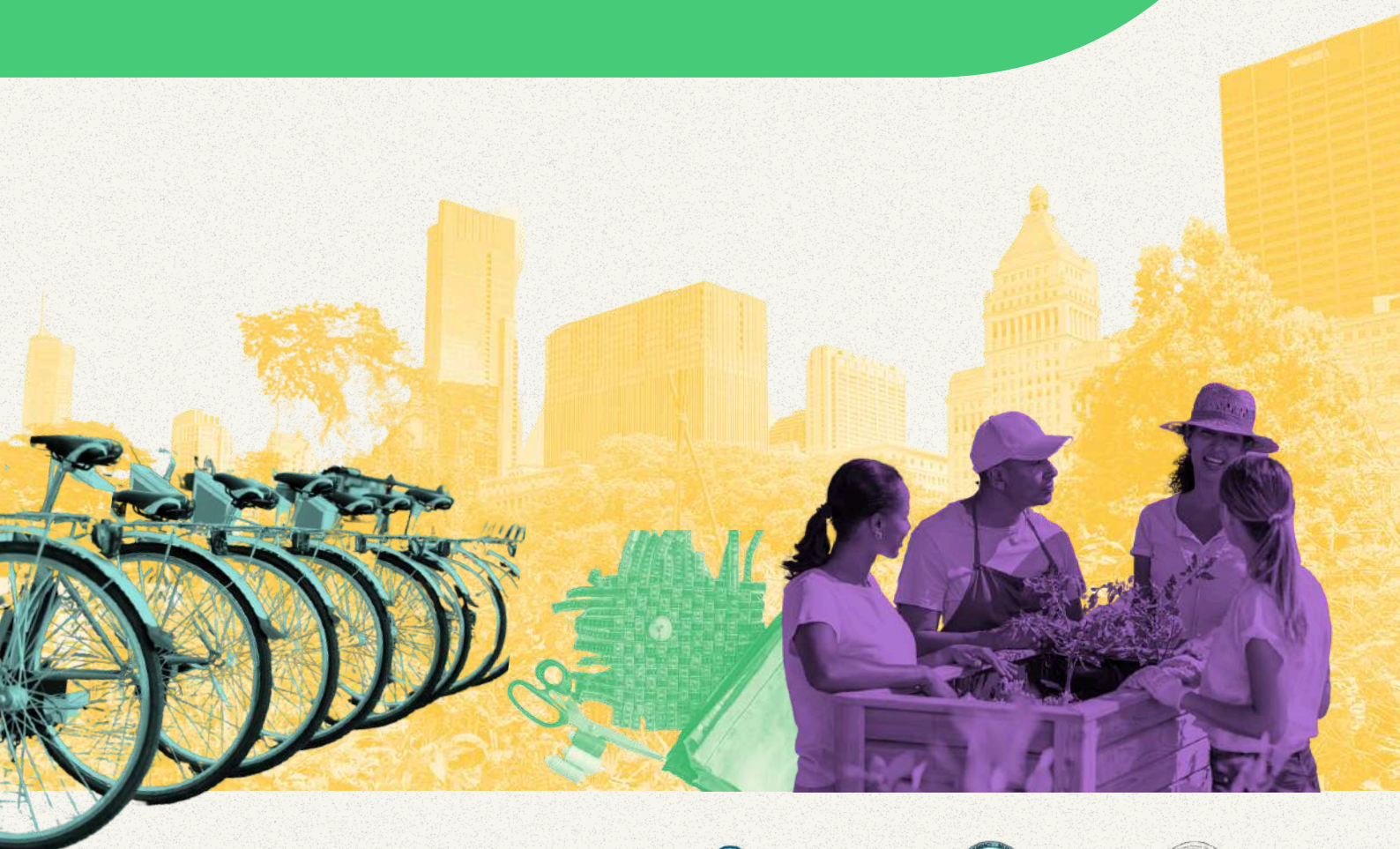


STUDIE ZU ZIRKULÄREN PRAKTIKEN FÜR (DIGITALE) BILDUNG



Autor*innen

Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Deutschland)

Sucessos Criativos Lda Portugal Norte (SC, Portugal)

Higher School of Transport "Todor Kableshkov" (HST, Bulgarien)

FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Griechenland)

Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Deutschland)

Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polen)

Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Türkei)

Koordinator

Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Deutschland)

Offenlegungserklärung



**Kofinanziert von der
Europäischen Union**

Das Projekt "Circular Practices for Education in the Digital Universe" ist von der Europäischen Union co-finanziert. Die geäußerten Ansichten und Meinungen entsprechen jedoch ausschließlich denen des Autors bzw. der Autoren und spiegeln nicht zwingend die der Europäischen Union oder der Europäischen Exekutivagentur für Bildung und Kultur (EACEA) wider. Weder die Europäische Union noch die EACEA können dafür verantwortlich gemacht werden.

INHALT

1	Einleitung	1
2	Kreislaufwirtschaft und KW-Ansätze in der Bildung	2
3	Zirkuläre Mobilitätslösungen in der Bildung	11
4	Zukunftsperspektiven für den Einsatz von KI im KW-Bereich	20
5	Ergebnisse der Befragung zu zirkulären Ansätzen in Curricula der Sekundarstufe	31
6	Ergebnisse der Befragung zu den Perspektiven, Erfahrungen und Bedürfnissen von Lehrkräften hinsichtlich der KW-Bildung an Schulen	35
7	Fazit	48

1. Einleitung

Angesichts zunehmender ökologischer Herausforderungen und sozialer Ungleichheiten erweisen sich traditionelle lineare Wirtschaftsmodelle, die durch einen „Nehmen, Herstellen, Wegwerfen“-Ansatz gekennzeichnet sind, zunehmend als nicht nachhaltig. Beispielsweise ist die geplante Obsoleszenz, bei der Produkte mit einer begrenzten Lebensdauer entwickelt werden, um Verbraucher*innen zum erneuten Kauf anzuregen, eine Strategie zur Erzielung von Gewinnen in dieser Wirtschaftsweise. Daher sind Transformationen hin zu einer Kreislaufwirtschaft entscheidend für die Bewältigung der Klimakrise und der damit verbundenen Herausforderungen.

Diese Studie zu zirkulären Praktiken für (Digitale) Bildung ist ein Ergebnis des CircEdu-Projekts (2024-1-DE03-KA220-SCH-000250897), das von der Europäischen Union kofinanziert wird. In allen an der Erstellung dieser Studie beteiligten Partnerländern (Bulgarien, Deutschland, Griechenland, Portugal, Polen und Türkei) wurde der Bedarf an umfassenden pädagogischen Praktiken und Materialien zur zirkulären Bildung festgestellt. Daher hat das CircEdu-Projektkonsortium, bestehend aus dem Kolleg für Management und Gestaltung Nachhaltiger Entwicklung (KMGNE, Deutschland), Sucessos Criativos Lda Portugal Norte (SC, Portugal), der Hochschule für Verkehrswesen „Todor Kableshkov“ (HST, Bulgarien) sowie den Schulen FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Griechenland), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Deutschland), Zespół Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polen) und Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Türkei) umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt und zwei verschiedene Umfragen erstellt, die sich an die Sekundarschulen des Projektkonsortiums und deren Lehrkräfte richteten. Mit diesen Umfragen konnte das Konsortium die tatsächliche Situation der Zielgruppen des Projekts, deren Kenntnisse und Bedürfnisse ermitteln und einen Einblick in den Stand der KW-Praktiken in der Sekundarstufe an europäischen Schulen gewinnen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es zwar zahlreiche Forschungsarbeiten zum Thema Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen gibt, jedoch sowohl in der Forschung als auch in der Praxis nur unzureichendes Material für den Sekundarschulbereich vorliegt. Ziel dieser Studie ist es daher, Wissen zu diesem Thema zusammenzutragen, das als Grundlage für die Weiterentwicklung von Lernmethoden dienen kann. Die Ergebnisse der Fragebögen werden in einem zusammenfassenden Bericht im Vergleich der vier verschiedenen Länder dargestellt.

Neben der Einleitung ist die Studie in fünf Kapitel unterteilt:

2. Kreislaufwirtschaft und KW-Ansätze in der Bildung
3. Zirkuläre Mobilitätslösungen in der Bildung
4. Zukunftsperspektiven für den Einsatz von KI im KW-Bereich
5. Ergebnisse der Befragung zu zirkulären Ansätzen in Curricula der Sekundarstufe
6. Ergebnisse der Befragung zu den Perspektiven, Erfahrungen und Bedürfnissen von Lehrkräften hinsichtlich der KW-Bildung an Schulen

2. Kreislaufwirtschaft und KW-Ansätze in der Bildung

Im folgenden Kapitel werden das Konzept der Kreislaufwirtschaft (KW) im Allgemeinen und die KW-Bildung im Besonderen vorgestellt. Mit dem Bericht des Club of Rome „Die Grenzen des Wachstums“ (1972), dem Brundtland-Bericht der Vereinten Nationen (1987) und der Weltkonferenz der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro (1992) begann sich die allgemeine Wahrnehmung der Folgen des kapitalistischen Stoffwechsels hin zu einem neuen und notwendigen Entwicklungsparadigma zu verschieben. Dieser gewünschte Kurswechsel wurde als nachhaltige Entwicklung bezeichnet und zielte darauf ab, gesellschaftliche und individuelle Praktiken so zu verändern, dass sie weniger ressourcenintensiv, zirkulärer, langlebiger, regionaler und kooperativer werden. Infolgedessen ordnet sich das Wirtschaftssystem dem endlichen Organismus Erde unter und integriert sich in ihn (vgl. Lovelock & Margulis 2007).

In Übereinstimmung mit diesem Paradigma erkennt die Kreislaufwirtschaft (KW) an, dass natürliche Ressourcen begrenzt sind, und versucht, den Lebenszyklus von Materialien zu verlängern, indem sie durch Praktiken wie Wiederverwendung, Reparatur, Wiederaufarbeitung, gemeinsame Nutzung und Recycling in Gebrauch bleiben. Zu den Kernprinzipien der KW gehören die 3Rs – Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln – sowie eine erweiterte Version, die als 6Rs bekannt ist und die Punkte Neugestaltung, Wiederaufarbeitung und Rückgewinnung hinzufügt (vgl. Jawahir & Bradley 2016). Die Kreislaufwirtschaft ist ein wirtschaftliches Rahmenkonzept, in dem die Phasen der Planung, Beschaffung, Produktion und Wiederaufbereitung bewusst so gestaltet und gesteuert werden, dass sowohl die Gesundheit des Ökosystems als auch das Wohlergehen der Menschen verbessert werden (vgl. Murray et al. 2017). Als generatives und restauratives Modell zielt die Kreislaufwirtschaft darauf ab, den Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten und dadurch die Entstehung von Endabfällen zu reduzieren (vgl. Ranta et al. 2018).

Obwohl der Schwerpunkt vor allem auf Innovationen wie der Entwicklung neuer Technologien und Geschäftsmodelle zur Aufrechterhaltung des Materialkreislaufs liegt, umfasst dies auch die Vermeidung von Abfall durch besseres Design, den Ersatz nicht erneuerbarer Materialien durch erneuerbare Alternativen und die Unterstützung der Regeneration natürlicher Ökosysteme. Das Europäische Parlament (2023) nennt folgende wesentliche Vorteile eines Übergangs zur Kreislaufwirtschaft: Begrenzung des Verlusts an biologischer Vielfalt, Verringerung der Treibhausgasemissionen, Reduzierung von Abfall, Verringerung der Abhängigkeit von Rohstoffen und Einsparungen für Verbraucher*innen durch langlebige Produkte. Darüber hinaus wird das Wirtschaftswachstum erwähnt, wobei dieser Punkt jedoch viele wissenschaftliche Erkenntnisse nicht widerspiegelt, die davon ausgehen, dass die Kreislaufwirtschaft mit einem Rückgang des Wirtschaftswachstums einhergeht (vgl. Winans et al. 2015: 825–826). In Anlehnung an post-wachstumsorientierte Ansätze bedeutet dies jedoch nicht zwangsläufig einen Rückgang des Wohlbefindens, sondern kann sogar zu einer Steigerung führen.



Abbildung 1: Das Kreislaufwirtschaftsmodell: weniger Rohstoffe, weniger Abfall, weniger Emissionen.
Quelle: European Parliament Research Service (European Parliament 2023).

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft hat keinen eindeutig identifizierbaren Ursprung oder Urheber. Allerdings haben mehrere Schlüsselpersonen seine Entwicklung geprägt, darunter der US-amerikanische Wissenschaftler John Lyle, sein Schüler William McDonough, der deutsche Chemiker Michael Braungart und der Architekt und Ökonom Walter Stahel (vgl. Winans et al. 2015: 825–826). Einfluss auf die KW-Idee hatten möglicherweise auch Rachel Carsons „Silent Spring“, der bereits erwähnte Bericht des Club of Rome aus den 1970er Jahren über die „Grenzen des Wachstums“, die von Barbara Ward und Kenneth Boulding eingeführte Analogie des „Raumschiffs Erde“ sowie die Arbeiten des Ökoökonom Herman Daly (ebd.).

Das KW-Konzept ist mit anderen Ideen verknüpft, von denen einige bereits früher existierten, wie beispielsweise die industrielle Symbiose (vgl. Winans et al. 2015: 825–826). Im Bereich der industriellen Ökologie und Systemtheorie ist die KW mit verschiedenen Disziplinen verbunden, darunter Thermodynamik und ökologische Ökonomie (ebd.). Gemäß der Systemtheorie und den Gesetzen der Thermodynamik führt die Umsetzung von CE-Strategien tendenziell zu einer Verlagerung der Wirtschaftssysteme in Richtung einer Phase des „Degrowth“ (Schrumpfung) anstatt die traditionelle wachstumsorientierte Entwicklung zu unterstützen (ebd.), was die Wirtschaftstheorien des Postwachstums und Degrowth stützt.

In einigen Ländern wie Deutschland und Portugal wird das CE-Konzept für die Abfallwirtschaft angewendet, und viele Unternehmen nutzen das Konzept, um ihre Materialflüsse zu verbessern (ebd.: 826). Die EU hat einen KW-Aktionsplan mit dem Ziel „Aufbau einer kreislaforientierten und klimaneutralen Wirtschaft bis 2050“ (Europäisches Parlament 2023) umgesetzt und dabei eine Reihe von Rechtsvorschriften zu Ökodesign, Verpackungen, Greenwashing, dem Recht auf Reparatur und Abfallwirtschaft eingeführt (siehe ebd.). Während die Zahl der Initiativen in diesem Bereich zunimmt, wird die soziale Komponente oft nicht umfassend berücksichtigt.

Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen betont, dass ökologische, soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeit eng miteinander verknüpft sind und nicht isoliert betrachtet werden können. Da die Zusammenhänge zwischen ökologischen Herausforderungen wie Klimawandel, übermäßiger Ressourcennutzung und Abfall sowie sozialen Herausforderungen wie Ungleichheit und dem Wandel der Arbeitswelt immer deutlicher werden, gewinnt die Notwendigkeit, Umweltmaßnahmen mit sozialer Gerechtigkeit in Einklang zu bringen, zunehmend an Bedeutung. Daher findet das Konzept einer "just transition" (gerechte Wende), das ökologische Nachhaltigkeit, faire Beschäftigung, soziale Inklusion und die Beseitigung von Armut miteinander verbindet, in Nachhaltigkeitsdiskussionen zunehmend Beachtung.

Ein gerechter Transformationsprozess im Rahmen der Kreislaufwirtschaft bietet eine Möglichkeit, Abfall zu reduzieren, Innovationen voranzutreiben und eine nachhaltige Entwicklung zu fördern, während gleichzeitig soziale und wirtschaftliche Ungleichheiten im Einklang mit den Zielen der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung bekämpft werden, damit niemand auf der Strecke bleibt (vgl. Schröder 2020). Angesichts der fortschreitenden Entwicklung von Strategien zur Kreislaufwirtschaft, insbesondere vor dem Hintergrund der Digitalisierung und des industriellen Wandels, ist es von entscheidender Bedeutung, deren Auswirkungen auf Arbeitsplätze und Lebensgrundlagen zu bewerten. Sozialschutzmaßnahmen müssen integriert werden, um zu verhindern, dass benachteiligte Gruppen die Hauptlast von Veränderungen wie Arbeitsplatzverlust oder sich verschlechternden Arbeitsbedingungen tragen müssen (ebd.).

Länder mit niedrigem und mittlerem Einkommen, die von linearen Wirtschaftssektoren wie Bergbau, Herstellung schnelllebiger Konsumgüter, Textilien und Landwirtschaft abhängig sind, könnten durch den Übergang zur Kreislaufwirtschaft vor Herausforderungen stehen (ebd.). Diese Länder werden gezielte internationale Unterstützung benötigen, um sich anzupassen. Eine wirksame globale Zusammenarbeit, transparente und rechenschaftspflichtige Finanzmechanismen, eine faire Regierungsführung und koordinierte Maßnahmen auf allen Regierungsebenen werden für die Bewältigung des Wandels von entscheidender Bedeutung sein (ebd.).

Darüber hinaus bietet Kate Raworths „Donut-Ökonomie“ einen zusätzlichen transformativen Rahmen, der einen sicheren und gerechten Raum für die Menschheit vorsieht. Dieses Modell schafft ein Gleichgewicht zwischen der Notwendigkeit, die Grundbedürfnisse aller Menschen zu befriedigen (die soziale Grundlage), ohne die ökologischen Grenzen des Planeten (die ökologische Obergrenze) zu überschreiten (vgl. Raworth 2017). Das Donut-Modell stellt die herkömmliche Betonung des permanenten Wirtschaftswachstums in Frage und plädiert stattdessen für regenerative und distributive Wirtschaftssysteme. Es unterstreicht die Bedeutung des Systemdenkens und erkennt die Vernetzung sozialer und ökologischer Systeme an. Die KW kann das Donut-Modell ergänzen, indem sie einen systemischen Wandel von linearen zu zirkulären Systemen vorschlägt, der soziale und wirtschaftliche Chancen und Resilienz einbezieht.

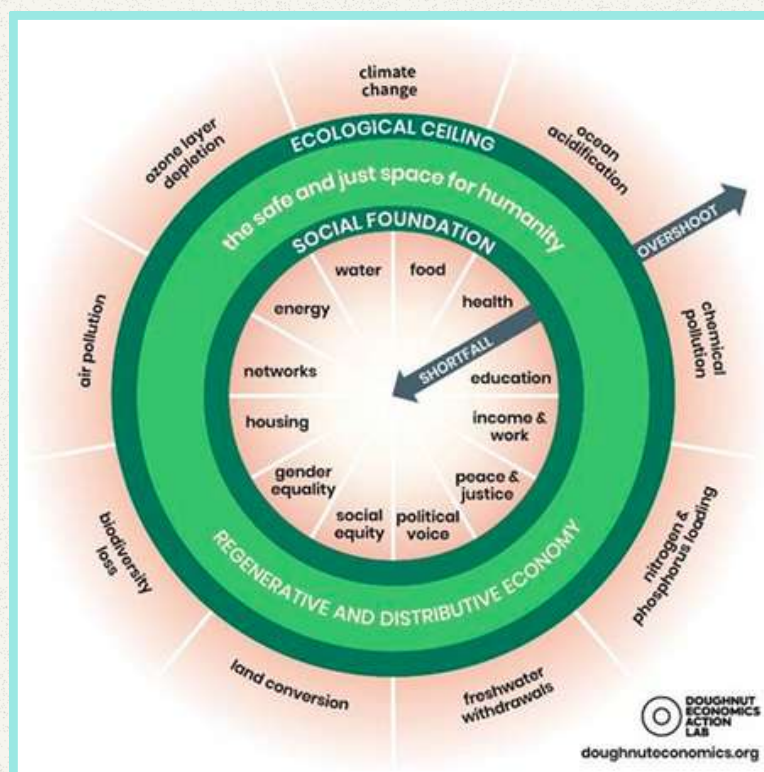


Abbildung 2: Der Donut der sozialen und planetarischen Grenzen.

Quelle: Kate Raworth und Christian Guthrie. CC-BY-SA 4.0 (Raworth 2017).

Die Umsetzung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft erfordert einen grundlegenden Wandel in der Art und Weise, wie Gesellschaften Güter produzieren und konsumieren. Dies beinhaltet ein Umdenken in Bezug auf Produktdesign, Geschäftsmodelle, Infrastrukturen, Politik und individuelles Verhalten. Die Sensibilisierung der Öffentlichkeit kann eine entscheidende Rolle bei der Erleichterung dieses Übergangs spielen, indem sie den Menschen das Wissen und die Fähigkeiten vermittelt, sich an Kreislaufpraktiken zu beteiligen und institutionelle und systemische Veränderungen voranzutreiben. Daher ist Bildung ein entscheidender Faktor für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft. Über die Sensibilisierung hinaus fördert sie Fähigkeiten und prägt Werte, die mit nachhaltigen Praktiken im Einklang stehen. Die Integration von KW-Konzepten in die Bildungssysteme bereitet die Schüler darauf vor, sich in der sich entwickelnden sozioökologischen Transformation zurechtzufinden und sie zu beeinflussen.

Konzepte wie Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) sind bereits fest etabliert, werden jedoch auf vielfältige Weise interpretiert. So bieten Interpretationen von BNE eine Vielzahl von Definitionen für Kreislaufwirtschaft, von denen sich einige hauptsächlich mit Recycling befassen, während andere, wie in dieser Studie, umfassendere ganzheitliche Ansätze einschließlich sozialer Faktoren und kultureller Veränderungen bieten (siehe Kirchherr & Piscicelli 2019). Im Gegensatz dazu ist die Forschung zu spezifischer Bildung für die Kreislaufwirtschaft noch begrenzt. Kirchherr & Piscicelli (2019) bieten einen Ansatz auf der Grundlage der BNE-Literatur und identifizieren fünf geeignete Kernprinzipien für den Unterricht in ECE (Education for Circular Economy/Bildung für Kreislaufwirtschaft): „Interaktivität, Nicht-Dogmatismus und Gegenseitigkeit sowie konstruktive Ausrichtung und problemorientiertes Lernen“.

Ein weiterer wichtiger Referenzrahmen in diesem Zusammenhang ist GreenComp – der europäische Kompetenzrahmen für Nachhaltigkeit, der vom Joint Research Centre (JRC), dem Wissenschafts- und Wissensdienst der Europäischen Kommission, entwickelt wurde (vgl. Bianchi et al. 2022: 2). Er zielt darauf ab, Einstellungen, Fähigkeiten und Kenntnisse im Bereich Nachhaltigkeit zu fördern, und schlägt 12 Kompetenzen in vier Schlüsselbereichen vor:

1. „Verinnerlichung von Nachhaltigkeitswerten, einschließlich der Kompetenzen: Wertschätzung von Nachhaltigkeit, Förderung von Fairness und Erhaltung der Natur,
2. Anerkennung der Komplexität von Nachhaltigkeit, einschließlich der Kompetenzen: Systemdenken, kritisches Denken und Problemdefinition,

3. Visionen für eine nachhaltige Zukunft entwerfen, einschließlich der Kompetenzen: Zukunftskompetenz, Anpassungsfähigkeit und exploratives Denken,
4. Handeln für Nachhaltigkeit, einschließlich der Kompetenzen: politisches Handeln, kollektives Handeln und individuelle Initiative” (ebd.).

Einige Länder haben KW-Bildung bereits in ihre Praktiken und Richtlinien integriert. In Finnland beispielsweise ist KW-Bildung auf allen Ebenen verankert, von der Grundschule bis zur Berufsausbildung. Programme wie Yrityskylä bieten Erfahrungslernmöglichkeiten, bei denen die Schüler*innen an simulierten wirtschaftlichen Aktivitäten teilnehmen, die KW-Prinzipien beinhalten (vgl. Circular Design Suomi 2023 und Tiippana et al. 2023). Tiippana et al. (2023) schlagen vor, das finnische Modell an verschiedene Bildungssysteme anzupassen.

Die Sekundarstufe ist ein entscheidender Zeitpunkt für die Vermittlung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft. In dieser Phase entwickeln die Schüler*innen die kognitiven Fähigkeiten, komplexe Systeme zu verstehen, und die Handlungsfähigkeit, Veränderungen zu bewirken. Die Integration der Kreislaufwirtschaft nicht nur in Fächer wie Naturwissenschaften, Technik, Ingenieurwesen und Mathematik (STEM), sondern auch in Fächer wie Geisteswissenschaften, Sprachen, Kunst und Sozialwissenschaften vermittelt ein ganzheitliches Verständnis von Nachhaltigkeit. Die Schüler*innen können befähigt werden, eigene Projekte zu entwickeln, die auch Kreislaufpraktiken umfassen.

Über praktische Anwendungen hinaus lädt die KW-Bildung zu einem philosophischen Wandel in der Art und Weise ein, wie wir unsere Beziehung zur Umwelt wahrnehmen, um durch die Erzählungen, die wir über die Welt erzählen, einen kulturellen Wandel zu fördern. Sie regt dazu an, von linearen, anthropozentrischen Weltanschauungen zu zirkulären, ökozentrischen Perspektiven überzugehen, die die gegenseitige Abhängigkeit aller Lebensformen anerkennen. Dies steht im Einklang mit vielen indigenen Philosophien, die die Beziehungen zu mehr-als-menschlichen und ökologischen Lebenszyklen betonen. So kann ein Diskurs über alternative Konzepte der spiralförmigen Zeit eröffnet werden, die die Menschheitsgeschichte mit der Natur verbinden und die menschlichen Generationen, einschließlich der Vorfahren und Nachkommen sowie die Einheit von Leben und Tod angemessener miteinander verknüpfen (vgl. Fritsch 2024). Die Einbeziehung dieser Perspektiven in die Bildung fördert ein tieferes Engagement für Nachhaltigkeit. Es fordert die Schüler*innen heraus, nicht nur die technischen Aspekte der KW zu berücksichtigen, sondern auch die moralischen Imperative der artenübergreifenden Verwandtschaft (vgl. Haraway 2016) und der sozialen Gerechtigkeit.

Darüber hinaus bereichert die Integration von traditionellem Wissen und Praktiken in die KW-Ausbildung das Lernen, indem sie die Schüler*innen mit der lokalen Geschichte und nachhaltigen Praktiken aus der Region in Verbindung bringt. Beispielsweise kann die Erforschung traditioneller Bautechniken, bei denen lokale, erneuerbare Materialien zum Einsatz kommen, Einblicke in nachhaltiges zirkuläres Design bieten. Auf diese Weise können hilfreiche Strategien, die im Laufe der Zeit verschwunden sind, wiederbelebt und an die moderne Zeit angepasst oder mit neuen Ideen kombiniert werden (vgl. Watson 2019). Dieser Ansatz bewahrt nicht nur das kulturelle Erbe und stärkt die Verbindung der Schüler*innen zu ihrer Um- und Mitwelt, sondern zeigt auch die Relevanz traditioneller Praktiken für die Bewältigung moderner Nachhaltigkeitsherausforderungen.

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erfordert eine umfassende Bildungsstrategie, die kognitive, praktische und ethische Dimensionen umfasst. Durch die Verankerung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in der Sekundarstufe statten wir Schüler*innen mit den Werkzeugen aus, um sich kritisch mit einer nachhaltigen Zukunft auseinanderzusetzen und diese mitzugestalten. Diese Bildungstransformation ist unerlässlich für die Entwicklung einer Gesellschaft, die soziale und ökologische Nachhaltigkeit schätzt, und legt den Grundstein für eine resiliente und gerechte Gesellschaft, die innerhalb der ökologischen Grenzen unseres Planeten gedeiht.

Quellen

Bianchi, G., Pisiotis, U., Cabrera Giraldez, M. (2022). GreenComp – The European sustainability competence framework. Bacigalupo, M., Punie, Y. (ed.), EUR 30955 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Circular Design Suomi (2023). Circular Design – a path towards circular economy, training programme. <https://circulardesignsuomi.fi/en/frontpage/>

European Parliament (2023). Circular economy: definition, importance and benefits. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

Fritsch, M. (2024). Indigenous Accounts of Spiraling Time. Yearbook for Eastern and Western Philosophy, 7(1), 60-86.

Haraway, D. J. (2016). Staying with the trouble: Making kin in the Chthulucene. Duke University Press.

Jawahir, I. S., & Bradley, R. (2016). Technological elements of circular economy and the principles of 6R-based closed-loop material flow in sustainable manufacturing. Procedia Cirp, 40, 103-108.

Kirchherr, J., & Piscicelli, L. (2019). Towards an education for the circular economy (ECE): five teaching principles and a case study. Resources, Conservation and Recycling, 150, 104406.

Lovelock, J., & Margulis, L. (2007). The gaia hypothesis. New York.

Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. Journal of business ethics, 140, 369-380.

Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. (2018). Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. Resources, Conservation and Recycling, 135, 70-82.

Raworth, K. (2017): Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist. London: Penguin Random House.

Schröder, P. (2020). Promoting a just transition to an inclusive circular economy (pp. p-33). London: Royal Institute of International Affairs.

Tiippana-Usvasalo, M., Pajunen, N., & Holuszko, M. (2023). The role of education in promoting circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 92–103.

Watson, J. (2019). *Lo-TEK: Design by radical indigenism*. Taschen.

Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833.

3. Zirkuläre Mobilitätslösungen in der Bildung

Im Zuge des weltweiten Übergangs zu nachhaltigeren Systemen hat sich das Konzept der zirkulären Mobilität zu einer wichtigen Säule der Kreislaufwirtschaft entwickelt. Angesichts der weltweit wachsenden "circularity gap", das heißt der Kluft zwischen dem tatsächlichen Stand der Kreislaufwirtschaft und dem angestrebten Ziel (Rakowski et al. 2025) ist es unerlässlich, diesen Ansatz in die Sekundarschulbildung zu integrieren, um die Schüler*innen auf eine Zukunft vorzubereiten, in der Nachhaltigkeit, Innovation und verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen im Vordergrund stehen.

Zirkuläre Mobilität umfasst verschiedene nachhaltige Verkehrsstrategien wie Elektrofahrzeuge, gemeinsame Mobilitätsdienste, die Integration erneuerbarer Energien und intelligente Stadtplanung. Die Einbindung dieser Konzepte in den Lehrplan fördert das Verständnis der Schüler*innen für die Zusammenhänge zwischen Technologie, Umwelt und Gesellschaft. Sie befähigt sie, kritisch darüber nachzudenken, wie Verkehrssysteme sich von linearen Konsummodellen zu zirkulären Modellen der Ressourcenoptimierung entwickeln können.

Projektbasiertes Lernen kann reale Herausforderungen simulieren, denen Mobilitätsmanager*innen gegenüberstehen – das Gleichgewicht zwischen Effizienz, Infrastruktur und Umweltzielen –, sodass die Schüler*innen strategische, technische und logistische Lösungen erforschen können. Durch interdisziplinäre Projekte können sie untersuchen, wie Städte Emissionen reduzieren, wie Materialien in der Fahrzeugherstellung wiederverwendet werden und wie erneuerbare Energien zukünftige Verkehrssysteme antreiben können.

Dieses Kapitel bietet einen umfassenden Leitfaden zu Circular Mobility Solutions und untersucht deren Umsetzung, Vorteile, Herausforderungen und Zukunftsaussichten anhand von Expert*innenmeinungen, Fallstudien aus der Praxis und praktischen Strategien (Green.org. 2024).

Schlüsselthemen für die Integration im Unterricht

1. Nachhaltiger Verkehr

Der Übergang zu nachhaltigem Verkehr umfasst Elektrofahrzeuge, Bike-Sharing-Programme und emissionsarme öffentliche Verkehrsmittel. Diese Initiativen verringern die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und verbessern die Luftqualität (Europäische Kommission 2025a).

2. Ressourceneffizienz in der Mobilität

Die Automobilindustrie setzt zunehmend recycelte Materialien ein und führt geschlossene Produktionskreisläufe ein, um Abfall zu minimieren und die Ressourcennutzung zu optimieren (Green.org 2024).

3. Stadtplanung und grüne Infrastruktur

Die Einbindung von Technologien in die Stadtplanung, wie intelligente Verkehrssysteme und nachhaltige städtische Mobilitätspläne, verbessert die Mobilität und senkt die Emissionen (Hartley et al. 2023).

4. Integration erneuerbarer Energien

Der Einsatz von Solar- und Wasserstofftechnologien im Verkehrssektor senkt die CO₂-Emissionen und fördert die Energieeffizienz. Der Ausbau von Ladesäulennetzen für Elektrofahrzeuge, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, ist dabei von entscheidender Bedeutung (Barman et al. 2023).

5. Abfallreduzierung in der Mobilität

Automobilhersteller verfolgen Strategien zum Recycling und zur Wiederverwendung von Materialien wie Aluminium, Kunststoffen und Batterien. Kreislaufwirtschaftliche Lieferketten und umweltfreundliche Fertigungsverfahren reduzieren Abfall (Lean Manufacturing Junction 2022).

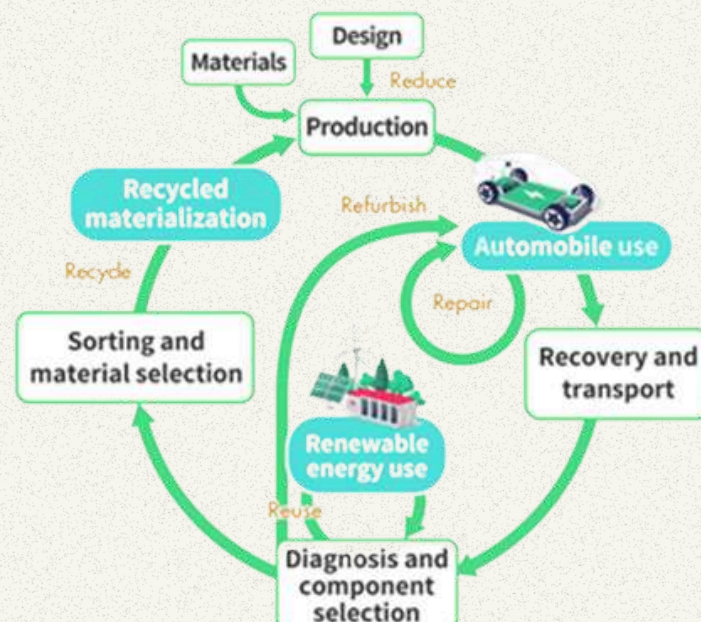


Abbildung 3: Implementierung der KW-Grundsätze in der Automobilproduktion.

Quelle: https://www.tytlabs.co.jp/en/assets/images/technology/project/project2_image_01.png

6. Politik & Richtlinien

Regierungen und globale Organisationen setzen Strategien zur Förderung nachhaltiger Mobilität um. Die Strategie der EU zielt darauf ab, die Emissionen im Verkehrsbereich bis 2050 um 90 % zu reduzieren (Europäische Kommission 2025b).

7. Bildung & öffentliches Bewusstsein

Die Integration von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in Lehrpläne und Gemeinschaftsprogramme fördert Nachhaltigkeit. Workshops und digitale Tools fördern nachhaltiges Verhalten und vermitteln Schüler*innen, wie sie das Bewusstsein der Gemeinschaft für zirkuläre Mobilität steigern können (Weltwirtschaftsforum 2022).

8. Technologie & Innovation

KI-basiertes Verkehrsmanagement, intelligente Logistik und Automatisierung verbessern die Transporteffizienz und verringern die Umweltbelastung.

9. Kollaborative Modelle

Partnerschaften zwischen Industrie und Gemeinden fördern nachhaltige Mobilität. Programme wie URBACT sind Beispiele für eine effektive lokale Zusammenarbeit (Europäische Kommission 2025b).

10. Wirtschaftliche und soziale Auswirkungen

Kreislaufwirtschaftliche Mobilität unterstützt die Schaffung von Arbeitsplätzen, die wirtschaftliche Entwicklung und die städtische Nachhaltigkeit, indem sie Emissionen reduziert und Innovationen fördert (World Economic Forum 2022).

11. Implementierung

Die Kreislaufwirtschaft erfordert einen grundlegenden Wandel im Transport- und Logistikbereich und verlangt neue Infrastrukturen, Prozesse und Technologien, um Nachhaltigkeit und Effizienz zu gewährleisten. Eine wichtige Strategie besteht darin, Nachhaltigkeit in allen Betriebsabläufen zu priorisieren, umweltfreundliche Praktiken in die Fahrzeugauswahl, die Wahl der Kraftstoffe, die Lagergestaltung und die Abfallwirtschaft zu integrieren und Praktiken wie Reverse Logistics (RL) und Remanufacturing (Ji-Hyland et al. 2025) umzusetzen. Darüber hinaus spielt die Digitalisierung eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung einer kreislaforientierten Logistik. Technologien wie IoT und Blockchain verbessern die Verfolgung des Produktlebenszyklus, die Ressourcenoptimierung und die Zusammenarbeit in der Lieferkette. Fortschrittliche KI und maschinelles Lernen verbessern die Routenoptimierung weiter, reduzieren Leerfahrten und minimieren den Kraftstoffverbrauch (Schumann et al. 2022).



Abbildung 4: Die 9 Rs der Kreislaufwirtschaft für eine bessere Umweltbilanz der Mobilität.

Quelle: VCÖ 2022 <https://vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/implementing-the-circular-economy-in-mobility>

Investitionen in den intermodalen Verkehr sind ein weiterer wichtiger Schritt. Die Förderung der Nutzung von Schiene, Wasser und anderen nachhaltigen Verkehrsträgern reduziert Emissionen und verbessert gleichzeitig die Infrastruktur für Sammlung, Sortierung und Verarbeitung. Die erfolgreiche Umsetzung der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft erfordert die Zusammenarbeit aller Beteiligten, darunter Logistikdienstleister, Hersteller, politische Entscheidungsträger und Partner, um den Datenaustausch und eine offene Kommunikation für eine effiziente Ressourcennutzung sicherzustellen (Crispin & Parthasarathy 2025).

Die letzte Meile der Lieferung stellt besondere Herausforderungen dar und erfordert Mikromobilitätslösungen, Drohnenlieferungen und lokale Abholstellen, um die Effizienz zu steigern. Darüber hinaus ist die Förderung einer Kultur der Nachhaltigkeit innerhalb der Branche von entscheidender Bedeutung, einschließlich der Schulung von Mitarbeitenden, Trainingsprogrammen und ehrgeizigen Nachhaltigkeitszielen (Crispin & Parthasarathy 2025).

Durch die Förderung von Innovation, Zusammenarbeit und Nachhaltigkeit können Logistikdienstleister eine resilientere und umweltfreundlichere Zukunft gestalten. Diese Transformation erfordert erhebliche Investitionen in Technologie, Infrastruktur und Personal, aber die langfristigen Vorteile machen sie zu einem unverzichtbaren Unterfangen.

Die erfolgreiche Einführung von Circular Mobility Solutions erfordert einen strategischen Ansatz, sorgfältige Planung und die Zusammenarbeit zwischen den wichtigsten Interessengruppen. Unternehmen müssen nachhaltige Praktiken umsetzen und dabei häufige Fallstricke vermeiden, um die Effizienz und die langfristige Wirkung zu maximieren.

Strategien für den Erfolg

Technologie und Innovation nutzen: IoT, KI und Datenanalyse einsetzen, um das Ressourcenmanagement zu optimieren, die vorausschauende Wartung zu verbessern und gemeinsame Mobilitätsdienste zu optimieren. Diese Technologien ermöglichen intelligentere und effizientere zirkuläre Abläufe.

Mit verschiedenen Partnern zusammenarbeiten: Alle Beteiligten entlang der Wertschöpfungskette mit einbeziehen, darunter Lieferant*innen, politische Entscheidungsträger*innen und Verbraucher*innen. Die sektorübergreifende Zusammenarbeit fördert innovative Lösungen und gewährleistet die Ausrichtung auf Nachhaltigkeitsziele.

Kontinuierliche Bewertung und Anpassung: Regelmäßig die wichtigsten Leistungsindikatoren (KPIs) bewerten und bei Bedarf Anpassungen vornehmen. Kreislaufwirtschaftliche Mobilität erfordert kontinuierliche Verbesserungen, um den Branchentrends voraus zu sein und die betriebliche Effizienz aufrechtzuerhalten.

Häufige Fallstricke vermeiden

Vernachlässigung der Einbindung von Stakeholdern: Eine mangelnde Einbindung wichtiger Partner*innen kann die Umsetzung verlangsamen und Widerstand gegen Veränderungen hervorrufen. Deshalb ist es zentral für Transparenz und Zusammenarbeit bei Kreislaufinitiativen zu sorgen.

Fokus ausschließlich auf kurzfristige Gewinne: Kosteneinsparungen sind zwar vorteilhaft, aber die Priorisierung langfristiger Nachhaltigkeit gewährleistet dauerhaften Geschäftserfolg. Kurzfristiges Denken untergräbt die Bemühungen um zirkuläre Mobilität und schränkt die Vorteile für die Umwelt ein.

Ignorieren von regulatorischen Änderungen: Über neue Richtlinien und Compliance-Anforderungen im Zusammenhang mit Transport und Nachhaltigkeit auf dem Laufenden bleiben. Die Nichtanpassung an Vorschriften kann zu operativen Risiken und Reputationsschäden führen.

12. Zukünftige Trends

Zirkuläre Mobilitätslösungen zielen darauf ab, den Verkehr nachhaltiger zu gestalten, indem Ressourcen wiederverwendet, recycelt und optimiert werden, anstatt dem traditionellen Modell „nehmen-herstellen-entsorgen“ zu folgen. Dieser Ansatz verlängert die Lebensdauer von Fahrzeugen, Infrastruktur und Transportmaterialien durch verschiedene Strategien.

Optimierte Fahrzeuglebenszyklen durch Wiederaufarbeitung und Überholung spielen eine wichtige Rolle bei der Abfallreduzierung und Effizienzmaximierung. Recycelte Infrastrukturmaterialien für Straßen und Verkehrsknotenpunkte tragen zur Minimierung der Umweltbelastung bei. Erneuerbare Energiequellen für den öffentlichen Verkehr und die Logistik unterstützen die Klimaneutralitätsziele. Intelligente Logistik hilft durch effiziente Verpackungen und umgekehrte Lieferketten, Abfall zu reduzieren. Gemeinsame Mobilitätslösungen wie Carsharing und Bikesharing minimieren den individuellen Fahrzeugbesitz und verringern die Verkehrsüberlastung in Städten. KI- und IoT-Technologien verbessern die Routenoptimierung und vorausschauende Wartung und machen Verkehrssysteme effizienter. Kreislaufwirtschaftliche Lieferketten reduzieren Abfall durch geschlossene Systeme weiter und gewährleisten eine maximale Wiederverwendung von Ressourcen. Staatliche Maßnahmen setzen umweltfreundliche Verkehrsregeln durch und fördern die breitere Einführung von Kreislaufwirtschaftspraktiken im Verkehrsbereich.

Praktische Umsetzung in Schulen

Pädagog*innen können Aktivitäten entwickeln, die die Umsetzung von Kreislaufmobilitätssystemen nachahmen. Dazu gehören die Routenplanung mit Berechnung des CO₂-Fußabdrucks, die Konzeption solarbetriebener Ladestationen für Elektrofahrzeugmodelle oder die Simulation von Drohnenlieferwegen für die letzte Meile. Durch STEM-integrierte Projekte erkunden die Schüler*innen, wie intelligente Logistik, umgekehrte Lieferketten und digitale Nachverfolgung die Umweltbelastung reduzieren.

Schüler*innen auf eine zirkuläre Zukunft vorbereiten

Die zirkuläre Mobilität steht für einen Wandel in der Art und Weise, wie die Gesellschaft mit Transport umgeht – weg vom Besitz hin zum Zugang, weg von Abfall hin zur Wiederverwendung und weg von der Abhängigkeit von Kohlenstoff hin zu erneuerbaren Lösungen. Die Einbettung dieser Themen in die Sekundarschulbildung fördert systemisches Denken, ökologische Kompetenz und unternehmerisches Problemlösen.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Bildung spielt eine wichtige Rolle bei der Verbreitung nachhaltiger Praktiken. Die Entwicklung von Lehrplänen, praktische Projekte, kommunale Partnerschaften und Öffentlichkeitsarbeitskampagnen stellen sicher, dass die Sekundarschulbildung die Kreislaufmobilität fördert. Dieser Bildungswandel unterstützt nicht nur die globalen Klimaziele, sondern befähigt die Jugend auch, sich eine kreislaforientierte, gerechte Zukunft vorzustellen und zu gestalten. Die Kreislaufwirtschaft konzentriert sich auf die Reduktion von Abfall und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und Materialien durch Wiederverwendung, Reparatur und Recycling. Im Gegensatz zum traditionellen linearen Modell von Produktion und Entsorgung liegt der Schwerpunkt der Kreislaufwirtschaft darauf, Materialien so lange wie möglich in Gebrauch zu halten und so den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung zu minimieren.

Einer der wichtigsten Bereiche, in denen die Kreislaufwirtschaft an Bedeutung gewinnt, ist das Transport- und Logistikwesen, da diese Branchen mit erheblichen Herausforderungen im Bereich der Nachhaltigkeit konfrontiert sind. Dazu gehören ein hoher Verbrauch an fossilen Brennstoffen, Abfälle aus Verpackungen und Geräten sowie die zunehmende Zahl von Produktrücksendungen im E-Commerce, die zu Emissionen, überflüssigen Verpackungen und Deponieabfällen beitragen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, kann der Transportsektor Kreislaufstrategien anwenden, wie z. B. die Optimierung von Lieferwegen zur Verringerung der Leerkilometer und des Kraftstoffverbrauchs, die Integration erneuerbarer Energien in Fahrzeuge und Betrieb sowie die Förderung wiederverwendbarer und recycelbarer Verpackungen. Darüber hinaus können effiziente Rücknahme- und Wiederverwendungssysteme dazu beitragen, die Abfallmenge zu minimieren und gleichzeitig wirtschaftliche Möglichkeiten zu schaffen. Unternehmen können Reparatur- und Aufarbeitungsdienste sowie Recyclinginitiativen für Transportmittel anbieten.

Eine große Hürde bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaft liegt im Management der Reverse (Rückwärts) Logistik. Eine wirksame Integration erfordert eine sorgfältige Planung, effiziente Sammelsysteme, Sortieranlagen und Wiederaufbereitungszentren. Darüber hinaus erfordert die Handhabung der wachsenden Vielfalt an Materialien Flexibilität, fortschrittliche Technologie und robuste Datenverwaltungssysteme. Durch die Einführung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft können Transport und Logistik eine nachhaltigere und ressourceneffizientere Zukunft anstreben, die ein Gleichgewicht zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und ökologischer Verantwortung schafft. Durch den Einsatz von Technologien, die Förderung der Zusammenarbeit und die Verpflichtung zur kontinuierlichen Verbesserung können Unternehmen Circular Mobility Solutions effektiv umsetzen und gleichzeitig die üblichen Fallstricke vermeiden. Ein proaktiver Ansatz gewährleistet Nachhaltigkeit, Effizienz und langfristigen Erfolg in einer sich wandelnden Transportlandschaft.

Quellen

Barman, P., Dutta, L., Bordoloi, S., Kalita, A., Buragohain, P., Bharali, S., & Azzopardi, B. (2023). Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123003751>

Crispin, A. & Parthasarathy, P. (2025). Geochemical characteristics and paleo weathering in sediments of Noyyal River Basin, Tamilnadu–India. *Environmental Research & Technology*, 8 (1), 163–171 (Scopus Index).

European Commission (2025a). Sustainable transport. Retrieved from https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/sustainable-transport_en

European Commission (2025b). Sustainable urban mobility planning and monitoring. https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport/sustainable-urban-mobility-planning-and-monitoring_en

Green.org (2024). The circular economy in automotive: Closing the sustainability loop. <https://green.org/2024/01/30/the-circular-economy-in-automotive-closing-the-sustainability-loop/>

Hartley, K., Schülzchen, S., Bakker, C. A., & Kirchherr, J. (2023). A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. *Journal of Cleaner Production*, 412, Article 137176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176>

Ji-Hyland, C., White, D., & Khaydarov, R. (2025). The impact of circular economy practices on sustainable logistics performance. *International Journal of Logistics: Research and Applications*. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13675567.2025.2465579>

Lean Manufacturing Junction (2022). The best ways to reduce waste in automotive manufacturing. [Hartley, K., Schülzchen, S., Bakker, C. A., & Kirchherr, J. \(2023\). A policy framework for the circular economy: Lessons from the EU. Journal of Cleaner Production, 412, Article 137176. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137176)

Rakowski, D., Ewalts, D. & Dall' Acqua, C. (2025). The Global Circularity Gap Report. <https://www.deloitte.com/global/en/issues/climate/global-circularity-gap.html>

Schumann, C., Riedel, R., Franke, S., Nitsche, A., & Runte, C. (2022). Artificial intelligence support for smart logistics systems in industrial environments. SAE Technical Paper, 2022-01-0347. <https://doi.org/10.4271/2022-01-0347>

World Economic Forum (2022). Circular economy key to accelerating net-zero transportation. <https://www.weforum.org/stories/2022/05/circular-economy-net-zero-transportation/>

4. Zukunftsperspektiven für den Einsatz von KI im KW-Bereich

Da Lehrkräfte versuchen, die nächste Generation mit dem Wissen und den Werkzeugen auszustatten, um die sozial-ökologische Transformation anzuführen, wird die Integration digitaler Technologien in die Bildung zur Kreislaufwirtschaft immer wichtiger. Unter diesen Technologien sticht die Künstliche Intelligenz (KI) durch ihre leistungsstarke Fähigkeit hervor, Komplexität zu modellieren, Entscheidungsprozesse zu optimieren und Nachhaltigkeitsprozesse zu automatisieren. Darüber hinaus bietet das maschinelle Lernen (ML) eine wachsende Anzahl von Rechentechniken, die in der Lage sind, die Komplexität und Dynamik von Kreislaufwirtschaftssystemen zu bewältigen, was ein Schlüsselthema in der Sekundarschulbildung sein sollte. In den letzten Jahren haben Forscher*innen und Praktiker*innen verschiedene Arten des maschinellen Lernens angewandt, um Ressourcenströme zu optimieren, die Materialrückgewinnung zu verbessern, Umweltergebnisse vorherzusagen und eine intelligentere Entscheidungsfindung in verschiedenen Sektoren zu ermöglichen. Die in der beiliegenden Tabelle zusammengefassten Studien spiegeln verschiedene Anwendungen des ML wider, die mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in Einklang stehen, darunter Wiederverwendung, Regeneration, reduzierte Emissionen und geschlossene Kreisläufe.

Überwachtes Lernen (Supervised Learning) ist nach wie vor eines der am häufigsten angewandten ML-Paradigmen in der KW-Forschung. Bei diesem Ansatz werden Modelle auf Datensätzen trainiert, die sowohl Eingabevariablen als auch bekannte Ergebnisse enthalten, so dass der Algorithmus prädiktive Beziehungen lernen kann. Einmal trainiert, kann das Modell unbekannte Ergebnisse für neue Daten schätzen. In Kreislaufsystemen wird das überwachte Lernen eingesetzt, um die Ausbeute oder Qualität von recycelten Materialien vorherzusagen, die Verfügbarkeit von Ressourcen zu prognostizieren oder die Leistung von Zulieferern anhand von Nachhaltigkeitskriterien zu bewerten. Zu den gängigen Algorithmen des überwachten Lernens gehören künstliche neuronale Netze (ANN), die besonders effektiv komplexe Muster in Umwelt- oder Agrardaten erkennen können, Support Vector Regression (SVR), die für präzise numerische Vorhersagen verwendet wird, und Random Forest, eine robuste Ensemble-Methode, die mit multivariablen Entscheidungsumgebungen wie dem PET-Kunststoffrecycling umgehen kann.

Unüberwachtes Lernen (Unsupervised Learning) zeichnet sich dadurch aus, dass es mit Daten ohne markierte Ergebnisse arbeitet. Es wird häufig verwendet, um zugrundeliegende Muster, Cluster oder Anomalien in komplexen Datensätzen zu untersuchen.

Im Kontext von KW unterstützt unüberwachtes Lernen Funktionen wie das Erkennen von Trends im Verbraucher*innenverhalten in Bezug auf nachhaltige Produkte, das Clustern von Abfallströmen nach Zusammensetzung oder das Erkennen von Unregelmäßigkeiten in Recycling-Netzwerken. Clustering-Techniken und Themenmodellierung sind besonders wertvoll bei der Analyse von unstrukturierten Datenquellen, einschließlich sozialer Medien, Abfallprotokollen oder Sensorfeedback von Infrastruktursystemen.

Verstärkendes Lernen (Reinforcement Learning) sorgt für Anpassungsfähigkeit durch Rückkopplungsschleifen. In diesem Modell lernt ein Agent durch iterative Interaktionen mit einem System optimale Strategien und erhält je nach Ergebnis Belohnungen oder Bestrafungen. Dieser Trial-and-Error-Mechanismus (Versuch und Irrtum) macht das Reinforcement Learning besonders geeignet für dynamische betriebliche Zusammenhänge wie Logistik, Flottenmanagement oder adaptive Planung in biokreislaufforientierten Lieferketten. Studien, die diese Technik anwenden, konzentrieren sich häufig auf die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs, die Reduzierung von Emissionen und die Verbesserung der Serviceeffizienz - Ziele, die eng mit dem Schwerpunkt der KW auf Ressourcenschonung und Systemresilienz verbunden sind.

Deep-Learning-Techniken, darunter Faltungsneuronale Netze (CNN), gewinnen in Anwendungen zur Bilderkennung, Klassifizierung und sensorischen Analyse zunehmend an Bedeutung. Sie sind besonders effektiv bei der Automatisierung der Abfallsortierung, der Erkennung von Verunreinigungen in Wertstoffen oder der Bewertung der Qualität von aufgearbeiteten Waren. Deep Learning ermöglicht eine schnelle, skalierbare Automatisierung von Materialklassifizierungsprozessen, was für die Erhöhung der Verwertungsquoten und die Verringerung arbeitsintensiver Vorgänge in der KW-Infrastruktur unerlässlich ist.

Schließlich ist erklärbare KI (Explainable AI, XAI) zu einer entscheidenden Innovation geworden, wo Modell-Transparenz und Verantwortlichkeit erforderlich sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen „Black-Box“-Modellen bietet XAI Einblicke in die Faktoren, die Vorhersagen beeinflussen, und unterstützt so die Entscheidungsfindung in der Umweltpolitik, bei der Planung von Emissionsreduzierungen oder in der nachhaltigen Stadtentwicklung. Modelle wie XGBoost können in Kombination mit SHAP-Werten (SHapley Additive exPlanations) die einflussreichsten Variablen aufdecken, die die Nachhaltigkeitsergebnisse beeinflussen, und so fundiertere und besser begründete Eingriffe in die KW-Governance ermöglichen. Zusammen bilden diese ML-Ansätze ein komplementäres Instrumentarium zur Operationalisierung der Kreislaufwirtschaft. Ihre Anwendung reicht von der Vorhersage und Optimierung bis hin zur Automatisierung und Einhaltung von Vorschriften - sie alle unterstützen die systemische Neugestaltung von Produktions-, Verbrauchs- und Verwertungssystemen, die für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erforderlich sind.

Ansätze des maschinellen Lernens in Kontexten der Kreislaufwirtschaft

KI wird zunehmend als strategischer Wegbereiter für die Förderung der Kreislaufwirtschaft anerkannt. KI dient nicht mehr nur als Hintergrundtechnologie, sondern prägt zunehmend die Gestaltung, Steuerung und Optimierung von Kreislaufsystemen in verschiedenen Sektoren. Von der Landwirtschaft bis zur Stadtplanung, von der Materialrückgewinnung bis zum Produktlebenszyklusmanagement erleichtert KI den Übergang von linearen „Nehmen-Herstellen-Entsorgen“-Modellen zu regenerativen, kreisförmigen Systemen, die Abfälle reduzieren und die Ressourceneffizienz maximieren.

Eine der zentralsten Anwendungen von KI in der KW liegt in der prädiktiven Modellierung zur Ressourcenoptimierung. Pitakaso et al. (2025) wendeten im Bereich der biologisch-zirkulären Landwirtschaft Reinforcement Learning und künstliche multiple Intelligenz an, um das Routing und die Planung der Logistik der Zuckerrohrflotte zu optimieren. Dieses System minimierte erfolgreich den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen und trug so zu zirkulären landwirtschaftlichen Praktiken bei, die den Kreislauf der Biomassenutzung schließen (Pitakaso et al. 2025). In ähnlicher Weise nutzten Kravchenko et al. (2025) die Support-Vector-Regression zur Vorhersage der chemischen Eigenschaften von Biokohle aus Lebensmittelabfällen. Ihre Arbeit unterstützt die Feinplanung von Abfall-Energie-Systemen und stellt sicher, dass die Biokohleproduktion mit den KW-Zielen übereinstimmt, indem sie die Wiederverwendung maximiert und den Reststoffausstoß reduziert (Kravchenko et al. 2025).

Ein weiterer wichtiger Bereich, in dem KI die Praktiken der KW umgestaltet, ist die Abfallsortierung und die Rückgewinnung von Kreislaufmaterial. Fortschritte in der Computer Vision, insbesondere durch Deep Learning, verändern die Effizienz von Recyclingsystemen. Faghih et al. (2024) zeigten, wie Faltungsneuronale Netze (CNNs) Post-Consumer-Textilien mit hoher Genauigkeit nach Stoffart klassifizieren können. Dadurch wird die Reinheit der zurückgewonnenen Materialien verbessert und die effektive Wiederverwendung in der Textilindustrie unterstützt (Faghih et al. 2024). Im Bereich des Kunststoffrecyclings entwickelten Abedsoltan et al. (2025) ein hybrides Modell, das Random Forest und ANN zur Simulation von PET-Hydrolyseprozessen verwendet und Recyclern hilft, sowohl die Ausbeute als auch die Reinheit von recyceltem Kunststoff in geschlossenen Kreislaufsystemen zu verbessern (Abedsoltan et al. 2025).

KI spielt auch eine zentrale Rolle bei städtischen Kreislaufsystemen. In intelligenten Städten ermöglicht KI eine nachhaltigere Infrastruktur durch dynamisches Management von Ressourcen wie Wasser und Abfall. Ojadi et al. (2024) setzten KI-basierte Zeitreihenprognosen ein, um die Wassernutzung und die Bewirtschaftung fester Abfälle in städtischen Umgebungen zu optimieren, so dass sich die Städte in Echtzeit an die Verbrauchsmuster anpassen und die Umweltbelastung verringern können (Ojadi et al., 2024).

Über die betriebliche Effizienz hinaus leistet die KI einen Beitrag zur strategischen Stadtplanung. Wang et al. (2025) verwendeten Explainable AI (XAI), eine Kombination aus XGBoost- und SHAP-Werten, um die Leistung von Kreislaufwirtschaftsinitiativen in chinesischen Pilotstädten zu bewerten. Ihre Ergebnisse bieten wertvolle politische Erkenntnisse darüber, welche Variablen die Emissionen am wirksamsten reduzieren, und verbessern so die Datentransparenz in der KW-Governance (Wang et al., 2025).

Industrielle Systeme und Lieferketten profitieren ebenfalls von der Integration von KI in das Kreislaufdesign. Ghanavati-Nejad et al. (2025) entwickelten ein stochastisches Modell eines künstlichen neuronalen Netzes zur Unterstützung der Lieferantenauswahl auf der Grundlage von Belastbarkeits- und Kreislaufwirtschaftsmetriken. Das Modell hilft Herstellern, Nachhaltigkeitskriterien in die Beschaffung einzubinden und Ziele wie Wiederaufbereitung und ethische Beschaffung zu fördern (Ghanavati-Nejad et al., 2025).

In ähnlicher Weise stellten Meena et al. (2025) einen entscheidungsunterstützenden Rahmen für zirkuläre Lieferketten vor, der KI nutzt, um die dreifache Bilanz auszugleichen: wirtschaftliche Effizienz, ökologische Verantwortung und soziale Verantwortung (Meena et al., 2025).

Mit Blick auf die Zukunft zeichnen sich immer ausgefeiltere Anwendungen in Form von KI-kooordinierten industriellen Ökosystemen ab. Telesca (2025) schlug das Modell der intelligenten nachhaltigen Entwicklung (Smart Sustainable Development, SSD) für die Verwaltung von Öko-Industriezonen vor, bei dem KI zur Integration von KW-Leistungskennzahlen, Zonierungsstrategien und Echtzeit-Energie- und Materialflussdaten eingesetzt wird. Das Modell sieht ein orchestriertes System vor, in dem Industrien Ressourcen gemeinsam nutzen und Abläufe auf der Grundlage intelligenter Analysen synchronisieren (Telesca, 2025).

ML-Anwendungen in der Kreislaufwirtschaft

Die Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten Anwendungen des maschinellen Lernens in der Kreislaufwirtschaft. Jeder Eintrag zeigt, wie ML-Techniken - einschließlich überwachtem, unüberwachtem, verstärktem und tiefem Lernen - Ressourcenoptimierung, Abfallreduzierung, Materialklassifizierung und Systemanpassungsfähigkeit ermöglichen. Die Übersicht verbindet jeden Ansatz mit spezifischen KW-Funktionen und bietet einen Einblick, wie intelligente Werkzeuge regenerative, umweltfreundliche und datengestützte Lösungen in verschiedenen Branchen unterstützen.

Titel	Autor*innen	ML-Typ	Algorithmus	Anwendung	Auswirkungen für die Kreislaufwirtschaft
Kartierung der Erträge von Wasserpflanzen für die Biokohleproduktion	Banda et al. (2025)	Überwachtes Lernen	Artificial Neural Networks (ANN)	Vorhersage des Biomassertrags für die Biokohleproduktion	Umwandlung von Biomasse in Energie, Optimierung der Bioressourcenströme
Bio-Kreislaufwirtschaft in der Landwirtschaft	Pitakaso et al. (2025)	Verstärkendes Lernen	RL mit Artificial Multiple Intelligence	Fuhrparkplanung und -steuerung für die Biomasselogistik	Optimierung von Transportemissionen und Ressourcengewinnung in der Landwirtschaft
Lieferantenauswahl in zirkulären Lieferketten	Ghanavati-Nejad et al. (2025)	Überwachtes Lernen	Stochastic ANN Modelle	Auswahl von Lieferanten auf der Grundlage von Resilienz und Zirkularität	Verbessert die Nachhaltigkeit und Agilität von Lieferkettennetzwerken
PET-Hydrolyse-Modellierung für zirkuläre Kunststoffe	Abedsoltan et al. (2025)	Überwachtes Lernen	Random Forest, ANN	Modellierung der Effizienz des Hydrolyseprozesses für PET-Abfälle	Ermöglicht das Recycling von Kunststoffen in einem geschlossenen Kreislauf durch Optimierung chemischer Prozesse
Analyse der städtischen CO2-Kreislaufwirtschaft	Wang et al. (2025)	Explainable AI (XAI)	XGBoost mit SHAP Analyse	Bewertung der Nachhaltigkeitsleistung von chinesischen Pilotstädten	Unterstützt die Stadtplanung im Einklang mit KW durch Erkenntnisse über den CO2-Fußabdruck
AI für die Vorhersage von Biokohleeigenschaften	Kravchenko et al. (2025)	Überwachtes Lernen	Support Vector Regression (SVR)	Vorhersage der Eigenschaften von Biokohle aus Lebensmittelabfällen	Optimiert Abfallverwertungswege bei der Verarbeitung organischer Abfälle

Titel	Autor*innen	ML-Typ	Algorithmus	Anwendung	Auswirkungen für die Kreislaufwirtschaft
Compliance durch AI in Waste-to-Value-Systemen neu denken	Ashraf & Mustafa (2024)	Un-überwachtes Lernen	Anomaly Detection, Pattern Mining	Überwachung der Einhaltung von Vorschriften in digitalen Abfallverwertungsprozessen	Sicherstellung ethischer und rückverfolgbare r zirkulärer Abfallströme
KI-gestützte Optimierung von Wassernutzung und Abfall in Smart Cities	Ojadi et al. (2024)	Überwachtes Lernen	Time Series Forecasting	Optimierung der städtischen Wasser- und Abfallsysteme	Förderung geschlossener städtischer Ressourcenkreisläufe
Abfallverwertung trifft auf KI: KMU-Wachstum und Ungleichheit	Abbas & Mustafa (2024)	Deep Learning	Multi-layer Perceptron	Vorhersage der Wertschöpfung aus recycelten Materialien	Stärkung integrativer und skalierbarer Waste-to-Resource-Systeme

KI in der Kreislaufwirtschaft: Chancen und Risiken

Mit der zunehmenden Einbindung von KI-Systemen in die Infrastrukturen der Kreislaufwirtschaft entwickelt sich ihre Rolle von der analytischen Unterstützung hin zur autonomen Kontrolle und vorausschauenden Steuerung. Zu den sich abzeichnenden Anwendungen gehören Lebenszyklusbewertungen in Echtzeit (Kravchenko et al., 2025), KI-gesteuerte Energie-Mikronetze, dynamische Logistik für zirkuläre Lieferketten (Pitakaso et al., 2025) und autonome Rückverfolgbarkeitssysteme zur Überwachung von Materialströmen. Diese Instrumente versprechen einen erheblichen Gewinn an Effizienz, Transparenz und ökologischer Nachhaltigkeit. Durch fortschrittliches Lernen, Mustererkennung und adaptive Entscheidungsfindung unterstützt die KI die Ziele der Abfallvermeidung, der Regeneration von Ökosystemen und der Schließung von Ressourcenkreisläufen in verschiedenen Branchen.

Diese Fähigkeiten sind jedoch mit kritischen Herausforderungen verbunden. Die ethische Steuerung von KI bleibt in vielen KW-Kontexten unterentwickelt, wo Bedenken über algorithmische Verzerrungen, Datentransparenz und den Ausschluss von der Entscheidungsfindung fortbestehen (Floridi et al., 2018). Unkontrolliert können solche Risiken ökologische Ungerechtigkeiten verstärken oder die demokratische Kontrolle untergraben. So kann beispielsweise die KI-gestützte Automatisierung von Recyclingsystemen informelle Arbeiter*innen oder kleine Recycler an den Rand drängen, insbesondere in Volkswirtschaften mit niedrigem Einkommen, wo der Zugang zu digitaler Infrastruktur nach wie vor begrenzt ist (Vinuesa et al., 2020). Unterdessen stützen sich zirkuläre Lieferketten zunehmend auf eine groß angelegte Datenerfassung - durch Sensoren, intelligente Verträge oder die Verfolgung des Verbraucherverhaltens - was Bedenken hinsichtlich der Datensouveränität und des Datenschutzes aufwirft.

Diese Bedenken werden nun von den Regulierungsbehörden aufgegriffen. Das Gesetz über künstliche Intelligenz der Europäischen Union (EU-KI-Gesetz) führt einen Rechtsrahmen ein, der KI-Systeme auf der Grundlage ihrer potenziellen Risiken kategorisiert, mit besonderen Bestimmungen für Hochrisikosysteme, die im Umweltmanagement, in der städtischen Infrastruktur und in der industriellen Kontrolle eingesetzt werden (Europäische Kommission, 2021/2024). Das KI-Gesetz schreibt Transparenz, menschliche Aufsicht und algorithmische Rechenschaftspflicht für solche Systeme vor - Grundsätze, die besonders relevant sind, wenn KI zur Überwachung von Emissionen, zur Optimierung des Energieverbrauchs oder zur Durchsetzung der Einhaltung von KW-Richtlinien eingesetzt wird.

Das EU-Gesetz über künstliche Intelligenz führt einen risikobasierten Rahmen ein, der KI-Systeme in vier Stufen einteilt, die wie eine Pyramide aufgebaut sind. Diese Struktur trägt dazu bei, dass die Regulierung verhältnismäßig ist: Je höher das potenzielle Risiko ist, das ein KI-System für Menschen, Gesellschaft oder Umwelt darstellt, desto strenger sind die regulatorischen Anforderungen.

EU AI Act: Risk Levels

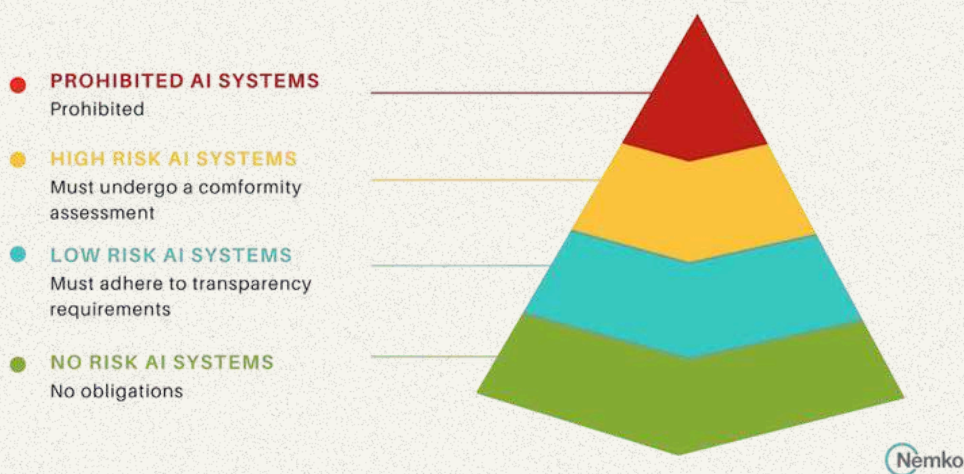


Abbildung 4: EU-KI-Gesetz: Risiko-Levels.

Quelle: <https://www.nemko.com/blog/a-quick-dive-into-the-eu-ai-act>

An der Spitze der Pyramide stehen KI-Systeme mit inakzeptablem Risiko, die als zu gefährlich gelten, um auf dem EU-Markt zugelassen zu werden. Diese Systeme sind gänzlich verboten. Im Kontext der Kreislaufwirtschaft könnte ein Beispiel ein KI-System sein, das eingesetzt wird, um die Verbraucher*innen durch irreführende grüne Marketingtaktiken zu manipulieren - zum Beispiel durch unterschwellige Botschaften, die ein Produkt fälschlicherweise als ökologisch nachhaltig darstellen. Wenn ein solches System schutzbedürftige Bevölkerungsgruppen (wie Kinder oder ältere Menschen) ausnutzt, würde es unter diese höchste Risikokategorie fallen und verboten werden.

Die nächste Stufe darunter sind KI-Systeme mit hohem Risiko, die nicht verboten sind, aber strenge Auflagen in Bezug auf Transparenz, Datenqualität, menschliche Aufsicht und Risikomanagement erfüllen müssen. In der Kreislaufwirtschaft könnten dies KI-Systeme sein, die in automatischen Müllsortieranlagen eingesetzt werden, die Materialien für das Recycling klassifizieren. Ein weiteres Beispiel wäre die KI, die kritische Energiesysteme in einer intelligenten Stadt verwaltet oder den Vertrieb wiederverwendbarer Waren optimiert. Diese Systeme unterstützen zwar die Nachhaltigkeitsziele, aber jeder Fehler oder jede Verzerrung könnte schwerwiegende Folgen haben, wie z. B. Umweltschäden oder eine Fehlallokation von Ressourcen - daher gelten sie als hochriskant.

Darunter liegen KI-Systeme mit begrenztem Risiko, für die hauptsächlich Transparenzanforderungen gelten. Diese Systeme können mit den Nutzer*innen interagieren oder Entscheidungen beeinflussen, richten aber mit geringerer Wahrscheinlichkeit Schaden an. Ein digitaler Assistent oder Chatbot, der die Verbraucher*innen bei der Wiederverwendung oder dem Recycling von Produkten unterstützt, fällt beispielsweise in diese Kategorie.

Diese KI-Tools müssen die Nutzer*innen darüber informieren, dass sie mit einem KI-System interagieren, und möglicherweise erklären, wie Empfehlungen generiert werden (z. B. Vorschläge für gebrauchte Produkte oder Reparaturmöglichkeiten auf der Grundlage von Nutzer*innenpräferenzen).

Am unteren Ende der Pyramide stehen minimale oder risikofreie KI-Systeme, für die das KI-Gesetz keine spezifischen rechtlichen Einschränkungen vorsieht. Dazu gehören die meisten gängigen Anwendungen, die die Rechte oder die Sicherheit der Menschen nicht wesentlich beeinträchtigen. In der Kreislaufwirtschaft könnte es sich dabei um KI handeln, die für die interne Logistik eingesetzt wird, z. B. zur Optimierung der Routen für Recycling-LKWs oder für die vorausschauende Wartung von Maschinen in einer Recyclinganlage. Diese Anwendungen verbessern die Effizienz und die Nachhaltigkeit, werfen aber keine ethischen oder rechtlichen Bedenken auf und sind daher ohne weiteres zulässig.

Die KI-Gesetz-Pyramide stellt sicher, dass KI-Anwendungen in Bereichen wie der Kreislaufwirtschaft ihren Auswirkungen angemessen reguliert werden. Für Systeme, die für das öffentliche oder ökologische Wohlergehen von entscheidender Bedeutung sind, gelten höhere Standards, während risikoärmere Instrumente mit minimalen Eingriffen gefördert werden.

Das Erreichen einer fairen und effektiven KI-gestützten Kreislaufwirtschaft erfordert mehr als nur die Einhaltung von Vorschriften. Sie erfordert ein verantwortungsvolles Design, eine integrative Governance und eine auf Gerechtigkeit ausgerichtete Innovation. Algorithmische Entscheidungen müssen erklärbar, nachvollziehbar und überprüfbar sein. Gemeinschaften, die von der Automatisierung betroffen sind - insbesondere solche in anfälligen Arbeits- oder Ökosystemen - müssen ein Mitspracherecht bei der Entwicklung und dem Einsatz von KI-Systemen haben. Die Integration von Prinzipien der Umweltgerechtigkeit in KI für KW stellt sicher, dass das Streben nach Nachhaltigkeit nicht auf Kosten der Gerechtigkeit geht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass KI zwar ein enormes Potenzial für die Skalierung von Kreislaufmodellen hat, ihr Einsatz jedoch von ethischen Schutzmaßnahmen begleitet werden muss. Rahmenwerke wie das KI-Gesetz der EU bieten einen Ausgangspunkt, aber ein ständiger Dialog zwischen politischen Entscheidungsträger*innen, Technologieexpert*innen und der Zivilgesellschaft ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass zirkuläre Intelligenz nicht nur klug, sondern auch fair, inklusiv und rechenschaftspflichtig ist.

Quellen

Abbas, S., & Mustafa, M. (2024). Waste valorization meets AI: SME growth and inequality. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390629994>

Abedsoltan, R., Jafari, R., Rastegar, M., & Brar, S. K. (2025). Modeling and optimization of enzymatic hydrolysis for PET plastic using machine learning. SSRN. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5223492

Almashaleh, I., Wicaksono, H., & Valilai, O. F. (2025). A framework for social media analytics in textile business circularity for effective digital marketing. Smart Cities and Society, 1(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2199853125000794>

Ashraf, M., & Mustafa, M. (2024). Reimagining compliance through AI in waste-to-value systems. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390630356>

Aslam, M., & Mustafa, M. (2024). From waste to wealth: AI and FinTech strategies for equitable SME development. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390630431>

Banda, M., Simukoko, M., & Kalumba, M. (2025). Utilizing machine learning to map aquatic weed yields for biochar production: A case study in the Bangweulu Wetlands, Zambia. Advances in Environmental and Energy Research, 6(2), 020. <https://www.lidsen.com/journals/aeer/aeer-06-02-020>

Faghih, M., Shokri, A., & Ramezani, M. (2024). AI-enabled textile waste classification for sustainable recycling: A deep learning approach. Sustainability, 17(10), 4264. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/10/4264>

Ghanavati-Nejad, M., Jolai, F., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2025). Supplier selection for resilient-leagile circular supply chains using stochastic ANN-based models. Soft Computing. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-025-10578-z>

Kravchenko, J., Bockel, L., & Li, Y. (2025). Predicting biochar properties from food waste using support vector regression. Waste Management & Research. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725014873>

Meena, P. L., Ghadge, A., & Kumar, V. (2025). A triple bottom line approach to circular supply chain optimization using artificial intelligence. *Annals of Operations Research*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-025-06510-1>

Ojadi, F., Eze, S. C., & Adeleke, I. (2024). AI-driven optimization of water usage and waste in smart cities. Working Paper, ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/390695591>

Pitakaso, R., Jittamai, W., & Chaitiamwong, N. (2025). Bio-circular green economy development in agriculture using reinforcement learning. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816992500537X>

Telesca, L. (2025). A systemic sustainable development model for industrial circular economy in special economic zones. University of Basilicata Doctoral Thesis. <https://iris.unibas.it/bitstream/11563/196975/1/tesi%20dottorato%20di%20ricerca%20Lo%20VECCHIO%20con%20firme.pdf>

Wang, L., Xu, Y., & Zhang, T. (2025). Explainable machine learning to evaluate circular carbon performance in pilot cities. *Environmental Development*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095525001233>

5. Ergebnisse der Befragung zu zirkulären Ansätzen in Curricula der Sekundarstufe

Diese Bewertung basiert auf einer Umfrage, die in den vier öffentlichen Sekundarschulen des Projektkonsortiums mit je einem*einer Vertreter*in jeder Schule durchgeführt wurde: FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Griechenland), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Deutschland), Zespót Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polen) und Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Türkei). Das Ziel der Befragung war, Einblicke in die Lehrpläne, die bestehenden Praktiken und den Bedarf an Konzepten für die KW-Bildung zu gewinnen. Alle teilnehmenden Schulen gaben an, dass Themen der politischen Bildung in ihren nationalen oder regionalen Lehrplänen enthalten seien, aber die Tiefe und Breite der Integration von Land zu Land sehr unterschiedlich sei.

Alle Schulen berichteten, dass ihr nationaler/regionaler Lehrplan spezifische KW-Themen enthalte, mit der Einschränkung, dass in Polen nur ein kleiner Teil einiger Fächer der KW gewidmet sei.

Alle vier Schulen bestätigen, dass KW-bezogene Themen Teil des formalen Lehrplans seien, hauptsächlich eingebettet in naturwissenschaftliche Fächer (z.B. Biologie, Chemie, Physik) und Geisteswissenschaften (z.B. Geschichte, Sozialkunde, Wirtschaft). In der Türkei und Polen ist der Bereich breiter gefasst und erstreckt sich auf IT und Sprachen in beiden Schulen und in der Türkei zusätzlich auf Kunst. In Deutschland liegt der Schwerpunkt jedoch eher auf der Nachhaltigkeit im Allgemeinen als auf dem Bereich Kreislaufwirtschaft.

Die Integration von KW-Themen in bestehende Fächer ist in Griechenland, Polen und Deutschland weit verbreitet. Die Türkei zeichnet sich durch die Hervorhebung projektbasierten Lernens und den Einsatz von Technologie und digitalen Werkzeugen aus. Auch die deutsche Schule wendet zusätzlich projektbasiertes Lernen an, während in Polen Kreislaufwirtschaft darüber hinaus in außerschulische Aktivitäten und die Zusammenarbeit mit externen Organisationen einbezogen wird.

Alle Schulen decken in ihrem Lehrplan Kernthemen der KW ab, wobei Polen die umfassendste Vielfalt behandelt. Der Klimawandel wird in allen Schulen integriert, Biodiversität in Griechenland, Polen und Deutschland, erneuerbare Energien und nachhaltiger Konsum in der Türkei, Polen und Deutschland sowie Abfallmanagement und Recycling in Griechenland, der Türkei und Polen. In Polen und Deutschland kommen noch Wasserschutz sowie soziale Gerechtigkeit und Gleichberechtigung hinzu. Umweltethik ist nur ein Teil des griechischen Lehrplans.

Deutschland berichtet erneut von einem weniger expliziten Fokus und merkt an, dass Themen wie Energieproduktion gelehrt werden können, ohne erneuerbare Energien als solche zu unterrichten. Dies deutet darauf hin, dass KW-Themen zwar vorhanden sind, die Terminologie und der Umfang jedoch unterschiedlich sein können, was potenziell zu Inkonsistenzen im Verständnis der Schüler*innen führen kann.

Nur die Türkei verweist ausdrücklich darauf, dass die SDGs Teil des Lehrplans sind. Polen und Deutschland berichten von einer teilweisen Erwähnung, während Griechenland angibt, dass es keine gibt. Dies ist signifikant, da die SDGs als weltweit anerkannte Rahmenbedingungen gelten, die gut mit der KW-Bildung harmonisieren und zu einer kohärenteren Bildungsstrategie beitragen können.

Alle Schulen gaben an, dass keine speziellen Rahmenbedingungen oder Richtlinien für die Lehrplananalyse (z.B. UNESCO Bildung für nachhaltige Entwicklung, lokale Rahmenbedingungen) verwendet werden und dass Schüler*innen, aber nicht Eltern in die KW-Bildung an ihrer Schule einbezogen sind.

Über den Lehrplan hinaus wurden die Schulen zur Einbeziehung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in ihre Unterrichtspraktiken befragt. Griechenland integriert diese Prinzipien in den Lehrplan und in Umweltprogramme, während die Türkei den Schwerpunkt auf projektbasiertes Lernen im Bereich Kreislaufwirtschaft legt, das in den Unterricht integriert wird. Die polnische Schule bezieht die Schüler*innen in außerschulische Aktivitäten ein, die von Lehrkräften durchgeführt werden, und beteiligt sich an Aktivitäten mit externen Organisationen oder lokalen Gemeinschaften. In Deutschland wird dies ebenfalls im regulären Unterricht oder durch spezielle Projekte umgesetzt.

Polen ist die einzige Schule, die aktive Partnerschaften mit externen Organisationen zur Förderung der Kreislaufwirtschaftsbildung unterhält. Alle anderen geben an, keine solchen Kooperationen zu haben, was einen wichtigen Bereich für potenzielle Verbesserungen bei den praktischen Lernmöglichkeiten in der „realen Welt“ darstellt. Auf der praktischen Seite führen alle Schulen Veranstaltungen zum Thema Nachhaltigkeit durch (z. B. Earth Day, Eco Fair) und die meisten Schulen zusätzliche Recyclingprogramme (Griechenland, Polen, Deutschland). Darüber hinaus bieten die Türkei und Polen Baumpflanz- oder Gartenprojekte an, während die Türkei auch Kompostierungsprojekte und Polen darüber hinaus Aufräumaktionen anbietet.

Auch das Engagement der Schüler*innen bei der Konzeption oder Umsetzung von KW-Projekten ist unterschiedlich: Polen berichtet von einer aktiven Beteiligung, die Türkei und Deutschland von einer teilweisen Beteiligung und Griechenland von keiner Beteiligung. Dies spiegelt unterschiedliche Schulkulturen und verfügbare Ressourcen für schülergeführte Initiativen wider. Darüber hinaus überwachen die meisten Schulen die Auswirkungen dieser praktischen Aktivitäten nicht,

nur Polen bewertet die Ergebnisse der außerschulischen Aktivitäten. Keine Schule bietet eine formale Lehrer*innenausbildung im Bereich Kreislaufwirtschaft an, und es mangelt generell an Ressourcen. Die Lehrkräfte stützen sich auf gedruckte Materialien (Griechenland, Deutschland, Türkei), Workshops, digitale Ressourcen und Tools (Türkei) oder selbst zusammengestellte Inhalte (Polen). Die türkische Schule ist vergleichsweise besser ausgestattet als die anderen, während Polen die Notwendigkeit eines zentralen Knowledge Hubs für KW-Materialien betont.

Zu den am häufigsten genannten Hindernissen bei der Umsetzung der KW-Bildung gehören:

- + Mangel an Ressourcen wie Unterrichtsmaterialien und Finanzmitteln (alle Schulen)
- + Begrenzte Flexibilität des Lehrplans (alle Schulen)
- + Unzureichende Ausbildung der Lehrkräfte (Griechenland, Polen, Deutschland)
- + Unzureichende Kompetenzen der Lehrkräfte (Türkei)
- + Übermäßige Bürokratie (besonders in Deutschland)
- + Mangelnde institutionelle Unterstützung und bildungspolitische Rahmenbedingungen (vor allem in der Türkei und in Polen)
- + Mangelndes Interesse der Schüler*innen (Türkei)
- + Begrenzte Zeit, die Lehrkräfte für KW aufwenden können, da diese freiwillig vorbereitet werden muss (vor allem in Deutschland und Polen)

Diese Herausforderungen spiegeln umfassendere systemische Probleme der jeweiligen Bildungspolitik wider, zeigen aber auch Möglichkeiten für Veränderungen auf Schulebene auf. Polen und Deutschland berichten über die am weitesten entwickelten KW-bezogenen Projekte. Polen listet Initiativen wie „Green Classroom“, „Oxford Debates“, Projekte zum Thema Elektroschrott, „Classroom under the Cloud (Arboretum)“, „Earth Day“ und „Cleaning the World Day“ auf, während Deutschland das unternehmerische Schulunternehmen „Freiday“ vorstellt, das Lebensmittel in wiederverwendbaren Bechern liefert und verkauft, sowie ein langfristiges Schüler*innenprojekt zur Umsetzung eines Schulgartens für dieses Unternehmen. In diesem Zusammenhang haben die Schüler*innen die Möglichkeit, ihre eigenen Projektideen zu entwickeln und umzusetzen, und das Gewinnerprojekt wird gefördert. Die griechische Schule hat kürzlich ein Erasmus+-Programm mit dem Titel „Let's Get Green – Sensibilisierung für ökologische Probleme“ durchgeführt, während die Türkei noch keine erfolgreichen Projekte in diesem Bereich realisiert hat.

Das Engagement der Schüler*innen ist zwar unterschiedlich, aber tendenziell stärker ausgeprägt, wenn außerschulische und projektbezogene Möglichkeiten bestehen. Die polnischen Schüler*innen beteiligen sich aktiv an allen von der Schule und externen Organisationen organisierten Aktivitäten und zeigen ein Bewusstsein für die Gefahren des Klimawandels, die Wiederverwendung von Materialien, das Recycling und das Sparen.

In Deutschland engagieren sich die Schüler*innen in den oben genannten Projekten. Im Gegensatz dazu beschränkt sich das Engagement der griechischen Schüler*innen auf das Recycling und in der türkischen Schule auf die beschriebenen projektbezogenen Lernaktivitäten

Bedarfe und Empfehlungen

Um die KW-Ausbildung zu verbessern, haben die Schulen folgende klare Bedürfnisse geäußert:

- ✦ Mehr Flexibilität im Lehrplan und mehr Zeit für KW, z. B. für interdisziplinäre Schulprojekte oder neue Fächer im Zusammenhang mit KW (insbesondere Deutschland und Griechenland)
- ✦ Praktische, auf KW zugeschnittene Unterrichtsmaterialien (alle Länder)
- ✦ Möglichkeiten zur Lehrkräftefortbildung und zum Austausch unter Kolleg*innen (Polen)
- ✦ Stärkere institutionelle und politische Unterstützung, einschließlich weniger Bürokratie (Deutschland)
- ✦ Zusammenarbeit mit externen Organisationen und der Industrie (Deutschland)

Der Vorschlag von ZAI (Polen) für ein zentralisiertes Knowledge Hub bestätigt die Notwendigkeit dieses Projekts und ist besonders vielversprechend, da es mehrere Herausforderungen gleichzeitig angehen könnte – Ressourcenlücken, Unterstützung für Lehrkräfte und Qualitätskontrolle.

Fazit

Die Umfragedaten zeigen, dass die Bedeutung der Bildung im Bereich Kreislaufwirtschaft allgemein anerkannt wird, aber auch erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Umsetzung, Tiefe und Unterstützung bestehen. Polen scheint in Bezug auf das Engagement der Schüler*innen, die Vielfalt der Themen und die externe Zusammenarbeit am weitesten fortgeschritten zu sein, während die Türkei durch digitale Infrastruktur und projektbasierte Ansätze ein starkes Potenzial aufweist. Deutschland und Griechenland weisen auf strukturelle und systemische Herausforderungen hin, die trotz des Interesses der Lehrkräfte die Tiefe der Integration der Kreislaufwirtschaft einschränken.

Um weitere Fortschritte zu erzielen, ist Folgendes erforderlich:

- ✦ Anpassung der nationalen Politik an die Grundsätze der KW sowie der SDGs
- ✦ Investitionen in die Lehrkräfteausbildung und Unterrichtsmaterialien
- ✦ Unterstützung für interdisziplinäres, projektbasiertes Lernen
- ✦ Verstärkte Zusammenarbeit mit externen Akteur*innen

Solche Maßnahmen würden den Übergang von isolierten Bemühungen zu einem kohärenteren, wirkungsvolleren KW-Bildungssystem in ganz Europa erleichtern. Die Studie unterstreicht die Bedeutung des CircEdu-Projekts, da es mehrere dieser Punkte aufgreift.

6. Ergebnisse der Befragung zu den Perspektiven, Erfahrungen und Bedürfnissen von Lehrkräften hinsichtlich der KW-Bildung an Schulen

Die folgenden Ergebnisse schließen die Auswertung einer Umfrage ab, die mit etwa der Hälfte des Lehrpersonals jeder der vier öffentlichen Sekundarschulen des Projektkonsortiums durchgeführt wurde: FIFTH GENERAL LYCEUM Larisas (FGLL, Griechenland), Fritz-Greve-Gymnasium (FGGM, Deutschland), Zespót Szkół Agrotechnicznych i Ogólnokształcących im. Józefa Piłsudskiego (ZAI, Polen) und Hadiye Kuradaci Bilim Ve Sanat Merkezi Tarsus (HKB, Türkei). Ziel dieser Umfrage war es, die Perspektiven, Erfahrungen und Bedürfnisse der Lehrkräfte in Bezug auf die Bildung zur Kreislaufwirtschaft in Schulen zu bewerten. Insgesamt nahmen 56 Lehrkräfte an der Umfrage teil, darunter 15 aus Griechenland, 19 aus Polen, 11 aus Deutschland und 12 aus der Türkei.

Fachbereiche

In Deutschland ist der größte Anteil der Lehrkräfte auf Sprachen spezialisiert (33,3 %), gefolgt von Geisteswissenschaften (z. B. Geschichte, Sozialkunde, Wirtschaft) mit 26,7 %, Naturwissenschaften (z. B. Biologie, Chemie, Physik) mit 20 % und Kunst (13,3 %). IT ist mit 6,7 % am wenigsten vertreten.

In Griechenland unterrichtet die Mehrheit der Befragten Naturwissenschaften (35,7 %), gefolgt von Geisteswissenschaften (28,6 %). Sprachen und Mathematik machen jeweils 14,3 % aus, Altgriechisch und Latein 7,1 %. Bemerkenswert ist, dass Kunst und IT nicht vertreten sind.

Polen weist eine vielfältigere Verteilung auf. Naturwissenschaften, Geisteswissenschaften und Sprachen sind mit jeweils 18,2 % gleich stark vertreten. Weitere Bereiche sind Bildungsunterricht, Familienerziehung, Schüler*innenbetreuung, Gastgewerbe, IT, Mathematik, Naturwissenschaften, Gastronomie, berufliche Bildung, Berufsberatung und Sport mit jeweils 4,5 %.

In der Türkei ist das am stärksten vertretene Fach IT (33,3 %), gefolgt von Naturwissenschaften (26,7 %), Sprachen (20 %), Kunst (13,3 %) und Geisteswissenschaften (6,7 %).

Lehrerfahrung

Was die Erfahrung angeht, weisen Griechenland, Polen und die Türkei eine starke Mehrheit an sehr erfahrenen Pädagog*innen auf. In Griechenland unterrichten 92,9 % der Lehrkräfte seit mehr als 10 Jahren, wobei eine kleine Minderheit (7,1 %) weniger als 2 Jahre Erfahrung hat. Polen zeigt einen ähnlichen Trend: 84,2 % haben mehr als 10 Jahre Erfahrung und 15,8 % liegen im Bereich von 2 bis 5 Jahren.

Auch die Türkei entspricht diesem Muster: 83,3 % verfügen über mehr als 10 Jahre Erfahrung, 16,7 % fallen in die Kategorie 6–10 Jahre. Deutschland hingegen weist eine ausgewogenere Verteilung auf. Während 45,5 % der Befragten über mehr als 10 Jahre Erfahrung verfügen, unterrichtet ein erheblicher Teil (27,3 %) seit 2–5 Jahren und 18,2 % seit 6–10 Jahren. Darüber hinaus sind 9,1 % relativ neu in diesem Beruf und verfügen über weniger als 2 Jahre Erfahrung.

Ausbildung im Bereich Kreislaufwirtschaft

Die Ausbildung in Konzepten der Kreislaufwirtschaft ist in den untersuchten Ländern nach wie vor begrenzt. Lehrkräfte in Deutschland, Griechenland und der Türkei geben an, keine formelle Ausbildung in diesem Bereich zu haben, was die mangelnde institutionelle Bedeutung des Themas unterstreicht. Polen sticht hervor, da 31,6 % der Befragten angeben, eine Form der Ausbildung erhalten zu haben. Allerdings ist eine solche Ausbildung selbst in Polen noch nicht weit verbreitet. Dies deutet auf einen systemischen Bedarf an Weiterbildungsmöglichkeiten hin, die auf die Nachhaltigkeitsbildung zugeschnitten sind.

Kenntnisse der Lehrkräfte zu Kreislaufwirtschaft

Lehrkräfte verfügen im Allgemeinen über ein grundlegendes Verständnis der Kreislaufwirtschaft, wobei die Tiefe und der Umfang dieses Verständnisses jedoch sehr unterschiedlich sind.

Polnische Lehrkräfte lieferten die umfassendsten Definitionen und verwiesen dabei häufig auf Nachhaltigkeit, Umweltverantwortung und Produktlebenszyklen. Insgesamt zeigte sich ein gutes Verständnis der Kernprinzipien der Kreislaufwirtschaft: Wiederverwendung, Recycling, Abfallreduzierung, Nachhaltigkeit und Verlängerung des Lebenszyklus. Einige betonten die Auswirkungen auf die Bildung: Bewusstseinsbildung, Werte und Verhaltensänderungen. Andere erkannten die Rolle des Lehrplans und der beruflichen Bildung (z. B. Gastronomie, Hotellerie). Einige Antworten verbinden die Kreislaufwirtschaft mit globalen Umweltproblemen (z. B. Klimawandel).

Die deutschen Antworten konzentrierten sich eher auf wirtschaftliche und gesellschaftliche Dimensionen: Die Definitionen betonen systemisches Denken unter Einbeziehung von Gesellschaft, Wirtschaft, Institutionen und Ressourcenkreisläufen. Der Schwerpunkt liegt auf geschlossenen Kreislaufprozessen, wobei ein gewisses Interesse daran besteht, wie die Kreislaufwirtschaft innerhalb der Schule selbst angewendet werden kann. Sie bieten eine analytische Perspektive auf Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit als systemisches Thema.

Lehrkräfte in der Türkei betonten praktische Anwendungen wie Wiederverwendung und Nachhaltigkeit in der Bildung: Die Definitionen reichen von grundlegender Wiederverwendung und Recycling bis hin zu tiefgreifenden pädagogischen Erkenntnissen. Bemerkenswert sind insbesondere eine fortgeschrittene Antwort, die die Kreislaufwirtschaft mit einem Lernökosystem verbindet (digitale Nachhaltigkeit, projektbasiertes Lernen), sowie einige Antworten, die Ressourcenbewusstsein, Nachhaltigkeit und die Einbeziehung in den Lehrplan betonen. Andere Antworten erkennen eine begrenzte Vertrautheit mit dem Konzept an.

In Griechenland zeigten die Antworten einen starken Zusammenhang zwischen Kreislaufwirtschaft und Recycling sowie Abfallwirtschaft. Mehrere Antworten erwähnen praktische Unterrichtsaktivitäten und Schulungen. Einige betonen Verhaltensänderungen durch praxisorientierte Bildung oder erwähnen Ökoschulen, Lehrer*innenfortbildungen und die Anpassung von Lehrplänen.

Integration von Kreislaufwirtschaft in den Unterricht

Die Integration von Themen der Kreislaufwirtschaft in den Lehrplan variiert erheblich. In Deutschland integrieren die meisten Lehrkräfte die Kreislaufwirtschaft in bestehende Fächer, wobei 36,4 % der Befragten diesen Ansatz angeben. Projektbasiertes Lernen und die Zusammenarbeit mit externen Organisationen werden jeweils von 18,2 % der Befragten genutzt, sind jedoch nicht weit verbreitet. 27,3 % der Lehrkräfte gaben an, dass sie die Kreislaufwirtschaft in ihrem Unterricht überhaupt nicht behandeln, und 9 % fügten hinzu, dass die Kreislaufwirtschaft in den höheren Klassenstufen (11. und 12. Klasse) kaum erwähnt wird.

In der griechischen Schule integriert die Mehrheit der Befragten (44,4 %) die Kreislaufwirtschaft in bestehende Fächer, anstatt sie als eigenständiges Thema zu unterrichten. Projektbasiertes Lernen und außerschulische Aktivitäten werden jeweils von 16,7 % der Lehrkräfte genutzt, ebenso wie die Zusammenarbeit mit externen Organisationen. Allerdings befassen sich 26,7 % der griechischen Lehrkräfte überhaupt nicht mit der Kreislaufwirtschaft, was auf deutliche Lücken in der Berichterstattung hindeutet.

Das größte Engagement in polnischen Schulen zeigt sich in speziellen Unterrichtsstunden zur Kreislaufwirtschaft, die von 36,8 % der Befragten genannt werden, und in der Integration in bestehende Fächer, die von 57,9 % genannt wird. Die Zusammenarbeit mit externen Organisationen wird von 21,1 % der Lehrkräfte genutzt, während projektbasiertes Lernen und außerschulische Aktivitäten weniger häufig zum Einsatz kommen. Nur 5,3 % der polnischen Lehrkräfte gaben an, die Kreislaufwirtschaft nicht zu behandeln, was auf einen relativ strukturierten und umfassenden Ansatz hindeutet.

In der Türkei wird die Kreislaufwirtschaft in erster Linie durch projektbasiertes Lernen vermittelt, das von 75 % der Befragten genutzt wird, sowie durch außerschulische Aktivitäten, die von 33,3 % genannt werden. Ein kleinerer Teil (8,3 %) gibt an, die Kreislaufwirtschaft in bestehende Fächer zu integrieren, und 16,7 % berichten, dass sie spezielle Unterrichtsstunden anbieten. 8,3 % hoben die Verwendung von Kunstprojekten mit recycelbaren Materialien als kreative Methode zur Auseinandersetzung mit Nachhaltigkeit hervor. Trotz dieser Bemühungen gaben 16,7 % der türkischen Lehrkräfte an, dass die Kreislaufwirtschaft in ihrem Unterricht nicht behandelt wird.

Deutschland und Griechenland integrieren die Kreislaufwirtschaft weitgehend in bestehende Fächer, sie steht jedoch nicht im Mittelpunkt. Polen weist das höchste Engagement mit strukturierten, speziellen Unterrichtsstunden auf, während die Türkei stark auf projektbasiertes Lernen setzt. Außerschulische Aktivitäten und externe Kooperationen sind in allen Ländern nur begrenzt vorhanden, was auf ein potenzielles Wachstumspotenzial hindeutet.

Behandlung von KW-Themen im Unterricht

Die Unterrichtsinhalte zur Kreislaufwirtschaft konzentrieren sich hauptsächlich auf Abfallreduzierung, Recycling und nachhaltigen Konsum:

In der deutschen Schule sind die am häufigsten behandelten Aspekte der Kreislaufwirtschaft im Unterricht nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion, die von 72,7 % der Befragten genannt wurden, sowie Abfallreduzierung und Recycling, die von 63,6 % genannt wurden. Reparatur- und Wiederverwendungsstrategien wurden in 36,4 % der Antworten genannt, während der Produktlebenszyklus und die Ressourceneffizienz nur in 9,1 % der Antworten vorkamen. Bemerkenswert ist, dass 18,2 % der Lehrkräfte überhaupt keine Themen der Kreislaufwirtschaft behandelten.

In Griechenland hat die Schule den höchsten Anteil an Lehrkräften, die sich nicht mit Konzepten der Kreislaufwirtschaft befassen. 33,3 % gaben an, dass sie diese Themen nicht behandeln. Abfallvermeidung und Recycling waren mit 40 % der Antworten die am häufigsten diskutierten Elemente, gefolgt von nachhaltigem Konsum und nachhaltiger Produktion, die von 20 % genannt wurden. Der Produktlebenszyklus und die Ressourceneffizienz wurden in 13,3 % der Antworten genannt.

Die polnischen Lehrkräfte zeigen ein breites Engagement für Themen der Kreislaufwirtschaft. 73,7 % der Lehrkräfte befassten sich mit Abfallreduzierung und Recycling, und nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion kamen in 52,6 % der Antworten vor.

Der Produktlebenszyklus und die Ressourceneffizienz wurden von 47,4 % der Teilnehmenden erwähnt, und Reparatur- und Wiederverwendungsstrategien wurden von 42,1 % genannt. Darüber hinaus wurden die Sharing Economy und verwandte Konzepte in 26,3 % der Antworten hervorgehoben. 15,8 % der Befragten gaben an, dass sie das Thema Kreislaufwirtschaft in ihrem Unterricht nicht behandeln.

In der Türkei befassten sich alle Befragten mit mindestens einem Aspekt der Kreislaufwirtschaft. Abfallvermeidung und Recycling wurden von allen Teilnehmenden integriert, während 66,7 % nachhaltigen Konsum und nachhaltige Produktion einbezogen. Der Produktlebenszyklus und die Ressourceneffizienz wurden von 50 % der Befragten genannt, Reparatur- und Wiederverwendungsstrategien von 41,7 %. Die Sharing Economy wurde von 8,3 % erwähnt, und als einziges der vier Länder bezog die Türkei die Kreislaufwirtschaft in den Kontext der Stadtplanung und der Gemeinden ein, was von 8,3 % der Lehrkräfte genannt wurde.

Diese Analyse zeigt unterschiedliche Grade der Integration von Themen der Kreislaufwirtschaft in die Bildung in den vier Ländern, wobei Polen und die Türkei das umfassendste und konsequenteste Engagement zeigen.

KW-Lehrmethoden

Die Lehrmethoden, die zur Vermittlung von Konzepten der Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden, unterscheiden sich in den vier Ländern erheblich. Traditionelle Frontalunterrichtsmethoden sind nach wie vor vorherrschend, obwohl praktische Aktivitäten und Experimente in allen Ländern an Bedeutung gewinnen, wobei Griechenland hier das Schlusslicht bildet. Die Türkei zeichnet sich durch einen höheren Einsatz digitaler Tools und schülergeführter Projekte aus. Der Einsatz von gamifizierten Lernmethoden und digitalen Simulationen ist jedoch insgesamt gering.

Traditionelle Methoden wie Vorlesungen und theoretischer Unterricht sind insgesamt der gängigste Ansatz. Am häufigsten werden sie in Polen eingesetzt, wo 73,7 % der Befragten angaben, auf diese Methode zurückzugreifen. Es folgen Griechenland mit 60 %, die Türkei mit 50 % und Deutschland mit 54,5 %. Dies deutet zwar auf eine solide theoretische Grundlage hin, lässt aber auch einen Bedarf an vielfältigeren Unterrichtsansätzen erkennen.

Praktische Aktivitäten und Experimente werden in der Türkei (58,3 %), Deutschland (54,5 %) und Polen (31,6 %) häufig eingesetzt. Interessanterweise gibt Griechenland nicht an, diese Methode ausdrücklich zu verwenden, was auf eine mögliche Lücke im Erfahrungslernen hindeutet.

Exkursionen und Besichtigungen vor Ort werden am häufigsten in Polen eingesetzt, wo 42,1 % der Befragten sie in ihren Unterricht integrieren. Im Gegensatz dazu sind diese Methoden in Griechenland (20 %), der Türkei (8,3 %) und Deutschland (9,1 %) weitaus weniger verbreitet, was darauf hindeutet, dass die lebensweltliche Einbindung in vielen Kontexten noch immer begrenzt ist.

Digitale und spielerische Lernansätze werden im Allgemeinen nach wie vor zu wenig genutzt. Serious Games werden von 15,8 % der polnischen Lehrkräfte und 18,2 % der deutschen Lehrkräfte eingesetzt, während in der Türkei und Griechenland keine Antworten diese Methode erwähnten.

Der Einsatz digitaler Tools und interaktiver Simulationen ist in der Türkei mit 41,7 % am höchsten, gefolgt von Polen mit 31,6 %, während er in Deutschland (9,1 %) und Griechenland (6,7 %) sehr begrenzt ist. Die Türkei weist unter den vier Ländern die stärkste Integration digitaler Bildungstechnologien auf.

Das kollaborative und schülerorientierte Lernen wird ebenfalls uneinheitlich angewendet. Gastredner*innen und Kooperationen sind relativ selten, nur 9,1 % der deutschen, 15,8 % der polnischen und 8,3 % der türkischen Befragten gaben an, diese zu nutzen. Griechenland berichtete über keinerlei Einsatz von Gastredner*innen. Die Türkei sticht jedoch durch den Einsatz schülerorientierter Projekte hervor, wobei 50 % der Befragten angaben, diesen Ansatz zu verfolgen. Im Vergleich dazu gaben Polen und Griechenland jeweils 10,5 % bzw. 13,3 % an, während Deutschland keine schülergeführten Projekte einsetzt.

Insgesamt weist Polen die größte Vielfalt an Lehransätzen auf, wobei traditioneller Unterricht mit Exkursionen, praktischen Aktivitäten und teilweise auch digitalen und spielerischen Methoden kombiniert wird. Auch die Türkei und Deutschland verfolgen einen diversifizierten Ansatz, wobei interaktive Tools besonders häufig zum Einsatz kommen. Im Gegensatz dazu scheint Griechenland über die begrenztsten Unterrichtsstrategien zu verfügen, wobei 26,7 % der Befragten angaben, überhaupt keine Lehrmethoden zur Kreislaufwirtschaft einzusetzen. Auch Polen gab an, dass 15,8 % keine spezifischen Methoden einsetzen, während in Deutschland 18,2 % der Lehrkräfte in dieselbe Kategorie fielen. Diese Unterschiede unterstreichen das unterschiedliche Engagement und die unterschiedliche Innovationskraft in der Bildung zur Kreislaufwirtschaft in den teilnehmenden Ländern.

Zugang zu Unterrichtsmaterialien zur Kreislaufwirtschaft

Der Zugang zu spezifischen Unterrichtsmaterialien variiert erheblich zwischen den einzelnen Ländern. In Deutschland gaben nur 18,2 % der Lehrkräfte an, über solche Materialien zu verfügen, wobei 9,1 % davon auf grundlegende Inhalte in Schulbüchern beschränkt waren. Bemerkenswerte 81,8 % gaben an, überhaupt keinen Zugang zu haben. Griechenland weist die größte Lücke auf, da keine Lehrkraft Zugang zu Materialien zur Kreislaufwirtschaft angab, was die dringende Notwendigkeit der Entwicklung von Ressourcen unterstreicht. Polen ist beim Zugang führend: 36,9 % der Lehrkräfte verfügen über Materialien, und 5,3 % nennen ausdrücklich ekopotencjal.pl als Ressource. Dennoch haben 63,2 % der polnischen Lehrer*innen immer noch keinen Zugang. In der Türkei ist der Zugang mit 23,1 % moderat, aber die Mehrheit – 76,9 % – verfügt über keine Materialien. Diese Unterschiede unterstreichen die Notwendigkeit gezielter Anstrengungen zur Verbesserung der Verfügbarkeit und Verteilung von Bildungsressourcen zur Kreislaufwirtschaft in ganz Europa.

Zentrale Herausforderungen bei der Integration der Kreislaufwirtschaft in den Unterricht

Zu den häufigsten Hindernissen für die Integration der Kreislaufwirtschaft in den Unterricht gehören:

- + Der **Mangel an Fortbildungen** wurde in allen Ländern am häufigsten genannt: Deutschland (25 %), Griechenland (23,1 %), Polen (20,9 %) und die Türkei (23,1 %). Dies unterstreicht den weit verbreiteten Bedarf an mehr Fortbildungsprogrammen für Lehrkräfte zum Thema Kreislaufwirtschaft.
- + **Unzureichende Unterrichtsmaterialien** wurden besonders in Deutschland bemängelt, wo 37,5 % Schwierigkeiten beim Zugang zu Unterrichtsmaterialien angeben. Auch Griechenland (25,6 %), Polen (27,9 %) und die Türkei (20,5 %) haben damit zu kämpfen, was eine anhaltende Lücke bei den Bildungsressourcen zeigt.
- + Die **begrenzte Flexibilität des Lehrplans** stellt in allen Ländern eine große Herausforderung dar, wobei Deutschland mit 33,3 % die höchste Quote aufweist, gefolgt von Griechenland (25,6 %), Polen (20,9 %) und der Türkei (17,9 %).
- + Ein **Mangel an Interesse und Engagement der Schüler*innen** wurde insbesondere von der türkischen Schule (15,4 %) gemeldet. Griechenland (7,7 %) und Polen (4,7 %) erwähnen dies ebenfalls, während Deutschland dieses Problem überhaupt nicht meldet.

- + Polen (7 %) und die Türkei (10,3 %) weisen auf einen gewissen **Mangel an elterlicher Unterstützung** hin, während Griechenland (2,6 %) nur minimale Bedenken meldet. Kein Land berichtet über einen Mangel an Unterstützung durch die Schulverwaltung, was bedeutet, dass die Umsetzung weiterer KW-Bildungsmaßnahmen nicht durch fehlende institutionelle Unterstützung beeinträchtigt werden sollte.
- + Griechenland (15,4 %), Polen (11,6 %) und die Türkei (12,8 %) heben die **unzureichende Einbeziehung in die Bildungspolitik** hervor. Deutschland meldet dies nicht als Herausforderung, was möglicherweise auf eine bessere politische Abstimmung hindeutet.
- + Deutschland (4,2 %) und Polen (7 %) geben an, dass ein kleiner Prozentsatz der Lehrkräfte keine Probleme mit der Bildung im Bereich Kreislaufwirtschaft hat. Griechenland und die Türkei melden keine Lehrkräfte, die frei von Herausforderungen sind.

Deutschland hat die größten Schwierigkeiten mit der Verfügbarkeit von Ressourcen und der Flexibilität der Lehrpläne. Griechenland zeigt die größte Besorgnis hinsichtlich politischer Lücken, elterlicher Unterstützung und mangelndem Interesse der Schüler*innen. Polen und die Türkei stehen vor vielfältigeren Herausforderungen. Das größte allgemeine Problem in allen Ländern ist der Mangel an Ausbildung und unzureichende Unterrichtsmaterialien.

Gewünschte Unterstützung für einen effektiveren KW-Unterricht

Viele Lehrkräfte wünschten sich Zugang zu besseren Unterrichtsmaterialien, was in allen Ländern oberste Priorität hatte. In Deutschland wurde dies von 90,9 % der Befragten hervorgehoben, was insgesamt die höchste Nachfrage darstellt. Polen folgte mit 89,5 %, während 60 % der Lehrkräfte in Griechenland und 75 % der Lehrkräfte in der Türkei dies als einen wichtigen Bedarf identifizierten.

Auch Fortbildungsprogramme und Workshops waren sehr gefragt, insbesondere in Griechenland mit 93,3 % und in Polen mit 78,9 %. Auch in Deutschland (36,4 %) und der Türkei (50 %) bestand Nachfrage nach solchen Angeboten.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit wird besonders von Lehrkräften in Deutschland (63,6 %) geschätzt, gefolgt von Polen (47,4 %) und der Türkei (41,7 %). Griechische Lehrkräfte (20 %) zeigten ebenfalls Interesse an interdisziplinären Ansätzen, wenn auch in geringerem Maße.

Projektbasiertes Lernen und praktische Möglichkeiten wurden von den Befragten aus Polen (68,4 %) und der Türkei (66,7 %) stark nachgefragt. Auch Deutschland (54,5 %) und Griechenland (26,7 %) zeigten Interesse an praxisorientierten und anwendungsbezogenen Lernformaten.

Die Unterstützung durch externe Organisationen und Expert*innen wurde in allen Ländern geschätzt: Polen (36,8 %), Deutschland (45,5 %), die Türkei (50 %) und Griechenland (33,3 %) wiesen auf den Wert solcher Kooperationen hin. Dies deutet auf eine Möglichkeit für Partnerschaften mit gemeinnützigen Organisationen, der Industrie und politischen Organisationen hin, um die Bildung im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu verbessern.

Lehrkräfte in Polen zeigten den größten Bedarf an einer stärkeren Bildungspolitik und institutioneller Unterstützung (42,1 %), gefolgt von Griechenland (33,3 %). In Deutschland wurde dieser Bedarf überhaupt nicht genannt, und nur 8,3 % der Lehrkräfte in der Türkei erwähnten ihn.

Schließlich äußerte Polen auch den größten Bedarf an elterlicher Unterstützung (26,3 %). In der Türkei (16,7 %), Deutschland (9,1 %) und Griechenland (6,7 %) hatte dies eine geringere Priorität. Flexibilität im Lehrplan wurde ausschließlich in Deutschland (9,1 %) erwähnt.

KW-Initiativen auf Schulebene

Alle Schulen setzen CE-Initiativen in irgendeiner Form um. Recyclingprogramme wurden von allen Schulen genannt, während Reparatur- und Wiederverwendungsworkshops nur in Polen und der Türkei existieren. Eine nachhaltige Schulinfrastruktur (z. B. Wassersparsysteme, Sonnenkollektoren) wird in der deutschen und der polnischen Schule umgesetzt, was Möglichkeiten für Investitionen in umweltfreundliche Schulkonzepte in den anderen Ländern aufzeigt. Wettbewerbe und Veranstaltungen zum Thema Kreislaufwirtschaft werden von den Schulen in Deutschland, Polen und der Türkei veranstaltet, während Griechenland keine Veranstaltungen meldet. Die türkische, polnische und deutsche Schule arbeiten aktiv mit lokalen Unternehmen und Organisationen zusammen. Darüber hinaus erwähnte Griechenland die jährliche Teilnahme am nationalen Umweltprogramm zu Waldökosystemen, Nachhaltigkeit und nachhaltiger Bewirtschaftung, einschließlich Aktivitäten im Zusammenhang mit Kreislaufwirtschaft.

In der Türkei (57,1 %) und Griechenland (13,3 %) gaben eine Reihe von Lehrkräften an, dass es derzeit keine Initiativen an ihrer Schule gibt, obwohl ihre Kolleg*innen Projekte erwähnt haben. Darüber hinaus gaben die Lehrkräfte in allen Ländern sehr unterschiedliche Antworten zu den Initiativen, die ihnen an ihrer Schule bekannt sind. Dies deutet auf Probleme bei der Kommunikation und Kohärenz sowie auf mangelnde Interdisziplinarität hin.

Beteiligung der Schüler*innen

In allen Schulen wurde über die aktive Beteiligung der Schüler*innen an der Konzeption oder Umsetzung von KW-Projekten berichtet. Deutschland erwähnte die Schüler*innenfirma, in der die Jugendlichen ihr eigenes nachhaltiges Geschäftsprojekt entwickeln können, die Umsetzung eigener Projekte im Zusammenhang mit den SDGs und das „Freiday“-Projekt, in dem die Schüler*innen ihr eigenes nachhaltiges Projekt erarbeiten. In Griechenland werden vor allem Recycling und das oben erwähnte Umweltprojekt umgesetzt. Die türkische Schule führt die Projekte TÜBITAK und Teknofest durch und bezieht die Schüler*innen teilweise in projektbasierte Studien ein, wobei Initiativen zur Produktentwicklung am beliebtesten sind. In Polen geben die meisten Lehrkräfte die Beteiligung der Schüler*innen an, ohne jedoch weitere Erläuterungen zu geben.

Die Auswertung dieser Fragen bestätigt die oben genannte Annahme, dass es an Konsistenz und Austausch zwischen den Lehrkräften und an Kommunikationsmaßnahmen in Bezug auf die umgesetzten Projekte mangelt, da sich die Antworten in allen Schulen stark widersprachen.

Insgesamt könnte die konsequente Umsetzung von schülergeführten praktischen und vielfältigen oder sogar interdisziplinären Projekten den Schulen sehr zugute kommen und eine aktive Führungsrolle der Jugend bei KW-Lösungen gewährleisten.

Evaluationspraktiken

Die Bewertung der Bemühungen um die Kreislaufwirtschaft erfolgt in allen Ländern hauptsächlich durch Schüler*innenprojekte und Präsentationen. Die Türkei (66,7 %), Griechenland (64,3 %) und Polen (58,3 %) berichten von der höchsten Anwendungsrate dieser Methode. Deutschland (38,5 %) nutzt diesen Ansatz ebenfalls, aber seltener, während im Vergleich zu anderen Ländern mehr auf Feedback von Schüler*innen/Mitarbeitenden (30,8 %) gesetzt wird. Griechenland (14,3 %), Polen (20,8 %) und die Türkei (6,7 %) verwenden in geringem Maße Umfragen. Die Datenerhebung (Abfallreduzierung & Energieeinsparungen) wird an Schulen in Griechenland (21,4 %), Polen (12,5 %) und der Türkei (20 %) integriert. Deutschland hingegen nutzt keine Datenerhebung.

Polen (4.2%) und die Türkei (6.7%) erstellen Berichte und Veröffentlichungen, wenn auch in geringerem Maße, während Deutschland und Griechenland überhaupt keine formellen Berichte veröffentlichen. In der deutschen Schule gibt es eine hohe Anzahl von Lehrkräften, die keine Evaluation der KW-Initiativen angeben, während in allen anderen Schulen alle Teilnehmenden eine Art von Bewertung berichteten, trotz eines kleinen Prozentsatzes polnischer Lehrkräfte, die nichts über die Maßnahmen wussten.

Insgesamt ist die Bewertung in allen Ländern nicht sehr umfassend. Strukturierte Umfragen, Berichte und Datensammlungen werden in den meisten Ländern weiterhin nur unzureichend genutzt.

Erfolgreiche KW-Projekte mit Schüler*innen

In den vier Ländern wurden in Schulen verschiedene Projekte zur Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit umgesetzt, die jeweils unterschiedliche Grade an Schüler*innenbeteiligung, Innovation und institutioneller Unterstützung widerspiegeln.

Deutschland

- + Fokus auf Upcycling (Möbel, Kunstprojekte) und Abfalltrennung, aber letzteres wurde nicht immer erfolgreich umgesetzt
- + Die Schüler*innenfirma entwickelte ihr eigenes Recyclingmodell für ein nachhaltiges Frühstück.
- + Workshops mit externen Expert*innen (Spirit of Football-Projekt), die Nachhaltigkeit mit Sport verbinden
- + Schüler*innen unterrichteten jüngere Kinder zu Abfallreduzierung und förderten peer-to-peer Bildung.
- + Bedenken hinsichtlich des Mangels an nachhaltigen Prinzipien, die in der Schule selbst umgesetzt werden

Griechenland

- + Bestehende Projekte konzentrieren sich auf Batterierecycling, Wiederverwendung alter Materialien, Baumpflanzung und Ausflüge mit Umweltfokus
- + Ein Erasmus+-Projekt
- + Keine Erwähnung von schüler*innengetriebenen Innovationen, hauptsächlich vorstrukturierte Nachhaltigkeitsbemühungen

Polen

- + Externe Kooperationen mit dem Arka Umweltbildungszentrum
- + Recyclingprojekte: "Weltreinigungstag" und eine Elektroschrottsammlung
- + Kampagnen wie "Saubere Berge", die den Umweltschutz und die Biodiversität fördern
- + Modebezogene Projekte der Kreislaufwirtschaft (Eco-Wave: Bewusstsein für Fast Fashion)
- + Projekte, die alternative Energiemodelle und nachhaltige Gartenarbeit sowie Humusernte umfassen
- + Gastronomiefokussierte Projekte der Kreislaufwirtschaft, die die Integration von branchenspezifischer Nachhaltigkeit zeigen

Türkei

- ✦ Praktische kreative Projekte mit Abfallmaterialien, einschließlich Raketen- und Autobau
- ✦ Stadtplanungsprojekte, die Nachhaltigkeitskonzepte integrieren
- ✦ TÜBİTAK - preisgekrönte mobile Anwendung zur Wassereinsparung
- ✦ Gamifizierte Lerntechniken steigern das Interesse der Schüler*innen
- ✦ Forschungsprojekte mit Schüler*innen

Die polnische Schule zeigt die breiteste Palette von Projekten, während die türkische Schule sich durch kreative und technologieorientierte Ansätze auszeichnet. Die griechische Schule hat einen Schwerpunkt auf traditionellem Recycling und Umweltbildungsaktivitäten. Die deutsche Schule legt Wert auf Peer-Learning, bei dem Schüler*innen andere in Nachhaltigkeitsthemen unterrichten.

Ratschläge für Lehrkräfte zum Unterrichten von Konzepten der Kreislaufwirtschaft

Integration der Kreislaufwirtschaft in den täglichen Unterricht

- ✦ Themen der Kreislaufwirtschaft und reale Beispiele in den täglichen Unterricht integrieren (Deutschland).
- ✦ Projektbasiertes Lernen und außerschulische Aktivitäten einbinden (Griechenland, Türkei).
- ✦ Schüler*innen ermutigen, Initiativen wie Kleidertausch oder Zero-Waste-Projekte zu starten (Polen).

Außerschulische Unterstützung & Kooperationen suchen

- ✦ Expert*innen einladen und arbeiten mit lokalen Unternehmen und Umweltorganisationen zusammenarbeiten (Deutschland, Griechenland, Türkei).
- ✦ Netzwerke für Peer-Learning bilden um Best Practices auszutauschen (Griechenland).
- ✦ Partnerschaften mit auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Institutionen fördern (Polen, Türkei).

Praktische & Hands-on Lernansätze verwenden

- ✦ Workshops, Exkursionen und interaktive Schüler*innenaktivitäten organisieren (Griechenland, Türkei).
- ✦ Kleine Nachhaltigkeitsprojekte, wie beispielsweise Batterie-Recycling oder Solarpanels in Schulen, implementieren (Türkei).
- ✦ Lehren durch gamifiziertes Lernen, einschließlich Öko-Wettkämpfen und Spielen zur Kreislaufwirtschaft (Polen).

Integration in Lehrpläne und Politische Maßnahmen vorantreiben

- ✦ Aktualisierungen des Curriculums fördern, um Konzepte der Kreislaufwirtschaft formal einzubeziehen (Türkei).
- ✦ Sich für institutionelle Unterstützung und Finanzierung zur Stärkung der Bildung für nachhaltige Entwicklung einsetzen (Griechenland, Polen).
- ✦ Pilotprogramme schon vor einer umfassenderen Implementierung starten (Griechenland).

Bildungsmaterialien nutzen & entwickeln

- ✦ Nach geeigneten Bildungsmaterialien und Fallstudien suchen (Deutschland, Griechenland).
- ✦ Ressourcenbibliotheken mit Lehrplänen, Videos und Fallstudien erstellen (Griechenland).
- ✦ Online-Kurse und Lehrerworkshops zur Kreislaufwirtschaft bewerben und fördern (Polen, Türkei).

Fazit und Empfehlungen

Die Umfrageergebnisse zeigen eine fragmentierte, aber sich entwickelnde Landschaft der Bildung zur Kreislaufwirtschaft. Während Polen den umfassendsten und strukturierten Ansatz verfolgt, zeigen andere Länder isolierte Bemühungen mit erheblichen Lücken in der Ausbildung, den Materialien und der Einbindung der Schüler*innen.

Die Empfehlungen umfassen:

1. Nationale Ausbildungsprogramme für Pädagog*innen zu Konzepten der Kreislaufwirtschaft entwickeln.
2. Standardisierte Lehrmaterialien, die in allen Sprachen zugänglich und an verschiedene Bildungsniveaus anpassbar sind, erstellen und verteilen.
3. Interdisziplinäres und projektbasiertes Lernen fördern, das die Anwendung in der realen Welt anregt.
4. Kooperationen mit Unternehmen, NGOs und lokalen Gemeinschaften unterstützen, um praktische Erfahrungen zu verbessern.
5. Von Schüler*innen geführte Initiativen unterstützen, um sicherzustellen, dass Jugendliche nicht nur passive Lernende sind, sondern aktive Mitgestalter*innen der Nachhaltigkeitsbemühungen.
6. Klare Bewertungsrahmen implementieren, die sowohl die Lernergebnisse als auch die Umweltwirkungen verfolgen.

Dementsprechend betont die Befragung auch die Bedeutung des CircEdu-Projekts, das eine europäische Lernlandschaft mit einem Capacity-Building-Programm und einem Knowledge-Hub implementiert.

7. Fazit

Diese Studie hebt den dringenden Bedarf hervor, die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in die Sekundarschulbildung zu integrieren, als transformative Reaktion auf die Umwelt- und Gesellschaftskrisen, die durch lineare Wirtschaftsmodelle verursacht werden. Durch eine umfassende Literaturübersicht und durch Umfragen in Deutschland, Griechenland, Polen und der Türkei hat das CircEdu-Projekt sowohl die weit verbreitete Anerkennung der Bedeutung der Kreislaufwirtschaft als auch die erheblichen Lücken in der Lehrplanintegration, der Lehrer*innenbildung und der Verfügbarkeit von Ressourcen aufgezeigt.

Während es vermehrt Forschung, Literatur und innovative Praktiken im weiteren Bereich der Kreislaufwirtschaft gibt, bleibt deren Einbindung in die Bildungssysteme, insbesondere auf der Sekundarstufe, fragmentiert und unterentwickelt. Die Studie unterstreicht die Wichtigkeit von Bildung, nicht nur um das Bewusstsein zu schärfen, sondern auch um zukünftige Generationen mit den Fähigkeiten, Werten und dem Systemdenken auszustatten, die notwendig sind, um einen nachhaltigen Wandel zu gestalten. Sie zeigt auch das Potenzial interdisziplinärer, projektbasierter und digital unterstützter Lernmodelle, die konstruktives und tiefgreifendes Engagement mit Konzepten der Kreislaufwirtschaft fördern.

Die Erkenntnisse, die von Lehrkräften und Institutionen aus den Partnerländern gesammelt wurden, bilden eine solide Grundlage für die nächsten Phasen des CircEdu-Projekts. Um voranzukommen, sind nachhaltige Anstrengungen notwendig, um Kapazitäten aufzubauen, anpassungsfähige Lehrressourcen zu schaffen und das Bewusstsein für Änderungen im politischen Rahmen zu schärfen, die zirkuläres Denken in die Schulkulturen und Lehrpläne integrieren. Indem sowohl Lehrkräfte als auch Schüler*innen empowert werden, kann Bildung zu einem Katalysator für eine gerechte und regenerative Kreislaufwirtschaft im digitalen Zeitalter werden.