ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

BBSR-
Online-Publikation
20/2021

# Photosynthese und Photovoltaik in hybriden Fassadensystemen

Autoren

Mark Helamieh
Dr. Kai Gehrke
Norbert Osterthun
Dr. Martin Vehse
Dr. Martin Kerner

# Photosynthese und Photovoltaik in hybriden Fassadensystemen

Entwicklung semitransparenter Photovoltaikmodule für gebäudeintegrierte Hybridsysteme aus Photosynthese und Photovoltaik zur komplementären Nutzung des Sonnenlichts

Gefördert durch:

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.
Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.02
Projektlaufzeit: 04.2017–08.2019

## Impressum

**Herausgeber**
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

**Fachbetreuer**
Dr. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen"
zb@bbr.bund.de

**Autoren**
SSC Strategic Science Consult GmbH
Dr. habil. Martin Kerner (Projektleitung)
m.kerner@ssc-hamburg.de

Mark Helamieh
m.helamieh@ssc-hamburg.de

DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme e. V.
Dr. Kai Gehrke
kai.gehrke@dlr.de

Norbert Osterthun
norbert.osterthun@dlr.de

Dr. Martin Vehse
martin.vehse@dlr.de

**Stand**
Juni 2021

**Bildnachweis**
Titelbild: Bernadette Grimmenstein, Hamburg
Fotograf M. Kerner: S. 44 links; Fotograf A. Peschek: S. 44 rechts
Alle anderen Abbildungen stammen von dem Autorenteam

**Vervielfältigung**
Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit jenen des Herausgebers übereinstimmen.

**Zitierweise**
Helamieh, Mark; Gehrke, Kai; Osterthun, Norbert; Vehse, Martin; Kerner, Martin: Photosynthese und Photovoltaik in hybriden Fassadensystemen – Entwicklung semitransparenter Photovoltaikmodule für gebäudeintegrierte Hybridsysteme aus Photosynthese und Photovoltaik zur komplementären Nutzung des Sonnenlichts**.** BBSR-Online-Publikation 20/2021, Bonn, Juli 2021.

ISSN 1868-0097 Bonn 2021

# Inhaltsverzeichnis

**Kurzfassung ..... 5**

Vorteile des neu entwickelten Photosynthese PV-Hybridsytems ..... 8

**1 Ausgangspunkt und Zielstellung ..... 9**

**2 Grundlagen ..... 10**

2.1 Bioenergiefassade ..... 10

2.2 Biomasse und Wertstoffproduktion mit Mikroalgen ..... 11

2.3 Germanium-Dünnschicht-Photovoltaik (PV) ..... 12

**3 Planung und Ablauf des Vorhabens ..... 15**

**4 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 17**

4.1 Übersicht über die erfolgten Arbeiten ..... 17

4.2 Ergebnisse und Erreichung der Meilensteine ..... 17

4.2.1 Spektralselektives Wachstum und Produktion von Wertstoffen ..... 18

4.2.2 Entwicklung einer Dünnschicht-PV ..... 19

**5 Ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ..... 21**

5.1 Entwicklung einer spektralselektiven Dünnschicht PV Zelle ..... 21

5.1.1 Entwicklung eines spektralselektiven Rückreflektors ..... 21

5.1.2 Erste Solarzellen mit MOMO-Rückreflektor ..... 22

5.1.3 Ersatz des AZO-Frontkontaktes durch eine ITO- oder AZO-Schicht ..... 23

5.1.4 Entwicklung von elektronenselektiven Schichten mit verringerter Absorption ..... 25

5.1.5 Entwicklungen von loch-selektiven Schichten mit verringerter Absorption ..... 26

5.1.6 Herstellung von Filtern für Algentests ..... 28

5.1.7 Verbesserungen des Absorbers ..... 29

5.1.8 Bau elektrisch funktionaler Kleinmodule ..... 30

5.2 Spektralselektives Wachstum von Mikroalgen ..... 33

5.2.1 Material und Methoden ..... 33

5.2.2 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben ..... 35

5.2.3 Laboruntersuchungen spektralselektiver Temperaturversuche ..... 36

5.2.4 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben und kombinierten Spektren ..... 37

5.2.5 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben über MOMO-Schichtstapel ..... 38

5.2.6 Laboruntersuchungen mit Mischungen aus zwei diskreten Einzelfarben ..... 39

5.2.7 Versuche mit PV-Filter-Dummy Z47 ..... 40

5.2.8 Spektralselektive Freilandversuche mit Lee-Farbfiltern ..... 42

5.2.9 Photosynthetische Effizienz ..... 43

5.2.10 Spektralselektiver Aufbau von Fettsäuren ..... 44

5.2.11 Spektralselektive Kultivierung und Pigmente ..... 48

**6 Zusammenfassung ..... 50**

# Kurzfassung

Im interdisziplinären Verbundprojekt „HYPP“ haben die Partner SSC GmbH aus Hamburg und das DLR Institut für vernetzte Energiesysteme aus Oldenburg zusammen an der Realisierung eins Hybrid-Systems gearbeitet, das eine simultane Nutzung des Sonnenlichtes zur Produktion von Strom und Biomasse in Form von Algen ermöglicht. Ziel des Projektes war es, einen bereits etablierten Photobioreaktor, der als Fassadenelement in Gebäude integriert werden kann, mit einer neuen Art von teiltransparenten Solarzellen auszustatten und ihren Einfluss auf die Biomasseproduktion zu untersuchen. Die Grundlage für diese Idee bildet die Absorption von Chlorophyll, das in Algen und Pflanzen dafür sorgt, dass die Energie des Lichts zur Bildung der Biomasse umgesetzt wird. Das grüne Chlorophyll absorbiert dabei zu großen Teilen blaues und rotes Licht. Somit steht das grüne Licht zur Produktion von Strom zur Verfügung. Die Aufgabe des Projektpartners DLR Institut für vernetzte Energiesysteme war es daher, eine Solarzelle zu entwickeln, die rotes und blaues Licht passieren lässt, während grünes und infrarotes Licht zur Stromproduktion genutzt werden kann. Eine derartige Solarzelle wird als spektralselektiv bezeichnet.

Als Grundlage für eine derartige Solarzelle diente die am DLR - Institut für vernetzte Energiesysteme entwickelte Dünnschicht-Germanium-Solarzelle, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Sie besteht aus einem sehr dünnen Germanium-Absorber und weiteren Schichten, die zum Ableiten des elektrischen Stroms benötigt werden. Das Besondere an dieser Solarzelle ist, dass aufgrund der extrem geringen Dicke von nur 100 Atomlagen und der besonderen optischen Eigenschaften der verwendeten Materialien das Licht in der Solarzelle „eingefangen“ wird. Dadurch passiert das Licht nicht nur einmal den Absorber, sondern mehrmals, was zu einer erhöhten Stromproduktion führt. Während des Projektes konnte die Umwandlungseffizienz dieser Solarzellen-Technologie auf 5 % gesteigert werden.

Um die Solarzelle nun dazu zu befähigen, nur das grüne Licht zu absorbieren und die anderen Farben durchzulassen, wurde erfolgreich ein neuartiger Rückreflektor entwickelt. Dieser besteht aus zwei sehr dünnen - und daher transparenten - Silberschichten, die durch eine transparente, leitfähige Schicht (TCO) getrennt sind. Ein zweites TCO schützt die äußere Silberschicht. Durch gezielte Abstimmungen der optischen Eigenschaften und Schichtdicke in dem Schichtstapel kann eingestellt werden, welche Lichtfarben den Reflektor passieren. Durch gezielte Optimierung der Herstellungsprozesse konnte für den Reflektor eine Transmission von 50 % des blauen und 60 % des roten Lichtes erreicht werden, während grünes und infrarotes Licht reflektiert wird und damit zur Stromproduktion beiträgt.

Im nächsten Schritt konnte dieser neue Reflektor erfolgreich in den Schichtstapel der Solarzelle integriert werden. Das grüne und infrarote Licht wird in der Kavität „eingefangen“, während das blaue und rote Licht die Solarzelle passiert und somit für das Algenwachstum bereitsteht. Nach weiteren Anpassungen im gesamten Schichtstapel konnte für eine derartige Solarzelle eine Transmission im blauen Licht von 20 % und im roten Licht von 60 % erreicht werden. Die Umwandlungseffizienz von Licht zu Strom beträgt in diesem teildurchlässigen Fall zwischen 1,6 % und 2,5 %. Eine höhere Effizienz kann durch Anpassungen der Schichtdicken erreicht werden, jedoch geht dies auf Kosten des transmittierten Lichts.

Zur Verbesserung der Transparenz der Solarzelle mussten einige Schichten in der Solarzelle weiter verbessert werden. Silizium-Schichten, die zur Extraktion des elektrischen Stroms benötigt werden, absorbieren einen Teil des Lichts, ohne dass dieser zur Stromgewinnung genutzt werden kann. Daher wurden Schichten aus alternativen Materialien entwickelt und der Einfluss aller Herstellungsparameter genau untersucht. Dabei konnten Siliziumcarbid-Schichten gefunden werden, die weniger Licht absorbieren und dennoch zur Stromextraktion eingesetzt werden können. Somit kann auf der n-Seite der Solarzelle das Silizium durch Siliziumcarbid ersetzt werden. Auf der p-Seite kann das Silizium durch eine dünne Schicht aus Molybdänoxid (MoOx) ersetzt werden. Hierbei konnte in Einzelschichten der Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Absorption gezeigt werden.

Es konnte im Vergleich zum Silizium eine deutliche Reduktion der Absorption in den Einzelschichten erreicht werden. Um die elektrische Funktionalität der neuen Schichten zu untersuchen, wurden diese in die Germanium-Solarzelle eingebaut. Es konnte gezeigt werden, dass diese modifizierten Zellen funktionieren, jedoch mit unerwartet verminderter elektrischer Leistung von nur 2 %. Es besteht an dieser Stelle somit weiterer Entwicklungsbedarf, um die Stromextraktion mit den neuen Materialien zu optimieren.

Im letzten Schritt wurden neue Siliziumcarbid- und Molybdänoxid-Schichten in der transparenten Version der Solarzelle verbaut, um den Vorteil in der Absorption zu untersuchen. Es konnte die Transmission für blaues Licht im Vergleich zu einer Solarzelle mit Silizium-Schichten von knapp 10 % auf fast 20 % erhöht werden. Für das rote Licht konnte entgegen den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen keine Verbesserung nachgewiesen werden. Es besteht an dieser Stelle somit ebenso weiterer Entwicklungsbedarf, um die optischen Eigenschaften des Gesamtsystems zu optimieren.

Weiterhin konnte die monolotische Verschaltung für ein spektralselektives Minimodul gezeigt werden. Dadurch war es erstmals möglich, elektrisch funktionierende PV-Module von 7 x 7 cm herzustellen, die jedoch nur einen sehr geringen Strom und damit auch nur eine Effizienz von 0,6 % aufwiesen.

Zur Abstimmung der semitransparenten PV auf die Bioreaktoren wurden bei der SSC GmbH umfassende Untersuchungen an der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* durchgeführt. Zunächst wurde dabei, ausgehend von den Absorptionsmaxima im Photosynthesepigment Chlorophyll, angenommen, dass vorwiegend das rote und das blaue Licht für die Algen relevant sind. Das grüne Licht, so wurde ferner angenommen, hat eine untergeordnete Bedeutung für die Biomassenproduktion in Mikroalgen. Zur Überprüfung dieser Annahmen wurden Versuche mit diskreten Lichtspektren im Labor durchgeführt. In diesen Versuchen wurden Rotlicht, Grünlicht und Blaulicht sowie das ungefilterte Spektrum (Weißlicht) miteinander verglichen. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, dass mit Weißlicht unter allen Bedingungen immer die höchste Biomassenproduktion erzielt werden konnte. Demgegenüber war die Biomassenausbeute bei Bestrahlung mit Rotlicht um ca. 30 % reduziert. Die Bestrahlung mit dem blauen Spektralbereich resultierte in der geringsten Biomassenproduktion. Dabei wurden, abhängig von der Strahlungsintensität, nur etwa 30 bis 50 % der Ergebnisse von Weißlicht erzielt. Die ursprüngliche Annahme, wonach Grünlicht eine untergeordnete Rolle bei der Algenphotosynthese spielt, hat sich nicht bestätigt. Insbesondere unter den Bedingungen von hohen Strahlungsintensitäten und hoher Biomassenkonzentrationen wurden mit diesem Spektralbereich sogar die höchsten Werte von allen Teilspektren erzielt. Insgesamt schwankten die erreichten Biomassenproduktionen mittels Grünlicht zwischen Werten bei ca. 30 % (Schwachlichtbedingungen) und 80 % (Starklichtbedingungen) von Weißlicht. Weitere Laboruntersuchungen mit distinkten Einzelspektren bestätigten diese Ergebnisse. Es wird angenommen, dass die schwach absorbierten Wellenlängen tiefer in die Algensuspension eindringen können. Dadurch ergibt sich eine günstigere Verteilung der Lichtenergie in der Algenlösung und eine effizientere Nutzung der Lichtenergie[1]. Diese Laborergebnisse wurden später bei den Freilanduntersuchungen in den Außenanlagen der SSC GmbH bestätigt.

Im weiteren Verlauf wurden mehrere kombinierte Spektren an den Algen im Labormaßstab getestet. In diesen Versuchen zeigte sich eine hohe photosynthetische Effizienz bei den Experimenten mit dem MOMO-Schichtstapel Z47. In diesem Fall wurde ein hoher Anteil Rotlicht und Gelblicht (570 – 700 nm) sowie ein geringer

[1] M. D. Ooms, P. J. Graham, B. Nguyen, E. H. Sargent & D. Sinton. (2017). Light dilution via wavelength management for efficient high-sityphotobioreactors. Biotechnology and bioengineering, 114(6), 1160-1169.
T. De Mooij, G. de Vries, C. Latsos, R. H. Wijffels & M. Jansse. (2016). Impact of light color on photobioreactor productivity. Algal research, 15, 32-42.
E. R. Mattos, M. Singh, M. L. Cabrera & K.C. Das (2015). Enhancement of biomass production in Scenedesmus bijuga high-density culture using weakly absorbed green light. Biomass and Bioenergy, 81, 473-478.

Anteil Blaulicht transmittiert. In diesen Versuchen konnten erstmals mit Teilspektren vergleichbar hohe photosynthetische Effizienzen wie mit Weißlicht erzielt werden. Der hohe Rotlichtanteil und die zusätzliche Transmission von geringen Mengen Blaulicht und Gelblicht bewirken eine bessere photosynthetische Effizienz. Auch wenn monochromatisches Blaulicht zu einer niedrigen photosynthetischen Effizienz führt, wirkt eine zusätzliche Supplementierung von Blaulicht aktivierend auf den Metabolismus der Algen. Dies wäre eine Erklärung für die höheren Effizienzen von kombinierten Spektren und von Weißlicht gegenüber den Teilspektren. Einen Hinweis auf diese Annahme liefert die Analyse der Algenwertstoffe.

Es konnte bei der Untersuchung der Fettsäuren in *A. obliquus* ein Einfluss der Lichtspektren auf die Fettsäurekomposition entdeckt werden. Der prozentuale Anteil ernährungsrelevanter ungesättigter Fettsäuren in den Algen war signifikant gegenüber Rotlicht erhöht, wenn zusätzlich Licht unterhalb von 500 nm supplementiert wurde. Dies war der Fall bei Weißlicht, Blaulicht und Grünlicht. Ferner bewirkt die Supplementierung von Blaulicht auch eine Verringerung des prozentualen Anteils von trans-Fettsäuren. Diese Fettsäureisomere werden in der Ernährungsphysiologie mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit assoziiert[2]. Die Daten legen eine wichtige physiologische Funktion des blauen Spektralbereichs für den Algenstoffwechsel nahe. Hinsichtlich der spektralen Vorgaben für das Hybridsystem ist daher eine hohe Transmission von Rotlicht mit Gelblicht (550 – 700 nm) bei gleichzeitiger Teilsupplementierung von Licht von etwa 480 nm optimal. Dadurch kann die Biomassenproduktion und die Wertstoffproduktion in den Algen im Hybridsystem maximiert werden. Dies wurde auch nochmals durch die Untersuchungen mit dem MOMO-Schichtstapel Z47 bestätigt, der diese spektrale Selektivität aufweist (Abb. 26). Aufgrund des vergleichsweisen engen phylogenetischen Verwandtschaftsverhältnisses der verwendeten Algenart lassen sich diese Daten womöglich auch auf Landpflanzen übertragen. Die generierten Daten liefern daher einen wichtigen ersten Anhaltspunkt für eine Anwendung des Hybridsystems an Gewächshäusern.

[2] S. K. Gebauer, T. L. Psota, & P. M. Kris-Etherton. (2007). The diversity of health effects of individual trans fatty acid isomers. Lipids, 42(9), 787-799.

**Vorteile des neu entwickelten Photosynthese PV-Hybridsytems**

Grundsätzlich ist festzustellen, dass durch eine Kombination von Pflanzenwachstum mittels Photosynthese und einem PV-System der Wirkungsgrad der Nutzung von Sonnenlicht potenziell um den Betrag der Stromgewinnung erhöht wird. Berücksichtigt man, dass die Photonenflussdichte im Spektralbereich 550 bis 700 nm deutlich höher als im kürzerwelligen Bereich ist, kann mit der neu entwickelten Dünnschicht-PV nicht nur bis zu 60 % der photosynthetisch aktiven Strahlung für die Biomasseproduktion nutzbar werden, sondern auch das Farbspektrum mit der höchsten photosynthetischen Effizienz, woraus sich Lichteinbußen von nur ca. 30% errechnen. Für die Photovoltaik ergeben sich Lichteinbußen von ca. 50 %, womit durch weitere Optimierung der Schichtstapel eine Effizienz in der Stromerzeugung von 4 % erreicht werden kann. Damit wäre die neu entwickelte Germanium-PV sowohl in der Effizienz zur Stromerzeugung als auch in der Transparenz den am Markt befindlichen a-Si-PV-Zellen deutlich überlegen, die nur Transparenz über den gesamten Spektralbereich von maximal 30% und eine Effizienz in der Stromerzeugung von 2,8 % erreichen[3].

Da die PV-Dünnschichten unmittelbar auf die Glasflächen aufgebracht werden können, würden Glasfassaden bereits das Trägersystem darstellen, was eine entsprechend breite Palette an Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Für diese Anwendung spricht, dass die inneren Glasflächen des PBR einen mit Argon gefüllten Zwischenraum begrenzen, was eine Verkapselung der PV-Schicht obsolet macht. Darüber hinaus könnte der erzeugte Strom direkt dazu genutzt werden, um den Bedarf zum Betrieb der Bioreaktorfassade zu decken. Dazu würde bereits eine Leistung von 20 bis 30 W/m$^2$ ausreichen, was bei einer Sonneneinstrahlung von 1000 W/m$^2$ einem PV-Wirkungsgrad im unteren einstelligen Prozentbereich entspricht. Da der Stromverbrauch des PBR mit der Lichtstärke steigt, sind die Kurvenverläufe von Stromproduktion und -verbrauch synchron, was dazu führt, dass kein Strom zwischengespeichert werden muss. Dies ist für die Eigennutzung des PV-Stroms von großem Vorteil. Im Allgemeinen führt die zeitversetzte Erzeugung und Nutzung von Solarstrom zu komplexen Problemen intelligenter Zwischenspeicherung. In dem integrierten Hybridsystem hingegen würde der Strom tatsächlich dann erzeugt werden, wenn er auch vor Ort gebraucht wird.

[3] https://www.onyxsolar.com

# 1 Ausgangspunkt und Zielstellung

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsverbundes wurde im Projekt HYPP ein semitransparentes Photovoltaikmodul für ein gebäudeintegriertes **Hy**bridsystem aus **P**hotosynthese und **P**hotovoltaik (HYPP) zur komplementären Nutzung des Sonnenlichts entwickelt. Damit sollte die bestehende Photobioreaktor-Technologie zur Produktion von Mikroalgen um eine semitransparente Photovoltaik (PV)-Beschichtung weiterentwickelt werden, die in dem für Pflanzen photosynthetisch nutzbaren Spektralbereich („PAR-Bereich") zwischen 650 nm und 710 nm hoch durchlässig ist und die kurzwelligeren (<650 nm) und langwelligeren Bereiche (>710 nm) zur Stromerzeugung nutzt. Mit diesem neu zu entwickelnden Hybridsystem sollte eine höhere Lichtkonversionseffizienz erreicht werden, da zusätzlich zu einem ungestörten Pflanzenwachstum Strom produziert wird. Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwieweit mit bestimmten Lichtspektren die Produktion von bioaktiven Stoffwechselprodukten (z. B. Speicherstoffe, Pigmente, Wirkstoffe) beeinflusst werden kann.

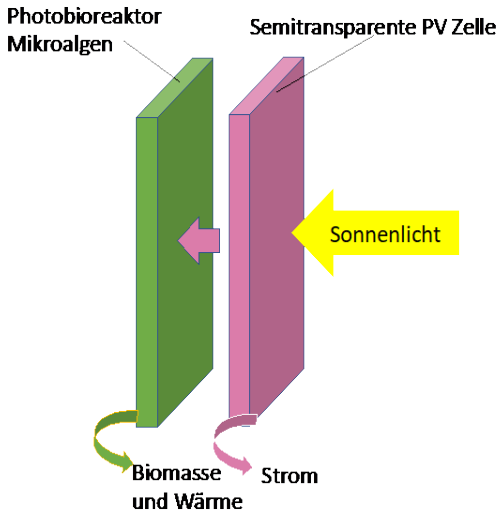



Abbildung 1. Aufbau eines Hybridsystems aus Photobioreaktor und semitransparenter PV-Zelle zur Erzeugung von Biomasse und Strom. Eigene Darstellung.

Ausgangspunkt für dieses zu entwickelnde Hybridsystem waren plattenförmige Photobioreaktoren der SSC GmbH. Sie wurden im Jahr 2013 im BIQ – Das Algenhaus am Standort Hamburg-Wilhelmsburg auf einer 200 qm großen Fassadenfläche realisiert. Seit dieser Zeit werden sie als Bioreaktorfassade erfolgreich betrieben. Mit dieser wird Wärme und Biomasse mit einer Konversionseffizienz von 38 bzw. 8 % produziert, wobei die Wärme weitgehend direkt, d. h. ohne Speicherung für die Versorgung des Gebäudes mit Warmwasser und Heizung genutzt wird[4]. In HYPP sollten diese um eine spektralselektive Dünnschicht-PV für die Produktion von Strom erweitert werden. Anwendungsgebiete für solch ein Hybridsystem aus Strom, Wärme und Biomasse sind Gebäudefassaden, die durch die etablierten PV-Systeme kaum nutzbar sind und erstmals als energieproduzierende Flächen voll erschlossen werden könnten. Ferner kann die mit dem Pflanzenwachstum kompatible PV-Komponente auch in Gewächshäusern, Wintergärten etc. zum Einsatz kommen.

[4] M. Kerner, T. Gebken, , I. Sundarrao, S. Hindersin, D. Sauss.. 2019. Development of a control logic to cover the demand for heat in a building with algae production in a bioenergy facade. Energy and Buildings 184: 65-71

# 2 Grundlagen

## 2.1 Bioenergiefassade

Im Rahmen der Internationalen Bauausstellung 2013 in Hamburg[5] wurde von der Firma SSC GmbH eine 200 qm große Bioreaktorfassade an einem Wohngebäude, dem sogenannten BIQ - Das Algenhaus realisiert, mit der, eingestrahltes Tageslicht in Algen-Biomasse und Wärme konvertiert wird. Grundlagen der Bioreaktorfassade sind eine Anlagen- und Verfahrenstechnik sowie spezielle, thermisch isolierte Photobioreaktoren aus Glas, die in den Jahren 2008 bis 2012 von der SSC GmbH in Kooperation mit verschiedenen Unternehmen und norddeutschen Forschungseinrichtungen entwickelt wurden[6].

Eine Bioenergiefassade besteht aus Paneelen, den sogenannten Bioreaktoren[7]. Diese sind plattenförmig und bestehen aus einem 4-Scheiben-Glasaufbau (Abb. 2). Die beiden inneren Glasscheiben umschließen dabei einen 1 cm breiten Hohlraum, in dem Mikroalgen in wässriger Lösung kultiviert werden (sog. Kulturmedium). Zur thermischen Isolation wird der Bioreaktor, wie bei einem Isolierglasfenster, durch außenliegende Glasscheiben, die jeweils einen 1 cm dicken mit Luft gefüllten Scheibenzwischenraum begrenzen (Abbildung 2 - zeigt nur einen Scheibenzwischenraum). Der gesamte Glasaufbau wird im Falle des BIQ Das Algenhaus durch einen Aluminium Klemmrahmen zusammengehalten. Im Rahmen einer zwischen 2016-2018 erfolgten Weiterentwicklung des Bioreaktors wurde die Dichtung über den Klemmrahmen durch eine vollständige Verklebung ersetzt. Dieser besser adaptierte Bioreaktor bietet die Möglichkeit einer Integration des Bioreaktors in eine kommerzielle Fassadenkonstruktion und somit nicht nur den Einsatz in einem Gebäude als Sekundär- sondern auch als Primärfassade.

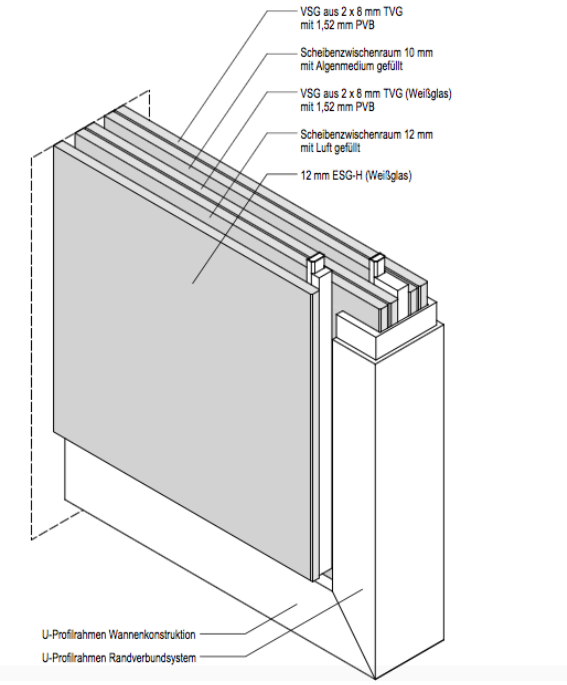



Abbildung 2. Schematischer Aufbau eines Bioreaktors aus Glas. Eigene Darstellung

Während der geklebte Bioreaktor eine Höhe und Breite von 3 x1,3 m aufweist, ist das Modell am BIQ mit H 3 x B 0,55 deutlich kleiner. Am BIQ sind 129 Reaktoren an den Südost- und Südwestseiten des Gebäudes als sogenannte hinterlüftete Fassade angebracht. Diese Bioreaktoren sind mit Wasser und Nährstoffen gefüllt und darin produzieren Mikroalgen mit dem einfallenden Sonnenlicht Biomasse (sog. Photosynthese). Die photoaktive Fläche der Bioenergiefassade am BIQ beträgt 170 m$^2$. Das Sonnenlicht, das nicht von den Algen genutzt wird, wird physikalisch wie bei der Solarthermie in Wärme umgewandelt. Die Leistungsfähigkeit dieser Bioenergie-

[5] www.iba-hamburg.de

[6] Hinterlüftete Fassadenkonstruktion aus Bioreaktoren (2010-2012): SF-10.08.18.7-10.30

[7] Europäisches Patent Nr. EP 2 228 432 A1. Bioreaktor und Verfahren zum Betrieb eines Bioreaktors.
Europäische Patentanmeldung Nr. 10153388.3. Fassadenelement, Fassadenkonstruktion und Gebäude.

fassade errechnet sich aus der Effizienz der Konversion von Licht in Biomasse und Wärme, die in Summe 48 % beträgt, wovon 10 % auf die Biomasse und 45 % auf die Wärme entfallen. Damit ist die Bioreaktorfassade durchaus konkurrenzfähig zur gängigen Photovoltaik und Solarthermie, die Effizienzen von 12-15 % bzw. 60-65 % aufweisen. Im Rahmen des Betriebs der Bioenergiefassade wurde allerdings im Rahmen eines von der Zukunft Bau geförderten Monitoringprojektes festgestellt, dass die Nutzung der Wärme aus der Fassade für die Versorgung des Gebäudes nicht optimal ist, da ein Großteil über lange Zeiträume im Erdreich zwischengespeichert werden muss, was zu großen Verlusten führt[8]. Zur Lösung dieses Problems erfolgte in einem weiteren Forschungsprojekt die Entwicklung und Testung einer Anlagen-und Steuerungstechnik für eine speicherfreie Nutzung der Wärme aus einer Bioreaktorfassade[9].

## 2.2 Biomasse und Wertstoffproduktion mit Mikroalgen

Grundsätzlich nutzen photoautotrophe Organismen (Mikroalgen, Blaualgen und höhere Pflanzen) in dem Prozess der Photosynthese das Sonnenlicht als Energiequelle und bauen damit aus $CO_2$ und Nährstoffen organische Substanzen, die sogenannte Biomasse, auf. Die Photosysteme in den Pflanzenfarbstoffen Chlorophyll a und b der Mikroalgen entsprechen denen der höheren Pflanzen. Die Absorptionsspektren dieser Chlorophylle sind in Abb. 3 dargestellt. Wie darauf zu ersehen, weisen die photosynthetisch aktiven Pigmente Chlorophyll a und b zwei ausgeprägte Maxima bei ca. 430 nm und 660 nm auf. Daraus wurde zunächst geschlossen, dass die Algen vornehmlich dieses Licht in der Photosynthese für den Aufbau von organischer Substanz (Biomasse) nutzen und damit besser wachsen als mit dem übrigen Lichtspektrum

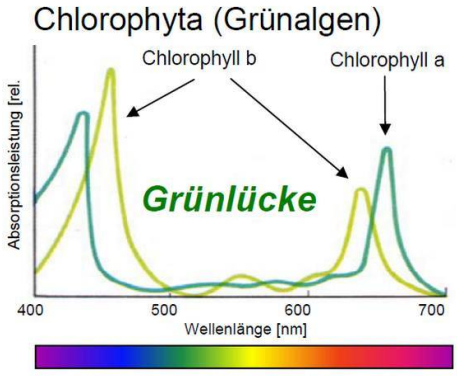



Abbildung 3. Absorptionsspektren von Chlorophyll a und b in Grünalgen. Eigene Darstellung

Ein weiterer Aspekt der Lichtfarbe betrifft seine Wirkung auf den Stoffwechsel von Pflanzen. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen, gibt es eine Reihe von Pigmenten, die über definierte Wellenlängen angeregt werden und Stoffwechselfunktionen steuern.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes HYPP die Auswirkungen einer spektralselektiven Beschattung bzw. einer Veränderung der Verhältnisse diskreter Spektralanteile auf das Wachstum und die Stoffwechselaktivität an Mikroalgen erforscht. Mikroalgen sind dafür optimale Testorganismen, da diese die gleichen Photosyntheseapparate wie höhere Pflanzen besitzen und damit die Ergebnisse unmittelbar übertragbar sind. Darüber hinaus können mit Mikroalgen in wesentlich kürzerer Zeit und im kleineren Maßstab als mit höheren Pflanzen Wachstums- und Produktionsversuche durchgeführt werden. Dies ermöglichte im Rahmen von HYPP auf der Basis von Laborversuchen an Mikroalgen die Entwicklung der Solarzellen und Einzelmaterialien so auszurichten und zu optimieren, dass diese das Pflanzenwachstum möglichst nicht inhibieren bzw. deren Stoffwechsel gezielt auf eine Bildung von hochwertigen Metaboliten ausgerichtet werden kann. Für die Untersuchungen wurde die Grünalge Acutodesmus obliquus ausgewählt, da mit diesen in nördlichen Breiten die höchsten Wachstumsraten und hohe Produktionen an ernährungsphysiologisch relevanten ungesättigten Fettsäuren erzielt werden können.

[8] J. Wurm, M. Pauli, M. Kerner, S. Hindersin, S. Krümmel, I. Breckner, M. Frechen, T. Sengewald. 2015. Monitoring Fassadenkonstruktion aus Photobioreaktoren am Pilotprojekt BIQ auf der IBA 2013 in Hamburg. Projekt Zukunft Bau 2013-2015, Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-13.06.

[9] I. Sundarrao, S. Hindersin, M. Kerner. 2018. Entwicklung und Testung der Anlagen- und Steuerungstechnik für eine speicherfreie Nutzung der Wärme aus einer Bioreaktorfassade in einem Wohnhaus. Projekt Zukunft Bau 2016-2018. Aktenzeichen SWD-10.8.18.7-16.05

Tabelle 1. Übersicht über die Wirkung von Licht über Photorezeptoren auf den Stoffwechsel von Pflanzen. Eigene Darstellung

| Name Pigment | Wellenlänge | Stoffwechselfunktion/Biosynthese | Nachweis an Spezies |
|---|---|---|---|
| Phytochrome | 660 nm | Der Rotlichtanteil reguliert die Photomorphogenese | *Chloroplastida* [10] |
| Violett/Rot Rezeptor | 450nm, 644 nm | Inhibition der Chlorophyll-Synthese und Stimulation des Zellwachstums | *Scenedesmus obliquus*[11] |
| Phycobilisome | 720 nm (far-red) | Energietransfer-Regulation von Phycolisisomen zum Photosystem I | *Galdieria sulphuraria*[12] |
| Phytochrome | 660 nm und 720 nm (far-red) | Erhöhter 720 nm Anteil induziert Carotenoid (Wertstoff)-Akkumulation und inhibiert die Zellteilungsrate | *Dunaliella bardawil*[13] |

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes HYPP die Auswirkungen einer spektralselektiven Beschattung bzw. einer Veränderung der Verhältnisse diskreter Spektralanteile auf das Wachstum und die Stoffwechselaktivität an Mikroalgen erforscht. Mikroalgen sind dafür optimale Testorganismen, da diese die gleichen Photosyntheseapparate wie höhere Pflanzen besitzen und damit die Ergebnisse unmittelbar übertragbar sind. Darüber hinaus können mit Mikroalgen in wesentlich kürzerer Zeit und im kleineren Maßstab als mit höheren Pflanzen Wachstums- und Produktionsversuche durchgeführt werden. Dies ermöglichte im Rahmen von HYPP auf der Basis von Laborversuchen an Mikroalgen die Entwicklung der Solarzellen und Einzelmaterialien so auszurichten und zu optimieren, dass diese das Pflanzenwachstum möglichst nicht inhibieren bzw. deren Stoffwechsel gezielt auf eine Bildung von hochwertigen Metaboliten ausgerichtet werden kann. Für die Untersuchungen wurde die Grünalge Acutodesmus obliquus ausgewählt, da mit diesen in nördlichen Breiten die höchsten Wachstumsraten und hohe Produktionen an ernährungsphysiologisch relevanten ungesättigten Fettsäuren erzielt werden können.

## 2.3 Germanium-Dünnschicht-Photovoltaik (PV)

Hydrogenisiertes amorphes Germanium (a-Ge:H) wurde aufgrund seines besonders hohen Absorptionskoeffizienten bereits vor vielen Jahren als mögliches Absorbermaterial für den Einsatz in Dünnschichtsolarzellen vorgeschlagen[14,15,16,17,18]. Diverse Abscheideverfahren wurden bereits untersucht, um eine Materialqualität zu

[10] A. Tretyn, J. Wisniewska, Postepy Biochem. 42 (1996) 57.

[11] J. Thielmann, P. Galland, Planta 183 (1991) 340.

[12] I. N. Stadnichuk, A. A. Bulychev, E. P. Lukashev, M. P. Sinetova, M. S. Khristin, M. P. Johnson, A. V. Ruban, Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics 1807 (2011) 227.

[13] M. P. Sánchez-Saavedra, C. Jiménez, F. L. Figueroa, Physiologia Plantarum 98 (1996) 419.

[14] W. A. Turner, S. J. Jones, D. Pang, B. F. Bateman, J.H. Chen, Y.-M. Li, F.C. Marques, A. E. Wetsel, P. Wickboldt, W. Paul, J. Bodart, R. E. Norberg, I. El Zawawi, M. L. Theye, J. Appl. Phys. 67 (1990) 7430.

[15] W. Kusian, E. Günzel, R.D. Plättner, Sol. Energy Mater. 23 (1991) 303–311.

[16] F. H. Karg, B. Hirschauer, W. Kasper, K. Pierz, Sol. Energy Mater. 22 (1991) 169–183.

[17] W. Kasper, R. Plättner, J. Eichmeier, J. Non. Cryst. Solids. 137-138 (1991) 799–802.

[18] T. Drüsedau, D. Pang, P. Wickboldt, J. Non. Cryst. Solids. 164-166 (1993) 11–14.

erreichen, die den Einsatz in Solarzellen ermöglicht. Hierbei sind Elektrodenzerstäubung (Sputtern) und plasmagestützte Gasphasenabscheidung (PECVD) die wohl meistverbreiteten Methoden[19]. Dabei stellte sich heraus, dass Verfahren, die zu hohem Ionenbombardement der aufwachsenden photoaktiven Schichten führen (z.B. remote ECR-PECVD, kathodische PECVD, Sputtern), typischerweise die besten Materialeigenschaften liefern. Geringes Ionenbombardement, welches typisch für sogenannte anodische PECVD-Verfahren ist, führt dagegen zu inhomogenen Filmen mit hohen Defektdichten. Insbesondere zeigte ein direkter Vergleich kathodischer und anodischer PECVD im selben Reaktor eine zehnmal höhere Photoleitfähigkeit im kathodisch abgeschiedenen Material[20].

Dennoch wurden bisher vergleichsweise wenige Studien veröffentlicht, die sich tatsächlich mit der Anwendung dieses Materials in Solarzellen beschäftigen. Ein Grund hierfür ist, dass typische a-Ge:H-Schichten auch trotz der oben genannten Studien noch vergleichsweise ungünstige elektronische Transporteigenschaften aufweisen. Dies führt bei Verwendung üblicher Absorberdicken (typischerweise einige 100 nm) zu starken Verlusten durch eine schnelle Rekombination photogenerierter Elektron-Loch-Paare. Daher wurden bis kürzlich mit a-Ge:H-Absorbern selbst unter Verwendung von kathodischer PECVD Solarzelleneffizienzen von nur maximal etwa 3.5 % erreicht[9,21,22].

Studien des DLR-Institutes für vernetzte Energiesysteme konnten jedoch zeigen, dass die Eigenschaften von a-Ge:H-Solarzellen deutlich verbessert werden können, indem die verwendete Absorberdicke drastisch reduziert wird. Durch geeignete Ausnutzung optischer Resonanzen (sogenannte Fabry-Pérot-Resonatoren[23]) ist es möglich, auch mit Absorberdicken von weniger als 25 nm hohe Stromdichten zu erzielen. Dies wirkt sich positiv auf die Extraktion der photogenerierten Ladungsträger aus[24]. Derartige Resonanzen entstehen zwischen zwei (teildurchlässigen) reflektierenden Schichten. Durch die Resonanzen wird die durch das Licht induzierte elektrische Feldstärke innerhalb des Absorbers signifikant erhöht, was bei konstanter Absorberdicke zu einer verstärkten Absorption führt. Hierdurch war es trotz des Einsatzes der weniger geeigneten anodischen PECVD auf leichte Weise möglich, die Effizienz der Technologie auf bisher etwa 4 % zu steigern.

Die oben erwähnte Ausnutzung optischer Resonanzen in Kombination mit ultradünnen Absorbern in den entwickelten a-Ge:H-Solarzellen hat einen zusätzlichen positiven Nebeneffekt: Licht wird aufgrund der geringen Absorberdicke bei einmaligem Durchlaufen der Absorberschicht nur schwach absorbiert. Erst durch die Reflektivität des Rückkontaktes sowie die teilweise Reflektivität des Frontkontaktes kommt es zur Ausbildung der

[19] B. Ebersberger, W. Krühler, W. Fuhs, H. Mell, Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 1683.
Y. Bouizem, A. Belfedal, J. D. Sib, A. Kebab, L. Chahed, J. Phys. Condens. Matter. 17 (2005) 51495158
T. Kaufman-Osborn, K. M. Pollock, J. Hiltrop, K. Braam, S. Fazzio, J. R. Doyle, Thin Solid Films. 520 (2012) 1866–1871.
C. Godet, I. El Zawawi, M. L. Thèye, M. Gauthier, J. P. Stoquert, Solid State Commun. 74 (1990) 721-725.
W. A. Turner, S. J. Jones, Y. M. Li, D. Pang, A. E. Wetsel, W. Paul, Sol. Cells. 30 (1991) 245–254
P. Wickboldt, S. J. Jones, F. C. Marques, D. Pang, W. A. Turner, A .E. Wetsel, W. Paul, J. H. Chen, Philos. Mag. Part B. 64 (1991) 655–674.
M. Kumru, Thin Solid Films. 198 (1991) 75–84.
T. Drüsedau, B. Müller, A. Scholz, B. Schröder, J. Non. Cryst. Solids. 164-166 (1993) 75–78.
T. Drüsedau, B. Schröder, J. Appl. Phys. 75 (1994) 2864–2875.
F. C. Marques, P. Wickboldt, D. Pang, J.H. Chen, W. Paul, J. Appl. Phys. 84 (1998) 3118.
Y. Bouizem, A. Belfedal, J. D. Sib, L. Chahed, Solid State Commun. 126 (2003) 675–680
A. Belfedal, Y. Bouizem, J. D. Sib, L. Chahed, J. Non. Cryst. Solids. 358 (2012) 1404–1409.

[20] F. Karg, H. Böhm, K. Pierz, J. Non. Cryst. Solids. 114 (1989) 477–479

[21] J. Zhu, V.L. Dalal, M.A. Ring, J.J. Gutierrez, J.D. Cohen, J. Non. Cryst. Solids. 338-340 (2004) 651–654.

[22] E. V. Johnson, P. Roca i Cabarrocas, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 91 (2007) 877–881.

[23] M. S. Ünlü, S. Strite, J. Appl. Phys. 78 (1995) 607

[24] V. Steenhoff, M. Theuring, M. Vehse, K. von Maydell, C. Agert, Adv. Opt. Mater. 3 (2015) 182–186.
V. Steenhoff, A. Neumüller, O. Sergeev, M. Vehse, C. Agert, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 145 (2016) 148–153.
V. Steenhoff, M. Juilfs, M. Vehse, C. Agert, Nano Energy. (2016).
V. Steenhoff, M. Juilfs, R.-E. Ravekes, M. Ahrlich, M. Kellermann, O. Siepmann, M. Vehse, C. Agert, IEEE J. Photovoltaics. (2016).

optischen Resonanz und damit zu einer deutlichen Verstärkung der Absorption. Daher lässt sich durch Verwendung von spektralselektiven Front- und Rückreflektoren eine entsprechend spektralselektive Durchlässigkeit der Zellen erzielen. Dieser Effekt wurde im Rahmen des Projektes HYPP dazu verwendet, Solarzellen mit einer hohen Durchlässigkeit in den für die Photosynthese relevanten Wellenlängenbereichen zu entwickeln, welche gleichzeitig Licht der übrigen Wellenlängen effizient absorbieren.

Spektralselektive reflektierende Elektroden an sich sind im Prinzip bekannt und wurden auch schon bereits erfolgreich für die Herstellung von Solarzellen mit variablem Farbeindruck in Reflektion eingesetzt. Hier kamen Mehrfachschichtsysteme, bestehend aus sich abwechselnden Metall- und Oxid-Schichten, zum Einsatz[25,26,27]. Bisher war es jedoch nicht möglich, in Solarzellen mit anorganischen Absorbermaterialien eine hohe Transmission in einem schmalbandigen Wellenlängenbereich bei gleichzeitig starker Absorption höherer Wellenlängen zu erzielen. Dies liegt darin begründet, dass in anorganischen Halbleitern der Absorptionskoeffizient typischerweise zu höheren Wellenlängen abnimmt. Reduziert man also die Absorberdicke derart, dass eine hohe Transparenz bei etwa 650 nm erzielt wird, so führt dies im Normalfall automatisch auch zu einer geringen Absorption höherer Wellenlängen.

[25] M. Theuring, S. Geissendörfer, M. Vehse, K.von Maydell, C. Agert, EPJ Photovoltaics 5, 55205, 2–6 (2014).

[26] M. Theuring, M. Vehse, K.von Maydell, C. Agert, Thin Solid Films 558, 294–297 (2014).

[27] M. Theuring, Light Management in Flexible Silicon Thin Film Solar Cells. (Doktorarbeit, Universität Oldenburg, 2014)

# 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt, die im Folgenden mit den Zielen, Aufgaben und Meilensteinen aufgeführt sind. Der Projektpartner DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme übernahm AP 2 und die SSC Strategic Science Consult GmbH AP 0 und 1. Beide Partner bearbeiteten gemeinsam das AP 3.

**AP0**
**Ziel:** Projektmanagement
**Teilaufgaben**
- Koordination der Arbeitspakete
- Organisation/Leitung von Meetings (alle 6 Monate)
- Supervision der wissenschaftlichen Kohärenz und Qualität der Ergebnisse
- Supervision der Zusammenarbeit/Abstimmung der Experimente
- Abfassung des Abschlussberichtes

**Meilensteine**
M0.1 Koordination der Arbeitspakete und Zusammenarbeit
M0.2 Organisation Meetings
M0.3 Qualitätssicherung

**AP1**
**Ziel:** Erhebung biologischer Kenndaten
**Teilaufgaben**
- Laborversuche zur Beziehung Einstrahlungsspektrum und Biomassezuwachs verschiedener Algenspezies
- Laborversuche zur Beziehung Einstrahlungsspektrum und Wertstoffproduktion von Algenspezies
- Chemische Analyse von Biomasse und Wertstoffen

**Meilensteine**
M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Biomasse/Zusammensetzung
M1.2 Vorgaben für optimale Transmissionsspektren der PV
M1.3 Einfluß von Änderungen im Schichtenaufbau der PV auf Biomasse/Zusammensetzung
M1.4 Leistungsdaten Biomasse für ein Hybridsystem PV- Photosynthese

**AP2**
**Ziel:** Solarzellenentwicklung
**Teilaufgaben**
- Entwicklung selektiv reflektierender Elektrodensysteme
- Materialentwicklung in Einzelschichtexperimenten
- Simulationsgestützte Schichtdickenoptimierung der Einzelschichten in der Zelle
- Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption
- Materialentwicklung in Einzelschichtexperimenten
- Integration in die Solarzelle und Optimierung
- Zellcharakterisierung
- Transmissionseigenschaften
- Absorptionseigenschaften / Quanteneffizienz
- Elektrische Eigenschaften

**Meilensteine**
M2.1 Erste Kenndaten für Solarzelle mit optimiertem Spektralanteile der Transmission

M2.2 Fertigung der PV-Proben für die Algentests
M2.3 Optimierte Solarzelle die auf die Biomasse/Zusammensetzung abgestimmt ist

**AP3**
**Ziel:** Prototypentwicklung und proof of concept
**Teilaufgaben**

- Bau von 30x30 cm PV-beschichteten Glasplatten
- Verkapselung und Verschaltung der PV-Zellen, sowie elektrische Abführungen
- Bestimmung der Leistungsfähigkeit der PV-Prototypen
- Installation und Integration in bestehende Photobioreaktoren auf der Pilotanlage der SSC
- Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Hybridsystems aus PV und Photobioreaktor

**Meilensteine**
M3.1 Bereitstellung der Prototypen
M3.2 Leistungszahlen PV
M3.3 Leistungszahlen Hybridsystem

# 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

## 4.1 Übersicht über die erfolgten Arbeiten

Im Rahmen der PV-Zellenentwicklung fand die Entwicklung und Untersuchung der spektralselektiven Solarzellen statt. Hierzu wurde ein spektralselektiver Reflektor in Form eines Metall/Oxid/Metall/Oxid-Schichtstapels (*MOMO*) entwickelt und untersucht, welcher nur das für die Photosynthese notwendige Licht transmittiert. Dieser wurde in ersten Germanium-Solarzellen erprobt und deren Kenndaten bestimmt. Insgesamt konnten bisher in der Zelle elektrische Umwandlungseffizienzen von etwa 2 % und eine Transmission des photosyntheserelevanten roten und blauen Lichts von 60 % bzw. 20 % gezeigt werden. Um diese Werte weiter zu verbessern, wurden elektronenselektive Schichten mit deutlich erhöhter Transmission entwickelt, welche in weiterführenden Untersuchungen in der Solarzelle erprobt werden sollten. Da sich hierdurch die Transmissionseigenschaften der Solarzelle an diejenigen der MOMO-Reflektoren annähern sollten, wurden zur Durchführung von Algen-Wachstumsexperimenten mehrere Proben mit diesen Reflektoren beschichtet und der SSC GmbH zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der biologischen Untersuchungen wurden spektralselektive Wachstumsversuche im Labor an der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* mit Lichtfiltern (so genannten LEE-Filterfolien) sowie MOMO-Schichtstapeln durchgeführt. Lichtquelle waren Metalldampflampen, mit denen das Sonnenlicht im Spektrum und Intensität simuliert werden konnte (Abb.27). Das Ziel dieser Untersuchungen war es, dass für das Wachstum optimale Transmissionsspektrum mit einer semitransparenten Germanium-Zelle zu identifizieren. Dazu wurde das Gesamtspektrum der Metalldampflampe mit dem über Filter selektierten roten Spektralbereich, dem grünen Spektralbereich und dem blauen Spektralbereich verglichen (Abb.14 a-d). Die Versuche wurden jeweils Photonengleich über den Zeitraum von mindestens 5 Tagen durchgeführt, wobei Photonenflussdichte und die Temperatur variiert wurden. Zusätzlich dazu wurden kombinierte Spektren im direkten Vergleich zueinander getestet. Diese kombinierten Spektren wurden durch ein Streifenmuster unterschiedlicher Filterfolien durchgeführt (Abb.17a und b). Hierbei war das vorrangige Ziel, Erkenntnisse darüber zu erhalten, warum das ungefilterte Spektrum der Metalldampflampe bei allen bisherigen Tests immer zu höherem Algenwachstum führte als bei den getesteten Teilspektren. Darüber hinaus wurden Freilandversuche an den Photobioreaktoren der SSC GmbH in Hamburg Reitbrook sowie Experimente mit spektralselektiven MOMO-Schichtstapel durchgeführt. Die Ergebnisse aus allen Versuchen wurden über die photosynthetische Effizienz des Wachstums miteinander verglichen, was die für den Aufbau von Biomasse (Wachstum) benötigte Photonenmenge (g $mol^{-1}$) beschreibt. Über eine Korrelation von Beleuchtungsintensität und photosynthetischer Effizienz konnten Kausalzusammenhänge für die Unterschiede im Wachstum aufklärt werden. Darüber hinaus wurde auf der analytischen Ebene getestet, wie sich die applizierten Spektralbereiche, unter Berücksichtigung des Parameters Temperatur und Lichtstärke, auf die Produktion von ernährungsrelevanten Fettsäuren und die Photosynthesepigmente in *Acutodesmus obliquus* auswirken.

## 4.2 Ergebnisse und Erreichung der Meilensteine

Die Aufzählung der wichtigsten Ergebnisse erfolgt in der Reihenfolge der Arbeitspakete und zusammen mit den damit erreichten Meilensteinen. Wie daraus zu erkennen ist, wurden fast alle Meilensteine erreicht. Nur die Leistungszahlen eines Hybridsystems im Freiland (M3.3) konnten nicht bestimmt werden, da die Anlagen zur Fertigung der PV-Zellen von 30x30 cm für einen großen Prototyp im Freiland nicht betriebsbereit waren. Aus diesem Grund wurde der Meilenstein M3.3 in Bezug auf das Algenwachstum in Photobioreaktoren der SSC im Freiland mit spektralselektiven Filtern bearbeitet und erreicht. Der für M3.3 eingeplante Personeneinsatz des DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme wurde dafür genutzt, die Effizienz der PV-Zelle, wie nachfolgend beschrieben, konsequent zu verbessern.

### 4.2.1 Spektralselektives Wachstum und Produktion von Wertstoffen

- Algen-Wachstumsvergleich des ungefilterten Lichtspektrums mit den Teilspektren Blau, Grün und Gelb. Es zeigt sich, dass blaues Licht unter allen Testbedingungen eine signifikant niedrigere Biomassenproduktion bewirkt. Rotes Licht führt insbesondere bei geringen Lichtintensitäten und niedrigen Biomassenkonzentrationen zu einem im Vergleich höheren Algenwachstum. Bei höheren Lichtintensitäten und erhöhten Biomassenkonzentrationen wird ein vergleichsweise höherer Biomassenzuwachs mit Grünlicht erreicht. Bei allen getesteten Versuchen wurde allerdings das höchste Wachstum mit Weißlicht gemessen. **(M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Biomasse)**
- Das vergleichsweise erhöhte Wachstum bei Grünlicht lässt sich dadurch erklären, dass dieser Spektralbereich durch Mikroalgen schwächer absorbiert wird als Rot- und Blaulicht. Dies führt in einer Kultur zu größeren Eindringtiefen und damit besseren Lichtausnutzung. Dieser Effekt ist am stärksten bei Starklichtbedingungen, weil dann das Grünlicht effizienter als bei Rot- und Blaulicht für das Wachstum genutzt werden kann, indem ein größerer Volumenanteil der Algensuspension mit moderaten Intensitäten beleuchtet wird, was eine höhere Photosynthetische Effizienz bewirkt. **(M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Biomasse)**
- Algen-Wachstumsvergleich des ungefilterten Lichtspektrums mit 2 Teilspektren sowie kombinierten Lichtspektren. Bei diesen Versuchen zeigten sich keine Wachstumsvorteile der kombinierten Teilspektren gegenüber den einzelnen Spektralbereichen (grün und rot). Der Wachstumsvorteil bei der Weißlichtreferenz blieb weiterhin bestehen. Dies weist darauf hin, dass es bei den Teilspektren gegenüber dem vollen Lichtspektrum in den Algen zu Überanregungseffekten kommt. Im Umkehrschluss kann daraus abgeleitet werden, dass keine metabolischen Effekte für diesen Wachstumsunterschied ursächlich sind und somit dem roten Spektralbereich für das Wachstum eine herausragende Bedeutung zukommt. **(M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Biomasse)**
- Weitere Wachstumstests wurden mittels MOMO Schichtstapel mit einzelnen distinkten Transmissionspeaks im gelben und im blauen Spektralbereich durchgeführt. Bei höheren Photonenflussdichten konnte ein deutlicher Wachstumsvorteil von gelbem Licht um 600 nm gegenüber blauem Licht (470 nm) beobachtet werden. Ähnlich wie bei den Versuchen mit optischen Filterfolien konnte ein vergleichsweise hohes Algenwachstum mit einem schwach durch Chlorophyll-*a* absorbierten Wellenlängenbereich erzielt werden. **(M1.3 Änderungen im Schichtenaufbau)**
- Durch Versuche im Freiland wurden die Laborresultate bestätigt. Auch in den Freilandversuchen konnte die maximale Photosynthetische Effizienz mit Rotlicht erzielt werden, mit vergleichbarem Wachstum im grünen Spektralbereich. **(M3.3 Bestimmung Leistungsfähigkeit des Hybridsystems)**
- Der Vergleich der Photosynthetischen Effizienzen zeigt unter allen Testbedingungen einen niedrigen Wirkungsgrad von blauem Licht. Rotes Licht hat dagegen bei niedrigen Strahlungsintensitäten eine sehr hohe Photosynthetische Effizienz. Grünlicht hat die höchste Photosynthetische Effizienz oberhalb von 50 mol $m^{-2}$ $d^{-1}$, was im Labor bei Dauerbeleuchtung einer Intensität von 500 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ entpricht. Solch hohe Werte werden bei Teilnutzung durch die PV im Hybridsystem in Deutschland allerdings nur an strahlungsintensiven Tagen erreicht. **(M1.4 Leistungsdaten Biomasse für ein Hybridsystem)**
- Die Korrelation zwischen photosynthetischer Effizienz und der Beleuchtungsstärke (d.h. dem Biomasseaufbau pro eingestrahlter Lichtmenge und dem Photonenfluß = eingestrahlte Lichtmenge pro Tag) folgte im untersuchten Beleuchtungsbereich von 10 bis 80 Mol $m^{-2}$ $d^{-1}$ bei den diskreten Lichtfarben Rot und Grün sowie für gemischtes Licht (x) aus Rot und Blau der gleichen logarithmischen Beziehung (- 0,21 ln (x)), wobei die Effizienz mit Zunahme der Beleuchtungsstärke abnahm. Diese Korrelation entsprach im Wesentlichen der für Weißlicht (- 0,18 ln (x)). **(M1.4 Leistungsdaten Biomasse für ein Hybridsystem)**

- Die Korrelation für Blaulicht war ebenfalls logarithmisch, jedoch über den gesamten Beleuchtungsbereich von 10 bis 30 Mol $m^{-2}$ $d^{-1}$ mit einer um ca. 40 % geringeren Effizienz als für Rot und Grün **(M1.4 Leistungsdaten Biomasse für ein Hybridsystem)**
- Das Fettsäureprofil der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* weist einen hohen Anteil an hochungesättigten Fettsäuren auf. Insbesondere die α-Linolensäure (18:3) hat ernährungstechnisch eine herausragende Bedeutung. Diese Fettsäure kann unter bestimmten Bedingungen über 30% des Gesamtfettsäureanteils in den Algen betragen. Die Versuche zeigen, dass kühlere Kultivierungstemperaturen, höhere Strahlungsintensitäten und Anteile kurzwelliger Strahlung, möglichst Grünlicht, die Produktion der hochungesättigten Fettsäuren erhöhen. Gegenüber der Kultivierung mit Rotlicht konnte bei allen Spektren, in denen Grünlichtanteile enthalten waren, ein um bis zu 30% erhöhter Anteil dieser Fettsäuren beobachtet werden. **(M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Zusammensetzung“)**
- Nach Analyse der bisher getesteten Proben aus den spektralselektiven Versuchen konnten keine signifikanten Veränderungen im Pigmentmuster in *Acutodesmus obliquus* festgestellt werden. **(M1.1 Kenndaten für Beziehung Spektralanteile und Zusammensetzung“)**
- Mit dem PV Modul Z47 wurde ein Spektrum erzielt, mit dem ähnlich hohe Wachstumsraten wie mit Weißlicht erzielt werden konnten.
- Da Z47 auch kurzwellige Spektralanteile inkludiert, steigerte dieser Filter auch die Produktion der hochungesättigten Fettsäuren in den Algen und damit die Qualität der Biomasse. **(M1.2 Vorgaben für optimale Transmissionsspektren der PV)**

### 4.2.2 Entwicklung einer Dünnschicht-PV

- Es wurde ein neuartiger Metall/Oxid/Metall/Oxid-Schichtstapel (*MOMO*) mit einer hohen Transmission von > 60 % bzw. > 50 % in den beiden für das Algenwachstum wichtigen Spektralbereichen rot und blau und gleichzeitig hoher Reflektivität von 50-70% in den übrigen Wellenlängenbereichen entwickelt. **(M2.1 Entwicklung selektiv reflektierender Elektrodensysteme)**
- Die Winkelstabilität der Transmission des MOMO-Schichtstapels wurde untersucht, um abschätzen zu können, wie sich die Beleuchtung der Algen über den Verlauf des Tages ändert. Im roten Wellenlängenbereich bleibt die Transmission für einen Einfallswinkel von 40° bei 63 % im Peak.
- Dieser spektralselektive Rückreflektor wurde in ersten Germaniumsolarzellen erprobt. Reflexions- und Transmissionsmessungen zeigen, dass hiermit das für die Photosynthese unwichtige Licht (UV/grün/infrarot) in die Solarzelle zurück reflektiert und dabei aufgrund von Resonanzen effektiv in der Solarzelle absorbiert werden kann. Die für die Photosynthese notwendigen Wellenlängen, insbesondere im roten Bereich, werden dagegen transmittiert (rot: 60 %, blau: 20 %). **(M2.1 Entwicklung selektiv reflektierender Elektrodensysteme Zellcharakterisierung)**
- Zur Bestimmung der elektrischen Solarzellenkenndaten wurden Strom-Spannungskennlinien bestimmt. Wie zu erwarten verringert sich bei Verwendung des MOMO-Rückreflektors die Kurzschluss-Stromdichte der Solarzelle gegenüber einer Referenzzelle mit Silber-Rückkontakt aufgrund der Transmission des blauen und roten Lichts. Die Kenndaten Füllfaktor (*FF*) und Offenklemmenspannung ($V_{OC}$) verändern sich jedoch nicht signifikant, was eine hervorragende elektronische Kompatibilität des neuen Rückreflektors mit dem bestehenden Solarzellenstapel zeigt. Die erreichte Zelleffizienz auf der Basis des Filterstapels Z47 liegt derzeit bei etwa 2 %. **(M2.1 Zellcharakterisierung)**
- Die entwickelten MOMO-Schichtstapel wurden der SSC GmbH zur Durchführung erster Algentests zur Verfügung gestellt, um den Einfluss des veränderten Lichtspektrums auf das Algenwachstum untersuchen zu können. **(M2.2 Proben für Algentests)**
- Anhand der biologischen Leistungsdaten bei einer Exposition der Algen mit Licht, das die MOMO-Schichtstapel durchstrahlten, konnten die Kenndaten für eine optimierte Solarzelle erarbeitet werden, mit denen

sowohl Biomasse als auch Strom optimal gewonnen werden kann **(M2.3 Abstimmung optimierte Solarzelle).**

- Licht, welches in den ladungsträgerselektiven Silizium-Schichten absorbiert wird, kann weder elektrisch noch durch Photosynthese genutzt werden (sog. *parasitäre Absorption*). Daher wurden elektronenselektive Siliziumcarbid-Schichten (µc-$SiC_x$:H(n)) entwickelt, welche durch den Kohlenstoffeinbau eine gegenüber reinem Silizium verringerte Absorption aufweisen. Durch Vermeidung von Absorption in diesen Schichten soll die Transmission des Solarzellenstapels in den für die Algen nutzbaren Spektralbereichen erhöht werden. Gleichzeitig wird hierdurch mehr Licht der übrigen Spektralbereiche für die Nutzung im Germaniumabsorber verfügbar gemacht, was die elektrische Effizienz der Solarzelle erhöht. **(M2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption)**
- Es wurde hierzu eine umfassende Variation der µc-$SiC_x$:H(n)-Herstellungsparameter *Prozessdruck* und *$CH_4$-Fluss* durchgeführt. Anhand der abgeschiedenen Einzelschichten wurde jeweils die optische Bandlücke (als Maß für die Reduktion des Absorptionskoeffizienten) und die elektronische Aktivierungsenergie (als Maß für die Eignung als elektronenselektive Schicht) bestimmt **(M2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption).**
- Hierbei wurde ein Prozessregime ausgemacht, in welchem gleichzeitig die optische Bandlücke von 1.55 eV auf >2.2 eV erhöht wird (d.h. deutlich verbesserte Transmission), während die Aktivierungsenergie auf einem niedrigen Niveau von < 0.1 eV bleibt (d.h. hohe ladungsträgerselektive Leitfähigkeit für Elektronen). Diese Schichten sollten sich daher hervorragend zur Reduktion der parasitären Absorption in der Germanium-Solarzelle eignen und wurden in den folgenden Monaten im Rahmen von AP2 in der Solarzelle erprobt **(M2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption).**
- Für die p-dotierte Seite wurde die ladungsträgerselektive Schicht aus p-a-Si durch Molybdänoxid ($MoO_x$) ersetzt. In der Einzelschichtentwicklung wurde eine deutliche Reduktion des Absorptionskoeffizienten im Vergleich zum p a-Si erreicht. **(M2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption).**
- Die $MoO_x$ Schichten wurden erfolgreich in die Referenzzellen integriert. Die Effizienz der Zellen ist zwar reduziert worden, optisch konnte aber eine Verbesserung erzielt werden. Aufgrund von Limitierungen in der Herstellungstemperatur war eine elektrische Optimierung nicht möglich. Dafür muss der Prozess in Zukunft auf eine Sputteranlage übertragen werden. **(M2.3 Entwicklung ladungsträgerselektiver Schichten mit verringerter Absorption).**
- Es konnte eine Verbesserung der Referenzzelle mit Silberrückkontakt auf 5 % erreicht werden, was der höchsten jemals gemessenen Effizienz für eine auf amorphem Germanium basierenden Solarzelle bedeutet. Beim Übergang von der Referenzzelle tritt derzeit ein Verlust von ca. 2 % auf, sodass das Potential der spektralselektiven Zelle auf 3 % abgeschätzt werden kann. Bei weiterer Optimierung der Dotierschichten müssten weitere Verbesserungen erzielt werden können, da die parasitäre Absorption minimiert werden würde **(M3.2 Leistungszahlen PV).**
- Im Zuge des Projektes konnte ein Prototyp in Form eines Minimoduls gefertigt werden. Alle nötigen Entwicklungen, wie die Laserstrukturierung und Depositionsprozesse wurden erfolgreich abgeschlossen. (M3.1 Bereitstellung der Prototypen).

# 5 Ausführliche Beschreibung der Ergebnisse

## 5.1 Entwicklung einer spektralselektiven Dünnschicht PV Zelle

### 5.1.1 Entwicklung eines spektralselektiven Rückreflektors

Zur Realisierung der spektralen Selektivität der Solarzelle wurde ein neuartiger Rückreflektor entwickelt (siehe Abbildung 4). Er besteht aus zwei dünnen Metallschichten (hier Silber), zwischen welchen sich eine Oxidschicht befindet (hier aluminiumdotiertes Zinkoxid, *AZO*). Zur Verkapselung der zweiten Silberschicht wird eine zweite Oxidschicht verwendet, so dass sich insgesamt die Schichtabfolge Metall/Oxid/Metall/Oxid ergibt (*MOMO*). Alle Schichten werden mittels eines Sputter-Prozesses hergestellt. Durch die teilweise Reflektion von Licht an den beiden Silberschichten entstehen Interferenzen, welche zu einer wellenlängenabhängigen Reflektion und Transmission des Schichtstapels führen. Gleichzeitig dienen die Silberschichten als stromführender Kontakt, so dass die ansonsten üblicherweise verwendete dicke Silberschicht vollständig ersetzt werden kann.

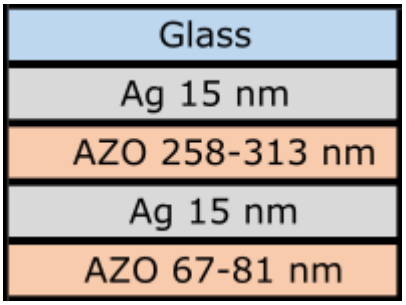



Abbildung 4: Aufbau spektralselektiver Rückreflektor. Eigene Darstellung.

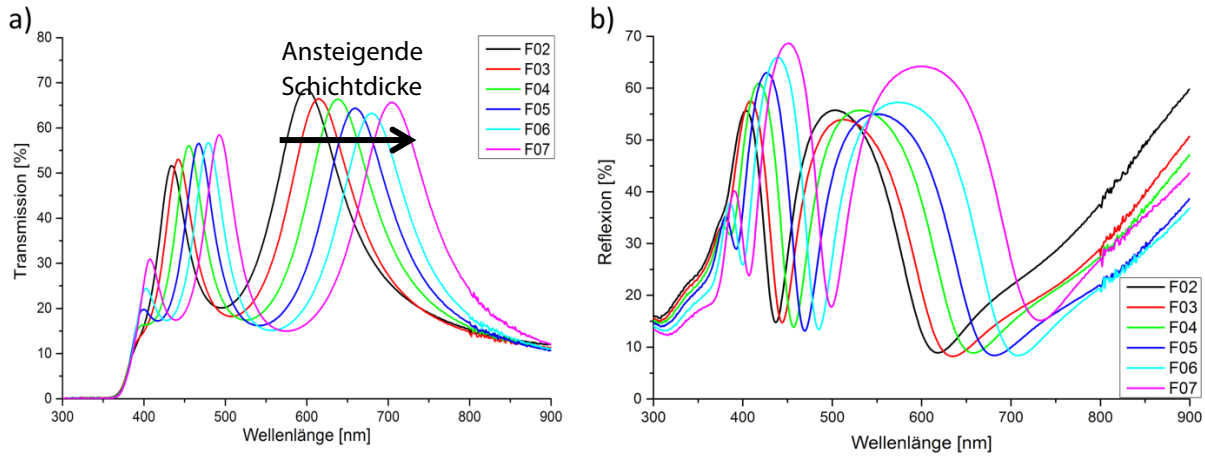



Abbildung 5: a) Transmissions- und b) Reflexions-Spektren unterschiedlicher spektralselektiver MOMO-Reflektoren. Die Schichtdicke wird von 258-313nm und von 67-81nm variiert. Eigene Darstellung.

Abbildung 5 zeigt Transmissions- und Reflexionsspektren von MOMO-Filtern (F02-F10) mit ansteigender Schichtdicken der Oxid-Schicht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Variation der Schichtdicke von 258 auf 313 nm die spektrale Position der Transmissions- und Reflexionsmaxima leicht eingestellt werden kann, was im weiteren Projektverlauf die Optimierung auf einen hohen Überlapp der Transmission mit den Photosynthesepeaks der Algen ermöglicht. Insgesamt zeigt sich mit ansteigender Schichtdicke eine Verschiebung der Transmissionspeaks zu höheren Wellenlängen. Bei Überschreiten einer kritischen Schichtdicke von ungefähr 280 nm ist ein dritter Transmissionspeak festzustellen. Mit Hinblick auf das Absorptionsspektrum von Chlorophyll ist festzuhalten, dass in den für die Photosynthese wichtigen Spektralbereichen um 450 nm (blaues Licht) bzw. 680 nm (rotes Licht) eine hohe Transmission von >60 % (rot) bzw. >50 % (blau) erzielt werden konnte.

Gleichzeitig wird in den übrigen Wellenlängenbereichen eine hohe Reflektivität von 50-70 % erzielt. Bei Nutzung eines solchen Rückreflektors in der Germaniumsolarzelle wird photosynthetisch nutzbares Licht also transmittiert, das restliche Licht jedoch zurück in die Solarzelle reflektiert.

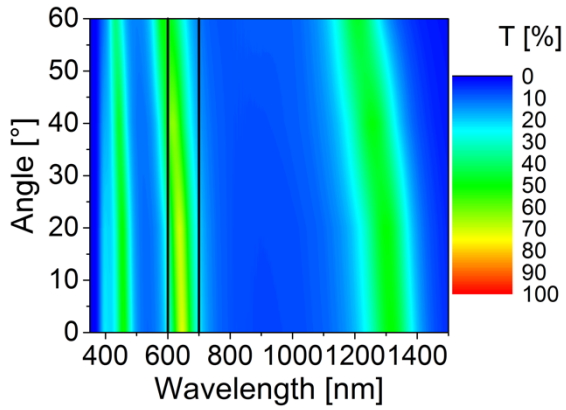



Abbildung 6: Winkelabhängigkeit der Transmission, spektralselektiver MOMO-Reflektoren gemessen in 20° Schritten. Eigene Darstellung.

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit in der Fassade wurden winkelabhängige Transmissionsmessungen durchgeführt. Während der blaue Peak seine Position kaum ändert, ist für den roten Peak ein kleiner Shift zu sehen (Abb. 6). Die Transmission sinkt bei einer Wellenlänge von 650 nm von 71 % bei 0° auf 41 % bei 40°. Das Peakmaximum bei 40° liegt bei einer Wellenlänge von 618 nm bei 64 %. Durch Anpassen der Schichtdicken kann der MOMO auf eine optimale Transmission bei höheren Winkeln mit Hinblick auf die Anforderungen der Algen geeignet optimiert werden.

### 5.1.2 Erste Solarzellen mit MOMO-Rückreflektor

Nach erfolgter Entwicklung des spektralselektiven Rückreflektors wurde dessen grundsätzliche Funktionalität in ersten Germanium-Solarzellen erprobt. Hierzu wurde in einem bestehenden Referenzprozess für die Germaniumsolarzelle der dort verwendete Silber-Rückreflektor durch den MOMO-Schichtstapel ersetzt. Gleichzeitig wurde zum Vergleich im selben Prozess eine Referenzprobe mit Silber-Rückreflektor hergestellt. Um eine ausreichende Transmission in den photosyntheserelevanten Wellenlängenbereichen zu ermöglichen, wurde eine verringerte Germanium-Absorberdicke von nur 5 nm verwendet. Der Solarzellenstapel bestehend aus siliziumbasierten n- und p-Schichten sowie dem Germaniumabsorber. Diese wurden mittels plasmagestützter Gasphasenabscheidung (PECVD) auf ein mit einem AZO-Frontkontakt versehenes Glassubstrat abgeschieden. Abschließend wird die MOMO-Elektroden wie bereits vorher beschrieben mittels Magentronsputtern hinzugefügt. Der entsprechende Schichtstapel ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Um die elektrischen Verluste durch die spektrale Selektivität abschätzen zu können, wurden außerdem Referenzzellen gebaut, in denen statt dem MOMO ein Silber-Reflektor mit Elektronenstrahlverdampfen aufgebracht wurde.

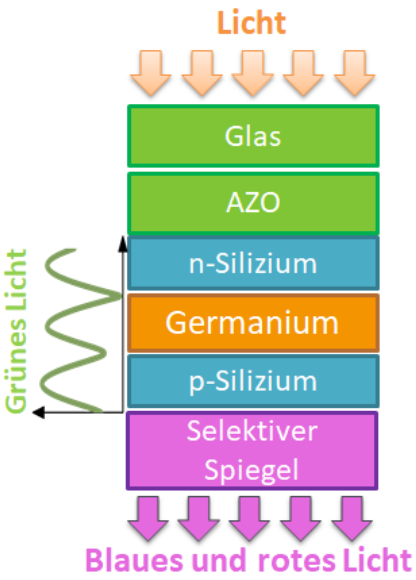



Abbildung 7: Schematische Darstellung des Solarzellenstapels. Eigene Darstellung

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich für die Solarzelle mit Silber-Reflektor, mit MOMO-Reflektor und ohne Rückreflektor. Gemessen wurden die Transmission T und die Reflektion R, die der Übersicht halber als 1-R dargestellt wird. Zudem ist die externe Quanteneffizienz EQE dargestellt., Diese Größe ist ein Maß dafür, wie viel des ankommenden Lichtes einer Wellenlänge in Strom umgewandelt werden kann. Insgesamt lässt sich sagen, dass der MOMO-Rückreflektor hier noch nicht die gewünschten Transmissionseigenschaften erzielte: Die gemessene

Peak-Transmission liegt mit maximal 35 % bzw. 10 % im roten bzw. blauen Bereich deutlich niedriger als erwartet. Auch insgesamt sind die Maxima und Minima nur sehr schwach ausgeprägt. Hier wurde als Hauptursache der AZO-Frontkontakt ausgemacht, wie in weiteren Experimenten gezeigt werden konnte (siehe nächster Abschnitt).

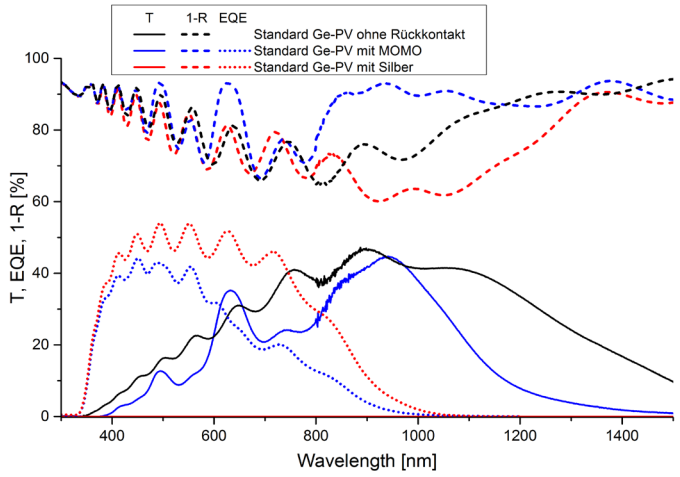



Abbildung 8: Transmission (T), 100-Reflexion (1-R) und externe Quanteneffizienz (EQE) der hergestellten Germananiumsolarzellen ohne Rückreflektor, mit Silberreflektor und mit MOMO-Reflektor. Eigene Darstellung.

Dennoch zeigt die Transmissionsmessung schon hier zwei lokale Maxima bei 500 nm und bei 620 nm, was die grundsätzliche Funktionalität des Konzepts belegt. Insbesondere im Vergleich zur Messung ohne Rückreflektor zeigt sich, dass sich die Transmission durch den MOMO-Reflektor lokal teils sogar erhöht, während bei Wellenlängen erhöhter Reflektivität des MOMO-Schichtstapels erwartungsgemäß eine verringerte Transmission gemessen wird. Auch zu erwarten war, dass bei Wellenlängen erhöhter Transmission eine verringerte externe Quanteneffizienz gegenüber der Referenzzelle mit Silberrückreflektor gemessen wird. Dies führt zu einer Reduktion der Kurzschlussstromdichte der Solarzelle und damit zu einer Verringerung der Zelleffizienz von 3.6 % auf 2.1 %. Gleichzeitig blieben jedoch die Solarzellenkenngrößen Füllfaktor (FF) und Offenklemmenspannung ($V_{OC}$), welche Aufschluss über die elektronische Qualität der Solarzelle liefern, weitestgehend unverändert gegenüber der Referenzzelle. Dies bedeutet, dass der MOMO-Rückreflektor seine gleichzeitige Funktion als stromführender Kontakt hervorragend erfüllt.

### 5.1.3 Ersatz des AZO-Frontkontaktes durch eine ITO- oder AZO-Schicht

Als Ursache für die noch geringe Peak-Transmission der ersten Solarzellen vermuteten wir in erster Linie den verwendeten, vergleichsweise dicken AZO-Frontkontakt, dessen Rauheit die Ausbildung der benötigten Interferenzen teilweise abschwächt, und welcher selbst zu zusätzlichen Interferenzen führt, welche ebenfalls die Funktionalität des MOMO-Rückreflektors beeinflussen. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden weitere Solarzellen hergestellt, in welchen gegenüber den ersten Zellen die ≈1000 nm dicke AZO-Elektrode auf der Vorderseite durch eine nur etwa 70-80 nm dicke ITO-Elektrode (Indium-Zinnoxid) ersetzt wurde. Ein Umstieg auf ITO musste hier erfolgen, da die Leitfähigkeit von AZO-Schichten vergleichbarer Dicke nicht für die Nutzung als Elektrode in unseren Solarzellen ausreicht.

Abbildung 9 zeigt das Ergebnis der Transmissions- und Reflexionsmessungen (genauer: 1-Reflexion) dieser Zellen. Es zeigt sich hier, dass der Ersatz des dicken AZO-Frontkontaktes durch eine dünne ITO-Elektrode zu deutlich besseren Transmissionseigenschaften führt. Die ursprünglich durch die AZO-Elektrode hervorgerufenen zusätzlichen Interferenzmuster sind nicht mehr zu sehen und es treten ausschließlich die gewünschten Transmissionsmaxima in den für die Algen wichtigen roten und blauen Spektralbereichen auf. Insbesondere im roten Bereich wird bereits eine Transmission von bis zu 60 % erzielt, während im blauen Bereich ein Wert von maximal 20 % erreicht wird. Gleichzeitig zeigt die große Differenz zum 1-R-Spektrum vor allem zwischen den beiden Transmissionsmaxima, dass das Licht in den übrigen Wellenlängenbereichen die Solarzelle weder durch Transmission noch durch Reflexion verlässt, sondern wie gewünscht im Zellstapel absorbiert wird.

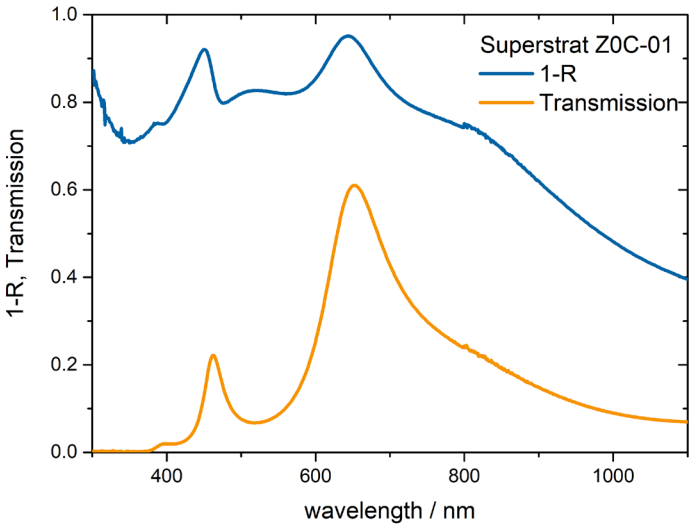



Abbildung 9: Transmission und 1-Reflexion einer Germaniumsolarzelle mit MOMO-Rückreflektor, welche einen ITO- statt eines AZO-Rückreflektors beinhaltet. Eigene Darstellung.

Diese Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Ursache für die zu geringe Transmission der ersten Solarzellen in der Verwendung der dicken AZO-Frontelektrode lag.

Da die 60-80 nm dicken Frontkontakte entgegen der Erwartungen elektrisch nicht funktionierten, wurde im nächsten Schritt ein 400 nm dickes AZO verwendet, dass auf elektrische Leitfähigkeit optimiert wurde. Im Zuge dessen wurden auch die Silberschichtdicken im MOMO Rückreflektor variiert, um zu überprüfen, ob die Form der Transmissionspeaks anpassbar ist.

Abbildung 10 zeigt, dass trotz des dickeren Frontkontaktes die einzelnen Peaks klar zu erkennen sind. Die reduzierte Transmission kann aufgrund des 10 nm dicken Germaniumabsorbers sowie durch erhöhte parasitärer Absorption erklärt werden, die durch nicht optimale Herstellungsbedingungen entstanden sind. Diese konnten im Zuge des Projektes nicht mehr optimiert werden.

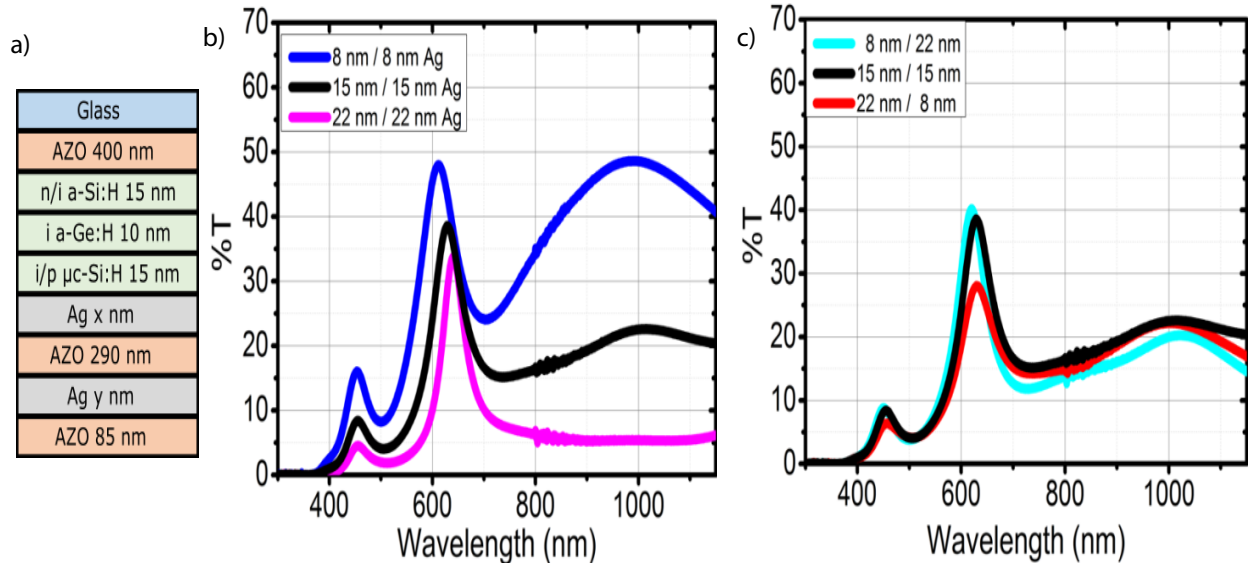



Abbildung 10: a) Aufbau der spektralselektiven Solarzelle. Für den symmetrischen MOMO sind die Silberschichtdicken gleich (x = y) während sie für unsymmetrischen Fall unterschiedlich sind. Außerdem sind die dazugehörigen Transmissionsspektren von den spektralselektiven Solarzellen mit b) symmetrischen und c) asymmetrischen MOMO-Reflektoren dargestellt. Eigene Darstellung.

Mit Hinblick auf den Einfluss der Silberschichten wurden symmetrische MOMOs mit gleichen Silberdicken und asymmetrische MOMOs mit unterschiedlichen Silberdicken hergestellt. Bei den symmetrischen MOMOs (siehe Abbildung 9a) lässt sich feststellen, dass die Peaks mit ansteigender Silberdicke an Intensität verlieren, aber gleichzeitig schärfer werden. Dies kann auf erhöhte Absorption in der Solarzelle als auch durch Verluste durch

Reflexion erklärt werden. Im Infraroten nimmt die Transmission deutlich ab, was interessante Anwendungsfälle im Bereich des thermischen Managements erlaubt. Bei den asymmetrischen MOMOs (Abbildung 9b) ist zu erkennen, dass der MOMO mit einer 8 nm und 22 nm dicke Silberschichten vergleichbar zu dem mit zwei Mal 15 nm Silber ist. Im Gegensatz dazu zeigt sich beim Umdrehen der 8 und 22 nm dicken Silberschicht, dass Intensität im roten Peak verloren geht.

Der Frontkontakt aus 400 nm AZO ermöglichte die Aufnahme elektrischer Kenndaten, die in Tabelle 2 zusammengefasst wurden. Die nicht spektralselektive Solarzelle mit Silberrückreflektor erreichte eine Effizienz von 4%. Die beste Effizienz von 2,5% von einer spektralselektiven Solarzelle ist bei der mit 22 und 8 nm Silber im Rückreflektor festzustellen, die gleichzeitig im schlechtesten transmittiert. Die Probe mit der höchsten Transmission zeigt eine Effizienz von 1.6%.

Die Effizienz der anderen Proben variiert dazwischen. Alle Proben weisen Verluste im Strom (Jsc) durch die Transmission auf, zeigen allerdings eine ähnliche Offenklemmenspannung (Voc) von ca. 460 mV. Das bedeutet, dass die Qualität des Absorbers für alle Proben erhalten bleibt. Mit Ausnahme der Probe mit dem symmetrischen Rückreflektor von 22 nm, weisen alle Proben einen Füllfaktor (FF) zwischen 43 und 52 % auf (Tabelle 2). Dies bedeutet, dass die elektrische Funktionalität der spektralselektiven Zellen gewährleistet ist.

| Sample<br>Ag thickness | Jsc<br>[mAcm$^{-2}$] | Voc<br>[mV] | FF<br>[%] | η [%] |
|---|---|---|---|---|
| 300 nm | 16.641 | 466 | 51.2 | 4 |
| 08 nm / 08 nm | 7.744 | 464 | 43.8 | 1.6 |
| 15 nm / 15 nm | 10.515 | 456 | 48.2 | 2.3 |
| 22 nm / 22 nm | 11.638 | 445 | 38.9 | 2 |
| 08 nm / 22 nm | 9.427 | 459 | 48 | 2.1 |
| 22 nm / 08 nm | 11.376 | 474 | 46.1 | 2.5 |

Tabelle 2: Elektrische Kenndaten von spektralselektiven Solar-Zellen mit verschiedenen Silberdicken im Rückreflektor. Eigene Darstellung.

Damit steht eine erste spektralselektiv transmittierende Solarzelle zur Verfügung, welche sowohl elektrisch funktional ist als auch einen Teil des einfallenden Lichts im für die Photosynthese relevanten Wellenlängenbereich transmittiert. Die Ziele des Meilensteins M2.1 konnten damit erreicht werden. Eine weitere Verbesserung sowohl der Transmissionseigenschaften als auch der Solarzelleneffizienz ist in Zukunft durch den Ersatz der ladungsträgerselektiven Silizium-Schichten durch Materialien mit geringerer Absorption zu erwarten.

### 5.1.4 Entwicklung von elektronenselektiven Schichten mit verringerter Absorption

Licht, welches in den ladungsträgerselektiven Silizium-Schichten der hier vorgestellten Solarzellen absorbiert wird, ist sowohl für die Stromgeneration als auch für die Photosynthese der Algen verloren. Um daher die Transmission der entwickelten Solarzellen insbesondere im blauen Wellenlängenbereich zu erhöhen und gleichzeitig mehr Licht für die gewünschte Absorption in der Germaniumschicht verfügbar zu machen, müssen ladungsträgerselektive Schichten entwickelt werden, welche eine deutlich geringere Absorption aufweisen als das derzeit verwendete Silizium. Hier sind unterschiedliche Lösungen für die n-Seite (elektronenselektive Seite) und die p-Seite (Löcher-selektive Seite) der Solarzelle nötig.

Im Rahmen von AP2 wurde mit der Entwicklung verbesserter elektronenselektiver Schichten begonnen. Hierzu wurde ein bestehender PECVD-Prozess zur Abscheidung von n-dotiertem amorphen Silizium (a-Si:H(n)) durch

Hinzufügen von Methan ($CH_4$) zum Prozessgas abgewandelt, sodass n-dotiertes mikrokristallines Siliziumcarbid (µc-SiC:H(n)) abgeschieden wurde. Es wurde unteranderem eine ausführliche Variation der Prozessparameter $CH_4$-Fluss und Prozessdruck durchgeführt. Die abgeschiedenen Einzelschichten wurden mit Hinblick auf die optische $E_{04}$-Bandlücke (als Maß für die Transparenz) sowie die Aktivierungsenergie für Elektronen (als Maß für die elektronenselektive Leitfähigkeit) bestimmt. Eine Erhöhung der optischen $E_{04}$-Bandlücke führt zu einer reduzierten Absorption von Licht und somit zu einer erhöhten Transparenz. Eine niedrige Aktivierungsenergie erlaubt ein schnelles Abführen von Elektronen, sodass Rekombinationsverluste vermieden werden.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen generell einen deutlichen Anstieg der $E_{04}$-Bandlücke (siehe Abbildung 10a) durch Zugabe von Methan, was eine Erhöhung der Transparenz im sichtbaren Bereich impliziert. Hierbei zeichnet sich für geringere Drücke (bis 6.5 mbar) tendenziell eine Zunahme der $E_{04}$-Bandlücke mit Erhöhung des Methan-Flusses ab. Gleichzeitig zeigt sich jedoch bei hohen Methanflüssen eine deutliche Zunahme der Aktivierungsenergie (siehe Abbildung 10b) und damit Verringerung der Leitfähigkeit für Elektronen bzw. der Elektronenselektivität, so dass hier ein Kompromiss gefunden werden musste. Der Zielwert für die Aktivierungsenergie elektronenselektiver Schichten sollte bei etwa 0.1 eV oder weniger liegen. Durch weitere Anhebung des Prozessdruckes auf 8 mBar konnte der gegenläufige Trend jedoch aufgehoben werden, so dass bei Erhalt einer Aktivierungsenergie von < 0.1 eV die $E_{04}$-Bandlücke von 1.55 eV auf mehr als 2.2 eV angehoben werden konnte. Dies impliziert eine starke Reduktion des Absorptionskoeffizienten bei gleichzeitiger Sicherstellung einer hohen Elektronenleitfähigkeit, so dass der Einsatz dieser Schichten in den entwickelten Solarzellen zu einer deutlichen Erhöhung der Transmission in den Photosynthese relevanten Wellenlängenbereichen führen sollte.

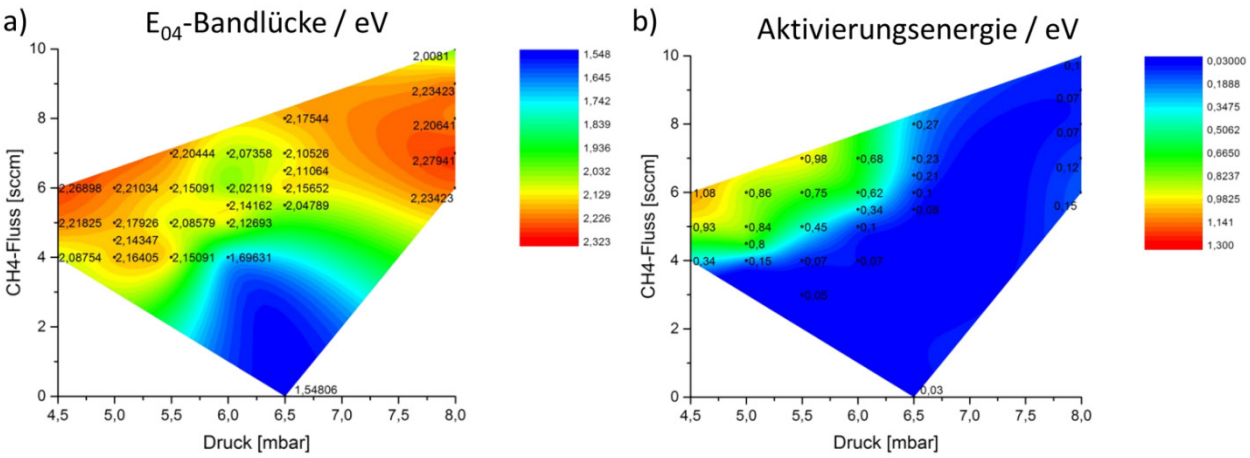



Abbildung 11: Abhängigkeit der a) E04-Bandlücke sowie b) der Aktivierungsenergie von µc-SiCx:H-Schichten in Abhängigkeit von den Prozessparametern Druck und CH4-Fluss. Eigene Darstellung.

### 5.1.5 Entwicklungen von loch-selektiven Schichten mit verringerter Absorption

Die Verringerung der parasitären Absorption kann durch die Verwendung von Materialien mit größerer Bandlücke im Vergleich zu der von amorphem Silizium erreicht werden. Für die p-Seite eignet sich Molybdänoxid ($MoO_x$), dessen optische Eigenschaften durch den Sauerstoffgehalt während der Herstellung beeinflusst werden können.

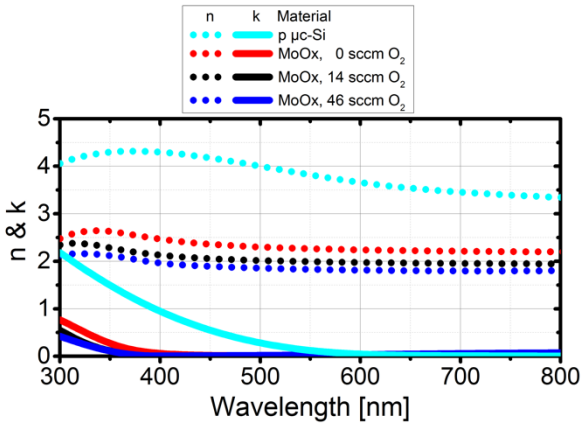



Abbildung 12: Die Parameter n, k des komplexen Brechungsindex für MoOx Einzelschichten im Vergleich zu p µc-Si. Transmissionskurven werden nicht gezeigt, da diese durch Schichtdickeneffekte nicht vergleichbar wären. Eigene Darstellung.

Das MoOx wurde mittels Elektronenstrahl-Verdampfung deponiert. Bevor die Integration des MoOx stattfinden konnte, wurden Einzelschichten entwickelt, bei denen der Sauerstofffluss in der Kammer während der Herstellung variiert wurde. Der Einfluss des Sauerstoffes auf die Parameter n, k des komplexen Brechungsindex ist in Abbildung 12 dargestellt. Der Brechungsindex beschreibt die Änderung der Lichtgeschwindigkeit beim Übergang von einem Material in ein anderes und legt dabei Reflektion und Transmission fest. Der k-Wert steht in Zusammenhang mit dem Absorptionskoeffizienten und sollte daher möglichst klein sein.

Im Vergleich zum Silizium ist n von 4 auf 2 reduziert, während k bei 400 nm von ca. 1 auf knapp 0 reduziert ist. Dies sollte zu einer signifikanten Erhöhung der Transmission bei erfolgreicher Zellintegration führen. Aufgrund der Abscheidung bei Raumtemperatur sind die Schichten horizontal nicht leitfähig. Dies könnte in Zukunft behoben werden, indem der Prozess auf eine Sputteranlage übertragen wird, bei der Abscheidungen bei erhöhten Temperaturen möglich sind.

Trotz der fehlenden Leitfähigkeit konnten funktionierende Solarzellen (ohne SiCx) in der Referenzzelle mit Silberrückspiegel realisiert werden. Hierfür gibt es zwei mögliche Erklärungen: Da die Schichten sehr dünn sind, kann es sein, dass eine Leitfähigkeit senkrecht zur Ebene gegeben ist. Weiterhin ist es möglich, dass die Ladungsträger durch den physikalischen Effekt des Tunnelns aus der Solarzelle extrahiert werden können. Die Effizienz der Zellen betrug ungefähr 2 % (siehe Abbildung 13a). Diese Reduktion kann dadurch erklärt werden, dass das MoOx nicht leitfähig war. Dies führt zu einer erschwerten Ladungsträgertrennung. Ein Voc von ca. 550 mV wurde erreicht, sodass die Qualität des Absorbers nicht beeinträchtigt wurde. Außerdem muss die Position des Absorbers in der optischen Kavität angepasst werden, da das MoOx einen anderen Brechungsindex hat als das Silizium.

Das optische Potential konnte durch Messungen an Stellen auf den Proben zwischen den Silberrückkontakten abgeschätzt werden.

Abbildung 13b zeigt bei 400 nm einen Anstieg der Transmission von ca. 8 % auf ca. 15 %, während sie bei 600 nm von ca. 35 auf 45 % erhöht werden konnte. Durch die Anpassung der Kavität sollte dies in Zukunft noch weiter verbessert werden können. Die Integration in die spektralselektive Zelle war nicht mehr möglich, da die drei notwendigen Herstellungsanlagen sowie der Laser nicht gleichzeitig mehr zur Verfügung standen. Optische Demonstratoren, die sowohl $MoO_x$ als auch $SiC_x$ enthalten, konnten dennoch realisiert werden (siehe nächster Abschnitt).

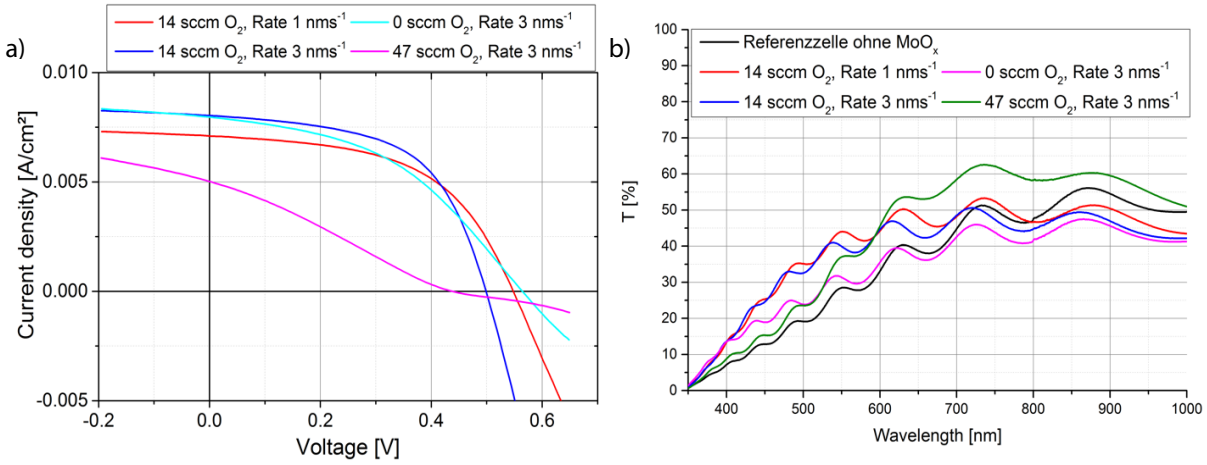



Abbildung 13: a) IV-Kennlinien von a-Ge:H mit $MoO_x$ anstatt von p µc-Si. b) Transmissionsmessungen zwischen den Rückkontakten, um das Potential der verbesserten Transmission abzuschätzen. Eigene Darstellung.

### 5.1.6 Herstellung von Filtern für Algentests

Um eine frühzeitige Durchführung von Algen-Wachstumsexperimenten zu ermöglichen, wurden mehrere 10x10 $cm^2$-Glasscheiben mit den hier entwickelten MOMO-Reflektoren beschichtet und der SSC GmbH zur Verfügung gestellt. Hiermit konnte der Meilenstein M2.2 erreicht werden. Zwar führt das Aufbringen einer Germanium-Solarzelle auf die Reflektoren zu einer gewissen Reduktion der Transmission auch in den für die Photosynthese relevanten Wellenlängenbereichen. Ziel des Projekts ist es jedoch, diese Reduktion so gering wie möglich zu halten. Die Projektpartner haben sich daher darauf verständigt, dass eine Verwendung der, unter Punkt 1, vorgestellten MOMO-Reflektoren als Proben für die ersten Algentests am sinnvollsten erscheint. Ein Grund hierfür ist die frühe Verfügbarkeit weit vor der Herstellung der ersten vollständigen Solarzellen und die hierdurch deutlich frühere Durchführbarkeit der Wachstumstests. Des Weiteren müssen die für eine besonders transparente Zelle notwendigen verbesserten ladungsträgerselektiven Elektroden im Rahmen von AP2 zunächst vollständig entwickelt und optimiert werden, bevor ihr Potential voll ausgeschöpft werden kann. In der Form zu Beginn des Projektes absorbierten die Zellen mehr Licht, als es für die ausentwickelten Zellen zu erwarten ist.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurden optische Demonstratoren mit Zellen an SSC geliefert (Die Proben Z45, Z46 und Z47). In ihnen ist sowohl eine µc-SiC:H(n) Schicht, als auch eine MoOx-Schicht integriert. Zum Vergleich wurde eine spektralselektive Zelle mit den Standard-Dotierschichten geliefert. Die optischen Kenndaten der Referenzzelle sind in Abbildung 14a dargestellt, die mit den verbesserten Dotierschichten sind in Abbildung 13b dargestellt. Im blauen Licht konnte eine Verdopplung der Transmission auf fast 20% erzielt werden, während diese im roten Licht ausblieb (60 %). Parasitäre Verluste im Silber könnten hierfür die Ursache sein, da diese auch in anderen Projekten vom DLR - Institut für vernetzte Energiesysteme beobachtet wurden. Außerdem kann die Qualität der µc-SiC:H(n)-Schicht von der Qualität der Einzelschichten abweichend sein. Während der Einzelschichtentwicklung wurden die Schichten auf Glas abgeschieden, für die Herstellung der Solarzellen wurde das µc-SiC:H(n) auf dem Frontkontakt abgeschieden. Die Abweichungen in der Qualität könnten sich durch den ganzen Stapel auswirken, sodass auch beispielsweise der Germanium Absorber fehlerhaft aufgewachsen sein kann. Dass dennoch eine Verbesserung erzielt wurde, kann eindeutig als Erfolg festgehalten werden.

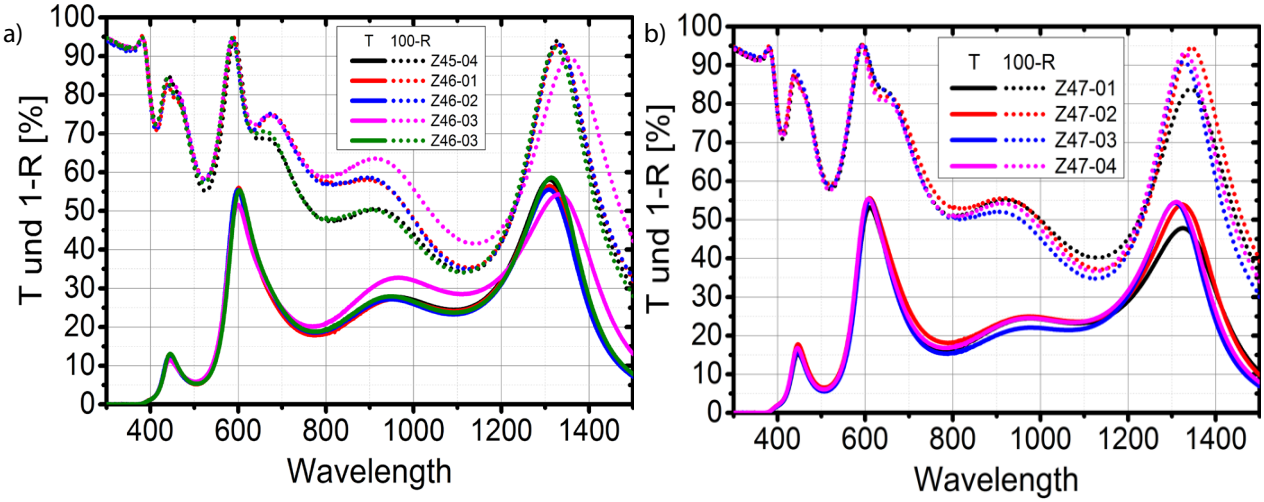



Abbildung 14: Transmissionsmessungen T (durchgezogen) und 1-Reflektionsmessungen (gepunktet) von spektralselektiven Solarzellen, die an SSC für Wachstumstests geschickt wurden a) Probe Z46 mit n a-Si und p µc-Si b) ) Probe Z47 mit n µc-SiC und $MoO_x$. Z steht für Zelle und die Zahl dahinter für den Herstellungsrun. Die Zahl hinter dem Bindestrich beschreibt die Position während der Herstellung, da es 4 gleichwertige Positionen gibt. Eigene Darstellung.

### 5.1.7 Verbesserungen des Absorbers

Zur Optimierung der Solarzelle wurde der a-Ge:H Absorber der Referenzsolarzelle weiterentwickelt. Mit verschiedenen Messmethoden wurden die a-Ge:H Materialeigenschaften (wie Bandlücke, n & k Daten) bestimmt und in ein Simulationsmodell integriert. Weitere relevante Eigenschaften, wie Mehrfachdurchgänge und interne Reflektionen können in diesem Modell ebenfalls aktiviert werden, so dass eine konsistente Simulation erreicht werden konnte. Weitere Verbesserungen wurden durch Variation der Herstellungsparameter untersucht. Die untersuchten Prozessvariationen beinhalteten:

- Absorberdicke
- H2/GeH4 Verhältnis
- Druck der Wasserstoffbehandlung (während des Absorberwachstums)
- Rückkontakt
- Rauigkeit des Substrates
- Druck und Leistung während der Abscheidung

Insgesamt konnte hierdurch der Füllfaktor (FF) und die Vorwärtsspannung Voc verbessert werden, was zu einer deutlichen Verbesserung der Effizienz h der Solarzelle führt (siehe Abbildung 15). Zudem konnte ein besseres Verständnis der Solarzelle erlangt werden.

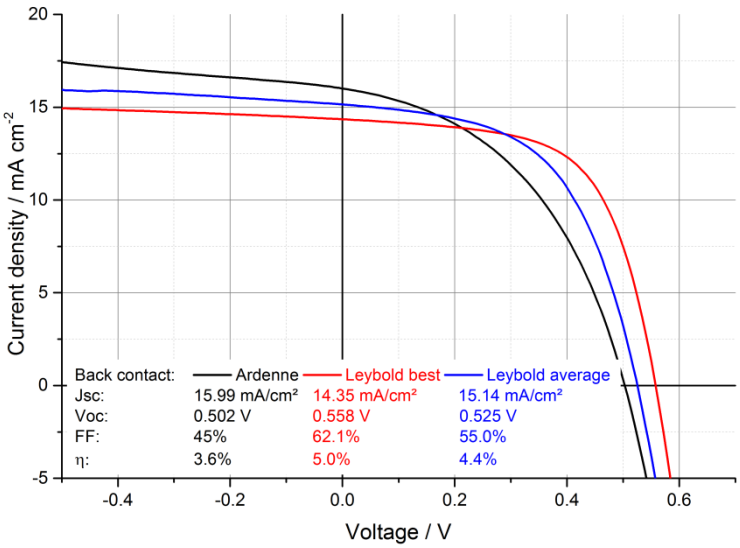



Abb. 15: Vergleich der Strom-Spannungs-Kennlinien der Referenzsolarzelle zwischen der kleinen (Ardenne) und größeren (Leybold) Anlage. Eigene Darstellung.

### 5.1.8 Bau elektrisch funktionaler Kleinmodule

Wie bereits weiter oben beschrieben, wurde die elektrische Leistung an 1 cm² großen PV-Zellen standardmäßig gemessen. Um im Rahmen des Projektes HYPP auch die Leistung verschalteter Zellen messtechnisch zu bestimmen, wurden Minimodule der Größe 7 x 7 cm hergestellt. Für diese Minimodule waren sehr saubere Gläser notwendig, da kleinste Verunreinigung bei der geringen Zellgröße zu Kurzschlüssen führen können. Dafür wurde eine Waschmaschinenreinigungsprozdeur entwickelt, die 95° C heißes, frisch destilliertes Wasser und einen sehr aggressiven Glasreiniger verwendet. Für die Herstellung von Modulen ist eine Verschaltung der Einzelzellen notwendig. Die Definition der Einzelzellen geschieht durch Laserschnitte. Um eine Verschaltung der Einzelzellen zu erreichen, sind insgesamt 3 Laserschnitte in verschiedenen Schritten des Schichtenwachstums notwendig (monolithische Verschaltung). Der erste Schnitt (p1, roter Pfeil in Abb. 16) muss den Frontkontakt, in diesem Fall den selektiven Spiegel, komplett entfernen. Die letzten beiden Laserschnitte (p2 und p3, Abb. 16, grüne Pfeile) müssen so optimiert werden, dass sie die Schichten oberhalb des Selektiven Spiegels abtragen, ohne den Selektiven Spiegel selbst abzutragen oder zu beschädigen.

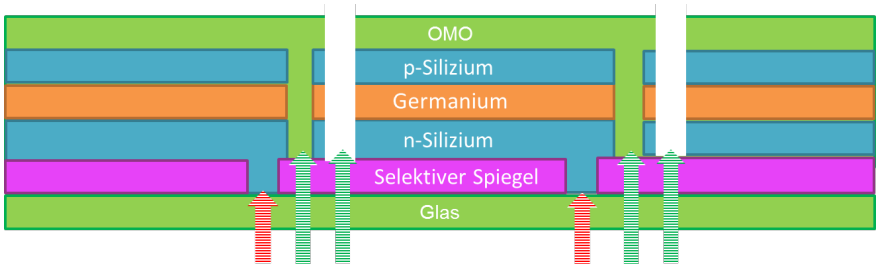



Abb. 16: Monolithische Verschaltung von Dünnschichtsolarzellen. Eigene Darstellung.

Für den p1 Schnitt wurde eine Laserpower Optimierung mit einem grünen und roten Laserpuls durchgeführt. Exemplarisch sind in Abbildung 17a vier Schnitte des grünen Lasers zu sehen, wobei die Laserleistung von unten nach oben zunimmt. Dies führt zu einem breiteren Graben bei der Abtragung. Untersuchungen mit dem Konfokalmikroskop zeigen (Abb. 17b), dass bei solchen Schnitten an den Schnittkanten Flakes zurückbleiben,

die im Modul zu Kurzschlüssen führen könnten. Um diese und weitere Rückstände vom Lasern zu entfernen, wurden die Module nach den p1 Schnitt nochmals in der Spülmaschine mit warmen DI-Wasser gereinigt.

Für die p2 und p3 Schnitte wurde ebenfalls eine Variation der Laserleistung durchgeführt. Dafür wurden 5x5 $mm^2$ große Flächen durch den selektiven Spiegel geschnitten. Dies ist in Abbildung 17c zu sehen. Der mit „x" markiert Schnitt zeigt eine vollständige Entfernung der Schichten da nur Glas zu sehen ist, sodass eine zu hohe Leistung gewählt wurde. Das 3x3 Feld mit den Pfeilen zeigt Schnitte mit niedrigerer Leistung. Die Leistung nimmt entlang der Pfeile zu. Oben rechts wurde die niedrigste Leistung gewählt, während unten links die höchste gewählt wurde. Die 3 Felder rechts sind nur zu erahnen. Dies deutet darauf hin, dass die Halbleiterschichten nicht vollständig entfernt wurden. In der Mitte und links ist die grüne Reflektion des MOMOs zu sehen. Daher sind die Halbleiterschichten vollständig entfernt worden, während der MOMO Reflektor weiterhin vorhanden ist. Diese Leistungen sind daher für den p2 und p3 Schnitt geeignet.

Die neuentwickelten Schnitte wurden zu Herstellung von Minimodule auf 10x10 $cm^2$ Glasscheiben verwendet. Die verwendet Laserschnitte sind in Abb. 17 c und d zu sehen. Für alle drei Schnitte sind gerade, kontinuierliche Linien zu sehen. Die grüne Reflektion vom p3 Schnitt zeigt, dass der MOMO Reflektor erfolgreich freigelegt wurde. Die Laserschnittentwicklung war somit erfolgreich.

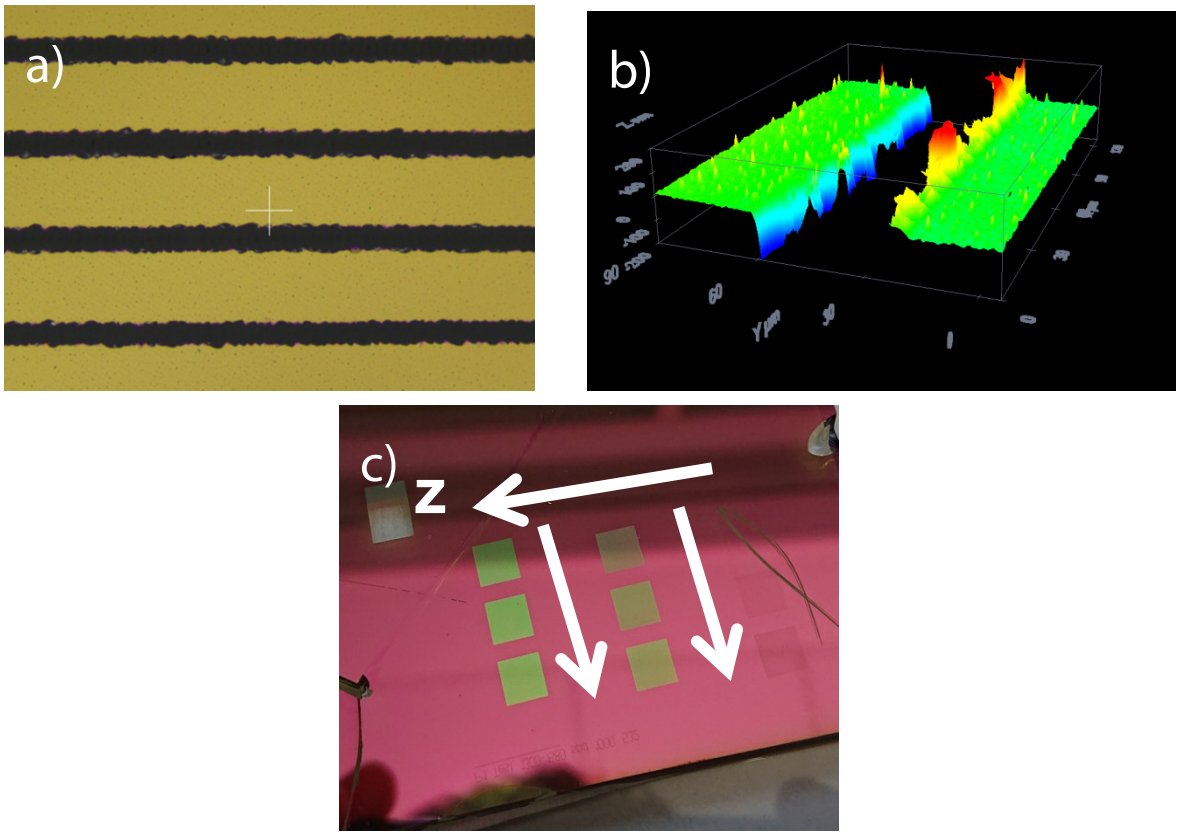



Abb 17. a) p1 Schnitt durch einen MOMO mit ansteigender Laserleistung von oben nach unten. b) Konfokalmikroskop-Bild eines p1 Laserschnittes. c) p2 Schnitte durch einen MOMO. Eigene Darstellung.

Aufgrund der Randentschichtung bleibt eine aktive Zellfläche von 49 $cm^2$ (=7x7 cm), die in 11 Streifen unterteilt ist. Abbildung 18a zeigt ein Minimodul unter Weißlicht-Beleuchtung im Sonnensimulator. Unter dem Minimodul ist die violette Färbung zu sehen, die durch die Transmission von blauem und rotem Licht zustande

kommt. Die dazugehörigen elektrischen Kenndaten sind in Abbildung 17b zu erkennen. Es konnte eine hohe Spannung von 4,2 V erreicht werden, was auf eine erfolgreiche monolithische Verschaltung zurückzuführen ist. Der Strom von 18 mA bietet weitere Möglichkeiten zur Optimierung. Mit einer Effizienz von 0,6 % werden 6 W/m² Strom produziert, die damit deutlich geringer ist als die 1,5 -2 %, die an den 1 cm² Zellen gemessen wurden. Die niedrige Effizienz beruht auf dem sehr niedrigen Strom. Die Ursachen für den niedrigen Strom können sehr vielseitig sein. Es können zum Beispiel Verluste an den Laserschnitten auftreten. Außerdem wurde für die Messungen spezielle Nadeln verwendet, die eventuell nicht alle Ladungsträger eingesammelt haben. Weiterhin könnte die Leitfähigkeit des Frontkontaktes nicht optimal gewesen sein. Um dies klären zu können, sind weitere Experimente notwendig.

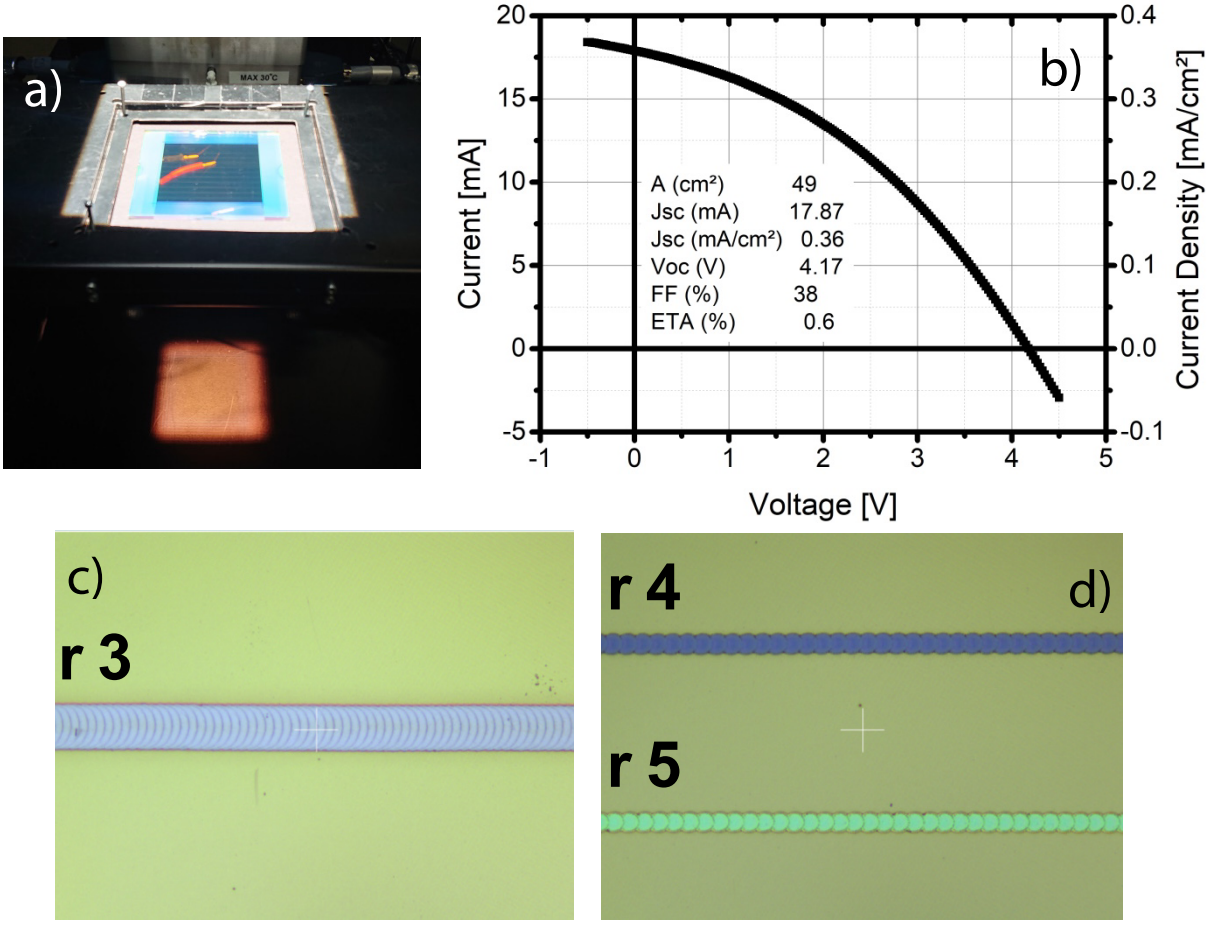



Abb 18 a) Minimodul unter weißer Beleuchtung. b) IV-Kennline und elektrische Kenndaten eines spektralselektiven Minmoduls. c) und d) zeigen die dazugehörigen Laserschnitte an einem Modul. Eigene Darstellung.

## 5.2 Spektralselektives Wachstum von Mikroalgen

### 5.2.1 Material und Methoden

#### 5.2.1.1 Kultivierungsanlage

Die Kultivierung der Mikroalgen wurde in einer speziell angefertigten Kultivierungseinheit durchgeführt (Abb. 19). Die Einheit setzt sich aus einem transparenten Plexiglasbecken und drei flexiblen und herausnehmbaren Reagenzglashalterungen zusammen. Das Plexiglasbecken kann mit Wasser befüllt werden und ermöglicht in Kombination mit einem Thermostaten eine Temperatureinstellung sowie eine hohe Transparenz im visuellen Lichtspektrum.

Die Reagenzglashalter ermöglichen einen sicheren Stand für die Reagenzgläser im temperierten Wasser. Zu-

Abbildung 19: Kultivierungseinheit mit Reagenzglashaltern. Die Reagenzglashalter sind herausnehmbar, verhindern das Eindringen von Streulicht und ermöglichen einen sicheren Stand. Eigene Darstellung.

dem wird sichergestellt, dass ausschließlich Licht von der Frontseite die Algen erreichen kann. Diese Vorrichtung ermöglicht eine exakte Temperierung der Algen in den Reagenzgläsern. Diese wurde in den unten beschriebenen Versuchen bei 30 °C konstant gehalten. Insgesamt können pro Halterung vier Reagenzgläser mit Mikroalgen bzw. insgesamt 12 getrennte Proben untersucht werden. Die Mikroalgen werden in einem speziellen Nährmedium, welches neben Stickstoff und Phosphat auch weitere anorganische Komponenten enthält kultiviert, die ein optimales Wachstum ermöglichen. Des Weiteren werden die Mikroalgen in den Reagenzgläsern mit einem Gasgemisch aus 4 % $CO_2$ und Druckluft behandelt. Diese Begasung ermöglicht eine Durchmischung der Nährstoffe und Algen sowie die Zugabe des für die Photosynthese notwendigen $CO_2$.

#### 5.2.1.2 Beleuchtung

In den Wachstumsuntersuchungen im Labor wurden Gasentladungslampen der Firma Phillips eingesetzt, die ein Lichtspektrum annährend der Sonne erzeugen. Die Farben Rot, Grün und Blau wurden daraus über Lee Filter erzeugt. Darüber hinaus wurden Spektralfilter (F-Signatur, Kapitel 4.1.1) und spektralselektive Solarzellen (Z-Signatur, Kapitel 4.1.6) vom Projektpartner DLR - Institut für vernetzte Energiesysteme bereitgestellt und für die Versuche eingesetzt. Tabelle 3 listet die Spezifikationen der damit erzeugten Bestrahlungsspektren auf.

Tabelle 3. Spezifikation der in den Wachstumsversuchen genutzten Spektralfilter. Getestet wurden Spektralfilter der F-Signatur (F-17-F22) und der Z-Signatur (Z47). Zudem wurden Filterfolien des Farbfilterherstellers LEE (light red, dark green und dark blue) eingesetzt. Als Lichtquelle diente eine Phillips MSR 575 HR CT metal halide Lampe. Bei den Freilanduntersuchungen wurden die LEE-Filter mit eingestrahltem Sonnenlicht kombiniert. Die LEE-Filter hatten einen breiten Transmissionsbereich, Die F- und Z- Filter hatten einen oder zwei Transmissionspeaks. Die Transmission ist in Prozent bei der jeweiligen Photonenflussdichte angegeben, wurde bei einigen Filtern allerdings nicht bestimmt (n.b.).

| Filter Typ | Peak 1 (nm) | Peak 2 (nm) | Transmission (%) | Photonenfluss (µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ ) | Versuch vom |
|---|---|---|---|---|---|
| F17 | 470 | 680 | 40 | 500 | 26.11.-01.12.18 |
| F17 | 470 | 680 | 40 | 425 | 01.12.-05.12.18 |
| F17 | 470 | 680 | 40 | 780 | 07.08.-14.08.18 |
| F18 | 430 | 640 | 45,8 | 890 | 25.07.-30.07.18 |
| F19 | 490 | 720 | 38,2 | 740 | 30.07-04.08.18 |
| F20 | 600-700 | (-) | n.b. | 270 | 26.11.-01.12.18 |
| F20 | 600-700 | (-) | n.b. | 425 | 01.12.-05.12.18 |
| F21 (gelb) | 596 | (-) | n.b. | 450 | 14.12.-19.12.18 |
| F21 (gelb) | 596 | (-) | n.b. | 450 | 14.12.-19.12.18 |
| F22 (blau) | 467 | (-) | n.b. | 300 | 05.12.-14.12.18 |
| F22 (blau) | 467 | (-) | n.b. | 300 | 05.12.-14.12.18 |
| LEE rot | 580-720 nm | (-) | 33,5 | 550 | 28.02.-07.03.18 |
| LEE grün | 450- 600 nm | (-) | 20,55 | 550 | 28.02.-07.03.18 |
| LEE blau | 380- 540 nm | (-) | 26 | 550 | 28.02.-07.03.18 |
| LEE rot | 580-720 nm | (-) | 33,5 | 550 | 30.01.-04.02.18 |
| LEE grün | 450- 600 nm | (-) | 20,55 | 550 | 30.01.-04.02.18 |
| LEE blau | 380- 540 nm | (-) | 26 | 550 | 30.01.-04.02.18 |
| LEE rot (F) | 580-720 nm | (-) | 33,5 | 150 | 27.07.-02.08.18 |
| LEE grün (F) | 450- 600 nm | (-) | 20,55 | 85 | 02.08.-10.08.18 |
| LEE grün (F) | 450- 600 nm | (-) | 20,55 | 90 | 27.07.-02.08.18 |
| Z47 | 450 | 610 | n.b | 350 | 19.11.-29.11.2019 |
| Z47 | 450 | 610 | n.b | 600 | 15.01.-24.01.2020 |

### 5.2.2 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben

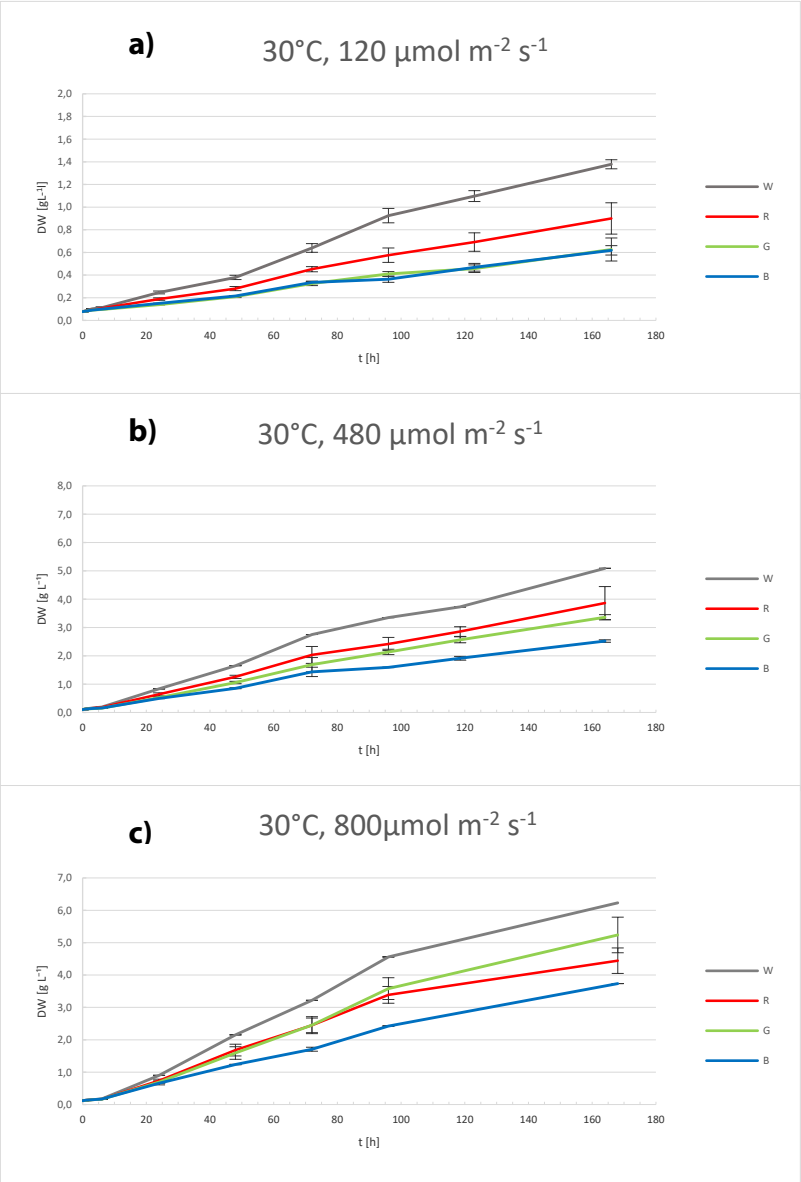
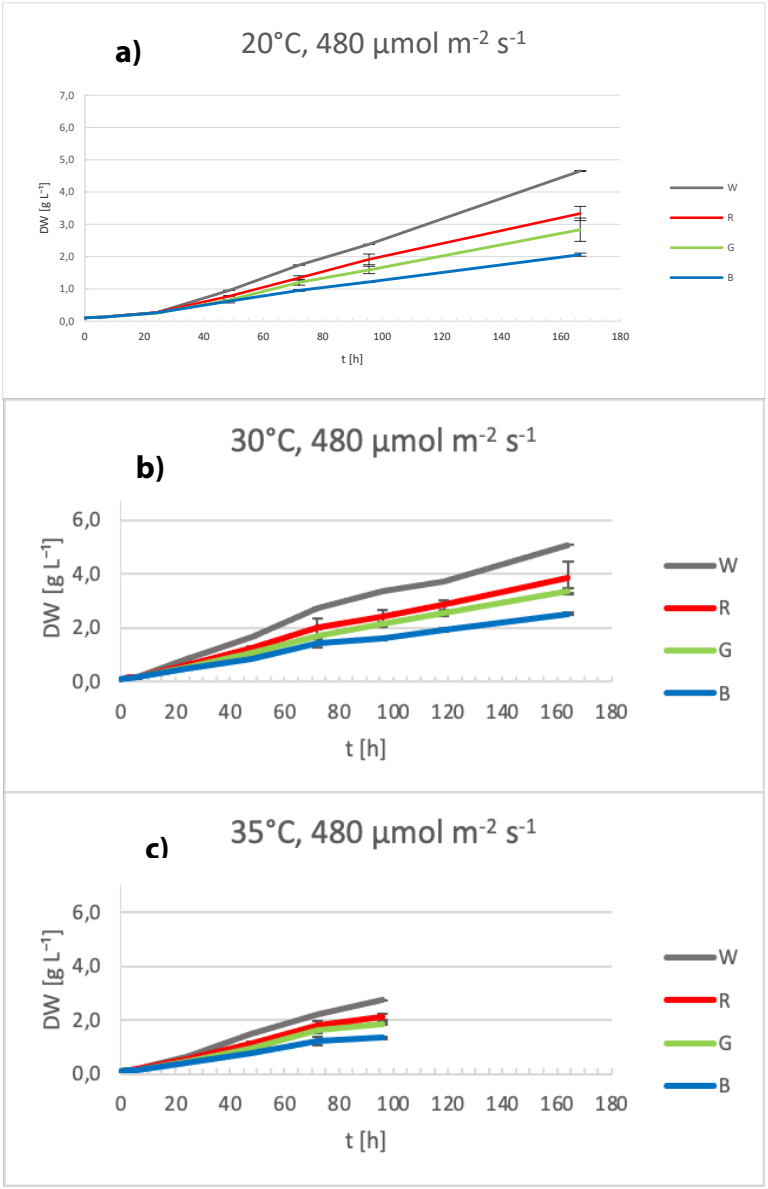



Abb. 20. Spektralselektive Wachstumsversuche im Labor vom 2.4. 2019. Wachstum der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* bei rotem (R), grünem(G), blauem (B) und weißem Licht (W). Die Versuche wurden bei 30°C sowie einer Beleuchtungsstärke von 120 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung (a), 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung (b) und 800 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung (c) durchgeführt. Es wurden jeweils Triplikate ausgewertet (Mean und SD). Zusätzlich wurde eine Weißlichtreferenz als Einzel- oder Doppelansatz getestet. Aufgetragen wurde die Trockensubstanz (DW g $L^{-1}$) gegen die Zeit. (Stunden). Die Trockensubstanz wurde aus der Optischen Dichte mittels Korrelation errechnet. Eigene Darstellung.

In diesen Versuchen wurden breite Spektralbereiche im Labormaßstab an den Algen getestet. Dabei wurde ungefiltertes Weißlicht mit Teilspektren verglichen. Die Teilspektren wurden mit Hilfe von optischen Filterfolien des Herstellers LEE, in Kombination mit der Phillips MSR-575 HR CT Metall Halogenlampe generiert. Die Farbfilter hatten eine Transmission von 380-540 nm (LEE-Blaufilter), 450-600 nm (LEE-Grünfilter), 580-720 nm (LEE-Rotfilter). Als Weißlichtreferenz diente jeweils das ungefilterte Lichtspektrum der Phillips MSR 575 HR CT. Alle Filterfarben und die Weißlichtreferenz wurden jeweils bei gleicher Lichtintensität (Photonenflussdichte) getestet. Neben der Biomassenproduktion wurde in diesen Versuchen täglich Laborproben entnommen und die Wertstoffproduktion in nachfolgenden Analysen bestimmt (Kap.4.2.8 und 4.2.9). (Abbildung 20 zeigt exemplarisch die Beziehungen des Wachstums zur Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke. Wie daraus zu erkennen, wurden die höchsten Biomassenzuwächse in allen Versuchen mit der Weißlichtreferenz erreicht. Bei Rotlicht wurde demgegenüber bei allen Versuchen ein etwa 30 % niedrigerer Wert erzielt. Mit blauem Licht wurden dagegen die niedrigsten Biomassenkonzentrationen erreicht, diese lagen versuchsabhängig ca. 20-30 % unter den Werten von Rotlicht und sogar unter 50 % der Werte von Weißlicht. Demgegenüber erwies sich Grünlicht als sehr variabel. Während bei niedrigen Beleuchtungsstärken und niedrigen Biomassenkonzentrationen ähnlich niedrige Werte wie bei Blaulicht erreicht wurden, konnte bei hohen Beleuchtungsstärken und hohen Biomassenkonzentrationen ähnliche oder sogar höhere Werte wie mit Rotlicht erzielt werden.

### 5.2.3 Laboruntersuchungen spektralselektiver Temperaturversuche




Temperaturversuche wurden bei mittlerer Photonenflussdichte durchgeführt. Insgesamt konnte hierbei die höchste Biomassenproduktion bei 30° C beobachtet werden (Abb.21b), dies ist auch das aus der Literatur bekannte Temperaturoptimum[2] von *A. obliquus*. Die niedrigste Biomassenproduktion wurde bei 20° C beobachtet (Abb. 21a), mit sinkender Temperatur verlangsamt sich der Metabolismus der Alge, wodurch der Biomassenaufbau langsamer abläuft. Auch die Biomassenproduktion bei 35° C war gegenüber dem Wachstumsversuch bei 30° C minimal niedriger, weil das Temperaturoptimum der Alge überschritten wurde. Allerdings zeigten sich bei allen Temperaturen keine signifikanten Veränderungen im spektralen Wachstumsverhalten der Algen. Das Verhältnis der gebildeten Biomassenkonzentration bei den getesteten Lichtfarben ist konstant (Abb. 21 a-c). Temperaturabhängig verändert sich allerdings die stoffliche Zusammensetzung auf Ebene der Fettsäuren (siehe 4.2.8). Die Versuche wurden über 170 h durchgeführt. Allerdings war im Versuch 20c der Thermostat nach 96 h. Die Ergebnisse werden trotzdem gezeigt, da weil bereits nach 96 h eine klare Tendenz zu erkennen war.

Abb. 21. Spektralselektive Wachstumsversuche im Labor von 02-04 2019. Wachstum der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* bei rotem- (R), grünem-(G), blauem- (B) und weißem Licht (W). Die Versuche wurden bei einer Beleuchtungsstärke von 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung bei 20°C (a), 30°C (b) und 35°C (c) durchgeführt. Es wurden jeweils Triplikate ausgewertet (Mean und SD). Zusätzlich wurde eine Weißlichtreferenz einzeln oder als Duplikat getestet. Aufgetragen wurde die Trockensubstanz (g $L^{-1}$) gegen die Zeit (Stunden). Die Trockensubstanz (DW) wurde aus der Optischen Dichte mittels Korrelation errechnet. Eigene Darstellung.

Es gibt zwei mögliche Erklärungen für das hohe Algenwachstum bei Weißlicht. Möglicherweise wird eine Kombination unterschiedlicher Spektralbereiche für ein hohes Wachstum benötigt. Alternativ könnte allerdings auch ein Strahlungs-Überladungseffekt bei den Teilspektren die Ursache für die Diskrepanz sein. Zur Klärung der Fragestellung wurden Folgeexperimente konzipiert. Durch Beklebung eines Streifenmusters der Lee-Filterfolien auf die Kultivierungseinheit konnten kombinierte Spektren an den Algen getestet werden (Abb.22).

### 5.2.4 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben und kombinierten Spektren

Zunächst wurde ein kombiniertes Spektrum aus der roten und grünen Filterfolie gegen den grünen und roten Spektralbereich sowie der Weißlichtreferenz getestet (Abb.21 a). In diesem Versuch lieferten die kombinierten Spektren keinen signifikanten Wachstumsvorteil gegenüber dem roten oder grünen Spektralbereich. Die Algen zeigten bei den kombinierten Spektren ein vergleichbares Wachstum wie beide Teilspektren. Bei der Weißlichtreferenz wurden nach 168 h mit über 5 g $L^{-1}$ ca. 30 % höhere Werte erreicht (Abb. 22 a).

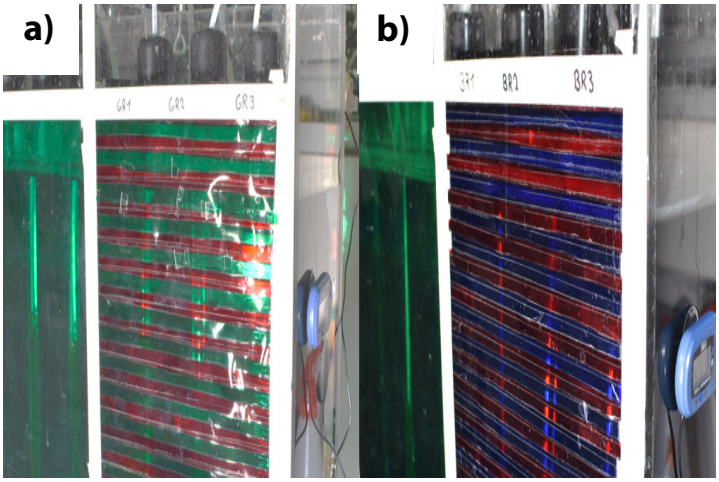



Abb. 22. Filterversuche mit kombinierten Spektren. Eigene Darstellung.

Weiterhin wurde eine Kombination aus roter und blauer Folie gegen die grünen und roten Teilspektren sowie gegen die Weißlichtreferenz getestet (Abb. 23 b). Auch in diesem Versuch lagen die Werte für die Biomassenproduktion bei der Weißlichtreferenz, vergleichbar mit den anderen Versuchen, mit etwas über 5 g $L^{-1}$ ca. 30 % über den Werten der roten und grünen Teilspektren. Die kombinierten Spektren führten dagegen zu einem im Vergleich zu Rot- und Grünlicht um ca. 20 % reduziertem Wachstum (Abb.23 b).

Offensichtlich führte in diesem Fall bei den kombinierten Spektren der Blaulichtanteil zur reduzierten Biomassenproduktion. Daraus kann geschlossen werden, dass Blaulicht auch in kombinierten Spektren keinen Wachstumsvorteil liefert und dieser Spektralbereich zugunsten eines hohen Rotlichtanteils an die PV abgetreten werden kann. Die Kombination der Teilspektren hatte nicht zu den Wachstumsresultaten von Weißlicht geführt. Daraus kann geschlossen werden, dass Weißlicht immer einen Vorteil vor den Teilspektren hat. Trotz photonengleicher Einstrahlung wird bei Weißlicht die Energie über einen breiteren Spektralbereich verteilt, woraus sich eine günstigere Energieverteilung als bei den Teilspektren ergibt. Im Umkehrschluss bedeutet dies allerdings, dass nur die Teilspektren untereinander in Bezug auf die Biomassenproduktion vergleichbar sind, was der Bedeutung von rotem Licht noch mehr Stellenwert einräumt.

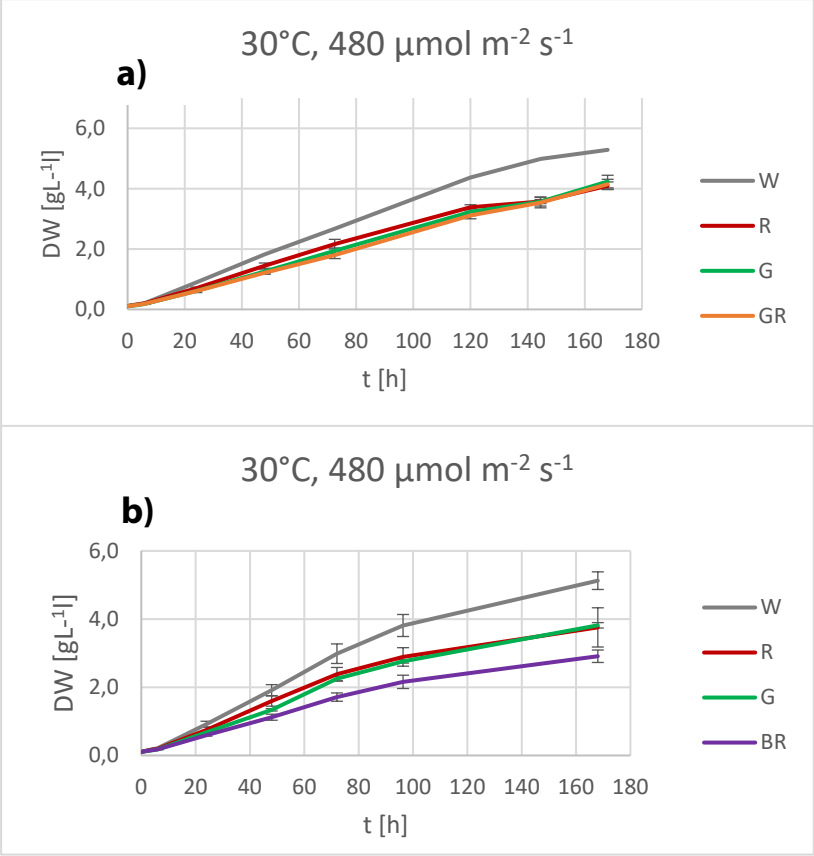



Abb. 23. Spektralselektive Wachstumsversuche im Labor von Februar und März 2019. Wachstum der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* bei rotem (R), grünem(G), grünrotem (GR), blaurotem (B)R und weißem Licht (W). Die Versuche wurden bei einer Beleuchtungsstärke von 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung 30°C durchgeführt. Es wurden jeweils Triplikate ausgewertet (Mean und SD). Zusätzlich wurde eine Weißlichtreferenz einzeln oder als Duplikat getestet. Aufgetragen wurde die Trockensubstanz (g $L^{-1}$) gegen die Zeit (Stunden). Die Trockensubstanz (DW) wurde aus der Optischen Dichte mittels Korrelation errechnet. Eigene Darstellung.

### 5.2.5 Laboruntersuchungen mit diskreten Einzelfarben über MOMO-Schichtstapel

In den hier gezeigten Ergebnissen (Abb. 24) wurden die MOMO-Schichtstapel F21 und F22 getestet (Tabelle 3). Diese Spektralfilter zeichneten sich durch einen distinkten Transmissionspeak aus, mit einer maximalen Transmission bei 467 nm (F 22) bzw. 596 nm (F21) um blaues und gelbes Licht zu vergleichen. verglichen werden. Bei einer Beleuchtungsstärke von 450 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ wurde nach 5 Tagen mit)eine Biomassenkonzentration von 2,5 g $L^{-1}$ und mit F21 ein um ca. 35 % höherer Wert (ca. 4 g) erreicht. Dieser Unterschied war bei 300 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ nicht mehr zu erkennen (Abb.21). Dies ist bemerkenswert, da gelbes Licht ähnlich wie grünes Licht von den Algen nur minimal absorbiert wird. Analog zum hohen Wachstum bei grünem Starklicht ist daher auch mit hohem Wachstum bei hohen Lichtintensitäten des gelben Spektralbereichs zu rechnen. Daher wurde bei höheren Photonenflussdichten ein höherer Wert mit F21 erreicht. Die Ergebnisse bekräftigen somit die Resultate aus den LEE-Filterversuchen (4.2.1).

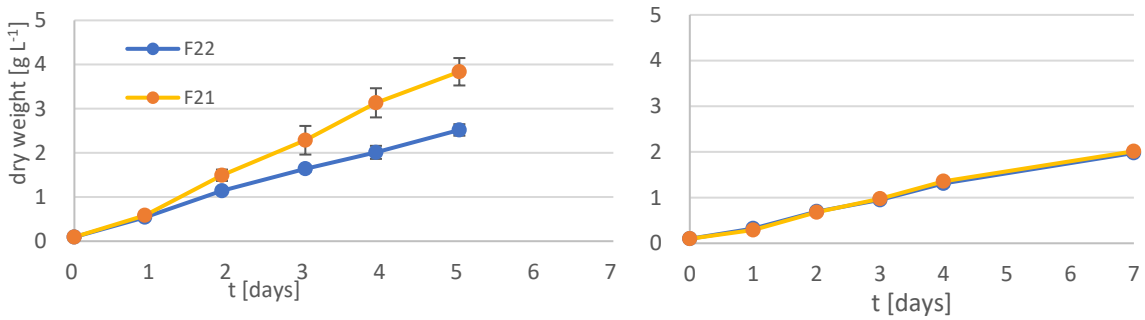



Abbildung 24. Vergleich des Wachstums (Mean und SD von Triplikaten) von *Acutodesmus obliquus* bei Bestrahlung mit F22 und F21 und 450 links bzw. 300 (rechts) µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung.

### 5.2.6 Laboruntersuchungen mit Mischungen aus zwei diskreten Einzelfarben

In diesen Versuchen wurden 4 verschiedene Filter mit zwei diskreten Transmissionspeaks getestet. Die Transmissionspeaks von F17 liegen bei 470 und 680 nm, von F18 bei 430 und 640 nm, und von F19 bei 490 und 720 nm. Der Filter Z47 hat eine sehr ähnliche Transmission wie F18. In diesem Fall liegen die Peaks bei 450 und 610 nm. Im Unterschied zu F18 sind die Peaks um ca. 20 nm in den längerwelligen Spektralbereich verschoben. Zudem überwiegt der Spektralbereich zwischen 580 und 700 nm und Blaulicht wird in geringerem Umfang transmittiert. Diese Filter wurden sowohl untereinander als auch mit dem Dummy F 20 verglichen. F20 simuliert das Spektrum einer a-Si Zelle und transmittiert vorwiegend Rotlicht zwischen 600 und 700 nm. Wie aus Abbildung 25 zu erkennen war das Wachstum mit dem Filter F18 nach 5 Tagen um ca. 10 % geringer als das mit den Filtern F17 und F19 von ca. 5 g $L^{-1}$. Allerdings ließen sich bei Beleuchtungsstärken von 950 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ keine Unterschiede mehr beobachten. Dies läßt den Schluß zu, dass bei höheren Beleuchtungsstärken, die bei F18 größeren Anteile des Spektralbereiches zwischen 550 und 600 nm einen spektralen Vorteil darstellen, die den Nachteil bei geringen Beleuchtungsstärken gegenüber F17 kompensieren.

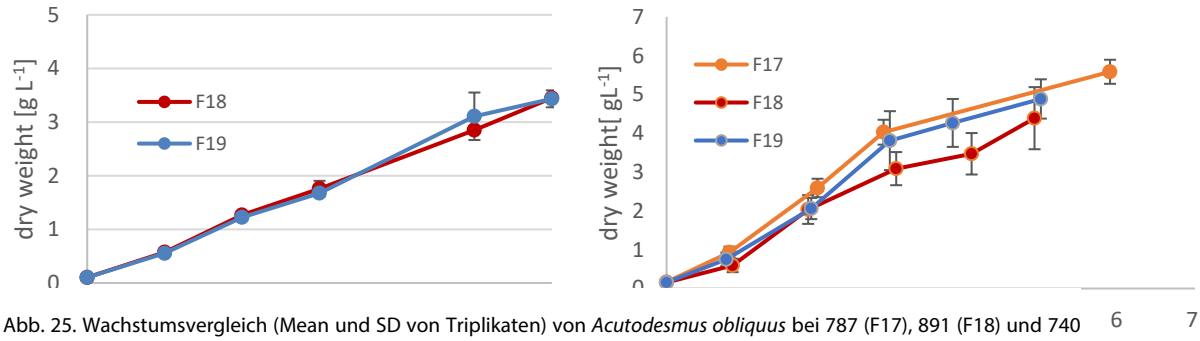



Abb. 25. Wachstumsvergleich (Mean und SD von Triplikaten) von *Acutodesmus obliquus* bei 787 (F17), 891 (F18) und 740 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR Strahlung (F19) (rechts), links bei 950 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung mit den Filtern F18 und F19. Eigene Darstellung.

In einem weiteren Test wurden die MOMO-Schichtstapel F20 und F17 bei 425 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ verglichen. Es konnten keine signifikanten Wachstumsvorteile des kombinierten Spektrums bei F17 gegenüber F20 mit einer hohen Transmission im roten Spektralbereich beobachtet werden (Abbildung 26). Dieser Befund bestätigt die bei den LEE-Filterversuchen beobachtete hohe Relevanz von rotem Licht.

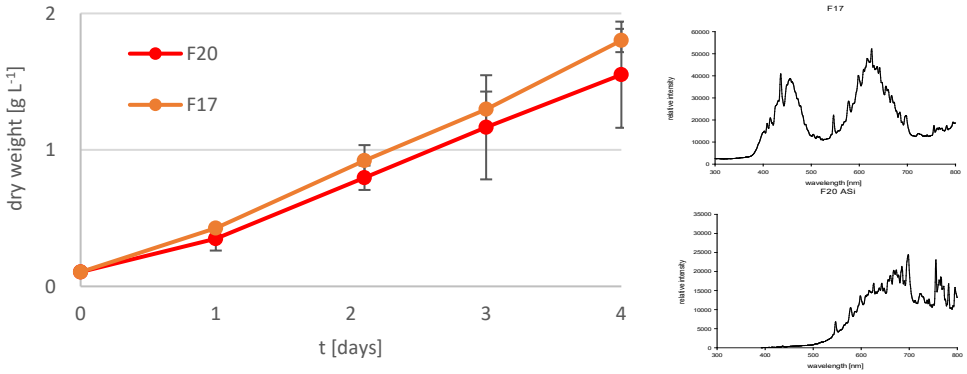



Abbildung 26. Vergleich des Wachstums (Mean und SD von Triplikaten) von *Acutodesmus obliquus* bei 425 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ PAR-Strahlung mit den Filtern F20 und F17. Daneben dargestellt die gemessenen Transmissionsspektren der Filter (F17 und F20) in Kombination mit der Phillips MSR 575 HR CT. Eigene Darstellung.

### 5.2.7 Versuche mit PV-Filter-Dummy Z47

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus Wachstumsversuchen mit einer voll funktionstüchtigen, semitransparenten PV-Zelle aus Germanium (Z47) dargestellt

Der untersuchte Filter Z 47 besteht aus einem vollständigen Schichtenaufbau einer funktionsfähigen, semitransparenten Photovoltaikzelle. Das Transmissionsspektrum des Z47 ist auf Abbildung 27 dargestellt.

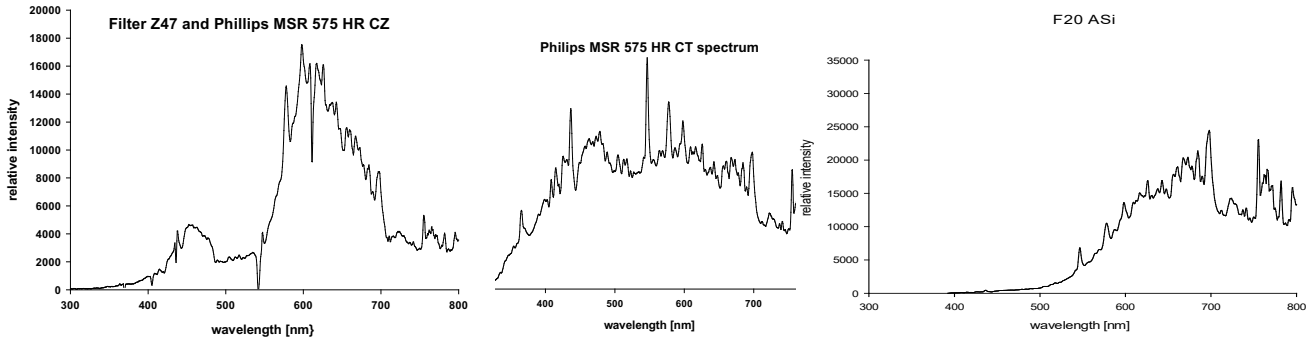



Abbildung 27. Transmissionsspektren einer spektralselektive Germanium-PV-Zelle (Z47), einer amorphe Silizium-PV-Zelle (ASI) und einem ungefilterten Weißlicht. Alle Spektren wurden mit einer Hochdrucklampe (MSR 575) erzeugt. Eigene Darstellung.

Wie darauf zu ersehen, erfolgt eine Transmission von photosynthetisch aktiver Strahlung hauptsächlich im Bereich zwischen 550 und 690 nm und in sehr geringem Umfang im Bereich 450. Die mit diesem Filter Z47 erreichten Wachstumsraten wurden verglichen mit Ergebnissen des Wachstums mit einem Rotfilter (entsprechend der Transmission einer amorphen Silizium PV Zelle - ASI Rot) und einem ungefilterten Weißlichtspektrum, wie es von einer Halogendampflampe (MSR 575 HR CZ) erzeugt wird, das weitgehend dem Sonnenlichtspektrum entspricht (Abbildung 27).

Die Wachstumsversuche wurden als batch im Labor mit der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* bei 30° C unter Begasung mit 5 % $CO_2$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche wurden in Abbildung 28 als photosynthetische Effizienzen, die aus der Zunahme der Biomasse pro mol Strahlungsenergie errechnet wurden, mit der jeweiligen Strahlungsintensität (Photonenfluxdichte) korreliert.

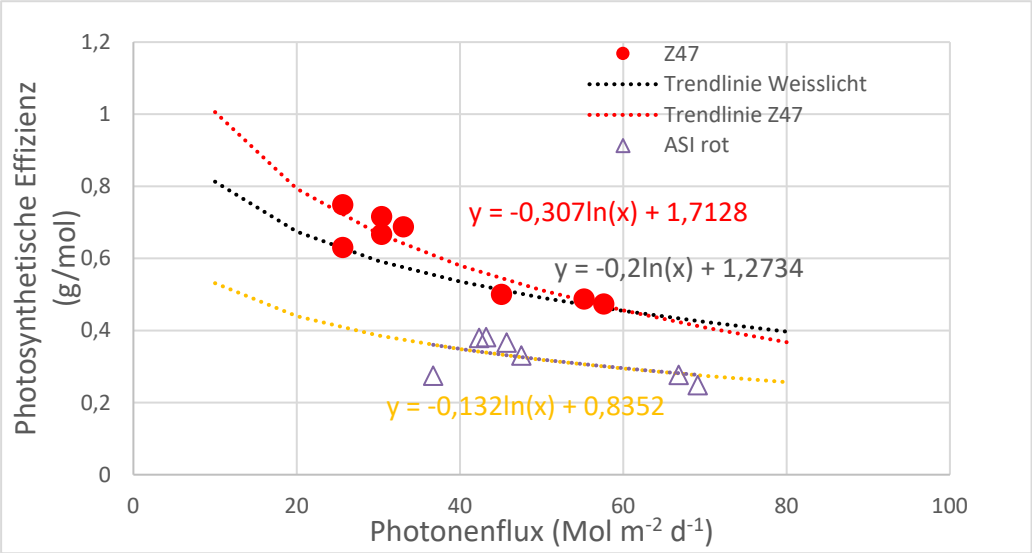



Abbildung 28. Vergleich des Wachstums der Grünalge *Acutodesmus obliquus* mit Weißlicht, mit Z47 gefiltertem grünem und rotem Licht und reinem rotem Licht (ASI). Aus den jeweiligen Messdaten wurden Trendlinien aus den logarithmischen Korrelationen errechnet und zusammen mit den Algorythmen dargestellt. Eigene Darstellung.

Wie aus Abbildung 28 zu ersehen, entsprachen die mit dem Filter Z 47 erzielten photosynthetischen Effizienzen bei einer Photonenflussrate von > 40 mol $m^{-2}d^{-1}$ weitgehend denen für das Weißlicht. Bei geringeren Photonenflussraten von < 40 mol $m^{-2}d^{-1}$ wurden mit der PV Zelle Z47 sogar deutlich höhere photosynthetische Effizienzen als mit Weißlicht erzielt. Diese Befunde unterscheiden sich wesentlich von den bisherigen Ergebnissen mit Farbfiltern (Rot bzw. Grünfiltern), in denen gezeigt werden konnte, dass mit Weißlicht unabhängig von der Photonenfluxdichte immer die höchste photosynthetische Effizienz erzielt wird (siehe ASI Rot - Abbildung 27). Offensichtlich bietet das Transmissionsspektrum des Z47 sowohl gegenüber den Farbfiltern als auch dem Weißlicht einen Wachstumsvorteil. Dieser ist damit zu begründen, dass auch der Spektralbereich des Grünlichts zwischen 550 und 620 nm zusammen mit dem Rotlicht für das Wachstum mit zur Verfügung steht. Dieser breitere Spektralbereich führt dazu, dass das Licht auch bei höheren Lichtstärken (i.e. Photonenflussraten) auf die Absorbtionsbande der Pigmente verteilt und deshalb besser genutzt und so eine höhere Effizienz erreicht wird. Bei geringen Lichtstärken führt die Spreizung dazu, dass weniger Lichtenergie verloren geht und deshalb die photosynthetische Effizienz sogar höher als bei Weißlicht ist. Darüber hinaus führt der kleine Transmissionspeak bei 460 nm dazu, dass mit Z47 auch das für eine Produktion von ungesättigten Fettsäuren notwendige Lichtsignal gesetzt wird, der Großteil des blauen Lichtspektrums aber für die Photovoltaik zur Verfügung steht.

### 5.2.8 Spektralselektive Freilandversuche mit Lee-Farbfiltern

Die Freilandversuche erfolgten in den Monaten Juli bis August 2018 an der Freilandanlage der SSC GmbH in Hamburg Reitbrook. In diesen Versuchen wurden die LEE-Filterfolien in Kombination mit Sonnenlicht verwendet. Die Kultivierung wurde in plattenförmigen Photobioreaktoren, die für die Anwendung an Fassaden von Gebäuden von der SSC GmbH in anderen F&E Projekten bereits bis zur Marktreife entwickelt wurden, durchgeführt (Abb. 29).

Abb. 29. Plattenförmige Photobioreaktoren aus Glas von 3 x1,3 m Größe und einer Schichtdicke zur Kultivierung von 1 cm. Links - im Einsatz auf der Pilotanlage der SSC GmbH in Hamburg Reitbrook und rechts - auf der Messe Glastec 2018 in Düsseldorf. Eigene Darstellung.

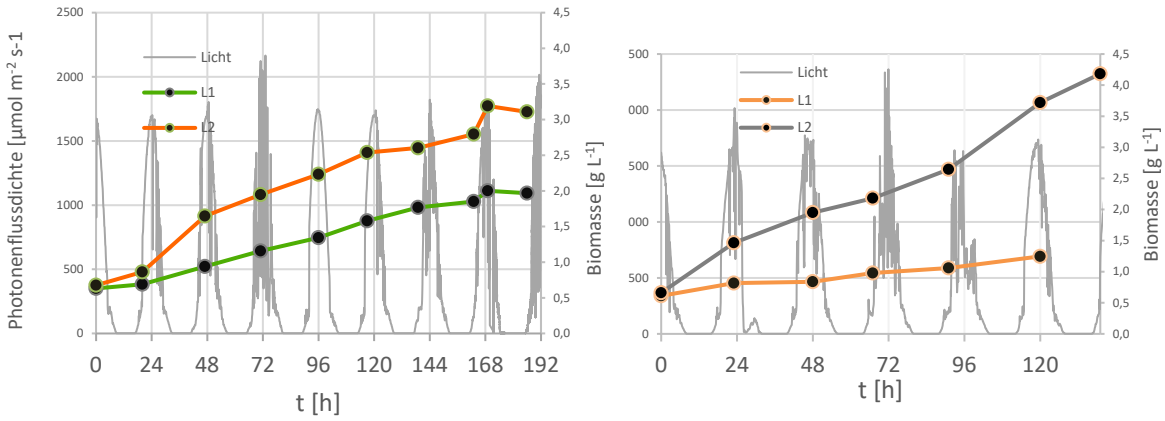



Abbildung 30. Zunahme der Biomasse beim Wachstum mit rotem (L2) und grünem Licht (L1) – links - und grünem (L1) und weißem Licht (L2) - rechts - in den Photobioreaktoren im Freiland. Es wurden Lee-Filter zur Filterung des Sonnenlichts (graue Linie) eingesetzt, wobei das rote Filter (L2) eine Transmission von 33,5 % und das grüne Filter (L1) von 20,6 % aufwies. Eigene Darstellung.

Abbildung 30 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der Freilandversuche. Wie darauf gut zu erkennen, erfolgte im Freiland mit den Filtern ein weitgehend ungestörter Biomasseaufbau, wobei die Unterschiede zwischen den Farben Rot und Grün auf die unterschiedliche Transmission und damit geringe PAR-Einstrahlung bei Grün zurückzuführen ist. Wie weiter unten in der photosynthetischen Effizienz zu erkennen, war diese weitestgehend gleich.

### 5.2.9 Photosynthetische Effizienz

Die photosynthetische Effizienz gibt an, wieviel Mol Photonen für den Aufbau eines g Trockenmasse Algen benötigt werden. Für alle durchgeführten Versuche wurden die Ergebnisse in Abbildung 31 zusammengeführt und mit der Photoneneinstrahlung (x) korreliert.

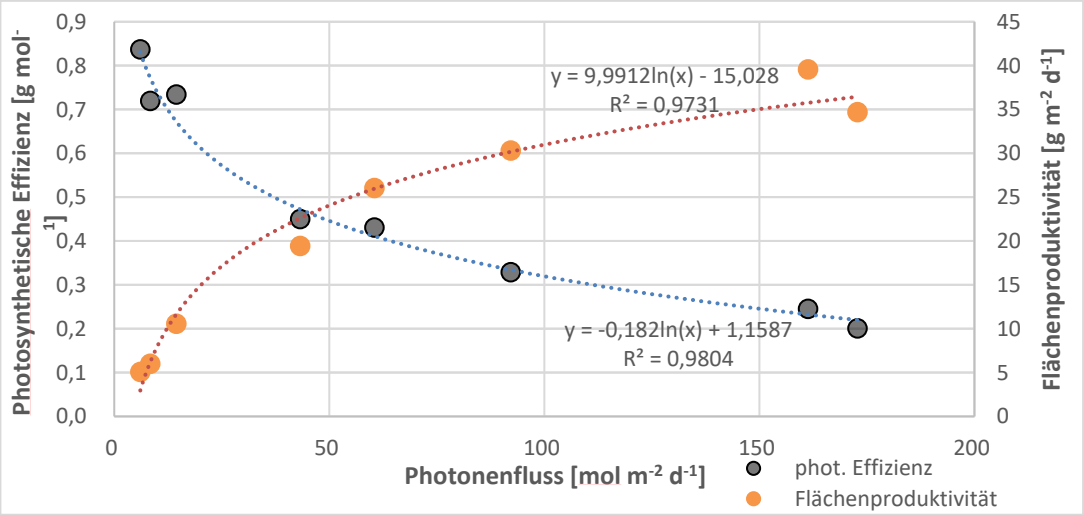



Abbildung 31. Photosynthetische Effizienz über alle mit Weißlicht im Rahmen von HYPP durchgeführten Labor- und Freilandversuche. Eigene Darstellung.

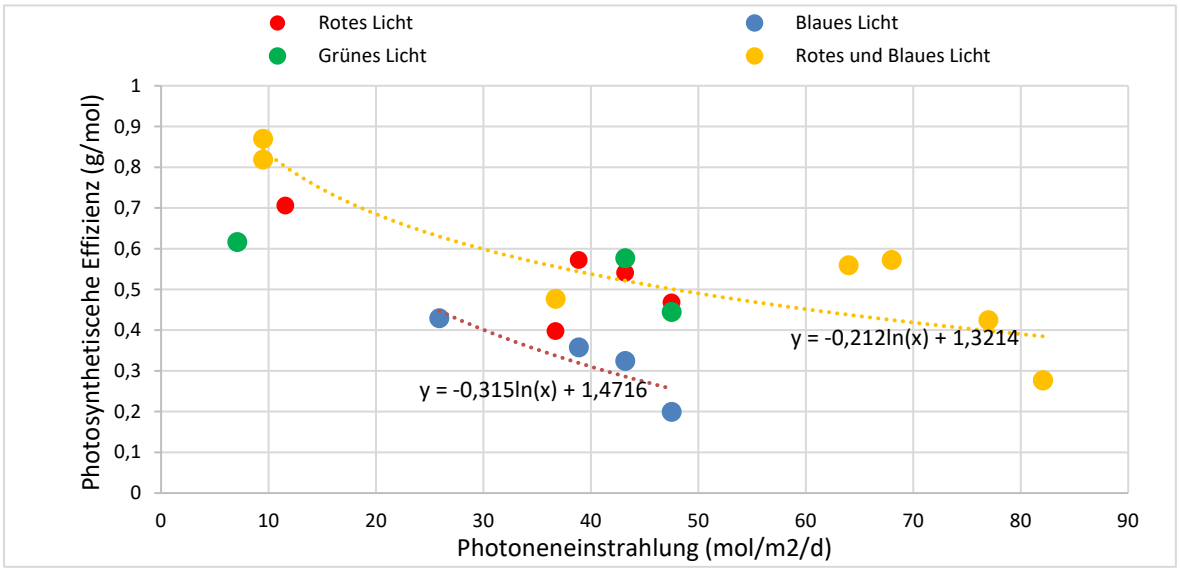



Abbildung 32. Vergleich der photosynthetischen Effizienz über alle im Rahmen von HYPP durchgeführten Labor- und Freilandversuche getrennt nach Einzelfarben Blau, Rot und Grün sowie den Gemischen aus Blau und Rot. Eigene Darstellung.

Wie aus Abbildung 32 zu erkennen, lag für die Farben Rot und Grün eine logarithmische Korrelation vor, die mit -0,21 ln (x) weitgehend der für Weißlicht – 0,18 ln (x) für Weißlicht (Abbildung 31) entspricht. Das blaue Licht zeigt hingegen eine über den gesamten Beleuchtungsbereich von 10 bis 80 mol $m^{-2}$ $d^{-1}$ eine ca. 40 % niedrigere Effizienz und mithin andere Korrelation von -0,315 ln(x).

### 5.2.10 Spektralselektiver Aufbau von Fettsäuren

| Nr. | FS | Nr. | FS |
|---|---|---|---|
| 1 | 12:0 | 10 | 18:0 |
| 2 | 14:0 | 11 | 18:1 (c/t) |
| 3 | 15:0a | 12 | 18:2 |
| 4 | 15:0 | 13 | 18:3 |
| 5 | 16:0 | 14 | 18:4 |
| 6 | 16:1(c/t) | 15 | 20:0 |
| 7 | 16:2 | 16 | 22:0 |
| 8 | 16:3 | 17 | 24:0 |
| 9 | 16:4 | | |

Tab. 4. Auflistung der identifizierten Fettsäuren in *Acutodesmus obliquus*. FS (Fettsäure); Nr. (laufende Nummer); c/t (*cis*/*trans*); Der Aufbau der Fettsäuren sind in der Kurzschreibweise dargestellt (Anzahl der Kohlenstoffmoleküle: Anzahl der Doppelbindungen). Eigene Darstellung.

Mikroalgen produzieren im Rahmen des Stoffwechsels diverse Fettsäuren, die als Speicherstoffe zu sogenannten Triacylglyceriden verestert sind. Darüber hinaus befinden sich Fettsäuren in der Zellmembran als Lipide gebunden. Mögliche Veränderungen in der Menge und Zusammensetzung der Fettsäuren bei einer spektralselektiven Bestrahlung sind Gegenstand des Projektes HYPP. Dazu wurden Algenproben aus den Versuchen 4.2.1 sowie 4.2.2 mittels Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie (GC MS) analysiert. Bei der Analyse der Kulturproben der Mikroalge *A. obliquus* konnten 17 unterschiedliche Fettsäuren identifiziert werden (Tabelle 4). Die identifizierten Fettsäuren sind dabei in der chemisch etablierten Kurzschreibweise angegeben. In dieser Schreibweise wird zunächst die Anzahl der Kohlenstoffatome und nach einem Doppelpunkt die Anzahl der Doppelbindungen angegeben. Beispielsweise besteht die Fettsäure alpha Linolensäure, (18:3) aus 18 Kohlenstoffatomen und sie besitzt 3 Doppelbindungen. Einige Fettsäuren wurde zudem in zwei Isomeren Formen *cis* und *trans* (c/t) identifiziert. In der organischen Chemie werden als Isomere, Verbindungen mit der gleichen Summenformel aber unterschiedlichen Verknüpfungen innerhalb des Moleküls bezeichnet. Darüber hinaus wurde die Fettsäure 15:0a (anteiso) mit verzweigter Kohlenstoffkette identifiziert.

Zur Steigerung der Wertstoffgehalts der Algenbiomasse wäre ein erhöhter Anteil ungesättigter Fettsäuren (mit einer oder mehreren Doppelbindungen) optimal. Eine herausragende Rolle nimmt dabei die alpha Linolensäure (18:3) ein. Hierbei handelt es sich um eine so genannte Omega-3 Fettsäure, mit hoher Relevanz für die Nahrungs- und Futtermittelindustrie[28]. Zudem ist wichtig, dass ein geringer Anteil von trans-Fettsäuren vorliegt. Die trans-Fettsäuren haben ungünstige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Zusammengefasst wäre eine Steigerung des Anteils der ungesättigten Fettsäuren bei gleichzeitiger Reduzierung der Trans-Fettsäuren für die Wertstoffproduktion ideal[29].

Es wurde aus jedem Versuch ausgewählte Proben analysiert. Durch diese systematische Analyse sollte der Einfluss unterschiedlicher Lichtspektren auf das Fettsäureprofil untersucht werden. Zusätzlich konnte auch der Einfluss der Parameter Lichtintensität und Temperatur auf die Algen untersucht werden. Insbesondere interessant sind die ernährungsrelevanten ungesättigten Fettsäuren. Quantitativ überwog zwar die gesättigte Fettsäure Palmitinsäure (16:0), die ernährungsrelevante Omega-3-Fettsäure, alpha Linolensäure (18:3) sowie

[28] Brenna, J. T. (2002). Efficiency of conversion of α-linolenic acid to long chain n-3 fatty acids in man. Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care, 5(2), 127-132.

[29] Gebauer, S. K., Psota, T. L., & Kris-Etherton, P. M. (2007). The diversity of health effects of individual trans fatty acid isomers. Lipids, 42(9), 787-799.

die hochungesättigte Fettsäure (16:4) kommen jedoch ebenfalls in hohen prozentualen Anteilen vor. Weiterhin konnten signifikante Mengen die ungesättigten Fettsäuren 16:1, 16:2, 16:4, 18:1, 18:2 und 18:4 sowie die gesättigte Fettsäure 18:0 nachgewiesen werden. Einige der Fettsäuren konnten zudem in den stereoisomeren *cis*-und *trans*- Konfigurationen nachgewiesen werden, so die 16:1(c/t) und 18:1 (c/t). Darüber hinaus wurden in geringen Mengen die Fettsäuren 12:0, 14:0, 15:0, 22:0, 24:0 sowie die verzweigte anteiso-Pentadecansäure (15:0a) nachgewiesen. Aufgrund der geringen Nachweisgrenze der eingesetzten Analytik kann nicht ausgeschlossen werden, dass die in Spuren nachgewiesenen Fettsäuren der natürlichen Bakterienflora von *A. obliquus* entstammen.

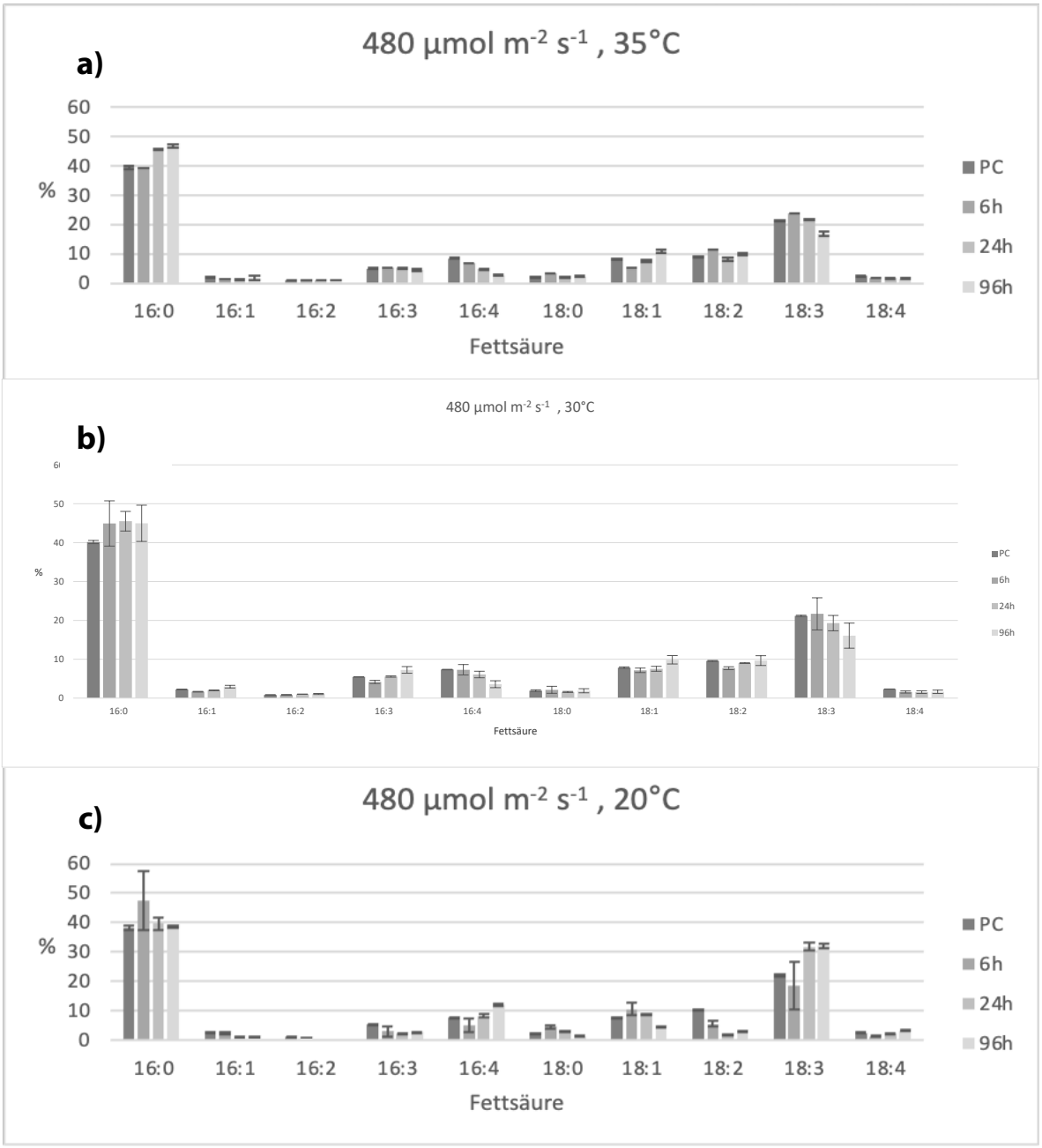



Abb. 33. Fettsäureveränderungen in der Alge *Acutodesmus obliquus* in den Laborversuchen von Februar-April 2019. Kultiviert wurde bei 35° C (a), 30° C (b), 20° C (c) sowie 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ Weißlicht. Es wurden jeweils die Proben der Vorkultur nach 0h Kultivierung (PC), 6h Kultivierung 24 h Kultivierung und 96h Kultivierung ausgewertet. Die Vorkultivierung erfolgte bei 120 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ und 25° C. Eigene Darstellung.

Für das Verständnis der dynamischen Veränderungen der Fettsäuren in *Acutodesmus obliquus*, ist zunächst erforderlich den Einfluss der Temperatur zu verstehen. Daher wurden bei konstanter Photonenflussdichte und einheitlicher Lichtfarbe die Veränderungen im Fettsäureprofil beobachtet. Weil die Tendenz bei allen getesteten Spektren sehr ähnlich war, wurden exemplarisch die Proben der Weißlichtreferenz aus den Temperaturversuchen (4.2.2) dargestellt (Abb. 33). Bei den Temperaturversuchen ist zu erkennen, dass bei höheren Temperaturen der prozentuale Anteil der gesättigten Fettsäure 16:0 im zeitlichen Verlauf zunimmt. Reziprok dazu nimmt der Anteil der hochungesättigten Fettsäuren 16:4 und 18:3 sukzessive ab. Im Gegensatz dazu verändert sich das Fettsäureprofil beim 20° C Versuch hin zu einer höheren Entsättigung der Fettsäuren. Insbesondere der Anteil der Fettsäuren 16:4 und 18:3 steigt dabei jeweils um ca. 30 % (Abb. 33b). Die Zunahme des Desaturierungsgrades bei niedrigeren Kultivierungstemperaturen ist in der Literatur bei anderen Algen bereits bekannt[3]. Viele Mikroorganismen erhöhen dadurch die Fluidität der Cytoplasmamembran bei sinkenden Temperaturen. Biochemisch werden die 18:3 und 16:4 aus den Fettsäuren 16:1, 16:2 und 16:3 bzw. 18:1 und 18:2 synthetisiert. Es ist erkennbar, dass diese Vorläufermoleküle sich reziprok zur 16:4 und 18:3 verhalten. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass dieser Syntheseschritt durch den Parameter Temperatur beeinflusst wird.

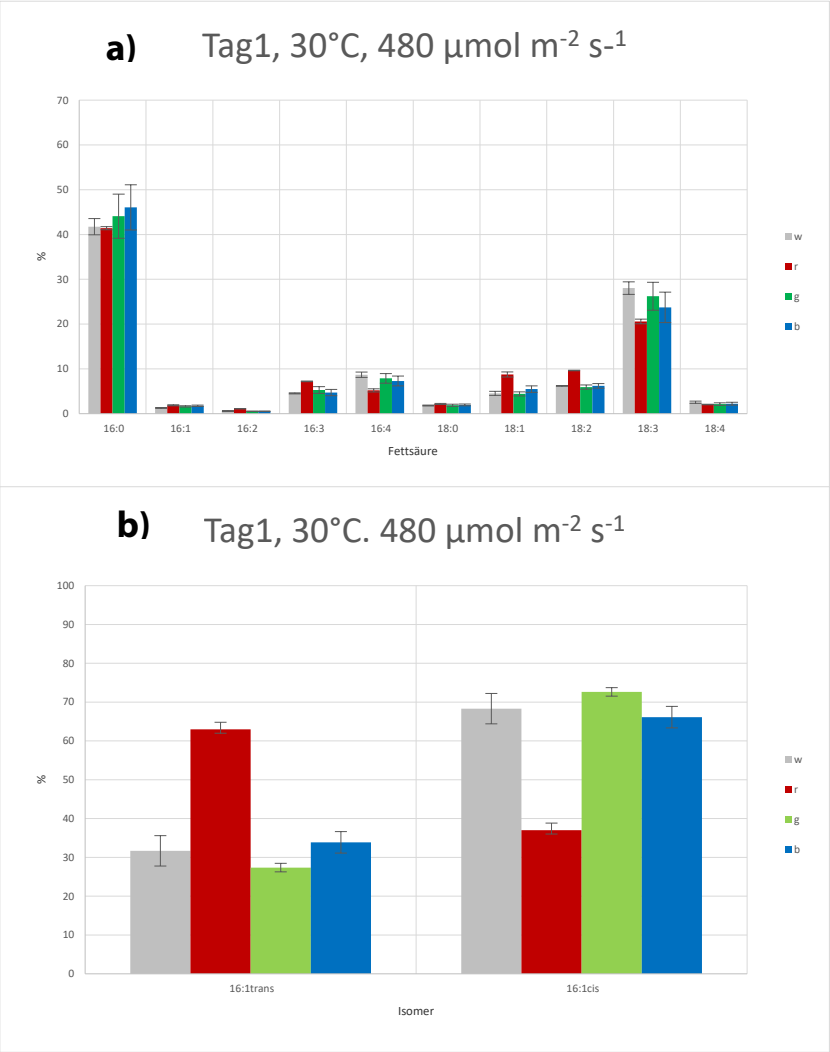



Abb. 34. Fettsäureveränderungen in der Alge *Acutodesmus obliquus* in den Laborversuchen von Februar-April 2019. Prozentuale Veränderungen der Fettsäuren (a) und der isomeren Formen der Fettsäure 16:1. Kultiviert wurde über den Zeitraum von 24 h bei 30°C sowie photonengleich 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$ mit Weißlicht (w), Rotlicht (r), Grünlicht(g) und Blaulicht (b). Isomere sind chemische Verbindungen mit gleicher Molekülstruktur aber anderer Anordnung der Molekülverknüpfungen. Eigene Darstellung.

Bei allen Versuchen sind signifikante Veränderungen beim Fettsäureprofil der Algen in Abhängigkeit der eingestrahlten Spektralfarbe erkennbar. Die Veränderungen beziehen sich sowohl auf den Saturierungsgrad als auch auf das Verhältnis der Isomeren Formen bestimmter Fettsäuren. Hierbei zeigen die Resultate der Rotlichtproben gegenüber den Proben aller anderen Spektralbereichen Veränderungen.

Es zeigte sich unter allen getesteten Bedingungen eine bis zu 30 % reduziertere Produktion der hochungesättigten Fettsäuren 16:4 und 18:3 bei Rotlicht gegenüber allen anderen getesteten Lichtspektren.

Im Gegensatz dazu sind bei Rotlicht die Fettsäuren 16:2, 16:3 sowie 18:1 und 18:2 gegenüber

den anderen Spektralfarben erhöht (Abb. 34a). Wie weiter oben bereits erläutert werden die 16:4 und 18:3 aus diesen niedriger ungesättigten Fettsäuren synthetisiert.

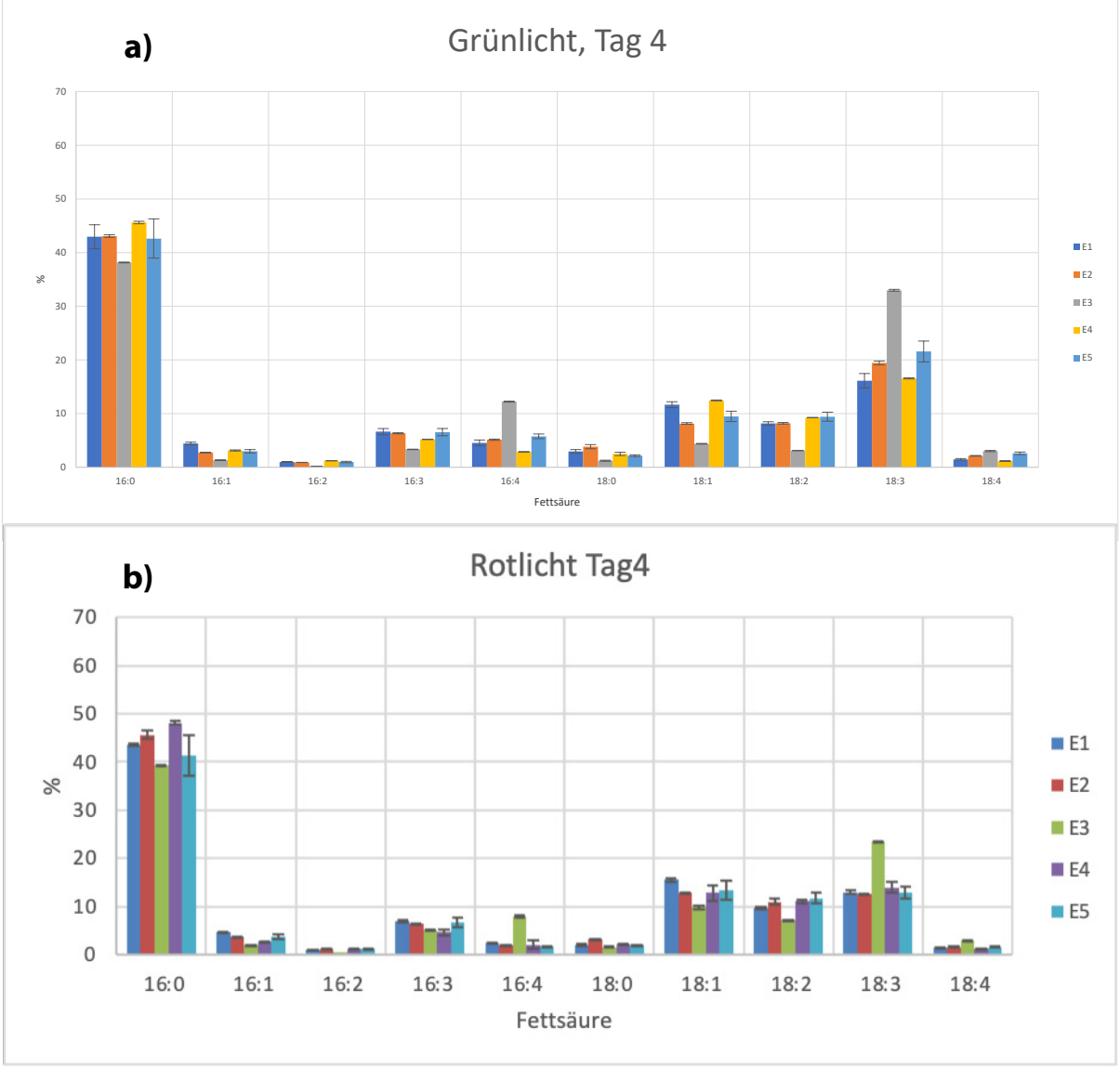



Abb. 35. Fettsäureveränderungen in der Alge *Acutodesmus obliquus* in den Laborversuchen vom 2.4. 2019. Prozentualer Vergleich der Fettsäuren aus den Laborversuchen. E1: 120 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$, 30°C; E2:480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$, 30°C, E3: 480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$, 20°C, E4:480 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$, 35°C und E5:800 µmol $m^{-2}$ $s^{-1}$, 30°C. Verglichen sind jeweils Proben von Grünlicht und Rotlicht nach 4 Tagen Kultivierung. Eigene Darstellung.

Weiterhin wurden auch auf der Ebene der Isomeren Veränderungen beobachtet. Die Fettsäure 16:1 kommt in der Natur in zwei isomeren Formen (*cis* und *trans*) vor. Den *trans*-Fettsäuren werden in der Ernährungswissenschaft negative Eigenschaften zugeordnet, während die *cis*-Fettsäuren eine hohe Ernährungsrelevanz haben[4]. Es konnte in allen untersuchten Proben eine signifikante Erniedrigung der 16:1 *cis* Form zugunsten der 16:1 *trans*-Form beobachtet-werden. Exemplarisch sind diese Veränderungen in Abb. 34 b bei der Probe von Tag 1 aus den Kultivierungsversuchen (4.2.2) bei mittlerer Intensität und 30° C dargestellt. Isomere Moleküle lassen sich auch durch thermische Energie oder Strahlungsenergie ineinander umwandeln. Häufig ist dafür allerdings

kurzwellige Strahlung notwendig, was den Unterschied der Rotlichtproben zu den Proben aller anderen Spektralfarben erklären könnte.

Alternativ kommen neben diesen Photokonversionseffekten auch metabolische Reaktionen in Betracht. Dieser Effekt auf Ebene der Isomeren ist bisher in der Literatur unbekannt. Neben dem Lichtspektrum und der Temperatur beeinflusst auch die Strahlungsintensität das Fettsäureprofil. Generell konnte hier eine Zunahme der hochungesättigten Fettsäure 18:3 mit steigender Strahlungsintensität beobachtet werden (Abb. 35 a und b). Insgesamt wurde der höchste Anteil an hochungesättigten Fettsäuren bei 20°C, vergleichsweise hoher Photonenflussdichte und grünem Licht erreicht (Abb.35a). Zur Aufwertung der Fettsäurekomposition wäre also neben dem Rotlicht, die zusätzliche Bestrahlung der Algen mit kurzwelligerem Licht erforderlich. Die Supplementierung von Blaulicht hätte weiterhin den Vorteil eines erhöhten 16:1 (c/t) Verhältnisses. Von diesem Aspekt her betrachtet hätte eine Beschattung mit einer spektralen Komposition des Filters Z47 einen deutlichen Vorteil vor einer ausschließlichen Bestrahlung mit Rotlicht, wie z.B. in Filter ASi F20.

### 5.2.11 Spektralselektive Kultivierung und Pigmente

Zusätzlich wurden aus den Proben der spektralselektiven Versuche die Pigmente extrahiert und mittels *High performance liquid Chromatographie* und Diodenarraydetektor (HPLC-DAD = High Liquid Chromatography mit Dioden Array Detector) qualitativ und untersucht. Bei diesen Analysen konnten die Pigmente Chlorophyll-*a*, Chllorophyll-*b*, Lutein, Violaxanthin und Neoxanthin mittels Pigmentstandards eindeutig identifiziert werden. Es wurde zudem ein Pigment mittels Absorptionsspektrum als Phaeophytin identifiziert. In den Algen dominiert das Pigment Chlorophyll a mit etwa 50 % Gesamtpigmentanteil. Das Pigment Chlorophyll b sowie die Xanthophylle, Violaxanthin und Lutein machen jeweils etwa 15 % des Gesamtpigmentanteils aus. Das Neoxanthin trägt in etwa zu 5 % zum Gesamtpigmentanteil bei.

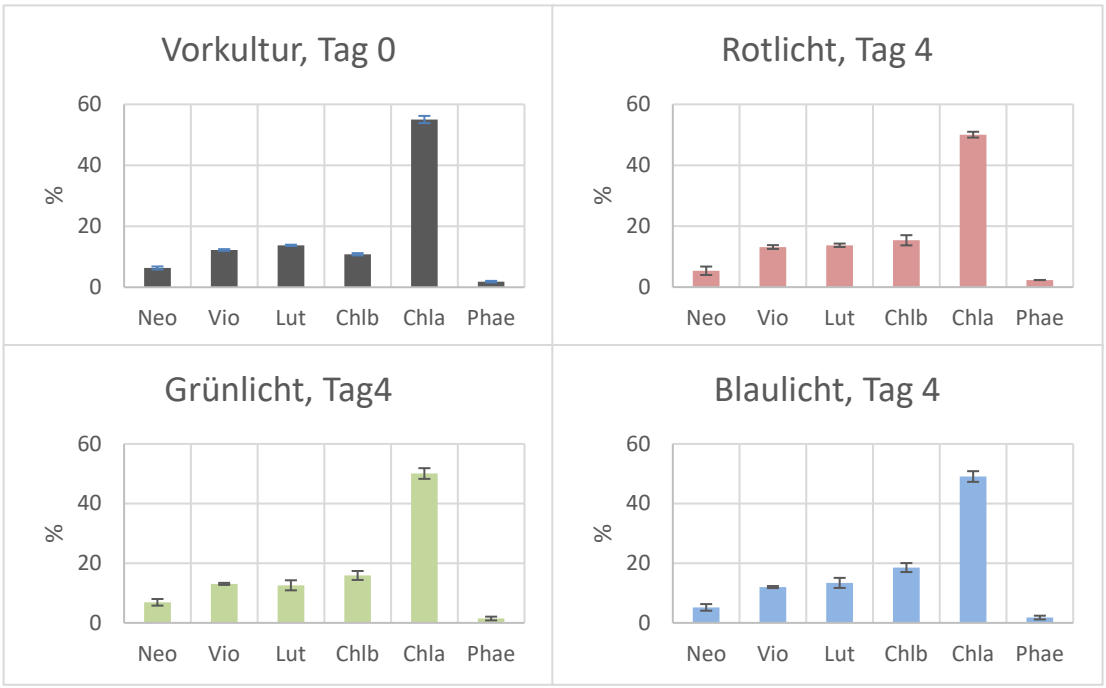



Abb. 36. Pigmentanteile in Acutodesmus obliquus in Versuchen mit unterschiedlichen Beleuchtungsfarben. Es wurden jeweils Triplikate der Spektralfarben und Unikate der Referenz analysiert. Dargestellt sind die Resultate der Versuchsproben aus den Versuchen bei 480 und 30°C. Neo: Neoxanthin, Vio: Violaxanthin, Lut: Lutein, Chlb: Chlorophyll b, Chla: Chlorophyll a und Phae: Phaeophytin. Die Grafiken sind farblich in den Spektralfarben dargestellt mit denen kultiviert wurde. Die Vorkultur am Tag 0 dargestellt. Eigene Darstellung.

In Abb. 36 sind repräsentative Resultate der Proben nach 4 Tagen Kultivierungsdauer dargestellt. Wie dort erkennbar konnten keine signifikanten Veränderungen beim Pigmentverhältnis bei unterschiedlichen Spektralfarben beobachtet werden. Es ändert sich lediglich über den Zeitverlauf das Verhältnis von Chlorophyll a zu Chlorophyll b. Hierbei nimmt der Anteil von Chlorophyll b gegenüber zuungunsten von Chlorophyll a im Kultivierungsverlauf zu. Eine Erklärung für diese Veränderung könnte mit der steigenden gegenseitigen Verschattung der Algen bei höherer Biomassenkonzentration zusammenhängen. Das Chlorophyll b hat eine höhere Absorption im Bereich der so genannten Grünlücke, sodass es die schwächer absorbierten Bereiche des Lichtspektrums effizienter nutzen kann.

# 6 Zusammenfassung

Im interdisziplinären Verbundprojekt „HYPP“ haben die Partner SSC GmbH aus Hamburg und das DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme aus Oldenburg zusammen an der Realisierung eines Hybridsystems gearbeitet, das eine simultane Nutzung des Sonnenlichtes zur Produktion von Strom und Biomasse in Form von Algen ermöglicht. Ziel dieses Projektes war es, einen bereits etablierten Photobioreaktor, der als Fassadenelement in Gebäude integriert werden kann, mit einer neuen Art von teiltransparenten Solarzellen auszustatten und ihren Einfluss auf die Biomasseproduktion zu untersuchen. Die Grundlage für diese Idee bildet die Absorbtion von Chlorophyll, das in Algen und Pflanzen dafür sorgt, dass die Energie des Lichts zur Bildung der Biomasse umgesetzt wird. Das grüne Chlorophyll absorbiert dabei zu großen Teilen blaues und rotes Licht. Somit steht das grüne Licht zur Produktion von Strom zur Verfügung. Die Aufgabe des Projektpartners DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme war es daher, eine Solarzelle zu entwickeln, die rotes und blaues Licht passieren lässt, während grünes und infrarotes Licht zur Stromproduktion genutzt werden kann. Eine derartige Solarzelle wird als spektralselektiv bezeichnet.

Als Grundlage für eine derartige Solarzelle diente die am DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme entwickelte Dünnschicht-Germanium-Solarzelle, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Sie besteht aus einem sehr dünnen Germanium-Absorber und weiteren Schichten, die zum Ableiten des elektrischen Stroms benötigt werden. Das Besondere an dieser Solarzelle ist, dass aufgrund der extrem geringen Dicke von nur 100 Atomlagen und der besonderen optischen Eigenschaften der verwendeten Materialien das Licht in der Solarzelle „eingefangen“ wird. Dadurch passiert das Licht nicht nur einmal den Absorber, sondern mehrmals, was zu einer erhöhten Stromproduktion führt. Während des Projektes konnte die Umwandlungseffizienz dieser Solarzellen-Technologie auf 5 % gesteigert werden.

Um die Solarzelle nun dazu zu befähigen, nur das grüne Licht zu absorbieren und die anderen Farben durchzulassen, wurde erfolgreich ein neuartiger Rückreflektor entwickelt. Dieser besteht aus zwei sehr dünnen und daher transparenten Silberschichten, die durch eine transparente, leitfähige Schicht (TCO) getrennt sind. Ein zweites TCO schützt die äußere Silberschicht. Durch gezielte Abstimmungen der optischen Eigenschaften und Schichtdicke in dem Schichtstapel kann eingestellt werden, welche Lichtfarben den Reflektor passieren. Durch gezielte Optimierung der Herstellungsprozesse konnte für den Reflektor eine Transmission von 50 % des blauen und 60 % des roten Lichtes erreicht werden, während grünes und infrarotes Licht reflektiert wird und damit zur Stromproduktion beiträgt.

Im nächsten Schritt konnte dieser neue Reflektor erfolgreich in den Schichtstapel der Solarzelle integriert werden. Das grüne und das infrarote Licht werden in der Kavität „eingefangen“, während das blaue und rote Licht die Solarzelle passieren und somit für das Algenwachstum bereitstehen. Nach weiteren Anpassungen im gesamten Schichtstapel konnte für eine derartige Solarzelle eine Transmission im blauen Licht von 20 % und im roten Licht von 60 % erreicht werden. Die Umwandlungseffizienz von Licht zu Strom beträgt in diesem teildurchlässigen Fall zwischen 1,6 % und 2,5 %. Eine höhere Effizienz kann durch Anpassungen der Schichtdicken erreicht werden, jedoch geht dies auf Kosten des transmittierten Lichts.

Zur Verbesserung der Transparenz der Solarzelle mussten einige Schichten in der Solarzelle weiter verbessert werden. Silizium-Schichten, die zur Extraktion des elektrischen Stroms benötigt werden, absorbieren einen Teil des Lichts, ohne dass dieser zur Stromgewinnung genutzt werden kann. Daher wurden Schichten aus alternativen Materialien entwickelt und der Einfluss aller Herstellungsparameter genau untersucht. Dabei konnten Siliziumcarbid-Schichten gefunden werden, die weniger Licht absorbieren und dennoch zur Stromextraktion eingesetzt werden können. Somit kann auf der n-Seite der Solarzelle das Silizium durch Siliziumcarbid ersetzt werden. Auf der p-Seite kann das Silizium durch eine dünne Schicht aus Molybdänoxid (MoOx) ersetzt werden. Hierbei konnte in Einzelschichten der Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Absorption gezeigt werden.

Es konnte im Vergleich zum Silizium eine deutliche Reduktion der Absorption in den Einzelschichten erreicht werden. Um die elektrische Funktionalität der neuen Schichten zu untersuchen, wurden diese in die Germanium-Solarzelle eingebaut. Es konnte gezeigt werden, dass diese modifizierten Zellen funktionieren, jedoch mit unerwartet verminderter elektrischer Leistung von nur 2 %. Es besteht an dieser Stelle somit weiterer Entwicklungsbedarf, um die Stromextraktion mit den neuen Materialien zu optimieren.

Im letzten Schritt wurden neue Siliziumcarbid- und Molybdänoxid-Schichten in der transparenten Version der Solarzelle verbaut, um den Vorteil in der Absorption zu untersuchen. Es konnte die Transmission für blaues Licht im Vergleich zu einer Solarzelle mit Silizium-Schichten von knapp 10 % auf fast 20 % erhöht werden. Für das rote Licht konnte entgegen den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen keine Verbesserung nachgewiesen werden. Es besteht an dieser Stelle somit ebenso weiterer Entwicklungsbedarf, um die optischen Eigenschaften des Gesamtsystems zu optimieren.

Weiterhin konnte die monolitische Verschaltung für ein spektralselektives Minimodul gezeigt werden. Dadurch war es erstmals möglich, elektrisch funktionierende PV-Module von 7 x 7 cm herzustellen, die jedoch nur einen sehr geringen Strom und damit auch nur eine Effizienz von 0,6 % aufwiesen.

Zur Abstimmung der semitransparenten PV auf die Bioreaktoren wurden bei der SSC GmbH umfassende Untersuchungen an der Mikroalge *Acutodesmus obliquus* durchgeführt. Bei diesen Versuchen sollte die spektrale Präferenz der Algen untersucht werden. Insbesondere wurde der Einfluss unterschiedlicher Lichtspektren auf die Biomassenproduktion und den Wertstoffgehalt in den Algen analysiert. Ziel dieser Arbeiten war es, geeignete Wellenlängenbereiche zu definieren, auf welche die semitransparente Solarzelle hin zu einer erhöhten Transmission abzustimmen war. Zunächst wurde dabei, ausgehend von den Absorptionsmaxima im Photosynthesepigment Chlorophyll, angenommen, dass vorwiegend das rote und das blaue Licht für die Algen relevant ist. Das grüne Licht, so wurde ferner angenommen, hat eine untergeordnete Bedeutung für die Biomassenproduktion in Mikroalgen. Zunächst wurden zur Überprüfung dieser Annahmen Versuche mit diskreten Lichtspektren im Labor durchgeführt. Die entsprechenden Spektren wurden mit Tageslichtlampen in Kombination mit optischen Filterfolien generiert. In diesen Versuchen wurden Rotlicht, Grünlicht und Blaulicht sowie das ungefilterte Spektrum (Weißlicht) miteinander verglichen. Es zeigte sich bei diesen ersten Versuchen, dass mit Weißlicht unter allen Bedingungen immer die höchste Biomassenproduktion erzielt werden konnte. Demgegenüber war die Biomassenausbeute bei Bestrahlung mit Rotlicht um ca. 30 % reduziert. Die Bestrahlung mit dem blauen Spektralbereich resultierte in der geringsten Biomassenproduktion. Dabei wurden, abhängig von der Strahlungsintensität, nur etwa 30 bis Rolle50 % der Ergebnisse von Weißlicht erzielt. Die ursprüngliche Annahme, wonach Grünlicht eine untergeordnete Rolle bei der Algenphotosynthese hat, hat sich nicht bestätigt. Insbesondere unter den Bedingungen von hohen Strahlungsintensitäten und hohen Biomassenkonzentrationen wurden mit diesem Spektralbereich sogar die höchsten Werte von allen Teilspektren erzielt. Insgesamt schwankten die erreichten Biomassenproduktionen mittels Grünlicht zwischen Werten bei ca. 30 % (Schwachlichtbedingungen) und 80% (Starklichtbedingungen) von Weißlicht. Weitere Laboruntersuchungen mit distinkten Einzelspektren bestätigten diese Ergebnisse. Hierbei wurde der durch die Algen schwach absorbierte gelbe Spektralbereich mit Blaulicht verglichen. Auch in diesem Fall zeigte sich ein hohes Wachstum mit gelbem Licht bei höherer Strahlungsintensität. Es wird angenommen, dass die schwach absorbierten Wellenlängen tiefer in die Algensuspension eindringen können. Dadurch ergibt sich eine günstigere Verteilung der Lichtenergie in der Algenlösung und eine effizientere Nutzung der Lichtenergie[30]. Diese Laborergebnisse wur-

[30] Ooms, M. D., Graham, P. J., Nguyen, B., Sargent, E. H., & Sinton, D. (2017). Light dilution via wavelength management for efficient high-density photobioreactors. Biotechnology and bioengineering, 114(6), 1160-1169.

den später bei den Freilanduntersuchungen in den Außenanlagen der SSC GmbH bestätigt. In diesen Versuchen wurden die Photobioreaktoren mit optischen Filterfolien verhüllt. Es zeigte sich auch in diesem Fall ein signifikantes Algenwachstum bei Grünlicht. Aufgrund der Teilverschattung durch die Folien wurden hierbei allerdings nur geringe bis moderate Lichtintensitäten erreicht. Unter diesen Bedingungen wurde dann, ähnlich wie im Labor, das höchste Wachstum bei Weißlicht beobachtet. Von den Teilspektren wurde unter diesen Bedingungen mit Rotlicht das höchste Algenwachstum erzielt.

Im weiteren Verlauf wurden mehrere kombinierte Spektren an den Algen im Labormaßstab getestet. In diesen Versuchen zeigte sich eine hohe photosynthetische Effizienz bei den Experimenten mit dem MOMO-Schichtstapel Z47. In diesem Fall wurde ein hoher Anteil Rotlicht und Gelblicht (570 – 700 nm) sowie ein geringer Anteil Blaulicht transmittiert. In diesen Versuchen konnten erstmals mit Teilspektren vergleichbar hohe photosynthetische Effizienzen wie mit Weißlicht erzielt werden. Der hohe Rotlichtanteil und die zusätzliche Transmission von geringen Mengen Blaulicht und Gelblicht bewirken eine bessere photosynthetische Effizienz. Auch wenn monochromatisches Blaulicht zu einer niedrigen photosynthetsischen Effizienz führt, wirkt eine zusätzliche Supplementierung von Blaulicht aktivierend auf den Metabolismus der Algen. Dies wäre eine Erklärung für die höheren Effizienzen von kombinierten Spektren und von Weißlicht gegenüber den Teilspektren. Einen Hinweis auf diese Annahme liefert die Analyse der Algenwertstoffe.

Es konnte bei der Untersuchung der Fettsäuren in *A. obliquus* ein Einfluss der Lichtspektren auf die Fettsäurekomposition entdeckt werden. Der prozentuale Anteil ernährungsrelevanter ungesättigter Fettsäuren in den Algen war signifikant gegenüber Rotlicht erhöht, wenn zusätzlich Licht unterhalb von 500 nm supplementiert wurde. Dies war der Fall bei Weißlicht, Blaulicht und Grünlicht. Ferner bewirkt die Supplementierung von Blaulicht eine Verringerung des prozentualen Anteils von trans-Fettsäuren. Diese Fettsäureisomere werden in der Ernährungsphysiologie mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit assoziiert[31]. Die Daten legen eine wichtige physiologische Funktion des blauen Spektralbereichs für den Algenstoffwechsel nahe. Hinsichtlich der spektralen Vorgaben für das Hybridsystem ist daher eine hohe Transmission von Rotlicht mit Gelblicht (550 - 700 nm) bei gleichzeitiger Teilsupplementierung von Licht von etwa 480 nm optimal. Dadurch kann die Biomassenproduktion und die Wertstoffproduktion in den Algen im Hybridsystem maximiert werden. Dies wurde nochmals durch die Untersuchungen mit dem MOMO-Schichtstapel Z47 bestätigt, der diese spektrale Selektivität aufweist (Abb. 26). Aufgrund des vergleichsweisen engen phylogenetischen Verwandtschaftsverhältnisses der verwendeten Algenart lassen sich diese Daten womöglich auch auf Landpflanzen übertragen. Die generierten Daten liefern daher auch einen wichtigen ersten Anhaltspunkt für eine Anwendung des Hybridsystems an Gewächshäusern.

[30] De Mooij, T., de Vries, G., Latsos, C., Wijffels, R. H., & Janssen, M. (2016). Impact of light color on photobioreactor productivity. Algal research, 15, 32-42. Mattos, E. R., Singh, M., Cabrera, M. L., & Das, K. C. (2015). Enhancement of biomass production in Scenedes musobliquus high-density culture using weakly absorbed green light. Biomass and Bioenergy, 81, 473-478.

[31] Gebauer, S. K., Psota, T. L., & Kris-Etherton, P. M. (2007). The diversity of health effects of individual trans fatty acid isomers. Lipids, 42(9), 787-799.