

Nachhaltigkeit in der Bioverfahrenstechnik

Dorina Strieth*

DOI: 10.1002/cite.202200053

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In diesem Beitrag stellt sich die Nachwuchswissenschaftlerin Dr.-Ing. Dorina Strieth vom Lehrgebiet Bioverfahrenstechnik der TU Kaiserslautern vor. Neben aktuellen Forschungsarbeiten und Lehraktivität berichtet sie über die Notwendigkeit des Wissenstransfers in die Zivilgesellschaft. Fachlich berichtet sie von aktuellen Ergebnissen der intelligenten Nutzung phototropher Biofilme sowie dem Potenzial zur biotechnologischen Herstellung nachhaltiger Baumaterialien.

Schlagwörter: Cyanobakterien, Nachhaltigkeit, Phototrophe Biofilme

Eingegangen: 06. Mai 2022; *akzeptiert:* 20. Mai 2022

Sustainability in Bioprocess Engineering

In this article, young scientist Dr.-Ing. Dorina Strieth from the Chair of Bioprocess Engineering at the TU Kaiserslautern introduces herself. In addition to current research work and teaching activities, she reports on the need for knowledge transfer to civil society. On a scientific level, she presents recent results on the intelligent use of phototrophic biofilms as well as the potential for biotechnological production of sustainable building materials.

Keywords: Cyanobacteria, Phototrophic biofilms, Sustainability

1 Einleitende Worte

Ich, Dr.-Ing. Dorina Strieth, studierte Biowissenschaften an der TU Kaiserslautern (TUK) und merkte schnell, dass mir im Rahmen meines Studiums die verfahrenstechnische und damit vor allem die anwendungsorientierte Betrachtung der Prozesse fehlte. Aus diesem Grund bewarb ich mich 2013 für das Carl-Zeiss-Promotionsstipendium zum Thema „Nutzung von Kohlenstoffdioxid als Ressource zur Produktion von Wertstoffen mit phototrophen Biofilmen“. Die Finanzierung durch die Carl-Zeiss-Stiftung erlaubte mir den Start meiner Promotion im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik am Lehrgebiet für Bioverfahrenstechnik (BioVT). Mit Abschluss der Promotion zum Dr.-Ing. im Winter 2018 erhielt ich die Möglichkeit, die Gruppenleitung „Phototrophe Systeme“ am Lehrgebiet BioVT zu übernehmen. Als Nachwuchswissenschaftlerin engagiere ich mich in der Lehre, der Forschung mit dem Schwerpunkt „Nachhaltigkeit in der BioVT“, im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik in unterschiedlichen Gremien sowie in außeruniversitären Einrichtungen. In diesem Artikel möchte ich mich anhand ausgewählter Beispiele aus meinen Forschungsarbeiten, Lehrveranstaltungen und dem Wissenstransfer in die Zivilgesellschaft vorstellen.

2 Forschung

Im Jahr 2015 hat die Weltgemeinschaft einen Fahrplan für die Zukunft verabschiedet (Agenda 30), in dem 17 globale Ziele für eine nachhaltige Entwicklung formuliert wurden. Die 17 „Sustainable Development Goals“ (SGD) decken dabei verschiedene Handlungsfelder ab, wie die Sicherung der weltweiten Ernährung (SGD 2), garantierte hochwertige Bildung weltweit (SGD 4), nachhaltige Städte und Gemeinden (SGD 11), nachhaltig produzieren und konsumieren (SGD 12) und weltweit Klimaschutz umsetzen (SGD 13). Im Rahmen meiner Forschung beschäftige ich mich mit potenziellen Lösungen bzw. Teillösungen dieser gesellschaftsrelevanten Problemstellungen.

2.1 Mikroalgen – die kleinen Alltagshelden

Unter dem Begriff Mikroalgen werden historisch bedingt pflanzliche Mikroalgen sowie Cyanobakterien zusammen-

Dr.-Ing. Dorina Strieth
strieth@mv.uni-kl.de
Technische Universität Kaiserslautern, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Gottlieb-Daimler-Straße 49, 67663 Kaiserslautern, Deutschland.

gefasst. Dabei leben Mikroalgen meist in ihrer natürlichen Form als Biofilm, eingebettet in einer Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), die sie schützend umgeben [1]. Sie betreiben Photosynthese, wobei CO_2 als Kohlenstoffquelle dient und, vereinfacht gesagt, Sauerstoff und Biomasse produziert werden. Deswegen werden die Biofilme von photosynthesebetreibenden Mikroorganismen auch als phototrophe Biofilme bezeichnet. Mikroalgen binden nach Hochschätzungen 20–30 % des atmosphärischen CO_2 über die Photosynthese [2]. So kann mithilfe von Mikroalgen der CO_2 -Kreislauf erweitert und simultan eine Vielzahl biotechnologisch interessanter Produkte wie bspw. natürliche Farbstoffe, Biopolymere, Polysaccharide und Fettsäuren produziert werden (vgl. Abb. 1). Die Biomasse an sich kann dabei als Nahrungs(ergänzungs)mittel [3], als Tierfutter oder Düngemittel dienen [4, 5]. Weiterhin produzieren viele Cyanobakterien antimikrobielle Verbindungen, die potenziell neue Wirkmechanismen aufweisen und so zur Bekämpfung von multiresistenten Keimen beitragen könnten [6]. Ich beschäftige mich vor allem mit dem Potenzial terrestrischer Cyanobakterien, die neben CO_2 auch Stickstoff und Feinstaub binden und unter Rauchgas kultiviert werden können [7]. Sie leben in extremen Habitaten (Wüsten, heiße Quellen, Antarktis) und sind tolerant gegenüber schwankenden biotischen und abiotischen Bedingungen [8]. Das macht sie zu einfachen Kultivierungsorganismen, da eine engmaschige Überwachung und Steuerung von Kultivierungsparametern wie Temperatur, pH-Wert und Licht meist nicht notwendig ist.

2.1.1 Kultivierung phototropher Biofilme

Um das Potenzial phototropher Biofilme auszuschöpfen, müssen diese im großtechnischen Maßstab kultiviert werden können. Die Kultivierung in submersen Systemen ist zwar möglich, es werden jedoch Änderungen der Zellmorphologie und der EPS von beispielsweise *Nostoc flagelliforme* beschrieben, was in geringen Ausbeuten ($0,335 \text{ g}_{\text{BTM}} \text{ L}^{-1}$

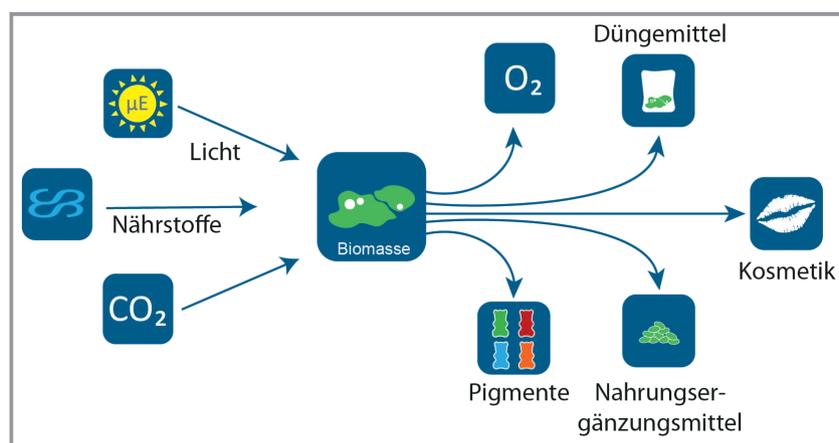


Abbildung 1. Illustrative Darstellung potenzieller Produkte produziert mit phototrophen Biofilmen. Dabei ist gezeigt, dass phototrophe Biofilme CO_2 , Licht und Wasser zur Produktion interessanter Wertstoffe benötigen, und so den CO_2 -Kreislauf erweitern.

[9]) und Zellvitalitäten resultiert [10]. Dieses Beispiel zeigt, dass gängige Reaktorsysteme, wie Open Ponds oder geschlossene Photobioreaktoren (PBR), zur Kultivierung von phototrophen Biofilmen nicht optimal sind, da ihr Wachstum unter submersen Bedingungen limitiert ist [8] und es zu Änderungen des Phänotyps kommen kann. Aus diesem Grund beschäftige ich mich bereits seit meiner Promotion mit der Entwicklung von speziellen aerosol-basierten PBR, bei denen Regen, Nebel bzw. Bedingungen arider Habitats imitiert werden und die Nährlösung als Aerosol in den Reaktor eingetragen wird [11–13]. Die aerosol-basierten PBR sind nicht wie submersen PBR mit Medium gefüllt, wodurch sie ein niedrigeres Gewicht aufweisen (vgl. Abb. 2). Durch die zyklische Zugabe von Medium in Form von Aerosol wird zusätzlich wenig Nährmedium benötigt, wodurch Wasser und Medienbestandteile eingespart werden können [14].

So könnten aerosol-basierte PBR beispielsweise an bestehenden Fassaden integriert werden, wodurch bislang ungenutzte Flächen zu Agrarflächen umgewandelt werden könnten [12]. Zusätzlich dazu kann die Produktivität der phototrophen Biofilme durch eine oberflächen-assoziierte Kultivierung gesteigert werden [8]. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Timo Schmidt (Hochschule Augsburg) und Dr. Michael Lakatos (HS Kaiserslautern) wurde der aerosol-basierten PBR weiterentwickelt, die Geometrie verändert und auf einen Quadratmeter hochskaliert. Dessen Funktion wird zurzeit einem Praxistest unterzogen [15, 16]. Fassadenintegrierte Bioreaktoren sind nichts Neues und spätestens seit der Umsetzung des BIQ-Hauses in Hamburg bekannt. Das zeigt, was die Fassaden von morgen leisten können. Stoffströme aus dem Gebäude wie Wärme und CO_2 können für die Kultivierung der Mikroalgen genutzt werden, wobei Sauerstoff produziert und in die Gebäude zurückgeleitet werden kann. Die Biomasse kann zur Energiegewinnung eingesetzt, oder als Nahrungsmittel verwendet werden. So könnten nachhaltige und regional produzierte Nahrungs(ergänzungs)- und Tierfuttermittel hergestellt

werden. Kurze Transportwege reduzieren ebenfalls den CO_2 -Ausstoß. Auch die Reinigung der Stadtluft wäre denkbar. Im Gesamten können Fassadenreaktoren dazu beitragen die SGDs 2 (Sicherung der weltweiten Ernährung), 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden), 12 (nachhaltig produzieren und konsumieren) und 13 (weltweit Klimaschutz umsetzen) zu erreichen.

2.1.2 Phototrophe Biofilme als natürliche Düngemittel

Im Jahr 2018 wurden in Deutschland rund 866 Mio. Tonnen Treibhausgase produziert, wobei weltweit 10–12 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft zuzuordnen sind. Wäh-

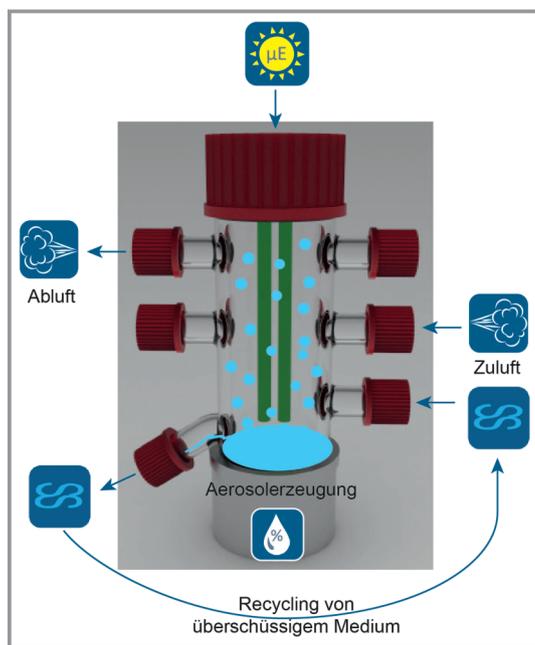


Abbildung 2. CAD-Modell des aerosol-basierten Photobioreaktors. Die im Deckel fixierten Stäbe fungieren gleichzeitig als Lichtwellenleiter und Kultivierungsoberfläche. Illustrativ sind die Nährstoffzu- und abfuhr eingezeichnet, wobei überschüssiges Nährmedium erneut dem Reaktor zugeführt wird, um Wasser und Medienbestandteile einzusparen. Das Medium wird direkt im Reaktor mittels Ultraschall zerstäubt und so eine optimale Verteilung im Reaktor erlaubt. Über Druckluft können unterschiedliche Konzentrationen an CO₂ in den Reaktor geleitet werden und zusätzliche Anschlüsse erlauben die Einbringung von Sensoren zur Überwachung der Luftfeuchtigkeit oder der Temperatur.

rend der Austausch an CO₂ durch die gleichzeitige CO₂-Fixierung in organische Masse fast ausgeglichen ist, beträgt der Anteil der Landwirtschaft bei Methan 50 % und bei Lachgas sogar 60 % aller Emissionen. Dies ist vor allem auf den Einsatz mineralischer und organischer Düngemittel zurückzuführen. Ohne ein aktives Gegensteuern wird eine Steigerung der Lachgasemissionen um 30 bis 65 % bis 2030 in der Agrarwirtschaft erwartet. Um das von der Bundesregierung gesetzte klimapolitische Ziel einer weitgehenden Treibhausgas-Neutralität Deutschlands bis 2050 zu erreichen, stellt ein klimaschonender Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in der Landwirtschaft eine wichtige Strategie dar. Ein zentraler Teilaspekt dieser Strategie könnte die Ansiedlung der gegenüber biotischen und abiotischen Bedingungen toleranten phototrophen Biofilme sein, die in der Lage sind, Luftstickstoff zu fixieren und in – für andere Organismen verwertbaren – Stickstoff umzuwandeln und an die Umgebung abzugeben [17]. Neben der Bereitstellung von Stickstoff haben phototrophe Biofilme ebenfalls einen Einfluss auf die Bodenstabilität (Schutz vor Bodenerosion) und den Wasserrückhalt im Boden. Weiterhin konnte ein verbessertes Pflanzenwachstum in Anwesenheit von phototrophen Biofilmen gezeigt werden [5]. Im Rahmen des von der DFG geförderten Projekts suchen Jonas Kollmen und

ich nach stickstofffixierenden (diazotrophen) Cyanobakterien, die sich für den Einsatz in der Agrarindustrie eignen. Besonders von Interesse sind dabei diazotrophe Cyanobakterien, die spezialisierte Zellen (Heterozysten) zur Stickstofffixierung ausbilden, möglichst hohe Mengen an für Pflanzen nutzbaren Stickstoff ausscheiden und in künstlicher Symbiose mit zwei verschiedenen Modellpflanzen (*Arabidopsis thaliana* (Acker-Schmalwand) sowie *Triticum aestivum* (Weizen)) wachsen. Dabei gehört *A. thaliana* zur selben Familie wie die Nutzpflanzen Kohl, Brokkoli und Meerrettich [18], wodurch der direkte Bezug zur Agrarwirtschaft gegeben ist. *A. thaliana* ist sehr gut erforscht, was die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse erleichtert. Für die Untersuchungen der Co-Kulturen werden Agarplatten und Hydroponik-Systeme verwendet. Wir konnten zeigen, dass in Co-Kulturen in stickstofffreiem Medium das Wachstum der Cyanobakterien höher war als als Reinkultur und das Wachstum der Pflanzen vergleichbar mit dem Wachstum auf stickstoffhaltigem Medium ohne Cyanobakterien war. Weiterhin kommt es zur Anlagerung und Akkumulation der Cyanobakterien um die Wurzeln der Pflanze, was ebenfalls ein Indikator für eine erfolgreiche, künstliche Symbiose ist [19]. Zurzeit untersuchen wir die Fähigkeit phototropher Biofilme, Wasser im Boden zurückzuhalten. Das übergeordnete Ziel ist es, die phototrophen Biofilme auf bioabbaubaren Trägermaterialien in einem speziell dafür designten PBR anzuziehen und bereits optimal auf die Bedingungen im Feld vorzubereiten. Vorarbeiten zeigten, dass das Wachstum auf unterschiedlichen Carriern möglich ist [20], jedoch eignen sich Carrier aus unterschiedlichen Kunststoffarten nicht für eine Ausbringung in die Landwirtschaft. Eine Übersicht über das Projekt ist in Abb. 3 illustriert.

Eine erfolgreiche Umsetzung des Projekts kann dazu beitragen, die SGDs 2 (Sicherung der weltweiten Ernährung), 12 (nachhaltig produzieren und konsumieren) und 13 (weltweit Klimaschutz umsetzen) zu erreichen.

2.1.3 Charakterisierung phototropher Biofilme

Die Charakterisierung von (phototrophen) Biofilmen erfordert ein anderes Methodenportfolio als beispielsweise die Charakterisierung von einzellig, submers wachsenden Mikroorganismen. Eine verlässliche Probenahme während der Kultivierung und die Bestimmung des Wachstums über die optische Dichte ist nicht möglich. Aus diesem Grund habe ich verschiedene invasive und nicht-invasive Methoden zur Charakterisierung phototropher Biofilme entwickelt und etabliert. Nicht-invasiv können die optische Kohärenztomographie (OCT) zur Bestimmung der Biofilmdicke und die Pam-Fluorometrie für das Flächenwachstum über die Chlorophyll-a-Fluoreszenz eingesetzt werden. Hier konnten die Biofilmdicke und die Biofilmausbreitung über eine Kultivierungsdauer von zehn Tagen mit der Bio-trockenmasse korreliert werden. Danach nahmen die Abweichungen zu. Das bedeutet, dass das Wachstum charakterisiert werden kann, aber klassische Wachstumsraten

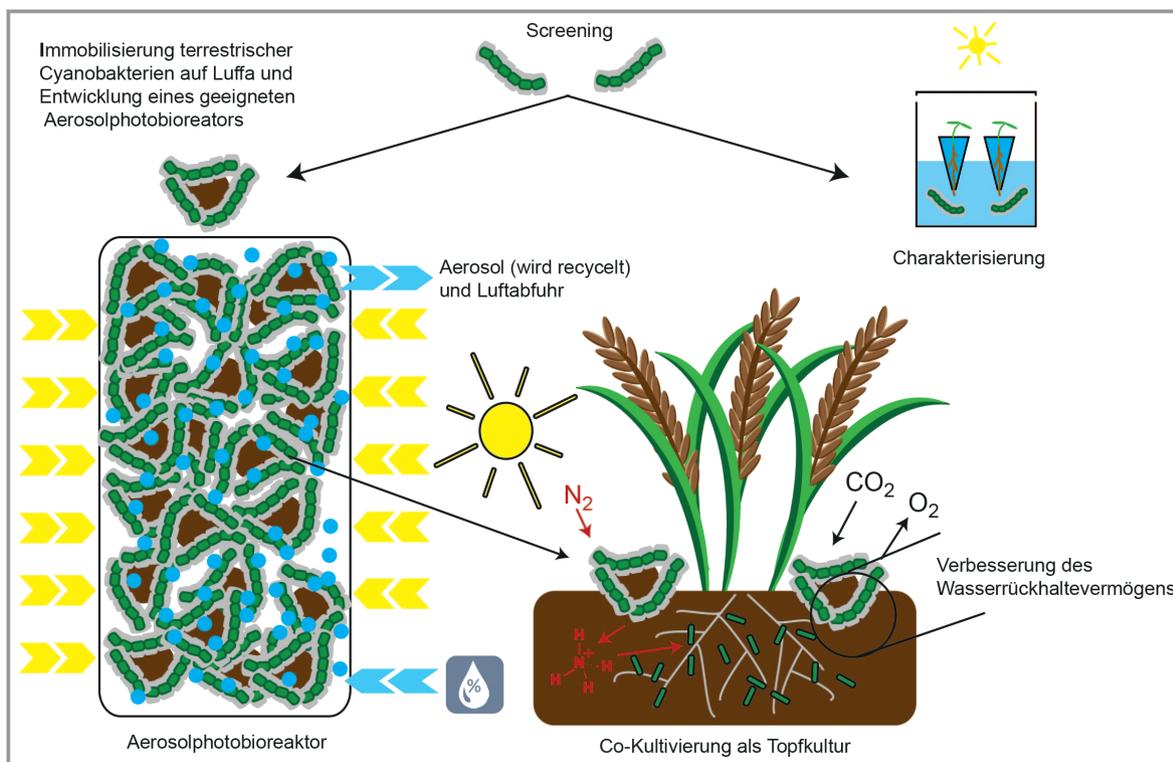


Abbildung 3. Zusammenfassung der Forschungsschwerpunkte im Bereich der Co-Kultivierung von Cyanobakterien und Pflanzen mit dem Ziel, künstliche Düngemittel zukünftig durch natürliche, nachhaltige und biologische Düngemittel zu ersetzen.

nicht über diese Methode berechnet werden können [21]. Neben den etablierten Methoden ermöglicht das digitale Auflichtmikroskop dreidimensionale Aufnahmen von Biofilmen beispielsweise auf Oberflächen, wobei hier auch Oberflächenrauheiten und Schichtdicken des Biofilms bestimmt werden können. Zusätzlich dazu kann auch das Konfokalmikroskop zur Visualisierung von Cyanobakterien (rot) und Luffa (grün) über die jeweilige Eigenfluoreszenz genutzt werden. Beispiele für die etablierten und genutzten nicht-invasiven Methoden sind in Abb. 4 zusammenfassend dargestellt.

Mittels Ionenchromatographie werden die Anionen und Kationen des Mediums bestimmt, wodurch zum einen limitierende Substanzen (Phosphat, Magnesium etc.) beobachtet und zum anderen die Produktion von bioverfügbarem Stickstoff (Ammonium und Nitrit) untersucht werden können [19]. Nach Abschluss der Kultivierungen stehen im Labormaßstab meist nur geringe Mengen an Biomasse zur Verfügung, weswegen für eine umfassende Charakterisierung der wichtigsten Indikatorkomponenten (vgl. Tab. 1) möglichst viele Informationen aus nur einer Probe gewonnen werden müssen.

Hier wurde ein kombiniertes Downstream-Verfahren zur Extraktion und Bestimmung von Pigmenten (Chlorophyll-a, Carotinoide), Phycobiliproteinen (C-Phycocyanin, Phycoerythrin, Allophycocyanin) und EPS entwickelt [33]. Die Pigmente und Phycobiliproteine können im Anschluss chromatographisch aufgetrennt, charakterisiert und be-

stimmt, oder die Konzentration mittels UV-VIS berechnet werden. Zur Charakterisierung der EPS wurde eine Separationsmethode entwickelt, die es ermöglicht, die EPS in ihre drei Hauptbestandteile aufzuteilen – (i) Polysaccharide, (ii) Proteine und (iii) Fettsäuren – sowie im Anschluss daran mittels chromatographischer oder kolorimetrischer Methoden zu analysieren [34, 35]. Alternativ können die EPS, oder einzelne Fraktionen auch auf ihre antimikrobielle Wirkung hin untersucht werden [14]. Diese Methode wurde nun für die Charakterisierung von Polyhydroxybutyraten (kurz: PHB, Bioplastik) erweitert. Zur Bestimmung der Zellviabilität (Unterscheidung zwischen lebenden und toten Zellen) wird der Nukleinsäurefarbstoff SytoxGreen verwendet, der die toten Zellen anfärbt. Die lebenden Zellen werden über die Chlorophyll-a-Fluoreszenz detektiert [14]. Zur Bestimmung der Zellvitalität (Stoffwechselaktivität der Zellen) wurde ein Resazurin-Assay etabliert, der auch auf pflanzliche Kalluszellen sowie heterotrophe Bakterien übertragen werden konnte [36]. Alle Methoden sind in Abb. 5 zusammenfassend dargestellt.

Die Charakterisierung von Biofilmen über die Kultivierungszeit ist wichtig, um die Produktbildung zu erfassen, aber auch um Informationen über den Zustand der Zellen zu erhalten. Weiterhin ist der etablierte Aufarbeitungsprozess ebenfalls für die Industrie von Interesse, da eine stufenweise Aufarbeitung der Biomasse die Nutzung mehrerer interessanter Produkte aus nur einer Probe ermöglicht.

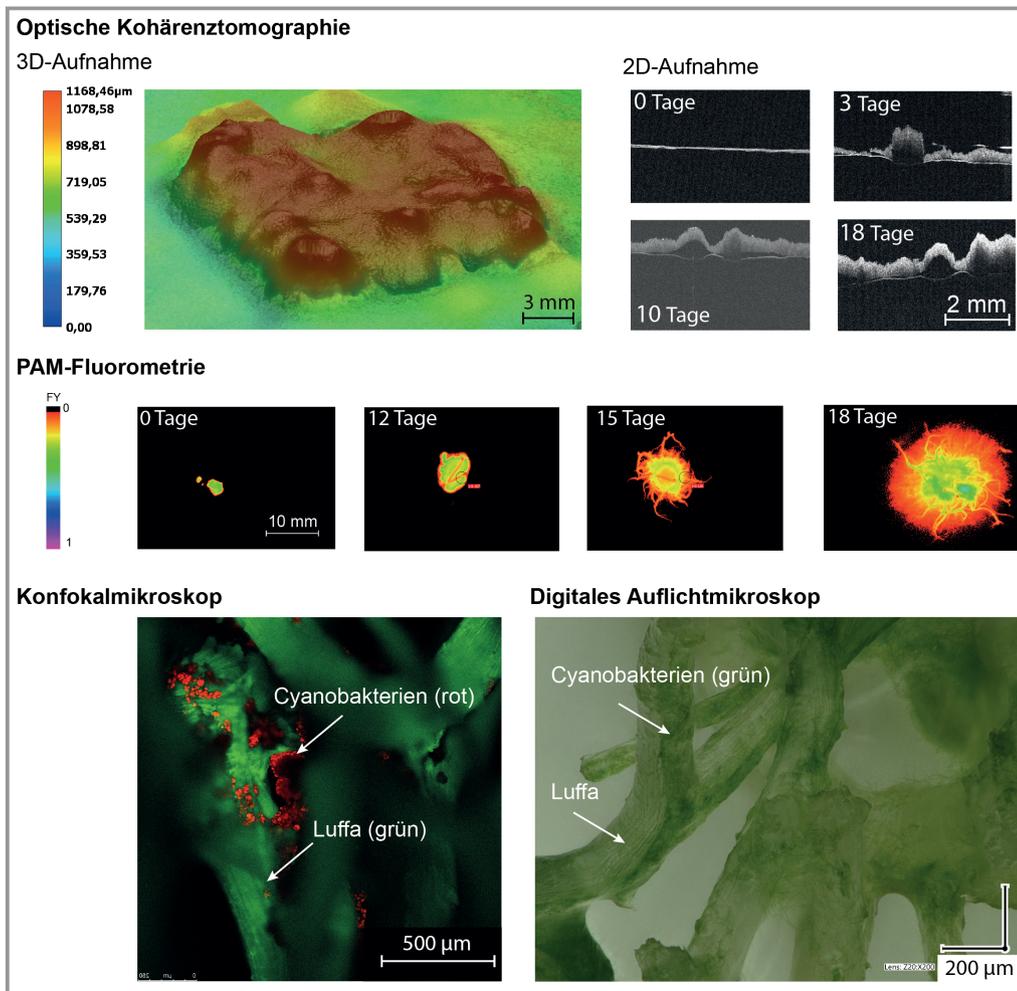


Abbildung 4. Bildliche Darstellung der etablierten bzw. genutzten nicht-invasiven Methoden zur Charakterisierung von phototrophen Biofilmen.

Tabelle 1. Ausgewählte Indikatorkomponenten von Cyanobakterien und deren Funktion.

Indikatorkomponente	Funktion	Lit.
EPS	Schutz vor biotischen und abiotischen Bedingungen; Nährstoffspeicher	[22–26]
Erhöhter Lipidgehalt der EPS	Erhöhte Löslichkeit von CO ₂ führt zu höherer Absorptionsrate und geringerer Verlustrate	[27]
Carotinoide	Zellwandstabilisierung, UV-Schutz	[28, 29]
Chlorophyll-a	Photosynthese	[30]
C-Phycocyanin	Lichtsammelkomplex, Stickstoffspeicher	[30, 31]
Änderungen der Pigmentzusammensetzung	Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse	[32]

2.2 Nachhaltig Bauen mit Mikroorganismen

Mit mehr als 10 km³ pro Jahr ist Beton das meistgenutzte Baumaterial [37]. Eine Hauptkomponente von Beton ist Zement (Calciumoxid), der bei hohen Temperaturen aus Kalkstein (CaCO₃) hergestellt wird [38]. Beim sogenannten Brennen von Zementklinkern betragen die Temperaturen

etwa 1450 °C [39]. Die für diesen Prozess benötigte Energie beträgt etwa 2,6 % des weltweiten Energiebedarfs [40]. Die mikrobiologisch induzierte Calciumcarbonatfällung (MICP) ist ein Prozess, bei dem Calciumcarbonat (Kristall) durch mikrobiologische Aktivität erzeugt wird. Werden die Kristalle in Hohlräumen von Partikeln ausgefällt, werden diese verbunden und das Material somit verfestigt (vgl. Abb. 6).

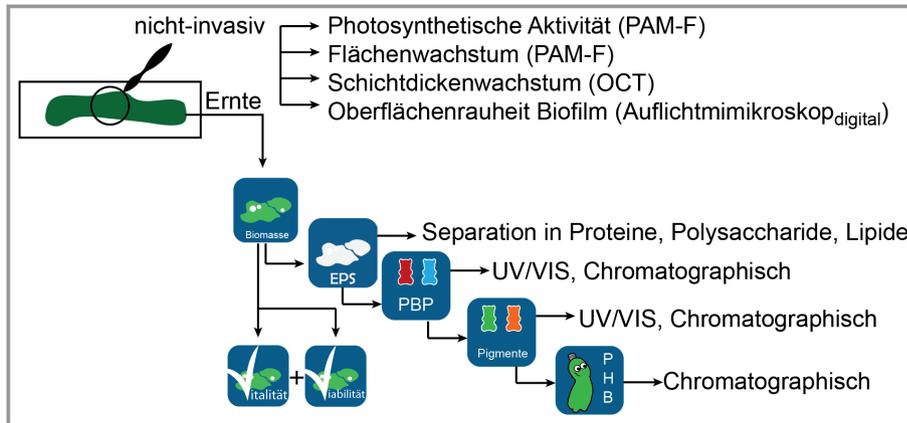


Abbildung 5. Zusammenfassung der entwickelten und etablierten Methoden zur Charakterisierung phototropher Biofilme. Abkürzungen: PAM-F = Pam-Fluorometrie, OCT = Optische Kohärenztomographie, EPS = Extrazelluläre Polymere Substanzen, PBP = Phycobiliproteine, PHB = Polyhydroxybuttersäure, UV/VIS = UV/VIS-Spektroskopie.

Die MICP läuft dabei bei Temperaturen zwischen 20–50 °C [41] ab. Diese Temperaturen liegen deutlich niedriger als bei der Herstellung von Zement. Die MICP bietet unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten. So konnten verschiedene Studien zeigen, dass sie das Potenzial hat, bestehende Baumaterialien wie Zementmörtel und Sandstein in ihrer Festigkeit und Wasserpermeabilität zu verbessern [42], Risse in Baumaterialien zu reparieren [43], und Materialien zu produzieren, die eine nachhaltigere und ökologischere Alternative zu herkömmlichen Baumaterialien, wie Beton, darstellen könnten [44]. Der am häufigsten genutzte Mechanismus der MICP ist die Fällung von Calciumcarbonat durch ureolytische Bakterien [45], z. B. *Sporosarcina pasteurii* und *Bacillus megaterium*.

Im Rahmen des Projekts untersuchen Niklas Erdmann und ich Möglichkeiten, die MICP zur Herstellung von Biosandstein zu nutzen. Eine große Herausforderung bei der Herstellung von Biosandstein ist, dass verschiedene Lösun-

gen (L1: Zellen + L2: Harnstoff (Urea) und ein Calciumsalz) zyklisch zur Verfestigung des Sandes aufgegeben werden müssen (vgl. Abb. 7). Durch die Bildung der Kristalle werden Hohlräume zwischen Partikeln gefüllt, was zum einen die Probe verfestigt (viele Kristalle = hohe Festigkeit), aber zum anderen die Permeabilität verringert. Um diesen Prozess zu optimieren, sind besonders Kenntnisse über den Ablauf der MICP wichtig. Die Konzentrationen dieser Calcinerungslösung wurden mittels statistischer Versuchsplanung (DoE) optimiert. Dabei konnte durch die Erhöhung der eingesetzten Menge Harnstoff und Calciumsalz um 49 % bzw. 39 % eine Steigerung der Druckfestigkeit um 144 % erreicht werden. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Kristin de Payrebrune vom Lehrstuhl für Computational Physics Engineering der TUK wurde ein 3D-Drucker aus Lego Technik entwickelt, mit dem Biosandsteine automatisch gedruckt werden können. So könnten beispielsweise Strukturen passgenau für die Sanierung von Bestandsbauten gedruckt werden. Hier ist jedoch noch viel Forschung und Generierung von Grundlagenverständnis erforderlich, um feine Strukturen mit ausreichenden Festigkeiten zu drucken. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Alexander Bartscher vom Fachbereich Architektur der TUK wird zurzeit ein Modell nach dem Interlocking-Prinzip mit Biosandstein hergestellt sowie die potenzielle Verwertbarkeit von Abfallprodukten wie Steinmehl aus Steinbrüchen zur Herstellung von Biosandstein untersucht. Weiterhin lässt sich Wüstensand aufgrund seiner runden Form nicht zur Herstellung von Beton verwenden, konnte aber in Vorarbeiten mittels MICP zur Biosandsteinherstellung genutzt werden. Das zeigt, welches Potenzial dieser Forschungszweig bietet und die MICP kann zur Erreichung der SGDs 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden), 12 (nachhaltig produzieren und konsumieren) und 13 (weltweit Klimaschutz umsetzen) beitragen.

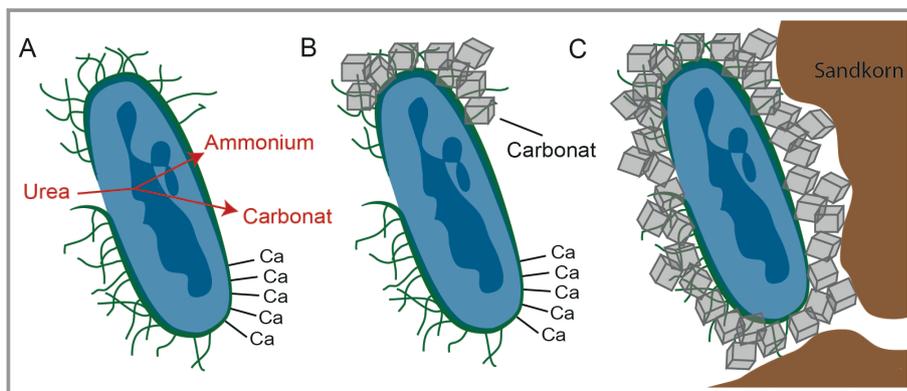


Abbildung 6. Vorgänge während der ureolytischen Calciumcarbonatfällung. (A) Urea wird von den Mikroorganismen aufgenommen, intrazellulär zu Ammonium und gelöstem, anorganischen Kohlenstoff verstoffwechselt, welche in die Umgebung abgegeben werden. (B) Durch lokale Übersättigung und einen erhöhten pH-Wert kommt es zur Ausfällung von Calciumcarbonat. (C) Limitierungen in der Nährstoffversorgung durch Einkapselung der Zelle. Abbildung modifiziert nach Muynek et al. [45].

2.3 Wissenstransfer

Projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit, also die Partizipation der Nicht-Fachöffentlichkeit an fach-

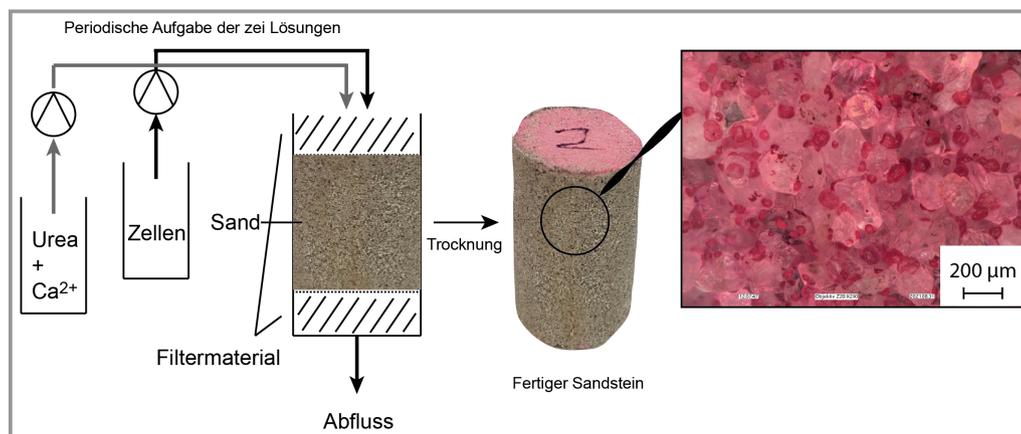


Abbildung 7. Prozessschema zum Versuchsaufbau zur Produktion von biologisch hergestelltem Sandstein. Rechts: Mikroskopische Aufnahme (digitales Auflichtmikroskop) von biologisch hergestelltem Sandstein. Die Kristalle, die die Sandkörner zusammenkleben, sind mit Alizarinrot 5 angefärbt.

bezogenen Erkenntnissen, ist ein integraler Bestandteil vieler Förderformate für die Wissenschaft, etwa bei Exzellenzclustern und Sonderforschungsbereichen (SFBs). Das dieser sogenannte „Science Outreach“ absolut berechtigt ist, zeigt der zunehmende Wunsch der Zivilgesellschaft nach Partizipation [46]. Dies gilt insbesondere hinsichtlich aktueller Forschung zu gesellschaftlich relevanten Themen, wie bezüglich Umsetzungsstrategien der globalen Nachhaltigkeitsziele. Es gibt bisher jedoch nur sehr wenige forschungsbasierte Erkenntnisse darüber, wie die Einbindung der Nicht-Fachöffentlichkeit bestmöglich gelingen kann. Zusammen mit Nachwuchswissenschaftlern der TUK (Dr.-Ing. Dorina Strieth und Justus Niemayer (Molekulare Biotechnologie und Systembiologie)) und der Uni Landau (Dr. Noel Juvigny-Khenafou (Quantitative Landschaftsökologie) und Dr. Alexander Engl (Institut für naturwissenschaftliche Bildung)) entwickeln wir in einem von der Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Projekt ein virtuelles Spiel, um fachfremden Interessierten das Potenzial von Mikroalgen im Bereich der Landwirtschaft näherzubringen. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Björn Risch von der Uni Landau werden im Rahmen eines weiteren von der Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Projekts MikaDo („Mit Mikroalgen gegen den Klimawandel – Do it Yourself“) fachbezogene Forschungsmethoden zur Kultivierung der Mikroalgen weiterentwickelt sowie in der fachdidaktischen Forschung Strategien zur adressatengerechten Kommunikation nachhaltigkeitsbezogener Fachforschung erarbeitet. Gemeinsam wird ein PBR (Steckkastensystem) für den Einsatz im schulischen und außerschulischen Bereich entwickelt. Dieser dient zur Kultivierung der Mikroalgen als Biofilm zum Selbermachen („Do it Yourself“). Zur Einbindung des Bioreaktors in Bildungsprojekte werden zusätzlich flankierende didaktisch-methodische Materialien wie (digitale) Experimente, Erklärvideos, Alltagsbezüge etc. zum Thema Mikroalgen entwickelt. Dabei steht immer der Nachhaltigkeitsbezug sowie die Verknüpfung zu den SDGs im Mittelpunkt. Die erstellten Materialien werden in verschiedenen Science Outreach-

Aktivitäten zum Thema „Mikroalgen gegen den Klimawandel“ eingesetzt: Wissenschaftsevents für die Öffentlichkeit, multimediale Lernumgebungen für Schulen sowie Veranstaltungen in Schülerlaboren der TUK bzw. am Campus Landau der Universität Koblenz-Landau. Ziel der Aktivitäten ist es, nachhaltiges Denken und Handeln zu fördern. Im Rahmen quantitativer und qualitativer Studien wird mittels Methoden der empirischen Sozialforschung die Wirksamkeit der Maßnahmen hinsichtlich der Einstellung der Teilnehmer*innen zu nachhaltigkeitsbezogenen Themen sowie zur Rolle der Wissenschaft in der Gesellschaft erhoben. Weiterhin halte ich Vorträge an Schulen zum Thema „Mikroalgen – die kleinen Alltagshelden! – Wie die Allerköner die Welt nachhaltiger machen können“ und bin ebenfalls bei der Online-Vortragsreihe MI(N)Treden involviert. Dabei sind die Zuhörenden enorm interessiert und begeistert davon, aktuelle Forschungsthemen einfach und verständlich vorgestellt zu bekommen.

3 Forschungsausblick

Weltweit wird nach nachhaltigen Alternativen zu bspw. erdöl-basierten Prozessen gesucht. Aus meiner Sicht können biotechnologische Innovationen in den verschiedensten Bereichen zur Erreichung der gesetzten Nachhaltigkeitsziele beitragen. Dabei ist nicht nur die konkrete Anwendung wichtig, sondern auch das Schaffen der entsprechenden Grundlagen sowie die Akzeptanz in der Gesellschaft durch frühzeitigen Wissenstransfer. Allerdings kann nur ein umfassendes Verständnis der Grundlagen dazu beitragen, die Prozesse für die spätere Anwendung zu entwickeln und anschließend auf die Industrie zu übertragen. Ich bin der Meinung, dass vor allem im Bereich der intelligenten Nutzung von Mikroalgen noch viel Grundlagenverständnis generiert werden muss, um sie zur Erweiterung des CO₂-Kreislaufs bei simultaner regionaler und nachhaltiger Produktion von biotechnologisch wertvollen Produkten

einsetzen zu können. Neben der fachspezifischen Forschung ist aber auch die Akzeptanz der Bevölkerung enorm wichtig. Aus diesem Grund sollte verstärkt daraufhin gearbeitet werden, aktuelle Entwicklungen in der Forschung der Zivilgesellschaft zugänglich zu machen, um die spätere Umsetzung der Prozesse zu vereinfachen.

Im Bereich des nachhaltigen Bauens muss darauf geachtet werden, dass für die Kultivierung der Mikroorganismen nachhaltige Medien (Bestandteile) genutzt werden, bspw. auf Basis nachwachsender Rohstoffe als Kohlenstoffquelle. Weiterhin eignet sich die MICP auch zur Wasseraufbereitung und könnte mit zum Erreichen des SDG 6 (Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen) beitragen. Zukünftig muss das im Labor erzielte Grundlagenwissen zur Erreichung der SDGs in Feldversuche transferiert werden.

4 Lehre

Die Lehre ist für mich von besonderem Reiz in einer akademischen Karriere. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ist enorm wichtig und bereitet mir große Freude. Gerade in den Grundlagenfächern werden häufig die fachspezifischen Basics vermittelt, ohne den Bezug zu anderen Fachdisziplinen herzustellen. Dadurch fehlt den Studierenden oft die Verbindung zwischen den einzelnen Disziplinen. Hier könnten die Fächer aus meiner Sicht durch entsprechende Anwendungsbeispiele enger miteinander verknüpft werden. Außerdem sollte mit Blick auf die Zukunft die Notwendigkeit der Grundlagenfächer für das Lösen gesellschaftlich relevanter Themen gelehrt werden. Dadurch können diese – häufig von den Studierenden als lästig angesehenen Grundlagen – an Attraktivität gewinnen. Zusätzlich dazu sollten neue Lehrmethoden eingesetzt werden, um die Lehre spannender zu gestalten und die Studierenden vor allem in den Grundlagenfächern zu motivieren. Gerade die letzten Semester waren sehr herausfordernd und haben die Lehre – zumindest an der TUK – grundlegend verändert. In der Task Force „digitale Lehre“ habe ich zusammen mit weiteren Dozierenden die Konzepte zur Umsetzung der digitalen Lehre im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der TUK entwickelt. Dabei wurden Konzepte für Hybridveranstaltungen, Live-Veranstaltungen und die Erstellung von Lernvideos etabliert. Das zeigt, wie viel in kurzer Zeit verändert werden kann. Die Studierenden waren von dem digitalen Lehrangebot überzeugt, was sich ebenfalls im Notendurchschnitt verschiedener Vorlesungen zeigte, der seit dem ersten digitalen Sommersemester angehoben werden konnte. Eine enge Zusammenarbeit mit den Studierenden ist meiner Meinung nach enorm wichtig, um das bestehende Lehrangebot stetig zu verbessern. Eine gute Kommunikation sowie konstruktive Kritik führen zu Verbesserungen. Um etwas zu verändern, muss man sich aktiv engagieren. Aus diesem Grund arbeite ich eng mit der Fachschaft zusammen, wirke im Prüfungsausschuss, im Fachausschuss für Studium und

Lehre und der Studienberatung für den Studiengang Bio- und Chemieingenieurwesen (BCI) mit.

5 Schlusswort

Aufgrund der Interdisziplinarität meiner Ausbildung kann ich mich schnell in neue Aufgabengebiete einarbeiten und die Brücke zwischen den Natur- und Ingenieurwissenschaften schlagen. Als Nachwuchswissenschaftlerin hatte ich bereits die Möglichkeit, mit den unterschiedlichsten Tätigkeitsfeldern in Berührung zu kommen. Diese Interdisziplinarität hat es mir ermöglicht, andere Sichtweisen und Blickwinkel kennenzulernen, wodurch spannende Fragestellungen und Forschungsfelder entstanden sind. Ich freue mich, neue Forschungsideen und -konzepte mit Projektpartner*innen zu entwickeln, Drittmittel zu beantragen und so innovative Ideen in die Tat umzusetzen. Dabei ist es mir besonders wichtig, die Mitarbeitenden und Studierenden zu motivieren und sie in ihren eigenen Ideen und Vorhaben zu unterstützen, um so das Beste aus ihrer Arbeit und damit verbunden für die Projekte herauszuholen. Um meinen Führungsstil stetig zu verbessern, habe ich mich privat entsprechend fort- und weitergebildet. Gerade die Kombination aus Forschung und Lehre stellt den besonderen Reiz der akademischen Welt für mich dar.

Ich möchte meinem Doktorvater Prof. Dr. Roland Ulber (Leiter des Lehrgebiets BioVT, TUK) dafür danken, dass er mir bereits während meiner Promotion sämtliche Türen geöffnet hat und mir die Möglichkeit gab und gibt meine eigenen Forschungsideen umzusetzen. Er steht mir stets mit Rat und Tat zur Seite. Die Forschungsideen könnte ich nicht ohne die Hilfe meiner Doktoranden M. Sc. Jonas Kollmen und M. Sc. Niklas Erdmann sowie den Studierenden, die in den Projekten mitarbeiten, umsetzen. Vielen Dank, dass ihr mit so viel Spaß und Engagement dabei seid. In einem guten Arbeitsumfeld macht die Arbeit einfach enorm viel Spaß. Zudem danke ich für die finanzielle Unterstützung der DFG, der Carl-Zeiss-Stiftung und des TU Nachwuchsringes sowie der TUK für die Finanzierung verschiedener Open Access Publikationen. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.



Dorina Strieth begann im Januar 2019 als Nachwuchsgruppenleiterin an der TUK zu arbeiten. Ebenfalls an der TUK promovierte sie im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik bei Prof. Dr. Roland Ulber und forschte zwei Monate an der Jadavpur University in Kalkutta in Indien in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Joydeep Mukherjee. Während ihres Studiums der Biowissenschaften an TUK absolvierte sie ein fünfmonatiges Praktikum am Julius-Kühn-Institut in Landau sowie ein zweimonatiges Praktikum in Costa Rica in der Golfo Dulce Lodge. Sie engagiert sich im Fachbereich als Gleichstellungsbeauftragte, ist gewähltes Mitglied im Fachbereichsrat sowie im Forum der wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen. Außerdem ist sie seit 2021 stellvertretende Sprecherin des TU Nachwuchsringes und ist in der Studienberatung tätig. Außerhalb der TUK ist Dr. Strieth gewähltes Mitglied im Zukunftsforum der DECHEMA sowie stellvertretende Sprecherin der neu gegründeten Fachgruppe „Ausbildung in den Naturwissenschaften“.

Literatur

- [1] H. Xu, H. Cai, G. Yu, H. Jiang, Insights into extracellular polymeric substances of cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* using fractionation procedure and parallel factor analysis, *Water Res.* **2013**, *47* (6), 2005–2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.019>
- [2] S. P. Cuellar-Bermudez, J. S. Garcia-Perez, B. E. Rittmann, R. Parra-Saldivar, Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels, *J. Clean. Prod.* **2015**, *98*, 53–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.034>
- [3] M. Gantar, Z. Svirčev, Microalgae and cyanobacteria: Food for thought (1), *J. Phycol.* **2008**, *44* (2), 260–268. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00469.x>
- [4] D. Strieth, R. Ulber, K. Muffler, Application of phototrophic biofilms: from fundamentals to processes, *Bioprocess Biosyst. Eng.* **2018**, *41* (3), 295–312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1870-3>
- [5] J. Kollmen, D. Strieth, The Beneficial Effects of Cyanobacterial Co-Culture on Plant Growth, *Life* (Basel) **2022**, *12* (2), 223. DOI: <https://doi.org/10.3390/life12020223>
- [6] D. Strieth, S. Lenz, R. Ulber, In vivo and in silico screening for antimicrobial compounds from cyanobacteria, *MicrobiologyOpen* **2022**, *11* (2), e1268. DOI: <https://doi.org/10.1002/mbo3.1268>
- [7] S. Y. Choi, S. J. Sim, S. C. Ko, J. Son, J. S. Lee, H. J. Lee, W. S. Chang, H. M. Woo, Scalable Cultivation of Engineered Cyanobacteria for Squalene Production from Industrial Flue Gas in a Closed Photobioreactor, *J. Agric. Food. Chem.* **2020**, *68* (37), 10050–10055. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c03133>
- [8] M. Lakatos, D. Strieth, Terrestrial Microalgae: Novel Concepts for Biotechnology and Applications, in *Progress in Botany* (Eds: F. Cánovas, U. Lüttge, R. Matyssek), 79, Springer, Cham **2017**. DOI: https://doi.org/10.1007/124_2017_10
- [9] H. Yu, S. Jia, Y. Dai, Growth characteristics of the cyanobacterium *Nostoc flagelliforme* in photoautotrophic, mixotrophic and heterotrophic cultivation, *J. Appl. Phycol.* **2009**, *21* (1), 127–133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9341-5>
- [10] K. Gao, C. Ye, Culture of the terrestrial cyanobacterium, *Nostoc flagelliforme* (Cyanophyceae), under aquatic conditions, *J. Phycol.* **2003**, *39* (3), 617–623. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2003.02013.x>
- [11] D. Strieth, A. Weber, J. Robert, J. Stiefelmaier, J. Kollmen, M. Volkmar, M. Lakatos, V. Jordan, K. Muffler, R. Ulber, Characterization of an Aerosol-Based Photobioreactor for Cultivation of Phototrophic Biofilms, *Life* (Basel) **2021**, *11* (10), 1046. DOI: <https://doi.org/10.3390/life11101046>
- [12] K. Scherer, J. Stiefelmaier, D. Strieth, M. Wahl, R. Ulber, Development of a lightweight multi-skin sheet photobioreactor for future cultivation of phototrophic biofilms on facades, *J. Biotechnol.* **2020**, *320*, 28–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.06.004>
- [13] S. Kuhne, D. Strieth, M. Lakatos, K. Muffler, R. Ulber, A new photobioreactor concept enabling the production of desiccation induced biotechnological products using terrestrial cyanobacteria, *J. Biotechnol.* **2014**, *192*, 28–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.10.002>
- [14] D. Strieth, J. Schwing, S. Kuhne, M. Lakatos, K. Muffler, R. Ulber, A semi-continuous process based on an ePBR for the production of EPS using *Trichocoleus sociatus*, *J. Biotechnol.* **2017**, *256*, 6–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2017.06.1205>
- [15] T. Schmidt, M.-K. Nguyen, M. Lakatos, Phototrophe Mikroorganismen an der Fassade, *Fassade* **2017**, *1*, 24–26.
- [16] K. Scherer, C. Herrmann, M. Wahl, T. Schmidt, M. Lakatos, Entwicklung von fassadenintegrierten emersen Photobioreaktoren, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90* (9), 1239. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201855237>
- [17] A. A. Esteves-Ferreira, M. Inaba, A. Fort, W. L. Araújo, R. Sulpice, Nitrogen metabolism in cyanobacteria: metabolic and molecular control, growth consequences and biotechnological applications, *Crit. Rev. Microbiol.* **2018**, *44* (5), 541–560. DOI: <https://doi.org/10.1080/1040841X.2018.1446902>
- [18] N. J. Provart, J. Alonso, S. M. Assmann, D. Bergmann, S. M. Brady, J. Brkljacic, J. Browse, C. Chapple, V. Colot, S. Cutler, J. Dangl, D. Ehrhardt, J. D. Friesner, W. B. Frommer, E. Grote-wold, E. Meyerowitz, J. Nemhauser, M. Nordborg, C. Pikaard, J. Shanklin, C. Somerville, M. Stitt, K. U. Torii, J. Waese, D. Wagner, P. McCourt, 50 years of *Arabidopsis* research: highlights and future directions, *New. Phytol.* **2016**, *209* (3), 921–944. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13687>
- [19] D. Strieth, S. Di Nonno, J. Stiefelmaier, J. Kollmen, D. Geib, R. Ulber, Co-cultivation of diazotrophic terrestrial cyanobacteria and *Arabidopsis thaliana*, *Eng. Life Sci.* **2020**, *21* (3–4), 126–136. DOI: <https://doi.org/10.1002/elsc.202000068>
- [20] J. Walther, N. Erdmann, M. Stoffel, K. Wastian, A. Schwarz, D. Strieth, K. Muffler, R. Ulber, Passively immobilized cyanobacteria *Nostoc* species BB 92.2 in a moving bed photobioreactor (MBPBR): design, cultivation and characterization, *Biotechnol. Bioeng.* **2022**, *119* (6), 1467–1482. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.28072>

- [21] J. Stiefelmaier, D. Strieth, S. Di Nonno, N. Erdmann, K. Muffler, R. Ulber, Characterization of terrestrial phototrophic biofilms of cyanobacterial species, *Algal Res.* **2020**, *50*, 101996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101996>
- [22] H.-C. Flemming, T. R. Neu, D. J. Wozniak, The EPS matrix: the "house of biofilm cells", *J. Bacteriol.* **2007**, *189* (22), 7945–7947. DOI: <https://doi.org/10.1128/JB.00858-07>
- [23] *Perfect slime. Microbial extracellular polymeric substances (EPS)* (Eds: H.-C. Flemming, T. R. Neu, J. Wingender), IWA Publishing, London **2017**.
- [24] S. R. Schooling, T. J. Beveridge, Membrane vesicles: an overlooked component of the matrices of biofilms, *J. Bacteriol.* **2006**, *188* (16), 5945–5957. DOI: <https://doi.org/10.1128/JB.00257-06>
- [25] J. Moreno, M. Vargas, H. Olivares, J. Rivas, M. G. Guerrero, Exopolysaccharide production by the cyanobacterium *Anabaena* sp. ATCC 33047 in batch and continuous culture, *J. Biotechnol.* **1998**, *60* (3), 175–182. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(98\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(98)00003-0)
- [26] F. Rossi, R. de Philippis, Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats, *Life* (Basel) **2015**, *5* (2), 1218–1238. DOI: <https://doi.org/10.3390/life5021218>
- [27] M. A. Mitz, CO₂ Biodynamics: A new concept of Cellular Control, *J. Theor. Biol.* **1979**, *80*, 537–551.
- [28] C. S. Foote, R. W. Denny, Chemistry of singlet oxygen. VII. Quenching by beta-carotene, *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90* (22), 6233–6235. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01024a061>
- [29] W. I. Gruszecki, K. Strzalka, Carotenoids as modulators of lipid membrane physical properties, *Biochim. Biophys. Acta* **2005**, *1740* (2), 108–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.11.015>
- [30] D. E. Sadava, D. M. Hillis, H. C. Heller, M. Berenbaum, *Biologie*, 9. Auflage Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg **2011**.
- [31] W. Gross, Heterotrophic Growth of Two Strains of the Acidothermophilic Red Alga, *Galdieria sulphuraria*, *Plant Cell Physiol.* **1995**, *36* (4), 633–638. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a078803>
- [32] J. Pittera, F. Partensky, C. Six, Adaptive thermostability of light-harvesting complexes in marine picocyanobacteria, *ISME J.* **2017**, *11* (1), 112–124. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.102>
- [33] D. Strieth, J. Stiefelmaier, B. Wrabl, J. Schwing, A. Schmeckebier, S. Di Nonno, K. Muffler, R. Ulber, A new strategy for a combined isolation of EPS and pigments from cyanobacteria, *J. Appl. Phycol.* **2020**, *58* (3), 419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02063-x>
- [34] D. Strieth, A. Schwarz, J. Stiefelmaier, N. Erdmann, K. Muffler, R. Ulber, New procedure for separation and analysis of the main components of cyanobacterial EPS, *J. Biotechnol.* **2021**, *328*, 78–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.01.007>
- [35] A. Schwarz, D. Hornung, M. Witthohn, D. Strieth, R. Ulber, K. Muffler, A modified method for colorimetric quantification of lipids from cyanobacteria, *Algal Res.* **2020**, *50*, 102015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102015>
- [36] A. Mehring, N. Erdmann, J. Walther, J. Stiefelmaier, D. Strieth, R. Ulber, A simple and low-cost resazurin assay for vitality assessment across species, *J. Biotechnol.* **2021**, *333*, 63–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.04.010>
- [37] E. M. Gartner, D. E. Macphee, A physico-chemical basis for novel cementitious binders, *Cem. Conc. Res.* **2011**, *41* (7), 736–749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.006>
- [38] A. Røyne, Y. J. Phua, S. Balzer Le, I. G. Eikjeland, K. D. Josefsen, S. Markussen, A. Myhr, H. Throne-Holst, P. Sikorski, A. Wentzel, Towards a low CO₂ emission building material employing bacterial metabolism (1/2): The bacterial system and prototype production, *PLoS one* **2019**, *14* (4), e0212990. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212990>
- [39] N. Husillos Rodríguez, S. Martínez-Ramírez, M. T. Blanco-Varela, S. Donatello, M. Guillem, J. Puig, C. Fos, E. Larrotcha, J. Flores, The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production, *J. Clean. Prod.* **2013**, *52*, 94–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.026>
- [40] S. A. Miller, A. Horvath, P. J. M. Monteiro, Impacts of booming concrete production on water resources worldwide, *Nat. Sustainability* **2018**, *1* (1), 69–76. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- [41] D. Mujah, M. A. Shahin, L. Cheng, State-of-the-Art Review of Biocementation by Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization, *Geomicrobiol. J.* **2017**, *34* (6), 524–537. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1225866>
- [42] P. Ghosh, S. Mandal, B. D. Chattopadhyay, S. Pal, Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cem. Conc. Res.* **2005**, *35* (10), 1980–1983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>
- [43] V. Achal, A. Mukerjee, M. Sudhakara Reddy, Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures, *Constr. Build. Mat.* **2013**, *48*, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.061>
- [44] S. Mondal, A. Ghosh, Microbial Concrete as a Sustainable Option for Infrastructural Development in Emerging Economies, in *Proc. of Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure*, ASCE India Conference 2017, American Society of Civil Engineers, Reston, VA **2018**, 413–423.
- [45] W. de Muynck, N. de Belie, W. Verstraete, Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review, *Ecol. Eng.* **2010**, *36* (2), 118–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [46] *Grundsatzpapier des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur Partizipation*, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin **2016**. www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmbf_grundsatzpapier_partizipation_barrierefrei.pdf?__blob=publicationFile&v=2