

CEASEless

Circular Economy Begreifen – Algen im Schülerlabor Erforschen



Abschlussbericht

Gefördert unter dem AZ 38320 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Prof. Dr. Björn Risch

Rheinland Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Zentrum für Bildung und Forschung an Außerschulischen Lernorten

Landau, 29.07.2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1. Anlass und Zielsetzung des Projekts.....	2
2. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden.....	4
3. Ergebnisse	6
4. Diskussion	7
5. Öffentlichkeitsarbeit	7
6. Fazit.....	8

Zusammenfassung

Im DBU-geförderten Projekt CEASEless (Circular Economy Begreifen – Algen im Schülerlabor Erforschen) wurde ein innovatives Bildungsangebot zur Circular Economy (CE) für Schüler:innen der Klassen 9-13 entwickelt, erprobt, evaluiert und öffentlich zugänglich gemacht. Ziel war es, über eine forschend-entdeckende Auseinandersetzung mit Mikroalgen zentrale Prinzipien der Circular Economy zu vermitteln und damit Circular Literacy, Beteiligungskompetenz und Ambiguitätstoleranz zu fördern. CEASEless leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) im Sinne eines systemisch-reflektierten, zukunftsgerichteten Lernens.

Im Projektverlauf entstanden fünf thematisch aufeinander abgestimmte Lerneinheiten, die in verschiedenen schulischen und außerschulischen Settings mit insgesamt acht Schulklassen erprobt wurden. Zur Qualitätssicherung wurde ein Testinstrument zur Erfassung von Circular Literacy entwickelt und angewendet. Die Ergebnisse flossen in die Finalisierung der Materialien ein.

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden kontinuierlich Forschungsdaten erhoben und ausgewertet, um die Wirkung von CEASEless auf deklaratives Wissen über CE sowie auf umweltgerechtes Verhalten zu überprüfen. Die entwickelten Lerneinheiten und die dazugehörigen Handreichungen stehen der Öffentlichkeit über eine digitale Plattform als Open Educational Resources (OER) zur Verfügung. Zudem wurden die Ergebnisse auf Fachkonferenzen präsentiert und in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert.

1. Anlass und Zielsetzung des Projekts

Den Kreislauf schließen“ – so lautet der Titel des von der Europäischen Kommission 2015 veröffentlichten Aktionsplans¹. Jahrelang stand der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ vor allem für eine gut funktionierende Abfallwirtschaft². Mit dem Aktionsplan wurden jedoch neue Fragen zu Geltungsbereich und Zielen einer Kreislaufwirtschaft aufgeworfen und der Übergang in die „Circular Economy (CE)“ als Systemwandel der Wirtschaft initiiert. Der Aufbau einer nachhaltigen CE bedarf eines grundsätzlichen Paradigmenwechsels, weg vom klassischen Abfallmanagement hin zu einer naturverträglichen Gestaltung von Wirtschaftssystemen im Sinne der Prämissen: *Reuse, Reduce, Recycle, Refuse, Repair* und *Rethink*. Bis dahin ist es aber noch ein langer Weg: Aktuell funktionieren nur 8,6 % der Weltwirtschaft zirkulär³.

Der Kerngedanke der CE folgt dem Prinzip der inbegriffenen Zirkularität von Ökosystemen, oder anders formuliert: die wirtschaftlichen Prozesse orientieren sich an den Stoffkreisläufen der Natur⁴. Besonders im Bereich der „Biogeochemischen Kreisläufe“ (Phosphor- und Stickstoffkreislauf) sind die planetaren Belastbarkeitsgrenzen jedoch bereits deutlich überschritten worden⁵. Dazu trägt insbesondere die industrielle Landwirtschaft mit hohen Stickstoffeinträgen durch Überdüngung bei. Denn Phosphor und Stickstoff sind die Hauptbestandteile in Düngemitteln. Düngemittel werden verstärkt ausgebracht, um die Nährstoffverarmung der Böden auszugleichen und den maximalen Ernteertrag gewährleisten

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>

² https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf

³ <https://www.circularity-gap.world/2022#Download-the-report>

⁴ Jaeger-Erben, M. und Hofmann, F. (2019). Kreislaufwirtschaft – Ein Ausweg aus der sozial-ökologischen Krise? Schriftenreihe Nachhaltigkeit. Wiesbaden: Hessische Landeszentrale für politische Bildung

⁵ Rockström, J. et al. (2009). Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14 (2).

zu können. In der deutschen Landwirtschaft erzeugen etwa 608 000 Beschäftigte in rund 264 000 Betrieben jährlich Güter im Wert von rund 58 Milliarden Euro. Knapp die Hälfte der Fläche der Bundesrepublik wird landwirtschaftlich genutzt⁶.

Durch Überdüngung werden unter anderem die Böden versauert sowie das Trinkwasser belastet. Zudem kann durch Abbauprozesse Lachgas entstehen – ein Treibhausgas das rund 300-mal so klimaschädlich ist wie Kohlenstoffdioxid. Eine konsequent umgesetzte CE forciert den Umbau des Ernährungs- und Agrarsektors hin zu mehr Nachhaltigkeit. In einer sozial und ökologisch ausgerichteten Landwirtschaft wird die Nahrungsmittelproduktion als biologischer Kreislauf natürlicher Ressourcen betrachtet. Im Sinne von Forschung und Innovation, die sich konsequent an gesellschaftlichen Bedarfen orientiert (Responsible Research and Innovation, RRI⁷), wird häufig auf das Potenzial von alternativen Rohstoffquellen, wie beispielsweise Mikroalgen, verwiesen.

Mikroalgen sind einer der zukünftigen Schlüsselfaktoren für die Abschwächung des Klimawandels, da sie phototroph aktive Mikroorganismen sind, die auf verschiedene Weise genutzt werden können⁸. Aktuelle Forschungsergebnisse legen nahe, dass Mikroalgen auch eine entscheidende Rolle bei der erfolgreichen Wiederverwendung von landwirtschaftlichen Abfällen im industriellen Maßstab spielen könnten⁹. Sie passen hervorragend zu der Idee einer CE, da sie in der Lage sind, Nährstoffabfälle biologisch zu sanieren und als Quelle für Biomasse für verschiedene kommerzielle Anwendungen zu dienen¹⁰. Historisch bedingt werden unter dem Oberbegriff Mikroalgen die eukaryotischen Mikroalgen und die prokaryotischen Cyanobakterien zusammengefasst. Einige Cyanobakterien (z. B. *Desmonostoc muscorum*)¹¹ sind in der Lage Stickstoff aus der Luft zu fixieren, in bioverfügbaren Stickstoff wie Ammonium umzuwandeln und den Pflanzen zur Verfügung zu stellen¹². So könnten Cyanobakterien als natürliche und vor allem lebende Düngemittel eingesetzt und der Einsatz künstlicher Düngemittel reduziert werden. Es wurden bereits erfolgreich künstliche Symbiosen zwischen Pflanzen und Cyanobakterien im Labormaßstab etabliert, wobei das Wachstum der Cyanobakterien im Vergleich zur Reinkultur verbessert werden konnte und die Pflanzen gleiche Wachstumseigenschaften auf stickstofffreiem Medium mit Cyanobakterien im Vergleich zum Wachstum auf stickstoffhaltigem Medium als Reinkultur aufzeigten. Zusätzlich dazu können Cyanobakterien den Boden stabilisieren und das Pflanzenwachstum verbessern¹³.

Das Ziel des Projekts „CEASEless – Circular Economy Begreifen – Algen im Schülerlabor Erforschen“ bestand darin, dass Schülerinnen und Schüler der zehnten bis 13. Jahrgangsstufe das Potenzial von Mikroalgen und Cyanobakterien für eine Circular Economy (CE) kennenlernen. Die Jugendlichen sollten mit dem CE-Konzept vertraut gemacht werden (Circular Literacy), zu einer nachhaltigen Mitgestaltung ihrer Umwelt aktiviert werden (Beteiligung) und in ihrer Resilienz im Umgang mit ökologisch-sozialen Nachhaltigkeitsdilemmata gestärkt werden (Ambiguitätstoleranz). Im Rahmen von vier Terminen (jeweils halbtags) setzten sich die Lernenden sowohl in der Schule als auch am außerschulischen Lernort experimentell-forschend und kritisch-analytisch mit den Prämissen einer CE auseinander.

⁶ <https://www.iva.de/praxis/landwirtschaft-deutschland>

⁷ <https://rri-tools.eu/>

⁸ Kholssi, R., Ramos, P. V., Marks, E. A. N., Montero, O., & Rad, C. (2021). Biotechnological uses of microalgae: A review on the state of the art and challenges for the circular economy. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 36, 102114.

⁹ <https://algaepianet.com/de/microalgae-could-play-crucial-role-in-circular-economy/>

¹⁰ Fuentes-Grünwald, C., Ignacio Gayo-Peláez, J., Ndovela, V., Wood, E., Vijay Kapoor, R., Anne Llewellyn, C., Towards a circular economy: A novel microalgal two-step growth approach to treat excess nutrients from digestate and to produce biomass for animal feed, *Bioresource Technology* (2020)

¹¹ Strieth, D., Di Nonno, S., Stiefelmaier, J., Kollmen, J., Geib, D., & Ulber, R. (2021). Co-cultivation of diazotrophic terrestrial cyanobacteria and *Arabidopsis thaliana*. *Engineering in Life Sciences*, 21(3-4), 126-136.

¹² Esteves-Ferreira, A. A., Inaba, M., Fort, A., Araújo, W. L., and Sulpice, R. (2018) Nitrogen metabolism in cyanobacteria: metabolic and molecular control, growth consequences and biotechnological applications, *Critical reviews in microbiology* 44, 541–560.

¹³ Kollmen, J., & Strieth, D. (2022). The Beneficial Effects of Cyanobacterial Co-Culture on Plant Growth. *Life*, 12(2), 223.

2. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

CEASEless setzt sich aus vier zentralen Projektbausteinen zusammen. Diese orientieren sich an den Leitlinien der fachdidaktischen Aktionsforschung: (1) Entwicklung, (2) Erprobung, (3) Evaluation und (4) Dissemination (vgl. Abb. 1).

Zu Beginn wurden die Lerneinheiten rund um die Besuche des Schülerlabors im Dialog mit Expert:innen aus dem Bereich Circular Economy (CE) entwickelt und mit Kooperationsschulen pilotiert. Im zweiten Schritt wurden die entwickelten Materialien und Methoden mit Schulklassen sowohl im Schülerlabor als auch in der Schule erprobt. Über die gesamte Projektlaufzeit wurden kontinuierlich Forschungsdaten erhoben und ausgewertet, um die Wirkung von CEASEless auf deklaratives Wissen über CE sowie umweltgerechtes Verhalten zu überprüfen. Abschließend wurden die Lerneinheiten sowie die dazugehörigen Handreichungen über eine digitale Plattform als Open Educational Resources (OER) öffentlich zur Verfügung gestellt.

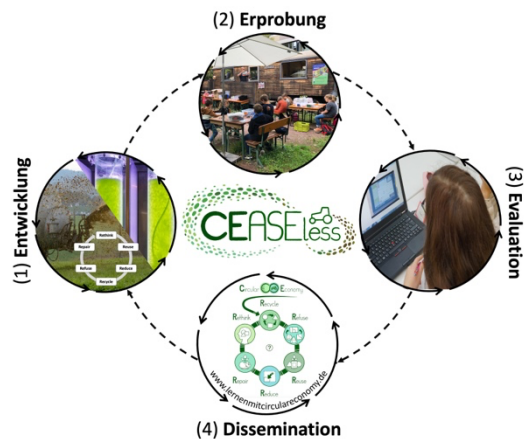


Abbildung 1: Die vier Projektbausteine von CEASEless

Ablauf der Lerneinheiten

Im Rahmen von vier Terminen (jeweils halbtags) setzen sich die Lernenden sowohl in der Schule als auch am außerschulischen Lernort experimentell-forschend und kritisch-analytisch mit den sechs Prämissen einer CE – Recycle, Refuse, Reuse, Reduce, Repair und Rethink – auseinander (vgl. Abb. 2).

Der erste Termin in der Schule gliedert sich in drei Phasen und thematisiert die CE-Prämissen Recycle und Refuse. Es geht zunächst darum, das Konzept von Circular Economy begreifbar zu machen – und die Herausforderungen der Landwirtschaft zu thematisieren. So lernen die Schülerinnen und Schüler relevante Fachbegriffe, um anschließend mit journalistischen Methoden einen Nachrichtenbeitrag beispielsweise für die Tagesschau oder aber für soziale Medien in Form eines TikTok-Videos oder eines Instagram-Posts anzufertigen. In der zweiten Phase wird mit der Prämisse Recycle die fachliche Grundlage zum globalen biogeochemischen Stickstoffkreislauf gelegt.

In einem digitalen Lernmodul wird durch Storytelling ein bedeutsamer Kontext für die Lernenden geschaffen, der die Umwandlungsprozesse der unterschiedlichen Stickstoffverbindungen und die damit verbundenen Probleme im globalen Kreislauf aufgreift (Rote Flaggen) ^[4]. Zum Abschluss des ersten Tages bearbeiten die Teilnehmenden ein Mystery (vgl. Abb. 3). Hierbei wird erstmalig auf das Potenzial



Abbildung 2: Übersicht über den Ablauf des Projekts CEASEless mit den zu vermittelnden Inhalten sowie dem didaktischen Konzept

von Mikroalgen und Cyanobakterien als nachhaltige Alternative zu Kunst- und Wirtschaftsdünger hingewiesen (Refuse). In der Mystery-Methode werden die Lernenden dazu aufgefordert, Lösungsansätze für ein komplexes Rätsel zu entwickeln. Als Ausgangspunkt erhalten sie eine kurz skizzierte Ausgangssituation, die durch die Klärung folgender Leitfrage gelöst werden soll: *Was hat das ungenießbare Brunnenwasser von Anna und Max mit einem Photobioreaktor zu tun?* Die Frage selbst hat keine „richtige“ Antwort; vielmehr werden die Lernenden dazu ermutigt, verschiedene Perspektiven abzuwägen, Zusammenhänge zu erkunden, Hypothesen aufzustellen und sich auf einen für sie besten Kompromiss zu einigen. Um dies zu erreichen, müssen sie sich in das Hintergrundwissen einarbeiten, das in diesem Fall durch die vorlie-



Abbildung 4: Bau des Photobioreaktors im Lehr-Lern-Labor.

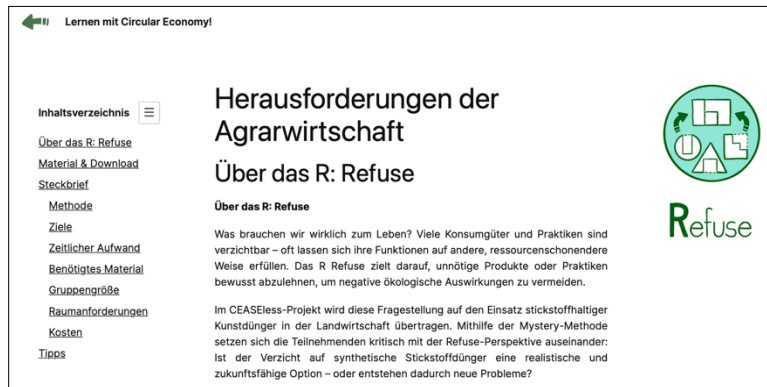


Abbildung 3: Ausschnitt der Homepage www.lernenmitcirculareconomy.de zum Thema „Refuse“, erarbeitet mit der Mystery-Methode.

genden Informationskärtchen erworben werden kann. Die Lernenden werden ermutigt, kritisch zu denken, verschiedene Standpunkte zu berücksichtigen und gemeinsam zu einer Lösung zu gelangen.

Der zweite Termin findet im Lehr-Lern-Labor statt. Es wird die CE Prämisse Reuse behandelt. Die Lernenden bauen aus Alltagsmaterialien und 3D gedruckten Teilen einen modularen Low-Cost Photobioreaktor zur Kultivierung von Mikroalgen und Cyanobakterien (vgl. Abb. 4). Die eingesetzten Sensoren ermöglichen das kontinuierliche Monitoring von Wachstumsparametern, die über einen Mikrocontroller mit WLAN im Sinne des Internet of Things in einer Datenbank online frei zugänglich sind ^[6]. Nach der Prämisse Reuse werden bereits existierende Algenstammlösungen als Starterkultur wiederverwendet.

Beim dritten Termin stehen vier Modellexperimente im Fokus, die zu den skizzierten roten Flaggen des globalen Stickstoffkreislaufs Lösungsansätze bieten. Die Durchführung der Experimente wird aufgezeigt, wie Mikroalgen und Cyanobakterien das durch Überdüngung beschädigte Mikrobiom des Bodens ^[7] regenerieren (Repair) oder durch deren Stoffwechselprozesse beispielsweise in Luftwasch- ^[8] oder Trinkwasseraufbereitungsanlagen ^[9] umwelt- und klimaschädliche Stickstoffverbindungen (z.B. NO_x, NH₃, NH₄⁺ oder N₂O) reduziert werden können (Reduce). So können konventionelle Düngemittel wie Kunstdünger (z. B. Ammoniumnitrat) oder Wirtschaftsdünger (z. B. Harnstoff aus Gülle) im Boden beispielsweise in flüchtigen Ammoniak (NH₃) umgewandelt werden, das in der Atmosphäre auf vielfältige Weise reagieren kann (z. B. zu treibhausrelevantem Lachgas). Dieser Kontext wird in einem Modellexperiment aufgegriffen, indem vier Böden mit aktivem Mikrobiom (toniger Lehm Boden, lehmiger Sandboden, Sandboden und Komposterde) in einer luftdicht verschließbaren Kiste jeweils entweder mit Ammoniumnitrat oder Harnstoff gedüngt werden. Zur Messung der Ammoniak Ausgasung werden die

Kisten mit einem befeuchteten Indikatorpapier sowie einem Sensor ausgestattet, dessen erfasste Daten über einen Arduino ausgelesen wird. Vergleichend dazu werden die Böden in einem weiteren Ansatz anstatt mit Kunst- oder Wirtschaftsdünger mit dem Cyanobakterium *Spirulina platensis* gedüngt. Das Cyanobakterium kann elementaren Stickstoff aus der Luft fixieren und in für Pflanzen verfügbare Stickstoffverbindungen wie Aminosäuren umwandeln. Zusätzlich wirken sich Cyanobakterien positiv auf die Humusbildung und das Wasserhaltevermögen von Böden aus und können Pflanzen schützen, indem sie Schwermetalle und Xenobiotika in ihrer Mobilität hemmen ^[7]. Durch die Mischung von konventionellen Düngemitteln mit Cyanobakterien könnten zwischen 25-40 % Dünger eingespart werden ^[7]. Die Ergebnisse im Modellexperiment zeigen im Verlauf von fünf Tagen einen Anstieg der Ammoniakkonzentration in der Luft bei allen mit Harnstoff gedüngten Böden, während die Ammoniakkonzentration in den mit Cyanobakterien versetzten Böden unverändert bleibt (vgl. Abb. 5). Das Ergebnis lässt sich optisch durch die Blaufärbung des Indikatorpapiers bei den Ansätzen mit Harnstoff im Vergleich zu keiner Farbveränderung bei den Ansätzen mit Cyanobakterien bestätigen.

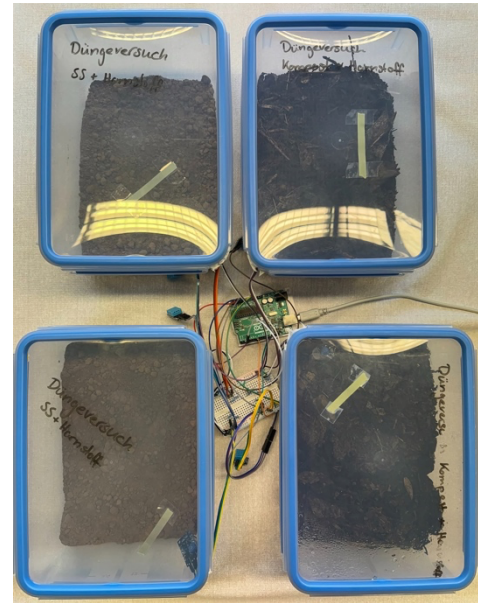


Abbildung 5: Ein Modellexperiment zur Ammoniak Ausgasung von Böden – Vergleich von Komposterde mit Sandboden jeweils gedüngt mit Harnstoff als konventionelles Düngemittel.

Der vierte Termin in der Schule thematisiert die CE Prämisse Rethink. Dabei führen die Lernenden eine Podiumsdiskussion zu einem sozial-ökologischen Dilemma der Agrarwirtschaft aus verschiedenen ökonomisch-politischen Perspektiven durch ^[10]. Acht vorgefertigte Kartensets unterstützen die Lernenden in den Rollen der Moderation sowie der Vertretungen aus der Düngemittelindustrie, Politik, Landwirtschaft, NGO und Wissenschaft. Zunächst beziehen die Lernenden zum skizzierten Dilemma anhand drei offener Fragen schriftlich und im Rahmen einer Gruppendiskussion Stellung. Anschließend bereiten sie sich in Kleingruppen mit dem bereitgestellten Material auf die Podiumsdiskussion vor. Bei der Durchführung der Podiumsdiskussion schlüpft je eine Person der Kleingruppen in die entsprechende Rolle. Währenddessen hat das Publikum die Möglichkeit mittels Chatwall sich an der Diskussion zu beteiligen. Abschließend werden erneut die offenen Fragen schriftlich beantwortet sowie alle Erkenntnisse in einer Gruppendiskussion zusammengeführt. Im Rahmen eines flankierenden Forschungsprojekts wird der Forschungsfrage nachgegangen, inwieweit eine Podiumsdiskussion die Argumentationsfähigkeit von Lernenden fördert ^[11].

3. Ergebnisse

Insgesamt wurden zahlreiche Materialien (digitales Lernmodul, Mystery, Photobioreaktor, Modellexperimente) und Methoden (Journalistenmethode, Podiumsdiskussion mit Rollenspiel) im Zusammenhang mit Circular Economy entwickelt und mit Schulklassen der zehnten bis 13. Jahrgangsstufe mit acht Schulen und ca. 200 Schülerinnen und Schülern erprobt. Sie wurden sukzessive als Open Educational Resources auf der Projekthomepage <https://lernenmitcirculareconomy.de> frei zugänglich gemacht. Das Projekt wurde zudem empirisch begleitet. Im ersten Schritt wurde ein Test entwickelt, der das deklarative Fachwissen zu Circular Economy erfasst. Zur Erfassung der drei Wissensbereiche der Circular Literacy wurden 37 Single-Choice-Items mit vier Antwortmöglichkeiten entwickelt. Diese orientieren sich am Aktionsplan der Europäischen Union „Den Kreislauf schließen“ (Eur-Lex, 2015) sowie

an den sechs CE-Prämissen: Recycle, Refuse, Reuse, Reduce, Repair und Rethink. Die Items wurden mit 107 Studierenden des ersten Semesters (MW = 22 Jahre, 67 % weiblich) im Studiengang Wirtschaftswissenschaften pilotiert und eine Itemanalyse durchgeführt. Als Indiz für umweltgerechtes Verhalten wurden die persönliche Betroffenheit als kognitive Komponente und die Selbstwirksamkeit als motivationale Komponente mittels Q-Sort erhoben. Q-Sort ist eine Forschungsmethode zur systematischen Untersuchung subjektiver Sichtweisen. Als Intervention wurde eine Projektwoche mit 44 Lernenden aus zwei Klassen der zehnten Jahrgangsstufe (MW = 15 Jahre, n ♀ = 36 %) durchgeführt. Die Intervention der Hauptstudie mit 54 Lernenden der neunten bis 13. Jahrgangsstufe (MW = 15 Jahre, n ♀ = 46 %) war vergleichbar zur Pilotierung, mit dem Unterschied, dass die Inhalte erweitert und auf vier Projektstage aufgeteilt wurden. (1) Einführung in die Circular Economy mit der Placement- und Journalistenmethode sowie Vermittlung der fachwissenschaftlichen Grundlagen des globalen biogeochemischen Stickstoffkreislaufs mithilfe eines digitalen Lernmoduls, (2) Herausforderungen der Agrarwirtschaft mithilfe eines Mysterys sowie Bau und Inbetriebnahme eines Photobioreaktors, (3) vier Modellexperimente mit Mikroalgen und (4) Podiumsdiskussion zu einem sozial-ökologischen Dilemma der Agrarwirtschaft. Der Pre-Post-Vergleich zeigt beim t-Test keine signifikante Zunahme des deklarativen Wissens zu CE. Allerdings zeigt der Pre-Post-Vergleich eine fast signifikante Zunahme der subjektiven Betroffenheit der Proband:innen von Cyanobakterien im Kontext des Klimawandels mit großer Effektstärke (vgl. Abb. 6).

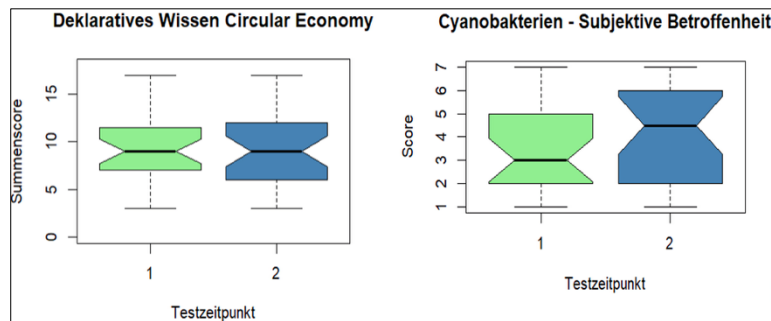


Abbildung 6: Boxplot Diagramme zum deklarativen Wissen im Bereich CE und zur subjektiven Betroffenheit (Pre-Post-Vergleich).

4. Diskussion

Das Projekt konnte wie geplant durchgeführt werden. Die Rückmeldungen der Lehrkräfte waren außerordentlich positiv, sodass bereits weitere Termine vereinbart wurden, vor allem im Rahmen von Projektwochen. Während der Projektlaufzeit fand ein regelmäßiger Austausch und gemeinsame Datenerhebungen mit den Kolleg:innen in Tübingen (TüChemLab) und Osnabrück (GreenLab_OS) statt.

5. Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt wurde über eine Projekthomepage kommuniziert:

<https://nuw.rptu.de/ags/chemdid/forschung/ceaseless>

Die Lernmaterialien werden auch zukünftig als Open Educational Resources zur Verfügung gestellt:

<https://lernenmitcirculareconomy.de>

Im Forschungsmagazin der Universität wurde über das Projekt berichtet:

<https://rptu.piipe.de/node/192>

Das Projekt wurde auf zahlreichen wissenschaftlichen Tagungen präsentiert. Die Ergebnisse wurden in Zeitschriften oder Büchern publiziert:

- Geuer, L., Erdmann, N., Kollmen, J., Otteny, A., Wastian, K., Wallrath, S., Engl, A., Risch, B., Ulber, R. & Strieth, D. (2025). Educational approaches to bioprocess engineering using DIY bioreactors for scientific literacy. *Education Sciences* 15(3), 323
- Risch, B., Bier, T., Engl, A., Jupke, I., Strieth, D., Wallrath, S., Weinberger, P. & Zachert, I. (2024). CEASEless: Circular Economy begreifen – Algen im Schülerlabor erforschen. In: *LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e. V. (Hrsg.), Es geht rund im Schülerlabor. Circular Economy vermitteln*. S. 26-33.
- Wallrath, S., Engl, A., Erdmann, N., Kollmen, J., Strieth, D. & Risch, B. (2023). Mikrocontroller als Low-Cost Technologie: Monitoring von Wachstumsparametern bei Mikroalgen in einem 3D-gedruckten IoT-Photobioreaktor. *MNU journal*, 76(5), 360-365.
- Risch, B., Zachert, I., Engl, A., Przywarra, T. & Strieth, D. (2023). Circular Economy Begreifen – Algen im Schülerlabor Erforschen (CEASEless). In: van Vorst, H. (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt*. GDCP, 2022.

6. Fazit

CEASEless konnte erfolgreich zeigen, wie sich komplexe Konzepte wie Circular Economy mit Jugendlichen der Sekundarstufe I praxisnah und wirkungsorientiert erarbeiten lassen. Die Kombination aus naturwissenschaftlichem Experimentieren, systemischem Denken und multiperspektivischer Auseinandersetzung mit Nachhaltigkeitsfragen stellt ein innovatives didaktisches Modell dar. Das Projekt zeigt, dass Schüler:innen nicht nur Fachwissen erwerben, sondern sich auch aktiv mit ökologischen Dilemmata und Lösungsstrategien auseinandersetzen können. Dies stärkt ihre Fähigkeit zur Mitgestaltung einer nachhaltigen Gesellschaft.

Die Evaluation des Projekts leistete einen Beitrag zur Frage, inwieweit CEASEless deklaratives Wissen über CE sowie umweltgerechtes Verhalten der Teilnehmenden fördert. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Testinstrumente entwickelt, die für zukünftige Studien im Bereich Circular Economy zur Verfügung stehen. Die bereitgestellten Materialien, die begleitende Evaluation und die Verankerung in der Lehrer:innenbildung schaffen die Grundlage für eine Verstetigung und Skalierung. Eine Fortführung und Weiterentwicklung des Projekts in weiteren Bildungsformaten – insbesondere im Kontext von BNE und Bildung im Anthropozän – ist ausdrücklich intendiert