Das Kunststoff-Zentrum

Prüfung · Bildung · Forschung · Zertifizierung · Vernetzung





Transformationspfade für ein klimaneutrales Bayern 2040

Die Analyse wurde durch die SKZ - KFE gGmbH in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie gGmbH erstellt.

Johannes Schwaiger, Sophia Botsch, Dr. Hermann Achenbach, Dr. Benedikte Hatz, Prof. Dr. Martin Bastian | SKZ Christine Zeher, Nadine Braun, Prof. Dr. Henning Wilts | Wuppertal Institut



Kunststoffe umgeben uns praktisch überall. Machen Sie sich bewusst, in welcher Vielfalt Kunststoffe Verwendung finden – sei es Ihr Zuhause, der Arbeitsplatz oder das Auto und natürlich auch im Sport. Ihre Vielseitigkeit hat Ihnen Tür und Tor in nahezu all unsere Lebensbereiche geöffnet. Die Kehrseite der Medaille ist uns mittlerweile auch gut bekannt. Müllstrudel in den Meeren, Mikroplastik in unseren Böden und Gewässern, im Essen und letztlich in unserem Körper. Hinzu kommt, dass Herstellung und Entsorgung von Kunststoffen schlecht für das Klima sind.

Wenn wir aber unsere Lebensgewohnheiten beibehalten wollen, werden wir langfristig nicht ohne Kunststoffe auskommen. Unsere medizinische Versorgung wäre nicht aufrecht zu erhalten. Zukunftsprojekte wie z. B. die Energiewende oder der digitale Wandel könnten nicht umgesetzt werden.

Zur Lösung des Dilemmas brauchen wir eine klare Vorstellung davon, wie wir Kunststoffe und Umweltschutz unter einen Hut bringen können. Dabei ist die Kreislaufwirtschaft von besonderer Bedeutung. Ich bin froh, dass wir mit der vorliegenden Analyse einen umfassenden Überblick zur Gesamtsituation in Bayern haben. Die identifizierten Handlungsfelder und die konkreten Maßnahmen für eine umweltfreundlichere Nutzung von Kunststoffen, insbesondere durch wirkungsvolle Recyclingprozesse sind für uns politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in unserem Land richtungsweisend. Mit dieser Ausgangsbasis kann Bayern die ökologische Transformation der Kunststoffindustrie in Angriff nehmen und so Vorbild für andere sein.

Viel Freude beim Lesen wünscht Ihr Sandro Kirchner

Staatssekretär des Bayerischen Staatsministeriums des Innern, für Sport und Integration Abgeordneter des Bayerischen Landtags, MdL

INHALT

1	Hintergrund und Ziel der Analyse	6
1.1	Hintergrund der Analyse	8
1.2	Zielstellung der Analyse	9
2	Executive Summary	10
3	Kunststoffe - Herstellung und Nutzung in Bayern	14
3.1	Wirtschaftliche Bedeutung	16
3.2	Kunststoffproduktion und -verarbeitung	17
3.3	Kunststoffnutzung und -verwertung	24
4	Klimawirkung und Einträge in die Umwelt	30
4.1	Klimawirkung von Kunststoffen	32
4.2	Eintragsmengen und -pfade von Kunststoffemissionen sowie deren Umweltwirkungen	33
4.3	Makroplastik	34
4.4	Mikroplastik	35
5	Politische und regulative Rahmenbedingungen	38
6	Konzepte und Technologieroadmaps	44
6.1	Produkt- und Produktionsinnovationen	46
6.2	Kreislaufschließung durch verbesserte Sammel-, Sortier- und Recyclingsysteme	52
6.3	Bioökonomische Potenziale für Kunststoffe	57
6.4	Kunststoffnutzung neu denken	60
6.5	Kunststoffemissionen vermeiden	64
6.6	Ausgleich durch Entzug	68
6.7	Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie – Monitoring und Bildung	69
7	Transformationsszenarien für die bayerische Kunststoffindustrie	70
7.1	Ausgangslage	72
7.2	Klimaszenario 2040 – Umsetzung politischer Vorgaben	74
7.3	Klimaszenario 2040 – Weitgehende Ausschöpfung Technologietrends	75
7.4	Klimaszenario 2040 – Best Case	76
8	Empfehlungen für eine klima- und umweltfreundliche Kunststoffnutzung in Bayern	78
8.1	Erforderliche Einzelmaßnahmen	80
8.2	Institutionelle Begleitung der Entwicklungsthemen	82
9	Quellen	84

HINTERGRUND

und Ziel der Analyse



Hintergrund der Analyse

1.0

Kunststoffe sind von hohem funktionalem Wert und haben großen Anteil am Wohlstand unserer Gesellschaft. Mit mehr als 83.000 Angestellten in Bayern ist die Kunststoffindustrie ein wichtiger Arbeitgeber in unserem Land. Hinzu kommen bedeutungsvolle Branchen, wie der Lebensmitteleinzelhandel oder die Automobil- und Baubranche, die auf Produkte der kunststoffherstellenden und -verarbeitenden Unternehmen angewiesen sind.

Gleichzeitig sind auch die Umweltfolgen von Kunststoffen allgegenwärtig und haben die planetaren Belastungsgrenzen überschritten. Im Zentrum hierbei steht das globale Plastikmüllproblem mit immer noch steigenden Kunststoffeinträgen in Böden, Flüsse und die Ozeane. Hinzu kommt, dass Rohölförderung, Raffinerie und schließlich die Polymerisation zu Kunststoffen energieintensive Prozesse sind, bei denen große Mengen an Treibhausgasen entstehen.

Der Freistaat Bayern will mit verschiedenen politischen Initiativen, wie der bayerischen Nachhaltigkeitsstrategie oder der landeseigenen Bioökonomiestrategie Wege hin zu mehr Umwelt- und Ressourcenschutz beschreiten, mit dem ehrgeizigen Ziel als erstes Bundesland bis 2040 klimaneutral zu werden.

Die zwingend notwendige ökologische Transformation kann von einzelnen Wirtschaftszweigen nur umgesetzt werden, wenn der Status Quo der Umweltwirkungen einer Branche in der Gesamtschau offenkundig wird und hierauf basierend aussichtsreiche Maßnahmen sowie Bedarfe für technologische Weiterentwicklungen sowie deren Transfer in die Industrie identifiziert werden. Hierauf aufbauend lassen sich Roadmaps erstellen, mit denen konkrete Ziele erreicht werden können.

Die vorliegende Analyse zeigt mögliche Transformationspfade zu einer umweltneutralen Kunststoffnutzung für ein klimaneutrales Bayern 2040 auf. Sie soll politischen Entscheidungsträger*Innen helfen, die richtigen Weichen zu stellen, um den Wandel zu einer kreislaufgeführten und biobasierten Kunststofferzeugung und -nutzung zu vollziehen.

Identifikation ungenutzter Potenziale

der Kreislaufwirtschaft sowie Bioökonomie bei Kunststoffen in Bayern



Empfehlungen zur nachhaltigen Transformation

in eine kreislaufgeführte, klima- und umweltneutrale Kunststofferzeugung und -nutzung in Bayern



Abschätzung der Treibhausgasminderungspotenziale

durch eine ressourceneffiziente und stärker biobasierte Kreislaufwirtschaft vor dem Hintergrund der bayerischen Klimaziele bis 2040



Ableitung von Handlungsempfehlungen

für Entwicklungs- und Bildungsbedarfe sowie regulatorische Maßnahmen

EXECUTIVE SUMMARY



Die bayerische Kunststoffindustrie und ihre Klimawirkung

Die bayerische Kunststoffindustrie ist mit 20,8 Mrd. € Umsatz in ca. 600 Betrieben ein wichtiger Wirtschaftsfaktor. Wie die vorliegende Analyse zeigt, steht die Kunststoffindustrie Bayerns am Anfang einer auf Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität ausgerichteten Transformationsphase. Insbesondere Anforderungen, die aus regulatorischen Entwicklungen auf EU-Ebene hervorgehen, wie sich abzeichnende Rezyklatquoten für spezifische Kunststoffanwendungen und Polymere, Verbote von Einwegprodukten oder Anforderungen an die Langlebigkeit und Reparaturfähigkeit von Produkten im Zuge der kommenden EU-Ökodesign-Verordnung, bringen bereits heute oder in naher Zukunft großen Veränderungsdruck für die Kunststoffindustrie mit sich. Hinzu kommt, dass der Freistaat als erstes Bundesland bereits 2040 klimaneutral werden will, was auch für Unternehmen der Kunststoffbranche eine Klimastrategie und ein Klimamanagement unabdingbar macht.

Für die Herstellung und Verwertung in Bayern genutzter Kunststoffe konnte eine Klimawirkungskennzahl (KW-Kennzahl) ermittelt werden, die für das Jahr 2021 bei 8,7 Mio. t CO_2 -Äquivalenten (CO_2 e) liegt (siehe Abschnitt 7). Mit Blick auf das Jahr 2040 wurden drei Treibhausgasszenarien aufgestellt. Szenario 1 orientiert sich hierbei an den bestehenden politischen Vorgaben, Szenario 2 zeigt das Treibhausgasreduktionspotenzial bei der weitgehenden Ausschöpfung vorliegender Technologietrends an und Szenario 3 stellt ein Best-Case Szenario dar, welches insbesondere von einer stärkeren Vermeidung des Kunststoffeinsatzes, auch bedingt durch andere Nutzungsmuster ausgeht. Je nach Szenario können die Treibhausgasemissionen bis 2040 auf 5,5 Mio. t CO_2 e (Szenario 1) bis 2,1 Mio. t CO_2 e (Szenario 3) herabgesenkt werden.

Zielrichtung Umwelt- und Klimaneutralität - Erforderliche Maßnahmen

Um die insgesamt mit Kunststoffen verbundenen Umweltfolgen und insbesondere die Treibhauswirkung herabzusetzen, sind allen voran umfangreichere Entwicklungsarbeiten nötig, bei denen die Materialreduktion, die Substitution von Kunststoffneuware und die gezielte Wiederaufbereitung von Kunststoffabfällen im Fokus stehen. Hierfür muss die technische Infrastruktur an F&E-Einrichtungen in Bayern weiter ausgebaut werden. Die Ausarbeitung der *EU-Ökodesign-Verordnung* muss verbindliche Vorgaben zum Materialeinsatz, der Reparaturfähigkeit sowie zur Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit von Kunststoffen hervorbringen.

Im Bereich der Sortier- und Recyclinginfrastruktur stehen verschiedene Tracertechnologien sowie KI-basierte Erkennungs- und Sortiersysteme in den Startlöchern. Für ihre industrielle Erprobung sollten umfangreiche Entwicklungsprogramme eingeführt werden. Um Investitionssicherheit in Sortier- und Recyclinganlagen zu schaffen, muss die dauerhafte Wettbewerbsfähigkeit für Rezyklate hergestellt werden, was z. B. durch Besteuerung von Kunststoffneuware oder Rezyklatvorgaben in einzelnen Anwendungen erreicht werden kann. Damit Stoffströme am Ende des Lebenszyklus möglichst zielgerichtet gelenkt werden, müssen Geschäftsmodelle für Rücknahme- und Sammelsysteme entwickelt und erprobt werden.

Die Nutzung biobasierte Kunststoffe und der Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Verbund mit Kunststoff sind in der Regel ökologisch vorteilhaft. Im Sinne der bayerischen Bioökonomiestrategie sollten Modellregionen gefördert werden, die die gesamte Wertschöpfungsketten der Rohstoffbereitstellung und Produktherstellung biobasierter Kunst- und Verbundwerkstoffe abdecken und deren technische und wirtschaftliche Tragfähigkeit unter Beweis stellen.

SUMMARY

Der durch gestiegenen Konsum bedingte starke Mehrverbrauch von Kunststoffen (bei Kunststoffverpackungen stieg zwischen 1991 und 2020 in Deutschland der Bedarf um 113 % [1]) zeigt deutlich, dass Materialeffizienz alleine nicht ausreicht. Um den bayerischen Bürger*Innen die Zusammenhänge zwischen derzeitigem Konsum sowie den Umweltfolgen und der Klimakrise stärker bewusst zu machen und Änderungen im Konsumverhalten zu bewirken, sollte die Politik breite Aufklärungskampagnen umsetzen. Die Förderung von Mehrwegsystemen im Verpackungs- und Produktbereich ist dringend erforderlich, um den starken Materialverbrauch durch Einwegsysteme zu reduzieren.

Bayerische Seen, Flüsse und Böden sind mit Mikroplastik belastet. Um die weitere Akkumulation von Mikroplastik zu verhindern, müssen Kunststoffemissionen vermieden werden. Da der weitaus größte Teil des Mikroplastikeintrags aus Reifenabrieb stammt, sind die wirkungsvollsten Maßnahmen die Verringerung des Individualverkehrs durch die Förderung öffentlicher Verkehrsträger, generelle Geschwindigkeitsbegrenzungen und eine Verstetigung des Fahrzeugflusses.

Mit Blick auf die angestrebte "Umwelt- und klimafreundliche Kunststoffherstellung und -verarbeitung" sollte ein Bildungszentrum aufgebaut werden, das adressatenspezifische Bildungsformate für bayerische Unternehmen der Kunststoffindustrie entwickelt. Für Managementebenen müssen hierbei die Wissensvermittlung für strategische Weichenstellungen aufgrund kommender regulativer Entwicklungen im Fokus stehen. Für den Aufbau von Umsetzungs-Know How sind qualifikations- und tätigkeitsgerechte Schulungen bereitzustellen.

Nachhaltigkeitsmonitoring auf Branchenebene

Um die Wirksamkeit eingeleiteter Maßnahmen und technischer Entwicklungen zu überprüfen, wird empfohlen ein Nachhaltigkeitsmonitoring der bayerischen Kunststoffindustrie zu betreiben. Nur so können Umweltfolgen von Reboundeffekten und des fortschreitenden Wirtschaftswachstums mit in die Betrachtung einfließen. Das Beispiel des angestiegenen Aufkommens an Kunststoffverpackungsmüll trotz Materialeffizienzsteigerungen verdeutlicht diese Notwendigkeit. Um solche Effekte hinsichtlich Ressourceneffizienz und Klimawirkung einordnen zu können, steht das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Klimamodell der bayerischen Kunststoffherstellung und -nutzung zur Verfügung und kann auf weitere relevante ökologische *Key Performance Indicator* (KPI), wie Rezyklat- und Biomasseeinsatzquoten, Primärenergiebedarf und auf den Bedarf von fossilen Rohstoffen ausgeweitet werden. Ein derartiges begleitendes Vorgehen kann beispielhaft sein für andere Wirtschaftszweige und Regionen, um gezielt die Fortschritte des ökologischen Wandels zu verfolgen. Mit Bezug auf die bayerische Kunststoffindustrie kann ein Modellprojekt mit Leuchtturmcharakter ins Leben gerufen werden, mit dem Bayern einen eigenen innovativen Ansatz für die ökologische Transformation einer Branche auf den Weg bringt.

Um ein Nachhaltigkeitsmonitoring auf Branchenebene in die Umsetzung zu bringen und die genannten Entwicklungs- und Bildungsbedarfe hierauf abgestimmt gezielt zu initiieren, ist eine institutionelle Bündelung aller Themen erforderlich.

KUNSTSTOFFE

Herstellung und Nutzung in Bayern

In Bayern produzieren viele Firmen der Kunststoffindustrie Vorprodukte, Halbwaren aber auch Produkte direkt für Endkund*Innen. Dies geschieht für unterschiedlichste Anwendungen. Menschen in Bayern nutzen den Werkstoff tagtäglich für verschiedenste Bedarfe. Dieser Abschnitt soll einen Überblick darüber geben, in welchem Maße Kunststoffe sowohl für die hiesige Wirtschaft als auch für jede*n Einzelne*n von uns von Bedeutung sind¹.

l Das Dokument enthält eine Vielzahl quantitativer Angaben. Stammen die Zahlen direkt aus einzelnen Quellen, ist auf die entsprechende Quelle im Literaturverzeichnis verwiesen. Fehlt ein solcher Hinweis, handelt es sich um eine eigene Berechnung/Abschätzung. Weitere Informationen hierzu stellen wir gerne zur Verfügung. Bitte schreiben Sie hierzu eine E-mail an: nachhaltigkeit@skz.de.



Wirtschaftliche Bedeutung

Kunststoffindustrie in Bayern

Die Kunststoffindustrie² ist ein wichtiger Wirtschaftszweig Bayerns. Mit mehr als 83.000 Mitarbeiter*Innen in 599 Betrieben wurde im Jahr 2021 ein Umsatzvolumen von insgesamt 20,8 Mrd. € erzielt [2]. Dies entspricht einem Anteil von 5,5 % am gesamten Umsatz des verarbeitenden Gewerbes in Bayern und stellt etwa ein Fünftel des deutschlandweiten Umsatzes in der Kunststoffindustrie dar.





Branchenumsatz in 2021

Etwa 30 % des Gesamtumsatzes der bayerischen Kunststoffindustrie wurden im Jahr 2021 durch die Herstellung von Primärkunststoffen³ erwirtschaftet. Zentrale Branchen der Weiterverarbeitung sind die Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen (26 %), Verpackungsmitteln (10 %) sowie Baubedarfsartikeln (6 %). Die Verteilung des Umsatzes innerhalb der Kunststoffbranche in Bayern ist somit annähernd die gleiche wie im gesamten Bundesgebiet.

Kunststoffproduktion

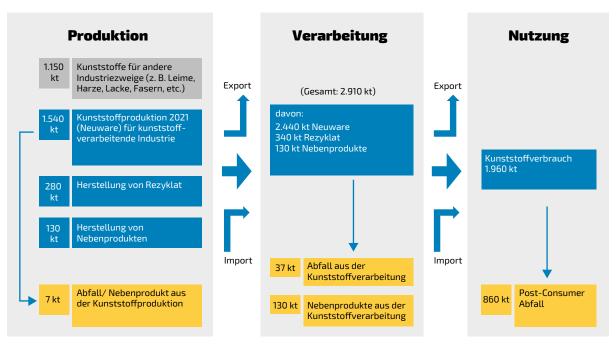
Im Jahr 2021 produzierten deutsche Unternehmen 18,7 Mio. t (Tonnen) Kunststoff als Neuware⁴ [3]. Der bayerische Anteil hieran beträgt ca. 14 % und somit etwa 2,7 Mio. t. Hiervon wurden 1,5 Mio. t in Form von z. B. Pulver und Granulat an die kunststoffverarbeitende Industrie vertrieben. Bei einer Exportquote von ca. 55 % werden davon etwa 0,85 Mio. t an deutsche Kunststoffverarbeiter ausgeliefert [3]. Die übrigen 1,2 Mio. t finden nicht in der kunststoffverarbeitenden Industrie Verwendung, sondern werden in anderen Industriezweigen weiterverarbeitet.

Bei der Kunststoffproduktion in Bayern fallen etwa 7 kt (Kilotonnen) Produktionsabfälle an. Diese werden hauptsächlich einer energetischen (15 %) oder werkstofflichen Verwertung (83 %) zugeführt. Etwa 2 % der Produktionsabfälle werden deponiert.

² Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes aus den Wirtschaftszweigen Herstellung von Kunststoffen in Primärform, Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen aus Kunststoffen, $Herstellung von Verpackungsmitteln \ aus \ Kunststoffen, Herstellung \ von \ Baubedarfsartikeln \ aus \ Kunststoffen \ und \ Herstellung \ von \ sonstigen \ Kunststoffwaren.$

³ Umfasst die Herstellung von Harzen, Kunststoffen und nicht vulkanisierbaren thermoplastischen Elastomeren sowie das Mischen von Harzen nach Kundenwunsch und die Herstellung von synthetischen Harzen nach eigener Spezifikation. Umfasst nicht die Herstellung von Chemiefasern und das Zerkleinern von Kunststoffen zur Materialrückgewinnung,

⁴ Dieser Wert umfasst neben Kunststoffen, die für die Weiterverarbeitung in der Kunststoffindustrie bestimmt sind, auch zusätzlich Polymere für Leime, Harze, Lacke, Beschichtungen, Fasern und Ähnliches, welche in anderen Industriezweigen eine Verwendung finden



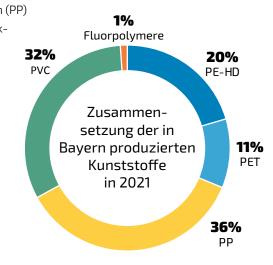
Hergestellte, verarbeitete und verbrauchte Kunststoffmengen in Bayern 2021

Produktionsstandorte in Bayern

Die größten Produktionsstandorte für Kunststoffe befinden sich im bayerischen Chemiedreieck, im Industriepark Münchsmünster sowie im Industriepark Gersthofen. Im Zentrum des bayerischen Chemiedreiecks liegt der Chemiepark Gendorf. Dort produziert die *3M Dyneon GmbH* Fluorpolymere. Die *Vinnolit GmbH & Co. KG* besitzt sowohl in Gendorf als auch im benachbarten Burghausen Anlagen zur Polyvinylchlorid-Produktion.

In Burghausen wird neben Polyvinylchlorid (PVC) auch Polypropylen (PP) produziert. Die *Borealis Polymere GmbH* nutzt hierfür zwei Produktionsanlagen. Der Industriepark Münchsmünster beheimatet einen Produktionsstandort der Firma *Basell Polyolefine GmbH* zur Herstellung von High Density Polyethylen (HD-PE). Zusätzlich wird das Portfolio der in Bayern hergestellten Kunststoffe vom Unternehmen *Indorama Ventures Polymers Germany GmbH* erweitert, welches im Industriepark Gersthofen Polyethylenterphthalat (PET) produziert.

Die Polyolefine PP und HD-PE machen ca. 56 % der bayerischen Kunststoffproduktion aus. Etwa ein Drittel der in Bayern hergestellten Polymere ist PVC. PET hat einen Anteil von ca. 11 % und ungefähr 1 % entfallen auf Fluorpolymere.



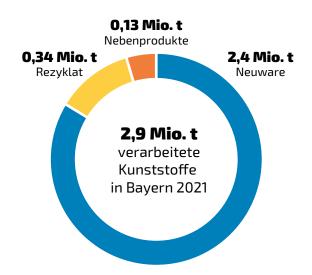


Industriepark Gersthofen (Foto: Ingrid Knöpfle / wikipedia.de)

Kunststoffverarbeitung

In Deutschland wurden im Jahr 2021 insgesamt 14 Mio. t Kunststoffe verarbeitet [3]. Der Anteil Bayerns am gesamtdeutschen Umsatzvolumen des kunststoffverarbeitenden Gewerbes beträgt 21 %. Somit lässt sich abschätzen, dass in Bayern etwa 2,9 Mio. t Kunststoffe verarbeitet wurden. Die kunststoffverarbeitende Industrie bezieht ihren Rohstoff jedoch nur zu einem geringen Teil direkt aus Bayern. Die gesamte Produktionskette beruht stark auf dem innerdeutschen Handel sowie dem Im- und Export von Kunststoffen.

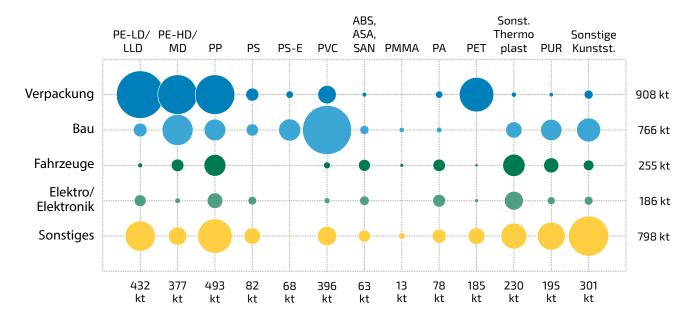
Die in Bayern verarbeiteten Kunststoffe setzen sich aus 2,4 Mio. t Neuware (83 %), 0,34 Mio. t Rezyklat (12 %) und 0,13 Mio. t wiederverwendeten Nebenprodukten⁵ (5 %) zusammen. Das verwendete Rezyklat wiederum besteht zu 23 % aus Post-Industrial- und zu 77 % aus Post-Consumer-Abfällen⁶.



Die kunststoffverarbeitenden Branchen mit dem größten Materialdurchsatz in Bayern waren im Jahr 2021 die Verpackungs- (31%), Bau- (26%) und Fahrzeugindustrie (9%). In der Verpackungsindustrie werden bevorzugt Polythylen (PE), PP und PET verarbeitet, wohingegen in der Baubranche PVC überwiegt. Für die Fahrzeugproduktion werden insbesondere PP, aber auch einige weniger verbreitete Thermoplaste (u. a. Polyamid (PA), Polyoxymethylen (POM), Polycarbonat (PC), Polybutylenterephthalat (PBT), Blends) genutzt. Es gibt zahlreiche weitere Branchen, in denen Kunststoffe eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen u. a. Elektronik, Möbel, Landwirtschaft und Medizin.

⁵ Ein Nebenprodukt liegt vor, wenn ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren anfällt, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist und zusätzlich die Kriterien nach §4 Kreislaufwirtschaftsgesetz erfüllt sind.

⁶ Post-Industrial Abfälle sind Kunststoffe, die bei der Produktion oder Verarbeitung anfallen und zur Entsorgung bzw. Aufbereitung den Betrieb oder den Prozess verlassen. Post-Consumer Abfälle sind Endverbraucherabfälle, die nach dem Gebrauch sowohl aus den gewerblichen als auch den haushaltsnahen Endverbraucher-Bereichen anfallen. [3].



Anwendungsbezogene Verarbeitungsmengen verschiedener Kunststoffe in Bayern, abgeleitet aus dem Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 [3]

Bei der Kunststoffverarbeitung fallen in Bayern etwa 37 kt Verarbeitungsabfälle an. Diese werden hauptsächlich werkstofflich (94 %) und zu einem kleinen Teil energetisch (6 %) verwertet. Zusätzlich entstehen sowohl bei der Kunststoffproduktion aber hauptsächlich bei der Kunststoffverarbeitung 130 kt Nebenprodukte, welche zu 100 % einer unternehmensinternen Wiederverwendung zugeführt werden.

Die Branche der Kunststoffverarbeitung umfasst eine vielfältige Unternehmenslandschaft. Die folgenden Beispiele sollen einen Eindruck hiervon vermitteln.

Kreislaufwirtschaft

Zurzeit überwiegt in der Branche der Kunststoffverarbeitung noch das lineare Wirtschaften. Die in Bayern verarbeitete Kunststoffmenge von 2,9 Mio. t besteht zu 83 % aus Neuware, 12 % aus Rezyklat und 5 % wieder eingesetzten Nebenprodukten.



Biofibre GmbH - Naturfasern als Basis für Materialinnovationen



Biofibre wurde 2011 gegründet und ist ein Joint Venture der LWB Steinl GmbH & Co KG und Anvis Plastics. Das biofibre-Team konzentriert sich auf die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe (NaWaRo) und achtet dabei darauf, dass die verwendeten NaWaRo nicht im Wettbewerb zur Lebensmittelproduktion stehen. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung und Herstellung von Materialinnovationen, wobei die Verarbeitbarkeit dieser Granulate mit etablierten Produktionstechniken einen der Schwerpunkte darstellt.



Aus NaWaRo können sowohl Biopolymere als auch natürliche Füll- und Faserstoffe gewonnen werden, die sich hervorragend zur Herstellung von biobasierten und/oder bioabbaubaren/kompostierbaren Compounds eignen. Die Biofibre® Compounds sind im Wesentlichen als naturfaserverstärkte Biowerkstoffe für thermoplastische Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Formartikeln zu beschreiben. Biofibre® kann mit einer Vielzahl an Naturfasern (z. B. Holz, Stroh) hergestellt werden. Neben dem Potenzial, die physikalischen Eigenschaften (z.B. mechanischer Natur) zu beeinflussen, sorgen die Naturfasern für eine natürliche Optik und Haptik der Endprodukte. Neben der großen Bandbreite an bestehenden Produktklassen für vielfältige Anwendungsfelder ist ein Schwerpunkt des biofibre-Teams als Partner gemeinsam mit den Kund:innen maßgeschneiderte Materiallösungen zu erarbeiten.

Das Biofibre-Portfolio beinhaltet aktuell, neben der kundenspezifischen Entwicklung, vier Produktklassen (Solva, Silva, Lenta, BioSustra) mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen. Aufgezeigt ist in der Abbildung die Produktklasse Silva, welche aus einem Biopolyester und Holzfasern besteht. Die Einfärbbarkeit ist nur eines der Argumente, warum diese Produktklasse unter anderem in der Spielzeugindustrie Anwendung finden kann.

Jörg Dörrstein

GESCHÄFTSFÜHRER / LEITUNG F&E

"Der Ersatz von konventionellem Kunststoff durch zukunftsfähige Materialien wie

z. B. Biofibre® kann kurzfristig dazu beitragen, die CO₂-Emissionen durch Produkte in unserer direkten Umgebung drastisch zu reduzieren und die End-Of-Life Optionen zu erweitern!"





Wir verändern Verpacken. Im Auftrag der Zukunft.

adapa

Die adapa Gruppe bietet ein umfangreiches Produktportfolio für flexible Verpackungslösungen an. Das in den 22 europäischen Produktionsstätten gelebte Ziel ist die Entwicklung und Produktion nachhaltiger Materialien.

Die als "exzellent recyclingfähig" eingestufte MonoFlow" PXC 70 ist eines der Erfolgsprodukte, die im Rahmen der adapa rethink-Initiative im Allgäu entwickelt wurden und 2020 den deutschen Verpackungspreis in der Kategorie Nachhaltigkeit erhielt: Gemeinsam mit Kunden haben wir bestehende Lösungen überdacht und durch neue Verpackungskonzepte ersetzt, die durch ganzheitliche Betrachtung die Nachhaltigkeitsziele des Marktes und der Gesetzgebung erfüllen.

Es handelt sich um eine hochtransparente, vollständig recyclefähige PP-Schlauchbeutelfolie mit Hochbarriere, die sich ideal für empfindliche Produkte, wie z. B. Frischfleisch, aber auch für Käse oder Teigwaren eignet. Gemeinsam mit der Fa. Feneberg Lebensmittel GmbH (Kempten) wurde so eine Tiefziehverpackung durch die recyclingfähige Schlauchbeutelfolie ersetzt und somit 70 % Kunststoff eingespart – bei gleichbleibendem Schutz des verpackten Hackfleisches.



70% weniger Kunststoff: Hackfleisch zukunftsfähig in einem recyclingfähigen PP-Schlauchbeutel verpackt.

Dr. Martin Berlekamp

HEAD OF SUSTAINABILITY

"Verpackungen haben die primäre Aufgabe, das verpackte Gut zu schützen, welches im

Bereich der Lebensmittel einen deutlich höheren Carbon-Footprint Impact hat als das Verpackungsmaterial. In Hinblick auf gleichbleibender Qualität, Schutz, Frische, Mindesthaltbarkeit und Transportfähigkeit sehen wir seitens adapa, dass Kunststoff auch hier eine Zukunft haben wird – allerdings unter dem Motto: So viel wie nötig und so wenig wie möglich – und, dieses "Wenige" aus Materialien, die wieder dem Rohstoffstrom zugeführt werden können und somit CO₂ bei Herstellung und Verarbeitung einsparen."





Engineering Progress. Enhancing Live.



Um unserem Versprechen "Engineering progress. Enhancing lives." gerecht zu werden, haben wir vier Geschäftsbereiche aufgebaut, die hochwertige Lösungen für den Hoch-, Tief-, Innen- und Industriebau bieten. So können

wir gezielt Lösungen für unterschiedliche Lebensbereiche entwickeln. Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft haben wir dabei als integralen Bestandteil in unserer Unternehmensstrategie verankert. Damit wollen wir zeigen, dass wir uns gegenüber Menschen und Umwelt verpflichtet fühlen.

Millionen alter PVC-Fenster sind eine wertvolle Ressource für neue Kunststoff-Fenster. Zur Sicherstellung einer effektiven Altmaterialgewinnung wurde ein europaweites Netzwerk mit knapp 2.000 Partnern aufgebaut, über das Altmaterial gesammelt wird. Die kompletten Altfenster werden in unseren eigenen Recyclingbetrieben in verschiedene Rohstoffe getrennt und recycelt. Die PVC-Anteile

werden zu hochwertigem Recycling-Granulat verarbeitet und in unsere Produktionswerke zurückgeführt. Die Co-Extrusion ermöglicht dann die Herstellung von Fensterprofilen, die im Inneren aus recyceltem Material bestehen. Dabei werden bis zu 88 % CO₂-Emissionen gegenüber der Produktion von Neu-PVC gespart.



Sammlung und Sortierung von Altmaterial am REHAU Werksstandort Witt-

Andreas Jenne

LEITER NACHHALTIGKEIT

"Zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft brauchen wir einen Bewusstseinswandel.

Alle Beteiligten der industriellen Prozessketten müssen lernen, stärker in Kreisläufen zu denken – und gemeinsam an neuen Lösungen arbeiten."





Auf die richtige Materialkombination kommt es an.



Als 100-prozentige Tochter der PORAVER® GMBH aus Schlüsselfeld versteht sich die poraComp GmbH als Spezialist in der Veredelung von thermoplastischen Kunststoffen mit den hauseigenen Produkten PORAVER® Blähglas

und poraSpheres® Hohlglaskugeln. Beide Produkte sind vollständig aus Recyclingglas hergestellt, weshalb sie sich als Füllstoffe direkt auf die Nachhaltigkeit der poraComp® Compounds auswirken.

Einer dieser Effekte ist die signifikant niedrigere Dichte im Vergleich zu anderen Füllstoffen, die in der Branche verwendet werden (z. B. Talk, Kreide, Vollglaskugeln). Diese ist im Schnitt zwischen 50 und 80 Prozent niedriger. Damit lässt sich das Gewicht von Kunststoffteilen reduzieren, was im weiteren Lebenszyklus noch zusätzlich zu CO₂-Einsparungen verhelfen kann. Gleichzeitig ist die CO₂-Bilanz der Füllstoffe attraktiv. Trotz der notwendigen Aufbereitung des Altglases schlagen die Füllstoffe mit nur

0,52 kg CO₂e/kg zu Buche und sind somit vergleichbar oder sogar deutlich besser als "neue" Füllstoffe. Einem klassischen Recycling der Kunststoff-Glas-Mischungen steht zudem nichts im Wege.

Ihre größte Stärke spielen die Materialien aus, wenn die Füllstoffe mit recycelten Kunststoffen kombiniert werden, egal ob Post-Consumer oder Post-Industrial. Mit Ausnahme weniger notwendiger Additive sind dann Rezyklatgehalte von weit über 90 Prozent möglich. Vor allem für Anwendungen, in denen Füllstoffe aufgrund der technischen Anforderungen an das Material nicht wegzudenken sind, kann die Nachhaltigkeit von Kunststoffprodukten auf ein bisher nicht mögliches Niveau angehoben werden.



Der Rohstoff für die Füllstoffe von poraComp®-Produkten kann im klassischen Glasrecycling nicht wieder eingesetzt werden. Dies macht die Compounds besonders interessant für nachhaltige Materiallösungen.

Dr. Marieluise Lang

"Mit unseren Compounds eröffnen wir neue Möglichkeiten zur Umsetzung von Nach-haltigkeitszielen in der Branche. Dabei setzten wir auf die einzigartige Kombination unserer hochwertigen Füllstoffe aus Recyclingglas und recycelten Kunststoffen. Im Fokus steht für uns, echte und ehrliche Alternativen zu Neuware zu entwickeln, ohne die Qualität zu vernachlässigen."



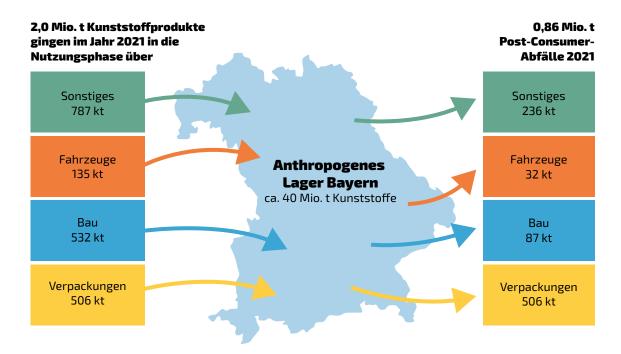
Kunststoffnutzung und -verwertung

Kunststoffverbrauch und Kunststoffabfälle

In Deutschland gingen im Jahr 2021 rund 12,4 Mio. t Kunststoffe in die Nutzungsphase über. Abgeleitet anhand der Einwohnerzahl finden somit in Bayern ca. 2,0 Mio. t Kunststoffe Verwendung. Den größten Anteil daran haben Bauprodukte mit ca. 27 %, gefolgt von Verpackungen (26 %). Weitere relevante Anwendungsbereiche von Kunststoffen sind Elektronik (8 %), Fahrzeuge (7 %), Haushalt- und Freizeit (5 %) sowie Landwirtschaft (5 %).

Kurzlebige Produkte wie Verpackungen werden meist nur wenige Tage genutzt und anschließend wieder entsorgt. Im Gegensatz dazu sind langlebige Produkte wie z. B. Baustoffe mehrere Jahrzehnte im Einsatz und fallen erst danach als Abfall an. Bei einem stetig wachsenden Kunststoffverbrauch führt dies dazu, dass jährlich mehr Kunststoffe in die Nutzungsphase übergehen, als Kunststoffabfälle in Bayern anfallen. Weiter verstärkt wird dieser Effekt durch den Export von gebrauchten Produkten. Beispielsweise werden nur etwa ein Fünftel der in Deutschland aus dem Fahrzeugregister gelöschten Fahrzeuge auch in Deutschland entsorgt [3]. Der Großteil wird ins Ausland exportiert und noch einige Jahre genutzt bevor dort die Entsorgung stattfindet.

Die Kunststoffabfälle am Ende der Nutzungsphase (Post-Consumer-Bereich) fallen sowohl in privaten Haushalten als auch bei gewerblichen Endverbrauchern an und erreichten 2021 in Deutschland eine Masse von 5,4 Mio. t. Auf Bayern übertragen ergibt sich ein rechnerischer Wert von 0,86 Mio. t Kunststoffabfall. Dieser bestand zu fast 60 % (506 kt) aus Verpackungen, was genau dem entspricht, was im Jahr 2021 an Verpackungen verbraucht wurde (506 kt). Die Abfallströme aus allen anderen Anwendungsbereichen liegen teilweise deutlich unter den in die Nutzungsphase übergegangenen Mengen.



Post-Consumer-Abfälle

Im Jahr 2021 gingen in Bayern ca. 2,0 Mio. t Kunststoffe in die Nutzungsphase über. Mehr als die Hälfte hiervon waren Bauprodukte und Verpackungen. Im gleichen Zeitraum fielen ca. 0,86 Mio. t Kunststoffabfälle aus dem Post-Consumer-Bereich an.



Sammlung und Sortierung von Kunststoffabfällen

Die getrennte Sammlung möglichst sortenreiner Wertstoffe ist eine wichtige Grundlage für eine optimale Verwertung. Kunststoffe fallen in verschiedenen Abfallströmen an. Neben den Post-Consumer-Abfällen werden die Abfälle, die bei der Kunststoffherstellung und verarbeitung anfallen als Post-Industrial-Abfälle bezeichnet. Ihr Aufkommen lag im Jahr 2021 bei etwa 45 kt. Daneben fielen 130 kt Nebenprodukte an. Diese sind nicht als Abfall anzusehen und werden unternehmensintern direkt in die Verarbeitung zurückgeführt. Post-Industrial-Abfälle liegen meist bereits relativ sauber und sortenrein vor. Sie werden gesammelt und können ohne aufwändiges Waschen und Sortieren einer Aufbereitung und Rezyklierung zugeführt werden. Andere Abfälle, insbesondere aus dem Post-Consumer-Bereich, werden zunächst durch verschiedene Sammelsysteme erfasst und müssen dann gesäubert und sortiert werden. Erst anschließend finden diese Kunststoffe als Rezyklat erneut Eingang in die Kunststoffverarbeitung.

Die Sammlung der Post-Consumer Abfälle erfolgt sowohl durch Hol- als auch Bringsysteme. Die PET-Pfandflaschensammlung ist ein typisches Beispiel eines Bringsystems. Wertstoffhöfe sind eine Besonderheit der bayerischen Entsorgungsstruktur und haben in vielen Städten und Landkreisen Bayerns eine zentrale Bedeutung für das Bringsystem. Im Jahr 2020 standen den Bürger*Innen insgesamt 1.537 Wertstoffhöfe zur Verfügung [4]. Ebenfalls zum Bringsystem zählen Container, in denen etwa Alttextilien, Kunststoffbecher, -folien, -flaschen, gemischte Verpackungen oder auch Elektro- und Elektronikaltgeräte gesammelt werden. Beim Holsystem werden die Abfälle und Wertstoffe direkt bei den privaten Haushalten und den gewerblichen Endverbrauchern gesammelt und abgeholt. Dafür stehen unter anderem die Restmülltonne, aber auch die gelbe Tonne oder der gelbe Sack zur Verfügung. Die Entsorgung anderer gewerblicher Abfälle sowie der Post-Industrial-Abfälle wird von den Unternehmen selbst organisiert.

Nach der Sammlung der Kunststoffabfälle werden diese, wenn möglich bzw. wenn nötig, vorsortiert und anschließend dem Recyclingprozess zugeführt. Alle anderen Kunststoffabfälle werden energetisch verwertet bzw. deponiert.

Verwertung und Beseitigung von Kunststoffabfällen

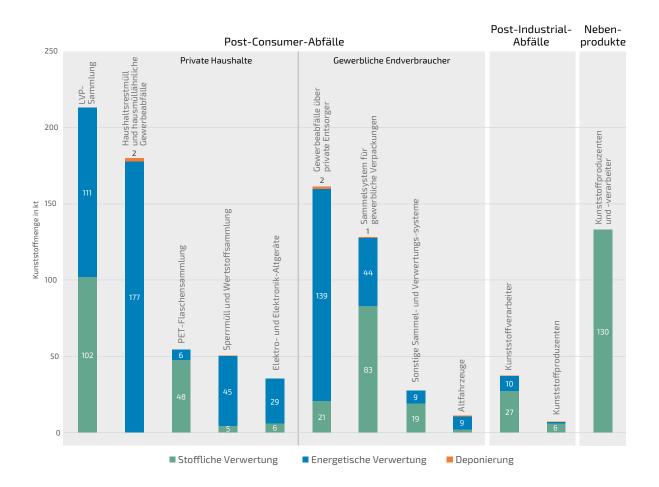
Etwa 45 % der Post-Consumer-Abfälle werden einem Recyclingprozess zugeführt. Nach Zerkleinerungs- und Nachsortierprozessen sowie Waschverfahren, verbleiben noch ca. 33 % der ursprünglichen Post-Consumer-Abfälle im Recyclingprozess und werden im eigentlichen Recyclingverfahren zu einem Rezyklat weiterverarbeitet. Für Post-Industrial-Abfälle liegt die Recyclingquote bei etwa 74 %. Je sauberer und sortenreiner der Abfallstrom, desto höher ist der Anteil, der aktuell recycelt wird. Hohe Recyclingquoten werden bei sauberen und sortenreinen Post-Industrial-Abfällen sowie bei PET-Flaschensammlungen erzielt. Verschmutzt und vermischt dagegen ist beispielsweise der Haushaltsrestmüll, was zu einer energetischen Verwertung von 99 % führt. Insgesamt werden ca. 35 % der Kunststoffabfälle werkstofflich und 64 % energetisch verwertet. Weniger als 1 % entfallen jeweils auf die rohstoffliche Verwertung und die Deponierung.

Wertstoffhof

Wertstoffhöfe sind eine Besonderheit der bayerischen Entsorgungsstruktur und haben in vielen Städten und Landkreisen Bayerns eine zentrale Bedeutung für die Abfallentsorgung. Im Jahr 2020 standen den Bürger*Innen insgesamt 1.537 Wertstoffhöfe zur Verfügung [4].



Die folgende Abbildung zeigt Abfallströme, die Kunststoffe enthalten und gibt an wie viel des enthaltenen Kunststoffabfalls energetisch verwertet, stofflich verwertet oder deponiert wird. Die Nebenprodukte sind ebenfalls aufgeführt, obwohl sie keinen Abfall darstellen. Sie werden zu 100 % werkstofflich wiederverwendet.



Um Ressourcen zu schonen sowie Abfall und damit Treibhausgasemissionen zu reduzieren ist es entscheidend mehr Kunststoffe am Ende ihrer Nutzungsphase in einen Kreislauf zu überführen und aus ihnen neue Produkte herzustellen.

Die Böhme GmbH und die R.Plast GmbH sind langjährige bayerische Vertreter der Branchen Entsorgung und Recycling. Ihre Vorstellung gibt Einblicke in die Geschäftsaktivitäten der Akteure einer Kreislaufwirtschaft.

Recyclingquote

In Bayern werden etwa $35\,\%$ der Kunststoffabfälle recycelt und $64\,\%$ energetisch verwertet. Weniger als $1\,\%$ werden rohstofflich verwertet bzw. deponiert.

%

Verwertung und Vermarktung von Sekundärkunststoffen



Die R.PLAST Kunststoffaufbereitungs- und Handels-GmbH wurde 1990 gegründet und konzentriert sich seitdem auf die Wiederverwertung industrieller Kunststoffreststoffe - dem Post-Industrial Recycling. Den Stoffkreis-

lauf der Natur zum Vorbild, kümmern wir uns darum, die in der Wirtschaft eingesetzten Rohstoffe wieder in den Produktionsprozess zurückzuführen. Damit schonen wir Ressourcen und sorgen aktiv dafür, dass Kreisläufe geschlossen werden. Das beginnt mit der sortenreinen Übernahme von Produktionsreststoffen bei unseren Lieferanten und findet seine Fortführung durch die Zerkleinerung, Laserfiltrierung und Regranulierung in unserem Betrieb bis hin zur Analyse technischer sowie sicherheitsrelevanter Daten im hauseigenen Labor. Vergleichbar mit Neuwaregranulat verkaufen wir unsere Regranulate mit einem Sicherheits- wie auch mit einem Technischen Datenblatt und beliefern als Partner der Kunststoffverarbeiter Kunden in der Automobil-, Bau-, Möbel- sowie der Konsumgüter- und Verpackungsindustrie mit über 1.000 t pro Monat.



Das Foto zeigt Teile des Maschinenparks. Zu sehen sind Shredder, Förderband, Compactor, Extruder und Unterwassergranulierung.

Die zwei folgenden Beispiele verdeutlichen unseren

Einsatz zur Ressourcenschonung und Kreislaufführung, mit dem wir – gemeinsam mit Lieferanten und Kunden – einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von CO_2 -Emissionen leisten.

Zum einen nutzen wir PP-Vliesreststoffe aus der Herstellung von Atemschutzmasken zur Produktion eines Regranulates, das wiederum zur Erzeugung von PP-Vlies verwendet wird. Zum anderen sind wir in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekt "GePart" tätig, welches die Entwicklung einer Strategie zur Kreislaufführung von Polypropylen-Partikelschaum (EPP) zum Ziel hat. Dabei übernehmen wir die Aufgabe der Weiterentwicklung von Aufbereitungsverfahren für EPP-Reststoffe zu hochwertigem Regranulat, das wieder in die Herstellung von EPP-Rohmaterial einfließt.

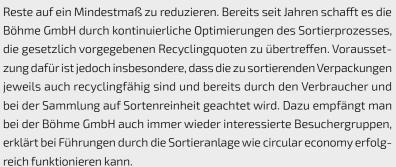


Die Sortierung von Abfallströmen ist eine High-Tech-Aufgabe.

entsorgen.de

Die Böhme GmbH Wertstofferfassung ist ein im Jahr 1985 gegründetes Familienunternehmen im Norden Bayerns und betreibt hier seit über 25 Jahren eine moderne Sortieranlage für Leichtverpackungen für die Dualen

Systeme. Mit einer Kapazität von 60.000 bis 70.000 Jahres-Tonnen und ca. 100 Mitarbeitern ist die Anlage eine der größten in Bayern. Qualität und Effizienz sind die Themen, die den Inhaber und Geschäftsführer Stefan Böhme ganz besonders beschäftigen. Stets die neueste Sortiertechnik wie Nahinfrarotsortierung, Wirbelstromabscheider, Ballistikseparatoren und modernste Anlagensteuerung, ermöglichen es, die Sortierung des Verpackungsgemisches exakt auf die Anforderungen der Verwerter, die die Böhme GmbH beliefert, anzupassen, die Recyclingquote hoch zu halten und die energetisch zu verwertenden





Die Sortierung von Abfallströmen ist eine High-Tech-Aufgabe. Um möglichst viele Sekundärrohstoffe wieder in den Kreislauf zu bringen und stets auf aktuelle Trends beim Verpackungsdesign vorbereitet zu sein, investiert man bei Böhme laufend in neueste Sortiertechnologie.

Stefan Böhme

GESCHÄFTSFÜHRER / CEO

Recycling ist für Stefan Böhme mehr als ein
Job. Sein Ziel ist es, dass aus den sortierten
Fraktionen wieder etwas Sinnvolles entsteht. Am besten auf
möglichst kurzen Wegen, bei regionalen Verwertern.

"Es war immer unsere Philosophie, nicht nur das zu tun, was der Gesetzgeber vorschreibt, sondern mit den gegebenen technischen Möglichkeiten so viel Material aus den gesammelten Wertstoffen herauszuholen und zu wiederzuverwerten wie möglich."



KLIMAWIRKUNG

und Einträge in die Umwelt

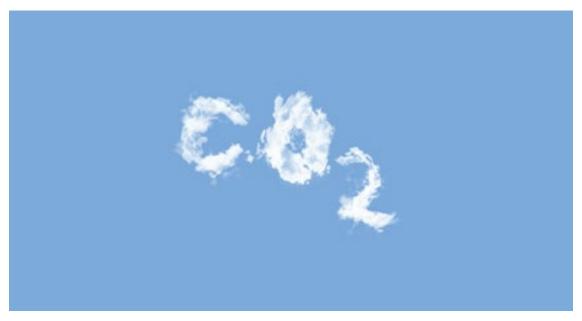
Kunststoffe in der Umwelt sind ein globales Problem. So entstehen die weitaus größten Einträge in die Umwelt in Entwicklungs- und Schwellenländern mit schlechtem Abfallmanagement. 90 % der globalen Plastikmülleinträge in die Ozeane stammen aus zehn Flüssen Asiens und Afrikas [5]. Jedoch stehen auch Industrieländer, in denen die meisten Kunststoffprodukte hergestellt werden, in der Produzentenverantwortung. Durch die Verhandlungen eines UN Plastikmüllabkommens soll das Problem durch die weltweite Staatengemeinschaft in Angriff genommen werden [6]. In der vorliegenden Analyse jedoch liegt der Fokus auf der Klimawirkung von Kunststoffen sowie den Eintragspfaden und Umweltwirkungen, wie sie auch in Bayerns Gewässern und Böden auftreten. Hierauf konzentrieren sich die nachfolgenden Abschnitte 4.1 und 4.2.



Die Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung von Kunststoffen verursacht große Mengen Treibhausgase und trägt so zur Verschärfung der Klimakrise bei. Eine 2019 veröffentlichte Studie kam zu dem Ergebnis, dass bei weiter steigendem Kunststoffverbrauch und der Beibehaltung der linearen Wirtschaftsweise bis 2050 weltweit 56 Gigatonnen CO_2 durch Kunststoffe freigesetzt werden. Dies entspricht 10-13% der Treibhausgase des verbleibenden CO_2 -Budgets für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels [7].

Insbesondere die Bereitstellung von Kunststoffneuware, d. h. Rohölförderung, Raffinerie und Polymerisation sind energieintensiv. Der Einsatz fossiler Energieträger in dieser Vorkette ist daher in der Regel für 60 - 90 % der Gesamtemissionen in der Herstellung eines Kunststoffprodukts verantwortlich. Der CO_2 -Fußabdruck von Kunststoffprodukten, die hingegen auf Basis von in Wert gesetzten Abfällen hergestellt werden, ist deutlich geringer und liegt je nach Kunststoffsorte lediglich bei 20 - 50 % im Vergleich zum Einsatz von Neuware.

Für die Herstellung und Verwertung der in Bayern genutzten Kunststoffprodukte wurde im Rahmen der vorliegenden Analyse eine Klimawirkungskennzahl (KW-Kennzahl) in Höhe von 8,7 Mio. t CO_2 e für das Jahr 2021 ermittelt (Abschnitt 7.1). Dieser Wert dient als Ausgangspunkt für eine zu gestaltende Transformation hin zur klimaneutralen Nutzung von Kunststoffen. Pro Einwohner*In stehen somit 0,7 t CO_2 e / Jahr im Zusammenhang mit der Kunststoffnutzung, was ca. 6 % des durchschnittlichen Pro-Kopf- CO_2 -Gesamtfußabdrucks (10,8 t CO_2 e / Jahr [8]) ausmacht.



CO₂-Emissionen der Kunststoffindustrie (Foto: Matthias Heyde/ unsplash.com)

CO₂-Budget

Ohne eine ökologische Transformation der Kunststoffindustrie, werden sich die von heute bis 2050 weltweit mit Kunststoff verbundenen CO₂-Emissionen auf 10-13 % des verbleibenden Budgets für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels belaufen.



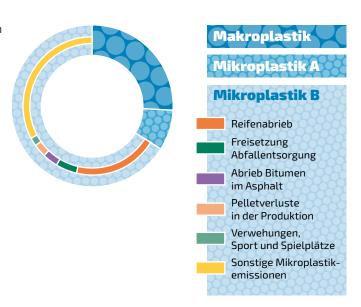
Eintragsmengen und -pfade von Kunststoffemissionen sowie deren Umweltwirkungen

Im gesamten Lebenszyklus von Kunststoffprodukten können Kunststoffemissionen, d. h. Einträge des Materials in die Umwelt, auftreten. Seit Beginn der Kunststoffnutzung gelangten 279 Mio. t Kunststoffe in die Umwelt [9]. An nahezu jedem Ort der Erde ist eine Belastung mit Kunststoffen nachweisbar, sei es als Makroplastik im Ozean oder als Mikroplastik im Boden [10], im Grundwasser und sogar im Schnee im Hochgebirge [11]. Kunststoffe sind langzeitstabil und werden in der Natur nur sehr langsam abgebaut. Gelangen sie in die Umwelt, akkumulieren sie dort und beeinträchtigen Ökosysteme und Lebewesen massiv. Die Plastikverschmutzung ist ein Phänomen, das die planetaren Belastungsgrenzen überschreitet [12]. Sie liegt (1) in einem globalen Maßstab vor, ist (2) nicht leicht umkehrbar und hat (3) einen störenden Einfluss auf lebenswichtige Prozesse im System Erde.

Begriffsklärung Mikroplastik A und B und Makroplastik

Mikroplastik und Makroplastik sind feste Objekte aus thermoplastischen, elastomeren oder duroplastischen Kunststoffen, die direkt oder indirekt durch menschliches Handeln in die Umwelt gelangen. Der Begriff Makroplastik bezeichnet hierbei größere Objekte aus Kunststoff. Mikroplastik hingegen umfasst Partikel und Fasern mit einem Durchmesser < 5 mm. Mikroplastik wird weiter unterteilt in primäres Mikroplastik Typ A, das gezielt hergestellt wird (z.B. Reibekörper in Kosmetik), primäres Mikroplastik Typ B, das während der Nutzung freigesetzt wird (z.B. Reifenabrieb, beim Waschen freigesetzte synthetische Fasern) und sekundäres Mikroplastik, das durch langsame Fragmentierung von Makroplastik in der Umwelt entsteht.

Die anfallenden Kunststoffemissionen umfassen Makro-, sowie Mikroplastik A und Mikroplastik B und betragen in Bayern 5,4 kg pro Einwohner*In pro Jahr (cap a) [9].



Zusammensetzung der Kunststoffemissionen in die Umwelt in Deutschland

Mikro- & Makroplastik

Die unkontrollierte Freisetzung von Kunststoff liegt in Deutschland jährlich bei 5,4 kg pro Einwohner*In.





Makroplastik

4.3

Eintragsmengen und -pfade

Laut einer Studie des Fraunhofer Instituts UMSICHT, in der Kunststoffemissionsarten und -mengen abgeschätzt wurden, besteht das emittierte Plastik in Deutschland⁸ zu 26 % aus Makroplastik [9]. Einwegartikel wie Lebensmittelverpackungen und Getränkebecher nehmen aufgrund ihrer kurzen Nutzungsdauer den größten Anteil der Makroplastikemissionen ein [13]. Die für Bayern relevantesten Eintragspfade sind landbasierte Quellen, wie Littering⁹, Industrie und Landwirtschaft, Kommunen (u. a. Deponien und Kläranlagen) und natürliche Sturmereignisse. Makroplastikemissionen durch Littering werden in Deutschland auf 1,3-3,5 kg / (cap a) geschätzt [9]. Durch Reinigung von Verkehrs- und Grünflächen können signifikante Mengen zurückgeholt werden. Dennoch verbleiben in Bayern 0,4 kg / (cap a) in der Umwelt [9]. Dies entspricht ungefähr 20 handelsüblichen Plastiktüten.

Folgen und Probleme

Die menschliche und tierische Gesundheit wird durch die Akkumulation von Makroplastik in der Umwelt beeinträchtigt. Tiere nehmen Plastik anstelle von Nahrung zu sich, was die weitere Nahrungsaufnahme unterbindet und die Tiere bei vollem Magen verhungern lässt. Außerdem verstricken sich Tiere in Netzen und anderen Makroplastikteilen. Indirekte Folgen beinhalten die Zersetzung von Makroplastik zu Mikroplastik. Außerdem bietet schwimmendes Makroplastik einen neuen Lebensraum für Mikroalgen, die sich dadurch leichter verbreiten können. Schadstoffe wie persistente organische Schadstoffe, die genetische Störungen hervorrufen sowie mutagen und karzinogen sein können, können sich ebenfalls an Mikro- und Makroplastik anlagern [13].

⁸ Selbige Verteilung ist für Bayern anzunehmen

 $^{9\,}Der\,Begriff\,Littering\,bezeichnet\,das\,wissentliche\,Entsorgen\,von\,Abfällen\,in\,die\,Umwelt.$



Mikroplastik

4.4

Eintragsmengen und -pfade

Plastikemissionen in Bayern bestehen zu 74 % aus Mikroplastik und werden auf 4,0 kg / (cap a) geschätzt [9]. Die mit Abstand größte Quelle für Mikroplastik ist mit 1,2 kg / (cap a) der Abrieb von Reifen, gefolgt von der Freisetzung bei der Abfallentsorgung und Abrieb von Bitumen in Asphalt. Der Großteil der Mikroplastikemissionen sind somit Elastomere. Weitere Mikroplastikemissionen stammen von Pelletverlusten in der Industrie und Verwehungen von Sport- und Reitplätzen sowie der Freisetzung auf Baustellen [9]. Einmal in der Umwelt, verteilt sich Mikroplastik über den Luft- und Wasserkreislauf und befindet sich daher in allen Umweltkompartimenten [14]. Eintragspfade in Flüsse sind dabei hauptsächlich Kläranlagen. In die Böden gelangt Mikroplastik durch atmosphärische Ablagerungen, Deponien, Kompostieranlagen, organische Düngemittel, Abwasserverrieselung, Ausbringung von Klärschlamm und Rückstände von landwirtschaftlich genutzten Kunststoffen, wie Mulch- und Abdeckfolien.

Reifenabrieb

Reifenabrieb hat mit mehr als 30 % den größten Anteil an den gesamten Mikroplastikemissionen in Deutschland [9]. Der Abrieb besteht aus synthetischem oder natürlichem Gummi (40 - 50 %), Ruß, Siliziumdioxid, Kalk (30 - 35 %) und häufig Spuren von Schwermetalloxiden. Reifenabrieb entsteht vor allem in Kurven und beim Bremsen und Anfahren an Kreuzungen. In Bayern landen knapp 50 % des Reifenabriebs im Siedlungsgebiet, 17,5 % im Wald, 33 % auf Feldern und fast nichts direkt im Wasser [15]. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Abriebe im Siedlungsgebiet früher oder später im Wasser landen [15].

Flüsse in Bayern

Eine Studie zum Thema Mikroplastik zeigte Mikroplastikvorkommen in allen untersuchten bayerischen Gewässern [16]. Die Konzentration des Mikroplastik steigt flussabwärts an und ist an Industriestandorten besonders hoch. Mikroplastik in Flüssen besteht zu über 90 % aus PE und PP [16]. Auch in Seen ist die Mikroplastikbelastung in Bayern spürbar und liegt im Median bei 4 Partikeln/m³ an der Wasseroberfläche, 11 Partikeln/m³ in der Wassersäule, 17.068 Partikeln/m² im Ufersediment und 5.709 Partikeln/m² im Grundsediment. Im Bodensee beispielsweise hat jeder fünfte Fisch Mikroplastik im Bauch [17].



Im Boden

Im Gegensatz zur Mikroplastikbelastung in Flüssen ist die Verschmutzung in Böden noch weniger stark erforscht, jedoch je nach Umgebung vier bis 23 mal so hoch [18]. Der Grund hierfür ist die Filterwirkung des Bodens. Hierdurch kommt es zu einer Akkumulation der Partikel. Mikroplastik im Boden besteht hauptsächlich aus dem Abrieb von Reifen, Fahrbahnmarkierungen, Farben, landwirtschaftlich eingesetzten Kunststoffen sowie als Dünger ausgebrachtem Klärschlamm. Mikroplastik verändert sowohl die Struktur, als auch den Lebensraum der Lebewesen, die für die Fruchtbarkeit der Böden wichtig sind [19]. Kunststoffpartikel werden von Bodenorganismen aufgenommen, in Geweben eingelagert und angereichert und über die Nahrungsmittelkette weitergegeben.

Umweltwirkungen

Die Kunststoffe aus denen Mikroplastik besteht, sind zunächst wenig reaktiv, ihre Toxizität ist gering und die von ihnen ausgehende Schadwirkung ist vor allem physikalischer Natur. Insbesondere kleinere Partikel haben jedoch einen negativen Effekt auf Organismen. Weiterhin lagern sich Schadstoffe aus dem umgebenden Wasser und Bodenmaterial (z. B. Pestizide) an der Oberfläche der Kunststoffe an und es ist unklar, welche Schadstofftransportmechanismen dadurch entstehen. Die Wirkung auf Bodenorganismen lässt sich somit in zwei Formen unterscheiden: (1) physikalische Schäden an Geweben und Membranen durch die Partikel selbst und (2) der Transport von an Mikroplastikpartikeln gebundener Schadstoffe in Habitate und Organismen [10].

Weiterhin lösen sich aus Kunststoffen niedermolekulare Chemikalien, auch Additive genannt. Die Art und Menge der Additive hängt von dem Kunststoff sowie dessen Einsatzbereich und Anforderungsprofil ab. PVC enthält meist Weichmacher und Hitzestabilisatoren, während Polystyrol oft Flammschutzmittel beinhaltet. Gemittelt beträgt der Anteil von Additiven in Kunststoffprodukten 4,5 %. In Bayern werden jährlich etwa 0,2 g / (cap a) Additive emittiert. Die emittierte Masse der Additive ist geringer als die des Mikroplastiks. Allerdings besitzen Additive aufgrund ihrer chemischen Struktur eine höhere Toxizität [9].

Mikroplastik & der Mensch

Der Mensch nimmt täglich ca. 6.000 Mikroplastikpartikel über die Luft auf.

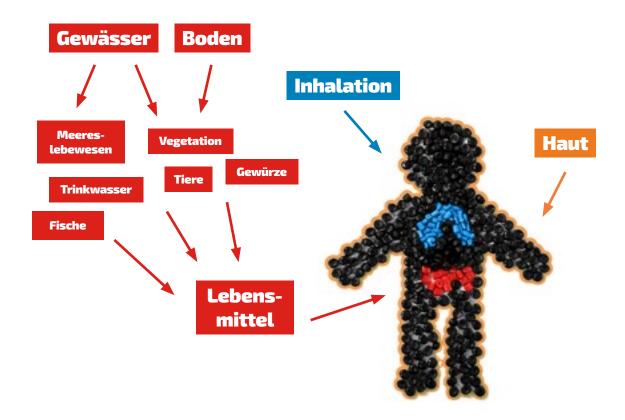
%



Auswirkungen auf den Menschen

Grundsätzlich bestehen drei Einnahmewege für Mikroplastik in den menschlichen Körper: Während dem Verzehr der Nahrung, durch Einatmen und über die Haut. Besonderes Augenmerk der Forschung wurde auf die Einnahme von Mikroplastik über die Nahrung gelegt. Viele Meerestiere enthalten Mikroplastik. Das gleiche gilt für Salz, wobei Meersalz nicht überraschend die höchste Konzentration an Mikroplastik aufweist. Die Kontamination von Wasser mit Mikroplastik wird in Deutschland auf ca. 700 Partikel/l geschätzt. Außerdem wurde Mikroplastik in Pflanzen, Obst und Gemüse nachgewiesen [20]. Die Aufnahme von Mikroplastik durch die Luft wird auf ca. 6.000 Partikel/Tag geschätzt. Die Aufnahme von Mikroplastik über die Haut ist hingegen vernachlässigbar [14].

Mikroplastik hat negative Auswirkungen auf die Gesundheit und kann z. B. Entzündungen verursachen. Die Akkumulation von Kunststoff kann eine Immunreaktion hervorrufen oder steigern. Eingeatmetes Mikroplastik kann sich im respiratorischen Epithel z. B. mittels Diffusion, direkter Zellpenetration oder aktiver zellulärer Aufnahme verbreiten. Die Forschungsergebnisse geben Anlass zur Vorsicht. Weitere Forschung ist jedoch notwendig, um Langzeitwirkungen zu quantifizieren [20].



Verbreitung des Mikroplastik im Nahrungsmittelnetz und Aufnahmewege des Menschen nach Domenech et al. [14]

RAHMEN-BEDINGUNGEN

politisch und regulativ

Angesichts der beschriebenen Herausforderungen für einen zirkulären Umgang mit Kunststoffen bzw. den Umweltbelastungen der aktuell noch stark linearen Nutzungsmuster wurden in den vergangenen Jahren auf unterschiedlichen Ebenen – von der regionalen bis hin zur internationalen Ebene – Initiativen gestartet, die Zirkularität von Kunststoffen zu erhöhen und dafür rechtliche Rahmenbedingungen zu entwickeln. Diese betreffen sowohl das Design von Kunststoffprodukten, die Entwicklung weniger umweltbelastender Stoffalternativen als auch den Wiedereinsatz von Rezyklaten.



	Design von Kunststoffprodukten	Wiedereinsatz von Kunststoffrezyklaten	Verminderung von Kunststoffemissionen	Verminderung von THG Emissionen aus Kunststoffprodukten
International	Keine verpflichtenden Vorgaben oder Regulierungen Globales Umwelt- forum der OECD Verhandlungen für ein rechtsverbindliches globales Abkommen über die Plastikverschmutzung (Global Commitment) Globaler Designkatalog	Sustainable Development Goal Nr. 12 "Nachhaltige Konsum- und Produktions- muster sicherstellen" Global Commitment	 Keine verpflichtenden Vorgaben oder Regulierungen rePurpose Global 	• UN-Bericht über die prob- lematische Verwendung von Einwegkunststoffen
Europa	EU- Abfallrahmen-Richtlinie (Richtlinie 2008/98 EG über Abfälle: ARRL) Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EC) Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft	 Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle 94/62/EG Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft 	 Aktionsplan für die Kreis- laufwirtschaft Horizon 2020 (2014 - 2020) Horizon Europe (2021 - 2027) 	Richtlinie zu Einweg- kunststoffen
Deutschland	5-Punkte-Plan des Bundesum- weltministeriums für weniger Plastik und mehr Recycling Energieverbrauchsrelevante- Produkte-Gesetz (EVPG) Förderprogramm KURT	Deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) 5-Punkte-Plan des Bundesumweltministeriums für weniger Plastik und mehr Recycling Rohstoffstrategie 2020 Verpackungsgesetz (VerpackG)	Deutsches Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) Abfallvermeidungsprogramm (AVP) Deponierungsverbot	Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) Abfallvermeidungsprogramm (AVP) Sachstandsbericht über die Schadstoffe in Kunststoffen und ihre Auswirkungen auf die Entsorgung
Bayern	 7-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz als Teil der bayerischen Ressourcenstrategie Projektverbund ForCycle II Runder Tisch Verpackung im Handel 	Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz (BayAbfū) Abfallwirtschaftsplan Bayern (AbfPV) Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie T-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz als Teil der bayerischen Ressourcenstrategie	Maßnahmenpaket zur zukünftigen Vermeidung und Reduzierung von Kunststoffabfällen	Bayerische Nachhaltigkeitsstrategie Runder Tisch zur Reduzierung des Ressourceneinsatzes Bayerische Bioökonomiestrategie

Übersicht regulatorischer Entwicklungen zur Nachhaltigkeit von Kunststoffen

Globale Initiativen

Die Wertschöpfungsketten für Kunststoffe sind international zunehmend vernetzt und grenzüberschreitend. Dennoch bestehen auf internationaler Ebene derzeit keine verpflichtenden Vorgaben oder Regulierungen hinsichtlich des Designs von Kunststoffprodukten. Erste Ansätze zum globalen Handeln wurden im Jahr 2018 durch das *Globale Umweltforum der OECD* angestoßen. Das Umweltforum befasste sich mit der Kreislauffähigkeit von Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung des Designs für Nachhaltigkeit. Ziel war es, Anreize für ein Umdenken zu schaffen, um die Auswirkungen des Produktdesigns, wie z. B. chemische Inhaltsstoffe in Kunststoffen, auf Umwelt und Gesundheit zu verringern [21].

Im Jahr 2022 wurden auf der Konferenz der *Umweltversammlung der Vereinten Nation (UNEA)* in Nairobi erstmals konkrete Verhandlungen für ein rechtsverbindliches globales Abkommen zur Eindämmung der Plastikverschmutzung in die Wege geleitet. Ein Aspekt dabei ist die Förderung eines nachhaltigen Designs von Produkten und Materialien, damit diese langlebiger sind und wiederverwendet, wiederaufbereitet oder recycelt werden können [22]. Im Rahmen der Entwicklung eines solchen Abkommens werden aktuell nationale Aktionspläne diskutiert, u. a. mit konkreten Maßnahmen und quantifizierten Zielsetzungen, die sich dann auch

direkt auf Bayern auswirken könnten. Weiterhin existieren seit 2018 globale freiwillige Verpflichtungen, wie das Global Commitment, geleitet von der Ellen MacArthur Foundation und dem UN-Umweltprogramm. Im Rahmen der Globalen Selbstverpflichtung verpflichten sich Unternehmen und Regierungen dazu die Kunststoffproduktion zu überdenken und verstärkt Kunststoffprodukte wiederzuverwenden. Kunststoffartikel, die nicht benötigt werden, sollen eliminiert und Innovationen entwickelt werden, damit Kunststoff sicher wiederverwendet, recycelt oder kompostiert werden kann. Die globale Selbstverpflichtung hat bereits über 500 Unterzeichner mobilisiert. Dazu zählen Unternehmen wie L'Oréal, Nestlé, PepsiCo, The Coca-Cola Company und Unilever, auf die 20 % aller weltweit hergestellten Kunststoffverpackungen entfallen [23].

Europäische Strategien

Auf europäischer Ebene sind die politischen Rahmenbedingungen im Hinblick auf das Design von Kunststoffprodukten konkreter und weitreichender. Generell definiert die EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98 Strategien zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Verbesserung des Ressourcen- und Abfallmanagements [24]. Die Mitgliedstaaten sind aufgefordert, Maßnahmen bezüglich des Designs, der Herstellung und Nutzung von Produkten zu ergreifen, sodass die Produkte ressourceneffizient, langlebig, reparierbar, wiederverwendbar oder aktualisierbar sind. Spezifisch definiert die Ökodesign-Richtlinie 2009/125 in der EU, Anforderungen an die Energie- und Ressourceneffizienz von energiebetriebenen Produkten [25]. Obwohl die Richtlinie die Kunststoffwirtschaft nicht direkt betrifft, bestehen viele dieser Produkte zu großen Teilen aus Kunststoff. Die im Jahr 2018 veröffentlichte europäische Kunststoffstrategie "Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft" zielt insbesondere auf den Ausbau einer nachhaltigen und kreislauforientierten Kunststoffwertschöpfungskette ab. Dazu sieht sie eine möglichst weitreichende Vermeidung von Kunststoffabfällen, eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Stärkung des Kunststoffrecyclings und die Reduktion des Kunststoffeintrags in die Umwelt, z.B. als Mikroplastik, vor. Der Ansatz berücksichtigt sämtliche an der Wertschöpfungskette beteiligte Akteure und enthält erste Maßnahmen zur Implementierung auf europäischer sowie nationaler Ebene [26].

Mit dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft aus dem Jahr 2020 wurden zunehmend EU-einheitliche Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Produktpolitik geschaffen. Die Regelungen beziehen sich insbesondere auf die Vermeidung von Abfällen, eine bessere Reparierbarkeit sowie die Bereitstellung von Ersatzteilen seitens der Hersteller, um die künstliche Obsoleszenz zu vermeiden. Im Wesentlichen konzentriert sich der Aktionsplan auf sieben industrielle Produktwertschöpfungsketten, dazu gehören die Verpackungs- und Kunststoffindustrie [27]. Für Kunststoffe arbeitet die EU gerade an anwendungsspezifischen bzw. polymerspezifischen Rezyklatquoten, wie es sie für PET-Getränkeflaschen ab 2025 bereits gibt [28]. Im Rahmen des Aktionsplans wird ausgehend von der EU-Ökodesign-Richtlinie eine erweiterte EU-Ökodesign-Verordnung erarbeitet, die über die Betrachtung energiebetriebener Produkte hinausgehen wird. Insbesondere auch die Einführung des digitalen Produktpasses zur Informationsweitergabe nachhaltigkeitsrelevanter Aspekte wird hiermit vorangetrieben [29].

Ebenfalls im Rahmen des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft wurde im November 2022 der Vorschlag zur Revision der Packaging and Packaging Waste Directive (PPWD) vorgestellt. Dieser enthält eine ganze Reihe von ambitionierten Zielen zur Zirkularität von Verpackungen. Das Hauptziel besteht darin, die Verpackungsabfälle pro Kopf bis 2040 pro Mitgliedstaat um 15 % im Vergleich zu 2018 zu reduzieren. Um die Wiederverwen-

Eindämmung der Plastikverschmutzung

In Nairobi beschließen die Vereinten Nationen 2022 die Aufnahme konkreter Verhandlungen für ein rechtsverbindliches globales Abkommen zur Eindämmung der Plastikverschmutzung.



dung von Verpackungen zu fördern, müssen Unternehmen einen bestimmten Prozentsatz ihrer Produkte in wiederverwendbaren oder wiederbefüllbaren Verpackungen anbieten, z. B. Getränke und Mahlzeiten zum Mitnehmen oder Lieferungen im elektronischen Handel. Um eindeutig unnötige Verpackungen zu vermeiden, sollen bestimmte Verpackungsformen verboten werden, z. B. Einwegverpackungen für Lebensmittel und Getränke beim Verzehr in Restaurants und Cafés, Einwegverpackungen für Obst und Gemüse, Miniaturshampooflaschen und andere Miniaturverpackungen in Hotels. Der Kommissionsvorschlag sieht auch vor, verbindliche Quoten für den Anteil an recyceltem Material auszuweiten – gleichzeitig sollen bis 2030 alle Verpackungen ökonomisch rentabel recycelbar sein, womit zusätzliche Investitionen in Sammel-, Sortier- und Recyclinginfrastrukturen incentiviert werden sollen.

Mit der *PPWD* eng verbunden ist eine jetzt vorgestellte Kommunikation der *Europäischen Kommission* zum Thema Bioplastik. Hier ist für die Verbraucher*Innen aktuell kaum nachvollziehbar, ob sich der Begriff "Bioplastik" auf biobasierte Materialien oder eher auf Aspekte der Kompostierbarkeit bezieht. Gleichzeitig gibt es aktuell keinen europaweit einheitlichen Industriestandard für die Kompostierbarkeit von Bioplastik, auf den z. B. in öffentlichen Ausschreibungen Bezug genommen werden könnte. Der jetzt vorgestellte Rahmen stellt klar, unter welchen Rahmenbedingungen solche Bio-Kunststoffe Teil einer nachhaltigen Zukunft sein können. Die für die Herstellung von biobasierten Kunststoffen verwendete Biomasse muss aus nachhaltigen Quellen stammen, ohne die Umwelt zu schädigen und unter Beachtung des Grundsatzes der "kaskadischen Nutzung von Biomasse": Die Hersteller sollten vorrangig organische Abfälle und Nebenprodukte als Ausgangsmaterial verwenden. Um Greenwashing zu bekämpfen und die Verbraucher*Innen nicht in die Irre zu führen, müssen die Hersteller außerdem allgemeine Angaben auf Kunststoffprodukten wie "Biokunststoff" und "biobasiert" vermeiden. Wenn sie über den biobasierten Anteil kommunizieren, sollten die Hersteller den genauen und messbaren Anteil des biobasierten Kunststoffs im Produkt angeben [30].

Deutschland

Die deutsche Bundesregierung hat in den letzten Jahren diverse Strategien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft entwickelt. Im Hinblick auf das Design von Kunststoffprodukten thematisiert der 5-Punkte-Plan des Bundesumweltministeriums für weniger Plastik und mehr Recycling von 2018, Maßnahmen im Bereich Ökodesign, um Verpackungen und andere Produkte umweltfreundlicher zu gestalten [31]. Im Jahr 2023 soll unter Federführung des BMUV eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie entwickelt werden, die u. a. auch die zirkuläre Nutzung von Kunststoffen adressieren soll. In Umsetzung der EU-Einwegkunststoffrichtlinie soll zudem ein Einwegkunststofffonds installiert werden, der für definierte Einwegprodukte wie Becher oder Zigarettenfilter eine Abgabe für jedes auf den Markt gebrachte Produkt vorsieht. Die Anfang 2023 finalisierte CE Normungsroadmap im Auftrag des BMUV hat unter Einbindung von mehr als 1.000 Stakeholdern 200 konkrete Normungsbedarfe für eine gelingende Kreislaufwirtschaft adressiert, davon ca. ein Viertel im Bereich Kunststoffe und Kunststoffverpackungen.

Der Bundestag verabschiedete zudem im Jahr 2019 das *Verpackungsgesetz (VerpackG)*. Um eine höhere Wiederverwendungs- und Recyclingquote zu erreichen, werden die dualen Entsorgungssysteme durch § 21 VerpackG zusätzlich zur ökologischen Gestaltung der Beteiligungsentgelte verpflichtet. Die Systeme müssen dementsprechend Anreize schaffen, damit Hersteller von Verpackungen besonders recyclingfähige Materialien einsetzen und einen hohen Rezyklateinsatz absichern [32,33]. Im Juli 2022 sind neuste Änderungen des VerpackG in Kraft getreten, um den Wiedereinsatz von Kunststoffrezyklaten zu fördern. Alle Erstinverkehrbringer von Verpackungen, auch kleine Händler und Online-Händler, sind nunmehr verpflichtet, sich in dem zentralen Verpackungsregister *LUCID* zu registrieren, für die Kosten der Entsorgung ihrer in Verkehr gebrachter Verpackungen aufzukommen und Lizenzgebühren zu zahlen [34]. Ebenfalls im Rahmen des Verpackungsgesetzes werden Restaurants, Bistros und Cafés, die Essen für unterwegs verkaufen ab 2023 verpflichtet ihre Produkte sowohl in Einweg- als auch in Mehrwegverpackungen anzubieten.

Bayern

Die Bayerische Staatsregierung hat bereits im Jahr 2018 den 7-Punkte-Plan für einen effizienten Ressourceneinsatz in der bayerischen Wirtschaft beschlossen. Dieser Maßnahmenplan ist Teil der Bayerischen Ressourcenstrategie und verfolgt das Ziel Ressourcen zielgenau einzusetzen und den unnötigen Einsatz von Rohstoffen weiter zu reduzieren. Im Bereich des Produktdesigns wurden Maßnahmen zur Stärkung der Integrierten Produktpolitik (IPP) erlassen. Die Forschungsprojekte im Rahmen der Maßnahme ForCYCLE II sollen die Ressourcennutzung über die gesamte Lebensdauer eines Produkts betrachten [35]. Im Teilprojekt "Digitale multikriterielle Materialauswahl zur optimierten Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten – DIMOP" werden wichtige Informationen des Produktdesigns zur Kreislauffähigkeit verschiedener Kunststoffmaterialien und Materialkombinationen zur Verfügung gestellt (vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [35]). Darüber hinaus hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im April 2019 einen Runden Tisch mit den Handelsunternehmen und -verbänden ins Leben gerufen, um die Thematik Verpackungen im Handel in den Fokus zu rücken. Dabei wurde u.a. über die Themen "Abfüllen von Produkten in wiederverwendbare Behältnisse", "Anti-Littering", und "Gestaltung von Verpackungen" diskutiert [36].

Der Bayerische Ministerrat hat im Jahr 2019 ein Maßnahmenpaket zur zukünftigen Vermeidung und Reduzierung von Kunststoffabfällen beschlossen. Dazu gehören eine Bundesratsinitiative für Verbote von Mikroplastik in Kosmetika, der Ausbau der Forschung zu Mikroplastik (z. B. Verhalten von Mikroplastik in Gewässerorganismen), die Erforschung nach alternativen abbaubaren Biokunststoffen, die qualitative und quantitative Weiterentwicklung des Recyclings, ein Ausbau der Verbraucherberatung sowie die Unterstützung der Kommunen bei der Vermeidung von Kunststoffabfällen [36].

Die Bayerische Bioökonomiestrategie hat zum Ziel, eine nachhaltige und biobasierte Wirtschaftsweise herbeizuführen. Die Landesregierung fördert daher den Aufbau von Forschungsnetzwerken der Bioökonomie. So hat der Projektverbund "BayBiotech" in anwendungsbezogenen Projekten die Entwicklung von biologisch abbaubaren Biokunststoffen vorangetrieben [37].

Abfallreduzierung

Bis 2040 sollen in der europäischen Union die Verpackungsabfälle pro Mitgliedstaat um 15 % verringert werden (Referenzjahr 2018).



KONZEPTE

und Technologieroadmaps

So vielfältig Kunststoffe hergestellt, verarbeitet und verwendet werden, so vielfältig sind auch die Ansätze zur Ressourceneinsparung, zur Treibhausgasreduktion und zur Vermeidung von Kunststoffemissionen. Die folgenden Abschnitte zeigen erfolgversprechende aktuelle Entwicklungen im gesamten Lebenszyklus von Kunststoffprodukten auf.



Produkt- und Produktionsinnovationen



Produkt- und Produktionsinnovationen, die auf eine ergiebigere Nutzung von Ressourcen zielen, können zugleich einen signifikanten Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasemissionen leisten. Es kann hier zwischen verschiedenen Strategien unterschieden werden. Erste Priorität sollte der reduzierte Materialeinsatz bei Erhalt der Funktionsmerkmale und konstanter Qualität haben. Neben der Steigerung der Materialeffizienz ist auch die Energieeffizienz ein wichtiger Stellhebel für CO₂-Einsparungen in der Produktion. Weitere Innovationen, die zur Reduktion des Treibhausgasausstoß beitragen können, betreffen die Substitution von fossiler Kunststoffneuware durch klimafreundlichere Alternativen sowie die Gewährleistung der Recyclingfähigkeit der Produkte. Anhand einiger Beispiele aus diesem breiten Handlungsfeld werden im Folgenden aussichtsreiche Konzepte und technische Entwicklungen vorgestellt.

Design for Recycling

Auswirkungen auf den Klimawandel sollen bei der Neuentwicklung und dem Redesign von Kunststoffprodukten mitgedacht werden. Insbesondere die Recyclingfähigkeit der Kunststoffprodukte ist eine entscheidende Stellschraube. Die Prinzipien guten Designs sind mittlerweile bekannt und beispielsweise von der Zentralen Stelle Verpackungsregister in den *Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG* veröffentlicht [38]. Plattformen wie *Recyda* und *Recyclass* bieten Software-Lösungen zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Kunststoffprodukten und stellen Design for Recycling Guidelines zur Verfügung. Die Integration dieser Design-Prinzipien in bestehende Entwicklungsprozesse, wie z. B. reversible Fügetechniken, ist jedoch häufig noch nicht etabliert. Gut integrierbare Lösungen, die die komplexen Interessen verschiedener Gruppen im Entwicklungsprozess berücksichtigen, stellen eine enorme Herausforderung dar. Aus diesem Grund befassen sich Forschungsprojekte, wie z. B. das Teilprojekt *DIMOP* der Projektverbundreihe *ForCYCLE II* damit, wichtige Informationen zur Kreislauffähigkeit verschiedener Kunststoffmaterialien und Materialkombinationen beim Produktdesign zur Verfügung zu stellen und somit verschiedene Kriterien, wie z. B. Funktionalität, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit gegeneinander abzuwiegen und eine ganzheitlich optimierte Materialauswahl zu ermöglichen (siehe hierzu auch Kapitel 5).

Teilweise sollen Unternehmen bereits in Form von Regularien, wie der am 30. März 2022 vorgeschlagenen Ökodesign-Verordnung oder der beschlossenen EU-Vorgabe 2019/904 Single Use Plastics (SUP) zu konkreten Maßnahmen verpflichtet werden [29,39]. Die SUP-Vorgabe tritt im Juli 2024 in Kraft und macht eine Umgestaltung von Verschlusssystemen von Einweg-Getränkeverpackungen einschließlich Verbundverpackungen wie Getränkekartons notwendig. Verschlüsse müssen in Zukunft fest als sogenannte "Tethered Caps" an den Getränkeverpackungen angebracht sein, um diese zusammen mit den Behältern zu recyceln und eine anders geartete Entsorgung der Verschlüsse oder Littering zu vermeiden. Ein solches Redesign nach den Richtlinien des Design for Recyclings zum Anlass genommen, können zusätzlich auch andere Aspekte, wie z. B. Materialeinsparungen berücksichtigt werden. So wurden bereits jetzt PET-Flaschen der Berry Global Group, die mit der bisher üblichen Mündung PCO 1881 versehen waren, auf die kürzere Version GME 30.40 umgestellt und so etwa 1g Kunststoff pro Flasche eingespart [40]. Angesichts der etwa 17 Milliarden verbrauchten Einweg-Kunststoffflaschen pro Jahr in Deutschland ergibt sich ein Einsparpotential von mehreren tausend Tonnen Kunststoff [41].

Recyclingfähigkeit

Die Recyclingfähigkeit von Kunststoffprodukten ist ein entscheidender Aspekt, um den Wandel zu einer nachhaltigen Kunststoffnutzung herbeizuführen.



Dünnwandverpackungen

Produktionsbedingte Limitationen bei der Einsparung von Kunststoffen werden durch die fortschreitende Weiterentwicklung von Produktionsanlagen verschoben. So erreicht beispielsweise eine moderne Spritzgießmaschine bei der Herstellung eines Eimers eine Reduktion der Wandstärke auf 0,4 mm und ermöglicht somit die Herstellung einer Dünnwandverpackung. Durch die dünnere Eimerwand konnte in diesem Beispiel das Teilegewicht und somit der Materialverbrauch um 20 % reduziert werden [42]. Weitere Möglichkeiten zur Reduktion von Wanddicken und somit zu einer höheren Ressourceneffizienz verspricht das Spritzprägen [43,44].

Schäumen

Im Bereich der Folienproduktion verspricht ein Forschungsprojekt zum Schäumen von Blasfolien hohe Materialeinsparungen. Ein Vergleich der Dichte geschäumter und ungeschäumter Folien weist beispielsweise auf eine potenzielle Materialeinsparung in Höhe von bis zu 62 % hin. Aufgrund der Schaumstruktur verringert sich zwar die Zugfestigkeit der Folie, jedoch nicht im gleichen Maße wie die Dichte, sodass auch bei gleichbleibender Qualität ein reduzierter Materialeinsatz möglich scheint [45].

Direktanspritzung

Weiteres Einsparpotenzial bietet die Umstellung der Produktion auf eine Direktanspritzung von Spritzgussteilen. So kann möglicherweise eine unnötige, umfangreiche Angussauslegung vermieden werden. Nach dem Umbau auf einen Heißkanal mit Nadelverschluss konnte beispielsweise bei der Produktion einer Frontkappe das Schussgewicht von 7,59 g auf 4,44 g reduziert und in Summe 1,2 t Kunststoffgranulat im Jahr eingespart werden [46].

Digitalisierte Messtechnik mit Regelkreis

Durch den Umstieg auf digitalisierte Messtechnik lassen sich relevante Produktparameter im laufenden Produktionsprozess messen und ermöglichen über einen Regelkreis eine schnelle bzw. sogar automatisierte Anlagenregelung. Anbieter solcher Systeme versprechen, dass die Produktion dadurch schneller angefahren werden kann und durch ein stetes Nachregeln mit geringen Schwankungen in der Qualität erfolgt [47,48]. Ein Beispiel für ein inline-Messverfahren stellt die vom SKZ entwickelte Methode zur Messung der Rohrwanddicke mittels Terahertz-Technik [49] dar. Somit können Anfahrschrott, Ausschuss und Sicherheitszuschläge signifikant reduziert werden. Ein optimierter Materialverbrauch mit minimalem Materialeinsatz ist die Folge.

Additive Fertigung

Großes Potenzial für Materialeinsparungen im Bereich der Produktion von Kleinserien und Prototypen bieten additive Fertigungsverfahren (3D-Druck) [50]. Durch die Rückführung von überschüssigem Material können Produktionsabfälle vermieden werden. Zusätzlich ist die Bauteilgeometrie in großem Maße flexibel, was sich als sehr günstig für die Fertigung von Leichtbauprodukten erweist. Insbesondere als On-Demand-Lösung kann der 3D-Druck gezielt zum Einsatz kommen, wodurch eine Überproduktion vermieden werden kann. Für eine ökologische Bewertung sollten neben der potenziellen Materialeinsparung auch Aspekte wie die Qualität und die Recyclingfähigkeit der mittels 3D-Druck hergestellten Produkte mitbetrachtet werden.

Prozessoptimierung

Die Weiterentwicklung und Optimierung von Produktionsprozessen bietet auch in Zukunft großes Potenzial für Material- und Energieeinsparungen.

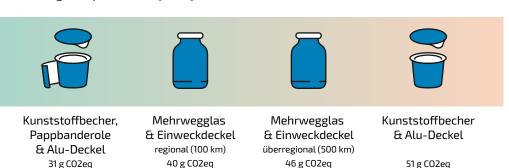


Substitution

Die Substitution von Kunststoffneuware aus fossilen Quellen durch ein anderes Material kann zu einer ökologischen Verbesserung führen, wobei sich nicht jede Substitution positiv auf die Ökobilanz auswirkt [51,52]. Für jedes Produkt ist dies daher im Einzelfall zu beurteilen.

Bei Verpackungen sind die Möglichkeiten zur Substitution von Kunststoff beispielsweise sehr vielfältig. Die Umstellung auf Einweg-Glas ist unabhängig von seinem Anwendungsbereich durchweg eine ökologisch nachteilige Verpackungslösung [53]. Eine Substitution mit Mehrweg-Glas kann im Falle eines Joghurtbechers unter der Bedingung kurzer Transportstrecken und vieler Nutzungskreisläufe des Glases sinnvoll sein [53–55]. Mit Mehrweglösungen befasst sich Abschnitt 6.4.

Werden Kunststoffe durch nachwachsende Rohstoffe wie z. B. Papier ersetzt, ist eine positive Auswirkung auf die Ökobilanz möglich. Ein typisches Beispiel ist ein Kunststoffbecher mit verringerter Wandstärke für Joghurtprodukte, welcher durch eine zusätzliche Pappbanderole eine ausreichende mechanische Stabilität erlangt. Diese Verpackung besitzt einen kleineren CO₂-Fußabdruck als ein Becher aus reinem Kunststoff, falls die Papierverpackung nicht deutlich schwerer ist als der ersetzte Kunststoff und die Papier-Rohstoffe aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammen. Für eine ökologische Bewertung von Papier-Kunststoff-Verbunden, wie sie z. B. für Milchverpackungen eingesetzt werden, muss insbesondere darauf geachtet werden, ob diese gut recycelbar sind [53,54].



Auswirkungen des Verpackungsdesigns auf den CO₂-Fußabdruck am Beispiel einer Joghurtverpackung (für 500 g Joghurt) [55]

Als weiteres Material aus nachwachsenden Rohstoffen bieten sich Biopolymere als Substitut für fossile Kunststoffe an. Die Rohstoffe für die Herstellung biobasierter Kunststoffe werden landwirtschaftlich angebaut, was zu geringeren CO₂-Emissionen führt, als dies bei Kunststoffen aus fossilen Quellen der Fall ist [56]. Eine ausführliche Betrachtung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist Inhalt von Abschnitt 6.3.

Eine der wichtigsten Varianten zur Substitution von Kunststoffneuware aus fossilen Rohstoffen mit weitreichenden Möglichkeiten zur Reduktion von CO₂-Emissionen ist der Einsatz von Kunststoffrezyklat. Damit die für eine Anwendung / ein Produkt potenziell geeigneten Rezyklate identifiziert werden können, sind in der Regel aufwendige Testserien bei Rezyklatverarbeitern erforderlich. Da vielfach Material- und Verarbeitungseinflüsse unterschätzt werden oder Spezifikationen nicht ausreichend definiert sind, erweist sich das Material oft als ungeeignet, wodurch entweder auf Neuware zurückgegriffen oder der aufwendige Testzyklus mit einem anderen Rezyklat erneut gestartet werden muss. Entwicklungszeiten sind daher heute meist immer noch sehr lang und die Akzeptanz, Rezyklate einzusetzen, ist in vielen Lieferketten immer noch sehr

Materialsubstitution

Kunststoffe aus fossilen Quellen durch Papier oder Glas zu ersetzen kann zur Einsparung von CO_2 -Emissionen führen, wobei dies für jedes Produkt im Einzelfall geprüft werden sollte.



gering [57]. Um hier Abhilfe zu schaffen, sind fortlaufend Entwicklungsprojekte nötig, die die Verwendbarkeit einzelner Sekundärkunststoffchargen für bestimmte Anwendungsfälle unter Beweis stellen und hieraus allgemeine Aussagen zu Einsatzmöglichkeiten verschiedener Abfall- und Rezyklatqualitäten erlauben. Durch die Beteiligung neutraler Forschungspartner in derartigen Entwicklungsprojekten kann mehr Vertrauen im Markt entstehen und der Einsatz von Kunststoffrezyklaten letztlich gesteigert werden.

Polymere aus CO₂

Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff für die Kunststoffherstellung hat den Vorteil, dass der Kohlenstoff des CO₂, der in Industrie- und Verbrennungsprozessen entsteht, nicht in die Atmosphäre entlassen, sondern in den Kreislauf zurückgeführt wird. Während der Nutzungsphase ist der Kohlenstoff in den hergestellten Kunststoffprodukten gespeichert. Die CO₂-Freisetzung erfolgt nach der Nutzungsphase und somit zeitverzögert. Da CO₂ eine stabile und unreaktive Verbindung ist, werden Katalysatoren, geeignete Reaktionspartner und Energie benötigt, um CO₂ in nutzbare Rohstoffe umzuwandeln. Zurzeit existieren nur wenige kommerzielle Prozesse, bei denen CO₂ als Rohstoff eingesetzt wird. Ein Großteil des CO₂ wird für die Harnstoff-Synthese genutzt [58]. Kunststoffe auf Basis von CO₂ existieren bisher nur in Form von Polyurethanen und Polycarbonaten. In Deutschland betreibt die Covestro AG in Dormagen eine Produktionsanlage für die Herstellung von Polyurethanen auf Basis von CO₂. Bei dem Prozess wird CO₂ als Rohstoff für die Herstellung von Polyolen eingesetzt. Die Polyole werden anschließend mit Diisocyanaten zu Polyurethan (PUR)-Schaumstoffen umgesetzt. Dabei wird der Kohlenstoff des CO₂ chemisch fest in das Material eingebunden und hat einen Massenanteil von 20 % im Endprodukt [58].

Die Technologie des Einsatzes von CO2 zur Herstellung von Kunststoffen steckt derzeit noch in den Kinderschuhen. Die Forschung im Bereich der rohstofflichen Nutzung von CO₂ hat in den vergangenen Jahren einen starken Zuspruch durch Politik und Gesellschaft erhalten. Daher wurden zunehmend Forschungsprojekte in diese Richtung gefördert [58]. Es bedarf insbesondere der weiteren Forschung an geeigneten Katalysatoren. Begleitend sollten die Weiterentwicklungen der Technologie ökobilanziell evaluiert werden, um tatsächlich einen ökologischen Vorteil zu identifizieren.



Kunststoffe aus CO2

Die Herstellung von Kunststoffen aus CO₂ bedarf noch ausführlicher Forschungsanstrengungen, um die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit zu gewährleisten und zu belegen.



Einführung des digitalen Produktpass

Eine weiter erhöhte Informationstransparenz ist zukünftig durch die im Rahmen des Aktionsplan Kreislaufwirtschaft und im Speziellen im Zusammenhang der Ausarbeitung der EU-Ökodesign-Verordnung zu erwarten. Hiernach ist für eine Vielzahl von – auch Kunststoffe enthaltenden – Produkten die Einführung eines digitalen Produktpasses vorgesehen, der Informationen zu Materialherkunft, Inhaltsstoffen und vielem Weiteren beinhaltet. Um für diesen anwenderfreundliche und branchenübergreifend auslesbare Lösungen zu schaffen, müssen einheitliche Informationskonzepte geschaffen werden, die allen Akteuren in der Wertschöpfungskette eine lückenlose Nachverfolgung ermöglichen [59].



Der digitale Produktpass ermöglicht eine vereinfachte Datenweitergabe und ist somit Treiber für die Kreislaufwirtschaft (Bild: freepik.com)

Steigerung der Energieeffizienz in der Kunststoffverarbeitung

Bei der Kunststoffverarbeitung wird die für die Maschinen erforderliche Energie zumeist elektrisch bereitgestellt. Während für das Plastifizieren und Aufschmelzen je nach verarbeitetem Material i. d. R. Temperaturen ab 200 °C erforderlich sind, ergibt sich die aufzubringende charakteristische Energiemenge aus der Enthalpiedifferenz zwischen Ausgangs- und Verarbeitungstemperatur der Kunststoffe inklusive der eingesetzten Additive und Füllstoffe (z. B. Talkum, Kreide). Weiterhin sind Energieeinträge u. a. für Materialtrocknung und -förderung, für Antriebe sowie für die Kühlung von Maschinenteilen notwendig. Um formstabile Produkte herzustellen, wird das Material nach der Formgebung bis zum Erstarren abgekühlt. Dabei wird ein Großteil der eingebrachten Energie unter erneuter Energiezufuhr wieder abgeführt, hauptsächlich mittels definierter Luft- oder Wasserkühlung. Zusätzlich geht ein Teil der zugeführten Energie durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung verloren (beim Spritzgießen z. B. ca. 20 %) [60].

In der Mehrzahl der Produktionen wird die kostenlos zur Verfügung stehende Energie aus Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben (z. B. über Freikühlung) oder unter erneutem Energieeinsatz mittels Kältemaschinen abgeführt. Falls doch eine Wärmerückgewinnung stattfindet, dann meist lediglich als Heizwärme, z. B. für Büroräume. Um das Potenzial auszunutzen, sollte die Nutzung von Abwärme möglichst prozessnah erfolgen, mit möglichst geringen zeitlichen und örtlichen Unterschieden zu ihrer Entstehung.

Eine solche Möglichkeit, die kontinuierlich entstehenden Abwärmeströme sinnvoll zu nutzen, ist eine prozessinterne Rückführung zur Vorwärmung des eingesetzten Kunststoffgranulats mittels eines Schüttgutwärmetauschers [61]. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz von Wärmetauschern bis zu 15 % des für die Extrusion benötigten Energieeinsatzes eingespart werden können [62,63].

Die technischen Voraussetzungen für die Granulat- und Füllstoffvorwärmung sind prinzipiell gegeben, dennoch wird sie nicht entsprechend zum Erreichen der Energieeinsparziele umgesetzt. Einige Hersteller bieten bereits Systeme zur Granulatvorwärmung an, die trotz in Aussicht stehender Amortisationszeiten von 1,6 bis 4 Jahren in der Industrie kaum Anwendung finden [63]. Bei weiter steigenden Energiepreisen ist jedoch zu erwarten, dass sich die Materialvorwärmung weiterverbreitet. Unternehmen haben beispielsweise die Möglichkeit auf der Homepage des SKZ mittels eines Online Tools¹⁰ die durch Vorwärmung erwartbaren spezifischen Energieeinsparpotenziale ihrer Produktion zu bestimmen. Das Tool dient somit als Entscheidungshilfe für die Investition in Vorwärmtechnik.

 $10\,https://www.skz.de/forschung/kreislaufwirtschaft/optiheat-vorwaermung-kunststoffverarbeitung$

Schematische Darstellung der energetischen Vorgänge bei Extrusion/Spritzgießen, nach Weiß modifiziert [54].

Ausblick

In Deutschland betragen die durch Materialeffizienz erzielten Einsparungen im Bereich Kunststoffverpackungen im Zeitraum von 1991 bis 2020 ca. 27 % (entspricht 751 kt). Trotzdem stieg der Gesamtverbrauch durch ein verändertes Konsumverhalten um 113 % von 977 kt auf 2.065 kt [1]. Durch diesen sogenannten Rebound-Effekt werden Einsparungen durch Materialeffizienz wieder zunichte gemacht bzw. sogar überkompensiert. Ähnliches gilt für die Energieeffizienz. Da die Entwicklung weiter voranschreitet, ist auch in Zukunft mit zusätzlichem Einsparpotenzial, beispielsweise durch die Optimierung von Produktionsprozessen, zu rechnen. Um tatsächlich Treibhausgasemissionen zu verringern, muss dieser Fortschritt jedoch auch mit einer Veränderung der Nutzungsmuster von Kunststoffprodukten einhergehen (siehe Abschnitt 6.4).

Die Recyclingfähigkeit von Kunststoffprodukten kann weiter deutlich verbessert werden. Label und Zertifikate, die die Recyclingfähigkeit von Produkten nachweisen, können es auch dem Verbraucher ermöglichen durch seine Konsumentscheidungen Einfluss auf diesen Wandel zu nehmen. Zusätzlich können regulatorische Vorgaben den Wandel vorantreiben und gleichzeitig eine Möglichkeit darstellen auch andere ökologische Aspekte, wie Materialeinsparungen beim Redesign der Kunststoffprodukte, in ganzheitlichen Entwicklungsprozessen mitzudenken.

Rezyklateinsatz

In vielen Branchen bestehen Vorurteile gegenüber dem Einsatz von Rezyklaten. Um Vertrauen in die Performance von Sekundärkunststoffen zu schaffen, sind neutral begleitete Entwicklungsvorhaben von der Abfallentstehung, über die Wiederaufbereitung bis hin zum Einsatz in der Verarbeitung notwendig.



Kreislaufschließung durch verbesserte Sammel-, Sortier- und Recyclingsysteme

Aktuell können 35 % der Kunststoffabfälle in Bayern werkstofflich verwertet werden (siehe Abschnitt 3.3). Durch den Ausbau und die weitere Entwicklung innovativer Sortieranlagen, eine gezielt an die Bedarfe angepasste Aufbereitung von Abfällen und die konsequente Nutzung digitaler Instrumente zur Verbesserung der Informationstransparenz zu im Umlauf befindlichen Kunststoffen kann diese Quote noch deutlich gesteigert werden.

Sammlung/Sortierung von Abfällen

Sehr gut verwertbare Abfälle sind bei der Produktion und Verarbeitung von Kunststoffen anfallender Ausschuss (Post-Industrial-Abfälle) und Nebenprodukte (siehe Abschnitt 3.3). Die Recyclingquote liegt für die in Bayern aufkommenden 175 kt bei 74 %. Kunststoffrecycler, wie die R.Plast Gmbh (siehe Abschnitt 3.3), holen diese Materialien ab und bereiten sie direkt für den Wiedereinsatz in Form von Kunststoffregranulaten und -recompounds (spezifisch additivierte Kunststoffgranulate für bestimmte Einsatzgebiete) auf. Grundsätzlich ließen sich über den direkten Wiedereinsatz in der eigenen Produktion die in diesem Bereich auftretenden Abfallmengen auch von vornherein stark reduzieren. Oftmals wird diese Praxis aufgrund von Vorbehalten vieler OEM nicht zugelassen [57].

Eine weitere Möglichkeit besteht in dem Ausbau lokaler Kooperationen zur Direktverwertung. So haben sich Forschungsinstitute und Kunststoffverarbeiter in und um Würzburg im Projekt "Kooperative Kunststoffkreisläufe Mainfranken" zusammengeschlossen mit dem Ziel, Reststoffe durch direkten Austausch unter den Unternehmen wieder in die Wertschöpfungskette zurückzugeben [59]. Ein Vorgehen, das sich zur Steigerung der lokalen Wertschöpfung auf viele Regionen Bayerns übertragen lässt.



Stofflich gut verwertbare Reste aus der Herstellung von Kunststoffolien (Foto: SKZ)

Kunststoffabfälle verwerten

Abfälle aus der Produktion und der Verarbeitung von Kunststoffen liegen oft sortenrein und wenig verunreinigt vor. Ihre stoffliche Verwertungsquote liegt heute schon bei 74 %.

Post-Consumer-Abfälle werden in Deutschland im Wesentlichen durch Sammelsysteme, Gewerbeabfallentsorger und die dualen Systeme entsorgt. In Bayern fallen in diesem Bereich 860 kt Kunststoffabfälle an (siehe Abschnitt 3.3), wovon derzeit 286 kt stofflich verwertet werden.

Verschiedene Beispiele zeigen, dass Sammel- bzw. Rücknahmesysteme für einzelne Materialien oder Anwendungen gut funktionieren können und sich so geschlossene Kreisläufe etablieren lassen. Beispiele hierfür sind die PET Flaschensammlung sowie Rücknahmesysteme für Fenster, PVC Bodenbeläge, Rohre und Agrarfolien [65]. Handelt es sich hierbei derzeit in der Regel, um branchenweite Lösungen, so sind auch einzelne Kunststoffunternehmen gewillt, eigene Sammelsysteme zu etablieren, scheitern jedoch oft an der Bereitschaft ihrer Business-to-Business (B2B) Kunden, den Einsatz der gesammelten Materialien auch zuzulassen [57]. Hier bedarf es an wertschöpfungsstufenübergreifenden Kooperationsprojekten, die von der Abfallsammlung über die Wiederaufbereitung und -verarbeitung bis zum Produkteinsatz die Realisierbarkeit konkreter Kreisläufe unter Beweis stellen, sodass Vertrauen bei den B2B Endkunden entstehen kann.

Über die dualen Systeme wird in Deutschland der Betrieb von Sortieranlagen für Leichtverpackungen (LVP-Sortieranlagen) finanziert. In Deutschland werden ca. 25 dieser Anlagen betrieben. Insgesamt fallen in Bayern ca. 213 kt Kunststoffabfälle als Leichtverpackungen an, 47 % hiervon können in LVP-Sortieranlagen stofflich verwertet werden. Dieser Anteil kann jedoch durch den flächendecken Einsatz bereitstehender Technologien signifikant erhöht werden. So hat das Unternehmen PreZero im Jahr 2022 in Eitting eine neue LVP-Sortieranlage in Betrieb genommen, in der 18 verschiedene Verpackungsfraktionen nach Art und Farbe sortiert werden. Durch sogenannte "Black Scans" können hier auch schwarze Kunststoffe identifiziert werden, die in herkömmlichen Anlagen nicht erkannt werden können [66]. Außerdem unterstützen Sortierroboter der neuesten Generation die Mitarbeiter*Innen bei der Qualitätskontrolle und der Nachsortierung. Auf



Rückholsysteme schaffen geschlossen Kreisläufe. Die Rewindo GmbH ermöglicht so das PVC-Fensterrecycling und den Wiedereinsatz des Materials in neuen Fenstern (Foto: Rewindo).

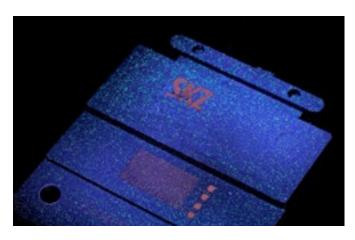
Basis künstlicher Intelligenz kann die vollautomatische Sortieranlage sämtliche durch den Gesetzgeber vorgeschriebenen Sortierquoten übertreffen [66]. Die technische Optimierung von Sortierstraßen ist allerdings bei weitem noch nicht ausgereizt. Verschiedene sich ergänzende Technologien sind hier in der Entwicklung, wie zum Beispiel der Einsatz von Markertechnologien. Verschiedene Marker, wie digitale Wasserzeichen oder Fluoreszenzmarker können bei der Verarbeitung von Kunststoffverpackungen ein- oder aufgebracht werden [67,68]. Die durch sie mitgetragenen Information zu den einzelnen Materialien können nach der Nutzung durch die entsprechende Sensorik ausgelesen und für eine differenziertere Trennung genutzt werden.

Kreislaufschließung

Viele Beispiele zeigen, dass Sammel- und Rücknahmesysteme gut funktionieren können. Die hier bestehenden Potenziale zur direkten Kreislaufschließung von Kunststoffen sind noch längst nicht ausgeschöpft.



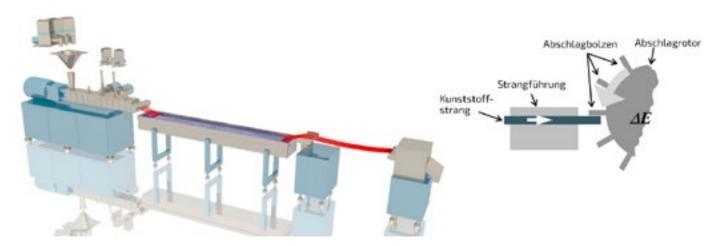
Hinzu kommen Weiterentwicklungen beim Einsatz von KI-basierten Mustererkennungsverfahren in Sortierstraßen, die es ermöglichen Material- und Objekteigenschaften besser zu erkennen. Mittels Reinforcement Learning können pneumatische Düsen angesteuertwerden, welche die Objekte in die richtigen Kanäle lenken. Gegenüber den herkömmlichen Quoten verspricht der Einsatz dieser Technologien in Kombination mit dem Einsatz von Markertechnologien eine höhere Sortierquote für die stoffliche Verwertung in LVP-Sortieranlagen von ca. 15 %11.



Fluoreszenzmarker zur Markierung und zur Identifikation von Kunststoffabfällen (Foto: SKZ)

Mechanisches Recycling

Das mechanische Recycling von Kunststoffabfällen geschieht durch einen Extruder, der vorgemahlene Kunststoffabfälle, sogenanntes Mahlgut aufschmilzt. In Form von plastischen Strängen verlässt der Kunststoff den Extruder und wird in einem Wasserbad abgekühlt. Hiernach werden durch einen mit Abschlagbolzen besetzten Rotor einzelne Pellets am Strang abgeschlagen. Das so gewonnene sogenannte Regranulat kann dann an Kunststoffverarbeiter zur Herstellung neuer Kunststoffprodukte als Rezyklat vertrieben werden.



Regranulierung von Kunststoffabfällen (mechanisches Recycling) durch Aufschmelzen und Abkühlen von Kunststoffabfällen mittels eines Extruders

Sortierquote erhöhen

Der Einsatz von Markertechnologien sowie die Weiterentwicklung KI-basierter Sortiertechnologien verspricht eine höhere Sortierquote für die stoffliche Verwertung in LVP-Sortieranlagen von ca. 15 %.



¹¹ Übereinstimmende Expertenschätzung von SKZ-Projektpartnern aus den Bereichen Markertechnologien und Künstliche Intelligenz für Sortierprozesse.

Trotz dieser guten Voraussetzungen steht einer werkstofflichen Verwertung häufig im Wege, dass Wiederaufbereitern, die die Kunststoffabfälle abholen wollen, zu wenig spezifische Materialinformationen vorliegen. Hierzu zählen Angaben zu verwendeten Polymertypen, Füllstoff- oder Verstärkungsstoffgehalten (z. B. Glasoder, Carbonfaser), Additivgehalte und vor allem Hinweise auf möglicherweise enthaltene gefährliche Stoffe. Lägen diese Informationen vor, hätten Recycler größere Sicherheit beim Einkauf, d. h. sie wüssten dass die Materialien auch für spezielle Anwendungen (z. B. in Automotivebauteilen) geeignet sind [69].

Um den Handel und letztlich die Verwendung von Sekundärkunststoffen zu erleichtern, haben sich in den letzten Jahren vermehrt digitale Plattformen gegründet. Beispiele hierfür sind die Online-Marktplätze Cirplus und Plastship. Die Cirplus GmbH betreibt eine globale Handelsplattform für standardisierte Rezyklate und Kunststoffabfälle, auf der sie die Abfall-, Recycling- und Kunststoffindustrie zusammenbringt. Aus der RIGK GmbH (Rückholgesellschaft für industrielle und gewerbliche Kunststoffe) hervorgegangen ist die europaweit operierende Handels- und Serviceplattform Plastship. Die Plattform integriert neben Kunststoffverarbeitern und -verwertern zusätzlich Additivhersteller, die ihre Additive (Stoffe, die Kunststoffen bestimmte Eigenschaften geben, wie Schlagzähmodifikatoren, Weichmacher, UV-Absorber etc.) passend zu Sekundärkunststoffen und ihren Aufbereitungsanforderungen anbieten. Ergänzend zum Handel werden Services, wie die Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen und Produkten, angeboten.

Um den Online-Handel mit Sekundärkunststoffen weiter zu vereinfachen, liegt seit 2021 zudem mit der DIN SPEC 91446 eine Klassifizierung der Datenqualitäten zu Kunststoffrezyklaten vor [70]. Die Einführung von Datenqualitätslevels und je nach Informationsquantität und Güte die Klassifizierung der Materialien intendiert hierbei, dass den Materialien möglichst viele Informationen beigegeben werden, um Absatzchancen zu erhöhen. Hierdurch sollen Kommunikationslücken zwischen den verschiedenen Akteuren der zirkulären Kunststoff-Wertschöpfungskette geschlossen werden, weil Qualitätsanforderungen nun auf Grundlage derselben Basis kommuniziert werden können.

Plattformen wie Cirplus und Plastship vereinfachen somit die Beschaffung von Kunststoffabfällen und Rezyklaten und minimieren Hindernisse in der industriellen Nutzung. Gleichzeitig werden Kunststoffrecyclern neue Märkte und Vertriebslösungen geboten.

Neuer Ansatz - Chemisches Recycling

Bei der derzeitigen Abfallzusammensetzung kommen mechanische Recyclingmethoden – auch bei gezielter Weiterentwicklung – an ihr Limit. Bestimmte Kunststoffe (z. B. Duroplaste, laminierte Kunststoffe, langfaserverstärkte Kunststoffe) sind praktisch werkstofflich nicht wiederverwertbar [71].

Im Bereich des Kunststoffrecyclings liegt deshalb in den letzten Jahren der Fokus der Forschung auch auf chemischen Recyclingverfahren, die es ermöglichen sollen auch werkstofflich unverwertbare

Kunststoffe in den Kreislauf zurück zu führen und so eine thermische Verwertung zu vermeiden. Diese sind noch in der Entwicklung und zählen noch nicht zum Stand der Technik.



Chemisches Recycling kann ein Baustein für mehr Kreislaufwirtschaft sein (Quelle: stock.adobe.com)

Anders als beim mechanischen Recycling verändert das chemische Recycling die Struktur der Polymerketten. Sie zerfallen in kleinere Moleküle oder Monomere. Zu den wichtigsten Depolymerisationsverfahren zählen hauptsächlich lösungsmittelbasierte Prozesse (Solvolyse) oder thermochemische Prozesse (z. B. Pyrolyse) [71]. Unter Solvolyse werden einzelne Prozesse wie Alkoholabbau, Glykolyse oder Hydrolyse zusammengefasst. Solvolyse ist besonders geeignet für: Polyadditiv- und Polykondensationspolymere (z. B.: PET, PA, Polylactic Acid (PLA), PUR). Das Ausgangsmaterial wird mit dem Lösungsmittel zusammengeführt. Durch Zugabe von Depolymerisationsreagenzien und Katalysatoren werden die Polymere unter Erhitzen zu Monomeren, Monomerderivaten und Oligomeren. Diese recycelten Materialien sind das Ausgangsmaterial für neue Polymersysteme. Allerdings sind Lösungsmittelbehandlungen sehr komplex und stoßen bei einem hohen Verschmutzungsgrad des Rohmaterials an ihre Grenzen [71,72].

Thermochemische Umwandlungsverfahren umfassen Pyrolyse- und Vergasungsverfahren. Das katalytische Cracken (Pyrolyse mit Katalysatorzusatz) findet oberhalb von 300 °C ohne Sauerstoff statt. Mischkunststoffe werden in kurzkettige Kohlenwasserstoffe in Form von Öl und Gasen wie Kohlendioxid und Methan umgewandelt. Das entstandene Öl kann als Rohstoff direkt in der petrochemischen Prozesskette oder in anderen Syntheseprozessen genutzt werden. Dahingegen werden Gase und Feststoffe bisher nur sinnvoll genutzt, um beispielsweise den Energiebedarf eines Prozesses zu decken [71].

Derzeit gibt es ein starkes Bestreben der Industrie, das chemische Recycling im industriellen Maßstab umzusetzen. Beispielsweise hat 2018 das deutsche Unternehmen *BASF* das Projekt *ChemCycling* gestartet, um durch thermochemische Prozesse Synthesegas oder Öl aus Plastik herzustellen, die in der Produktion wiederverwendet werden können [73]. Ebenfalls startete im Jahr 2018 das Pilotprojekt *ReOil* vom österreichischen Energieunternehmen *OMV*. In dem Projekt soll der Kunststoffabfall in synthetisches Rohmaterial überführt und daraufhin in Raffinerieprodukte weiterverarbeitet werden. Bis 2022 plant die *OMV*, die Recyclingkapazität zu erhöhen und bis 2025 eine neue Anlage zu bauen, deren Kapazitäten einem industriellen Maßstab entsprechen [74]. Weitere Pilotprojekte starten international und sind oftmals staatlich gefördert [75]. In Bayern startete hierzu bislang noch kein Pilotvorhaben, ist im Hinblick auf die Bedarfe an Sekundärkunststoffen der bayerischen Kunststoffverarbeitung aber notwendig.

Die technische Eignung sowie die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit der chemischen Recyclingverfahren sind zum derzeitigen Zeitpunkt im Vergleich zum werkstofflichen und energetischen Recycling noch nicht umfassend erforscht. Die Hoffnung besteht, dass durch das chemische Recycling auch gemischte Kunststoffabfälle und schwer werkstofflich recyclingfähige Kunststoffe verwertet werden können [75].

Der ökonomische Vorteil ist für den industriellen Maßstab aufgrund der derzeitigen Energie- und Mengenbilanzen im Vergleich zu anderen Verfahren nicht gegeben. Damit die chemischen Recyclingverfahren wirtschaftlicher werden, sind erhebliche Mengen an Kunststoffabfällen vonnöten. Die komplexen Technologien benötigen für ein gutes Ergebnis weiterhin eine gute Sortierung und eine energieintensive Vorbehandlung der Kunststoffe. Erheblicher Kostentreiber dabei ist auch die Bereinigung der durch das chemische Recycling entstehenden oder im Syngas enthaltenen unerwünschten Nebenprodukte [76]. Zum jetzigen Zeitpunkt ist in Deutschland der Betrieb einer industriellen Anlage aufgrund der Unwirtschaftlichkeit durch den erheblichen Sortierungs- und Reinigungsaufwand oder die fehlende technische Umsetzbarkeit noch nicht gelungen [71,72,76,77].

Chemisches Recycling

Das chemische Recycling kann sich als sinnvolle Ergänzung zum mechanischen Recycling etablieren. Der Betrieb weiterer Pilotanlagen ist jedoch nötig, um die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit zu überprüfen.



Sowohl die Weiterentwicklung von Sammelsystemen und Sortiertechnologien als auch die Wiederaufbereitung und der Wiedereinsatz von Sekundärkunststoffen haben großes Entwicklungspotenzial, um die Schließung von Kunststoffkreisläufen weiter voranzutreiben. Digitale Technologien, insbesondere die Einführung des Produktpasses und die somit verbesserte Rückverfolgbarkeit können dazu beitragen, dass Materialien unter Berücksichtigung ihrer Eigenschaften effizient und zielgenau in den Kreislauf zurückgeführt werden. Das chemische Recycling ist noch im Entwicklungsstadium und muss in weiteren Pilotprojekten seine ökonomische und ökologische Tragfähigkeit unter Beweis stellen. Alle aussichtsreichen Technologien profitieren derzeit von der hohen Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten, sodass sich die durch ihren Einsatz bedingten Mehrkosten rechtfertigen. Eine Steigerung der Rezyklatnachfrage aufgrund absehbarer Vorgaben bei Rezyklatquoten in einzelnen Anwendungen oder auch materialspezifisch im Rahmen des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft der EU (siehe Abschnitt 5) wird die Technologieentwicklung und ihren Einsatz weiter befördern.

Bioökonomische Potenziale für Kunststoffe

6.3

Der Markt für biobasierte Biokunststoffe hat in den letzten Jahren stark zugenommen und wird weiterhin an Bedeutung gewinnen, auch wenn der Materialpreis für Biokunststoffe in den meisten Fällen noch deutlich über dem seiner petrochemisch basierten Pendants liegt. Neben der Herstellung von Biokunststoffen kann Biomasse auch als Füllstoff für Verbundwerkstoffe eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist der Werkstoff WPC (Holz-Kunststoffverbund), der sich besonders zur Herstellung von Terrassendielen und Fassadenelementen etabliert hat.

Biobasierte Kunststoffe

Biobasierte Kunststoffe werden aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Als "biobasiert" dürfen sie auch bezeichnet werden, wenn der in ihnen enthaltene Anteil an nachwachsenden Rohstoffen nicht bei 100 % liegt [78,79]. Die am häufigsten zur Herstellung verwendeten Rohstoffe sind Stärke und Zellulose. Aus ihnen werden Monomere zur weiteren Verarbeitung hergestellt [78]. Mit einem Marktanteil von etwa 1 % sind biobasierte Kunststoffe derzeit noch ein Nischenmarkt [80,81].

Biobasierte Kunststoffe finden dennoch heute schon Anwendung in einer Vielzahl an Produkten. 50 % der weltweiten Produktion biobasierter Kunststoffe sind sogenannte "Drop-In"-Lösungen. Diese Kunststoffe, wie Bio-PE, Bio-PET oder Bio-PA, unterscheiden sich in ihrer chemischen Struktur nicht von Polymeren aus konventioneller Herstellung. Ihr Einsatz ist insbesondere aufgrund ihrer Einsatzfähigkeit in gängigen Verarbeitungsverfahren und im Hinblick auf ihre Recyclingfähigkeit in bestehenden Systemen problemlos möglich [80]. Bei ihnen ist die Verwendungsvielfalt enorm. Sie können in fast allen bekannten alltäglichen Gegenständen Anwendung finden. PET-Flaschen, Verpackungen, kompostierbare Gemüse- und Obstbeutel [82], aber auch Interieur in der Automobilbranche sind nur einige Beispiele [83]. Im Gegensatz zu den "Drop-In"-Kunststoffen können "neue" biobasierte Polymersorten, wie z. B. PLA aufgrund ihrer geringen Stoffstrommengen derzeit noch nicht getrennt aus Post-Consumer-Abfällen aussortiert werden und werden daher in sog. Mischkunststofffraktionen thermisch verwertet. Neben der Polymerproduktion werden nachwachsende Rohstoffe auch für biobasierte Additive eingesetzt. Diese machen aktuellen Studien zufolge etwa einen Anteil von 2 % am gesamten Additivmarkt aus. Sie werden als Weichmacher, Biozide sowie als Flammschutzmittel eingesetzt [84].

Ein ökologischer Vergleich der sog. "Drop-In"-Lösungen mit ihren petrochemischen Pendants (Bio-PE mit PE, Bio-PA mit PA, Bio-PET mit PET) ist aufgrund ihrer identischen Funktionalitäten gut möglich. Hierbei zeigen sich sowohl ökologische Vor- als auch Nachteile. Als ökologisch vorteilhaft erweisen sich biobasierte Kunststoffe zumeist in den Wirkungskategorien "Treibhauspotenzial" und "nicht erneuerbarer Energieverbrauch", wohingegen es z. B. in den Bereichen Eutrophierung oder Versauerung der Böden zu größeren Belastungen kommen kann, insbesondere dann, wenn nachwachsende Rohstoffe eigens für die Kunststofferzeugung angebaut werden [56]. Vorteilhafter ist daher die Nutzung von Abfall- und Reststoffen [85]. Der Bedarf an Agrarland für die Gesamtproduktion biobasierter Kunststoffe betrug weltweit im Jahr 2019 ungefähr 0,015 % (0,79 Mio. Hektar) und wird auch bei den in absehbarer Zeit zu erwartenden Wachstumsraten vergleichsweise gering bleiben (2,9 Mio. Hektar = 0,058 % in 2024) [86].

Handelt es sich um bioabbaubare, biobasierte Kunststoffe wie PLA oder PHA, bestehen besonders attraktive Einsatzmöglichkeiten in der Land- und Forstwirtschaft. Ein beliebtes Beispiel sind die Mulchfolien, welche nach der Nutzung einfach untergepflügt werden können. Diese zersetzen sich im Boden [80] und belasten diesen folglich nicht mit Mikroplastik. Andere Beispiele sind Pflanzenclips, Anzuchttöpfe oder Garne [80].

Mit dem *BioCampus MultiPot* entsteht im Hafen Straubing-Sand derzeit eine Mehrzweck-Demonstrationsanlage, deren technischer Fokus auf der Nutzung lignocellulosehaltiger Rohstoffe, biochemischer Produktumwandlung und einer flexibel anpassbaren Aufarbeitungstechnik liegt. Der Freistaat Bayern unterstützt
die Errichtung der Anlage über eine Investitionsfördermaßnahme. Auch die Nutzbarmachung nachwachsender Rohstoffe für biobasierte Kunststoffe kann hiervon erheblich profitieren [87]. Eine weitere bayerische
Fördermöglichkeit ist das Programm *BayBioökonomie-Scale-Up*, das Einzelunternehmen bei Investitionen in
Produktionsanlagen zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe unterstützt [88].

Nachwachsende Rohstoffe im Verbund mit Kunststoff

In Europa machen Bio-Verbundwerkstoffe 15 % der zum Einsatz kommenden Verbundwerkstoffe aus [89]. Hiervon wiederum handelt es sich bei ca. 75 % um sogenannte "Wood Plastic Composites" (WPC), ein Verbundwerkstoff aus einer Polymermatrix und Holzfasern oder Holzmehl. Verglichen mit traditionellen Holzwerkstoffen hat WPC den Vorteil, dreidimensional formbar und feuchteresistenter zu sein. Somit erschließt der Werkstoff Anwendungen, in denen Holz sonst nicht eingesetzt werden könnte. Gegenüber reinem Kunststoff ist WPC aufgrund des Holzanteils von bis zu 80 % ökologisch vorteilhafter. Extrudierte WPC-Profile finden derzeit breite Anwendung im Außenbereich, z. B. als Terrassendielen, Bootsstege, Fassadenverkleidungen und Geländern. Innenraumteile für die Automobilindustrie werden vor allem im Pressverfahren hergestellt. Gehäuse und Möbel werden durch Spritzgießen gefertigt. Da sich in einzelnen Bereichen gerade erste Marktsättigungen abzeichnen [90], werden neue Anwendungen angestrebt. Beispiele hierfür reichen von Spielwaren über Fensterrahmen bis zu Kabelschächten. Auch neue Verfahren, wie das Schäumen von WPC könnten in Zukunft stärker industriell umgesetzt werden. Die hierdurch erzielte Dichtereduktion auf 700-800 kg/m³ ermöglicht WPC breitere Einsatzfelder. Die Basis hierfür wurde durch wissenschaftliche Untersuchungen bereits geschaffen [91–93].

Biobasierte Kunststoffe

Biobasierte "Drop-In"-Polymere unterscheiden sich in ihrer chemischen Struktur nicht von Polymeren auf fossiler, petrochemischer Basis. Ihre Verarbeitung und ihr Recycling ist ohne weitere Verfahrensanpassungen möglich.



Auch wenn die WPC-Branche beständig wächst, bleibt der Werkstoff noch hinter seinen Potenzialen zurück. Die WPC-Verarbeitung ist für viele Unternehmen noch Neuland. Um für neue Produkte erforderliche Eigenschaftsprofile des Werkstoffs (Steifigkeit, Bruchfestigkeit, Feuchteresistenz etc.) zu entwickeln, fehlt oft das Know-how in den Unternehmen.

Ebenfalls vielversprechend erscheint die Anreicherung von Kunststoffcompounds durch Biokohlenstoff. Bis zu 50 % der Polymermatrix lassen sich durch den nachwachsenden Rohstoff ersetzen. Der Werkstoff eignet sich u. a. zur Herstellung verschiedenster Spritzgussteile, Schäumen, Pflanztöpfen und extrudierten Hülsen und Kappen [94].



Der WPC-Kabelschacht ecopolytec, ein Entwicklungsprodukt der in Garmisch Partenkirchen ansässigen Langmatz GmbH und des SKZ. (Foto: Langmatz GmbH)

Ausblick

Die Produktion von biobasierten Kunststoffen verzeichnet jährliche Wachstumsraten von 10 – 20 %. Bis 2027 wird annähernd eine Verdreifachung der weltweiten Produktionsmenge auf 6,3 Mio t prognostiziert [95]. Für Deutschland wird eine Erhöhung der Produktionsmenge von fast 95 % von 2019 bis 2024 erwartet, wobei die Mengenzunahmen insbesondere für den nicht biologisch abbaubaren Markt erwartet werden [96]. Da biobasierte im Vergleich zu fossilen Kunststoffen eine vergleichsweise gute Treibhausgasbilanz haben, ist ein Anstieg ihrer Produktionsmenge zu Lasten fossilbasierter Polymere aus Klimasicht wünschenswert. Um die regionale Bioökonomie bei Kunststoffen weiter zu befördern, sind unbedingt verschiedenste Modellregionen mit konkreten regionalen nachwachsenden Rohstoffquellen sowie Kunststoffherstellern, Kunststoffaufbereitern und -verarbeitern zu realisieren. Bislang bestehende Modellregionen greifen das Thema Bioökonomie eher breit auf; der Fokus angewandter Forschung auf die Verwendung nachwachsender Rohstoffe für Kunststoffe, abgestimmt auf lokale Anwendungsbedarfe einzelner Branchen, wäre enorm wichtig, um das Thema in die Praxis zu bringen.

Neue Nutzungsmuster im Umgang Vermeidung, Mehrweg, Nutzen mit Kunststoffprodukten können zur **Wiederverwendung** statt Besitzen Vermeidung von Kunststoffabfällen **Vorbereitung zur** Reparatur beitragen. Im Sinne der Abfallhierarchie Wiederverwendung ist der Abfall der Beste, der gar nicht erst Mechanisch/Chemisch Recycling entsteht; die Vermeidung von Kunststoffabfällen hat daher oberste Priorität. Unter diesem Polymere aus CO2: Verwertung Wärme und Stromgewinnung Motto können die Konzepte zur Etablierung neuer Nutzungsmuster zusammengefasst werden. Verpa-Beseitigung ckungsabfall, vor allem im Lebensmittelbereich kann durch die Umsetzung von Pfand- und Mehrwegsystemen Einordnung nachhaltiger Kunststoffnutzungsmuster in die europäische Abfallhierarchie verringert werden. Weitere Ansätze zur Verlängerung der Nutzungsdauer von kunststoffhaltigen Produkten, wie Nutzen statt Besitzen, Reparieren und Wiederverwenden erhöhen die Ressourceneffizienz von Produkten und verrin-

Mehrweg

gern so auch das Abfallaufkommen [97].

Die primäre Aufgabe von Verpackungen ist der Schutz von Gütern sowie das Ermöglichen von Lagerung und Transport. Mehrwegverpackungen erfüllen diese Aufgaben während gleichzeitig Ressourcen und Einwegverpackungsmüll gespart werden. Da bei Mehrwegsystemen der Materialeinsatz und die Kosten für den Materialeinsatz auf mehrere Umlaufzyklen umgelegt wird, kann die Verpackung robuster konstruiert werden. Die Bruchquoten sind entsprechend bei Mehrwegverpackungen geringer als bei Einwegverpackungen, da sparsamer Materialeinsatz und Robustheit nicht miteinander konkurrieren müssen. Auch bewirken Mehrwegverpackungen eine Vermeidung von Plastic Littering, da Pfand oder Miete wirksame Anreize zur Rückgabe darstellen [98].

Durch die seit 2023 eingetretene Angebotspflicht für Mehrwegverpackungen im Gastronomiebereich (siehe Abschnitt 5) finden Mehrweglösungen mehr und mehr Einzug in die alltägliche Praxis. So hat die Münchener *RECUP GmbH* ein Pfandsystem etabliert, über das an 24 000 Ausgabestellen in Deutschland Becher und Schalen ausgegeben und zurückgenommen werden können (www.recup.de). *Recup* ist das wohl prominenteste Beispiel eines Poolsystems für Mehrwegverpackungen in der Gastronomie. Neben dem Poolsystem gibt es noch weitere Ansätze für den Einsatz von Mehrwegverpackungen. Schließen sich mehrere Gastronomiebetriebe zusammen und setzen Gefäße aus einem gemeinsam betriebenen Bestand ein, so handelt es sich um ein Verbundsystem. Im Inselsystem setzen Betriebe eigene Mehrweggefäße ein, die dann auch mit dem betriebseigenen Logo versehen werden können. Für eine flächendeckende Etablierung dieser Mehrwegkonzepte ist die Verbreitung von Mehrwegangeboten noch zu gering und die Anschaffungskosten für einige Unternehmen zu hoch. Unternehmen müssten zusätzliche Ressourcen für betriebliche Innovationen

Abfallvermeidung

Abfall gar nicht erst entstehen zu lassen, muss die höchste Priorität haben. Dazu gehören Konzepte, die die Nutzungsdauer von Produkten erhöhen, z. B. Mehrwegsysteme, Nutzen-statt-Besitzen Modelle sowie Reparieren und Wiederverwenden.



und Veränderungsprozesse bereitstellen [99]. Unterstützung kommt zum Beispiel durch einzelne Kommunen: Die Stadt Miesbach hat diese Hürde erkannt und unterstützt seine Gastrobetriebe mit einer einmaligen finanziellen Hilfe bei der Umstellung auf Mehrwegalternativen [100].

Das vierte Mehrwegkonzept ist das Individualsystem, bei dem kundeneigene Gefäße befüllt werden. Eine Sonderform hiervon ist das unverpackt Einkaufen [98]. In etwa 30 Unverpackt-Läden in Bayern werden Lebensmittel ohne Verpackungen angeboten [101]. Vorzugsweise Produktgruppen, die sich für den unverpackten Verkauf eignen, wie Trockenware und Non-Food Artikel, aber auch Milchprodukte, Obst, Gemüse und Backwaren werden angeboten und in mitgebrachte oder vor Ort bereitstehende Gefäße gefüllt. Ob der Einkauf von unverpackten Lebensmitteln ökologisch sinnvoll ist, lässt sich nicht pauschal mit ja beantworten. Bei trockenen und haltbaren Lebensmitteln sowie anderen festen Produkten wie Seifenstücken und flüssigen Hygieneprodukten ist die ökologische Sinnhaftigkeit gegeben, bei schnell verderblichen Produkten wie Käse, wird der ökologische Vorteil des Verpackungsverzichts mitunter durch eine höhere Lebensmittelverschwendung überkompensiert [53]. Trotz der dynamischen Entwicklung in diesem Bereich handelt es sich noch immer um ein Nischenphänomen, das aber zunehmend auch von großen Akteuren im Lebensmittel- und Drogeriemarkt übernommen wird; so hat u. a. die Drogeriekette dm Pilotprojekte zu Abfüllstationen gestartet.Die derzeit stattfindende starke Verbreitung von Mehrwegverpackungen in der Gastronomie hat das Potenzial die Akzeptanz in der Gesellschaft für Mehrweg-Lösungen deutlich zu erhöhen. Es bestehen daher künftig gute Voraussetzungen auch in anderen Bereichen, sowohl am "Point of Sale" als auch im B2B-Handel neue Mehrweggeschäftsmodelle zu etablieren.



Beim Einkauf in den Unverpackt-Läden bestimmt man die Menge selbst (foto: stock.adobe.com)

Die derzeit stattfindende starke Verbreitung von Mehrwegverpackungen in der Gastronomie hat das Potenzial die Akzeptanz in der Gesellschaft für Mehrweg-Lösungen deutlich zu erhöhen. Es bestehen daher künftig gute Voraussetzungen auch in anderen Bereichen, sowohl am "Point of Sale" als auch im B2B-Handel neue Mehrweggeschäftsmodelle zu etablieren.

Nutzen statt Besitzen

Eine weitere Möglichkeit, Kunststoffabfall zu vermeiden und den Ressourcenverbrauch zu verringern, ist die intensivierte Nutzung von Produkten [102], denn Dienstleistungen können die Nachfrage nach Produkten häufig mit einem wesentlich geringerem Ressourcenverbrauch befriedigen. Die sogenannten Product-Service Systems (PSS) stellen eine Mischung aus dem Produkt (z. B. Rasenmäher) und der damit verbundenen Dienstleistung (gemähter Rasen) dar. PSS-Angebote können produktorientiert (z. B. Rasenmäher leasen), nutzungsorientiert (z. B. Rasenmäher ausleihen), oder ergebnisorientiert (z. B. Vertrag über gemähten Rasen) sein [103].

PSS-Angebote gibt es im Bereich Mobilität (z. B. Carsharing, Intermodale Mobilität, Bürgerbus), Wohnen und Reisen (z. B. Wohngemeinschaften, Flatsharing, Couchsurfing) und für Alltagsgegenstände (z. B. Werkzeugverleih, Umsonstläden, Gemeinschaftsgärten) [102].

Während alle Konzepte das Potenzial bieten, fossile und nachwachsende Ressourcen zu sparen, ist die tatsächliche Ressourcenschonung keineswegs immer gegeben. Der Fokus auf eine rein technische und ökonomische Effizienz birgt die Gefahr von Rebound-Effekten, wenn durch die Kosteneinsparung ein Mehrkonsum und dadurch ein absoluter Anstieg des Ressourcenverbrauchs folgt [103]. Das *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie* identifiziert in Anbetracht des Rebound-Effekts ein Cluster "Ökologisch sinnvolles Sharing", zu dem u. a. Wohngemeinschaften, Stationäres Carsharing, Intermodale Mobilität, Carpooling Unternehmen (für Pendler), Privates Carpooling (Online Mitfahrzentrale) zählen. Im Cluster "Kontextabhängiges Sharing" werden Angebote zusammengefasst, deren tatsächliche ökologische Sinnhaftigkeit vom Kontext abhängt. Couchsurfing ist z. B. nicht sinnvoll, wenn dadurch lange Flugreisen wirtschaftlich rentabel werden. Ebenso ist ein flexibles Carsharing problematisch, wenn Strecken, die sonst mit Fahrrad oder zu Fuß zurückgelegt werden würden, nun mit dem Auto überbrückt werden [102]. Auch der Werkzeugverleih birgt die Gefahr, dass durch den Transport der Geräte ökologische Vorteile gemindert werden, v. a. wenn diese häufig genutzt und damit häufig transportiert werden, wie dies z. B. beim Rasenmäher der Fall ist [103].



Mögliche Einteilung der Produkt-Service-System Angebote nach Ausprägung der Produkt- und Dienstleistungsgewichtung.

Reparatur

Eine weitere Möglichkeit, Kunststoffabfall zu vermeiden und den Ressourcenverbrauch zu verringern, ist die längere Nutzung von Produkten durch a) Reparieren und b) eine Weiternutzung (Second Hand etc.). Im Bereich Reparatur gibt es zum einen die Reparatur innerhalb der Garantie, die von den Herstellern beauftragt wird, zum anderen die Reparatur außerhalb der Garantie, die von den Konsument*innen beauftragt wird. Nicht außer Acht zu lassen sind nichtkommerzielle Reparaturen und Eigenreparaturen die 27 - 59 % aller Reparaturen ausmachen. Einflussfaktoren für die Langlebigkeit der Produkte, Angebot und Nachfrage nach Reparaturen und Refurbishment sind die Produktqualität, Reparierbarkeit der Produkte (meist Elektrogeräten) sowie die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Reparaturinformationen, Reparaturwerkzeugen und notwendiger Software bzw. Updates [104].

Bekleidung und Elektronik

Mit Blick auf zwei relevante Einsatzgebiete von Kunststoffen, Bekleidung und Elektronikprodukten, sieht das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz mit der sogenannten Obhutspflicht einen weiteren Ansatz zur Vermeidung von Kunststoffabfällen vor. Für beide Produktgruppen gibt es Hinweise darauf, dass relevante Mengen an Überhangproduktionen und Retouren vernichtet werden, obwohl diese Produkte noch gebrauchsfähig wären – speziell die Bekleidungsbranche verzeichnet dabei einen besonders hohen Anteil an Retouren, ca. 40 % der Einkäufe werden zurückgegeben [105]. Hier sollen durch eine Berichtspflicht Anreize zur Vermeidung von Kunststoffabfällen gesetzt werden. Inverkehrbringer sollen regelmäßig Daten zum Umgang mit ihren Produkten veröffentlichen und testieren lassen [106].

Ausblick

Angesichts des zunehmenden Kunststoffabfallaufkommens und den resultierenden Umweltfolgen ist absehbar, dass die Vermeidung von Kunststoffabfällen in Bayern deutlich an Bedeutung gewinnen muss. Mit der Single Use Plastics Directive hat die Europäische Kommission bereits erste Kunststoffprodukte verbieten lassen – die hiervon betroffenen Produkte stellen jedoch deutlich unter 1 % der Kunststoffabfallmengen. In einer zukünftigen Erweiterung der Direktive könnten weitere Produkte verboten werden [107]. Insbesondere mit Blick auf die Vermeidung von Verpackungsabfällen könnte auf europäischer Ebene die Überarbeitung der sogenannten "Essential Requirements" im Kontext der Packaging and Packaging Waste Directive zur Vermeidung beitragen, u. a. wenn dort verbindlichere Vorgaben z. B. zum Verhältnis von Verpackungsgröße und -inhalt gemacht werden [108]. Nicht zuletzt entwickelt die Europäische Kommission momentan eine Ökodesign-Verordnung [29], die nachhaltige Produkte zur Norm machen soll. Hauptbestandteil sind hierbei Anforderungen im Bereich Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit, leichte Demontage und Wiederaufarbeitung sowie einfaches Recycling von Produkten und Materialien. Diese Anforderungen werden aktuell erarbeitet und anschließend in einer Verordnung umgesetzt. Dies dient dazu, den politischen Rahmen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu setzen.

Neue Nutzungsmuster

Der Durchbruch von nachhaltigen Nutzungsmustern stößt auf viele Barrieren. Neue politische Rahmenbedingungen wie zum Beispiel die geplante Ökodesign-Verordnung [29] können helfen, nachhaltige Konsummuster zur Norm zu machen.



Kunststoffemissionen vermeiden

In Abschnitt 4.2 wurden die sechs Haupteintragspfade von Kunststoffen in die Umwelt vorgestellt. Nachfolgend werden aussichtsreiche Konzepte und Entwicklungen erörtert, die, ausgerichtet auf die mengenmäßig als relevant identifizierten Bereiche, zur Vermeidung von Kunststoffeinträge in die Umwelt beitragen können.

Unterbindung von Littering

Im Bereich Makroplastik stellt Littering, also das achtlose Wegwerfen oder Liegenlassen kleiner Abfälle im öffentlichen Raum, in Bayern das größte Problem dar. Lösungen, um Littering zu vermeiden, kombinieren den Ansatz das eigenverantwortliche Verhalten der Individuen mit technischen und regulatorischen Lösungen, die ein umweltkonformes Verhalten bedingen, zu beeinflussen. Durch Aufklärung im Rahmen von Öffentlichkeitsarbeit und Projekten kann das in Unwissenheit begründete Fehlverhalten von Einzelpersonen verändert werden. Zum Erlernen ökologischer Verhaltensmuster spielt in diesem Zusammenhang auch die Umwelterziehung durch Eltern und Lehrer*Innen eine wesentliche Rolle. Zusätzlich können Bürger*Innen (finanziell) belohnt werden, wenn sie mit ihrem Müll richtig umgehen. Daneben ist es möglich weitere vielfältige Anreize zu schaffen, die umweltkonformes Verhalten begünstigen [109]. Weitere wirksame Maßnahmen umfassen eine Kombination von Verboten, die Ausweitung des Pfandsystems sowie Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer (Gewährleistungspflichten, Reparierbarkeitsgarantien, Mehrweg etc.) und die Förderung der Recyclingfähigkeit [9]. Mit geschlossenen Stoffkreisläufen in Deutschland bzw. Europa würden deutlich weniger Kunststoffabfälle exportiert und damit insbesondere nicht rentabel recyclingfähige Abfälle fachgerecht verwertet.

Mikroplastik durch Reifenabrieb verringern

Der mengenmäßig größte Eintragspfad von Plastik in die Umwelt ist Reifenabrieb. Das effektivste Mittel gegen Reifenabrieb ist eine Verringerung der insgesamt gefahrenen Distanz und die Nutzung von umweltgerechten Verkehrsträgern [110]. Das Vorantreiben der Verkehrswende, also die qualitative Veränderung des Verkehrsverhaltens durch z. B. den Ausbau von öffentlichen Verkehrsmitteln ist nicht nur im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors, sondern auch für die Mikroplastikemissionen ein wichtiger Schritt. Der Trend des schrumpfenden Schienennetzes sollte gestoppt werden, um wieder mehr Verkehr auf die Schiene zu verlagern [111]. Geschwindigkeitsbegrenzungen und eine Verstetigung des Fahrzeugflusses wirken ebenso emissionsmindernd. Augsburg hat zusammen mit 350 Städten und Gemeinden in der Initiative Tempo-30 in den Innenstädten gefordert.



Reifenabrieb (Foto: Mylene2401 / pixabay)

Eintragsminimierung

Die Reinigung von Infrastrukturflächen ist eine effektive Maßnahme, um Einträge in die Gewässer zu minimieren. Nachgelagerte Ansätze (z. B. Filtern von großen Mengen Meerwasser) sind weniger sinnvoll.



Diese Initiative findet momentan im Bundesverkehrsministerium wenig Anklang, hätte aber neben einer enormen Lärmentlastung der Bürger auch zur Folge, dass Mikroplastikemissionen durch Reifenabrieb reduziert würden [112]. Reifenabrieb kann auch durch verschleißarme Reifen und nicht zu Verschleiß neigende Fahrbahnbeläge vermindert werden. Außerdem tragen eine korrekte Einstellung und Wartung von Fahrzeugkomponenten, wie ein richtiges Ausrichten und Auswuchten der Räder, Spureinstellung, Beibehalten des richtigen Reifendrucks und Wechseln zwischen Sommer- und Winterreifen und deren adäquate Einlagerung, zur Verringerung von Reifenabrieb bei.

Zur Reduktion der Einträge von Reifenabrieb in die Umwelt nach der Entstehung sind Minderungsmaßnahmen wie z. B. Kehren und Spülen an Hotspots sinnvoll. Um einen Austrag aus dem Straßenbereich zu verhindern, kann außerdem straßenbegleitendes Grün – insbesondere immergrüne Hecken – hilfreich sein. Aus siedlungswasserwirtschaftlicher Sicht ermöglicht die Identifikation von Reifenabrieb-Hotspots in einem Gewässerstrang eines Einzugsgebiets die Entwicklung und Umsetzung von Vermeidungs- und Beseitigungsstrategien am Entstehungsort. Dadurch könnte gezielt Abwasser behandelt werden [15,19].

Freisetzung bei der Abfallentsorgung (Kompost und Kunststoffrecycling)

Der Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt bei der Abfallentsorgung geschieht hauptsächlich über mit Kunststoffen verunreinigten Kompost und während des Kunststoffrecyclings [9]. Nach Auffassung der *Bundesgütegemeinschaft Kompost BGK* ist es auch mit hohem technischem Aufwand kaum möglich, aus Bioabfall mit Fremdstoffanteilen von über 3 % kunststofffreie Komposte herzustellen. Um diesen Eintragsweg von Kunststoffen in die Umwelt zu verringern, muss darauf hingewirkt werden, dass getrennt erfasste Bioabfälle weniger als 1 % Fremdstoffe aufweisen. Getrenntsammelsysteme bedürfen einer kontinuierlichen Öffentlichkeitsarbeit und Einbindung der Bürger*Innen, um den Zweck der Kreislaufwirtschaft von Wertstoffen zu erklären und die Konsequenzen bei Nichtbeachtung zu verdeutlichen [113].

Pelletverluste in der Wertschöpfungskette

Kunststoffpellets sind vorgeformte millimetergroße zylinder- oder linsenförmige Körper, die das Ausgangsmaterial für Kunststoffverarbeitungsprozesse darstellen. Bei der Produktion von Kunststoffprodukten und dem Transport zwischen Produktions- und Weiterverarbeitungsstätten kommt es zu ungewollten Verlusten dieses Ausgangsmaterials. Dieses gelangt anschließend durch Industrieabwässer in Gewässer in der Umwelt. Die Vereinigung *PlasticsEurope* hat mit der Initiative Operation Clean Sweep umfassende Strategien zur Minimierung von Pelletverlusten für seine Mitglieder vorgegeben und damit Akteure der Kunststoffbranche für das Thema sensibilisiert. Beinhaltete Maßnahmen sind eine Verbesserung der Arbeitsabläufe zur Verringerung von Pelletverlusten bei der Produktion sowie regelmäßiges Auffegen/Aufsaugen und die Installation von Abdeckungen, Filtern oder Sieben in Abwasserauffangsystemen. Eine Vermeidung der Schädigung von Behältern und Säcken durch stabilere Packmittel und bessere Handlingsysteme (z. B. sogenannte "Softtips" für Gabelstabler) ist ebenfalls Teil der Maßnahmen [114]. Damit diese Maßnahmen langfristig umgesetzt werden können, müssen Mitarbeiter*Innen durch Ausbildung und Weiterbildung für das Thema "Pelletloss" sensibilisiert werden. Die Anpassung von Managementsystemen inklusive der Identifikation von Hotspots und Monitoringsystemen kann diese Maßnahmen ebenso unterstützen [110].

Reifenabrieb

Reifenabrieb wird am effektivsten durch weniger PKW- und LKW-Verkehr, sowie Geschwindigkeitsbegrenzung vermieden.



Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsabläufe und zur Verringerung von Pelletloss bei der Produktion

In der industriegeführten Initiative *Operation Clean Sweep* fehlen jedoch Verpflichtungen und Konsequenzen bei Nichtbeachtung für die teilnehmenden Unternehmen. Eine verbindliche, gesetzliche Regulation mit festgelegten Zielen ist essenziell, um die Durchsetzung der Maßnahmen zu garantieren. Eine solche Regelung ist im Aktionsplan Kreislaufwirtschaft vorgesehen, eine konkrete Umsetzung fehlt jedoch noch.

Verwehungen von Sport- und Spielplätzen

Der Haupteintragspfad in dieser Kategorie sind Fußballplätze aus Kunstrasen. Zwischen den Kunstgrashalmen wird ein Infill-Material eingebracht, das oft aus Gummi besteht. Dieses Granulat wird durch die Schuhe der Akteure vom Platz in die den Platz umgebende Umwelt transportiert [115].

Das gleiche findet bei Reit- und Tennisplätzen sowie Spielplätzen statt. Dieser Eintragspfad kann durch zwei mögliche Ansätze vermieden werden. Zum einen können baulich konstruktive Maßnahmen helfen, den Kunststoff nicht in die Umwelt zu tragen. Rückhaltungsmaßnahmen wie Barrieren, Abstreifer, Reinigungssysteme und Filter im Abwasser sind hier denkbar. Im ersten Schritt muss jedoch eine



Bewusstseinsbildung bei Planern, Herstellern und Nutzer*innen stattfinden. Zum anderen kann der Belag des Sportplatzes so gewählt werden, dass er keine Belastung für die Umwelt darstellt, sollte er dort landen. Hier sind Naturrasen oder alternative Infill Materialien aus bioabbaubaren Materialien wie z. B. Kork, Sand, Olivenkernen oder PLA als Alternativen zu prüfen [110]. Eine Empfehlung der *Europäischen Chemikalienagentur ECHA* zur Nutzung dieser alternativen Einstreumaterialien für Fußball- und Sportplätze hat schon zu einer verstärkten Nachfrage dieser Materialien geführt [116].

Mikroplastikentfernung durch Siedlungswasserwirtschaft

Vor dem Eintrag von Mikro- und Makroplastik in die Flüsse und Meere hat die Siedlungswasserwirtschaft die Möglichkeiten, den Eintrag von Kunststoff in die Umwelt zu verringern. Bei der Behandlung von Abwässern wird zwischen Schmutz- und Niederschlagswasser unterschieden. Mikroplastik aus Abrieb und Verwitterung befindet sich hauptsächlich im Niederschlagswasser da es im Außenraum freigesetzt wird. Je nach Region werden die beiden Abwasserarten getrennt oder gemischt geführt und behandelt. In Bayern vorherrschend ist das Mischsystem, welches in Bezug auf die Rückhaltung von Kunststoffemissionen nach heutigem Wissensstand effizienter ist als das Trennsystem. In der Kläranlage wird das Mikroplastik zum größten Teil in den Klärschlamm überführt. Der Klärschlamm wird in Bayern zu ca. 1/3 als Düngemittel auf Ackerflächen ausgebracht und im Landschaftsbau verwendet, sodass nur 35 % des Mikroplastiks wieder in die Umwelt gelangt. Im Trennsystem ist die Abscheidung von Mikroplastik aus dem Niederschlagswasser deutlich niedriger, da hier keine Behandlung wie in der Kläranlage stattfindet. Allerdings wird auch hier durch Sedimentationsstrecken und Retentionsbodenfilter eine gewisse Abscheidung erreicht.

Die hohe Abscheiderate von Mikroplastik in Kläranlagen legt nahe, dass innerhalb der Siedlungswasserwirtschaft der Fokus auf a) der Nutzung des Klärschlamms und b) der Behandlung von Niederschlagswasser liegen sollte [110]. Mit der novellierten *Klärschlammverordnung* wird z. B. die bodenbezogene Klärschlammbehandlung nach einer Übergangszeit bis zum Jahr 2032 eingestellt [117]. Außerdem können, wie z. B. in München getestete, Filteranlagen helfen, die Abtrennung von Mikroplastik aus Abwässern zu verbessern [118].

Ausblick

Damit die Schäden durch Kunststoffe in der Umwelt nicht weiter zunehmen, müssen die Kunststoffemissionen nach Berechnung des Fraunhofer Instituts UMSICHT um den Faktor 27 reduziert werden [9]. Analog zum CO₂-Budget errechnete das Fraunhofer Institut, dass jeder*m Bürger*In ein Plastikemissionsbudget von 0,2 kg / (cap a) zustehen. Der aktuelle Wert liegt bei 5,4 g / (cap a). Die UN-Mitgliedsstaaten haben die weltweite Plastikkrise als solche erkannt. Bei der UN-Umweltversammlung UNEA in Nairobi im März 2022 haben die UN-Mitgliedsstaaten einstimmig beschlossen und entschieden, dass bis 2024 ein weltweit verbindlicher Vertrag ausgearbeitet werden soll, um die Verschmutzung durch Einweg- und Mikroplastik einzudämmen [22]. Unabhängig von diesem internationalen Abkommen werden in Deutschland – forciert durch die europäische Kunststoffstrategie – eine Vielzahl von Lenkungsmaßnahmen in der Öffentlichkeit und in der Politik diskutiert. In Bezug auf die Verringerung von Kunststoffemissionen könnten sich Verbote oder Selbstverpflichtungen schnell positiv auswirken. Der Verkauf von Produkten mit intendiertem Mikroplastik soll außerdem im Rahmen einer Überarbeitung der Chemikalienverordnung REACH verboten werden. Alle absehbaren Maßnahmen zur Emissionsreduktion von Mikroplastik werden jedoch eine Freisetzung von Reifenabrieb nicht vermeiden können. Das heißt, dass zusätzliche Rückholmaßnahmen diskutiert und umgesetzt werden müssen. Letztendlich stellt Kunststoff in der Umwelt ein generationenübergreifendes Problem dar und muss auch als dieses betrachtet werden.

Emissionen reduzieren

Kunststoffemissionen müssen um den Faktor 27 reduziert werden, damit die Schäden in der Umwelt nicht weiter zunehmen und sie müssen als generationenübergreifendes Problem verstanden werden, da sie kaum rückholbar sind [7]. ÷27

Das Bewusstsein der Verbraucher für Kunststoff und seine Auswirkungen auf die Umwelt wächst, sodass die Kompensation von Kunststoffemissionen eine immer größere Rolle spielt. Einige (Non-Profit) Unternehmen haben es sich zur Aufgabe gemacht, den Plastikmüll durch Kunststoffkompensation, sogenannte "Plastic Credits" zu bekämpfen, darunter befinden sich beispielsweise rePurpose [119], CleanHub [120], Pacific Collective Pty Ltd. [121] sowie das deutsche Non-Profit Unternehmen Waste Reduction [122]. Das Prinzip nach dem die (Non-Profit) Unternehmen vorgehen, ist es den Plastikfußabdruck von Kunststoffprodukten zu errechnen und anschließend eventuell zu kompensieren. Hierfür vergeben manche ein "Plastik-Neutral" Siegel. Das erklärte Ziel ist es, zu einer systematischen Verbesserung der Plastiksituation in der Zukunft beizutragen. Kunststoffkompensation wird betrieben, indem für eine spezifische Menge an Kunststoff eine Kompensationszahlung von Unterstützern oder Verursachern geleistet wird. So werden Tätigkeiten finanziert, die dieselbe Menge Kunststoffmüll aus der Umwelt bergen, oder ihn auf dem Weg in die Natur stoppen. Mit dem Sammeln von Müll werden kurzfristig die Umweltfolgen der Plastikverschmutzung reduziert. Mittelfristig muss jedoch ein Abfallmanagement in (ärmeren) Ländern geschaffen werden, in denen Plastikmüll nicht gesammelt wird. Damit Plastikmüll langfristig nicht mehr in der Natur entsorgt wird, ist zusätzlich Bildung und Aufklärung sowie Forschung und Innovation für ein besseres Recycling notwendig [122]. Zur Neutralisierung des Plastik-Fußabdrucks von Einzelpersonen und Organisationen existieren auch sogenannte "Social Plastic Collection Credits" (SPCCs) von der Plastic Bank. Die SPCCs werden verwendet, um lebensrettende Notwendigkeiten für Plastik-Sammler bereitzustellen, Recycling-Zentren zu errichten, den Betrieb der Plastic Bank zu erweitern und die sogeannte "Social Plastic®"-Lieferkette zu stärken. Dabei kann Kunststoff gegen Geld oder Sozialleistungen getauscht werden. Insbesondere in Ländern mit hoher Armutsquote und einem unzureichend entwickelten Abfallwirtschaftssystem werden Sammelstationen für Kunststoffabfälle errichtet [123].

Plastic Credits stellen einen aufstrebenden und dynamischen Markt dar. In diesem Zusammenhang müssen einige Risiken klar benannt werden. Plastik Credits können als Greenwashings missbraucht werden, wenn sie ohne relevanten positiven Effekt, begünstigt durch fehlende Transparenz und Definitionen, ausgegeben werden [123]. Plastic Credit Systeme benötigen strikte Rahmenbedingungen, die sicherstellen, dass das Prinzip der Abfallhierarchie befolgt wird. So soll unter dem möglichen Deckmantel der Plastikneutralität der Credits weder die notwendige Transformation der Kunststoffindustrie verhindert noch Anstrengungen im Hinblick auf die Extended Producer Responsibility untergraben werden. Zu diesen zukünftig unverzichtbaren Rahmenbedingungen gehören, dass Plastic Credits nur an Unternehmen verkauft werden dürfen, die nachweisen können, dass sie umfänglich alternative Optionen zur Plastikmüllvermeidung geprüft haben und ausreichend Geld in längerfristige Maßnahmen investieren [124]. Zusätzlich muss sichergestellt sein, dass die Kunststoffe ergänzend zu bereits existierenden Strukturen gesammelt und recycelt werden und dass das Projekt ohne die Finanzierung durch die Plastic Credits nicht hätte durchgeführt werden können [125].

Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie – Monitoring und Bildung

Die Abschnitte 6.1 bis 6.6 zeigen auf, dass es eine Vielzahl an Entwicklungsfeldern und hierin enthaltenen Ansatzpunkten für eine umweltfreundlichere Kunststoffnutzung in Bayern gibt. Um zu identifizieren, welche Wirkungen einzelne Entwicklungen haben, ist es erforderlich, dass Unternehmen und die gesamte bayerische Kunststoffindustrie ihre Umweltwirkungen zunächst erfassen und ein Nachhaltigkeitsmonitoring mittels der relevanten ökologischen Kennzahlen (Key Performance Indicator (KPI)) etablieren. Zudem ist ein transformationsorientiertes Entwicklungs-, Bildungs- und Transferprogramm für bayerische Unternehmen nötig, welches das Wissen und das praktische Know-how in der Industrie verankert, damit Ressourceneffizienzund Klimaziele erreichbar werden.

Nachhaltigkeitsmonitoring für die bayerische Kunststoffindustrie

Im Zuge der kommenden Verpflichtung zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, von der alle Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeitenden betroffen sind, werden viele Firmen ein Nachhaltigkeitsmonitoring etablieren. Gerade mittelständische Unternehmen benötigen hierbei häufig Hilfestellung, um geeignete Systeme zu entwickeln, welche die relevanten ökologischen KPI fundiert berechnen und darstellen können¹². Der Beratungs- und Entwicklungsbedarf hierfür wird mit der kommenden Verpflichtung sprunghaft ansteigen. Hier gilt es einheitliche Lösungen zu schaffen, die in der gesamten Branche genutzt werden können, sodass Transparenz und Akzeptanz eines breit eingesetzten Monitoringsystems erreicht wird.

Um den Transformationsprozess der bayerischen Kunststoffindustrie insgesamt verfolgen zu können, stellen über ein unternehmensbezogenes Nachhaltigkeitsmonitoring generierte Daten eine sehr gute Grundlage dar. Nur ein Branchenmonitoring, das die Unternehmensdaten zusammenführt, kann den Gesamtbeitrag der Kunststoffindustrie hin zu einer klimafreundlichen, ressourcenarmen und stärker biobasierten Wirtschaftsweise nachvollziehbar machen. Neben den Unternehmensdaten muss ein solches Branchenmonitoring die gesamtwirtschaftliche Entwicklung mit einbeziehen, sodass insbesondere auch Reboundeffekte, die aufgrund von Effizienzsteigerungen auftreten, miterfasst werden. Über jährliche aktualisierte Ergebnisse zum Zielerreichungsgrad bei einzelnen ökologischen KPI können die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen und Innovationen bewertet und neue Maßnahmen bzw. Entwicklungsbedarfe identifiziert werden.

Arbeitsforschung, Bildung und Transfer

Damit der Wandel hin zu einer nachhaltigen Kunststoffindustrie gelingen kann, müssen bei den Akteuren in den Unternehmen ein Bewusstseinswandel einsetzen, Nachhaltigkeitsziele sichtbar priorisiert werden und alle Beteiligten den Willen haben, ihr Arbeitsumfeld umzugestalten. Daher müssen ausgehend von klar formulierten Zielen Change-Prozesse im gesamten Unternehmen umgesetzt werden. Hierbei kommt der Arbeitsforschung besondere Bedeutung zu, um Prozesse in allen Unternehmensbereichen, d. h. vom Management, über den Einkauf, die Produktion, den Vertrieb bis hin zum Marketing partizipativ und präventiv neu zu gestalten. So ist es erforderlich konkrete systematisierte Tätigkeits- und Prozessanalysen für die Kunststoffindustrie zu entwickeln und die bayerischen Unternehmen bei der Konzeption und Umgestaltung zu begleiten. Damit der Wandel langfristig und selbstgesteuert von den Mitarbeitenden fortgeführt werden kann, ist ein breiter Industrietransfer erforderlich, der insbesondere Train-the-Trainer Formate und weitere Bildungsangebote beinhaltet.

¹² Das SKZ ist hierbei Ansprechpartner für die Kunststoffindustrie und entwickelt für die Unternehmen geeignete Systeme.

TRANSFORMATIONS-SZENARIEN

für die bayerische Kunststoffindustrie

Um abzuschätzen welche Wirkungen die in Abschnitt 6 aufgezeigten Konzepte und Technologien entfalten können, ist es erforderlich für die Kunststoffherstellung und -verarbeitung der in Bayern genutzten Kunststoffe ein Nachhaltigkeitsmonitoring mittels der relevanten ökologischen Schlüsselkennzahlen zu etablieren. Der folgende Abschnitt stellt eine Möglichkeit für ein solches Monitoring auf Basis einer Klimawirkungskennzahl dar.



Ausgangslage

Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde ein Modell entwickelt, welches geeignet ist, ökologische Kennzahlen zu berechnen und mit ihnen zukünftige Entwicklungen zu bewerten. In einem ersten Schritt konnte so eine Kennzahl für die Auswirkungen der Herstellung und Verarbeitung der in Bayern genutzten Kunststoffprodukte auf den Klimawandel (KW-Kennzahl) im Jahr 2021 ermittelt werden. Dies stellt eine hervorragende Ausgangslage für das Monitoring einer zukünftigen Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie dar. Auch andere KPI können zukünftig mit dem entwickelten Modell bestimmt werden.

Anhand der Annahme dreier aufeinander aufbauender Entwicklungsstufen und Maßnahmenpakete wurden zusätzlich drei Szenarien für das Jahr 2040 erstellt. Die so berechneten KW-Kennzahlen erlauben eine Abschätzung, welche Wirksamkeit die bisher beschlossenen politischen Maßnahmen entfalten können, was eine zusätzliche weitgehende Ausschöpfung der aktuellen Technologietrends bewirken kann und welches Potenzial weitere Konzepte und Entwicklungsschritte in einem sogenannten "Best Case" besitzen.

Aktuelle Umwelt- und Klimawirkungen

Das entwickelte Modell umfasst alle Wertschöpfungsstufen bis zum Kunststoffprodukt sowie die Entsorgung und Verwertung von Kunststoffabfällen. Berücksichtigt wurde dabei jedoch lediglich der Kunststoff selbst. Additive, Füllstoffe und andere nichtpolymere Bestandteile blieben außen vor. Das Modell basiert auf Zahlen aus öffentlichen Quellen, wie dem Landesamt für Statistik oder dem Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021 und vielen anderen. Die verwendeten Hintergrunddaten stammen aus der GaBi-Datenbank. Als Berechnungsbasis dient die in Bayern im Jahr 2021 verbrauchte Menge an Kunststoffprodukten (Abschnitt 3.3). Davon ausgehend wurde ermittelt, wie viel Kunststoff von welcher Sorte aus welchen Quellen für deren Produktion hergestellt und verarbeitet werden musste.

Die Herkunft der Kunststoffneuware und Rezyklate sowie die entsprechenden Bedingungen bei deren Herstellung wurden gemäß dem Durchschnitt der in Deutschland verarbeiteten Kunststoffe gewählt. In Bayern produzierte Kunststoffe werden im Modell folglich nur dann berücksichtigt, wenn diese auch in Bayern weiterverarbeitet wurden. In Summe wird im Modell die Herstellung einer größeren Kunststoffmenge berücksichtigt, als tatsächlich in Bayern produziert wurde. Dieses Vorgehen betont die Lieferkettenverantwortung bayerischer Kunststoffverarbeiter, lässt den Beitrag bayerischer Kunststoffproduzenten dennoch nicht gänzlich außer Acht. Weiterhin wurde angenommen, dass die Kunststoffverarbeitung entsprechend der Gegebenheiten (Energieverbrauch, Ausbeute, etc.) der bayerischen Kunststoffverarbeiter stattfand. Dies stellt eine von der Realität abweichende Annahme dar, da nicht jedes in Bayern verbrauchte Kunststoffprodukt auch in Bayern produziert wurde. Die Annahme besitzt jedoch den Vorteil, dass die für diese Analyse relevante bayerische Kunststoffindustrie und deren Produktionsbedingungen in der KW-Kennzahl prominent abgebildet werden. Durch diese Annahme wird der bayerische Treibhausgasausstoß unterschätzt, da in Bayern tatsächlich mehr Kunststoffe verarbeitet als verbraucht werden. Der Exportüberschuss wird im entwickelten Modell ausgeklammert. Die berücksichtigten Post-Consumer-Kunststoffabfälle und deren Entsorgung und Verwertung entsprechen den im Rahmen dieser Analyse ermittelten Mengen in Bayern im Jahr 2021 (Abschnitt 4.3). Die anhand des Modells berechnete KW-Kennzahl stellt somit eine geeignete Messgröße für ein Monitoring der Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie hin zu mehr Klimaschutz dar, hat jedoch nicht den Anspruch, die tatsächlichen Treibhausgasemissionen auszuweisen. Sie liegt dennoch in der Größenordnung der realen Emissionen.

Für das Jahr 2021 beträgt die ermittelte KW-Kennzahl 8,7 Mio. t CO_2 e. Die folgende Abbildung schlüsselt auf, aus welchen Beiträgen sich diese zusammensetzt.

24%

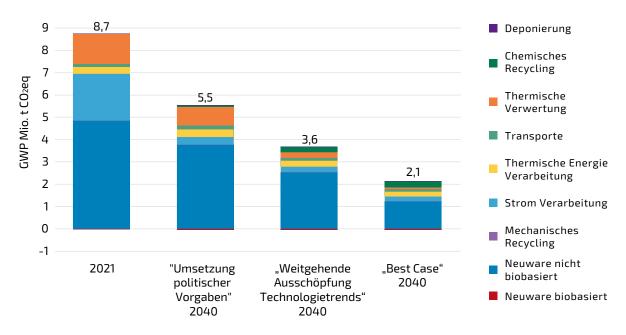
Strom Verarbeitung

Die Summe der Beiträge zur KW-Kennzahl der biobasierten Neuware, des mechanischen und chemischen Recyclings und der Deponierung liegen unter 1%, sodass diese in der Abbildung nicht grafisch dargestellt werden konnten.

Neuware

nicht biobasiert

Mit mehr als 50 % trug die Herstellung von Kunststoffneuware aus fossilen Rohstoffen (Neuware nicht biobasiert) den größten Teil zum Ausstoß von Treibhausgasen im Jahr 2021 bei. Der für die Kunststoffverarbeitung benötigte Strom sowie die thermische Verwertung von Kunststoffabfällen stellen ebenfalls hohe Beiträge zur KW-Kennzahl dar. Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Kunststoffherstellung und -verarbeitung in Bayern müssen insbesondere in diesen drei Kategorien Treibhausgasemissionen gesenkt werden.



Darstellung der KW-Kennzahlen für die Auswirkung der Herstellung und Verarbeitung der in Bayern genutzten Kunststoffprodukte auf den Klimawandel im Jahr 2021 und drei Szenarien für das Jahr 2040.

Klimaszenario 2040 – Umsetzung politischer Vorgaben

7.2

Für die drei Klimaszenarien 2040 wurden zunächst einige Basisannahmen getroffen. Diese gründen sich auf Trends, welche sich aus den Zahlen zur Kunststoffherstellung und -nutzung der vergangenen Jahre ableiten lassen oder auf Einschätzungen von Expert*Innen beruhen. Diese Annahmen bilden den Rahmen für die drei betrachteten Szenarien. Hierzu zählen die folgenden Punkte:

- Mehrverbrauch von Kunststoffprodukten abgeleitet auf Basis der Entwicklung in den Jahren 2005 2021
- Höheres Post-Consumer-Abfallaufkommen abgeleitet auf Basis der Entwicklung in den Jahren 2005 2021
- Eingesetzte Rezyklatmenge abgeleitet auf Basis der Entwicklung in den Jahren 2017 2021
- Biokunststoffeinsatz entsprechend einem prognostizierten jährlichen Produktionswachstum von 15 %

Das erste von drei Klimaszenarien für das Jahr 2040 "Umsetzung politischer Vorgaben" basiert auf der Annahme, dass alle bisher beschlossenen politischen Zielvorgaben im Jahr 2040 auch tatsächlich erreicht werden. Hierfür muss eine Vielzahl von Maßnahmen umgesetzt werden und diese ihre Wirkung entfalten. Die folgenden Annahmen liegen diesem Szenario zugrunde:

- Strom für die Verarbeitung zu 100 % aus erneuerbaren Energien
- Rezyklateinsatzquote bei Verpackungen von 55 %
- Reduktion des Post-Consumer-Verpackungsabfalls um 15 % gegenüber dem Jahr 2018
- · Recyclingfähige Verpackungen; Annahme, dass diese im Jahr 2040 zu 100 % stofflich recycelt werden

In Summe führen die Entwicklungen, wie sie obenstehend skizziert wurden, im Vergleich zum Jahr 2021 zu einer Reduktion der KW-Kennzahl um 37 % auf 5,5 Mio. t CO₂e. Dieser Rückgang basiert zu mehr als der Hälfte auf der Umstellung auf Strom aus erneuerbaren Energien. Außerdem werden durch Abfallreduktion und die Ausweitung des mechanischen Recyclings weniger Kunststoffe thermisch verwertet und somit Treibhausgasemissionen eingespart. Da aufgrund der hohen Rezyklateinsatzquote bei Verpackungen Kunststoffneuware durch Rezyklat substituiert wird, sinkt auch der Beitrag der nicht biobasierten Neuware in der KW-Kennzahl.

Politische Vorgaben

Werden alle bisher beschlossenen politischen Zielvorgaben im Jahr 2040 auch tatsächlich erreicht, sinken die betrachteten Treibhaugasemissionen im Vergleich zum Jahr 2021 um 37 %.



Klimaszenario 2040 – Weitgehende Ausschöpfung Technologietrends

Das Klimaszenario 2040 "Weitgehende Ausschöpfung Technologietrends" baut auf den Annahmen des Klimaszenarios "Umsetzung der politischen Vorgaben" aus dem vorhergehenden Abschnitt 7.2 auf. Zusätzlich werden in diesem Szenario bestehende Technologietrends weitestgehend ausgeschöpft, was sich in den folgenden Annahmen niederschlägt:

- \cdot Senkung des Materialverbrauchs durch Ökodesignfortschritte und mehr Mehrweglösungen um 25 %gegenüber dem Szenario "Umsetzung politischer Vorgaben"
- \cdot Rezyklat- und Biokunststoffeinsatzquote für alle Kunststoffprodukte im Durchschnitt bei insgesamt 50 %u.a. durch verbesserte Sortier- und Recyclingtechnologie
- · Zusätzlich Steigerung des stofflichen Recyclings um 30 % gegenüber dem Szenario "Umsetzung politischer Vorgaben" insbesondere durch Fortschritte in der Sortiertechnologie und im chemischen Recycling

Werden zusätzlich zur Umsetzung politischer Vorgaben auch aktuelle Technologietrends weitestgehend ausgeschöpft, reduziert sich die KW-Kennzahl im Vergleich zum Jahr 2021 um ca. 58 % auf 3,6 Mio. t CO2e. Der zusätzliche Rückgang basiert hauptsächlich auf der Senkung des Materialverbrauchs und dem somit gesunkenen Bedarf an nicht biobasierter Kunststoffneuware. Zusätzlich sinkt die KW-Kennzahl, da weniger Kunststoffabfälle verbrannt werden. Dieser Effekt wird durch die Emissionen beim chemischen Recycling, welches an die Stelle einer thermischen Verwertung tritt, zum Teil kompensiert. Unter dem Strich resultieren dennoch Treibhausgaseinsparungen.

Technologietrends

Werden bis ins Jahr 2040 zusätzlich zur Umsetzung politischer Vorgaben auch aktuelle Technologietrends weitestgehend ausgeschöpft, sinken die betrachteten Treibhaugasemissionen im Vergleich zum Jahr 2021 um ca. 58 %.



Das Klimaszenario 2040 "Best Case" baut auf den Annahmen der Klimaszenarien "Umsetzung der politischen Vorgaben" und "Weitgehende Ausschöpfung Technologietrends" aus den vorhergehenden Abschnitten 7.2 und 7.3 auf. Zusätzlich findet in diesem Szenario ein Umdenken bei Konsument*Innen statt. Die Änderung im Konsumverhalten führt zu einer Senkung des Materialverbrauchs. Außerdem werden die Recyclingtechnologien perfektioniert. Dies führt zu folgenden Annahmen:

- Zusätzliche Senkung des Materialverbrauchs durch geringere Nachfrage von Konsument*Innenseite, sodass 2040 wieder das Konsumniveau aus dem Jahr 2021 erreicht wird
- Thermische Verwertung sinkt auf ein Minimum von ca. 4 % der Post-Consumer-Abfälle durch Optimieren der Sortiertechnologie und des chemischen Recyclings
- Rezyklat- und Biokunststoffeinsatzquote für alle Kunststoffprodukte im Durchschnitt bei insgesamt 70 %
 u. a. durch verbesserte Sortier- und Recyclingtechnologie

Insgesamt ergibt das "Best Case"-Szenario eine KW-Kennzahl von 2,1 Mio. t CO_2 e. Sie sinkt damit nochmals um etwa 43 % im Vergleich zum vorhergehenden Szenario. Ursächlich hierfür sind primär die Emissionsbeiträge aus nicht biobasierter Neuware. Sie gehen durch einen geringeren Verbrauch von Kunststoffprodukten und eine höhere Rezyklateinsatzquote um etwa 50 % gegenüber dem Szenario "Weitgehende Ausschöpfung Technologietrends" zurück. Die Senkungen der thermischen Verwertung auf ein Mindestmaß trägt ebenfalls einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der KW-Kennzahl bei. Dieses Szenario entspricht einem klimaschutztechnisch idealen Vorgehen bis in das Jahr 2040 und würde den Treibhausgasausstoß gegenüber dem Jahr 2021 auf etwa ein Viertel begrenzen.

Um sich tatsächlich auf diesen Weg zu begeben und Einsparungen in dieser Größenordnung zu realisieren, müssen weitreichende Maßnahmen ergriffen werden. Hierbei ist unbedingt empfehlenswert, zukünftige Maßnahmen mit einem Nachhaltigkeitsmonitoring zu begleiten, um Fortschritte zu erkennen und nachzuweisen bzw. gegebenenfalls Nachsteuern zu können. Das folgende Kapitel stellt Empfehlungen für einen entsprechenden Maßnahmenkatalog auf.

Best Case

Ein klimaschutztechnisch ideales Vorgehen bis in das Jahr 2040 würde den Treibhausgasausstoß gegenüber dem Jahr 2021 auf etwa ein Viertel begrenzen.



EMPFEHLUNGEN

für eine klima- und umweltfreundliche Kunststoffnutzung in Bayern

Vor dem Hintergrund der bayerischen Klimaziele muss es Ziel sein, das Klimaszenario 2040 – "Best Case" (siehe Abschnitt 7.4) zu realisieren. Abschnitt 6 beschreibt verschiedene Entwicklungsfelder, innerhalb derer aussichtsreiche Technologien und Konzepte für eine möglichst nachhaltige Kunststoffnutzung identifiziert wurden. Nachfolgend sollen Maßnahmen beschrieben werden, die als wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Weiterentwicklung und Einführung dieser Technologien identifiziert wurden.



Da Klima- und Umweltfolgen der Kunststoffnutzung in allen Lebensphasen auftreten können, beschreibt dieser Abschnitt nötige Maßnahmen für den gesamten Lebenszyklus. Die jeweils blau gedruckten Maßnahmen sind als dringlichste Empfehlungen zu verstehen.

Produkt- und Produktionsinnovationen

- Förderung von Kooperationsprojekten zwischen Forschung und Industrie zur Entwicklung von Demonstratoren für die Materialreduktion und Kunststoffneuwaresubstitution in konkreten Produkten und Prozessen. Ausweitung der hierfür nötigen technischen Infrastruktur an F&E-Einrichtungen in Bayern.
- 2) Verbindliche Vorgaben des Gesetzgebers für das Ökodesign von Kunststoffprodukten bezüglich Materialeinsatz, Reparaturfähigkeit, Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit im Rahmen der weiteren Ausarbeitung der EU-Ökodesign-Verordnung.
- 3) Förderung der Wiederaufbereitung von Kunststoffabfällen durch die Erprobung neuer Rezepturen auf Basis verschiedener Abfallqualitäten und dem Einsatz von Additiven zur Erzielung der Passfähigkeit in bestimmten Anwendungen inklusive Erweiterung der technischen Infrastruktur an F&E Einrichtungen.
- 4) Ein gezieltes Programm zur Weiterentwicklung bestehender Normen und Werksstandards mit dem Ziel, den bislang in einzelnen Produktgruppen blockierten Einsatz von Rezyklaten zu ermöglichen. Hierzu zählen z. B. Farbvorgaben bei in der Anwendung nicht sichtbaren oder wenig designrelevanten Produkten.
- 5) Wertschöpfungsstufen übergreifende Kooperationen zur Weiterentwicklung und Implementierung von standardisierten, digitalen Rückverfolgbarkeitslösungen auf Material- und Produktebene. Einführung eines digitalen Produktpasses für Kunststoffprodukte mit recycling- und wiedereinsatzrelevanten Produktinformationen.
- 6) Konkrete Vorgaben und Förderungen des Gesetzgebers zur schrittweisen Einführung von Energieeffizienztechnologien in der Kunststoffverarbeitung, insbesondere zur Nutzung vorhandener Abwärme.

Ausbau und Weiterentwicklung der Sortier- und Recyclinginfrastruktur

- Programme zur Forschung, Entwicklung und industriellen Erprobung mit dem Ziel der technischen Weiterentwicklung von Sortierstraßen inklusive des Einsatzes von Tracertechnologien, KI basierter Erkennungssensorik und Sortiersystemen.
- Gezielte Förderung der Inbetriebnahme von Sortieranlagen und Anlagen für das spezifische, auf hochwertige Bedarfe abgestellte mechanische Recycling (Wiederaufbereitung/Qualifizierung von Kunststoffabfällen).
- 3) Schaffung von Investitionssicherheit in Sortier- und Recyclingtechnologien durch Herstellung einer dauerhaften Wettbewerbsfähigkeit für Rezyklate über eine Besteuerung von Kunststoffneuware und oder anwendungsspezifischer Rezyklateinsatzvorgaben durch den Gesetzgeber.
- 4) Entwicklung und Erprobung neuer Geschäftsmodelle für die Einrichtung von Rücknahme- und Sammelsystemen in einzelnen Produktkategorien für ein mechanisches oder chemisches Recycling.
- 5) Inbetriebnahme von Pilotanlagen für das chemische Recycling und Durchführung von Kooperationsprojekten unter Beteiligung der Produkthersteller und Entsorger.
- 6) Höher aufgelöste behördliche Erfassung der verschiedenen Kunststoffabfallströme in Bayern, um Potenziale für die Nutzung genauer zu identifizieren und gezieltere Maßnahmen für deren optimierte Wiederaufbereitung einzuleiten.
- 7) Umstellung der durchsatzorientierten Vergütung von Sortieranlagen durch das duale System hin zu einer auf qualitativ hochwertige Sortierfraktionen ausgerichteten Sortierung.

Bioökonomische Potenziale für Kunststoffe

 Weitere Initiierung von Modellregionen, in denen gesamte Wertschöpfungsketten der Rohstoffbereitstellung und Produktherstellung biobasierter Kunst- und Verbundwerkstoffe abgedeckt werden.

- 2) Förderung von Demonstratoren und Unterstützung praxisnaher Umsetzungsforschung für die am Produkt orientierte Substitution von petrochemischen Kunststoffen und mineralischen Füllstoffen durch Biopolymere und Füllstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe.
- 3) Schaffung von Investitionssicherheit für Agrar- und Forstprodukte zur stofflichen Nutzung für Kunststoffprodukte durch Herstellung einer dauerhaften Wettbewerbsfähigkeit über eine Besteuerung von fossilen Rohstoffen oder einer erweiterten CO₂-Bepreisung.

Kunststoffnutzung neu denken

- Der trotz gestiegener Materialeffizienz eingetretene Mehrverbrauch von Kunststoffen (z. B. an Kunststoffverpackungen um 113 % zwischen 1991 und 2020) verlangt eine durch die bayerische Politik initiierte Aufklärungskampagne, die die derzeitigen Konsummuster und deren Auswirkungen auf die Umwelt und die Klimakrise ergebnisoffen und wissenschaftsbasiert diskutiert.
- 2) Schaffung finanzieller Anreize für die Nutzung von ökologisch vorteilhaften Mehrweglösungen.
- 3) Förderprogramme für Pilotprojekte zur Einführung von Mehrwegsystemen im Verpackungs- und im Produktbereich (Stichwort: Erreichung von Mehrwegquote von 70 % bei Getränkeverpackungen). Konkrete Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung von Mehrweg könnte vor allem die Koordination von unterschiedlichen Angeboten beinhalten, ebenso der gemeinsame Aufbau von Spüllogistik für die Mehrwegbehälter. Da der ökologische Vorteil von Mehrweg insbesondere von kurzen Transportdistanzen abhängt, kommt dem Aufbau von regionalen Systemen besondere Bedeutung zu.
- 4) Einführung von Förderprogrammen zur Professionalisierung und Weiterverbreitung von Unverpackt-Läden.
- 5) Unterstützung innovativer Geschäftsmodelle, die auf Konzepten des Leasings oder Sharings basieren. Solche Konzepte benötigen derzeit noch Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Investoren oder Finanzierungsstrukturen.
- 6) Die Reparaturfähigkeit einzelner Produktkategorien muss gesetzlich verankert werden. Die Überarbeitung der *EU-Ökodesign-Verordnung* bietet sich an, um dies EU-weit harmonisiert in Gang zu setzen.

Kunststoffemissionen vermeiden

- Der mit Abstand größte Mikroplastikeintrag in die Umwelt findet durch Reifenabrieb statt. Die Menge lässt sich signifikant verringern durch die Förderung öffentlicher Verkehrsträger, generelle Geschwindigkeitsbegrenzungen und einer Verstetigung des Fahrzeugflusses (z. B. Kreisverkehre satt Ampeln).
- 2) Aufklärungskampagnen, insbesondere in Stadteilen, in denen die Müllsortierung privater Haushalte nachweißlich schlecht funktioniert (die Entsorger wissen in der Regel, wo dies der Fall ist), um Fehlwürfe von Kunststoffverpackungen in den Biomüll zu verringern.
- 3) Verpflichtung zum Einbau technischer Rückhaltemaßnahmen beim Bau von neuen Spiel- und Sportplätzen berücksichtigen. Wo möglich sollte eine Verpflichtung zur Auswahl bioabbaubarer Infill-Materialien eingeführt werden.
- 4) Gezielte Identifikation von Hotspots der Mikroplastikbildung durch Reifenabrieb und Einführung von Minderungsmaßnahmen wie Kehren und Spülen. Die Relevanz der Hotspots sowie von Vermeidungs- und Beseitigungsstrategien ist insbesondere aus siedlungswasserwirtschaftlicher Sicht zu prüfen.
- 5) Ausarbeitung, Erprobung und Einführung verpflichtender Maßnahmen zur Verhinderung des Mikroplastikeintrags auf Baustellen und beim Abriss von Gebäuden.

Transformation der Kunststoffindustrie durch Monitoring und Bildung

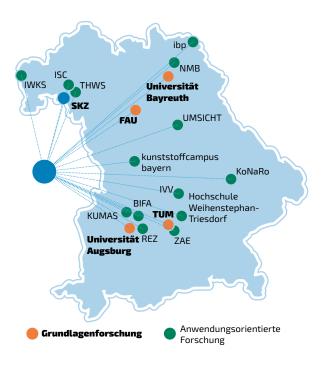
- Förderung der Entwicklung ganzheitlicher Roadmaps für die Unternehmenstransformation von der Linear- zur ressourcenarmen und stärker bioökonomiebasierten Kreislaufwirtschaft, abgestimmt auf das Ziel der Klimaneutralität bis 2040 durch die bayerische Staatsregierung (vergleichbar zur BAFA-Förderung für Transformationskonzepte hin zur Klimaneutralität).
- 2) Verankerung konkreter unternehmensindividueller, quantitativer Ziele zu den Themen Materialreduktion, Abfallvermeidung, Rezyklateinsatz, und Energieverbrauch. Finanzielle Anreize zur Förderung der Zielerreichung.

- 4) Förderung und Durchführung von Projekten der Arbeitsforschung, d. h. Tätigkeitsanalysen und Konzeption präventiver Arbeits- und Prozessumgestaltung, ausgerichtet auf die ökologischen Zielsetzungen aus 2) sowie Begleitung der Umsetzungsprojekte.
- 5) Förderung von Entwicklungsprojekten zur Verbesserung der Energiebilanz in der Kunststoffverarbeitung (insbesondere für KMU), d. h. Nutzung von Abwärme als Prozesswärme, Einbindung lokal gewonnener erneuerbarer Energien in die Prozesse der Kunststoffverarbeitung, Flexibilisierung der Produktionszeiten abgestimmt auf Verfügbarkeiten und Preise von grünem Strom.
- 7) Entwicklung und Einrichtung eines transparenten *Plastic Sustainability Monitorings* für die bayerische Kunststoffindustrie im Einklang mit den in 3) berichteten ökologischen KPI auf Unternehmensebene.

Institutionelle Begleitung der Entwicklungsthemen

8.2

Um das Ziel der ökologischen Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie langfristig zu verfolgen und die Wirksamkeit einzelner Entwicklungen und Maßnahmen z. B. auf dem Weg zur Umwelt- und Klimaneutralität für die gesamte Branche zu quantifizieren, ist unbedingt eine institutionelle Begleitung erforderlich. Die Bündelung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, der gezielte Wissenstransfer in die Praxis und ein ganzheitliches Fortschrittsmonitoring ermöglichen die Darstellung der Effekte des Transformationsprozesses. Dadurch können parallel neue Entwicklungsbedarfe identifiziert werden und es ist gewährleistet, dass der Wandel zielgerichtet und effizient gestaltet wird. Ausgehend von der in Abschnitt 7.4 erfassten Klimawirkung der Kunststoffnutzung sowie mittels des hierfür entwickelten Treibhausgasmodells muss die Minderung der Treibhausgasfreisetzung der bayerischen Kunststoffindustrie durch eine neu eingerichtete Institution kontinuierlich nachverfolgt werden. Gleichzeitig können von hier die relevanten Entwicklungs-, Bildungs- und Transferaktivitäten initiiert werden. Damit dies gelingen kann ist eine sehr gute Vernetzung sowohl mit der bayerischen Kunststoffindustrie als auch mit der bestehenden F&E-Einrichtungen Forschungs- und Entwicklungslandschaft erforderlich. Die Kompetenzen Letzterer sind hierbei unbedingt zielgerichtet zu nutzen. Folgende Abbildung gibt einen Überblick zur Forschungs- und Entwicklungslandschaft Bayerns F&E Instituten beim Thema Nachhaltige Kunststoffe.



BIFA: bifa Umweltinstitut GmbH

FAU: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

 $\textit{IWKS:} \ Fraunhofer-Einrichtung \ für \ Wertstoffkreisläufe \ und \ Ressourcenstrategie$

ibp: Institut für angewandte Polymerforschung der Hochschule Hof

ISC: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung

 $\emph{IVV:} \ Fraunhofer-Institut \ f\"ur \ Verfahrenstechnik \ und \ Verpackung$

IWKS: Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS

KoNaRo: Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe

KUMAS: Kompetenzzentrum Umwelt e. V.

NMB: Neue Materialien Bayreuth GmbH

REZ: Ressourceneffizienz - Zentrum Bayern

SKZ: SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

THWS: Technische Hochschule Würzburg/Schweinfurt

TUM: Technische Universität München

UMSICHT: Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits- und Energietechnik

ZAE: Zentrum für angewandte Energietechnik

Zwar bestehen bereits einige Institutionen, die im Hinblick auf eine ressourceneffizientere Kunststoffindustrie verschiedenste Beiträge leisten, es fehlt allerdings die Verknüpfung dieser Aktivitäten mit einer systemischen, bilanziellen Gesamtbetrachtung. Geschieht dies nicht, ist die Wirksamkeit des technischen Fortschritts vor dem Hintergrund der Umweltziele nicht zu bewerten. Vor allem die Umweltfolgen von Reboundeffekten und des fortschreitenden Wirtschaftswachstums müssen mit in die Betrachtung einfließen. Das Beispiel des angestiegenen Aufkommens an Kunststoffverpackungsmüll (siehe Abschnitt 6.1, Ausblick) trotz Materialeffizienzsteigerungen im Einzelfall belegt deutlich, dass die Betrachtung auf Produktebene zu kurz greift. Auch andere mittlerweile hinlänglich bekannte Effekte müssen in ihren Wirkungen ganzheitlich quantifiziert werden. Beispiele hierfür sind der gestiegene Materialverbrauch in der Automobilbranche trotz Fortschritte beim Leichtbau und der immens steigende Energiebedarf durch den Einsatz digitaler Technologien in der Produktion. Um diese Effekte bezüglich Ressourceneffizienz und Klimawirkung einordnen zu können, ist das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Klimamodell der bayerischen Kunststoffherstellung und -nutzung auszuweiten auf weitere relevante ökologische KPI, wie Rezyklat- und Biomasseeinsatzquoten, Primärenergiebedarf und auf den Bedarf von fossilen Rohstoffen. Eine solche Umsetzung, d. h. ein gezieltes, durch ein Forschungsinstitut betriebenes Nachhaltigkeitsmonitoring zur Überprüfung der Wirksamkeit neuer Technologien und Maßnahmen stellt eine Neuerung dar, die für einen erfolgreichen Wandel einzelner Wirtschaftszweige im Hinblick auf Klima- und Umweltneutralität unerlässlich scheint. Mit der Realisierung kann in Bezug auf die bayerische Kunststoffindustrie ein Modellprojekt mit Leuchtturmcharakter ins Leben gerufen werden, mit der Bayern einen eigenen innovativen Ansatz für die erforderliche ökologische Transformation einer Branche auf den Weg bringt. Dies stellt eine Vorgehensweise dar, die sich auf andere Branchen übertragen lässt, sodass ihre erstmalige Umsetzung eine starke Vorbildfunktion erfüllt. Folgende Abbildung zeigt die Schwerpunkte und Aufgabenbereiche eines alle Themen bündelnden Instituts.



Institutionell zu bündelnde Themen und Aktivitäten für die erfolgreiche ökologische Transformation der bayerischen Kunststoffindustrie.

QUELLEN



- [1] Gesellschaft für Verpackungsmarktfoschung. Entwicklung von Konsumverhalten, Aufkommen und Materialeffizienz von Verpackungen. Mainz; 2022.
- [2] Bayerisches Landesamt für Statistik. Verarbeitendes Gewerbe in Bayern 2021; 2022.
- [3] Christoph Lindner, Jan Schmitt, Elena Fischer, Julia Hein. Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Bericht zur Conversio Studie; 2022.
- [4] Bayerisches Landesamt für Umwelt. Hausmüll in Bayern Bilanzen 2021; 2022.
- [5] Schmidt C, Krauth T, Wagner S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. Environmental Science & Technology 2017;51(21):12246–53.
- [6] Regionale Informationszentrum der Vereinten Nationen für Westeuropa. UN-Konferenz soll Abkommen gegen Plastikmüll aushandeln. [December 16, 2022]; Available from: https://unric.org/de/plastikmuell28112022/.
- [7] Hamilton LA, Steven F, Muffet C, Kelso M, Rubright SM, Bernhardt C et al. Plastic and Climate The Hidden Costs Of A Plastic Planet; 2019.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland. [March 23, 2023].
- [9] Bertling J, Bertling R, Hamann L. Kunststoffe in der Umwelt: Mikro-und Makroplastik: Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. UMSICHT, Fraunhofer 2018.
- [10] Schneider I, Scholz K-N, Biegel-Engler A, Krüger F, Weißhaupt P, Hermann T et al. Kunststoffe in Böden. Dessau-Roßlau; 2021.
- [11] Bergmann M, Mützel S, Primpke S, Tekman MB, Trachsel J, Gerdts G. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. Science advances 2019;5(8):eaax1157.
- [12] Arp HPH, Kühnel D, Rummel C, MacLeod M, Potthoff A, Reichelt S et al. Weathering Plastics as a Planetary Boundary Threat: Exposure, Fate, and Hazards. Environmental Science & Technology 2021;55(11):7246–55.
- [13] Lechthaler S. Makroplastik in der Umwelt. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2020.
- [14] Domenech J, Marcos R. Pathways of human exposure to microplastics, and estimation of the total burden. Current Opinion in Food Science 2021;39:144–51.
- [15] Gehrke I, Dresen B, Blömer J, Sommer H, Lindow F, Röckle R. TyreWearMapping. Digitales Planungs-und Entscheidungsinstrument zur Verteilung, Ausbreitung und Quantifizierung von Reifenabrieb in Deutschland. Schlussbericht 2021.
- [16] Heß M, Diehl P, Mayer J, Rahm H, Reifenhäuser W, Stark J et al. Mikroplastik in Binnengewässern Süd-und Westdeutschlands: Teil 1: Kunststoffpartikel in der oberflächennahen Wasserphase. Karlsruhe, Augsburg, Wiesbaden, Recklinghausen, Mainz; 2018.
- [17] Ammann U. Drei Viertel der Fische im Bodensee haben Plastik im Bauch 2019, 7 January 2019; Available from: https://www.tagblatt.ch/ostschweiz/frauenfeld/drei-viertel-der-fische-im-bodensee-haben-plastik-im-bauch-ld.1083045. [August 01, 2022].
- [18] Plastikatlas: Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung; 2019.
- [19] Jepsen D, Zimmermann T, Spengler L, Rödig L, Bliklen R, Wagner J et al. Kunststoffe in der Umwelt Erarbeitung einer Systematik für erste Schätzungen zum Verbleib von Abfällen und anderen Produkten aus Kunststoffen in verschiedenen Umweltmedien. Dessau-Roßlau; 2019.
- [20] Pironti C, Ricciardi M, Motta O, Miele Y, Proto A, Montano L. Microplastics in the Environment: Intake through the Food Web, Human Exposure and Toxicological Effects. Toxics 2021;9(9).
- [21] OECD. Global Forum on Environment Plastics in a Circular Economy: Design of Sustainable Plastics from a Chemicals Perspective; 2018.

- [22] UNEP. Resolution adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022; 2022.
- [23] Ellen MacArthur Foundation. The Global Commitment. Progress Report; 2021.
- [24] Europäisches Parlament. Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien; 2008.
- [25] Europäisches Parlament. Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte; 2009.
- [26] Europäische Kommission. European Strategy for plastics.
- [27] Europäische Kommission. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft.
- [28] Philipp Bittermann. IK kritisiert Rezyklat-Quoten für Lebensmittelverpackungen. neue Verpackung 2022.
- [29] Europäische Kommission. Ökodesign für nachhaltige Produkte; 2022.
- [30] Europäische Kommission. European Green Deal: Putting an end to wasteful packaging, boosting reuse and recycling; 2022.
- [31] BMUV. "Nein zur Wegwerfgesellschaft" 5-Punkte-Plan des Bundesumweltministeriums für weniger Plastik und mehr Recycling; 2018; Available from: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/5_punkte_plan_plastik_181123_bf.pdf.
- [32] NABU. Kunststoffabfälle in Deutschland; 2019.
- [33] Wörrle J. T. DAs regelt das neue Verpackungsgesetz; 2019.
- [34] Umweltbundesamt. Änderungen im Verpackungsgesetz zum 1. Juli 2022; 2022.
- [35] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. FORCYCLE II Ziele, Themen; o.J.
- [36] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Schriftliche Anfrage der Abgeordneten Florian von Brunn, Ruth Müller (SPD) Plastikmüll in Bayern; 2019.
- [37] Bayerische Staatsregierung. Bayerische Bioökonomiestrategie; 2020.
- [38] Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister. Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück; 2022.
- [39] Europäische Kommission. Single Use Plastics Directive: SUP; 2019.
- [40] Middendorf E. Coca-Cola setzt Tethered Caps von Berry ein. [February 22, 2023]; Available from: https://www.neue-verpackung.de/markt/coca-cola-setzt-tethered-caps-von-berry-ein-708.html.
- [41] Deutsche Umwelthilfe. Einweg-Plastikflaschen aus 100 % Rezyklat; 2021.
- [42] Ivica Puskaric. Reduzierte Wandstärke bei Dünnwandverpackungen: Vom Dünnwand- zum Dünnstwandeimer. [February 22, 2023]; Available from: https://blog.engelglobal.com/de/blog/reduzierte-wandstaerke-bei-duennwandverpackungen.html#authorDetails.
- [43] van der Aarb, Härter C, Gmür R. Dünnere Verpackungen ohne Qualitätsverlust. Kunststoffe 2022 (09):92–4.
- [44] KraussMaffei. Interview mit Anwendungsexpertin Dr.-Ing. Christina Härter. [22.20.2023]; Available from: https://ahead.kraussmaffei.com/de/d/wir-zeigen-auf-welchen-beitrag-unsere-kunden-bezuglich-nachhaltigkeit-mit-unseren-maschinen-leisten-konnen.
- [45] Stieglitz M, Hopmann C, Schön M. Mit geschäumter Blasfolie nachhaltiger produzieren. neue Verpackung 2022(12):23–6.
- [46] Schopen A. Material einsparen mit Heißkanaltechnik. [February 22, 2023]; Available from: https://www.kunststoff-magazin.de/heisskanal/material-einsparen-mit-heisskanaltechnik.htm.
- [47] Exelliq Austria GmbH. FLOW.CONTROL & FLOW.MATIC Geringster Materialeinsatz. Präziseste Profilgeometrie. [February 22, 2023]; Available from: https://www.exelliq.com/upgrades.
- [48] SIKORA AG. Material einsparen: Wie Sie mit SIKORA Messsystemen der Rohstoffknappheit entgegenwirken. [February 22, 2023]; Available from: https://sikora.net/material-einsparen-wie-sie-

- mit-sikora-messsystemen-der-rohstoffknappheit-entgegenwirken/.
- [49] Schober G. Terahertz-Technologie Neue Chancen für Automation. [March 17, 2023]; Available from: https://www.skz.de/presse/terahertz-technologie-neue-chancen-fuer-automation.
- [50] Johnscher T, Schenk E, Zehnder T, Lang A. Stärken und Schwächen des Additiven Verfahrens; Available from: https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/additive-fertigung-lohnt-sich-das.
- [51] Gesellschaft für Verpackungsmarktfoschung. Substitution von Kunststoffverpackungen durch papierbasierte Verbunde. Mainz; 2021.
- [52] Bittermann P. WPV reagiert auf Studie zur Substitution von Kunststoffverpackungen. neue Verpackungen 2021
- [53] Wiesemann E, Bick C, Schmidt S, Schmidt A, Marken G, Rubik F. VERPACKUNGEN ÖKOLOGISCH OPTIMIEREN-Ein Leitfaden für Unternehmen 2022.
- [54] Istel K. Lebensmittelverpackungen im Vergleich; 2021.
- [55] Kauertz B. Ökobilanzielle Expertisen zu verschiedenen Lebensmittelverpackungen im Auftrag des Naturschutzbundes Deutschland e.V; 2021.
- [56] Umweltbundesamt. Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. [March 17, 2023]; Available from: https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#haufiggestellte-fragen-faq.
- [57] Wirthwein. Wie Wirthwein den CO2-Footprint von Kunststoffteilen zu ermitteln und zu optimieren versucht.
- [58] Otto A, Markewitz P, Robinius M. Technologiebericht 2.4 CO2-Nutzung. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken; 2017.
- [59] Achenbach H. Informationsbarrieren überwinden: Digitale Plattform für die Kreislaufführung von Lebensmittelverpackungen aus Kunststoff; 2022.
- [60] Weiß P. Energieeffizienz und Abwärmenutzung in der Kunststoffverarbeitung. Dissertation; 2016.
- [61] Bastian M, Stübs O, Gehring A. Energie endlos sparen 2009(10):160-7.
- [62] SKZ Das Kunststoff-Zentrum. Energieoptimierte Extrusionslinie Entwicklung, Herstellung und Bewertung für die Kunststoffverarbeitung, Schlussbericht; 2017.
- [63] Ort, J., Eckert, D., Eck, C., Achenbach, H., Baudrit, B., Hochrein, T., Bastian, M. Vorwärmung in der Kunststoffverarbeitung: Ermittlung von Materialkennwerten und Entwicklung eines Expertensystems. Würzburg; 2022.
- [64] FHWS Würzburg/Schweinfurth. Kooperative Kunststoffkreisläufe für Mainfranken; 2021.
- [65] Phillip Bendix, Holger Berg, János Sebestyén, Daniela Eckert, Robin Kocina, Hermann Achenbach. Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie. 151st ed; 2021.
- [66] BVSE Fachverband Kunststoffrecycling. Pre Zero nimmt LVP-Anlage vor den Toren Münchens in Betrieb; 2022.
- [67] Polysecure. Innovationen ermöglichen Recycling.
- [68] IGEPA Group. HolyGrail 2.0: Digitale Wasserzeichen für Plastikrecycling.
- [69] Werner J, Jung M, Hochrein T, Bastian M. RecyclingNet Kooperationen mittelständischer Kunststoffverarbeiter für das Recycling technischer Kunststoffe erfolgreich realisieren. Düren.
- [70] DIN. Klassifizierung von Kunststoff-Rezyklaten durch Datenqualitätslevels für die Verwendung und den (internetbasierten) Handel(DIN SPEC 91446:2021-12).
- [71] Hofmann A, Franke M, Betsch F, Rieger T, Seiler E, Mäurer A et al. Recyclingtechnologien für Kunststoffe. Positionspapier 2021.

- [72] Vollmer I, Jenks MJF, Roelands MCP, White RJ, van Harmelen T, Wild P de et al. Die nächste Generation des Recyclings-neues Leben für Kunststoffmüll. Angewandte Chemie 2020;132(36):15524–48.
- [73] BASF. Von Kunststoffabfällen zu neuen Produkten. [February 15, 2023]; Available from: https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling.html.
- [74] OMV. ReOil: 200,000 kg of plastic waste recycled with OMV's circular economy pilot project. [February 15, 2023]; Available from: https://www.omv.com/en/news/reoil-200-000-kg-of-plastic-waste-recycled-with-omv-s-circular-economy-pilot-project-.
- [75] Vogel, J., Krüger, F., Fabian, M. Chemisches Recycling; 2020.
- [76] NABU. Chemisches Recycling von Kunststoffen Potenziale, Risiken und viele offene Fragen. [February 15, 2023]; Available from: https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html.
- [77] Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T. et al. Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft.
- [78] Umweltbundesamt. Tüten aus Bioplastik sind keine Alternative. [January 24, 2023]; Available from: https://www.umweltbundesamt.de/themen/tueten-aus-bioplastik-sind-keine-alternative.
- [79] Bundesregierung. Bioplastik als Alternative; Available from: https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/biokunststoffe-1944646.
- [80] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 10 Punkte zu biobasierten Kunststoffen. [January 24, 2023]; Available from: https://biowerkstoffe.fnr.de/fileadmin/biopolymere/dateien/pdfs/BioKS-10-Punkte-final.pdf.
- [81] Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. [January 24, 2023]; Available from: https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe.
- [82] Bayerische Staastregierung 2021. Startschuss für den Praxistest des in Deutschland ersten kompostierbaren Gemüse- und Obstbeutels; Available from: https://www.bayern.de/startschuss-fuerden-praxistest-des-in-deutschland-ersten-kompostierbaren-gemuese-und-obstbeutels/.
- [83] Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern. Drop-In-Biokunststoffe. [January 24, 2023]; Available from: https://www.biooekonomierat-bayern.de/dateien/Publikationen/SVB-Schwerpunktthema_Drop-In-Biokunststoffe.pdf.
- [84] Schmidt K, Schmidt P, Lang M, Rusam A. Einsatz und Potential biobasierter Additive in Kunststoffen Abschlussbericht: Abschlussbericht.
- [85] H.-J. Endres, M. Mudersbach, H. Behnsen, S. Spierling. Biokunststoffe unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit und Kommunikation Status quo, Möglichkeiten und Herausforderungen; 2020.
- [86] european bioplastics. Bioplastics market data. [February 19, 2023]; Available from: https://www.european-bioplastics.org/market/.
- [87] Zweckverband Hafen Straubing-Sand. Die Biocampus Multiplot im Hafen Straubing-Sand: Onestop Shop für Innovationen der industriellen Biotechnologie. [February 18, 2023]; Available from: https://www.hafen-straubing.de/biocampus-multipilot/.
- [88] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. Förderung Bioökonomie-Scale-Up. [February 18, 2023]; Available from: https://www.stmwi.bayern.de/foerderungen/biooekonomie-scale-up/.
- [89] Carus, M., Eder, A., Dammer, A., Korte, H., Scholz, L, Essel, R., Breitmayer, E. WPC/NFC Market Study; 2014.
- [90] Carus, M., Eder, A., Scholz, L. Bioverbundwerkstoffe Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-

- Polymer-Werkstoffe (WPC); 2015.
- [91] Guo G, Lee Y.H, Rizvi G.M. Influence of Wood Fiber Size on Extrusion Foaming of Wood Fiber/HDPE Composites. Journal of Applied Polymer Science;2008(107):3505–11.
- [92] Zhang J, Rizvi G.M. and Park C.B. Effects of Wood Fiber Content on the Rheological Properties, Crystallization Behavior and Cell Morphology of Extruded Wood Fiber/HDPE Composites Foams. BioResources 2011(6):4979–89.
- [93] Kuboki T. Foaming behavior of cellulose fiber-reinforced polypropylene composites in extrusion. Journal of Cellular Plastics 2014(50):113–28.
- [94] Carbonauten GmbH. carbonauten polymers: CO2-Negative, technische Biokohlenstoff Composites. [February 18, 2023].
- [95] european bioplastics. New market data: the positive trend for the bioplastics industry remains stable. Berlin; 2018.
- [96] Prof. Dr. Siebert Raths, IfBB Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe. Interview.
- [97] Wilts H, Gries N von, Rademacher B, Peters Y. Einsparpotenziale beim Kunststoffeinsatz durch Industrie, Handel und Haushalte in Deutschland 2015.
- [98] Kleinhückelkotten S, Behrendt D, Neitzke H-P. Mehrweg in der Takeaway-Gastronomie: Grundlagen und Erfahrungen aus dem Projekt "Klimaschutz is(s)t Mehrweg".
- [99] Sattlegger L, Haider, Tobias: Zimmermann, Lisa, Völker C. Lebensmittelverpackungen-nachhaltig: Wege zu einer nachhaltigen Gestaltung und Vermeidung von Verpackungen. Frankfurt am Main.
- [100] Landkreis Miesbach. Mehrweg für die Gastronomie: Klimafrühling: Micro- Messe Mehrweggeschirr in Holzkirchen. [February 27, 2023]; Available from: https://www.landkreis-miesbach.de/Bauen-Umwelt/Natur-und-Umwelt/Klimaschutz/Klimaschutz-im-Landkreis/Klimaschutz-LK_Mehrweg-f%C3%BCrdie-Gastronomie.php?object=tx,2716.5&ModID=7&FID=2823.3021.1&NavID=2823.261&La=1.
- [101] enorm Redaktion. Diese Unverpackt-L\u00e4den gibt es in Deutschland: ZERO WASTE. [February 21, 2023]; Available from: https://goodimpact.eu/ratgeber/gute-alternativen-guck-mal/unverpackt-laeden-deutschland.
- [102] Schmitt M, Bienge K, Clausen J, Bowry J, Howell E, Rohn H. Nutzen statt Besitzen: eine ressourcenleichte Konsumalternative; Mythos oder Realität?; Ergebnisse der Analyse ausgewählter Sharing-Angebote; NsBRess: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; 2018.
- [103] Leismann K, Schmitt M, Rohn H, Baedeker C. Nutzen statt Besitzen: auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Konsumkultur; eine Kurzstudie: Heinrich-Böll-Stiftung; 2012.
- [104] Piringer M, Pattermann H, Einsiedler D, Wagner M, Neitsch M. MASSNAHMEN PRO REPARATUR: Entwicklung von Maßnahmen zur Förderung von langlebigen und reparierbaren Produkten 2022.
- [105] Asdecker B. Statistiken Retouren Deutschland Definition. [February 20, 2023]; Available from: http://www.retourenforschung.de/definition_statistiken-retouren-deutschland.html.
- [106] Bundesministerium der Justiz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen: KrWG; 2019.
- [107] Europäisches Parlament und Rat. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment (Text with EEA relevance): SUP Directive; 2019.
- [108] Europäisches Parlament und Rat. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC: PPWD; 2022.

- [109] Neubert K. Ethik in der Abfallwirtschaft-ethische und psychologische Ansätze zur Lösung des Littering-Problems. Augsburg, Germany 2008.
- [110] Bertling J, Dau K, Selig U, Werner S. Mikroplastikeinträge in die marine Umwelt Stand des Wissens und Handlungsoptionen: Fraunhofer-Gesellschaft; 2021.
- [111] Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr. Straßen in Bayern. [February 27, 2023]; Available from: https://www.stmb.bayern.de/vum/strasse/index.php.
- [112] 350 Städte und Gemeinden unterstützen Tempo-30-Initiative: Jahreswechsel Augsburg. Süddeutsche Zeitung 2023, 2 January 2023; Available from: https://www.sueddeutsche.de/panorama/jahreswechsel-augsburg-350-staedte-und-gemeinden-unterstuetzen-tempo-30-initiative-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-230101-99-68622. [February 27, 2023].
- [113] Kehres B. Kunststoffe in Kompost und Gärprodukten: Herkunft Bedeutung Vermeidung.
- [114] PlasticsEurope AISBL. PlasticsEurope Operation Clean Sweep: Report 2019. Brüssel; 2020.
- [115] Sieben P, Janczura S. Kunstrasen vor dem Aus? Warum Sportplätze Probleme machen. Analyse zu Mikroplastik; Available from: https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/kunstrasen-vor-dem-aus-warum-sportplaetze-schaedlich-sind/.
- [116] 320 ° Deutschlands Online-Magazin für die Circular Economy. ECHA will Kunststoffgranulate im Kunstrasen verbieten; 2020.
- [117] Roskosch A, Heidecke P. Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland; 2018.
- [118] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Reifenabrieb im Wasser und in der Umwelt: Antwort auf die Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Florian von Brunn SPD vom 01.03.2019. 18th ed; 2019.
- [119] rePurpose. 360° solutions to take action on your plastic footprint. [February 24, 2023]; Available from: https://repurpose.global/.
- [120] CleanHub. What is Plastic Neutrality? [February 24, 2023]; Available from: https://blog.cleanhub.com/what-is-plastic-neutrality.
- [121] Plastic Collective. Plastic Neutral Certification How Does it Work for Me? [February 24, 2023]; Available from: https://www.plasticcollective.co/plastic-neutral-certification-how-does-it-work-for-me/.
- [122] WasteReduction. Wenn schon Plastik, dann nur noch kompensiert. [February 24, 2023]; Available from: https://waste-reduction.de/plastikneutral.
- [123] plasticbank. Stop plastic before it reaches the Ocean. [February 24, 2023]; Available from: https://plasticbank.com/social-plastic-collection-credits/.
- [124] Wilts H. Plastic credit schemes and EPR risks and opportunities: Discussion paper.
- [125] Verra. Plastic Waste Reduction Standard. [February 24, 2023]; Available from: https://verra.org/programs/plastic-waste-reduction-standard/.