

Karl-Friedrich Berger,
Sandra Kiefer (Hrsg.)

JAHRBUCH 2023

Dichten. Kleben. Polymer.

Technische Kunststoffe, Klima und Kreislaufwirtschaft

Nachhaltigkeitsoptionen für Polymere in (High-)Tech-Anwendungen

BRANCHENÜBERGREIFEND – Ohne Kunststoffe geht es nicht, doch die Anforderungen an einen nachhaltigen Einsatz im Sinne einer Kreislaufwirtschaft steigen. Hier ist man mitten in der Entwicklung – ein Überblick über den aktuellen Stand der Diskussion und Lösungsansätze.

Plastik heute: ein globales Experiment

Kunststoffe sind mit ihrem seit 70 Jahren steil zunehmenden Verbrauch beispiellos im Vergleich zu anderen Materialien. Sie spielen eine Schlüsselrolle bei Innovationen und haben zur Entwicklung unserer modernen Gesellschaft maßgeblich beigetragen. Derzeit werden jährlich etwa 380 Mio. t Kunststoffe produziert, die zum Großteil nach kurzer Zeit wieder entsorgt werden müssen. Bis 2015 ergab dies global insgesamt etwa 6,3 Mrd. t Plastikabfälle, von denen 79% weder verbrannt noch recycelt wurden, d.h. sich in der Umwelt befinden. Diese Zahl würde sich bis 2050 auf 12 Mrd. t erhöhen, falls die gegenwärtigen Trends bei der Produktion und Entsorgung unverändert bleiben [1]. Faktisch befinden wir uns also mitten in einem globalen Experiment, bei dem sich derzeit Milliarden Tonnen Plastik über alle terrestrischen Ökosysteme verteilen und anreichern, da die hohe Beständigkeit von Kunststoff eine Rückführung in natürlich Kreisläufe verhindert. Dringend gefragt sind daher internationale, maßgeschneiderte und wirksame Strategien für unseren Umgang mit Kunststoff.

Prognosen und Szenarien werden konkreter

Der entsprechende Diskurs hat mittlerweile Fahrt aufgenommen [2] und eine hilfreiche Sachlichkeit erreicht, indem belastbare Zahlen erarbeitet und als Grundlage für Entscheidungen in der Politik und Wirtschaft genutzt werden. Selbst Umweltschutzorganisationen wie der NABU kommen zu dem Schluss, dass Kunststoffe sinnvoll



Von Dr. Arno Maurer, Senior Research Scientist, IMP Institut für Mikrotechnik und Photonik, Professor Dr. Jens Ulmer, Leiter Kompetenzbereich Polymere Werkstoffe, IMP Institut für Mikrotechnik und Photonik, Professor Daniel Schwendemann, Leiter Fachbereich Compoundierung/Extrusion, IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung

OST – Ostschweizer Fachhochschule
www.ost.ch

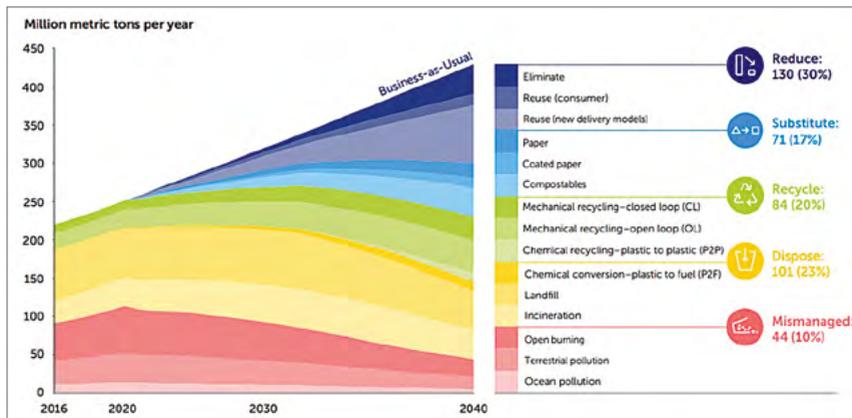


Bild 1: Entwicklung von Kunststoffmengen und -verbleib in Abhängigkeit verschiedener Vermeidungs- und Entsorgungsmaßnahmen (Bild: SYSTEMIQ [6], mit freundlicher Genehmigung)

genutzt werden müssen [3] und hinsichtlich ihrer Klimabilanz oft besser sind als Papier, Glas oder Metalle. Die durch den Einsatz von Kunststoff bisher entstandenen Auswirkungen können zunehmend genau beziffert werden; schwierig ist jedoch nach wie vor deren exakte Voraussage, da die weitere Entwicklung von der erfolgreichen Umsetzung der erzielten Übereinkünfte und Maßnahmen abhängt. Eine aktuelle Veröffentlichung der OECD prognostiziert eine Verdreifachung der weltweiten Kunststoffabfälle bis 2060 [4]. Die Auswirkung verschiedener Szenarien, vom „business as usual“ bis zu einer Net-Zero-Strategie bis 2040, stellt eine von „The Pew Charitable Trusts“ initiierte Studie [5] vor, deren Ergebnisse aktuell in die Praxis transferiert werden [6], und die auch die dazu notwendigen Interventionen definiert.

Bei einem „Business-as-usual“-Szenario, d.h. bei fortgesetzter Anwendung der aktuell angewendeten Gesetzgebungen und Technologien, würde sich die Kunststoffproduktion bis 2040 verdoppeln und die Plastikmenge in den Ozeanen vervierfachen. Um dem entgegenzuwirken, müssen zunächst Möglichkeiten zur Verringerung des Bedarfs und zum Ersatz von Kunststoff z.B. durch Papier genutzt werden, weiterhin eine Kombination aus mechanischem und chemischem Recycling, ergänzt durch einen Ausbau geordneter Deponien und sauberer Verbrennungsanlagen für anfallende Restfraktionen. Eine Zusammenfassung dieser Szenarien ist in **Bild 1** dargestellt. Im Ergebnis kann durch die Summe vieler Maßnahmen auf Basis bislang bekannter Technologien trotz steigendem Kunststoffverbrauch die Freisetzung von Plastikabfall in die Umwelt verringert werden, allerdings nur bis auf etwa 10% der jährlichen Gesamtmenge.

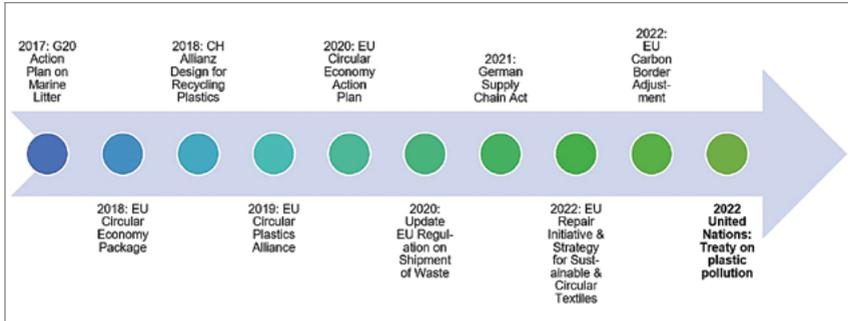


Bild 2: Entwicklung von Gesetzen und Initiativen zur Vermeidung von Plastikmüll (Bild: IMP)

Eine nahezu vollständige Beendigung der Plastikverschmutzung wäre dann möglich, wenn zusätzlich neu geschaffene Erfindungen und Innovationen zur Anwendung kommen, etwa bei der Sammellogistik, bei der Verwertung von Folien und Multimaterialien, bei der Vermeidung von Mikroplastik durch Reifenabrieb sowie beim recyclinggerechten Design und nachhaltigen Einsatz von Kunststoffen [7]. Ebenso notwendig wird ein Umbau der Kunststoffwirtschaft unter Umlenkung der Kapitalinvestitionen, was einen zusätzlichen Nutzen für Klima, Gesundheit und Arbeitsplätze bewirkt. Die vorgenannten Studien belegen, dass Lösungen nur gemeinsam von Wirtschaft, Konsumenten, Gesetzgebern und im internationalen Konsens gefunden werden können.

Weitreichende Regulierungen und Vereinbarungen

Im Bereich der Legislative sind in den letzten Jahren viele Initiativen entstanden (Bild 2), welche bei konsequenter Umsetzung relevante Auswirkungen auf die Kunststoffwirtschaft zeigen sollten. Dazu gehören auch Entwicklungen in thematisch angrenzenden Gebieten wie das Lieferkettengesetz [8], die Reparaturinitiative [9], die EU-Strategie für nachhaltige Textilien [10] und neuerdings das CO₂-Grenzausgleichssystem der EU [11], welches eine Verlagerung von CO₂-Emissionen infolge des Einkaufs von Produkten aus dem Ausland verhindern soll. Generell scheint die Notwendigkeit einer Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft in der Politik angekommen zu sein [12]. Ein sehr positiv stimmendes Signal ist der von 184 UN-Mitgliedsländern im März 2022 gefasste Beschluss [13], bis 2024 die erste global verbindliche Vereinbarung zum Kampf gegen die Plastikverschmutzung auszuarbeiten. Diese UN Plastics Pollution Treaty wurde von der UNEP-Vorsitzenden als wichtigste umweltrelevante Entscheidung seit dem Pariser Klimaabkommen gewertet [14] und wird die schon bestehenden nationalen Regelungen zum Umgang mit Plastik [15, 16] signifikant erweitern. Die Kunststoffhersteller bauen im schnellen Takt ein Portfolio an recycelten und bio-

basierten Produktlinien auf. Die Nachfrage ist so hoch, dass zwischenzeitlich die verfügbaren Quellen knapp werden [17, 18]. Um eine Kostenparität zwischen Primär- und Sekundärkunststoff herzustellen, empfiehlt der VDMA in seinem Diskussionspapier „Für den nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen“ [19] eine angemessene CO₂-Bepreisung und eine Reihe weiterer, recht weitgehender Maßnahmen. Ebenso hat der VDI ein Green Paper mit dem Titel „Circular Economy für Kunststoffe neu denken“ [20] herausgegeben. Mit einer detaillierten Analyse, die u.a. eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffverbrauch einschließt, zeigt man hier auf, wie die Transformation der Kunststoffwirtschaft gelingen kann.

Wie klimarelevant sind Kunststoffe?

Wie relevant die Herstellung und Verwendung von Kunststoffen für den globalen CO₂-Ausstoß und damit für den Klimawandel ist, stellt sich je nach Betrachtungsweise unterschiedlich dar. Die zunehmende Entwicklung und Vereinheitlichung der Bewertungsinstrumente erlaubt jedoch inzwischen verlässliche Analysen. So ergab eine aktuelle Studie der ETH [21], dass Kunststoffe im Moment global für etwa 4,5% der Treibhausgasemissionen verantwortlich sind, dies leider verbunden mit einem starken Wachstum auch aufgrund der kohlebasierten Energie, die zu deren Herstellung in naher Zukunft noch verwendet werden wird.

Was die Prognose der zukünftigen Klimarelevanz von Kunststoffen betrifft, hat das gemeinnützige Zentrum für Internationales Umweltrecht (CIEL) berechnet, dass allein die Produktion von Kunststoffen bis 2050 bei den derzeitigen und prognostizierten Wachstumsraten einen Ausstoß von 52,5 Gt Kohlendioxidäquivalent verursachen könnte. Zusammen mit den Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen erhöht sich diese Summe auf mehr als 56 Gt. Mit anderen Worten: Kunststoffe allein könnten zwischen 10 und 13% des gesamten Kohlenstoffbudgets verbrauchen, das es einzuhalten gilt, um die 1,5 °-Zielmarke zu erreichen [22].

In diesem Zusammenhang sollten die CO₂-Einspareffekte durch den Einsatz von Kunststoffen ebenfalls Beachtung finden. Diese entstehen vor allem dadurch, dass Kunststoffe andere Materialien mit wesentlich höherer Dichte oder höherem CO₂-Fußabdruck ersetzen. Eine Studie von 2017 [23] hat ergeben, dass beim Ersatz von sämtlichem Plastik durch alternative Materialien sich die Umweltkosten vervierfachen würden, vor allem verursacht durch einen höheren Masseneinsatz der alternativen Werkstoffe. Zudem mindern Kunststoffe in Gebäudeisulierungen den Energieverbrauch, in Verpackungen verhindern sie den Verderb von Lebensmitteln, deren CO₂-Fußabdruck besonders groß ist [19, 24]. Die Vorteile von Kunststoffen bei der Errei-

		Value of plastic						
		PET	HDPE	PP	LDPE + LLDPE	PVC	PS	Multi-layers
Clean/sorted waste	Mechanical recycling	✓	✓	✓	(✓)	✗	✗	✗
	Pyrolysis	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Contaminated waste	Mechanical recycling	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	✗	✗	✗
	Pyrolysis	✗	✓	✓	✓	✗	(✓)	(✓)

✓ Technically feasible
(✓) Feasible under some circumstances
✗ Technically not feasible

Bild 3: Anwendbarkeit von werkstofflichen und chemischen Recyclingverfahren (Bild: SYSTEMIQ [6], mit freundlicher Genehmigung)

chung der UN-Nachhaltigkeitsziele wie Wasserversorgung, Ernährungssicherheit, Gesundheit sind ebenfalls unbestritten [25], ebenso spielen sie eine entscheidende Rolle für den notwendigen wirtschaftlichen Transformationsprozess und den Klimaschutz [26]. Allerdings lassen sich solche Effekte nur sehr schwer in Zahlen fassen.

Negative CO₂-Emissionen – Plastik als potenzielle Kohlenstoffsenke

Eine Option, die erst in jüngster Zeit in den Fokus rückt, ist eine mögliche Rolle der Kunststoffe als CO₂-Senke [27, 28]. Eine negative CO₂-Bilanz für Kunststoffe wäre dann gegeben, wenn das Ausgangsmaterial aus Quellen stammt, die CO₂ aus der Atmosphäre entnehmen, z.B. Pflanzen. Dies ist bei biobasierten Kunststoffen der Fall, wobei der Energieaufwand für die Herstellung ebenfalls aus regenerativen Quellen stammen müsste. Eine Studie der Technical University of Denmark hat das Potenzial einer Kohlenstoffspeicherung in Biopolymeren zur Verminderung der globalen CO₂-Emissionen berechnet [29]. Die Ergebnisse zeigen, dass dies einen signifikanten Beitrag zur Einhaltung des 450-ppm-Ziels leisten könnte, insbesondere da der Kunststoffverbrauch noch zunehmen wird.

Stark diskutiert und entwickelt wird zur Zeit die direkte technische Nutzung von CO₂ aus der Luft, z.B. als Rohstoff für Polyole oder Polyurethane [30]. Als weitere Option können Kohlenstoff-Senken wie Pflanzenfasern oder Pflanzenkohle als Füllstoffe in Kunststoffe eingebracht werden [31], wodurch der Kohlenstoff dauerhaft fixiert wird. Für eine effektive CO₂-Senkung müssten alle diese Produkte langlebig sein bzw. in einer Kreislaufwirtschaft annähernd verlustfrei geführt werden. Eine intelligente Kombination von Recyclingverfahren, mit einem starken Ausbau des rohstofflichen

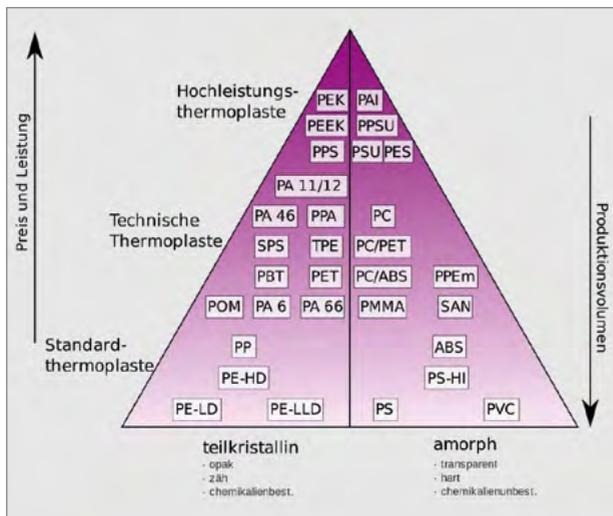


Bild 4: Abgrenzung von Standardkunststoffen, technischen und Hochleistungskunststoffen am Beispiel Thermoplaste
(Bild: Wikipedia [38])

Recyclings, sollte einen solchen Closed-Loop-Prozess möglich machen [32]. Das chemische Recycling mithilfe von Pyrolyse- oder Solvolyse-Verfahren ist auch für vermischte und verschmutzte Kunststofffraktionen geeignet und ergänzt daher das werkstoffliche Recycling unter gleichzeitiger Vermeidung von Qualitätsverlusten (Bild 3). Abhängig von der Natur der Einsatzstoffe können solche Verfahren einen negativen Netto-Kohlenstoff-Fußabdruck erzielen [33]. Bisweilen wird auch die thermische Nutzung von Kunststoffen als „Recycling“ eingeordnet. Entsprechende Zahlen und Angaben zu Recyclingquoten, wie in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben, sollten daher immer mit Vorsicht betrachtet werden.

Nachhaltigkeitsansätze für Kunststoffe in (High-)Tech-Anwendungen

In der öffentlichen Wahrnehmung stehen, wenn über Plastik gesprochen wird, Kunststoffverpackungen und Einwegartikel an erster Stelle. Ebenso befassen sich aktuelle und in Arbeit befindliche Regularien überwiegend mit der Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen. Dies korrespondiert mit dem hohen Anteil von über 40% am Materialverbrauch [34] sowie der kurzen Lebensdauer von Verpackungen. Die Folge sind hohe Abfallaufkommen und damit auch oft gut wahrnehmbare Umweltbelastungen durch Verpackungsmüll. Ebenso sind hier viele Initiativen bereits auf einem guten Weg [35, 36], von der Vermeidung, über ein zunehmend recyclinggerechtes Design, Erhöhung der Recyclatanteile bis zu weitreichenden Maßnahmen mit dem Ziel der Etablierung einer Kunststoff-Kreislaufwirtschaft sowie entsprechenden Entwicklungsprojekten [37].

Um einiges komplexer ist die Sachlage zum Thema Recycling im Bereich der technischen Kunststoffe und der langlebigeren Anwendungen. Unter technischen Kunststoffen (**Bild 4**) versteht man hinsichtlich Eigenschaften und Preis höherwertige Werkstoffe wie z.B. PET, PMMA, Polycarbonat oder Polyamide [38], wobei die Grenzen zum Teil fließend sind. Im Folgenden wird der Fokus auf diese Werkstoffgruppen und ihre Verwendung gelegt, auch mit Blick auf die hier beschriebenen Anwendungsschwerpunkte.

Die nächst größeren Kunststoffmengen nach den Verpackungen werden in der Bau-, Automobil-, und Elektrobranche [34] verbraucht. Man denke an Dämmstoffe aus PU, Scheiben und Profile aus PC, Verkleidungen und Radblenden aus ABS, Bildschirme aus PMMA, Gehäuse aus Duroplasten oder die Vielfalt spezialisierter polymerer Materialien in der Elektronik und Medizintechnik. Infolge dieser Materialbreite bei geringeren Mengen gestaltet sich die Substitution, Rücknahme und Wiederverwertung solcher Materialien noch wesentlich umständlicher als bei Verpackungsmaterialien.

Polymere aus regenerierbaren Quellen für technische Anwendungen

Im Zuge der Klimadiskussion und der verschärften EU-Klimaziele bis 2045 [39, 40] müssen Unternehmen vermehrt wissenschaftsbasierte Nachhaltigkeitsinstrumente etablieren [41]. Optionen zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks liegen dabei, außer in der Schaffung einer nachhaltigen Produktionsinfrastruktur, auch in der Substitution erdölbasierter Kunststoffe durch biobasierte oder recycelte Qualitäten. Herausforderungen bei der Verwendung solcher Materialien mit einem geringen oder gar negativen CO₂-Fußabdruck sind einerseits die Verfügbarkeit ausreichender Mengen für Massenprodukte wie Kraftfahrzeuge [42], andererseits die hohen technischen Anforderungen, welche durch entsprechende Industriestandards (Automobil, Elektrotechnik, Medizintechnik) gesetzt werden. Sofern die technischen Eigenschaften gewährleistet sind, lassen sich schrittweise immer mehr Kunststoffkomponenten, z.B. von Staubsaugern [43] oder in Fahrzeugen [44], durch solche aus Recyclingqualitäten oder nachwachsenden Rohstoffen ersetzen. Im Falle von PET ist auch ein Upcycling-Prozess bereits etabliert, indem PET-Abfälle aus Einweg-Getränkeflaschen zu hochwertigeren Polyester-Textilfasern verarbeitet werden [45]. Selbst Plastikmüll aus dem Ozean und Küstengebieten (Ocean Bound Plastic) wird aufbereitet und zu hochwertigen Artikeln wie Uhregehäusen [46], Seilen und Textilien [47] verarbeitet. Das Ziel ist also hier, dem Abfall einen Wert zu geben, um die Wahrscheinlichkeit des Eintrags in die Umwelt zu verringern [48].

Ein Anwendungsgebiet mit hohen Biokompatibilitäts- und Hygieneanforderungen ist die Medizintechnik. Jedoch gibt es auch dort Bestrebungen, Kunststoffabfälle zu recyceln [49] oder an geeigneten Positionen Kunststoffe zu substituieren [50].

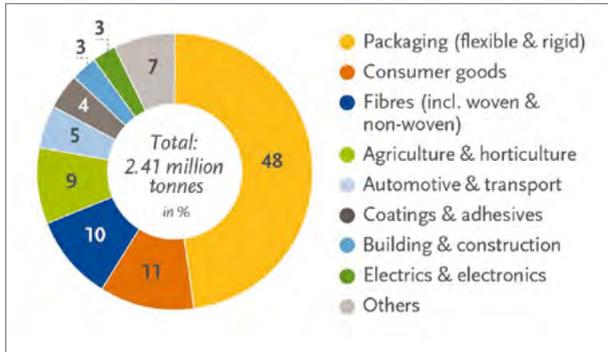


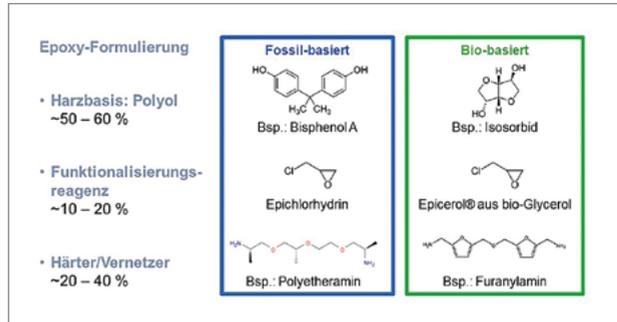
Bild 5: Anwendungen von Biokunststoffen, globale Produktion 2021 (Bild: European Bioplastics, nova-Institute [52])

Entsprechende Abklärungen wurden begonnen [51]. Klimaneutrale Thermoplaste (Polyolefine, PC, PA, ABS, PEEK) sind am Markt verfügbar [52, 53, 54] und finden zunehmend Eingang in Engineering-Anwendungen [55]. Einige Prozentanteile der weltweit produzierten Biokunststoffe [56] gehen bereits in die Automobil-, Elektro- und Elektronikbranche (**Bild 5**).

Eine besondere Herausforderung sind Duomere. Am Markt sind Harzsysteme, z.B. auf Epoxy- oder ungesättigter Polyesterbasis, mit unterschiedlichen Anteilen an biobasiertem Kohlenstoff verfügbar. Solche Systeme bestehen wahlweise aus einer biobasierten Harzbasis, welche durch eine Funktionalisierung in das eigentliche Epoxidharz umgewandelt wird, und/oder einem Härter, welcher ebenso aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden kann (**Bild 6**).

Biobasierte Produkte können grundsätzlich konventionelle Duomere in technischen Anwendungen ersetzen [57], müssen jedoch die erforderlichen mechanischen oder elektrotechnischen Kennwerte erfüllen. Weitere Nachteile im Vergleich mit Standardharzen sind die hohen Rohstoffpreise, sowie die großen benötigten Mengen, was eine parallele Entwicklung in der Lieferkette von z.B. Bioraffinerien notwendig macht. Ein viel versprechendes Ausgangsmaterial ist Lignin, ein Abfallprodukt aus der Papierproduktion, welches durch gezielten Abbau und Derivatisierung in funktionale Monomere für Epoxidharze umgewandelt werden kann. Diese „aromatische Polyol-Route“ verfolgt z.B. das VIABLE-Projekt, bei dem klassische Harzbausteine wie Bisphenol-A durch ligninbasierte ersetzt werden, um die Anwendungsreife solcher biobasierten Epoxidharze im Automobilbau zu prüfen [58]. Der Marktanteil für ligninbasierte Phenolharze und Polyurethane wird bislang auf nur 1% geschätzt [59].

Bild 6: Bestandteile eines biobasierten Epoxidharzes im Vergleich mit einem konventionellen Epoxidharz (Bild: IMP)



Erhöhung der Rücklauf- und Recyclingquote bei technischen Polymeren

Die Rückgewinnung technischer Kunststoffe erfordert andere Infrastrukturen und Prozesse als die Sammlung von Verpackungsabfällen. Abfallströme, welche technische Kunststoffe enthalten, sind vor allem ausgediente Elektrogeräte, Elektronikschrott, Altautos, aber auch bestimmte Fraktionen aus Haushaltssammelsystemen, wie dem gelben Sack, oder aus Abbruchmaterialien auf Recyclinghöfen. Die weltweit anfallende Menge an Elektroschrott ist mit 53 Mio.t (2019) bei einem jährlichen Wachstum um 3% beachtlich [60]. Typisch 25 bis 40% davon bestehen aus Kunststoffen, darunter technische Kunststoffe wie ABS, HIPS, PC/ABS [61].

Wo es gelingt, technische Kunststoffe sortenrein zu sammeln, ist das Potenzial für eine Wiederverwertung hoch, etwa bei Trennscheiben aus PMMA [62], welche nach dem Wegfall der Pandemie-Maßnahmen in relativ großen Mengen anfallen. Sammel- und Verwertungssysteme für spezielle Fraktionen wie etwa PVC-Fensterrahmen oder PU-Schaummatratzen sind im Aufbau. Für die Sammlung und Rückgewinnung von Kunststoffen aus Elektro- und Autoschrott existieren lokal sehr unterschiedliche Systeme. In der Schweiz wird dank eines dichten Netzes an Sammelstellen eine Rückgabequote von 95% erreicht [63]. Bei der Autoverwertung entstehen kleinteilige Shredderfraktionen, welche Kunststoffe, Glas, Gummi etc. enthalten. In der Schweiz sind dies 15 bis 20 kt/a [64], welche in der Müllverbrennung verwertet werden.

Die Recyclingquote über alle Materialien ist bei Elektroschrott regional sehr unterschiedlich, in Europa sind es 42% [56]. Von den darin enthaltenen Kunststoffen werden bislang nur 20% recycelt. Recyclingquoten von 50% wären aber erreichbar, insbesondere durch erweiterte Vorgaben zum Design, zu Materialkreisläufen und zu umweltrelevanten Kennzahlen [65]. Wie ein Beispiel aus der Schweiz zeigt, lassen sich bei geeigneter Vorgehensweise trotz des sehr vielfältigen Stoffgemisches in Elektro-

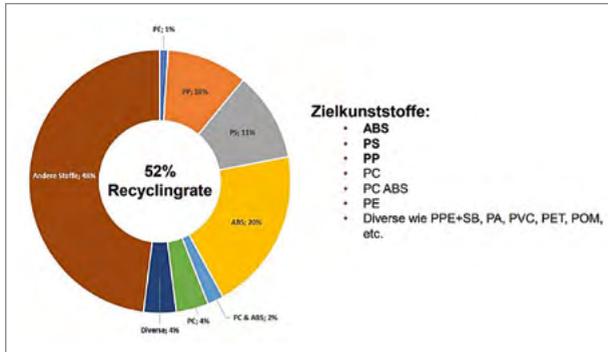


Bild 7: Stoffgemisch und Recyclingrate bei der Elektroschrott-Aufbereitung in Regensdorf (Bild: Immark AG [66], mit freundlicher Genehmigung)

schrott jetzt schon bis zu 52% der Kunststoffe, vor allem ABS, PS und PP, wiedergewinnen (Bild 7) und dabei auch solche mit bromierten Flammenschutzmitteln erkennen und abtrennen [66]. Da es sich überwiegend um Thermoplaste handelt, können diese dann werkstofflich recycelt werden. Bei verschmutzten und vermischten Polymeren, etwa den Bestandteilen von Shredderfraktionen, würde ein chemisches Recycling in vielen Fällen eine Wiedergewinnung von Chemierohstoffen erschließen [67, 68]. Dieses Verfahren wird auch zur Verwertung von Kunststoff aus Elektronikschrott diskutiert [69].

Besonders herausfordernd ist das Recycling von Duromeren und Kompositen. Ungeachtet dessen hat z.B. der Windkraftanlagenhersteller Vattenfall angekündigt, ausgeleichte Rotorblätter bis 2030 zu 100% zu recyceln [70]. Insbesondere bei carbonfaserverstärkten Kompositen ist das Ziel dabei die Rückgewinnung der wertvollen Fasern [71], etwa durch Pyrolyse der Harzmatrix. Da bei der Pyrolyse von Duromeren in vielen Fällen kaum verwertbare Abbauprodukte entstehen, wird alternativ auch versucht, das Polymernetzwerk durch Solvolyse aufzulösen. Eine Variante besteht darin, im zerkleinerten Material durch Zusatz von Katalysatoren dynamische kovalente Bindungen zu erzeugen, welche dann eine Wiederverarbeitung erlauben [72].

Auf dem Weg zur grünen Elektro- und Mikroelektronik sowie Sensorik

Für die Elektrotechnik-Branche ist das Streben nach einer Dekarbonisierung doppelt relevant – indem sie erstens den CO₂-Fußabdruck bei Materialeinsatz und Produktion vermindert, um zweitens damit Komponenten für neue, emissionsfreie Energietechniken bereitzustellen. Ein Beispiel sind Projekte von ABB, wo Gehäuse von Verteilerboxen aus recycelten Thermoplasten hergestellt werden [73].

Richtet man den Blick auf die Mikroelektronik, ergibt sich eine neue Problemstellung: Je kleiner die Strukturen und je spezieller die verwendeten Polymere werden, umso komplexer gestaltet sich eine Schließung von Stoffkreisläufen, wie etwa ein Blick auf den Materialmix eines Smartphones ahnen lässt.

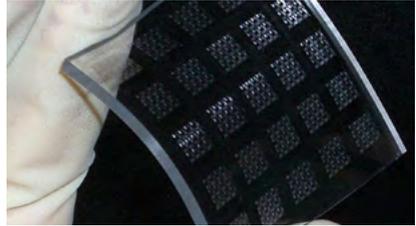


Bild 8: Mittels Micro-Contact-Printing hergestellte strukturierte Oberflächenschicht
(Bild: IMP)

Dennoch stehen auch in der Mikroelektronik und Mikrotechnik die Ampeln auf „grün“.

Unter nachhaltiger Elektronik versteht man elektronische Produkte, die ohne giftige Chemikalien, mit recycelbaren Teilen und niedrigen Kohlenstoffemissionen während der Produktion hergestellt werden [74]. Umweltgerechtes Design, Ökobilanzen und CO₂-Footprint-Analysen für Elektroniksysteme sind in Entwicklung [75, 76]. Infolge der hohen Stückzahlen bei elektronischen Konsumgütern sind die eingesetzten Mengen an Polymeren recht hoch, daher birgt eine Substitution durch kohlenstoffneutrale Materialien ein signifikantes CO₂-Reduktionspotenzial. Genutzt wird dies etwa bereits beim Shiftphone, dessen Gehäuse teilweise aus recyceltem Polycarbonat besteht. Auch beim Elektronik-Zubehör wächst das Angebot an nachhaltigen Materialien stetig. Seit Sommer 2022 sind Handy-Schutzhüllen am Markt, welche durch Aufbereitung von TPU aus ausgedienten Skischuhen gefertigt werden [77].

Auf der Komponentenebene, bei den mikroelektronischen und mikromechanischen Bauteilen und Sensoren, besteht noch ein hoher Entwicklungsbedarf, was Substitution und Design für ein Recycling betrifft. Die für das Electronic Packaging verwendeten Materialien bestehen sehr oft aus Kunststoffen, die in Zukunft auch umweltfreundlich sein sollten [78]. Nach Einschätzung der Initiatoren des Green Electronics Network im kanadischen Forschungsbeirat NSERC ist eine der größten Herausforderungen, vor denen die Elektronikindustrie heute steht, die Entwicklung umweltfreundlicher Materialien, Methoden und Prozesse [79]. Insbesondere das Drucken von Elektronik und Mikrostrukturen, welches in sehr vielen Arbeitsgruppen weltweit [80, 81] vorangetrieben wird, hat hierbei gegenüber konventioneller Elektronik den Vorteil, dass anstatt von Metallen vorwiegend polymerbasierte Materialien verwendet werden (**Bild 8**), die sich leicht substituieren lassen oder im Idealfall sogar biologisch abbaubar sind.

Das Mikrotechnologie-Netzwerk IVAM hat sein Jahrestreffen 2022 mit «Solutions for Sustainability» überschrieben, um Nachhaltigkeitsaspekte in Mikro- und Nanotech-



Bild 9: Die zwölf Prinzipien der Green Chemistry (Bild: INO [87] in Anlehnung an [86])

nologien, Photonik, Mikrofluidik und organischer Elektronik zu diskutieren [82]. Es wurden interessante erste Lösungsansätze für eine nachhaltige Materialentwicklung und -fertigung erkennbar. Recycling von elektronischen Komponenten ist hingegen das Thema des für 2023 geplanten International Electronics Recycling Congress [83]. Herstellungsprozesse für Mikrostrukturen und Mikroelektronik sind z.T. sehr chemie- und energieintensiv – möglicherweise einer der Gründe für den hohen CO₂-Fussabdruck elektronischer Komponenten, vor allem weil dieser auf je 1 kg Material bezogen wird. Für ein typisches IC-Package, das nur 21 g wiegt, gibt das LCA-Berechnungstool IDEMAT z.B. einen Footprint von 1.356 kg CO₂ aus [84]. Andererseits sollten sich durch die Miniaturisierung von Produkten und Funktionalitäten und die damit verbundenen Materialeinsparungen [85] Umweltvorteile schaffen lassen, etwa Einsparungen an Rohstoffen, vor allem aber auch an Produktionshilfsmitteln und Energie. Zusammen mit der geringeren Menge an Abfall ermöglicht dies grundsätzlich Perspektiven auf eine nachhaltige Produktion hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt [85]. Die bereits bewährten zwölf Prinzipien der „Green Chemistry“ [86] (**Bild 9**) sind dabei auch auf die Sensorfertigung anwendbar [87]. Mithilfe umweltfreundlicher Materialien lassen sich sogar Funktionskomponenten wie Batterien drucken. Empa-Forscher haben beispielsweise einen kompostierbaren Mini-Kondensator entwickelt, der lediglich aus Kohlenstoff, Zellulose, Glycerin und Kochsalz besteht [88].

Fazit und Perspektiven

Kunststoffe spielen eine Schlüsselrolle bei Innovationen zur Bewältigung zukünftiger Herausforderungen, und werden daher in weiter steigenden Mengen benötigt. Damit

die durch Plastik verursachten negativen Auswirkungen nicht im gleichen Maße skalieren, werden – nach übereinstimmenden Ergebnissen verschiedener Studien – logistische und technologische Entwicklungen auf internationaler Ebene zur Vermeidung, Substitution und Aufbereitung von Plastik notwendig, die zum Teil bereits gestartet sind. Das Ziel einer vollständigen Vermeidung der Plastikverschmutzung scheint möglich, falls eine Reihe von bislang offenen Punkten durch neue technologische Erfindungen gelöst werden kann, etwa die Rückhaltung von Mikroplastik, die Verwertung von Mischmaterialien und effektive Sammelsysteme auch in abgelegenen Gebieten. Überall wo es gelingt, dem Abfall einen Wert zu geben, wird die Kontamination der Umwelt zurückgehen. Außerdem wird ein systemisches Umdenken nötig, indem Recycling vom Ende her gedacht wird, um durch eine sinnvolle Produktgestaltung und -verwendung funktionierende Materialkreisläufe zu schaffen.

Während im Fall der Verpackungskunststoffe Forschungs- und Lösungsansätze für recyclinggerechtes Design, Materialsubstitution, Sammelsysteme und Wiederverwertung mit hoher Intensität entwickelt und ausgearbeitet werden, sind entsprechende Aktivitäten auf dem Gebiet der technischen Kunststoffe und Anwendungen meist erst im Entstehen. Aufgrund der längeren Einsatzdauer entstehen dort weniger Abfälle, die aber komplexer zusammengesetzt und schwieriger wiederzuverwerten sind. Andererseits haben technische Kunststoffe meist schon per se einen höheren Wert, was das Recycling potenziell lukrativer macht. Logistiksysteme und Recyclingquoten sind national sehr unterschiedlich, was die Möglichkeit zum Systemvergleich gibt, um beim Nachbarn zu lernen. Besonders herausfordernd ist die Schließung von Stoffkreisläufen im Fall mikroelektronischer oder gar mikrotechnischer Produkte, und zwar infolge des stark segmentierten und hochspezialisierten Stoffmixes bei den dort verwendeten Kunststoffen. Auch hier gibt es erste Entwicklungen hin zu einer Substitution durch erneuerbare Materialien, aber auch zur Einführung umweltfreundlicher Fertigungsverfahren. Interessante Ansätze bei gedruckten Sensoren und Batterien lassen hoffen, dass auf lange Sicht auch die Elektronik und Sensortechnik kreislauffähig wird und zukünftig mehr zur Lösung von Umweltproblemen beiträgt, als solche zu verursachen.

Literatur

- [1] R. Geyer, J.R. Jambeck, K. Lavender: Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3 (7) 2017, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- [2] A. Maurer: Wie machen wir mit Kunststoffen weiter? Eine Betrachtung unter realistischen Nachhaltigkeitsaspekten. *JAHRBUCH Dichten. Kleben. Polymer.* 2022, Mannheim, 2021, 85-108
- [3] Ökobilanzielle Expertisen zu verschiedenen Lebensmittelverpackungen im Auftrag des Naturschutzbundes Deutschland e.V. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 10.06.2021

- [4] OECD: Global plastic waste set to almost triple by 2060. 03. Juni 2022, <https://www.oecd.org/environment/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.htm>
- [5] W. W. Y. Lau et al.: Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science* 369 (2020) 6510, 1455-1461, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba9475>
- [6] The Pew Charitable Trusts & SYSTEMIQ: Breaking the plastic wave – A comprehensive assessment of pathways toward stopping ocean plastic pollution. 2020, <https://www.systemiq.earth/breakingthe-plasticwave/>
- [7] V. G. Zuin, K. Kümmerer: Chemistry and materials science for a sustainable circular polymeric economy. *Nature Reviews Materials* 7, 2022, 76-78
- [8] BMZ: Das Lieferkettengesetz. <https://www.bmz.de/de/entwicklungspolitik/lieferkettengesetz>
- [9] EU Parliament: Right to repair. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698869/EPRS_BRI\(2022\)698869_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698869/EPRS_BRI(2022)698869_EN.pdf)
- [10] Europäische Kommission: EU strategy for sustainable and circular textiles. 30. März 2022, https://environment.ec.europa.eu/publications/textiles-strategy_de
- [11] Europäische Kommission: Europäischer Grüner Deal (CO₂-Grenzausgleichssystem). https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12228-Europaischer-Gruner-Deal-CO2-Grenzausgleichssystem-_de
- [12] Renewable Carbon Initiative Outlines Support for Alternative Carbon Sources. ASI Adhesives & Sealants, 02.01.2022, <https://www.adhesivesmag.com/articles/99090-renewable-carbon-initiative-outlines-support-for-alternative-carbon-sources>
- [13] United Nations Environment Programme: End plastic pollution. Towards an international legally binding instrument. Draft resolution, 2 March 2022, <https://www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy/Sustainable-Plastics-and-Packaging-Value-Chains/Resources/Business-brief-Upcoming-UN-treaty-on-plastic-pollution>
- [14] WBCSD: Upcoming UN treaty on plastic pollution. <https://www.wbcsd.org/content/wbcsd/download/14029/202484/1>
- [15] UNEP: Marine Litter and Plastic Pollution Legal Toolkit. <https://leap.unep.org/knowledge/toolkits/plastic>
- [16] Team SGP: Complete guide to global packaging regulations and directives fighting plastics, 30. September 2021, <https://www.sourcegreenpackaging.com/global-packaging-regulations-plastic/>
- [17] E. Bürgler: Grosses Gerangel um gesammelte PET-Flaschen. *Tagesanzeiger*, 08.05.2022.
- [18] F. Streifinger: Mangelware Recyclate. *Kunststoffe* 02, 2022, 34-35.
- [19] VDMA: Für den nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen – pro Kreislaufwirtschaft. 08.03.2021, <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/6150334>
- [20] VDI Green Paper: Circular Economy für Kunststoffe neu denken. 10.12.2021, <https://www.vdi.de/news/detail/circular-economy-fuer-kunststoffe-neu-denken>
- [21] L. Cabernard, S. Pfister, C. Oberschelp, S. Hellweg: Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion. *Nature Sustainability* 5, 2022, 139-148

- [22] CIEL: Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet. www.ciel.org/plasticandclimate
- [23] Plastic Impact: Are Alternatives to Plastic Really Better for the Environment? 19. Januar 2017, <https://blog.impactplastics.co/blog/are-alternatives-to-plastic-really-better-for-the-environment>
- [24] GVM und Denkstatt: Nutzen von Verpackungen: „Verpackungen nutzen – auch in ökologischer Hinsicht“. Mainz, April 2018, https://kunststoff.swiss/Downloads/Nachhaltigkeit/ds_Verpackungen-nutzen-auch-in-%C3%B6kologischer-Hinsicht.pdf
- [25] Kunststoff.swiss: Kunststoffe für eine nachhaltige Zukunft. <https://kunststoff.swiss/Nachhaltigkeit/Kunststoffe-f%C3%BCr-eine-nachhaltige-Zukunft>
- [26] McKinsey & Company: Climate impact of plastics. July 2022, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/Climate-impact-of-plastics>
- [27] SYSTEMIQ: ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe. April 2022, <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2022/05/ReShapingPlastics-v2.1.pdf>
- [28] NTN Innovation Booster Plastics for Zero Emission: Towards negative emissions with polymers and composites. <https://plastics4zeroemission.ch/call-for-ideas>
- [29] S.V. Jørgensen, M.Z. Hauschild, P.H. Nielsen: The potential contribution to climate change mitigation from temporary carbon storage in biomaterials. *Int J Life Cycle Assess* 20, 2015, 451–462. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0845-3>
- [30] A. Geipel-Kern: Steht die stoffliche Nutzung von CO₂ vor dem Durchbruch? Studie untersucht das Potenzial. *Process*, 29.01.2021. <https://www.process.vogel.de/steht-die-stoffliche-nutzung-von-co2-vor-dem-durchbruch-studie-untersucht-das-potenzial-a-996073/>
- [31] H.P. Schmidt, N. Hagemann F. Abächerli, J. Leifeld, T. Bucheli: Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science* 112, 2021, 1-71. <https://doi.org/10.34776/as112g>
- [32] McKinsey: Advanced recycling: Opportunities for growth. May 16, 2022, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/advanced-recycling-opportunities-for-growth?cid=eml-web>
- [33] Clariters einzigartige Kunststoff-Recycling-Lösung erzielt einen negativen Netto-Kohlenstoff-Fußabdruck. *PR Newswire*, 01. Dezember 2020, <https://www.prnewswire.com/il/news-releases/clariters-einzigartige-kunststoff-recycling-losung-erzielt-einen-negativen-netto-kohlenstoff-fuss-abdruck-841473071.html>
- [34] Plastics Europe: Plastics – the Facts. 2021, <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>
- [35] P. Semadeni: Kunststoffe intelligent einsetzen. *PACK aktuell* 10, 2021, 7-8
- [36] D. Schwendemann: Im Spannungsfeld der Kreislaufwirtschaft. *Kunststoff Xtra* 12, 2019, 7-9
- [37] D. Schwendemann: Kunststoffrecycling - Herausforderungen an die Prozesskette. *Rapperswiler Kunststoff-Forum*, 2. September 2021
- [38] Wikipedia: Technische Kunststoffe. https://de.wikipedia.org/wiki/Technische_Kunststoffe

- [39] Klimaschutzgesetz 2021: Generationenvertrag für das Klima. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>
- [40] H.-W. Schiffer: Treibhausgasneutralität 2045/2050: Verschärfung der nationalen und der europäischen Klimaziele. *Wirtschaftsdienst* 8, 2021, 638-644. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10273-021-2982-6.pdf>
- [41] EU-Staaten einigen sich auf Regeln gegen Greenwashing von Unternehmen. *ZEIT ONLINE*, 22. Juni 2022, <https://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2022-06/unternehmensverantwortung-eu-nachhaltigkeit-transparenz-grossunternehmen>
- [42] C. Berger: Materialien mit geringem CO₂-Fußabdruck gesucht. *SpringerProfessional Online-Artikel*, 18.08.2021, <https://www.springerprofessional.de/emissionen/werkstoffe/materialien-mit-geringem-co2-fussabdruck-gesucht>
- [43] Miele setzt verstärkt auf Einsatz von Rezyklat. *Recyclingmagazin*, 02.02.2022, <https://www.recyclingmagazin.de/2022/02/02/miele-setzt-verstaerkt-auf-einsatz-von-rezyklat>
- [44] P. Schäfer: Faurecia und Veolia kooperieren bei Recycling-Materialien. *SpringerProfessional*, 09.05.2022, <https://www.springerprofessional.de/werkstoffe/interieur/faurecia-und-veolia-kooperieren-bei-recycling-materialien/20374464>
- [45] E. Sarioglu, H.K. Kaynak: PET bottle recycling for sustainable textiles. In: N. O. Camlibel (Ed.) *Polyester: Production, Characterization and Innovative Applications*. Intech, Rijeka, Croatia, 2018. <https://www.intechopen.com/books/6387>
- [46] Maurice Lacroix AIKON #tide: Uhr aus Upcycling-Ozeanplastik im Test. <https://chrononautix.com/maurice-lacroix-aikon-tide-test>
- [47] Hochwertige Seile und Textile aus Abfallplastik. <https://www.oceanyarn.com>
- [48] M. Flury: Dem Abfall einen Wert geben. *KunststoffXtra* 7-8, 2020, 26-27
- [49] B. Joseph, J. James, N. Kalarikkal, S. Thomas: Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4, 2021, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.003>
- [50] D. Mitsch: *Das Design nachhaltiger Medizinprodukte*. Springer-Gabler Wiesbaden 2018, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22492-9>
- [51] M. Meier: *Nachhaltigkeit bei medizinischen single-use-Produkten*. Bachelorarbeit, OST Ostschweizer Fachhochschule, 2022
- [52] H. Pelc: Markteinführung von klimaneutralem Polycarbonat. *Kleb- und Dichttechnik*, 24.01.2022, <https://www.springerprofessional.de/kleb--und-dichttechnik/markteinfuehrung-von-klimaneutralem-polycarbonat/20061108>
- [53] LUVOTECH® eco - Technische Compounds mit verbesserter Ökobilanz. <https://www.luvocom.de/de/produkte/luvotechr-eco-technische-compounds-mit-verbesserter-oekobilanz>
- [54] Future Devices: How Design and Materials Help Meet Emerging Needs and Sustainability Goals. Webinar presented by Covestro, June 23, 2022. https://knowledge.ulprospector.com/13190/pe-webinar-future-devices-how-design-and-materials-help-meet-emerging-needs-and-sustainability-goals/?st=9&ul_piid=a0B5a00000WjvO9

- [55] H. Nakajima, P. Dijkstra, K. Loos: The Recent Developments in Biobased Polymers toward General and Engineering Applications: Polymers that are Upgraded from Biodegradable Polymers, Analogous to Petroleum-Derived Polymers, and Newly Developed. *Polymers* 9 (10) 2017, 523; <https://doi.org/10.3390/polym9100523>
- [56] European Bioplastics e.V.: Bioplastics market data. <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- [57] J.S. Terry, A.C. Taylor: The properties and suitability of commercial bio-based epoxies for use in fiber-reinforced composites. *J Appl Polym Sci.* 2021; 138:e50417. <https://doi.org/10.1002/app.50417>
- [58] VIABLE project: manufacturing bio-based epoxy resins by partially replacing BPA with lignin biomass. <https://www.biorizon.eu/projects/viable-project-manufacturing-bio-based-epoxy-resins-by-partially-replacing->
- [59] S. Mastrolitti et al.: Sustainable Lignin Valorization: Technical lignin, processes and market development. IEA Bioenergy, 2021, <https://task42.ieabioenergy.com/publications/sustainable-lignin-valorization/>
- [60] UN-Bericht: Menge an Elektroschrott wächst auf Rekordhoch. ZEIT Online, 02.06.2020, <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2020-07/elektroschrott-zunahme-un-bericht-umweltschutz>
- [61] SENS, SLRS, Swico: Fachbericht 2021. Aktuelles zum Elektro- und Elektronikrecycling. <https://www.swico.ch/de/recycling/grundlagen/fachbericht/#fachbericht-2021>
- [62] Aus Infektionsschutzscheiben wird hochwertiger Recycling-Rohstoff. *Recycling-Magazin*, 02.03.2022, <https://www.recyclingmagazin.de/2022/03/02/aus-infektionsschutzscheiben-wird-hochwertiger-recycling-rohstoff>
- [63] Elektroschrott-Recycling: Thommen erreicht eine Wiederverwertungsquote von bis zu 95 %. 03.05.2021. <https://thommen.ch/de/blog/elektroschrott-recycling-thommen-erreicht-eine-wiederverwertungsquote-von-bis-zu-95>
- [64] Stiftung Autorecycling Schweiz. <https://stiftung-autorecycling.ch/autorecycling>
- [65] A. Raudaskoski, T. Lenau, T. Jokinen, A. V. Gisslén and A.-L. Metzke: Designing plastics circulation – electrical and electronic products. Nordic Council of Ministers, 2019, <http://dx.doi.org/10.6027/TN2019-534>
- [66] S. Krattiger: Recyclingpraxis und -Perspektiven für Kunststoffe aus Elektronikschrott. OST Coffee Lectures, 03.06.2021, https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/imp/materials/vortrag_polymeric_coffee_2021_neu.pdf
- [67] P. Schäfer: Audi und KIT testen chemisches Recycling von Kunststoffen. *SpringerProfessional Werkstoffe*, 24.06.2021, <https://www.springerprofessional.de/werkstoffe/werkstoffrecycling/audi-und-kit-testen-chemisches-recycling-von-kunststoffen/19285304>
- [68] E. Bayer, G. Becker, M. Faubel, M. Kutubuddin, A. Maurer: Wertstoffgewinnung aus Automobilkunststoffen. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 7 (4) 1995, 221-225, <https://enveurope.springeropen.com/track/pdf/10.1007/BF02937531.pdf>

- [69] Round Table on WEEE Plastics Raising the recycling bar: can chemical recycling help? 20th International Electronics Recycling Congress IERC 2022. <https://icm.ch/past-events/20th-international-electronics-recycling-congress-ierc-2022>
- [70] L. Wiese: Zweites Leben für Rotorblätter von Windkraftanlagen, Vattenfall, 21.04.2022, <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2022/zweites-leben-fuer-rotorblaetter-von-windkraftanlagen>
- [71] P. Schäfer: Pilotanlage für energieeffizientes Recycling von CFK-Abfällen. SpringerProfessional, 23.09.2021, <https://www.springerprofessional.de/werkstoffrecycling/verbundwerkstoffe/pilotanlage-fuer-energieeffizientes-recycling-von-cfk-abfaellen/19685626>
- [72] US2021032432A1: One-step, solvent-free method for recycling and reprocessing thermoset polymers with tunable properties. 2021-02-04
- [73] A. Koppenol: Reducing our carbon footprint with recycled plastic. ABB Conversations, 28 Oct 2021, <https://www.abb-conversations.com/2021/10/reducing-our-carbon-footprint-with-recycled-plastic>
- [74] Wikipedia: Sustainable electronics. https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_electronics
- [75] Fraunhofer IZM: Umweltbewertung und Ökodesign. https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental_reliabilityengineering/arbeitsgebiete/umweltbewertung-fuer-elektroniksysteme.html
- [76] INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH: Recyclability by Design – In Kunststoff integrierte Elektronik wird nachhaltiger. <https://www.leibniz-inm.de/pressemitteilung/recyclability-by-design-in-kunststoff-integrierte-elektronik-wird-nachhaltiger>
- [77] FREITAG lab.ag: So wird der Skischuh zur Schutzhülle. <https://www.freitag.ch/de/materials/ski-boots>
- [78] S. Huber: Mikrosystemtechnik - Neue Lösungsansätze für die Entwicklung innovative Produkte. Tag der Systemtechnik, OST, 15. Juni 2022
- [79] N. Le Bouch: Green innovations for industry. INO Blog, June 2020, <https://www.ino.ca/en/blog/green-photonics>, abgerufen am 20.05.2022
- [80] Swiss ePrint 2022 - The Swiss Conference on Printed Electronics and Functional Materials. <https://swisseprint.ch/site>
- [81] K. Albrecht: InkJet Printing of Functional Materials. OST Coffee Lectures «The Future of Polymers: Mikrotechnologien», 09.02.2022, https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/imp/materials/2022-02-09_coffeectures_printing_print.pdf
- [82] IVAM Hightech Summit 2022 - Solutions for Sustainability. <https://www.ivam-hightech-summit.com/schedule>
- [83] International Electronics Recycling Congress IERC 2023. 18 – 20. Januar 2023, Salzburg, Austria
- [84] IDEMAT: Sustainable Materials Selection. <http://idematapp.com>
- [85] A. Brunet, T. Müller, S. Scholz: Mikrofertigungstechnologien und ihre Anwendungen. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017, DOI 10.5445/KSP/1000062009

- [86] P.T. Anastas, J.C. Warner: Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, 1998
- [87] C. Trudeau: Green sensors by printed photonics. OST Coffee Lectures "The Future of Polymers: Mikrotechnologien", 09. Februar 2022, https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/imp/materials/presentation_coffee_lectures_-_green_sensors_by_printed_electronics_charlestrudeau.pdf
- [88] X. Aeby, A. Poulin, G. Siqueira, M.K. Hausmann, G. Nyström: Fully 3D Printed and Disposable Paper Supercapacitors. *Advanced Materials* 33 (26) 2021, 2101328. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202101328>

Inhalte

Das JAHRBUCH Dichten. Kleben. Polymer. 2023 enthält 51 wissenschaftliche und praxisorientierte Fachbeiträge aus den Bereichen **Dichten. Kleben. Polymer.:**

Dichten

Statische Dichtungen
Flüssigdichtsysteme/Verguss
Maschinen und Anlagen
Mess- und Prüftechnik
Dienstleistungen

Kleben

Klebtechnik
Klebstoffe
Klebebänder

Polymer

Werkstoffe

Die einzelnen Fachbeiträge geben branchenübergreifend Impulse und Lösungen für Ihre tägliche Arbeit und Entwicklungen.

Die Jahrbuch-Reihe umfasst seit 2004 bereits 19 Ausgaben mit mehr als 950 Fachbeiträgen und insgesamt ca. 8.500 Seiten und ist damit eines der umfangreichsten und wichtigsten Werke im Bereich Dichten. Kleben. Polymer. quer durch alle Branchen.

Herausgeber:in

Sandra Kiefer und Karl-Friedrich Berger haben sich mit der ISGATEC GmbH auf das Gebiet der Dichtungs-, Kleb- und Polymer-technik spezialisiert.

Die ISGATEC® GmbH (**I**nternational **S**ealing, **G**asket and **A**dhesive **T**echnology) ist seit 2002 kompetenter und themenfokussierter Wissensmanagement-Dienstleister im Bereich **Dichten. Kleben. Polymer.**

ISBN Print: 978-3-946260-08-0

ISBN Digital: 978-3-946260-09-7

Weitere Bücher zum Thema:

www.isgatec.com