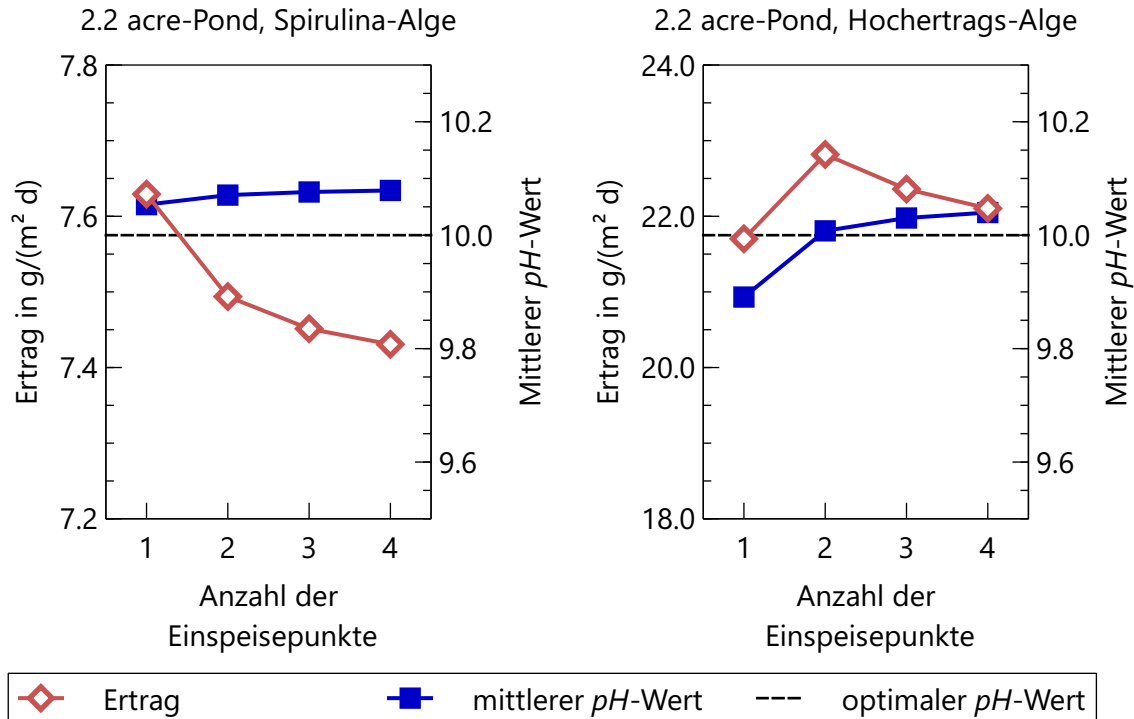


Abbildung 7.10: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 2.2 acre-Pond (Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum)

Der Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten ist für den Algenpond, der mit der Spirulina-Alge betrieben wird, gering. Eine größere Anzahl an Einspeisepunkten führt zu einem geringeren Ertrag und einem etwas höheren mittleren pH -Wert. Der mit der Hohertrags-Alge betriebene Algenpond wird optimalerweise mit zwei Einspeisepunkten betrieben. Werden mehr oder weniger Einspeisepunkte verwendet, fällt der Ertrag niedriger aus als bei der Verwendung von zwei Einspeisepunkten. Für beide Algenponds gilt, dass der mittlere pH -Wert mit der Anzahl an Einspeisepunkten zunimmt. Für den mit der Spirulina-Alge betriebenen Algenpond liegt der mittlere pH -Wert für jede Anzahl an Einspeisepunkten über dem optimalen pH -Wert. Für den Algenpond, der mit der Hohertrags-Alge betrieben wird, erreicht der mittlere pH -Wert den optimalen pH -Wert bei Verwendung von zwei Einspeisepunkten.

Abbildung 7.11 zeigt den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 10 acre-Pond. Das Ergebnis der Simulation des 10 acre-Ponds, der mit der Spirulina-Alge betrieben wird, ist vergleichbar mit dem Ergebnis für den 2.2 acre-Pond. Der Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag ist zwar vorhanden, jedoch nur in einem geringen Ausmaß. Für diesen Algenpond ist es optimal nur einen Einspeisepunkt zu verwenden, da eine höhere Anzahl an Einspeisepunkten zu einem verminderten Ertrag führt.

Wird der 10 acre-Pond mit der Hohertrags-Alge betrieben ist der Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten signifikant. Wird statt der optimalen Anzahl von drei Einspeisepunkten nur ein Einspeisepunkt verwendet, so fällt der Ertrag deutlich niedriger aus. Der mittlere pH -Wert nimmt, wie auch beim 2.2 acre-Pond, mit der Anzahl an Einspeisepunkten zu.

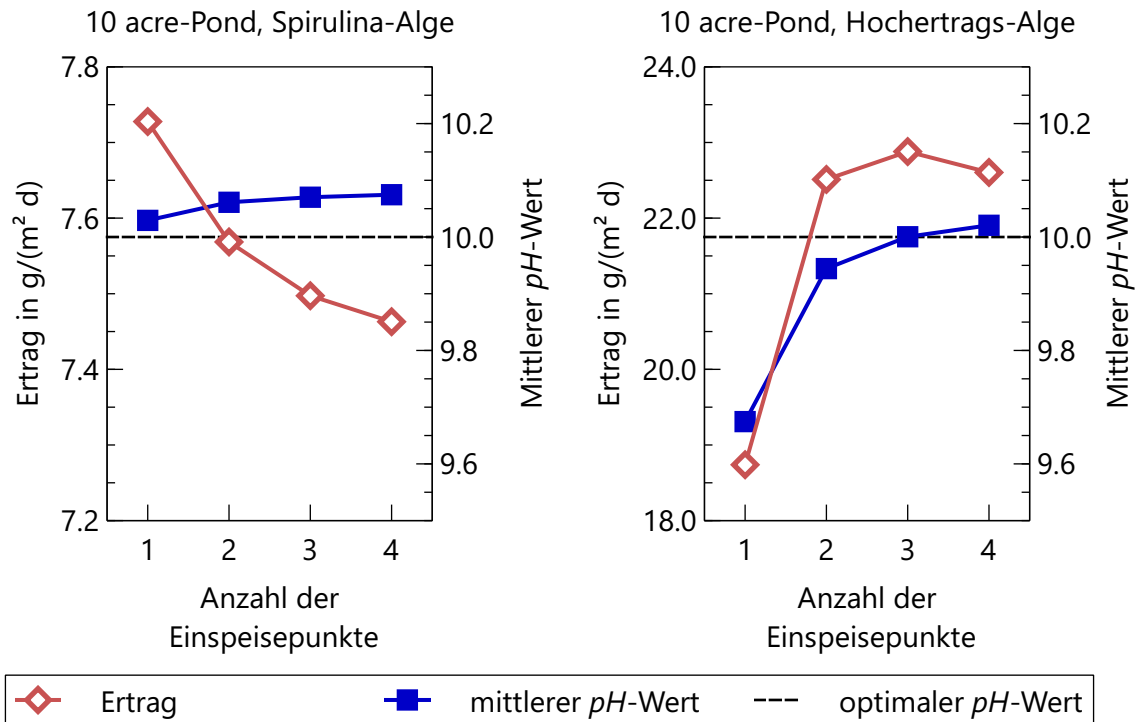


Abbildung 7.11: Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 10 acre-Pond (Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum)

Der in diesem Teil der Untersuchungen gezeigte mittlere pH -Wert ist, obwohl er alle während eines simulierten Betriebsjahres berechneten Werte zu nur einen Wert mittelt, ein brauchbarer Indikator um zu beurteilen wie nah der pH -Wert im Algenpond im Mittel am optimalen pH -Wert liegt. Um den Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag zu beurteilen, ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden: Wenn der mittlere pH -Wert im Algenpond zu niedrig ist, ist auch der Ertrag im Algenpond niedriger als er beim optimalen pH -Wert sein könnte. Wird in diesem Fall die Anzahl an Einspeisepunkten erhöht, nimmt dadurch der mittlere pH -Wert zu und mit ihm der Ertrag. Wenn die Anzahl an Einspeisepunkten optimal ist, dann führt die Verwendung von mehr Einspeisepunkten zwar ebenfalls zu einer Erhöhung des mittleren pH -Wertes, jedoch ist dieser dann schon nahe am optimalen pH -Wert und eine weitere Erhöhung resultiert in einer Abnahme des Ertrags. Der Grund für dieses Verhalten ist der Einfluss der CO_2 Zufuhr und des dafür verwendeten Regelalgorithmus auf den mittleren pH -Wert, die den pH -Wert im Algenpond offensichtlich auf einen Wert einstellt, der über dem Sollwert pH^{SW} liegt. Dabei ist zu beachten, dass die Verwendung von zu wenig

Einspeisepunkten zu einem bedeutend geringeren Ertrag führt als die Verwendung von zu vielen Einspeisepunkten.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Untersuchung mit den Ergebnissen des Standard-Falls, zeigt sich, dass die Anzahl an Einspeisepunkten bei der hier berechnete Ertrag maximal ist genau der minimalen Anzahl an Einspeisepunkten entspricht, die im Standard-Fall notwendig ist um den pH -Wert im Betriebsbereich zu halten. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass für die hier untersuchen Fälle so viele wie nötig, aber so wenig wie möglich, Einspeisepunkte verwendet werden sollten.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Teil der Arbeit wird untersucht, an wie vielen Stellen einem offenen Algenpond CO_2 zugeführt werden muss, um den pH -Wert im Algenpond in einem gewünschten Betriebsbereich zu halten. Die simulierten Algenponds werden für ein Jahr betrieben und ihr Standort ist Everglades City in Florida in den USA. Der CO_2 Bedarf der Algenponds wird durch die Zufuhr von gasförmigen CO_2 gedeckt, wobei der Volumenstrom der CO_2 Zufuhr an einem bestimmten Einspeisepunkt vom pH -Wert vor diesem Einspeisepunkt abhängt. Die in diesen Untersuchungen verwendete CO_2 Zufuhr und der verwendete Regelalgorithmus sind in der Lage, den Algenpond mit ausreichend CO_2 zu versorgen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Zufuhr von CO_2 den pH -Wert aktiv nur senken und nicht erhöhen kann.

Die Algenponds werden mit einer *Spirulina platensis* Alge betrieben, deren Wachstumsverhalten von einem Algenwachstumsmodell beschrieben wird, dessen Parameter an experimentelle Untersuchungen angepasst sind. Sowohl für den 2.2 acre-Pond mit einer Kanallänge mit 834 m als auch für den 10 acre-Pond mit einer Kanallänge von 1340 m sind maximal zwei Einspeisepunkte notwendig, um den pH -Wert im jeweils gewünschten Bereich zu halten. Der durchschnittliche jährliche Ertrag dieser sog. Spirulina-Alge beträgt dabei etwa $8 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$ und ist damit deutlich niedriger als der für industrielle Algenproduktionsanlagen erwartete Ertrag von $25 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$.

Das Verhalten der Algenponds wird auch bei Verwendung einer sog. Hohertrags-Alge untersucht. Diese Alge wird mit demselben Algenwachstumsmodell beschrieben wie die Spirulina-Alge, es wird jedoch ein modifizierter Parametersatz verwendet. Damit erreicht die Hohertrags-Alge einen jährlichen Ertrag von etwa $25 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{d}}$. Die mit der Hohertrags-Alge betriebenen Algenponds benötigen bei allen untersuchten Fälle mehr Einspeisepunkte, da diese Alge größere Anforderungen an die CO_2 Zufuhr als die Spirulina-Alge stellt. Ein mit der Hohertrags-Alge betriebener 10 acre-Pond benötigt mindestens drei Einspeisepunkte, damit der pH -Wert im Standard-Fall im Bereich von 9.5 – 10.5 gehalten werden kann. Selbst mit mehr Einspeisepunkten ist es jedoch nicht möglich, den pH -Wert in einem niedrigeren oder engeren Bereich zu halten, da der minimale pH -Wert die untere Grenze dieser veränderten Betriebsbereiche unterschreitet. Der Grund dafür liegt nicht in einer mangelhaften CO_2 Zufuhr, sondern in den Phasen des Betriebs, in denen die Alge überwiegend stirbt und dabei CO_2 freisetzt.

Wenn die Alge mit einem vom pH -Wert abhängigen Algenwachstumsmodell beschrieben wird, ist ein nennenswerter Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag des Algenponds vorhanden. Bei Verwendung einer zu geringen Anzahl an Einspeisepunkten ist der Ertrag deutlich geringer als der maximal mögliche Ertrag. Werden dagegen zu viele Einspeisepunkte verwendet, fällt die Ertragsminderung nur gering aus.

Die Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, sehr große Algenponds mit ausreichend CO_2 zu versorgen. Die CO_2 Zufuhr kann dabei von einem relativ einfachen Regelalgorithmus gesteuert werden, der den pH -Wert als Führungsgröße verwendet. Soll der pH -Wert in einem Betriebsbereich von 9.5 – 10.5 gehalten werden sind maximal drei Einspeisepunkte für CO_2 ausreichend. Bei engeren und niedrigeren Betriebsbereichen ist die Einhaltung des Betriebsbereichs bei Verwendung einer ertragreichen Alge deutlich anspruchsvoller und unter Umständen nicht zu gewährleisten.

8 Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Produktion von Algen im großindustriellen Maßstab möglich ist. Die Versorgung der Algenponds mit dem von den Algen benötigten CO_2 kann dabei durch einen relativ einfachen Aufbau der CO_2 Zufuhr sichergestellt werden. Wie das Design von sehr großen Algenponds im Detail ausfällt und wie diese mit einem Maximum an Ertrag betrieben werden, muss jedoch erst noch im Detail geklärt werden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell kann dabei als Werkzeug benutzt werden, um verschiedene Pondgeometrien und Betriebsweisen vorab zu testen, so dass die Anzahl an notwendigen Experimenten minimiert wird. Besonders bei sehr großen Algenponds treten auf Grund der sehr langen Kanäle und den damit verbundenen langen Umlaufzeiten des Pondwassers in Verbindung mit dem Tag-/Nachtwechsel Effekte auf, deren Klärung im Detail allein durch Experimente schwierig ist. Das Simulationsmodell kann dabei helfen, das Verhalten von Algenponds besser zu verstehen und die Algen letztendlich effizienter zu kultivieren. Zudem können mit dem Simulationsmodell vorab Standorte auf ihre Eignung für den Betrieb von Algenponds untersucht werden, wenn für den jeweiligen Standort entsprechende Wetterdaten zur Verfügung stehen.

Das Simulationsmodell berücksichtigt alle physikalischen Effekte, die zur Beschreibung eines offenen Algenponds nötig sind und liefert nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Ergebnisse. Trotzdem können beim Betrieb eines Algenponds weitere, noch nicht berücksichtigte Effekte auftreten, die für eine zukünftige Verwendung des Modells jedoch implementiert werden können, um dessen Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen. Als Beispiel sei die Verschmutzung oder Versandung eines Algenponds genannt, die dessen Betriebsverhalten deutlich beeinflussen kann. Insbesondere ist davon auszugehen, dass die Effizienz der CO_2 Zufuhr durch die Versandung der Sümpfe deutlich abnimmt. Die allmähliche Ablagerung von Kalk im Algenpond auf Grund der Verdunstung des Wassers und dessen Ausgleich durch einen meist kalkhaltigen Makeup-Strom ist ebenfalls ein Prozess, um den das Simulationsmodell für weitere Untersuchungen erweitert werden kann.

In dieser Arbeit wurde der Einfluss der Alkalinität des Pondwassers auf das Verhalten von Algenponds im Rahmen einer Parameterstudie untersucht. Bei der Untersuchung der CO_2 Zufuhr von großen offenen Algenponds zeigt sich, dass bei einer sehr aktiven Alge der pH -Wert nicht immer im gewünschten Bereich gehalten werden kann. Es ist noch offen, in welchem Maße durch eine Erhöhung der Alkalinität der Einfluss der Zu- oder Entnahme von CO_2 auf den pH -Wert gedämpft werden kann. Es ist zu erwarten, dass ein Algenpond, der mit einer sehr aktiven Alge betrieben wird, bei einer ausreichend hohen Alkalinität auch kleine Betriebsbereiche des pH -Wertes erfüllen kann.

Für die CO₂ Zufuhr von großen Algenponds wird in dieser Arbeit ein Konzept mit einem Proportional-Regler verwendet. Mit diesem Konzept ist die Versorgung der Algenponds mit ausreichend CO₂ möglich, jedoch sind auch weitere Konzepte denkbar. In zukünftigen Untersuchungen können dabei sowohl andere Regelalgorithmen als auch ein komplett anderer Aufbau der CO₂ Zufuhr untersucht werden.

Im Bereich der Produktion von Algen in offenen Algenponds sind noch längst nicht alle Fragen geklärt und es wird in den nächsten Jahren sicherlich noch viele neue Erkenntnisse geben. Trotzdem traut sich der Autor dieser Arbeit zu schon jetzt zu behaupten, dass Algen ein vielversprechender Baustein für eine nachhaltige Energieversorgung der Zukunft sind.

A Herleitung der optimalen Algenkonzentration

In diesem Abschnitt wird die optimale Algenkonzentration C_{Alge}^{opt} für das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* aus Abschnitt 4.6.2 hergeleitet. Das Algenwachstum \dot{M}_{Algae} wird dabei wie folgt beschrieben:

$$\dot{M}_{Alge} = \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \mu \cdot A_{Pond} \cdot C_{Alge} dl. \quad (A.1)$$

Die Pondoberfläche A_{Pond} ist eine konstante geometrische Größe und kann damit vor das Integral gezogen werden. Mit dem flächenspezifischen Massenfluss \dot{m}_{Alge} ergibt sich:

$$\dot{m}_{Alge} = \frac{\dot{M}_{Alge}}{A_{Pond}} = \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \mu \cdot C_{Alge} dl. \quad (A.2)$$

Die Konzentration der Alge ist optimal, wenn das Algenwachstum \dot{m}_{Alge} sein Maximum erreicht. Um dieses Maximum zu bestimmen wird die Funktion von \dot{m}_{Alge} abgeleitet:

$$\frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} = \frac{d}{dC_{Alge}} \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \mu \cdot C_{Alge} dl. \quad (A.3)$$

Ersetzt man die Wachstumsrate μ durch die Gleichung (4.64) des Algenwachstumsmodells für *Spirulina platensis* und den darin enthaltenen Lichtfaktor F_{Licht} durch Gleichung (4.59) und (4.18)¹ erhält man:

$$\frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} = \frac{d}{dC_{Alge}} \int_{l=0}^{l=l_{Depth}} \left[\mu_{max} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Algae} \cdot l} \right) \cdot F_{Temp} - \mu_{Death} \right] \cdot C_{Algae} dl. \quad (A.4)$$

¹ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für das Algenwachstumsmodell für *Spirulina platensis* der erste Faktor K_{e1} zu null gesetzt wird.

Gemäß der Leibniz-Regel werden der Differential- und Integraloperator vertauscht und dann die Differentiation im Integral ausgewertet:

$$\frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} = \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \frac{d}{dC_{Alge}} \left[\mu_{max} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) \cdot F_{Temp} - \mu_{Death} \right] \cdot C_{Alge} dl \quad (A.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} &= \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \mu_{max} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) \cdot F_{Temp} - \mu_{Death} \dots \\ &\quad + C_{Alge} \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \left[1 - \left[\tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) \right]^2 \right] \dots \\ &\quad \frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \cdot (-K_{e2}) \cdot l dl. \end{aligned} \quad (A.6)$$

Eine Umsortierung der Terme führt zu:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} &= \int_{l=0}^{l=l_{Tiefe}} \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) \dots \\ &\quad + l \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \left[1 - \left[\tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) \right]^2 \right] \dots \\ &\quad \frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \cdot (-K_{e2}) \cdot C_{Alge} - \mu_{Death} dl. \end{aligned} \quad (A.7)$$

Im Anschluss an die Differentiation führt die bestimmte Integration zu folgender Form:

$$\frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} = \left[l \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l} \right) - l \cdot \mu_{Death} \right]_{l=0}^{l=l_{Tiefe}}. \quad (A.8)$$

Nach Einsetzen der Integrationsgrenzen erhält man:

$$\frac{d\dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}} = l_{Tiefe} \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l_{Tiefe}} \right) - l_{Tiefe} \cdot \mu_{Death}. \quad (A.9)$$

Am Maximum des Algenwachstums ist die erste Ableitung der Funktion, die das Algenwachstum beschreibt, gleich null. Dadurch ist ein Ausdruck für die optimale Algenkonzentration C_{Alge}^{opt} gefunden:

$$\left. \frac{d\dot{m}_{Algae}}{dC_{Alge}} \right|_{C_{Alge}=C_{Alge,Opt}} = 0 \quad (A.10)$$

$$C_{Alge,Opt} = - \frac{\ln \left(\frac{I_k}{0.5 \cdot I_0} \cdot \operatorname{atanh} \frac{\mu_{Death}}{F_{Temp} \cdot \mu_{max}} \right)}{K_{e2} \cdot l_{Tiefe}}. \quad (A.11)$$

Um zu überprüfen, ob das Algenwachstum bei C_{Alge}^{opt} wirklich maximiert ist, wird die zweite Ableitung für diesen Punkt bestimmt.

$$\frac{d^2 \dot{m}_{Alge}}{dC_{Alge}^2} = \frac{d}{dC_{Alge}} \left[l_{Tiefe} \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l_{Tiefe}} \right) - l_{Tiefe} \cdot \mu_{Death} \right] \quad (A.12)$$

$$= (l_{Tiefe})^2 \cdot \mu_{max} \cdot F_{Temp} \cdot \frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l_{Tiefe}} \cdot K_{e2} \cdot \dots \left[\left[\tanh \left(\frac{0.5 \cdot I_0}{I_k} \cdot e^{-K_{e2} \cdot C_{Alge} \cdot l_{Tiefe}} \right) \right]^2 - 1 \right]. \quad (A.13)$$

Mit Ausnahme von $\left[\left[\tanh(\dots) \right]^2 - 1 \right]$ sind alle Multiplikationsterme in diesem Ausdruck größer als null. Der Term $\left[\left[\tanh(\dots) \right]^2 - 1 \right]$ ist immer kleiner als null. Folglich ist die zweite Ableitung des Algenwachstums an der Stelle C_{Alge}^{opt} kleiner null. Dadurch ist gezeigt, dass das Algenwachstum bei einer Konzentration C_{Alge}^{opt} ein Maximum erreicht.

Tabellenverzeichnis

3.1	Überblick der veröffentlichten Simulationsmodelle	8
5.1	Standort und Eigenschaften des experimentellen Algenponds	42
5.2	Feste Parameter des Algenwachstumsmodells	43
5.3	Angepasste Parameter des Algenwachstumsmodells für <i>Spirulina platensis</i>	44
6.1	Einfluss der Anzahl ans CSTRs und des Zeitschritts auf den Ertrag Y und die C-Fixierungseffizienz CFE (Werte gemittelt über den Monat) .	50
6.2	Numerische Einstellungen	55
6.3	Pondgeometrie, Eigenschaften der Strömung und Eigenschaften des Pond- wassers	55
6.4	Eigenschaften der Begasung	56
6.5	Parameter des generischen Algenwachstumsmodells	56
6.6	Untersuchte Standorte	57
7.1	Pondgeometrien und Strömungseigenschaften	82
7.2	Eigenschaften der CO_2 Zufuhr	84
7.3	Maximaler Volumenstrom $\sum \dot{V}_{CO_2}^{max}$ der CO_2 Zufuhr des Algenponds . .	85
7.4	Position der Einspeisepunkte für den 2.2 acre-Pond und den 10 acre-Pond.	86

Abbildungsverzeichnis

4.1	Beispiel eines Algenponds	10
4.2	Abmessungen eines Algenponds	11
4.3	Einfluss der Konzentration der Alge auf die gesamte Wachstumsrate der Alge und die Wachstumsrate am Boden für zwei verschiedene Lichtintensitäten $I_0 = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und $I_0 = 750 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ an der Wasseroberfläche, Temperatur $T = 30^\circ\text{C}$, Wassertiefe $l_{\text{Tiefe}} = 0.3 \text{ m}$	28
5.1	Schema des Simulationsmodells	32
5.2	Örtliche Diskretisierung eines Algenponds mit 12 CSTRs	33
5.3	Vergleich des Ertrags der Simulation und im Experiments von JIMÉNEZ ET AL. 2003b von Oktober 1997 bis Juli 1998	45
5.4	Vergleich der Konzentration der Alge der Simulation und im Experiment von JIMÉNEZ ET AL. 2003b	47
5.5	Vergleich der Temperatur des Pondwassers der Simulation und im Experiment von JIMÉNEZ ET AL. 2003b	47
6.1	Einfluss verschiedener Startwerte der Konzentration der Alge auf die Simulation eines Algenponds in Las Cruces (USA) für April 2013 (Werte gemittelt über 15 min)	51
6.2	Verlauf von Wachstumsrate der Alge, CO_2 -Feedstrom und pH -Wert über 24 h für den kontinuierlichen Basisfall (Werte gemittelt über 15 min)	59
6.3	Verlauf von Ertrag und Konzentration der Algen über die ersten 30 Tage des diskontinuierlichen Basisfalls	60
6.4	Ertrag des Algenponds in Abhängigkeit von Standort und Betriebsmonat; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	61
6.5	C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von Standort und Betriebsmonat; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	62
6.6	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Wassertiefe; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	64
6.7	Konzentration der Alge in Abhängigkeit von der Wassertiefe; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	65
6.8	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit des pH -Wertes; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	67

6.9	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Alkalinität; Werte für den kontinuierlichen (kont.) und diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	68
6.10	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Ernterate; Werte für den kontinuierlichen (kont.) Betrieb	70
6.11	Konzentration der Alge in Abhängigkeit von der Ernterate; Werte für den kontinuierlichen (kont.) Betrieb	70
6.12	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Startkonzentration der Alge; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	72
6.13	Betriebszeit und Endkonzentration der Alge in Abhängigkeit von der Startkonzentration der Alge; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	72
6.14	Ertrag und C-Fixierungseffizienz des Algenponds in Abhängigkeit von der Rüstzeit; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	74
6.15	Betriebszeit und Endkonzentration der Alge in Abhängigkeit von der Rüstzeit; Werte für den diskontinuierlichen (diskont.) Betrieb	75
6.16	Ertrag und C-Fixierungseffizienz der Basis-Fälle und optimierten Fälle	76
7.1	Örtliche Diskretisierung eines Algenponds mit 12 CSTRs und pH -Regelung	81
7.2	Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom \dot{V}_{CO_2} der CO_2 Zufuhr und dem pH -Wert	85
7.3	Verlauf des pH -Werts entlang des Kanals des Algenponds zu vier verschiedenen Zeiten; Ergebnisse des Standard-Falls 10 acre-Pond (Hohertrags-Alge, 2 Einspeisepunkte) für den 1. Juli 2013	89
7.4	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (Standard-Fall)	90
7.5	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (Standard-Fall)	91
7.6	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (engerer Betriebsbereich des pH -Wertes)	93
7.7	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (engerer Betriebsbereich des pH -Wertes)	93
7.8	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 2.2 acre-Pond (niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes)	95
7.9	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den minimalen und maximalen pH -Wert im 10 acre-Pond (niedrigerer Betriebsbereich des pH -Wertes)	96
7.10	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 2.2 acre-Pond (Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum)	97
7.11	Einfluss der Anzahl an Einspeisepunkten auf den Ertrag und den mittleren pH -Wert im 10 acre-Pond (Standard-Fall mit pH -abhängigem Algenwachstum)	98

Literatur

BAKIRCI 2009

BAKIRCI, K.: *Estimation of Solar Radiation by Using ASHRAE Clear-Sky Model in Erzurum, Turkey*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 31.3 (2009), S. 208–216. ISSN: 1556-7036. DOI: 10.1080/15567030701522534.

BARTOSH & BANKS 2007

BARTOSH, Y. ; BANKS, C.: *Algal growth response and survival in a range of light and temperature conditions: implications for non-steady-state conditions in waste stabilisation ponds*. Water Science & Technology 55.11 (2007), S. 211. DOI: 10.2166/wst.2007.365.

BENEMANN & OSWALD 1996

BENEMANN, J. R. ; OSWALD, W. J.: *Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass. Final report*. 1996. DOI: 10.2172/493389.

BERNARD ET AL. 2016

BERNARD, O. ; MAIRET, F. ; CHACHUAT, B.: *Modelling of Microalgae Culture Systems with Applications to Control and Optimization*. Advances in biochemical engineering/biotechnology 153 (2016), S. 59–87. ISSN: 0724-6145. DOI: 10.1007/10_{ }2014_{ }287.

BOROWITZKA & MOHEIMANI 2013

BOROWITZKA, M. A. ; MOHEIMANI, N. R.: *Algae for Biofuels and Energy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. ISBN: 978-94-007-5478-2. DOI: 10.1007/978-94-007-5479-9.

BUHR & MILLER 1983

BUHR, H. ; MILLER, S.: *A dynamic model of the high-rate algal-bacterial wastewater treatment pond*. Water Research 17.1 (1983), S. 29–37. ISSN: 00431354. DOI: 10.1016/0043-1354(83)90283-X.

CHAPRA 2008, c1997

CHAPRA, S. C.: *Surface water-quality modeling*. Long Grove und Ill: Waveland Press, 2008, c1997. ISBN: 1577666054.

CORNET ET AL. 1992a

CORNET, J. F. ; DUSSAP, C. G. ; CLUZEL, P. ; DUBERTRET, G.: *A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: II. Identification of kinetic parameters under light and mineral limitations*. Biotechnology and Bioengineering 40.7 (1992), S. 826–834. ISSN: 0006-3592. DOI: 10.1002/bit.260400710.

CORNET ET AL. 1992b

CORNET, J. F. ; DUSSAP, C. G. ; DUBERTRET, G.: *A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: I. Coupling between light transfer and growth kinetics*. Biotechnology and Bioengineering 40.7 (1992), S. 817–825. ISSN: 0006-3592. DOI: 10.1002/bit.260400709.

CORNET ET AL. 1994

CORNET, J. F. ; DUSSAP, C. G. ; GROS, J. B.: *Conversion of radiant light energy in photobioreactors*. AIChE Journal 40.6 (1994), S. 1055–1066. ISSN: 0001-1541. DOI: 10.1002/aic.690400616.

COURANT ET AL. 1928

COURANT, R. ; FRIEDRICHS, K. ; LEWY, H.: *Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik*. Mathematische Annalen 100.1 (1928), S. 32–74. ISSN: 0025-5831. DOI: 10.1007/BF01448839.

DAVIS ET AL. 2016

DAVIS, R. ; MARKHAM, J. ; KINCHIN, C. ; GRUNDL, N. ; TAN, E. C. ; HUMBIRD, D.: *Process Design and Economics for the Production of Algal Biomass: Algal Biomass Production in Open Pond Systems and Processing Through Dewatering for Downstream Conversion*. Hrsg. von NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. 2016. DOI: 10.2172/1239893.

DIAMOND ET AL. 2013

DIAMOND, H. J. ; KARL, T. R. ; PALECKI, M. A. ; BAKER, C. B. ; BELL, J. E. ; LEEPER, R. D. ; EASTERLING, D. R. ; LAWRIK, J. H. ; MEYERS, T. P. ; HELFERT, M. R. ; GOODGE, G. ; THORNE, P. W.: *U.S. Climate Reference Network after One Decade of Operations: Status and Assessment*. Bulletin of the American Meteorological Society 94.4 (2013), S. 485–498. ISSN: 0003-0007. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00170.1.

DICKSON ET AL. 2007

DICKSON, A. G. ; SABINE, C. L. ; CHRISTIAN, J. R.: *Guide to best practices for ocean CO₂ measurements*. PICES Special Publication 3 (2007), 191 pp.

DUFFIE & BECKMAN 1980

DUFFIE, J. A. ; BECKMAN, W. A.: *Solar engineering of thermal processes*. A Wiley-Interscience publication. New York: Wiley, 1980. ISBN: 0471050660. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0608/80013297-d.html>.

EL OUARGHI ET AL. 2000

EL OUARGHI, H. ; BOUMANSOUR, B. E. ; DUFAYT, O. ; EL HAMOURI, B. ; VASEL, J. L.: *Hydrodynamics and oxygen balance in a high-rate algal pond*. Water science and technology 42.10-11 (2000), S. 349–356. ISSN: 190022237X.

HECHT 1987

HECHT, E.: *Optics*. 2. ed. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1987. ISBN: 0-201-11609-X.

HUESEMANN ET AL. 2016

HUESEMANN, M. ; CROWE, B. ; WALLER, P. ; CHAVIS, A. ; HOBBS, S. ; EDMUNDSON, S. ; WIGMOSTA, M.: *A validated model to predict microalgae growth in outdoor pond cultures subjected to fluctuating light intensities and water temperatures*. Algal Research 13 (2016), S. 195–206. ISSN: 22119264. DOI: 10.1016/j.algal.2015.11.008.

IOC ET AL. 2010

IOC ; SCOR ; IAPSO: *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. 56. Manuals and Guides. UNSECO, 2010.

JAMES & BORIAH 2010

JAMES, S. C. ; BORIAH, V.: *Modeling Algae Growth in an Open-Channel Raceway*. Journal of Computational Biology 17.7 (2010), S. 895–906. ISSN: 1066-5277. DOI: 10.1089/cmb.2009.0078.

JAYARAMAN & RHINEHART 2015

JAYARAMAN, S. K. ; RHINEHART, R. R.: *Modeling and Optimization of Algae Growth*. Industrial & Engineering Chemistry Research 54.33 (2015), S. 8063–8071. ISSN: 0888-5885. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b01635.

JIMÉNEZ ET AL. 2003a

JIMÉNEZ, C. ; COSSIO, B. R. ; LABELLA, D. ; XAVIER NIELL, F.: *The Feasibility of industrial production of Spirulina (Arthrospira) in Southern Spain*. Aquaculture 217.1-4 (2003), S. 179–190. ISSN: 00448486. DOI: 10.1016/S0044-8486(02)00118-7.

JIMÉNEZ ET AL. 2003b

JIMÉNEZ, C. ; COSSIO, B. R. ; XAVIER NIELL, F.: *Relationship between physico-chemical variables and productivity in open ponds for the production of Spirulina: a predictive model of algal yield*. *Aquaculture* 221.1-4 (2003), S. 331–345. ISSN: 00448486. DOI: 10.1016/S0044-8486(03)00123-6.

JOHNSON 2010

JOHNSON, M. T.: *A numerical scheme to calculate temperature and salinity dependent air-water transfer velocities for any gas*. *Ocean Sci* 6.4 (2010), S. 913–932.

JUPSIN ET AL. 2003

JUPSIN, H. ; PRAET, E. ; VASEL, J. L.: *Dynamic mathematical model of high rate algal ponds (HRAP)*. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research* 48.2 (2003), S. 197. ISSN: 0273-1223.

KIEHL & TRENBERTH 1997

KIEHL, J. T. ; TRENBERTH, K. E.: *Earth's Annual Global Mean Energy Budget*. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78.2 (1997), S. 197–208. ISSN: 0003-0007. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<3C0197:EAGMEB>3E2.0.CO;2.

KURANO & MIYACHI 2005

KURANO, N. ; MIYACHI, S.: *Selection of microalgal growth model for describing specific growth rate-light response using extended information criterion*. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 100.4 (2005), S. 403–408. ISSN: 13891723. DOI: 10.1263/jbb.100.403.

LEDUY & THERIEN 1977

LEDUY, A. ; THERIEN, N.: *An improved method for optical density measurement of the semimicroscopic blue green alga Spirulina maxima*. *Biotechnology and Bioengineering* 19.8 (1977), S. 1219–1224. ISSN: 0006-3592. DOI: 10.1002/bit.260190812.

LUEKER ET AL. 2000

LUEKER, T. J. ; DICKSON, A. G. ; KEELING, C. D.: *Ocean pCO₂ calculated from dissolved inorganic carbon, alkalinity, and equations for K₁ and K₂: validation based on laboratory measurements of CO₂ in gas and seawater at equilibrium*. *Marine Chemistry* 70.1-3 (2000), S. 105–119. ISSN: 03044203. DOI: 10.1016/S0304-4203(00)00022-0.

LUNDQUIST ET AL. 2010

LUNDQUIST, T. ; WOERTZ, I. ; QUINN, N. ; BENEMANN, J.: *A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production*. Hrsg. von ENERGY BIOSCIENCES INSTITUTE REPORT. 2010.

MALEK ET AL. 2016

MALEK, A. ; ZULLO, L. C. ; DAOUTIDIS, P.: *Modeling and Dynamic Optimization of Microalgae Cultivation in Outdoor Open Ponds*. Industrial & Engineering Chemistry Research 55.12 (2016), S. 3327–3337. ISSN: 0888-5885. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b03209.

MILLER & BUHR 1981

MILLER, S. B. ; BUHR, H. O.: *Mixing characteristics of a high-rate algae pond*. Water SA 7.1 (1981).

MILLERO 1995

MILLERO, F. J.: *Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans*. Geochimica et Cosmochimica Acta 59.4 (1995), S. 661–677. ISSN: 00167037. DOI: 10.1016/0016-7037(94)00354-0.

MOHEIMANI ET AL. 2015

MOHEIMANI, N. R. ; MCHENRY, M. P. ; BOER, K. de ; BAHRI, P. A.: *Biomass and Biofuels from Microalgae*. 2. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN: 978-3-319-16639-1. DOI: 10.1007/978-3-319-16640-7.

NAYAR ET AL. 2016

NAYAR, K. G. ; SHARQAWY, M. H. ; BANCHIK, L. D. ; LIENHARD V, J. H.: *Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence*. Desalination 390 (2016), S. 1–24. ISSN: 00119164. DOI: 10.1016/j.desal.2016.02.024.

OGBONDA ET AL. 2007

OGBONDA, K. H. ; AMINIGO, R. E. ; ABU, G. O.: *Influence of temperature and pH on biomass production and protein biosynthesis in a putative Spirulina sp.* Bioresource technology 98.11 (2007), S. 2207–2211. ISSN: 0960-8524. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.08.028.

OLIVEIRA ET AL. 1999

OLIVEIRA, M. d. ; MONTEIRO, M. ; ROBBS, P. G. ; LEITE, S.: *Growth and Chemical Composition of Spirulina Maxima and Spirulina Platensis Biomass at Different Temperatures*. Aquaculture International 7.4 (1999), S. 261–275. ISSN: 09676120. DOI: 10.1023/A:1009233230706.

PACHAURI & MAYER 2015

PACHAURI, R. K. ; MAYER, L., Hrsg.: *Climate change 2014: Synthesis report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015. ISBN: 978-92-9169-143-2.

PARTINGTON 1949

PARTINGTON, J. R.: *An advanced treatise on physical chemistry: [in 5 volumes]*. London: Longmans Green and Co, 1949.

RAOOF ET AL. 2006

RAOOF, B. ; KAUSHIK, B. D. ; PRASANNA, R.: *Formulation of a low-cost medium for mass production of Spirulina*. Biomass and Bioenergy 30.6 (2006), S. 537–542. ISSN: 09619534. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.09.006.

RARREK ET AL. 2016

RARREK, A. ; MOSTERTZ, M. ; KISTENMACHER, H. ; REHFELDT, S. ; KLEIN, H.: *Simulation and optimization of large open algae ponds*. Chemical Engineering Research and Design 114 (2016), S. 220–235. ISSN: 02638762. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.08.018.

SANDER 2015

SANDER, R.: *Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent*. Atmospheric Chemistry and Physics 15.8 (2015), S. 4399–4981. ISSN: 1680-7324. DOI: 10.5194/acp-15-4399-2015.

SARTORI 1996

SARTORI, E.: *Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviors*. Solar Energy 56.2 (1996), S. 199–206. ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/0038-092X(95)00094-8.

SATEL-LIGHT 2016

SATEL-LIGHT: *The European Database of Daylight and Solar Radiation*. URL: <http://www.satellight.com> (besucht am 04.11.2016).

SCHERER ET AL. 2012

SCHERER, V. ; STOLTEN, D. ; FRANZ, J. ; RIENSCHKE, E.: *CCS-Abscheidetechniken: Stand der Technik und Entwicklungen*. Chemie Ingenieur Technik 84.7 (2012), S. 1026–1040. ISSN: 0009286X. DOI: 10.1002/cite.201100233.

SCHLÖSSER 1982

SCHLÖSSER, U. G.: *Sammlung von Algenkulturen*. Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft 95.1 (1982), S. 181–276. ISSN: 1438-8677. DOI: 10.1111/j.1438-8677.1982.tb02862.x. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1438-8677.1982.tb02862.x/pdf>.

SHANG ET AL. 2010

SHANG, H. ; SCOTT, J. ; SHEPHERD, S. ; ROSS, G.: *A dynamic thermal model for heating microalgae incubator ponds using off-gas*. Chemical Engineering Science 65.16 (2010), S. 4591–4597. ISSN: 0009-2509. DOI: 10.1016/j.ces.2010.04.042.

SHARQAWY ET AL. 2010

SHARQAWY, M. H. ; LIENHARD, J. H. ; ZUBAIR, S. M.: *Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data*. Desalination and Water Treatment 16.1-3 (2010), S. 354–380. ISSN: 1944-3994. DOI: 10.5004/dwt.2010.1079.

TUTIEMPO NETWORK 2016

TUTIEMPO NETWORK, S.: *Tutiempo Network*. 2016. URL: <http://en.tutiempo.net/malaga-aeropuerto.html> (besucht am 04.11.2016).

UMWELTBUNDESAMT 2016

UMWELTBUNDESAMT: *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016: Nationaler Inventarbericht zu Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014*. Hrsg. von UMWELTBUNDESAMT. 2016.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE SECRETARIAT 1997

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE SECRETARIAT: *1997 Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Kyoto Protocol*. 1997.

U.S. CLIMATE REFERENCE NETWORK 2016-02-02

U.S. CLIMATE REFERENCE NETWORK. 2016-02-02. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/crn/> (besucht am 02.02.2016).

VONSHAK 1997

VONSHAK, A., Hrsg.: *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. London u.a.: Taylor & Francis, 1997. ISBN: 0-7484-0674-3.

WATSON 2009

WATSON, M. K.: *Growth and Modeling of Freshwater Algae as a Function of Media Inorganic Carbon Content*. Diss. Clemson University, 2009.

WEISS 1974

WEISS, R.: *Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas*. Marine Chemistry 2.3 (1974), S. 203–215. ISSN: 03044203. DOI: 10.1016/0304-4203(74)90015-2.

WITTEN ET AL. 2011

WITTEN, I. H. ; FRANK, E. ; HALL, M. A.: *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*. 3. ed. /Morgan Kaufmann series in data management systems]. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2011. ISBN: 978-0-12-374856-0. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10525052>.

XIN ET AL. 2011

XIN, L.; HONG-YING, H.; YU-PING, Z.: *Growth and lipid accumulation properties of a freshwater microalga Scenedesmus sp. under different cultivation temperature*. Bioresource technology 102.3 (2011), S. 3098–3102. ISSN: 0960-8524. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.055.

YADALA & CREMASCHI 2016

YADALA, S.; CREMASCHI, S.: *A Dynamic Optimization Model for Designing Open-Channel Raceway Ponds for Batch Production of Algal Biomass*. Processes 4.2 (2016), S. 10. ISSN: 2227-9717. DOI: 10.3390/pr4020010.

YANG 2011

YANG, A.: *Modeling and Evaluation of CO₂ Supply and Utilization in Algal Ponds*. Industrial & Engineering Chemistry Research 50.19 (2011), S. 11181–11192. ISSN: 0888-5885. DOI: 10.1021/ie200723w.

ZARROUK ET AL. 1968

ZARROUK, C.; CLEMENT, G.; REBELLER, M.: »Method of culturing algae in an artificial medium«. US 3403471 A. 1968. URL: <https://www.google.com/patents/US3403471>.

ZEEBE & WOLF-GLADROW 2001

ZEEBE, R. E.; WOLF-GLADROW, D. A.: *CO₂ in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes*. 65. Elsevier oceanography series. Amsterdam, New York: Elsevier, 2001. ISBN: 0444509461.

ZHANG ET AL. 2007

ZHANG, D.; DEEN, N. G.; KUIPERS, J. A. M.: *Numerical modeling of hydrodynamics, mass transfer and chemical reaction in bubble columns*. 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF. 2007. URL: <http://doc.utwente.nl/68807/>.