



Facharbeit

Blualgen als alternative Proteinquelle im hydroponischen Anbau.

Verfasser:

Paul Ninnemann

14. April 2023

Klasse UT 21

Berufliche Schule Bautechnik (BS08)

Fachschule Umweltschutztechnik

Wendenstraße 166, 20537 Hamburg

Erstprüfer: Peter Corleis

Zweitprüfer: Elina Langbehn



Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis	
II. Tabellenverzeichnis	
1. Einleitung	2
2. Mangelernährung	3
2.1 quantitative Mangelernährung	3
2.2 qualitative Mangelernährung	3
2.3 Folgen einer Mangelernährung	3
3. Blaualgen als Nahrungsmittel	4
3.1 Was sind Blaualgen?	4
3.2 Spirulina	4
3.2.1 Aminosäuren	5
3.2.2 Zusammenfassung	5
4. Experimenteller hydroponischer Anbau von Spirulina	6
4.1 Zielstellung des Experimentes	6
4.1.1 Szenarien	6
4.2 Variablen	7
4.3 Beschreibung des Versuchsaufbaues	9
4.3.1 Unterteil	9
4.3.2 Oberteil	9
4.4 Nährstoffkonzentrat	10
4.5 Startkultur	11
4.6 Beschreibung der Durchführung eines Szenarios	12
4.6.1 Abfiltern der Spirulina	12
4.6.2 Ansatz einer Startkultur	13
4.6.3 Bestimmung der Algendichte	13
4.8 Auswertung der Ergebnisse	14
4.9 Fehlerbetrachtung	15
5. Hochrechnung	16
6. Vergleich zu anderen pflanzlichen Proteinquellen	17
7. Abschlussbetrachtung	18
8. Literaturverzeichnis	19
III. Anhang	
Eidesstattliche Erklärung	

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung oben	Zuchtbecken in Nariokotome (modifiziert) (Quelle: Thriving Green)	Deckblatt
Abbildung unten	Spirulina Algen (modifiziert) (Quelle: iStock)	Deckblatt
Abbildung 1	Geschätzte Anzahl der unterernährten Menschen (modifiziert) (Quelle: statista)	2
Abbildung 2	Abnahme Lichtintensität mit zunehmender Tiefe (Quelle: eigene Abbildung)	8
Abbildung 3	Diagramm Algendichte (Quelle: eigene Abbildung)	14

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Ein- und Ausschaltdauer für Beleuchtung, Belüftung und Zirkulation (Quelle: eigene Tabelle)	10
Tabelle 2	Zusammensetzung Nährstoffkonzentrat (Quelle: eigene Tabelle)	11
Tabelle 3	Proteinquellen Vergleich (Quelle: eigene Tabelle)	17

1. Einleitung

Laut dem Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung wird die Weltbevölkerung bis Ende 2060 auf über 10 Milliarden Menschen wachsen.¹ Das wirkt sich nachhaltig auf die Nahrungsmittelversorgung aus. Neben der wachsenden Weltbevölkerung gefährden auch der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur, die Häufung von Wetterextremen, wie Dürren oder Starkregen und der Anstieg des Meeresspiegels durch das Abschmelzen der Polkappen, die ausreichende Nahrungsmittelversorgung in vielen Regionen unserer Erde. Doch die Nahrungsmittelversorgung wird nicht nur durch umwelttechnische Faktoren beeinflusst, sondern auch durch geopolitische. Seit der Invasion der Ukraine durch Russland ist zum Beispiel der Export von Getreide aus der Ukraine nach Ländern wie Eritrea, Somalia und dem Jemen gestört.² Das verschärft die bereits angespannte Lage der Nahrungsmittelversorgung in diesen Ländern. Die Weltgemeinschaft hat im Jahr 2015 in der Agenda 2030 festgelegt, dass wir bis zum Jahr 2030 eine Ernährungssicherheit auf der ganzen Welt erreichen werden!³ Doch von diesem Ziel entfernen wir uns aktuell wieder, seit 2015 steigt die Anzahl der unterernährten Menschen auf der Welt.⁴

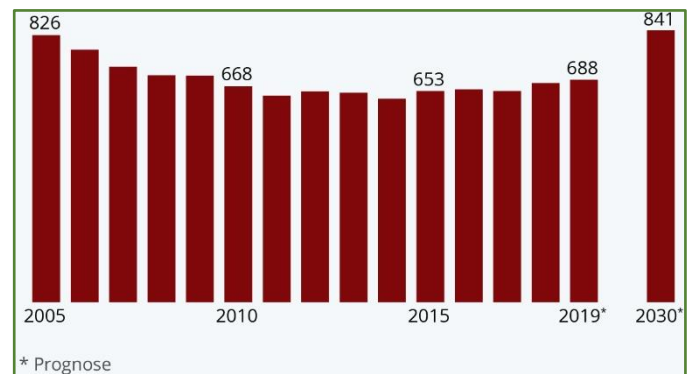


Abbildung 1: Geschätzte Anzahl der unterernährten Menschen (in Mio.) (modifiziert) (Quelle: statista)

Diese Facharbeit behandelt die mögliche Nutzung von Blaualgen als Proteinquelle. Dabei ist die These, dass der Anbau von Blaualgen eine Möglichkeit ist, eine nachhaltige Proteinquelle zu bieten und das vor allem in Gebieten, in denen keine ausreichende Viehwirtschaft möglich ist.

Um diese These zu stützen, wird eine Versuchsreihe in einem eigens erstellten Bioreaktor durchgeführt. Die Versuchsreihe soll dabei ermitteln, wie sich das Algenwachstum bei unterschiedlichen Umgebungsfaktoren verhält.

Das Ziel dieser Facharbeit ist es, einen skalierbaren Algenreaktor zu entwickeln, um festzustellen wieviel Fläche benötigt wird, um eine Person mit dem Tagesbedarf an Protein zu versorgen. Die Ergebnisse werden mit anderen Proteinquellen verglichen.

¹ vgl. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung | Bevölkerungszahl und ihr Wachstum (2019) | [bib.bund.de](https://www.bib.bund.de)

² vgl. ntv | Angriff auf Ukraine hat bestehende Hungersnot verschärft (2023) | [n-tv.de](https://www.n-tv.de)

³ vgl. Bundesregierung | Ernährungssicherheit (2022) | [bundesregierung.de](https://www.bundesregierung.de)

⁴ vgl. Statista | Der Hunger auf der Welt wird wieder größer (2020) | [de.statista.com](https://www.de.statista.com)

2. Mangelernährung

Eine Mangelernährung kann nicht nur durch zu geringe Aufnahme von Nahrung, sondern auch durch eine zu einseitige Ernährung entstehen. Deshalb wird diese in eine quantitative oder qualitative Mangelernährung unterschieden.

2.1 quantitative Mangelernährung

Bei der quantitativen Mangelernährung ist die Aufnahme an Energie durch die Nahrung zu gering. Diese Form der Mangelernährung wird auch als Unterernährung bezeichnet.

„768 Millionen Menschen weltweit galten im Jahr 2021 als unterernährt.“⁵

Als unterernährt zählt man, wenn die Aufnahme an Energie nicht ausreicht, um das Körpergewicht zu halten. Dabei werden 2100 kcal pro Tag von der WHO als Richtwert genutzt. Ab einer Aufnahme von weniger als 1400 kcal spricht man von einer extremen Unterernährung.⁶

2.2 qualitative Mangelernährung

Bei der qualitativen Mangelernährung ist nicht die Aufnahme von ausreichend Energie das Problem, sondern der Mangel an Vitaminen und Mineralstoffen. Diese Form der Mangelernährung wird auch als versteckter Hunger bezeichnet.⁷

Weltweit leiden geschätzt zwei Milliarden Menschen unter qualitativer Mangelernährung.⁸

Die qualitative Mangelernährung tritt nicht nur in Dritte Welt- und Schwellenländern, sondern auch in Erste Welt Ländern auf. Die Ursache liegt meist in einer unausgewogenen Ernährung.

2.3 Folgen einer Mangelernährung

Eine offensichtliche Folge ist Untergewicht, welches bei einer anhaltenden Unterernährung auftritt. Vor allem Kinder und Schwangere sind durch Mangelernährung gefährdet.

Kinder benötigen für ihre körperliche und geistige Entwicklung ausreichend Energie sowie Vitamine und Mineralstoffe. Wenn dies nicht gegeben ist, kommt es zu einer verringerten geistigen und körperlichen Entwicklung.

Der Bedarf an Vitaminen und Mineralstoffen ist bei schwangeren Frauen erhöht. Wenn dieser nicht gedeckt wird, kann das eine geminderte Entwicklung des Ungeborenen bis hin zu Fehlgeburt zur Folge haben.⁹

⁵ Statistisches Bundesamt | Unterernährung Weltweit (2022) | [destatis.de](https://www.destatis.de)

⁶ vgl. Aktion Deutschland Hilft | Hunger, Unter- und Mangelernährung (o.J.) | [aktion-deutschland-hilft.de](https://www.aktion-deutschland-hilft.de)

⁷ vgl. Deutsche Welthungerhilfe e. V. | 8 Mythen über Mangelernährung (2017) | [welthungerhilfe.de](https://www.welthungerhilfe.de)

⁸ vgl. Deutschland-Portal | Verborgener Hunger (2015) | [deutschland.de](https://www.deutschland.de)

⁹ vgl. German Doctors e.V. | Unterernährung in Entwicklungsländern (o.J.) | [german-doctors.de](https://www.german-doctors.de)

3. Blaualgen als Nahrungsmittel

Um das Problem der Mangelernährung in den Griff zu bekommen, werden neue Lösungsansätze benötigt. In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen, warum sich Blaualgen als Lösungsansatz eignen.

3.1 Blaualgen

Der Name Blaualge ist irreführend, da es sich bei Blaualgen nicht um Algen, sondern um Bakterien handelt. In der Wissenschaft werden sie unter dem Namen Cyanobakterien zusammengefasst. Sie unterscheiden sich zu den meisten anderen Bakterien darin, dass sie wie Pflanzen Photosynthese betreiben können.

Um Photosynthese betreiben zu können, enthalten Cyanobakterien den von der Pflanzen-Photosynthese bekannten Farbstoff Chlorophyll. Viele Arten enthalten zusätzlich noch Phycobilisomen. Phycobilisomen ist ein Proteinkomplex und gehört zu den effektivsten natürlich bekannten Lichtsammelstrukturen.¹⁰

Sie kommen vor allem in Süß-, Brack- und Salzwasser vor. Es wird geschätzt, dass Blaualgen ca. 20-30% der weltweiten Kohlendioxidfixierung betreiben.¹¹

Es wird davon ausgegangen, dass Blaualgen im Laufe von 2,4 Milliarden Jahren den Sauerstoff in unserer Atmosphäre produzierten.¹²

Blaualgen haben den Ruf gefährlich zu sein, doch nur ca. 40 der aktuell 1500 bekannten Arten produzieren Toxine, die für den Menschen gefährlich sind.¹³

3.2 Spirulina

Spirulina ist eine Gruppe an Cyanobakterien, es werden 35 Arten unterschieden.¹⁴ Im Laufe der Facharbeit wird die komplette Gruppe nur noch als „Spirulina“ bezeichnet. Spirulina besitzen den Proteinkomplex Phycobilisomen. Dadurch machen Proteine ca. 60% ihrer Trockensubstanz aus. Damit eignen sie sich sehr gut als Proteinlieferant. Durch ein Fehlen der Zellulosewände sind ihre Inhaltsstoffe gut durch den Körper aufnehmbar. Spirulina kommen vor allem in tropischen Gewässern mit hohem Salzgehalt vor z.B. in Afrika, Australien, Südostasien oder Mittelamerika. Dort wurden sie von den indigenen Völkern als Quelle für Protein, Eisen und Vitamin A genutzt.¹⁵

Die in Spirulina enthaltenen Proteine besitzen alle essentiellen Aminosäuren.¹⁶

¹⁰ vgl. Uni Freiburg | Bisher übersehene kleine Proteine in Bakterien (2021) | [uni-freiburg.de](https://www.uni-freiburg.de)

¹¹ vgl. Spektrum | Cyanobakterien (o.J.) | [spektrum.de](https://www.spektrum.de)

¹² vgl. MDR | Wie der Mond und die Blaualgen den Sauerstoff auf die Erde brachten (2021) | [mdr.de](https://www.mdr.de)

¹³ vgl. Spektrum | Cyanobakterien (o.J.) | [spektrum.de](https://www.spektrum.de)

¹⁴ vgl. LUMITOS AG | Spirulina (o.J.) | [bionity.com](https://www.bionity.com)

¹⁵ vgl. Verbraucherzentrale NRW | Spirulina – viel Grün und wenig dahinter (2022) | [verbraucherzentrale.de](https://www.verbraucherzentrale.de)

¹⁶ vgl. AuraNatura | Spirulina – Die blaue Alge und ihre Wirkung (2022) | [auranatura.com](https://www.auranatura.com)

3.2.1 Aminosäuren

Aminosäuren sind die Bausteine, aus denen Proteine bestehen. Durch Aneinanderreihung von unterschiedlichen Aminosäuren stellt der Körper die Proteine her, die er benötigt.

Aktuell sind ca. 270 Aminosäuren bekannt. Davon benötigt der Körper 20, um die biologischen Vorgänge im Körper zu betreiben. Von diesen 20 Aminosäuren können 12 vom Körper selbst gebildet werden. Die restlichen 8 Aminosäuren müssen durch die Nahrung aufgenommen werden.¹⁷

Bei diesen Aminosäuren handelt es sich um Isoleucin, Leucin, Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin, Tryptophan und Valin. Eine Sonderstellung hat dabei Histidin, da es vom Körper nicht in einer ausreichenden Menge hergestellt werden kann. Diese 9 Aminosäuren werden als die essentiellen Aminosäuren bezeichnet.¹⁸

Ein Fehlen der essentiellen Aminosäuren führt zu den oben beschriebenen Folgen einer Mangelernährung.

3.2.2 Zusammenfassung

Spirulina besitzen viel Protein und alle essentiellen Aminosäuren. Das macht sie zu einer wertvollen Proteinquelle, da das Vorhandensein aller essentiellen Aminosäuren sonst nur im tierischen Protein der Fall ist.¹⁹

Sie wachsen vor allem im warmen salzigen Wasser mit einem pH-Wert zwischen 9 und 11.²⁰

Durch den hohen Salzgehalt und den alkalischen pH-Wert ist es dagegen für Schimmelpilze oder viele Algenarten schwer sich anzusiedeln. Dieser Umstand ermöglicht es Spirulina einfach und unter schlechten hygienischen Bedingungen hydroponisch anzubauen. Dadurch eignen sie sich hervorragend als Quelle für Protein und alle essentiellen Aminosäuren. Dies ist vor allem in Regionen, in denen das Bereitstellen von ausreichend tierischem Protein nicht möglich ist, relevant.

¹⁷ vgl. Wassenberg Apotheke | Aminosäuren - Basiswissen einfach erklärt (2021) | [wassenberg-apotheke.de](https://www.wassenberg-apotheke.de)

¹⁸ vgl. eucell | Essentielle Aminosäuren (o.J.) | [eucell.de](https://www.eucell.de)

¹⁹ vgl. Primal State | Essentielle Aminosäuren im Überblick (2020) | [primal-state.de](https://www.primal-state.de)

²⁰ vgl. Neosmart Consulting | Aminosäuren - Basiswissen einfach erklärt (2023) | [zentrum-der-gesundheit.de](https://www.zentrum-der-gesundheit.de)

4. Experimenteller hydroponischer Anbau von Spirulina

„Der Begriff „Hydroponik“ (engl. „hydroponics“) leitet sich aus den griechischen Wörtern „hydro“ (Wasser) und „ponos“ (Arbeit) ab.“²¹ Umgangssprachlich bezeichnet Hydroponik den Anbau von Pflanzen in einer Nährstofflösung ohne Erde. Da es sich bei Spirulina wissenschaftlich gesehen nicht um eine Pflanze handelt, passt diese Definition nicht so ganz. Weil Spirulina aber pflanzenähnliche Eigenschaften besitzen, lange als Algen galten und kein anderer Begriff gefunden werden konnte, wird der Anbau weiterführend als hydroponisch bezeichnet.

4.1 Zielstellung des Experimentes

Das Ziel des Experimentes ist die Ermittlung der Wachstumsraten von Spirulina in vier unterschiedlichen Szenarien. Die Parameter der Szenarien sind so gewählt, dass eine einfache Vergleichbarkeit untereinander möglich ist. Der Versuchsaufbau ist so gewählt, dass er möglichst realitätsnah und skalierbar ist.

Die Wachstumsraten werden mittels der Algendichte ermittelt. Die Belichtungsdauer soll nicht der Sonnenscheindauer, der in dem Szenario beispielhaft genannten Region entsprechen. Die Belichtungsdauer ist normalisiert, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen. Das Probenahme Protokoll ist dem Anhang beigelegt.

4.1.1 Szenarien

Die einzelnen Szenarien unterscheiden sich durch ihre Wassertemperatur und Belichtungsdauer. Dabei stellen die einzelnen Szenarien unterschiedliche Anbaubedingungen dar. Sie werden chronologisch beginnend mit Szenario 1 durchgeführt.

Szenario 1 (8 h Belichtungsdauer und 25 °C Wassertemperatur) hat die schlechtesten Voraussetzungen der vier Szenarien. Es hat eine kurze Belichtungszeit und eine niedrige Wassertemperatur. Die Wachstumsrate sollte in diesem Szenario am geringsten ausfallen. Das Szenario könnte z.B. im Spätsommer in Deutschland spielen, das Wasser ist immer noch warm aber die Tage werden langsam wieder kürzer.

Szenario 2 (16 h Belichtungsdauer und 25 °C Wassertemperatur) hat bessere Voraussetzungen als Szenario 1, da die Belichtungsdauer verdoppelt wurde. Durch die doppelt so lange Belichtungsdauer ist eine Verdopplung der Wachstumsrate zu erwarten, da die Spirulina länger Photosynthese betreiben können. Dieses Szenario könnte z.B. am Anfang des Sommers in Deutschland spielen, die Tage sind lang und das Wasser wird warm.

Szenario 3 (8 h Belichtungsdauer und 35 °C Wassertemperatur) unterscheidet sich zu Szenario 1 und 2 in der Erhöhung der Wassertemperatur.

²¹ Lasse Polsfuss | Einführung in die Hydroponik (2022) | pflanzenfabrik.de

Durch die Erhöhung der Wassertemperatur um 10 K ist mit einer Verdopplung des Wachstums im Vergleich zu Szenario 1 zu rechnen.

Diese Annahme basiert auf der RGT-Regel. Die RGT-Regel besagt, dass sich der Stoffwechsel von Lebewesen bei einer Erhöhung der Umgebungstemperatur um 10 Kelvin verzwei- bis verdreifacht. Dieser Effekt tritt nur in einem bestimmten Temperaturbereich auf und variiert je nach Organismus.²²

Dieses Szenario könnte z.B. in Deutschland im Spätsommer spielen. Um das Wasser auf 35 °C zu erwärmen, könnte Solarthermie genutzt werden. Es könnte aber auch in Kenia an einem bewölkten Tag spielen.

Szenario 4 (16 h Belichtungsdauer und 35 °C Wassertemperatur) hat durch die erhöhte Belichtungsdauer und Wassertemperatur die besten Bedingungen und sollte somit die höchsten Wachstumsraten haben. Dieses Szenario könnte z.B. im Hochsommer in Deutschland bei zusätzlicher Erwärmung des Wassers durch Solarthermie spielen oder an einem normalen wolkenlosen Tag in Kenia.

Nach Abschluss des vierten Szenarios werden Szenario 1 und 4 wiederholt, diese dienen als Doppelbestimmung. Szenario 1 stellt durch die minimale Belichtung und Temperatur das Minimum der zu erwartenden Wachstumsrate aller Szenarien dar. Szenario 4 stellt durch die maximale Belichtung und Temperatur das Maximum der zu erwartenden Wachstumsrate dar. Durch den Sprung vom Szenario 4 zu 1 zu 4 müsste die Wachstumsrate von Maximum zu Minimum zu Maximum springen. Wenn dabei die Werte konstant bleiben, kann davon ausgegangen werden, dass die Werte für Szenario 2 und 3 auch konstant bleiben.

4.2 Variablen

Es gibt unterschiedliche Variablen, die das Wachstum der Spirulina beeinflussen. Die Hauptvariablen sind dabei die Wassertemperatur und die Belichtungsdauer. Diese werden je nach gewünschtem Szenario angepasst. Es gibt aber auch noch weitere Variablen, die das Wachstum der Spirulina beeinflussen. Diese Variablen werden so konstant wie möglich gehalten, um eine Beeinflussung der Wachstumsraten zu minimieren.

Wassermenge

Die Wassermenge im Reaktor beeinflusst die Algendichte. Je weniger Wasser im Reaktor ist, desto höher fällt die Algendichte aus. Diese Variable wird durch regelmäßiges Kontrollieren des Wasserpegels konstant gehalten. Die Wassermenge beträgt 26,5 l.

²² vgl. Studyflix | RGT-Regel (o.J.) | [studyflix.de](https://www.studyflix.de)

Wassertiefe

Die Wassertiefe beeinflusst die Menge an Licht, die jede einzelne Spirulina bekommt. Umso tiefer das Wasser ist, desto mehr Licht wird durch die Spirulina absorbiert. Das bedeutet, dass Spirulina die weiter unten liegen, grundsätzlich weniger Licht abbekommen und somit auch weniger Photosynthese betreiben. Diese Variable wird genauso wie die Wassermenge durch regelmäßiges Kontrollieren des Wasserpegels konstant gehalten. Die Wassertiefe beträgt 38 cm.

Belüftungszeit

Die Belüftungszeit beeinflusst die Konzentration an N_2 und CO_2 im Wasser. Umso länger der Algenreaktor belüftet wird, desto höher ist die Konzentration an N_2 und CO_2 im Wasser. Das beeinflusst wiederum das Wachstum, da mehr CO_2 für die Photosynthese vorhanden ist. Außerdem entsteht durch das Mischen von CO_2 und Wasser Kohlensäure. Diese senkt den pH-Wert des Wassers.

pH-Wert

Der pH-Wert des Wassers beeinflusst das Wachstum indirekt. Ein zu hoher pH-Wert (>11) sorgt für zu alkalische Bedingungen und würde langfristig zu einer stark geminderten Wachstumsrate oder zum Absterben der Spirulina führen. Ein zu niedriger pH-Wert (<9) hätte ähnliche Effekte und würde das Ansiedeln von Schimmelpilzen erleichtern. Der pH-Wert wird mit Indikatorpapier überprüft und durch Zugabe von Natron oder Essigsäure korrigiert. Er wird zwischen einem pH-Wert von 9-10 gehalten.

Nährstoffkonzentration

Die Nährstoffkonzentration des Wassers beeinflusst das Algenwachstum, da ein Fehlen von Nährstoffen eine Reproduktion der Spirulina vermindert oder stoppt. Das Messen der Nährstoffkonzentration ist im Rahmen dieser Facharbeit nicht möglich. Daher wird durch die regelmäßige Zugabe von Nährstoffkonzentrat für ein Überangebot an Nährstoffen gesorgt.

Vitalität

Die Vitalität der Spirulina spiegelt sich ebenso in den Wachstumsraten wider. Wenn ein Teil oder alle Spirulina krank wären, würde dies das Wachstum hemmen. Die Vitalität lässt sich nur indirekt messen. Durch die Doppelbestimmung vom 1. und 4. Szenario lässt sich bei gleichbleibenden Ergebnissen eine Veränderung der Vitalität ausschließen.



Abbildung 2: Abnahme Lichtintensität mit zunehmender Tiefe (Quelle: eigene Abbildung)

4.3 Beschreibung des Versuchsaufbaues

Der komplette Versuch wird in einem extra dafür angefertigten Bioreaktor durchgeführt. Der Bioreaktor lässt sich in ein Ober- und ein Unterteil unterscheiden. Die Basis für den Bioreaktor bildet ein Mülleimer. Dabei ist der Eimer das Unterteil und der Deckel das Oberteil.²³ Der Mülleimer besteht aus weißem Polypropylen (PP) und ist lebensmittelecht.²⁴ Fotos für die Abschnitte 4.3.1 und 4.3.2 sind dem Anhang beigelegt.

4.3.1 Unterteil

Das Unterteil des Reaktors spiegelt im Versuchsaufbau das Zuchtbecken, in dem die Spirulina leben. Es fasst ein maximales Volumen von 42 l. Dadurch, dass das Unterteil aus weißem undurchsichtigen PP besteht, wird der Eintrag von Fremdlicht vermindert.

Der Reaktor verfügt über eine Zirkulationspumpe, die das Algenwasser ca. 2 cm über dem Mülleimerboden ansaugt und durch einen Schlauch von der Rückseite des Behälters zur Vorderseite transportiert. Dort wird es oberhalb des Wasserspiegels in den Reaktor abgegeben. Diese Pumpe soll, die durch Wind und Wärmedifferenzen entstehende Wasserzirkulation widerspiegeln. Der Abstand von 2 cm zum Boden soll verhindern, dass Sedimente aufgewirbelt werden.

4.3.2 Oberteil

Das Oberteil des Reaktors spiegelt im Versuchsaufbau die Umwelteinflüsse, die das Zuchtbecken beeinflussen. Es besteht aus 3 Pflanzenlampen, einer Belüftungspumpe, einem Heizstab und der Steuerung. Die Pflanzenlampen imitieren dabei das Licht der Sonne. Die Belüftungspumpe sorgt für einen stetigen Luftaustausch, somit können die Spirulina CO₂ und N₂ aufnehmen und O₂ wieder abgeben. Der Heizstab erwärmt das Wasser auf die für die Umgebung typische Temperatur. Die Reaktortemperatur wird mithilfe eines Aquarium-Thermometers gemessen. Die Steuerung aktiviert die einzelnen Elemente nach einem vorgegebenen Programm.

Steuerung-Hardware

Die Steuerung besteht aus einem Arduino (programmierbarer Mikrocontroller) und vier Relais. Ein Relais ist ein fernsteuerbarer Schalter. Jedes Relais wird von dem Arduino einzeln angesteuert. Drei der vier Relais sind für die Schaltung der Pflanzenlampen da. Das vierte Relais schaltet die Zirkulationspumpe und die Belüftungspumpe. Der Heizstab regelt sich selbständig auf die eingestellte Temperatur.

²³ vgl. IKEA | Mülltonne Filur (o.J.) | [ikea.com](https://www.ikea.com)

²⁴ vgl. Kunststoffe.de | Polypropylen (o.J.) | [kunststoffe.de](https://www.kunststoffe.de)

Steuerung-Software

Der Arduino schaltet die einzelnen Relais nach einem in seinem Speicher hinterlegten Programm. Das Programm gibt vor, wie lange Lampen, Belüftung und Zirkulation ein- und ausgeschaltet werden.

Das Programm für die Steuerung der Lampen variiert je nach gewünschten Umgebungsbedingungen.

	Einschaltdauer	Ausschaltdauer	Einschaltdauer pro Tag
Beleuchtung (8 h)	1 min 40 s	3 min 20 s	8 h
Beleuchtung (16 h)	3 min 20 s	1 min 40 s	16 h
Belüftung u. Zirkulation	36 s	6 min	2 h 11 min

Tabelle 1: Ein- und Ausschaltdauer für Beleuchtung, Belüftung und Zirkulation (Quelle: eigene Tabelle)

4.4 Nährstoffkonzentrat

Damit die Spirulina sich vermehren können, benötigen sie für die Photosynthese neben Licht und CO₂ auch noch unterschiedlichste Mikronährstoffe. Mikronährstoffe sind in diesem Fall vor allem Mineralien. Diese bieten den Spirulina zwar keinen energetischen Mehrwert, werden aber für unterschiedliche Vorgänge im Körper benötigt.

Zum Beispiel wird Stickstoff und Schwefel benötigt, um Phycocyanin zu bilden. Phycocyanin ist eines der Proteinkomplexe, das es den Spirulina ermöglicht Photosynthese zu betreiben. Außerdem ist es durch seine bläuliche Färbung das namensgebende Pigment der Blaualgen.²⁵

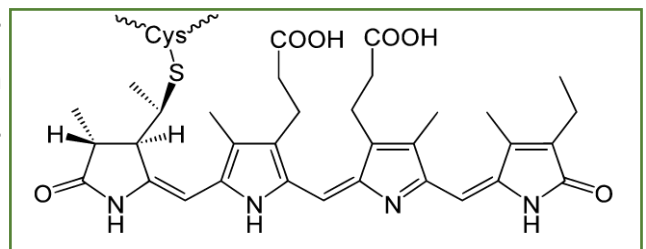


Abbildung 2: Die chromophore Gruppe Phycocyanobilin (Quelle: chemie-schule.de)

Die Mikronährstoffe werden in Form eines

Nährstoffkonzentrats in das Wasser gegeben. Die daraus entstehende Lösung wird im Folgendem als Nährstofflösung bezeichnet.

Das genutzte Nährstoffkonzentrat wurde eigenhändig angemischt, da es zum Zeitpunkt der Durchführung keine vergleichbaren Konzentrate auf dem Markt gab.

Die genutzte Rezeptur ist eine öffentlich zugängliche Abwandlung des Zarrouk-Mediums mit dem Namen :subKultur-Medium-1.²⁶

²⁵ vgl. Chemie Schule | Phycocyanin (o.J.) | chemie-schule.de

²⁶ vgl. Subkultur Wiki | Nährstoffkonzentrat (2022) | oekoprog.org

Dieses musste aufgrund von Problemen bei der Akquisition der Chemikalien nochmals leicht abgewandelt werden. Dabei wurde Dikaliumhydrogenphosphat (K_2HPO_4) durch Kaliumdihydrogenphosphat ($KHPO_4$) ersetzt. Der Masseanteil wurde so berücksichtigt, dass der Anteil an Kalium (K) in dem Konzentrat gleichbleibt.

Aufgrund der Wichtigkeit einzelner Chemikalien, wird auf diese eingegangen.

Chemikalien	g/l
Meersalz	1
Kaliumsulfat	1
Urea (Harnstoff)	0,5
Kaliumdihydrogenphosphat	0,78
Magnesiumsulfat-Heptahydrat	0,2
Calciumchlorid-Dihydrat	0,04
Natrium-Eisen(III)-EDTA	0,015
Natron	16,8
Gesamt	20,34

Tabelle 2: Zusammensetzung Nährstoffkonzentrat
(Quelle: eigene Tabelle)

Natron

Natron wird benötigt um den pH-Wert des Wassers in den Bereich von 9-11 zu heben. Es wird von den Spirulina in keiner Form verstoffwechselt.

Urea/Harnstoff

Urea, auch als Harnstoff bezeichnet, ist neben der Luft ein weiterer Stickstofflieferant. Der Vorteil gegenüber dem molekularen Stickstoff in der Luft ist, dass Urea von den Spirulina einfacher verstoffwechselt werden kann. Der in der Luft befindliche Stickstoff muss erst aufwendig in Ammonium umgewandelt werden, um den Spirulina zu Verfügung zu stehen.²⁷

Meersalz

Meersalz erfüllt zwei Funktionen. Erstens macht es das Wasser salzig, sodass das osmotische Gleichgewicht zwischen Wasser und Spirulina gehalten werden kann. Zweitens ist es durch seine Unreinheit ein guter Lieferant von unterschiedlichsten Kationen (z.B. K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+}), die von den Spirulina in geringen Mengen benötigt werden.

4.5 Startkultur

Für die Durchführung des Experimentes wird eine Startkultur an Spirulina benötigt. Die Masse der Startkultur beträgt in den einzelnen Szenarien immer 10 g abgefilterte Spirulina. Dieser Wert wurde so gewählt, dass die Spirulina in ausreichender Menge in der Nährstofflösung vorhanden sind. Wenn die Algendichte in der Nährstofflösung zu gering ist, wird pro einzelner Spirulina mehr Licht absorbiert als sie vertragen.

Das würde zur Unterbrechung der Photosynthese führen.²⁸

Die Urstartkultur hatte ein Volumen von 500 ml und wurde über Ebay-Kleinanzeigen gekauft. Die Algenmasse in dieser Urstartkultur entsprach ungefähr 1 g und reichte somit nicht für das Ansetzen des ersten Szenarios aus. Um die Algenmasse zu Erhöhen wurde die

²⁷ vgl. Höhere Bundeslehranstalt für Landwirtschaft Ursprung | Nitrifikation in Blaualgen - Verfügbarkeit im Boden (o.J.) | gbt-ursprung.at

²⁸ vgl. RedueSystems | Wie viel Licht vertragen Pflanzen (o.J.) | redusystems.com

Urstartkultur über ca. 3 Wochen in unterschiedlich großen Behältern unter den Rahmenparametern des vierten Szenarios vermehrt. Dazu wurde das Volumen der Nährlösung alle 4 Tage verdoppelt. Die schrittweise Erhöhung war nötig, um die Unterbrechung der Photosynthese auf Grund von zu hoher Belichtung zu verhindern.

4.6 Beschreibung der Durchführung eines Szenarios

In diesem Abschnitt wird der Ablauf eines Szenarios beispielhaft am ersten Szenario erläutert. Für den Beginn eines neuen Szenarios werden immer Spirulina des vorigen Durchlaufes genutzt. Aus diesem Grund wird zuerst das Abfiltern der Spirulina am Ende eines Szenarios beschrieben. Im Fall des Ersten kommen diese aus der Urstartkultur. Die in den folgenden Abschnitten durchgeführten Rechnungen und Fotos sind dem Anhang beigelegt.

4.6.1 Abfiltern der Spirulina

Das Abfiltern der Spirulina geschieht mithilfe eines Nylon-Tuches. Dieses hat eine Maschenweite von 0.037 mm und wird über einen Auffangbehälter gespannt. Die gefilterten Spirulina werden im Folgenden als „Nass-Spirulina“ bezeichnet.

Durch ihre Länge von ungefähr 0.5 mm, ist es den ausgewachsenen Spirulina nicht möglich das Nylon-Tuch zu passieren.²⁹

Anschließend wird der Algenreaktor über den Schlauch der Zirkulationspumpe mittels Schwerkraft entleert. Dabei verbleiben ca. 2 cm Nährlösung im Reaktor. Dieser Rest enthält hauptsächlich abgestorbene Spirulina und nicht in Wasser lösliche Teile des Nährstoffkonzentrats.

Der einzige Teil des Nährstoffkonzentrats, der eine Gefahr für die Umwelt darstellen könnte, ist Calciumchlorid-Dihydrat. Dessen Konzentration ist mit 0,04 g/l aber so gering, dass es bedenkenlos über den Abfluss entsorgt werden kann.³⁰

Danach wird der Algenreaktor gründlich gereinigt und ausgespült.

Von den im Nylon-Tuch verbliebenen Spirulina werden 10 g für den nächsten Durchlauf aufgehoben. Ein Teil des Restes wird zur Ermittlung der durchschnittlichen Trockensubstanz genutzt. Dazu werden mindestens 10 g Nass-Spirulina (m_g) auf einem Stück Backpapier abgewogen und anschließend für 30 min bei 75 °C Umluft im Backofen getrocknet. Durch die Antihafbeschichtung des Backpapiers lassen sich die getrockneten Spirulina einfach abtrennen. Die Trockenmasse der Spirulina (m_t) wird danach durch die Masse der Nass-Spirulina (m_g) dividiert. Das Ergebnis ist die Trockensubstanz der Spirulina.

$$\frac{m_t}{m_g} = TS \text{ in } [\%]$$

²⁹ vgl. SunChemical | California Grown Spirulina (o.J.) | sunchemical.com

³⁰ vgl. Axel Schunk | Experiment des Monats Januar 2010 Calciumphosphate (2010) | axel-schunk.de

Dies wird für alle Szenarien wiederholt. Die Trockensubstanzen werden am Ende als durchschnittliche Trockensubstanz ($TS\emptyset$) gemittelt.

$$\frac{TS_1 + TS_2 + \dots + TS_n}{n} = TS\emptyset \text{ in } [\%]$$

4.6.2 Ansatz einer Startkultur

Damit die Szenarien untereinander vergleichbar sind, wird die Startkultur immer mit 10 g Nass-Spirulina aus dem vorherigen Durchlauf begonnen. So wird gewährleistet, dass alle Szenarien die gleichen Ausgangsvoraussetzungen haben.

Die Nass-Spirulina werden mit der gefilterten Nährstofflösung vermischt und zurück in den Reaktor gegeben. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Volumen wird mit Nährstofflösung aufgefüllt. Damit ist die Startkultur angesetzt und der Unterteil des Reaktors wieder einsatzbereit.

Am Oberteil des Reaktors wird die Steuerung der Belichtung auf das neue Szenario eingestellt. Sie verringert sich von 16 h auf 8 h Belichtungszeit. Die zu erreichende Temperatur des Heizstabes wird von 35 °C auf 25 °C verringert. Somit sind die neuen Rahmenparameter eingestellt. Danach werden Ober- und Unterteil wieder zusammengeführt.

Der komplette Vorgang des Ansetzens eines neuen Szenarios ist für die Spirulina sehr stressig. Durch das Filtern klumpen einzelne Spirulina zusammen und werden nicht mehr ausreichend belüftet. Um dem neuen Ansatz gute Startbedingungen zu geben, werden sie für 10 min zirkuliert und belüftet. Dadurch ist eine ausreichende Homogenisierung und Belüftung der Startkultur gewährleistet.

4.6.3 Bestimmung der Algendichte

Die Algendichte zum Start einer Kultur wird rechnerisch ermittelt. Dazu wird die Masse der für die Startkultur genutzten Nass-Spirulina (m_g) durch das Volumen der gesamten Nährstofflösung (V) geteilt und mit durchschnittliche Trockensubstanz ($TS\emptyset$) multipliziert. Das Ergebnis ist der rechnerische Trocken-Spirulina Anteil pro Volumeneinheit (ρ_t).

$$\frac{m_g}{V} * TS\emptyset = \rho_t \text{ in } g/l \quad \frac{10 g}{26,5 l} * 10,3\% = 0,4 g/l$$

Während des Szenarios wird die Algendichte in einem Abstand von zwei Tagen gemessen. Um eine homogene Verteilung der Spirulina in der Nährlösung zu gewährleisten, wird die Zirkulationspumpe vor Beginn der Probennahme für 5 min eingeschaltet. Anschließend werden 1 Liter der Nährlösung (V) entnommen und gefiltert. Die herausgefilterten Spirulina und der Filter werden für 10 min bei 75 C° Umluft im Backofen getrocknet. Anschließend wird der trockene Filter mit Inhalt (m_1) gewogen. Danach wird der Filter ausgewaschen und nochmals für 10 min bei 75 C° Umluft im Backofen getrocknet. Der getrocknete Filter ohne

Inhalt (m_2) wird gewogen. Die Masse des Filters ohne Inhalt wird anschließend vom Filter mit Inhalt subtrahiert. Das Ergebnis ist die Trockenmasse der Spirulina (m_t). Das Dividieren der Trockenmasse der Spirulina (m_t) durch das Volumen (V) ergibt den Anteil an Trocken-Spirulina pro Volumeneinheit (ρ_t).

$$m_1 - m_2 = m_t \text{ in [g]} \quad \frac{m_t}{V} = \rho_t \text{ in [g/l]}$$

Die, durch die Trocknung entstehende Wartezeiten, werden für die Bestimmung des pH-Wertes und der Wassertemperatur genutzt. Der pH-Wert wird mittels pH-Papier bestimmt. Die Ergebnisse und Messwerte werden anschließend in einer Excel Tabelle protokolliert. Wenn die gemessene Algendichte über mindestens 2 Messungen konstant bleibt, hat das Szenario seine maximale Algendichte erreicht und wird beendet. Anschließend wird, wie im Abschnitt 4.6.1 beschrieben, der Algenreaktor für ein neues Szenario vorbereitet.

4.8 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Szenarien werden im folgenden Diagramm dargestellt. Für einzelne Szenarien wurden für den 10. und 12. Tag Werte hinzugefügt. Das dient ausschließlich zur besseren Lesbarkeit des Diagrammes und hat keine Auswirkung auf die Ergebnisse.

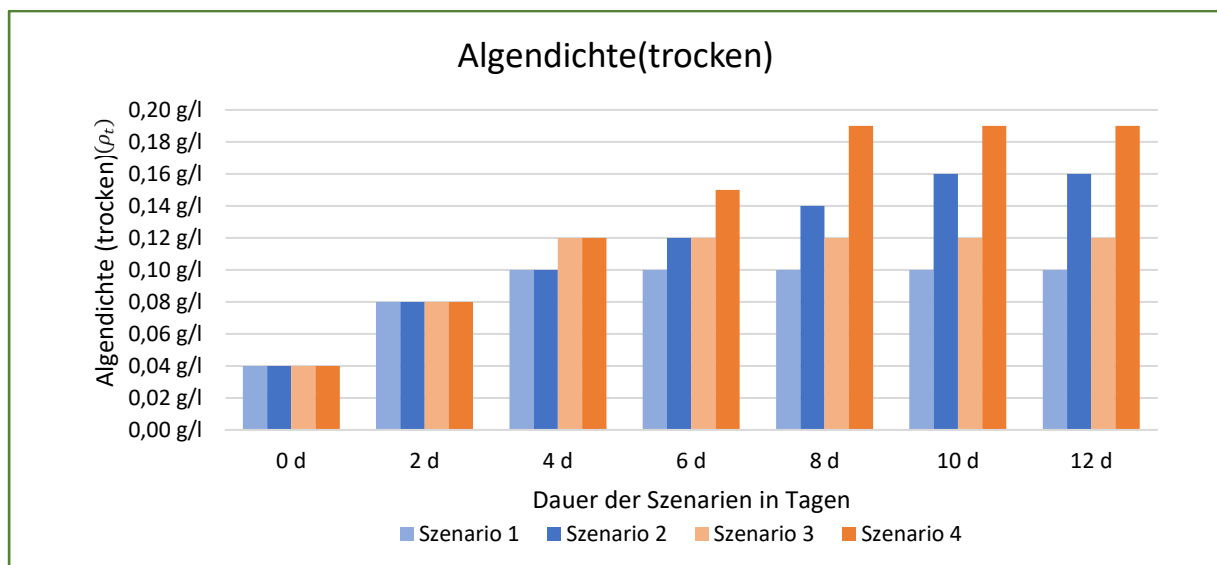


Abbildung 3: Diagramm Algendichte (Quelle: eigene Abbildung)

Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Trocken-Algendichte (ρ_t) und der Dauer des Szenarios. Vom Start bis zu ersten Messung am 2. Tag steigt die Algendichte bei allen Szenarien konstant an. Die Messung am 4. Tag zeigt, dass die Algendichte bei den Szenarien mit der gleichen Wassertemperatur (1/2 und 3/4) auch die gleiche Wachstumsrate haben. Dabei haben die Szenarien mit einer höheren Wassertemperatur (3/4) auch ein höheres Algenwachstum. Außerdem stoppt das Wachstum bei den Szenarien mit der geringeren Belichtungsdauer (1/3). Bei den Szenarien mit der längeren Belichtungsdauer (2/4) bleibt die Wachstumsrate so gut wie konstant.

Ab dem 8. Tag stoppt auch das Wachstum bei dem 4. Szenario. Am 10. Tag ist das Wachstum bei allen Szenarien gestoppt.

Szenario 4 hat mit 0,19 g/l Trocken-Algendichte die höchste Algendichte. Das Algenwachstum ist bei Szenario 3 und 4 mit 0,04 g/l über 2d am höchsten. Szenario 1 und 2 haben eine Wachstumsrate von 0,02 g/l über 2d. Bei dieser Aussage werden die Werte des 2. Tages ignoriert. Die Gründe dafür werden in der Fehlerbetrachtung genannt.

Die Ergebnisse weichen stark von der Prognose der Szenarien ab, sie sind aber dennoch sinnvoll. Szenario 1 hat die geringste Wachstumsrate und Algendichte. Szenario 4 die höchste Wachstumsrate und Algendichte.

Die Kernaussage der Ergebnisse ist, dass die Belichtungszeit die maximale Algendichte bestimmt, aber keinen Einfluss auf die Wachstumsrate hat. Die Wassertemperatur hingegen, beeinflusst hauptsächlich die Wachstumsrate, erhöht aber auch die maximale Dichte. Das könnte sich darauf zurückführen lassen, dass gewisse Stoffwechselfvorgänge bei höheren Temperaturen effektiver und schneller durchgeführt werden.

4.9 Fehlerbetrachtung

Die Fehlerbetrachtung dient dazu sicherzustellen, dass die Ergebnisse präzise, reproduzierbar und aussagekräftig sind. Da bei der Durchführung des Experimentes unterschiedliche Fehlerquellen zum Vorschein gekommen sind, werden diese nun näher beschrieben.

Die Recherche zum Phycobilisom-Proteinkomplex ergab, dass dieses gelb/grünes Licht benötigt.³¹ Die verbauten Pflanzenlampen emittieren aber nur rot/blaus Licht. Da das Experiment zu diesem Zeitpunkt aber schon lief, war eine Umstellung nicht mehr möglich.

Das Nylon-Tuch filtert nicht alle Spirulina heraus, sondern nur Ausgewachsene. Das könnte die erhöhte Wachstumsrate am 2 Tag bei allen Szenarien zur Folge haben. Eine Erklärung dafür wäre, dass zum Zeitpunkt der ersten Messung die nicht filterbaren Spirulina aus dem Vordurchlauf so weit herangewachsen waren, dass sie filterbar wurden.

Ein zu komplizierter Algenreaktor. Der erste genutzte Algenreaktor wurde beim Ansetzen des 3. Szenarios undicht. Das führte zu einer Verzögerung des kompletten Ablaufes. Der erste Reaktor verfügte über ein Sichtfenster, das mittels Silikon abgedichtet war. Diese Silikonabdichtung wurde undicht. Grundsätzlich hätte man diese erneuern können, aber um ein erneutes Auftreten einer Undichtigkeit zu verhindern wurde das komplette Unterteil ersetzt. Das neue Unterteil verfügte über kein Sichtfenster und nur eine abzudichtende Öffnung für die Zirkulationspumpe. Dadurch ist diese Konstruktion unanfälliger.

³¹ vgl. Biologie Seite | Phycobilisom (o.J.) | biologie-seite.de

5. Hochrechnung

Die Ergebnisse des Experimentes werden auf den Tagesbedarf an Protein ($m_{p ges.}$) eines normalgewichtigen Menschen hochgerechnet. Dieser entspricht rund 75 g Protein pro Tag.³²

Dafür wird der Anteil an Trocken-Spirulina pro Volumeneinheit (ρ_t) durch 2 geteilt. Das ist nötig, da ρ_t über 2 Tage gemessen wird, der Bedarf an Protein aber täglich vorliegt. Das Zwischenergebnis wird mit dem Proteinanteil der Trocken-Spirulina multipliziert. Dieser entspricht 60%. Das Endergebnis spiegelt den Proteinanteil der Trocken-Spirulina pro Liter Nährstofflösung ($p_{p äqu.}$).

$$\frac{\rho_t}{2} * 60\% = p_{p äqu.} \text{ in } [g/l]$$

Um das benötigte Volumen an Nährstofflösung (V) zu errechnen, wird der Tagesbedarf an Protein ($m_{p ges.}$) durch den Proteinanteil der Trocken-Spirulina pro Liter Nährstofflösung ($p_{p äqu.}$) dividiert.

$$\frac{m_{p ges.}}{p_{p äqu.}} = V \text{ in } [l]$$

Die benötigte Fläche für das Zuchtbecken (A) ergibt sich durch das Teilen des benötigten Volumens der Nährstofflösung (V) durch die Wassertiefe in dm (h_w).

$$\frac{V}{h_w} = A \text{ in } [dm^2]$$

Die Ergebnisse werden anschließend in m² umgerechnet.

Die benötigte Fläche des Zuchtbeckens für Szenario 1 und 2 beträgt 32,9 m². Für Szenario 3 und 4 beträgt sie 16,5 m². Die Rechnungen befinden sich im Anhang.

³² vgl. NDR | Wieviel Eiweiß ist gesund? (2023) | [ndr.de](https://www.ndr.de)

6. Vergleich zu anderen pflanzlichen Proteinquellen

In diesem Abschnitt wird der Protein-Ertrag pro m² ($m_{p\ m^2}$) der Spirulina mit anderen pflanzlichen Proteinquellen verglichen. Um den Protein-Ertrag pro m² ($m_{p\ m^2}$) zu ermitteln wird der Tagesbedarf an Protein ($m_{p\ ges.}$) durch die Fläche des Zuchtbeckens (A) geteilt. Dieser entspricht 4,56 g/m².

$$\frac{m_{p\ ges.}}{A} = m_{p\ m^2} \text{ in } [g/m^2]$$

Für die Ermittlung des Protein-Ertrags pro m² ($m_{p\ m^2}$) der anderen Proteinquellen, wird deren Ertrag pro Jahr und Hektar ($m_{p\ m^2}$) durch 365 Tage und 10.000 m² geteilt. Dieser Wert wird anschließend mit dem Proteinanteil der Proteinquelle ($p\%$) multipliziert und in g/m² umgerechnet.

$$\frac{m_{alt.}}{365\ d * 10.000\ m^2/ha} * p\% * 1000\ kg/t * 1000\ g/kg = m_{p\ m^2} \text{ in } [g/m^2]$$

Proteinquelle	Ertrag pro ha u. Jahr	Proteinanteil	Protein-Ertrag	Effektivität
Spirulina	-	60 %	4,56 g/m ²	100 %
Soja ³³	2,48 t ³⁴	36,5 %	0,28 g/m ²	5,44 %
Kichererbse ³⁵	2,5 t ³⁶	20,5 %	0,13 g/m ²	3,08 %
Weizen ³⁷	7,58 t ³⁸	13,7 %	0,21 g/m ²	6,24 %
Linsen ³⁹	0,85 t ⁴⁰	24,6 %	0,06 g/m ²	1,26 %

Tabelle 3: Proteinquellen Vergleich (Flächenerträge aus Deutschland) (Quelle: eigene Tabelle)

³³ U.S. Department of Agriculture | Soybeans, mature seeds, raw (2019) | fdc.nal.usda.gov

³⁴ Statista | Ernteertrag von Sojabohnen in Europa (2022) | de.statista.com

³⁵ U.S. Department of Agriculture | Chickpeas, mature seeds, raw (2019) | fdc.nal.usda.gov

³⁶ Landwirtschaftsverlag | Experiment Erbse (2020) | topagrar.com

³⁷ U.S. Department of Agriculture | Wheat, durum (2018) | fdc.nal.usda.gov

³⁸ Statista | Ertrag ausgewählter Getreidearten in Deutschland (2023) | de.statista.com

³⁹ U.S. Department of Agriculture | Lentils, raw (2019) | fdc.nal.usda.gov

⁴⁰ Statistisches Landesamt Baden-Württemberg | Die Linse (2014) | statistik-bw.de

7. Abschlussbetrachtung

Abschließend ziehe ich ein kurzes Fazit. Spirulina eignen sich hervorragend als Quelle für Protein und essentielle Aminosäuren. Andere pflanzliche Proteinquellen benötigen ca. die 15 – 80-fache Fläche, um den gleichen Ertrag zu leisten. Wobei diese nicht alle essentiellen Aminosäuren liefern. Im Vergleich zu Fleisch als Proteinquelle schneidet Spirulina noch besser ab. Für die Produktion von 1 kg Rindfleisch werden 12 kg Soja benötigt.⁴¹

Dabei enthält das Rindfleisch im Durchschnitt nur 26% Protein.⁴²

Das bedeutet, wenn Soja für die Fleischproduktion verfüttert wird, wird um die gleiche Menge an Protein und Aminosäuren zu liefern, die 280-fache Fläche im Vergleich zu den Spirulina benötigt.

Doch Spirulina bieten noch viele weitere Vorteile. Sie haben einen kurzen Lebenszyklus, wodurch ein Absterben einer Kultur nicht so tragisch wäre, da sie schnell wieder herangezogen werden können. Spirulina werden in Salzwasser angebaut, dieses Wasser ist für die Land- und Viehwirtschaft unbrauchbar. Sie können in Regionen des Äquators das ganze Jahr über angebaut und geerntet werden. Dadurch entfallen mögliche Probleme mit der Lagerung. Der Anbau benötigt keine landwirtschaftlichen Maschinen.

Meiner Meinung nach könnte der Anbau von Spirulina einen kleinen Teil zur Lösung des Welthungers beitragen. Ich sehe ihre Einsatzmöglichkeiten vor allem in warmen Regionen in der Nähe des Äquators. Dort wird Spirulina z.B. in Kenia bereits hydroponisch angebaut. In Europa sehe ich Spirulina nicht als eine ernsthafte alternative Proteinquelle, da die Wachstumsraten zu gering sind und ein offener Anbau nur halbjährig möglich wäre.

⁴¹ vgl. OroVerde | Zahlen und Fakten zum Thema Fleischkonsum und Sojaanbau (2011) | regenwald-schuetzen.org

⁴² vgl. U.S. Department of Agriculture | Beef Nutrients (2019) | fdc.nal.usda.gov

8. Literaturverzeichnis

Die folgenden URLs wurden zuletzt am 14.04.2023 abgerufen und waren alle verfügbar.

Aktion Deutschland Hilft: Hunger, Unter- und Mangelernährung (o.J.)

URL: www.aktion-deutschland-hilft.de/de/fachthemen/natur-humanitaere-katastrophen/hungersnoete/hunger-unter-und-mangelernaehrung/

AuraNatura: Spirulina – Die blaue Alge und ihre Wirkung (2022)

URL: <https://www.auranatura.com/magazin/spirulina/>

Axel Schunk: Experiment des Monats Januar 2010 Calciumphosphate (2010)

URL: <https://www.axel-schunk.de/experiment/edm1001.html>

Biologie Seite: Phycobilisom (o.J.)

URL: www.biologie-seite.de/Biologie/Phycobilisom

Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Bevölkerungszahl und ihr Wachstum (o.J.)

URL: www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/W03-Bevoelkerungszahl-Wachstum-Welt-ab-1950.html

Bundesregierung: Ernährungssicherheit (o.J.)

URL: www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/ernaehrungssicherheit-319080

Chemie Schule: Phycocyanin (o.J.)

URL: www.chemie-schule.de/KnowHow/Phycocyanin

Deutsche Welthungerhilfe e. V.: 8 Mythen über Mangelernährung (2017)

URL: www.welthungerhilfe.de/aktuelles/blog/8-mythen-ueber-mangelernaehrung

Deutschland-Portal: Verborgener Hunger (2015)

URL: www.deutschland.de/de/topic/leben/lifestyle-kulinarik/verborgener-hunger

eucell: Essentielle Aminosäuren (o.J.)

URL: www.eucell.de/ernaehrung/ernaehrungslexikon/aminosaeuren/essentielle-aminosaeuren

German Doctors e.V.: Unterernährung in Entwicklungsländern und ihre Folgen (o.J.)

URL: www.german-doctors.de/de/ueber-uns/krankheiten-in-entwicklungslaendern/unterernaehrung

IKEA: Mülltonne Filur (o.J.)

URL: www.ikea.com/de/de/p/filur-tonne-mit-deckel-weiss-20193899/

Höhere Bundeslehranstalt für Landwirtschaft Ursprung: Nitrifikation in Blaualgen - Verfügbarkeit im Boden (o.J.)

URL: <http://www.gbt-ursprung.at/gbt/projekte/cyanobakterien/de/index.php?seite=nitrifikation>

Kunststoffe.de: Polypropylen (o.J.)

URL: www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polypropylen-pp-264406

Landwirtschaftsverlag GmbH: Experiment Erbse (2020)

URL: <https://www.topagrar.com/perspektiven/alternative-proteine/anbau-von-kichererbsen-in-deutschland-12375529.html>

LUMITOS AG: Spirulina (o.J.)

URL: <https://www.bionity.com/de/lexikon/Spirulina.html>

Lasse Polsfuss: Einführung in die Hydroponik (2022)

URL: www.pflanzenfabrik.de/die-hydroponik/

MDR: Wie der Mond und die Blaualgen den Sauerstoff auf die Erde brachten (2021)

URL: <http://www.mdr.de/wissen/klima/cyanobakterien-sauerstoff-atmosphaere-tageslaenge-100.html>

NDR: Wieviel Eiweiß ist gesund? (2023)

URL: https://www.ndr.de/ratgeber/gesundheit/Wie-viel-Eiweiss-ist-gesund_eiweiss102.html

Neosmart Consulting AG: Aminosäuren - Basiswissen einfach erklärt (2023)

URL: www.zentrum-der-gesundheit.de/ernaehrung/nahrungsergaenzung/algen/spirulina

ntv: Angriff auf Ukraine hat bestehende Hungersnot verschärft (o.J.)

URL: www.n-tv.de/politik/Angriff-auf-Ukraine-hat-bestehende-Hungersnot-verschaerft-article23936686.html

OroVerde: Zahlen und Fakten zum Thema Fleischkonsum und Sojaanbau (2021)

URL: www.regenwald-schuetzen.org/fileadmin/user_upload/pdf/Projekt/Weil-wir/Fleisch/weil-wir-es-wert-sind-zahlen-fakten-fleischkonsum.pdf

Primal State: Essentielle Aminosäuren im Überblick (o.J.)

URL: <http://www.primal-state.de/essentielle-aminosaeuren/>

RedueSystems: Wie viel Licht vertragen Pflanzen (o.J.)

URL: <https://www.redusystems.com/de/artikel/wie-viel-licht-vertragen-pflanzen>

Spektrum: Cyanobakterien (o.J.)

URL: www.spektrum.de/lexikon/biologie/cyanobakterien/16137

Statista: Der Hunger auf der Welt wird wieder größer (2020)

URL: <https://de.statista.com/infografik/15511/anzahl-der-unterernaehrten-personen-weltweit/>

Statista: Ertrag ausgewählter Getreidearten in Deutschland (2023)

URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28888/umfrage/hektarertrag-von-getreide-in-deutschland-seit-1960/>

Statista: Ernteertrag von Sojabohnen in Europa (2022)

URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1142573/umfrage/hektarertrag-von-sojabohnen-in-europa/>

Statistisches Bundesamt: Unterernährung Weltweit (2022)

URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/landwirtschaft-fischerei/Unterernaehrung.html>

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Die Linse (2014)

URL: <https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Monatshefte/20141205>

Studyflix GmbH: RGT-Regel (o.J.)

URL: www.studyflix.de/chemie/rgt-regel-1921

Subkultur Wiki: Nährstoffkonzentrat (2022)

URL: https://www.oekoprogram.org/subkultur-wiki/index.php?title=Spirulina_anbauen#Salze_und_N.C3.A4hrstoffe

SunChemical: California Grown Spirulina (o.J.)

URL: <https://www.sunchemical.com/california-grown-spirulina/>

U.S. Department of Agriculture: Beef Nutrients (2019)

URL: fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/174032/nutrients

U.S. Department of Agriculture: Chickpeas, mature seeds, raw (2019)

URL: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/173756/nutrients>

U.S. Department of Agriculture: Lentils, raw (2019)

URL: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/172420/nutrients>

U.S. Department of Agriculture: Soybeans, mature seeds, raw (2019)

URL: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/174270/nutrients>

U.S. Department of Agriculture: Wheat, durum (2019)

URL: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/174270/nutrients>

Uni Freiburg: Bisher übersehene kleine Proteine in Bakterien (2021)

URL: <https://kommunikation.uni-freiburg.de/pm/2020/schlusselenzyme-zur-naturstoffherstellung>

Verbraucherzentrale NRW e.V.: Spirulina – viel Grün und wenig dahinter (2022)

URL: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/nahrungsergaenzungsmittel/spirulina-viel-gruen-und-wenig-dahinter-21053>

Wassenberg Apotheke: Aminosäuren - Basiswissen einfach erklärt (2021)

URL: www.wassenberg-apotheke.de/gesundheitsbibliothek/index/aminosaeuren/

III. Anhang

Der Anhang ist aus Platzgründen nicht komplett chronologisch.

4.6.1 Bestimmung der Algendichte

Spirulina aus einem Liter gefilterte Nährlösung (nass)



Spirulina aus einem Liter gefilterte Nährlösung (getrocknet)



4.3.1 Unterteil

Rückseite Algenreaktor



Zirkulationspumpe

Innenseite Algenreaktor nach Entellerung (ca. 2 cm Restwasserhöhe)



Ansaugung

Heizstab

Rückführung

4.3.2 Oberteil Steuerung-Hardware

Abdeckung

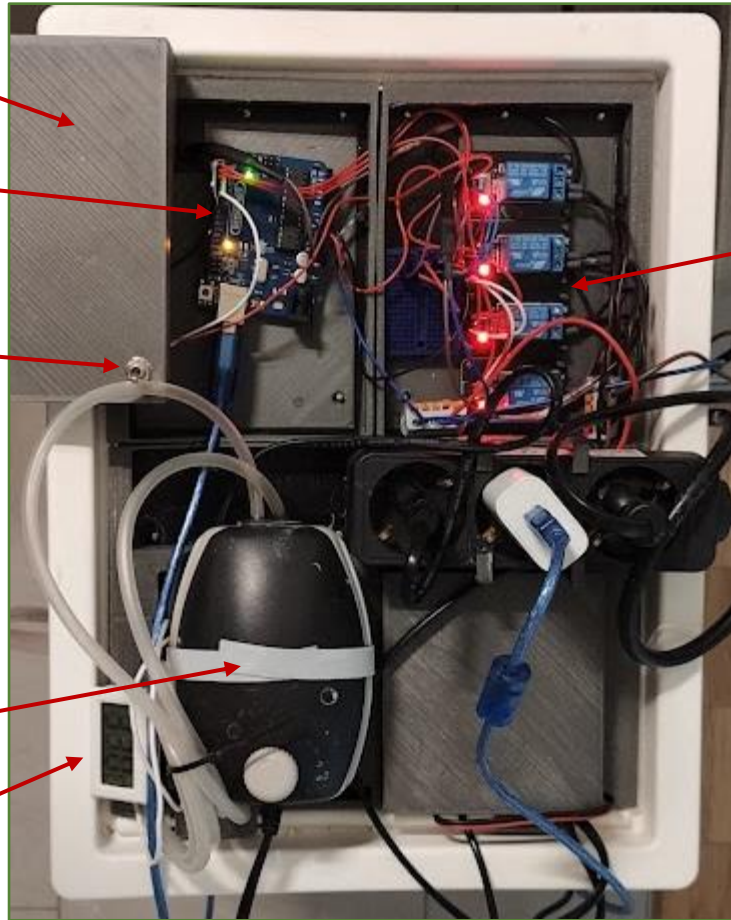
Arduino

Schalter für
manuelle Steuerung der
Belüftungs- und Zirkula-
tionspumpen

Belüftungspumpe

Thermometer

Relais

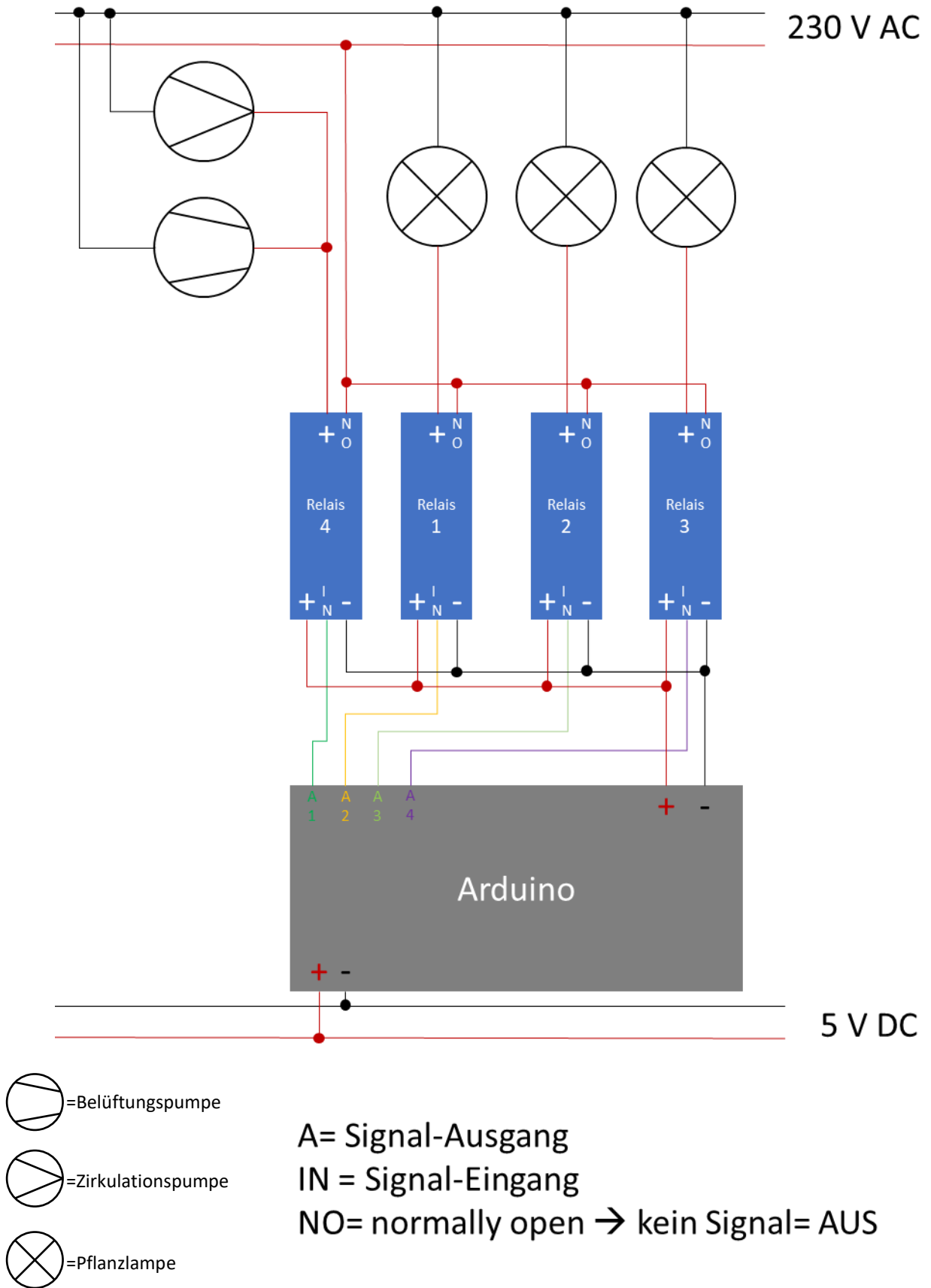


Belüftungsschläuche

50 Watt Pflanzlampen



4.3.2 Oberteil Steuerung-Hardware (Schaltplan)



Berechnungen für 4.6.1 Abfiltrern der Spirulina

Trockensubstanz

Formel	Ansatz (TS1)	Szenario 1 (TS2)	Szenario 2 (TS3)
$\frac{m_t}{m_g} = TS \text{ in } \%$	$\frac{1,53 \text{ g}}{13,95 \text{ g}} = 11 \%$	$\frac{0,95 \text{ g}}{10 \text{ g}} = 9,5 \%$	$\frac{1,52 \text{ g}}{13,72 \text{ g}} = 11,1 \%$
	Szenario 3 (TS4)	Szenario 4 (TS5)	Szenario 1 (2x) (TS6)
	$\frac{0,99 \text{ g}}{10,1 \text{ g}} = 9,8 \%$	$\frac{1,40 \text{ g}}{13,80 \text{ g}} = 10,1 \%$	$\frac{1,02 \text{ g}}{10,1 \text{ g}} = 10,2 \%$

durchschnittliche Trockensubstanz ($TS\emptyset$)

$$\frac{TS_1 + TS_2 + \dots + TS_n}{n} = TS\emptyset \text{ in } [\%] \quad \left| \frac{11 \% + 9,5 \% + 11,1 \% + 9,8 \% + 10,1 \% + 10,2 \%}{6} = 10,3 \%$$

Berechnungen für 5. Hochrechnung

Formel	Szenario 1 und 2	Szenario 3 und 4
$\frac{p_t}{2} * 60\% = p_{p \text{ äqu.}} \text{ in } [g/l]$	$\frac{0,02 \text{ g/l}}{2} * 60\% = 0,06 \text{ g/l}$	$\frac{0,04 \text{ g/l}}{2} * 60\% = 0,012 \text{ g/l}$
$\frac{m_{p \text{ ges.}}}{p_{p \text{ äqu.}}} = V \text{ in } [l]$	$\frac{75 \text{ g}}{0,006 \text{ g}} = 12500 \text{ l}$	$\frac{75 \text{ g}}{0,012 \text{ g}} = 6250 \text{ l}$
$\frac{V}{h_w} = A \text{ in } [dm^2]$	$\frac{12500 \text{ l}}{3,8 \text{ dm}} = 3289 \text{ dm}^2 = 32,89 \text{ m}^2$	$\frac{6250 \text{ l}}{3,8 \text{ dm}} = 1645 \text{ dm}^2 = 16,45 \text{ m}^2$

Berechnungen für 6. Vergleich zu anderen pflanzlichen ProteinquellenProtein-Ertrag pro m^2

Formel	Spirulina
$\frac{m_{p \text{ ges.}}}{A} = m_{p \text{ m}^2} \text{ in } [g/m^2]$	$\frac{75 \text{ g}}{16,45 \text{ m}^2} = 4,56 \text{ g/m}^2$

Formel	$\frac{m_{alt.}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/ha} * p\% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = m_{p \text{ m}^2} \text{ in } [g/m^2]$
Soja	$\frac{2,48 \text{ t}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/ha} * 36,5 \% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = 0,25 \text{ g/m}^2$
Kichererbse	$\frac{2,5 \text{ t}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/ha} * 20,5 \% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = 0,14 \text{ g/m}^2$

Weizen	$\frac{7,58 \text{ t}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/\text{ha}} * 13,7 \% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = 0,28 \text{ g/m}^2$
Linsen	$\frac{0,85 \text{ t}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/\text{ha}} * 24,6 \% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = 0,06 \text{ g/m}^2$
Soja 12:1 (Rindfleisch)	$\frac{2,48 \text{ t} / 12 \text{ t/t}}{365 \text{ d} * 10.000 \text{ m}^2/\text{ha}} * 26 \% * 1000 \text{ kg/t} * 1000 \text{ g/kg} = 0,015 \text{ g/m}^2$

Probenahme Protokoll

Tag	Durchlauf	Datum	Tag	Belichtungszeit	Soll Temperatur	Ist-Temperatur	pH-Wert	Probenvolumen	Filter + Inhalt	Filter ohne Inhalt	Algenmaße	TS Algendichte	Alge Nass	Alge Trocken	TS
0	Ansatz	15. Feb		16 h	35 °C								13,95 g	1,53 g	10,97%
0	1	15. Feb	Mi	8h	25 °C	31,5 °C	9,5	-	-	-	0,04 g	0,04 g/l			
2	1	17. Feb	Fr	8 h	25 °C	25,6 °C	9,5	1,0l	3,99 g	3,91 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	1	19. Feb	So	8 h	25 °C	25,0 °C	9,5	1,0l	4,01 g	3,91 g	0,10 g	0,10 g/l			
6	1	21. Feb	Di	8 h	25 °C	24,8 °C	9,5	1,0l	4,01 g	3,91 g	0,10 g	0,10 g/l			
8	1	23. Feb	Do	8 h	25 °C	25,9 °C	9,5	1,0l	4,01 g	3,91 g	0,10 g	0,10 g/l			
10	1	25. Feb	Sa	8h	25 °C	24,9 °C	9,5	1,0l	4,01 g	3,91 g	0,10 g	0,10 g/l	10,00 g	0,95 g	9,50%
0	2	25. Feb	Sa	16 h	25 °C	24,9 °C	9,5	-	-	-	-	0,04 g/l			
2	2	27. Feb	Mo	16 h	25 °C	25,6 °C	9,5	1,0l	4,02 g	3,94 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	2	01. Mrz	Mi	16 h	25 °C	26,7 °C	9,5	1,0l	4,04 g	3,94 g	0,10 g	0,10 g/l			
6	2	03. Mrz	Fr	16 h	25 °C	25,7 °C	9,5	1,0l	4,06 g	3,94 g	0,12 g	0,12 g/l			
8	2	05. Mrz	So	16 h	25 °C	25,5 °C	9,5	1,0l	4,08 g	3,94 g	0,14 g	0,14 g/l			
10	2	07. Mrz	Di	16 h	25 °C	25,5 °C	9,5	1,0l	4,13 g	3,97 g	0,16 g	0,16 g/l			
12	2	09. Mrz	Do	16h	25 °C	25,6 °C	9,5	1,0l	4,13 g	3,97 g	0,16 g	0,16 g/l	13,72 g	1,52 g	11,08%
0	3	13. Mrz	Mo	8 h	35 °C	34,8 °C	9,5	-	-	-	-	0,04 g/l			
2	3	15. Mrz	Mi	8 h	35 °C	35,2 °C	9,5	1,0l	4,05 g	3,97 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	3	17. Mrz	Fr	8 h	35 °C	34,9 °C	9,5	1,0l	4,09 g	3,97 g	0,12 g	0,12 g/l			
6	3	19. Mrz	So	8 h	35 °C	35,4 °C	9,5	1,0l	4,09 g	3,97 g	0,12 g	0,12 g/l			
8	3	21. Mrz	Di	8 h	35 °C	35,1 °C	9,5	1,0l	4,09 g	3,97 g	0,12 g	0,12 g/l	10,10 g	0,99 g	9,80%
0	4	21. Mrz	Di	16 h	35 °C	35,1 °C	9,5	-	-	-	-	0,04 g/l			
2	4	23. Mrz	Do	16 h	35 °C	34,9 °C	9,5	1,0l	4,05 g	3,97 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	4	25. Mrz	Sa	16 h	35 °C	35,1 °C	9,5	1,0l	4,09 g	3,97 g	0,12 g	0,12 g/l			
6	4	27. Mrz	Mo	16 h	35 °C	35,3 °C	9,5	1,0l	4,12 g	3,97 g	0,15 g	0,15 g/l			
8	4	29. Mrz	Mi	8 h	35 °C	34,9 °C	9,5	1,0l	4,16 g	3,97 g	0,19 g	0,19 g/l			
10	4	31. Mrz	Fr	8 h	35 °C	35,2 °C	9,5	1,0l	4,16 g	3,97 g	0,19 g	0,19 g/l			
12	4	02. Apr	So	8 h	35 °C	35,5 °C	9,5	1,0l	4,16 g	3,97 g	0,19 g	0,19 g/l	13,80 g	1,40 g	10,14%
0	5	02. Apr	So	8 h	25 °C	33,2 °C	9,5	-	-	-	-	0,04 g/l			
2	5	04. Apr	Di	8 h	25 °C	24,8 °C	9,5	1,0l	4,05 g	3,97 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	5	06. Apr	Do	16 h	25 °C	24,9 °C	9,5	1,0l	4,07 g	3,97 g	0,10 g	0,10 g/l			
6	5	08. Apr	Sa	16 h	25 °C	25,3 °C	9,5	1,0l	4,07 g	3,97 g	0,10 g	0,10 g/l			
8	5	10. Apr	Mo	16 h	25 °C	25,1 °C	9,5	1,0l	4,07 g	3,97 g	0,10 g	0,10 g/l	10,00 g	1,02 g	10,20%
0	6	10. Apr	Mo	16 h	35 °C	26,1 °C	9,5	-	-	-	-	0,04 g/l			
2	6	12. Apr	Mi	16 h	35 °C	34,6 °C	9,5	1,0l	4,05 g	3,97 g	0,08 g	0,08 g/l			
4	6	14. Apr	Fr	16 h	35 °C	35,2 °C	9,5	1,0l	4,10 g	3,97 g	0,13 g	0,13 g/l			
6	6	16. Apr	So	16 h	35 °C	34,2 °C	9,5	1,0l	4,12 g	3,97 g	0,15 g	0,15 g/l			
8	6	18. Apr	Di	16 h	35 °C	34,8 °C	9,5	1,0l	4,16 g	3,97 g	0,19 g	0,19 g/l			
10	6	20. Apr	Do	16 h	35 °C	34,7 °C	9,5	1,0l	4,16 g	3,97 g	0,19 g	0,19 g/l			

 Wechsel der Parameter Ende eines Szenarios

Bemerkung: Durch eine Leckage am Algenreaktor am 09.03.2023 wurde der Versuch unterbrochen und am 13.03.2023 in einem neuen Algenreaktor fortgeführt.

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Paul Ninnemann, erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsordnung vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Hamburg, den 21.04.2023

Paul Ninnemann