

Kunststoffe bis 2050 kreislauffähig, klimaneutral und umweltfreundlich machen

Was müssen wir heute dafür tun?

Kunststoffe stecken voller Widersprüche – eben deshalb gibt es zu der gestellten Frage keine einfachen Antworten. Für Kunststoffe scheinen mehrere Versionen der Zukunft möglich. Und nur eine davon liegt innerhalb dessen, was unser Planet verkraften kann. Ein grundlegender Wandel ist notwendig, um Treibhausgasemissionen und ökologische Schäden bis 2050 zu begrenzen. Ausgehend von einer Bestandsaufnahme aktueller Szenarien, einem Backcasting-Ansatz und einer Journey mit Kunststoff-Expert:innen identifiziert der Artikel systemische Hebel – von der Rohstoffbasis über Ökodesign bis zu molekularem und KI-gestütztem Recycling – und schließt mit Handlungsempfehlungen für das kritische Zeitfenster bis 2030.

Interessant für
alle Branchen



Dr. Arno Maurer
Polymer Coach



Professor Dr. Jens Ulmer
Leiter Kompetenzbereich Polymere Werkstoffe
OST Ostschweizer Fachhochschule, Buchs
www.ost.ch



Professor Dr. Christof Brändli
Laborleiter Klebstoffe und Polymere Materialien
IMPE, ZHAW, Winterthur
www.zhaw.ch



Cedric Gysel
Chief Changemaker
be circular
www.be-circular.com



Fabian Bänninger
Business Development Manager – Medical Polymers
Biesterfeld Plastic Suisse AG
www.biesterfeld.com



Dr. Melanie Haupt
Geschäftsführerin und Inhaberin
realcycle GmbH
www.realcycle.ch



Andreas Brunner
Stv. Geschäftsführer
RecyPac
www.recypac.ch

Was müssen wir heute tun? – Zehn Antworten

1. Kunststoffe nicht eliminieren, sondern neu denken. Das ist eine Gestaltungsaufgabe, keine Verbotsdiskussion.
2. Den systemischen Wandel jetzt anstoßen. Effizienzgewinne und Technologien allein reichen nicht, um die planetaren Grenzen einzuhalten. Ohne gleichzeitige Nachfragebegrenzung und Governance bleiben alle Fortschritte hinter dem Produktionswachstum zurück.
3. Das Zeitfenster bis 2030 nutzen und die Weichen jetzt stellen. Wer heute falsch konstruiert, investiert oder reguliert, verbaut dreißig Jahre Kreislaufpotenzial.
4. Upstream zuerst. Nachfragereduktion und Design for Circularity sind wirksamere Hebel als End-of-Life-Lösungen. Nur was richtig konzipiert ist, lässt sich am Ende sauber recyceln.
5. Designstandards und digitale Produktpässe heute in Produktregulierungen verankern. Die ESPR (Ecodesign for Sustainable Products Regulation) bietet dafür den Rahmen.
6. Chemische und andere fortgeschrittene Recyclingverfahren als Ergänzung zum mechanischen Recycling entwickeln und skalieren.
7. Technologietransfer und Trickle-Down-Effekte strategisch nutzen. Hochpreissegmente wie die Medizintechnik können das Testfeld von heute sein und die Grundlage für skalierbare Lösungen von morgen werden.
8. KI-gestützte Entwicklung, Sortierung und Prozessoptimierung vorantreiben. Das ist keine Zukunftsmusik mehr, sondern ein zentraler Enabler der Transformation.
9. Saubere Energie als einen der wichtigsten systemischen Hebel nutzen. Ohne erneuerbaren Strom für Produktion und Recycling kein klimaneutrales Kunststoffsystem.
10. Kreislaufwirtschaft als Teamsport verstehen – von Forschung, Industrie, Politik und Gesellschaft und mit einem gemeinsamen Bild davon, wohin die Reise gehen soll.

Motivation: Chancen nutzen, Gefahren abwenden

Niemand möchte Plastikabfall in der Natur – aber kaum jemand möchte auf Kunststoffe verzichten. Über 98% aller Kunststoffe stammen heute aus fossilen Quellen. Die globale Produktion ist von 2 Mt im Jahr 1950 auf 475 Mt im Jahr 2022 gewachsen und soll bis 2060 auf 1.200 Mt ansteigen (**Bild 1**) – bei einer effektiven Recyclingquote von weniger als 10%. [1] Gleichzeitig sind Kunststoffe in vielen Bereichen schlicht nicht

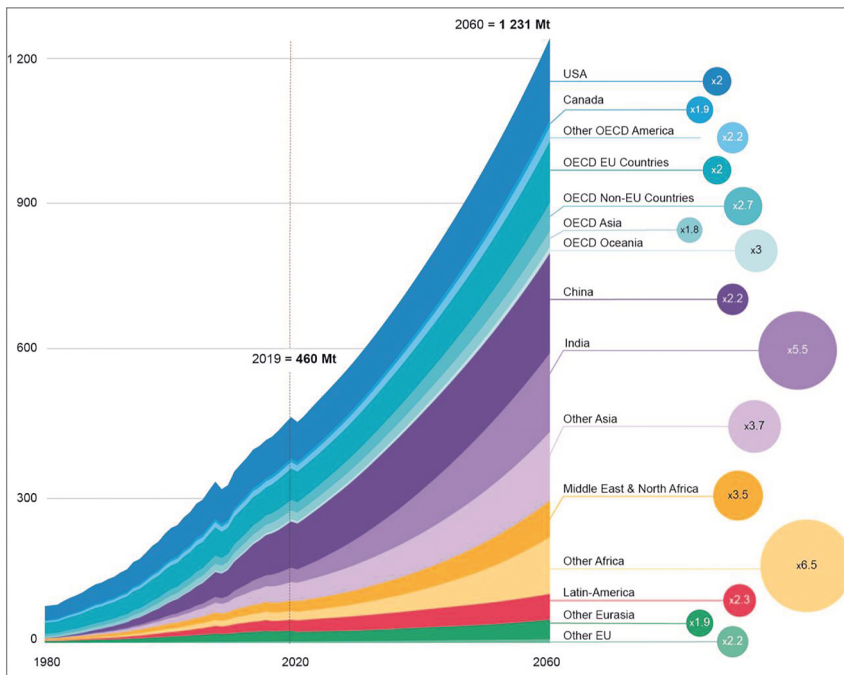


Bild 1: Entwicklung des Kunststoffverbrauchs bis 2060 [2]

ersetzbar: in der Medizintechnik, im Leichtbau, beim Schutz von Lebensmitteln oder in der Energietechnik.

Die Frage ist daher nicht, ob Kunststoffe in einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft noch einen Platz haben, sondern wie dieser Platz gestaltet werden muss – und was dafür heute zu tun ist, um eine realistische Perspektive bis 2050 zu haben.

Die politischen Rahmenbedingungen sind gesetzt. So strebt die EU beispielsweise an, der erste klimaneutrale Kontinent bis 2050 zu werden. Der European Green Deal zielt auf 65% zirkuläre Kunststoffe und Netto-Null-Emissionen bis 2050 – ambitionierte Ziele, für die das Zeitfenster zu Investitionsentscheidungen gerade jetzt noch offen steht. [3] Auch das (bisher nicht abgeschlossene) globale Plastikabkommen [4] soll die Treibhausgasemissionen bis 2050 „drastisch“ senken und dazu den Eintrag von Kunststoffabfällen in die Ozeane bis 2040 um > 80% verringern. Voraussetzung dafür wären verbindliche Deckelungen der Kunststoffproduktion in Verbindung mit einem

funktionierenden globalen Abfallmanagement – beides politisch alles andere als selbstverständlich. Außerdem sollen Chemikalien in Plastik stark reguliert werden.

Größtes Problemfeld der wachsenden Kunststoffproduktion – und damit dringendes Motiv für einen Strategiewechsel – ist deren Einfluss auf die Ökosysteme. Insbesondere die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die eine aktuelle Studie im Lancet Planetary Health auf Mehrkosten von 1,5 Bio. US\$/a beziffert hat [5], welche bis 2040 auf das Doppelte ansteigen könnten. [6] Überwiegend sind diese Kosten eine Folge der mit Kunststoffen assoziierten Treibhausgasemissionen. Aufgrund bisher fehlender Evidenz wurden in der Studie direkte Effekte von Mikro- und Nanoplastik und von Kunststoffadditiven auf die Gesundheit nicht berücksichtigt. Auch positive Auswirkungen des Kunststoffeinsatzes auf Klima und Gesundheit wurden nicht gegengerechnet.

Die gute Nachricht: Ähnlich wie beim Verbot bleihaltiger Kraftstoffe oder von FCKW gilt auch hier, dass evidenzbasierte, gemeinschaftlich umgesetzte Regulierungen wirken können. Voraussetzung dafür sind klare Commitments und das koordinierte Handeln ganzer Akteursgruppen. Einzelinitiativen reichen nicht aus. Generelle Bedingungen für den Erfolg neuer Initiativen sind somit, dass sich rechtzeitig genügend Akteure für wirksame Koalitionen finden und dass die Umsetzung ausreichend schnell geschieht.

Das Ziel im Blick: Kunststoffe im Jahr 2050

Um ein anschauliches Bild für Kunststoffe im Jahr 2050 zu entwickeln, wurden im September 2025 Expert:innen aus der Schweizer Kunststoffforschung und -wirtschaft zu einer Paneldiskussion eingeladen. [7] Unter dem Leitgedanken „Zurück in die Zukunft“ und im Rahmen von Folgetreffen und einem Workshop diskutierten sie, wie Polymere in 25 Jahren aussehen sollen – und welche Weichenstellungen heute dazu notwendig sind.

Entstanden ist ein Tableau komplementärer Zukunftsbilder, beispielsweise:

- geschlossene Ressourcenkreisläufe mit regionalen Lieferketten,
- CO₂ als universeller Rohstoff,
- Biomasse aus Nebenströmen der Landwirtschaft statt in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion,
- eine funktional reduzierte Basis von Kunststoffsorten, die sich einfach recyceln lassen,
- verfügbare und vergleichbare Datensätze für eben diese Materialien und

- ein Performance Pricing, das ökologische Mehrkosten endlich einpreist, anstatt sie zu externalisieren.

Die Teilnehmenden waren sich einig: Das Ziel lässt sich nur branchenübergreifend erreichen. Kreislaufwirtschaft ist Teamsport und erfordert die Zusammenarbeit aller Akteure aus Forschung, Industrie, Politik und Gesellschaft.

Szenarien und systemische Analyse

Was die Szenarien sagen – und was nicht

Stand heute liegt die globale Recyclingquote noch unter 10 %. Mechanisches Recycling überwiegt bei Weitem, geht jedoch oft mit Downcycling aufgrund von Qualitätsverlusten und Verunreinigungen einher.

Die verfügbaren Szenarien zeichnen ein konsistentes Bild: Ohne strukturelle Eingriffe wird die jährliche Menge nicht fachgerecht entsorgter Kunststoffe bis 2050 auf rund 120 Mio. t ansteigen – eine Verdoppelung gegenüber heute. [2, 8] Der Mikroplastikeintrag könnte sich bis 2060 sogar vervierfachen. [9] Parallel dazu würden sich die jährlichen Treibhausgasemissionen aus dem globalen Kunststoffsystem auf 4,3 Gt CO₂e mehr als verdoppeln. [10]

Das ist die schlechte Nachricht. Die gute: Transformationsszenarien zeigen, dass bis zu 78% Zirkularität des Materialflusses theoretisch erreichbar sind – wenn Vermeidung, Substitution und Recycling kombiniert und frühzeitig skaliert werden. [11] Biogene Ressourcen und Recycling, kombiniert mit erneuerbarer Energie, könnten sogar netto-negative Emissionen bis 2050 ermöglichen – allerdings nur unter anspruchsvollen Voraussetzungen: mindestens 40% Recyclingquote, maximal 10% Deponierung. [12] Die (recht optimistische) Roadmap von Plastics Europe (**Bild 2**) geht davon aus, dass die Substitution fossiler Kunststoffe schrittweise erfolgen wird und bis 2030 einen Anteil von 25% sowie bis 2050 von 65% erreichen könnte (die Niederlande planen sogar 100%). [13] Die Roadmap legt zudem einen möglichen Weg fest, um die Treibhausgasemissionen des gesamten Kunststoffsystems bis 2030 um 28% zu senken und bis 2050 Netto-Null zu erreichen. [3]

Systemisch betrachtet ist die Substitution von Erdöl durch biogene Ressourcen aber ein Spiel mit dem Feuer. Deren Verwendung ist zwar weniger klimaintensiv, verursacht aber deutlich größere Biodiversitätsverluste, Wasserstress und andere Ökosystems Schäden. [14, 15]

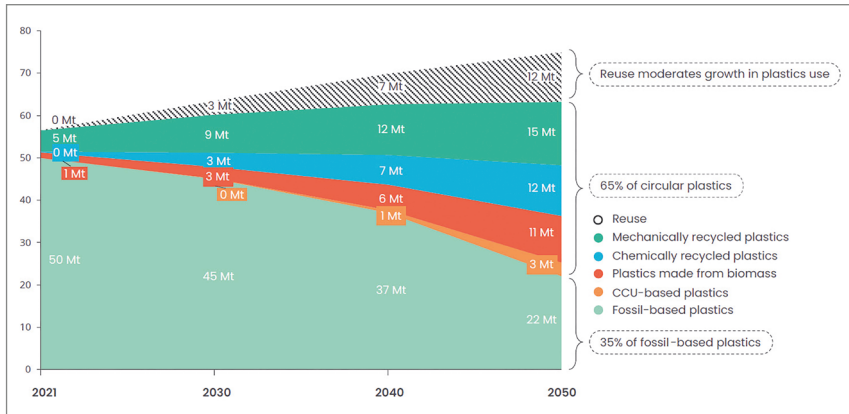


Bild 2: Plastics Europe Roadmap bis 2050 [3]

Außerdem stellt der „Balanced Approach“ von Bachmann et al. [16] eine unbequeme Frage: Was, wenn selbst ambitionierte Effizienzgewinne nicht reichen? Die Antwort der Studie ist eindeutig – nach 2030 genügen die heute verfügbaren Hebel allein nicht mehr, um die planetaren Grenzen einzuhalten. Erforderlich ist ein vollständiger systemischer Wandel bei der Herstellung, Verwendung und Entsorgung von Kunststoffen. Technologie ist ein notwendiger, aber kein hinreichender Treiber. Ihre Wirkung entfaltet sich erst im Zusammenspiel mit effizienter Regulierung und gesellschaftlicher Akzeptanz.

Drei Szenarien – nur eines davon hilft uns weiter

Tab. 1 fasst drei grundlegende Szenarien zusammen. Szenario C ist das einzige, das die planetaren Grenzen einhält – und damit der eigentliche Referenzrahmen für alle folgenden Überlegungen.

Warum scheitern die Szenarien A und B?

- Szenario A verlängert den Status quo: Effizienzgewinne werden durch Produktionswachstum überkompensiert – ein Muster, das man aus anderen Bereichen kennt, vom Energieverbrauch bis zum Flugverkehr.
- Szenario B setzt auf technologische Innovation ohne Nachfragebegrenzung: Die Recyclingquoten steigen, aber die Absolutmengen an Kunststoff auch. Das wäre kein Kreislauf, sondern ein schneller drehendes Hamsterrad.

Szenario	Merkmale	Konsequenzen 2050
A – Regulatorischer Minimalismus	Compliance ohne Transformation; Trendfortschreibung mit leichten Effizienzgewinnen	Fehlbewirtschaftung +100%, Gesund- heitskosten verdoppeln sich, THG-Emis- sionen mehr als verdoppelt
B – Technologiegetriebene Transition	Skalierung chem. Recycling, Ausbau mech. Recycling, KI-Sortierung, bio- basierte Polymere; Innovation schlägt Regulierung	78% Zirkularität theoretisch erreichbar, hohe Energie- und Investitionsbedarfe, Nachfrage unkontrolliert
C – Systemischer Wandel	Nachfragebegrenzung + Design for Circularity + politische Steuerung	Einziges Szenario innerhalb planetarer Grenzen, erfordert globale Governance und Verhaltensänderung

Tab. 1: Drei Szenarien bis 2050, basierend auf den ausgewerteten Quellen (Quelle: OST IMP)

- Nur Szenario C adressiert gleichzeitig Volumen, Design und Governance. Es ist das unbequemste Szenario – und vermutlich das einzige, das eine substantielle Verbesserung gegenüber dem Status quo ermöglicht.

Das Dilemma der Zukunftsforscher

Klassische Zukunftsprognosen scheitern oft an unvorhergesehenen Diskontinuitäten. [17] Thomas Watsons (IBM) berühmte Einschätzung von 1943 – die Welt brauche nicht mehr als fünf Computer – ist ein gutes Beispiel für das Versagen linearer Extrapolation in komplexen Systemen. Ähnliches lässt sich für Pfadabhängigkeiten in der Petrochemie zeigen: Ohne regulative Eingriffe ändern sich Strukturen nicht, auch wenn technische Alternativen längst verfügbar sind. [18]

Abhilfe bietet die bewusste Integration von Wildcards – das sind disruptive Faktoren wie politische Kipppunkte, technologische Durchbrüche oder Paradigmenwechsel, die das System fundamental neu ordnen könnten – durch positive wie negative Wirkungen.

Auf der Seite der Beschleuniger stehen Wildcards mit positiver Wirkung wie beispielsweise: technologische Sprünge in der CCU-basierten Rohstoffgewinnung (CCU = Carbon Capture and Use) oder weiterentwickelte Recyclingmethoden [19], ein Durchbruch beim globalen Plastikabkommen [20], ein unerwartet schneller Kostenverfall bei erneuerbarem Strom [21] oder dramatisch steigende Ölpreise. Geopolitische Konflikte können durch Verteuerung fossiler Routen nachhaltige Lösungen begünstigen (Bild 3).

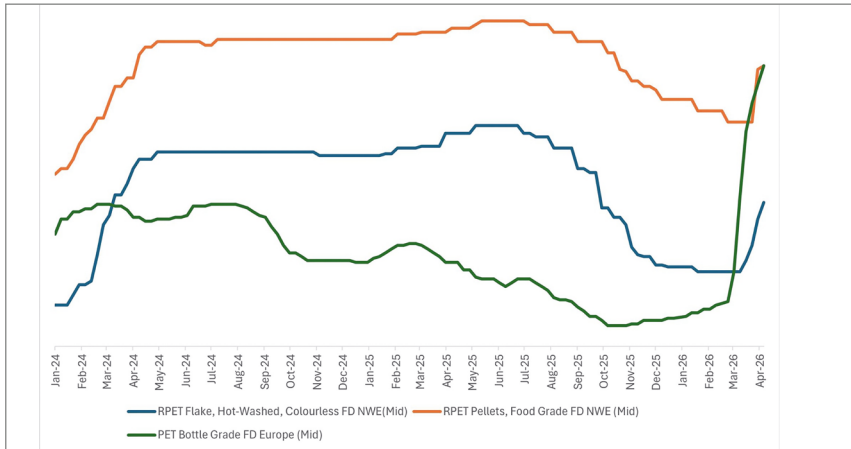


Bild 3: Preisanstieg bei fossilbasiertem im Vergleich zu recyceltem PET im April 2026 aufgrund der Auswirkungen des Iran-Krieges [22]

Nicht zu unterschätzen wird in Zukunft eine KI-gestützte Materialentwicklung sein, die Kreislauffähigkeit, Performance und Nachhaltigkeit von Anfang an integriert statt nachträglich optimiert [23, 24] oder auch die rasante Diffusion von KI-basierten Sortier- und Robotiksystemen, die Qualität und Effizienz des Recyclings massiv erhöhen können. [25, 26]

Auf der Seite der Bremser: das aktuelle Unternehmenssterben im Recyclingmarkt, Fehlsubventionen in fossile Energien und Fehlinvestitionen in bestehende Infrastrukturen, die Verhinderung internationaler Abkommen durch Handelskonflikte oder geopolitisch bedingte Deregulierungswellen und die strukturelle Veränderungsresistenz der Fossillobby – nicht aus Böswilligkeit, sondern aus fehlgeleiteter ökonomischer Logik. [18]

Inkrementelle Verbesserungen dürfen in diesem Kontext nicht unterschätzt werden. Der kontinuierlich steigende Wirkungsgrad von Solarmodulen zeigt, wie stetige Kleinarbeit letztlich zum Durchbruch führt. Für die Steigerung der Recyclingquoten von heute < 10% auf die angestrebten 50% und mehr bis 2040 wird ähnliche Geduld und Konsequenz nötig sein. [3]

Backcasting: Vom Ziel zur Gegenwart

Backcasting dreht die Denkrichtung um. Dieser Ansatz setzt das gewünschte Zielbild als Ausgangspunkt und leitet aus der Rückwärtsperspektive ab, welche Weichen-

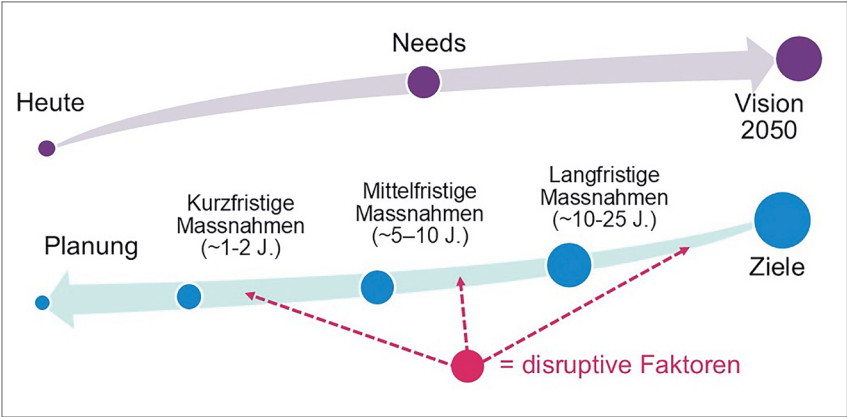


Bild 4: Veranschaulichung des Backcasting-Prozesses mit disruptiven Faktoren (Bild: OST IMP)

stellungen, Handlungsschritte und Meilensteine heute notwendig sind (Bild 4). Statt zu fragen: „Wohin entwickeln wir uns?“, fragt man: „Was muss heute wahr sein, damit 2050 das Gewünschte möglich ist?“

Ein konkretes Beispiel: Wenn 2050 nettoneutrale Emissionen im Kunststoffsystem erreicht werden sollen, muss 2035 der überwiegende Teil der Energie bereits erneuerbar sein (was allerdings sehr stark von den Annahmen bezüglich Strommix abhängt). [15] Wenn 2040 mehr als 50% hochwertiges Recycling stattfinden soll, müssen 2030 die Designstandards etabliert und die Sortierinfrastruktur ausgebaut sein. [3, 11] Die Meilensteine hängen dabei logisch voneinander ab. Wer 2030 die Designstandards verpasst, kann 2040 die Recyclingquoten nicht erreichen. Wer 2040 die Recyclingquoten verfehlt, verpasst 2050 die Nettoneutralität. Tab. 2 zeigt die wesentlichen Meilensteine.

Horizont	Wesentliche Meilensteine
2030	Designstandards etabliert, PCF-Daten als Pflichtangabe, Sortierinfrastruktur ausgebaut, SSRbD-Prinzipien in Produktregulierung verankert
2040	>50% hochwertiges Recycling, chemisches Recycling skaliert, fossile Primärproduktion rückläufig, überwiegend erneuerbare Energien, DPP (digitaler Produktpass) in Sektoren aktiv
2050	Nettoneutralität des Kunststoffsystems; <10 % Deponierung, DPP flächendeckend, nahezu vollständige Entkopplung von fossilen Rohstoffen

Tab. 2: Zielbündel gemäß Backcasting-Ansatz [2, 3, 11]

Strategien für einen systemischen Wandel

„Systemischer Wandel“ ist ein Begriff, der in Nachhaltigkeitsdiskussionen so oft verwendet wird, dass er seine Schärfe verloren hat. Konkret ist damit gemeint, dass es nicht ausreicht, einzelne Prozesse zu optimieren oder einzelne Produkte zu ersetzen. Notwendig ist eine gleichzeitige Veränderung auf der Ebene der Leitbilder, der Strukturen und der Technologien – und das in einer Geschwindigkeit, die mit dem Backcasting-Horizont kompatibel ist.

Die gute Nachricht: Die Voraussetzungen dafür sind besser als noch vor zehn Jahren. Die wachsende Erkenntnis, dass Kreislaufwirtschaft nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern wirtschaftlich attraktiv ist, verändert die Diskussion. [27, 28] Lokale und regionale Wertschöpfungsketten gewinnen auch aus geopolitischen Gründen an Attraktivität – eine Entwicklung, die durch aktuelle Handelskonflikte noch beschleunigt wird.

Auf der strukturellen Ebene braucht es Regulierungen, die nicht nur verbieten, sondern gestalten: globale Governance-Rahmen, CO₂-Bepreisung, Carbon Border Adjustment für Polymere [18, 20], Designstandards, Verwertungsprioritäten nach dem 10R-Prinzip und Performance Pricing. Eine Deckelung der Produktionsmengen – das unangenehmste aller Instrumente – ist ohne internationale Vereinbarungen kaum realistisch. Aber ohne eine Reduktion des globalen Kunststoffverbrauchs bleibt Szenario C eine Wunschvorstellung.

Upstream: Nachfrage senken, Design neu denken

Die wirksamsten Maßnahmen stehen am Anfang: bevor ein Produkt entworfen, ein Material gewählt oder ein Additiv eingemischt wird. Nachfragereduktion und Design for Circularity gelten als die effektivsten Upstream-Hebel. [8, 29, 30] Das SSRbD-Konzept – Safe, Sustainable and Recyclable by Design – beschreibt, was das konkret bedeutet: Polymere werden von Anfang an so entwickelt, dass gefährliche Chemikalien ausgeschlossen sind. [31] Für Additive werden überdies global einheitliche Regulierungen und Verbote notwendig; mehr als 2.400 identifizierte bedenkliche Substanzen erfordern ein systematisches Substitutionsmanagement. [32, 33]

Was die Polymere selbst betrifft, unterstützt gezieltes Mono-Material-Design die Wiederverwertung erheblich. Eine Vereinfachung der Polymervielfalt auf wenige, optimal recycelbare Sorten wäre sinnvoll – nach dem 80/20-Prinzip: PP und PET als universelle Werkstoffe für Verpackungen und viele technische Teile. Hochwertigere Spezialkunststoffe nur in Anwendungen, wo sie wirklich gebraucht werden (und wo wegen

kleinerer Mengen und längerer Lebensdauer die Umweltrelevanz geringer ist). Elastomere wie Silikone oder EPDM könnten sukzessive durch bioabbaubare oder recycelbare TPU ersetzt werden [34,35], Duroplaste mittelfristig durch Hochleistungsthermo-plaste oder recycelbare Vitrimere. [36, 37]

Um die relevanten Polymersysteme klimaneutral zu produzieren, sind viele Technologien bereits entwickelt – etwa die Konversion von CO_2 in Methanol und dann in Polyolefine. [38] Breite Marktakzeptanz und neue Regulierungen für massenbilanzierbare Polymere [39] sowie Durchbrüche beim chemischen Recycling [40] werden die Nutzung von CCU-, biobasierten und regenerierten Quellen begünstigen – und damit einen netto-neutralen oder sogar negativen CO_2 -Fußabdruck realisierbar machen. [19, 21] Saubere Energie ist dabei kein Bonus, sondern eine Grundvoraussetzung.

Downstream: Kreisläufe separieren und schließen

Am Lebensende eines Kunststoffprodukts wird sich zeigen, ob die Entscheidungen am Anfang gut waren. Ein endgültiges „End of Life“ wird es künftig nur für einen kleinen Rest geben – für stark vermischte und kontaminierte Sortierreste, bei denen die Verbrennung mit nachgelagerter Kohlenstoffsequestrierung das sauberste verfügbare Mittel bleibt. Eine vielversprechende Alternative wäre die Carbonisierung: Der verfügbare Kohlenstoff wird, ohne erst über die Gasphase zu gehen, durch Pyrolyse fixiert, in technische Substrate eingebaut oder deponiert und so dauerhaft aus dem Kreislauf geschleust. [41]

Entscheidend für geschlossene Kreisläufe ist die weitestgehende Entkopplung von Bio- und Technosphäre (**Bild 5**). Alle nicht bioabbaubaren Kunststoffe müssen konsequent im technischen Kreislauf gehalten werden. Dazu gehören auch Drop-in-Kunststoffe, die zwar biobasiert oder nachhaltig erzeugt, aber materialseitig identisch mit technischen Kunststoffen sind. Was fehlgeleitete Emissionen in die Umwelt betrifft, so sollte das Littering dann signifikant abnehmen, wenn Kunststoffabfälle einen ökonomischen Wert erhalten – durch Steuern, Abgaben [42], Pfandsysteme oder Upcycling. [8, 43] Technologische Fortschritte wie KI-gestützte Sortierung sowie Molecular Sorting, d.h. komplementäre chemische und biologische Recyclingverfahren, schließen die Lücken, die mechanisches Recycling offen lässt. [7]

Alles, was in die Biosphäre gelangen kann, sollte dagegen generell bioabbaubar sein, etwa Kunststofffolien in Mischabfällen aus dem Agrarbereich, der Gastronomie oder dem Gesundheitswesen. Häufig gelangen Kunststoffe auch in Form von Mikroplastik in die Biosphäre. Der direkteste Lösungsansatz wäre hier, die für Mikroplastik

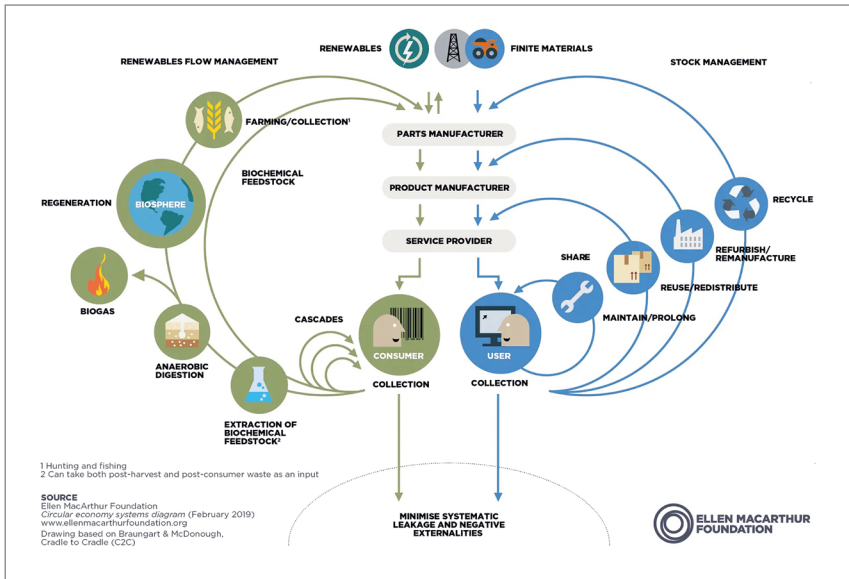


Bild 5: Butterfly-Diagramm, das den biologischen und technischen Kreislauf visualisiert [44]

bekannten und relevanten Emissionsquellen wie Reifen, Textilien oder Schuhsohlen [45] auf bioabbaubare Polymere umzustellen. Wo dies nicht möglich ist, müssen die Emissionen vermindert werden sowie alle Möglichkeiten zur Rückhaltung, etwa in Kläranlagen oder Filtern von Haushaltsgeräten, intensiv weiterentwickelt und flächendeckend genutzt werden. Schließlich entstehen auch schon Technologien zur Entfernung von Mikroplastik aus der Umwelt. [46] Hilfreich wäre außerdem eine Versachlichung und stärker faktenbasierte Diskussion über Mikroplastik, nachdem zunehmend Artefakte bei den Forschungsergebnissen bekannt werden. [47, 48]

Hochpreissegmente als Innovationslabor

Obwohl die moderne Industrie in der Lage ist, komplexe Produkte mit hoher Fertigungstiefe und Präzision in hoher Qualität herzustellen, dominieren beim Recycling immer noch einfache Techniken wie Shreddern oder manuelle Sortierung. Ein Gegenbeispiel ist Apples Zerlegeroboter Daisy [49]. Die Entwicklung solcher fortgeschrittenen Recyclingtechnologien kann auch strategisch genutzt werden im Sinne eines Trickle-Down-Effekts. Der Investitionsaufwand für die Implementierung geschlossener Kreisläufe kann sich in Hochpreissegmenten mit großen Margen und hohem regulatorischem Druck rechnen, etwa in der Medizintechnik. [50] Die solcherart

entwickelten und erprobten Technologien können dann in einer zweiten Phase auf niederwertigere Abfallströme ausgerollt werden, beispielsweise Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikabfällen, um später auch auf Haushaltsabfälle übertragen zu werden. Das ist kein Selbstläufer, aber ein realistischer Pfad – und er nutzt die Bereitschaft der Industrie, dort zu investieren, wo es sich lohnt. Parallel dazu schafft die Digitalisierung die Infrastruktur, ohne die Kreisläufe nicht geschlossen werden können: KI-gestützte Produktentwicklung, Digitale Produktpässe (DPP), Trackingsysteme und interoperable Datenstandards. [3] Ohne diese Informationsinfrastruktur bleibt Kreislaufwirtschaft Theorie.

Was heute zu tun ist

Die Synthese aus Literaturevaluation, Backcasting, Szenarioanalyse und Expertendiskussion ergibt keine erschöpfende Liste, aber eine Auswahl von Handlungsfeldern, die sich durch eine potenziell hohe Hebelwirkung und gleichzeitig realistische Machbarkeit im laufenden Jahrzehnt auszeichnen.

- Gestaltungsaufgabe auf der Leitbild-Ebene mit einem hohen Wirkungspotenzial wäre ein Imagewandel bei Kunststoffen. Wenn es gelingt, Plastic-Bashing und Polarisierung zu beenden [51], damit die Stakeholder voneinander lernen, lösungsorientiert zusammenarbeiten und die Wissenschaft ihre Unabhängigkeit und Glaubwürdigkeit wiedererlangt, könnte dies alle anderen Elemente einer systemischen Transformation entscheidend beschleunigen.
- Auf der Strukturebene sind jetzt kreative Lösungen für eine funktionierende Governance und effiziente Anreizsysteme gefragt, die durch Signalwirkung und Wertschöpfungspotenzial überzeugen. Performance Pricing wäre ein solcher Ansatz [52]: Wer kreislaufhinderliche Eigenschaften verlangt, zahlt einen Aufpreis. Die Mehreinnahmen finanzieren die Kreislaufinfrastruktur. Bei Massenkunststoffen könnte schon eine geringfügige Abgabe für einen impliziten Materialwert sorgen, der Sammelsysteme initiiert, das Littering beendet und gleichzeitig noch ein Recycling-Business generiert. [43] Um einiges schwieriger dürfte die Schaffung durchsetzbarer Instrumente zur Nachfragebegrenzung werden.
- Auf der technologischen Ebene sind Materialien, Produkte und Kreisläufe zu betrachten. Was die Rohstoffbasis betrifft, ist das volle Potenzial CO₂-basierter, biobasierter und/oder bioabbaubarer Kunststoffe noch längst nicht erschlossen. Drop-in-Materialien aus erneuerbaren Quellen sind dabei eine kurzfristig verfügbare Lösung mit überschaubarem Entwicklungsaufwand. Es braucht interdisziplinäre Forschung – Polymerchemie, Verfahrenstechnik, Systemmodellierung, Politik- und Sozialwissenschaften – intensiv unterstützt durch gezielte Regulierungsarbeit und öffentliche Sichtbarkeit.

- Designstandards sind ein Powertool, wenn sie auch wirtschaftlich überzeugen. Auf der Materialeite ist in den kommenden Monaten und Jahren eine starke Verankerung von ESPR- und SSRbD-Kriterien an ausgewählten Use Cases zu erwarten – ebenso pilotierte und auf Skalierbarkeit geprüfte Digitale Produktpässe. Starke Enabler wären außerdem Carbon Footprints (PCF) als Pflichtangabe bei Kunststoffen, vernetzte Datenbanken und Vorgaben für eine reduzierte Polymerkomplexität. In Konsequenz aus den z.T. langen Produktlebenszyklen lohnt sich jede Investition in vorausschauendes Design.
- Bei produktseitigen Designstandards können Produktentwickelnde bereits direkt einen Unterschied machen, ohne auf Regulierung zu warten. Vorausschauende Anforderungen im Pflichtenheft – Kreislauffähigkeit (von Reuse bis Recycle), minimierter Materialeinsatz, ökologisch sinnvolle Materialwahl, verlängerte Lebensdauer – sind kein utopisches Ziel, sondern eine Frage der Priorität. Die Entwicklung entsprechender Tools ist in vollem Gange. [53]
- Im Downstream wird die Bandbreite an Lösungen zur Verwertung oder Kreislaufführung von Kunststoffen immer größer. Chemisches Recycling fungiert als Ergänzung, nicht als Ersatz für mechanisches Recycling. Der Weg dorthin führt über Machbarkeitsnachweise, lokale Wertschöpfungspartnerschaften und einen intensiven Dialog mit der Öffentlichkeit. [54] Ein kaskadierendes Recycling [55] nach effizienter Triage kann dabei Downcycling – insbesondere nach mehreren mechanischen Zyklen – verhindern.
- Technologietransfer: Ergebnisse erfolgreicher Lösungsansätze können an andere Branchen und Abfallströme adaptiert und so technologische Fortschritte weitergegeben werden. Ein Beispiel wäre die komplexe Aufbereitung medizinischer Kunststoffabfälle [50] als Modell für weitgehend geschlossene Kreisläufe – mit recyclinggerechtem Design, automatischer Zerlegung, KI-gestützter Sortierung und Multi-Stream-Recycling.
- Disruptive Faktoren kann man natürlich nicht „planen“, aber mit einer gewissen Plausibilität in die Agenda einfließen lassen. Erneuerbare Energien wachsen weitaus stärker als bisher vorhergesehen und werden mindestens eine grundlegende Neubewertung sämtlicher Lebenszyklusanalysen in der Kreislaufwirtschaft zur Folge haben. Ähnlich große Effekte sind von KI-Anwendungen zu erwarten und geopolitische Ereignisse, welche sowohl massive positive als auch negative Wirkungen auf die Rohstoff- und Energiepolitik nach sich ziehen können, treten mit zunehmender Häufigkeit auf.

Fazit

Kunststoffe müssen nicht eliminiert werden. Sie müssen neu gedacht werden – als zentraler Werkstoff einer klimaneutralen Industriegesellschaft, der seinen Platz hat –

aber nur dann, wenn dieser Platz durch konsequentes Handeln heute gestaltet wird. Die nächste Generation wird mit den Kunststoffen, Regulierungen und Technologien umgehen, die wir heute entwerfen – oder mit den Problemen, die wir durch Untätigkeit hinterlassen.

Das ist keine Wohlfühl-Botschaft. Aber sie ist ehrlicher als die Perspektive, dass Effizienzgewinne und technologischer Fortschritt allein die Lösung bringen. Die Szenarien weisen darauf hin, dass das nicht ausreicht. Das Backcasting zeigt, dass das Zeitfenster noch offen ist, um jetzt konstruktiv zusammenzuarbeiten.

Literatur

- [1] Houssini, K., Li, J. & Tan, Q.: Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Commun Earth Environ* 6, 257 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02169-5>
- [2] OECD: Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. OECD Publishing, Paris, 2022. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>
- [3] Plastics Europe: Our industry's roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2050. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/10/PlasticsEurope_Summary_24.10.pdf
- [4] IPEN: Der Plastikvertrag. <https://stoppoisonplastic.org/plastics-treaty/>, abgerufen am 14.04.2026.
- [5] Deeney, M., Hamelin, L., Vialle, C., Yan, X., Green, R., Yates, J., Kadiyala, S.: Global health burdens of plastics: a lifecycle assessment model from 2016 to 2040. *Lancet Planet. Health* 2026. <https://doi.org/10.1016/j.lanplh.2025.101406>
- [6] Landrigan, P. J., Dunlop, S., Treshova, M. et al.: The Lancet Countdown on Health and Plastics. *Lancet* 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673625014473>
- [7] Maurer, A.: Zurück in die Zukunft: angenommen 2050 sind alle Kunststoffe kreislauffähig und klimaneutral - was müssen wir heute dafür tun?. LinkedIn-Artikel, 04.12.2025. <https://www.linkedin.com/pulse/zur%C3%BCck-die-zukunft-angenommen-2050-sind-alle-und-m%C3%BCssen-arno-maurer-mn48f>
- [8] Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R.M. et al.: Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science* 2020, 369(6510), 1455–1461. <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>
- [9] Sonke, J. E., Koenig, A. M., Segur, T., Yakovenko, N.: Global environmental plastics dispersal under OECD policy scenarios towards 2060. *Science Advances* 2025. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adu2396>
- [10] Stegmann, P., Daioglou, V., Londo, M., Van Vuuren, D., Junginger, M.: Plastic futures and their CO₂ emissions. *Nature* 2022, 612, 272–276. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05422-5>
- [11] SYSTEMIQ/Ellen MacArthur Foundation: ReShaping Plastics. SYSTEMIQ Report, 2022, <https://www.systemiq.earth/systems/circular-materials/reshaping-plastics/>

- [12] Van Roijen, E. & Miller, S.: Leveraging biogenic resources to achieve global plastic decarbonization by 2050. *Nat. Commun.* 2025, 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62877-6>
- [13] Netherlands, Government of the: Circular Dutch economy by 2050. <https://www.government.nl/topics/circular-economy/circular-dutch-economy-by-2050>, abgerufen am 17.04.2026.
- [14] Erradhouani, B., Coma, V., Sonnemann, G. et al.: Transition to bio-based plastic packaging reveals complex climate–biodiversity trade-offs. *Nat Commun* 17, 3630 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41467-026-69016-9>
- [15] Huo, J., Wang, Z., Oberschelp, C., Hellweg, S.: Global plastic industry transition addressing key drivers of the triple planetary crisis. *Environ. Sci. Technol.* 59, 19257–19268 (2025). <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5c08703>
- [16] Bachmann, M., Zibunas, C., Hartmann, J., Tulus, V., Suh, S., Guillén-Gosálbez, G., Bardow, A.: Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nat. Sustainability* 2023, 6, 599–610. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9>
- [17] Eberl, U.: *Zukunft 2050 – wie wir schon heute die Zukunft erfinden*. Beltz & Gelberg, 2011.
- [18] Bauer, F., Nielsen, T., Nilsson, L., Palm, E., Ericsson, K., Frane, A., Cullen, J.: Plastics and climate change: breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. *One Earth* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.007>
- [19] Vidal, F., van der Marel, E.R., Kerr, R.W.F. et al.: Designing a circular carbon and plastics economy for a sustainable future. *Nature* 2024, 626, 45–57. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06939-z>
- [20] Carbon Brief: Five charts: Why a UN plastics treaty matters for climate change. 2023. <https://www.carbonbrief.org/five-charts-why-a-un-plastics-treaty-matters-for-climate-change>
- [21] Meys, R., Kätelhöhn, A., Bachmann, M., Winter, B., Zibunas, C., Suh, S., Bardow, A.: Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy. *Science* 2021, 374, 71–76. <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>
- [22] Tudball, M., ICIS, LinkedIn-Beitrag, 26.04.2026. https://www.linkedin.com/posts/matttudball_recycling-recycledplastic-plastic-activity-7449439578865827840-zJPc
- [23] Börger, L.: Wird Künstliche Intelligenz die Kreislaufwirtschaft erleichtern? *Ingenieur.de*, 09.02.2026 <https://www.ingenieur.de/fachmedien/vdi-energie-umwelt/wird-kuenstliche-intelligenz-die-kreislaufwirtschaft-erleichtern/>
- [24] SKZ: „RezyPart“ – Optimierter Einsatz von Rezyklaten im Fahrzeugbau dank KI, 26.02.2026. <https://www.skz.de/presse/rezypart-optimierter-einsatz-von-rezyklaten-im-fahrzeugbau-dank-kuenstlicher-intelligenz>
- [25] Lubongo, C., Bin Daej, M.A.A.; Alexandridis, P.: Recent Developments in Technology for Sorting Plastic for Recycling: The Emergence of Artificial Intelligence and the Rise of the Robots. *Recycling* 2024, 9, 59. <https://doi.org/10.3390/recycling9040059>
- [26] Fang, Y., Wen, Y., Dai, L., Wang, C., You, S., Li, W.: Artificial intelligence in plastic recycling and conversion: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108090>

- [27] Zimmermann, N. C.: Wie das Wirtschaften in Kreisläufen zum Wettbewerbsvorteil wird. Handelsblatt, 27.01.2026, <https://www.handelsblatt.com/meinung/kolumnen/industrie-wie-das-wirtschaften-in-kreislaeufen-zum-wettbewerbsvorteil-wird/100192779.html>
- [28] BDI: Kreislaufwirtschaft: 880 Milliarden Euro Wertschöpfungspotenzial für die deutsche Industrie, 05.05.2026. <https://bdi.eu/de/articles/presse/kreislaufwirtschaft-880-milliarden-euro-wertschoepfungspotenzial-fuer-die-deutsche-industrie>
- [29] Prata, J., Patrício Silva, A.L., da Costa, J.P.: Solutions and Integrated Strategies for the Control and Mitigation of Plastic and Microplastic Pollution. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132411>
- [30] ESPR – Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Verordnung (EU) 2024/1781, in Kraft seit 28. Juni 2024. European Commission: European Green Deal & Circular Economy Action Plan. ec.europa.eu, 2019/2022.
- [31] Soeteman-Hernández, L.G., Cabrera, G., Huegun, A. et al.: Safe, Sustainable, and Recyclable by Design (SSRbD): A Qualitative Integrated Approach Applied to Polymeric Materials Early in the Innovation Process. *Sustainability & Circularity NOW* 2025; 02 <https://doi.org/10.1055/a-2554-7325>
- [32] Wiesinger, H., Wang, Z., Hellweg, S.: Deep Dive into Plastic Monomers, Additives, and Processing Aids. *Environ. Sci. Technol.* 2021, 55(13), 9339–9351, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c00976>
- [33] Wang, J., Chan, F. K. S., Johnson, M. F., Chan, H. K., Cui, Y., Chen, J., Chen, W. Q.: Material flow analysis of chemical additives in plastics: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 54(23), 1692–1708 (2024). <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2354993>
- [34] Wisniewska, P., Peyman Ezzati, P., Haponiuk, J.: Towards developing fully sustainable elastomers: the role of chemistry. *Green Chem.* 2025, 27, 1254–1277, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/gc/d4gc03802a>
- [35] ZSR: Silicon vs. TPU: Which is the best choice? <https://consumersiliconeproducts.com/blog/silicon-vs-tpu-which-is-the-best-choice.html>, abgerufen am 05.05.2026.
- [36] Bulutcu, D., Eschig, S.: Bio-based vitrimers and covalent adaptable networks – a short review. *Next Sustainability*, 7, 2026, 100235, <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100235>
- [37] Maurer, A., Bruderer, M., Valiollahi Bisheh, R., Ulmer, J., Cerqua, S., Bonora, E., Brändli, C.: CO₂-neutrale, biobasierte und rezyklierbare Duroplaste. *Technologietag 2024*, OST Campus Buchs. https://www.researchgate.net/publication/381377156_CO2-neutrale_biobasierte_und_rezyklierbare_Duroplaste
- [38] Klotz, M., Oberschelp, C., Salah, C., Subal, L., Hellweg, S.: The role of chemical and solvent-based recycling within a sustainable circular economy for plastics. *Sci. Total Environ.* 906, 2024, 167586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167586>
- [39] Santos, B.: EU mass balance rules published. *Plastics News*, 20.02.2026. <https://www.plasticsnews.com/public-policy/sp-eu-mass-balance-rules-supd-published/>

- [40] Plastics Europe: Chemical recycling and mass balance explained. 2026. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/chemical-recycling-mass-balance-explained/>, abgerufen am 15.04.2026.
- [41] Lura, P., Lunati, I., Desing, H., Heuberger, M., Bach, C., Richner, P.: Mining the atmosphere: a concrete solution to global warming. *Resour. Conserv. Recycl.* 2025, 212, 107968. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107968>
- [42] Nikiema, J. & Asiedu, Z.: A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022, 29, 24547–24573. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-18038-5>
- [43] Charles, D. & Cumming, P.: The Polymer Premium: A Fee on Plastic Pollution. Minderoo Foundation, 2024. <https://cdn.minderoo.org/content/uploads/2024/04/21232940/The-Polymer-Premium-a-Fee-on-Plastic-Pollution.pdf>
- [44] EMF – Ellen MacArthur Foundation: The butterfly diagram: visualising the circular economy. 2021. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- [45] ZHAW: In Rekordzeit zur abbaubaren Schuhsohle. 08.04.2026. <https://www.zhaw.ch/de/engineering/ueber-uns/news/news/event-news/in-rekordzeit-zur-abbaubaren-schuhsohle>
- [46] Wasser 3.0: Mikroplastik-Entfernung aus Wasser und Abwasser. <https://wasserdreinull.de/technologie/mikroplastik-entfernung>, abgerufen am 15.04.2026.
- [47] Monikh, F. A., Materić, D., Valsami-Jones, E. et al.: Challenges in studying microplastics in human brain. *Nat Med* 31, 4034–4035 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-025-04045-3>
- [48] McNeil, A. & Clough, M.: Scientists Found a Big Problem With How We Measure Microplastics. *Environment*, 01 April 2026. <https://www.sciencealert.com/scientists-found-a-big-problem-with-how-we-measure-microplastics>
- [49] ZEIT: Dieser Roboter könnte 1,2 Millionen iPhones zerlegen. Könnte. 19.04.2026. <https://www.zeit.de/digital/2026-04/apple-recycling-roboter-daisy-niederlande-iphone-nachhaltigkeit>
- [50] Gysel, C.: Be Circular – der Reichtum im Abfall. *Wirtschaftsmagazin Schaffhausen* 1/2026. <https://www.schaffhausen-area.ch/de/maker-story/becircular>
- [51] Maurer, A.: Beendet das Plastic Bashing – legt den Streit bei und packt gemeinsam an. *DICHT! 2*, 2023, 46. <https://www.isgatec.com/artikel/beendet-das-plastic-bashing-legt-den-streit-bei-und-packt-gemeinsam-an/35839>
- [52] Brunner, A.: pers. Mitt. (2025)
- [53] INCREASE: Recyclability Assessment Tool (RAT). <https://increase-project.eu/recyclability-assessment-tool-rat/>, abgerufen am 11.05.2026.
- [54] Maurer, A., Ulmer, J., That, P.: Chemisches Recycling – Baustein für Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft? *JAHRBUCH 2026 Dichten. Kleben. Polymer.* Mannheim, 2025, 414–433.
- [55] Tickner, M.: Thoughts from the Alliance – the notion of „Cascade Recycling“. *Alliance to End Plastic Waste*, 03.06.2021. <https://endplasticwaste.org/en/our-stories/notion-of-cascade-recycling>