

# Circular Economy durch Interdisziplinarität – Chemie mit Mikroorganismen

**Im Schülerlabor *TüChemLab* der Eberhard Karls Universität Tübingen werden die Prinzipien der Circular Economy unter anderem anhand des hochaktuellen Themenbereichs der Biokunststoffe behandelt. Dabei wird sowohl der Beitrag der Chemie als auch die Möglichkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Chemie und Mikrobiologie zum Erreichen einer nachhaltigen Gesellschaft theoretisch vermittelt und praktisch durch Experimente erfahrbar gemacht. Durch die Ausweitung des interdisziplinären Ansatzes auf andere Themenfelder, wie die Wiedergewinnung von Seltenerdmetallen mithilfe von Mikroorganismen, werden die vielfältigen Kooperationsmöglichkeiten weiter vertieft.**

Kunststoffe spielen eine wesentliche Rolle in unserem Alltag. Sie begegnen uns in vielfältigen Anwendungen, von Verpackungen und Haushaltsgegenständen über Spielzeug bis hin zu medizinischen Geräten und Elektronik. Ihre Vielseitigkeit, Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit machen sie zu einem der am häufigsten verwendeten Materialien.

Allerdings hat diese weitverbreitete Nutzung auch negative Auswirkungen. Die Herstellung petrochemischer Kunststoffe verbraucht fossile

Ressourcen und deren Produkte sind zumeist nicht biologisch abbaubar. Das Recycling von Kunststoffen ist zwar grundsätzlich möglich und auch im Sinne einer nachhaltigen Nutzung von Ressourcen wichtig, birgt aber viele praktische Probleme: Fehlende Sortenreinheit, Polymerdegradation, Additive und hohe Energiekosten verhindern in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen, sodass jährlich Millionen Tonnen von Kunststoff in Endlagern deponiert oder verbrannt werden.<sup>[1]</sup> Durch eine unsachgemäße Entsorgung landen zudem bis zu 5 % der globalen Kunststoffmenge in den Ozeanen, wo nur ein extrem langsamer Abbau stattfindet und somit große Schäden für die Natur entstehen.<sup>[2]</sup> Eine vielversprechende Möglichkeit zur Beseitigung dieses erheblichen Übelstandes bieten bestimmte Biokunststoffe, die sowohl aus biologischen Rohstoffen gewonnen werden als auch biologisch abbaubar sind.<sup>[3]</sup>

## „Recycle“ – PLA-Recycling und 3D-Druck

Die Hoffnung hinsichtlich der Abfallproblematiken rund um Kunststoffe liegt in den biologisch Abbaubaren. Der am häufigsten eingesetzte bio-basierte und biologisch abbaubare

Kunststoff ist die Polymilchsäure bzw. Polylactid (kurz PLA).

Obwohl PLA laut der DIN EN 13432 als biologisch abbaubarer Kunststoff eingestuft werden kann und demnach ein Zerfall nach höchstens sechs Monaten zu mindestens 90 % in kleine Teile (< 2 mm) erfolgen muss, ist eine Kompostierung außerhalb industrieller Anlagen und deren besonderen Zerfallsbedingungen stark eingeschränkt. Außerdem sind gemäß der Norm maximal 5 % an Additiven erlaubt.<sup>[4]</sup> Hierbei werden unter anderem Stabilisatoren, Farb- und Füllstoffe sowie Weichmacher eingesetzt. Eine höhere Beigabe an Additiven kann dazu führen, dass der Kunststoff nur noch schwer biologisch abbaubar ist,<sup>[5]</sup> was beispielsweise bei PLA-Filament für den 3D-Druck der Fall sein kann. Aufgrund dieser Herausforderungen ist eine angemessene Verwertung von PLA, wie zum Beispiel durch Recycling, sinnvoll.

Im *TüChemLab* durchlaufen die Schülerinnen und Schüler hierzu einen Tag lang verschiedene Experimentierstationen, um einen Geträn-

kebecher aus PLA Schritt für Schritt zu recyceln sowie die Vor- und Nachteile des Kunststoffrecyclings zu bewerten.<sup>[6]</sup> Die Schülerinnen und Schüler stellen aus den Bechern zunächst Granulat her und geben ggf. Glimmerpulver als Farbstoff hinzu. Anschließend wird das Granulat im Extruder zu Filament weiterverarbeitet, welches schließlich zu einem selbst entworfenen Objekt 3D-gedruckt wird (Abb. 1).

Abschließend bewerten die Schülerinnen und Schüler die Vor- und Nachteile des Kunststoffrecyclings im Sinne einer Circular Economy, indem unter anderem auf das Einsparen von Ressourcen sowie die Grenzen aufgrund von Polymerdegradation eingegangen wird.

### „Rethink“ – Einblicke in aktuelle Forschung mit Cyanobakterien

Als vielversprechende Alternative zu PLA gewinnt Polyhydroxybuttersäure (PHB) zunehmend an Aufmerksamkeit. PHB zeichnet sich durch exzellente Materialeigenschaften aus, ist

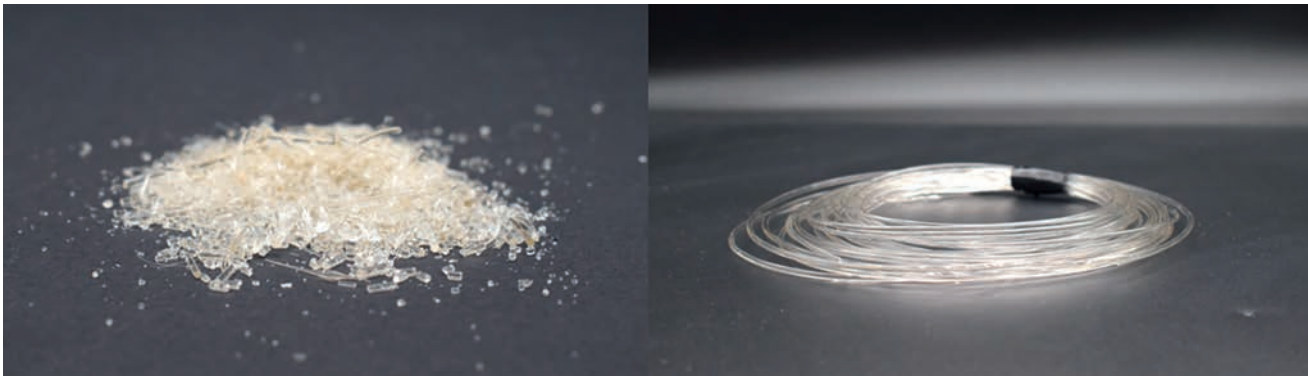


Abbildung 1: PLA-Granulat (links) und extrudiertes Filament (rechts).

Foto: TüChemLab

im Gegensatz zu PLA auch außerhalb industrieller Anlagen vollständig kompostierbar und entsteht durch den Stoffwechsel verschiedener Mikroorganismen. Die industrielle Herstellung erfolgt bisher durch heterotrophe Bakterien, die allerdings mit Kohlenhydraten gefüttert werden müssen. Um auf diese Weise eine Tonne PHB zu gewinnen, werden ca. sieben Tonnen Weizen oder 18 Tonnen Kartoffeln benötigt. Der Verbrauch an Lebensmitteln ist somit fast doppelt so hoch wie für PLA.[7]

Neben heterotrophen Bakterien produzieren jedoch auch viele Stämme der Cyanobakterien PHB. Cyanobakterien sind die einzigen Bakterien, die sich durch oxygene Photosynthese ernähren – also ausschließlich durch Licht und

Kohlenstoffdioxid – und somit keine Stärke oder Zucker zur Produktion des Biokunststoffes benötigen. Das Potential für eine Circular Economy für Kunststoffe ist damit enorm: Das zur Produktion von PHB von den Cyanobakterien benötigte  $\text{CO}_2$  wird bei der Kompostierung wieder freigesetzt, und als einzige Energiequelle wird das praktisch unbegrenzt verfügbare Sonnenlicht genutzt. Der PHB-Zyklus ist auf diese Weise vollkommen  $\text{CO}_2$ -neutral.

Da die von Cyanobakterien intrazellulär angereicherte Menge an PHB maximal 10% des Zelltrochengewichts erreichen kann, ist die großtechnische Produktion bislang noch unwirtschaftlich. Aus diesem Grund hat sich die Arbeitsgruppe für Mikrobiologie und Organis-

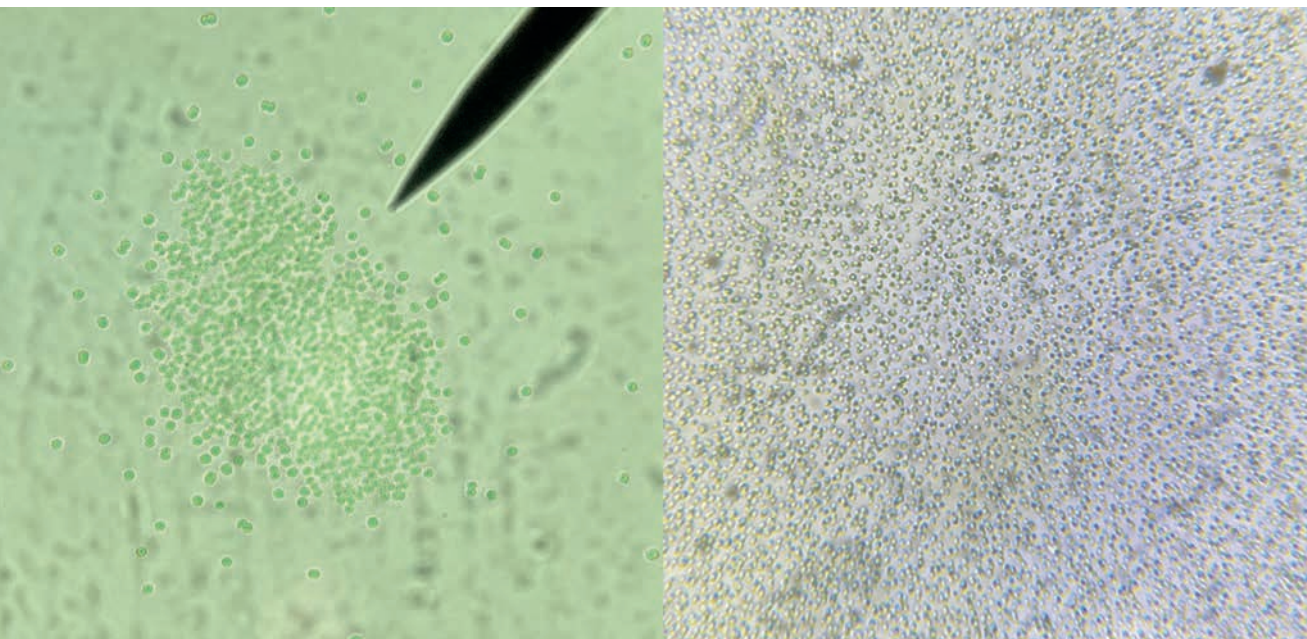


Abbildung 2: Cyanobakterien unter dem Lichtmikroskop in der Wachstumsphase (links) und PHB-Produktionsphase (rechts).

Foto: TüChemLab

mische Interaktionen der Universität Tübingen unter Leitung von Prof. Dr. Karl Forchhammer zum Ziel gesetzt, den Stoffwechsel von Cyanobakterien besser zu verstehen, um im Anschluss durch *metabolic engineering* die PHB-Produktion zu erhöhen.[8]

Nachdem die Forscher herausgefunden hatten, dass das PHB bei Cyanobakterien durch den Abbau (Katabolismus) des Oligosaccharids Glykogen entsteht, konnten sie durch gezielte Mutationen den zentralen Regulator des Glykogenabbaus entfernen und gleichzeitig die Expression (Ausprägung) zweier Gene, die für die PHB-Produktion verantwortlich sind, erhöhen. Das Ergebnis war der Cyanobakterienstamm mit dem Namen „PPT1“ (*PHB Producer Tübingen 1*), in dem die intrazelluläre PHB-Menge über 80% des Zelltrockengewichts erreichen kann.[9]

Durch eine Kooperation der Chemiedidaktik mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Forchhammer entstand die Schülerlaborstation „Cyanobakterien und PHB“, die Schülerinnen und Schülern einen Einblick in dieses hochaktuelle Forschungsthema bietet. In der Station lernen die Schülerinnen und Schüler zuerst die Unterschiede zwischen den beiden Biokunststoffen PLA und PHB kennen. Basierend auf Informationen über die Eigenschaften, die Kompostierbarkeit und die bisherigen Herstellungswege bewerten die Schülerinnen und Schüler die beiden Biokunststoffe. Darauf wird der neue Produktionsansatz mit Cyanobakterien vorgestellt. Hierbei mikroskopieren die Schülerinnen und Schüler Cyanobakterien in der Wachstumsphase und der Produk-

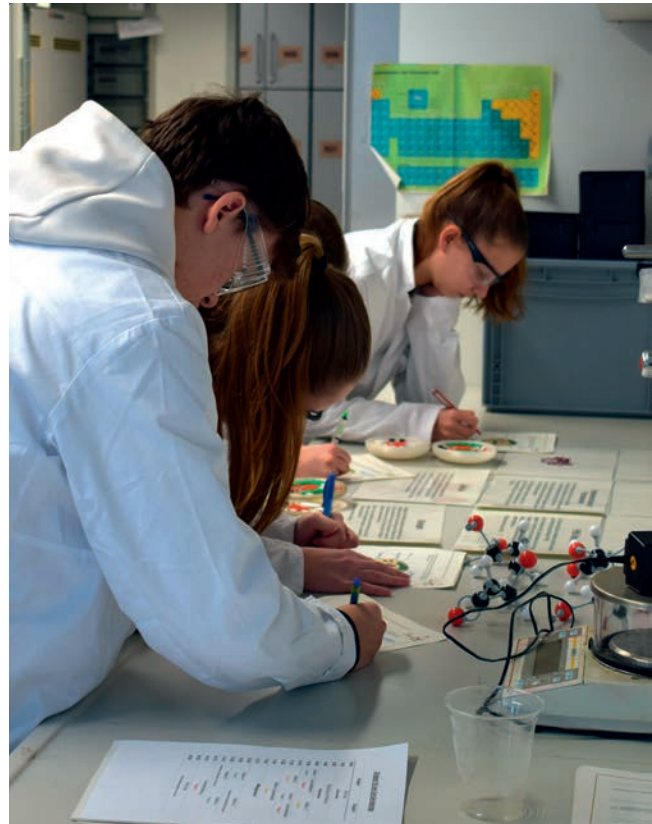


Abbildung 3: Schülerinnen und Schüler erarbeiten sich im TüChemLab die PHB-Synthese durch Cyanobakterien.

Foto: TüChemLab

tionsphase (Abb. 2). Diese werden von der AG Forchhammer dem Schülerlabor zur Verfügung gestellt und ermöglichen somit einen authentischen Einblick in die Forschung. Anhand von Bakterienmodellen beschäftigen sich die Schülerinnen und Schüler daraufhin eingehend mit dem zellulären Aufbau von Cyanobakterien und erarbeiten das Prinzip der katabolen PHB-Produktion (Abb. 3). Der Höhepunkt der Station ist ein Besuch in der Mikrobiologie. Hier bekommen die Schülerinnen und Schüler von Mitarbeitern der AG Forchhammer eine Laborführung, in der sie die aktuellen Forschungsmethoden kennenlernen und mit Fachwissenschaftlern in Kontakt treten.



Am Ende der Station vergleichen und bewerten die Schülerinnen und Schüler erneut die beiden Biokunststoffe PLA und PHB, wobei sie nun den kennengelernten Produktionsweg über Cyanobakterien miteinfließen lassen. Die Schülerinnen und Schüler erfahren auf diese Weise die Möglichkeiten und Vorteile eines Umdenkens („Rethink“) in der Kunststoffproduktion. Aktuell werden zudem vertiefende Einblicke in die Forschung durch den Dreh und die Produktion von Kurzvideos gegeben (Abb. 4).



Abbildung 4: Dreh von Kurzvideos in der Mikrobiologie.

Foto: TüChemLab

## „Rethinking Recycling“ – Bioleaching von seltenen Erden mit Kombucha

Einen weiteren Anknüpfungspunkt, die Möglichkeiten der interdisziplinären Zusammenarbeit von Chemie und Mikrobiologie im Schülerlabor aufzuzeigen, bietet das Recycling der sogenannten Seltenen Erden: Ungefähr die Hälfte aller Treibhausgasemissionen und mehr als 90 % des Verlustes an Biodiversität sind auf die Extraktion und Verarbeitung von natürlichen Ressourcen zurückzuführen.<sup>[10]</sup> Bei der Gewinnung von Seltenen Erden ist die Umweltbelastung besonders gravierend: Pro Tonne Seltener Erden fallen ca. 2000 Tonnen Abfallprodukte, 1000 Tonnen mit Schwermetallen belastetes Schmutzwasser und 1400 Tonnen radioaktiver Müll an. Zusätzlich werden zwischen 40 und 110 Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt.<sup>[11]</sup> Um diesen zerstörerischen Abbau einzudämmen, werden effektive und umweltschonende Recyclingverfahren für Seltene Erden dringend benötigt.

Eine Schülerlaborstation zu diesem Thema befindet sich aktuell in der didaktischen Erschließung und thematisiert die derzeit in der Forschung erprobte Recyclingmethode des *Bioleachings*.<sup>[12]</sup> Hierbei werden Seltene Erden durch Mikroorganismen aus Sekundärrohstoffen extrahiert, wodurch auf die Verwendung von umweltschädlichen Chemikalien und großen Lösungsmittelmengen verzichtet werden kann.<sup>[13]</sup> Dies bietet für Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, verschiedene Recyclingverfahren kritisch zu bewerten und die Notwendigkeit von „Rethink“ auch in diesem Themenbereich zu erkennen.



Abbildung 5: Ansätze von Kombucha-Kulturen für das Bioleaching von Yttrium.

Foto: TüChemLab

In der Schülerlaborstation sollen die Schülerinnen und Schüler mit Kombucha experimentieren, einer Mischung aus verschiedenen Bakterien und Hefen, die im Alltag auch zur Herstellung eines Kombucha-Gärgetränks genutzt werden (Abb. 5). In einem Modellexperiment soll aufgezeigt werden, wie Seltene Erden aus Leuchtstoffröhrenabfall durch *Bioleaching* zurückgewonnen werden können: Die in Leuchtstoffröhren enthaltenen Yttriumverbindungen werden mit Kombucha selektiv herausgelöst, der Kombucha-Überstand dekantiert und das gelöste Yttrium mit Oxalsäure ausgefällt.<sup>[14]</sup>

### Circular Economy und Interdisziplinarität im Schülerlabor

Dieser kurze Überblick zeigt, wie das *TüChemLab* durch verschiedene Experimente und Stationen zu Circular Economy authentische Einblicke in aktuelle Forschungsthemen bietet. Die Versuche betonen die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Chemie und Mikrobiologie und verdeutlichen die daraus resultierenden Chancen für die Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft an ausgewählten Beispielen. Da zum Erreichen einer Circular Economy eine interdisziplinäre Vernetzung

nötig ist und in der Forschung schon praktiziert wird,<sup>[10]</sup> wird diese auch im Schülerlabor entsprechend thematisiert.

*Alexander Paul Fritz, Felix Pawlak,  
Stefan Schwarzer*

## Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Prof. Dr. Forchhammer und seinem Arbeitskreis für die gute und offene Zusammenarbeit sowie dem Exzellenzcluster „Kontrolle von Mikroorganismen zur Bekämpfung von Infektionen“ (CMFI), ohne die die Station zu Cyanobakterien nicht möglich gewesen wäre. Zudem möchten wir Oliver Sander für die von ihm im Rahmen seines Praktikums angefertigten konzeptionellen Vorarbeiten herzlich danken. Das Projekt wird von der DBU großzügig gefördert (Aktenzeichen 38330/01).

## Literatur

- [1] **R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law**, *Sci. Adv.* 2017, 3, e1700782.
- [2] **J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan, K. L. Law**, *Science* 2015, 347, 768.
- [3] **J.-G. Rosenboom, R. Langer, G. Traverso**, *Nat. Rev. Mater.* 2022, 7, 117.
- [4] Deutscher Bundestag, „Zur Verwendung von Bioabfallbeuteln aus bioabbaubaren Kunststoffen“, zu finden unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/853962/a519da7da451ee8dda8951fb7a3940a1/WD-8-062-21-pdf-data.pdf>, 2021.
- [5] **N.-A. A. B. Taib, M. R. Rahman, D. Huda, K. K. Kuok, S. Hamdan, M. K. B. Bakri, M. R. M. B. Julaihi, A. Khan**, *Polym. Bull.* 2023, 80, 1179.
- [6] **F. Pawlak, S. Schwarzer**, *CHEMKON* 2024, 31, 82.
- [7] Institute for Bioplastics and Biocomposites, “Biopolymers - facts and statistics”, zu finden unter <https://www.ifbb-hannover.de/en/facts-and-statistics.html>, 2023.
- [8] **M. Koch, K. Forchhammer**, *Biospektrum* 2021, 27, 200.
- [9] **M. Koch, J. Bruckmoser, J. Scholl, W. Hauf, B. Rieger, K. Forchhammer**, *Microb. Cell. Fact.* 2020, 19, 231.
- [10] **G. Chatel**, *Chem. Eur. J.* 2020, 26, 9665.
- [11] **Y. Geng, J. Sarkis, R. Bleischwitz**, *Nature* 2023, 619, 248.
- [12] **N. Mandal, E. Osman, P. Pawlowsky, S. Prüschenk, E. Ringhoff, L. J. Daumann, S. Schwarzer, S. M. Gutenthaler, S. Mandl, F. Johannes**, *NiU-Chemie* 2021, 183, 16.
- [13] **A. Dance**, *Nature* 2023, 623, 876.
- [14] **S. Hopfe, K. Flemming, F. Lehmann, R. Möckel, S. Kutschke, K. Pollmann**, *Waste Manag.* 2017, 62, 211.



Schülerinnen und Schüler im TüChemLab.

Foto: TüChemLab

**Name des Schülerlabors:** TüChemLab

**Institution:** Universität Tübingen

**Kontakt:** Prof. Dr. Stefan Schwarzer, stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de

**Schülerlabor-Kategorie:** SchüLerLabor<sup>LW</sup>

**Projektlaufzeit:** 01.03.2023 bis 01.08.2026

**Fachgebiet(e):** Chemie

**Zielgruppen:** Klassenstufen 10 bis 13, Lehrkräfte, Studierende, Referendarinnen und Referendare, Schülerlabormitarbeiterinnen und -mitarbeiter

**Schularten:** Hauptschulen, Realschulen, Gesamtschulen, Regionalschulen, Gymnasien, Fachoberschulen, Berufsschulen

**Didaktische Methoden:**

- Rezeptives Experimentieren. Die didaktisch entwickelten Kurse/Module werden von den Schülerinnen und Schülern in der Regel vollständig nach Anleitung durchgeführt.
- Geführt forschendes Experimentieren. Schülerinnen und Schüler bekommen für die Lösung der Problemstellung genügend Informationsmaterial zur Verfügung gestellt.
- Online-Angebot
- Einblicke in die Berufswelt
- Erstellung von Zukunftsvisionen

