

# Digitalisierung des Kunststoffrecyclings

Ein Ergebnis des Themenfeldes 2 – Produkte und Wertschöpfungsketten SCI4climate.NRW

**SCI4climate.NRW** ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes Forschungsprojekt zur Entwicklung einer klimaneutralen und zukunftsfähigen Industrie im Jahr 2050. Das Projekt ist innerhalb der Initiative IN4climate.NRW verankert und repräsentiert die Seite der Wissenschaft. Das Projekt erforscht die technologischen, ökologischen, ökonomischen, institutionellen und (infra)-strukturellen Systemherausforderungen für produzierende Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. Ein transdisziplinärer Prozess mit den Partnerinnen und Partnern aus der Industrie und Wissenschaft erarbeitet gemeinsam mögliche Pfade und deren Auswirkungen hin zu einer klimaneutralen Industrie.



### **Bibliographische Angaben**

Herausgeber: SCI4climate.NRW  
Veröffentlicht: 2. August 2021  
Autorenschaft: Phillip Bendix, Holger Berg, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
Kontakt: phillip.bendix@online.de  
Bitte zitieren als: SCI4climate.NRW 2020: *Digitalisierung des Kunststoffrecyclings, Wuppertal*

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....	1
1 Einführung.....	2
2 Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie: Status quo und Entwicklungsperspektiven .....	3
2.1 Status Quo.....	3
2.2 Die Wertschöpfungskette der Kunststoffkreislaufwirtschaft.....	3
2.3 Gegenwärtige Barrieren des Kunststoffrecycling .....	5
2.3.1 Unzureichende Umsetzung des Design-for-Recyclings.....	6
2.3.2 Fehlendes Vertrauen der Kunststoffverarbeiter in Rezyklatqualität und -verfügbarkeit aufgrund von Informationsdefiziten.....	6
2.3.3 Rezyklatfarben.....	7
2.3.4 Bedruckbarkeit .....	7
2.3.5 Aufwand für die Sortierung .....	7
2.3.6 Anforderungen bei Lebensmittelverpackungen.....	7
2.3.7 Preis von Kunststoffneeware .....	7
2.3.8 Hohe Such- und Transaktionskosten .....	8
2.3.9 Duroplaste und Elastomere .....	8
2.3.10 Additive.....	8
3 Entwicklungsperspektiven .....	9
4 Digitale Lösungsansätze - Einsatz digitaler Technologien in Kunststoffkreisläufen: Recycling ermöglichen und skalieren .....	10
4.1 Behebung von Informationsdefiziten durch Datenerzeugung, -analyse und -transfer sowie Tracing- und Trackingverfahren .....	11
4.2 Reduktion von Such- und Transaktionskosten, Herstellen von Markttransparenz durch Online-Plattformen .....	11
4.3 Verbesserung von Sortierergebnissen durch Sensorik und Bilderkennung.....	12
4.4 Digitale Produkt- und Materialpässe.....	13
4.5 Verbesserung des allgemeinen Wissensstandes zu Nutzung und Einsatz von Kunststoffrezyklaten .....	14
4.6 Entwicklung geeigneter Design-for-Recyclingansätze.....	15
5 Implikationen .....	16
5.1 Implikationen zu einer Digitalpolitik für die Kunststoffkreislaufwirtschaft.....	16
5.2 Recycling durch die Unterstützung digitaler Ansätze ermöglichen .....	16
5.3 Implikationen für Unternehmen.....	18
Literaturverzeichnis .....	20

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Wertschöpfungsnetzwerk in der Kunststoffverarbeitung auf der folgenden Seite abgebildet.....	4
Abbildung 2: Darstellung der mit Hilfe des DPP genutzten und zur Verfügung gestellten Informationen für verschiedene Akteure in der Kreislaufwirtschaft (BMU o. J.).....	13
Tabelle 1: Digitale Lösungsansätze für die verschiedenen beschriebenen Barrieren des Kunststoffrecyclings.....	10

## 1 Einführung

Die globale Kunststoffproduktion beträgt gegenwärtig 368 t/a. An einem einzigen Tag werden damit mehr Kunststoffe produziert als im gesamten Jahr 1950. (Statista 2021) Auch wenn Kunststoffe im direkten Vergleich ressourcenschonender sind, als viele andere Materialien, entstehen durch die enormen Produktionsmengen erhebliche Umweltschäden. Diese resultieren aus der Förderung der Grundstoffe und der Produktion des Kunststoffes, durch deren Persistenz in ökologischen Systemen bei unsachgemäßer Entsorgung und auch durch Beseitigung in Deponien oder Müllverbrennungsanlagen.

Bis zur Verwendung eines Kunststoffprodukts sind viele Schritte notwendig: Rohstoffförderung, Monomerherstellung, Polymerisation zum Kunststoff, Compoundieren, Halbzeugherstellung, Produktherstellung, Vertrieb und letztlich Nutzung des Endprodukts. Ein sich daran anschließendes Recycling ist im allgemeinen Interesse, da sich so der mit dem Produkt verbundene ökologische Fußabdruck verringern lässt (ALBA 2011). Diese Verringerung beruht sowohl auf einer ressourceneffizienteren Produktion eines Produkts aus Kunststoffrecyclat, als auch auf der Vermeidung der Deponierung oder Verbrennung des sonst entstehenden Abfalls.

Prinzipiell ist das Recycling von thermoplastischen Kunststoffen wie PET, PP oder PE technisch gut realisierbar, in der Praxis bestehen allerdings einige Hürden, die das erfolgreiche Recycling erschweren, sodass in der Produktion von Kunststoffprodukten bis heute nur 13,7 % Rezyklatkunststoff verwendet wird (Conversio Market & Strategy 2020, 57). Diese Hindernisse für das erfolgreiche Kunststoffrecycling sind breit gefächert und reichen von schlechtem, nicht recyclinggerechtem Produktdesign, über technische Herausforderungen bei der Säuberung und Sortierung der Kunststoffabfälle bis hin zu hohen Such- und Transaktionskosten beim Handel zwischen den einzelnen Akteuren der Recycling-Wertschöpfungskette, die wiederum zu Vertrauensproblemen hinsichtlich des Einsatzes von Rezyklat führen. Letztlich schlagen sich diese Hürden aber vor allem in zwei entscheidenden, korrelierten Faktoren nieder – zum einen ist der (zumeist höhere) Preis des Rezyklateinsatzes im Vergleich zur günstigeren Kunststoffneueware ein wichtiges Entscheidungskriterium, zum anderen ist die Qualität des Kunststoffrecyclates bezüglich mechanischer und toxikologischer Anforderungen und die Informationsführung hierzu entscheidend. (Bastian u. a. 2020; UBA 2016).

Digitale Strategien und Instrumente werden derzeit zur Überwindung vieler dieser Hürden für das Kunststoffrecycling untersucht und entwickelt. Sie stehen jedoch nicht allein, sondern sind auf komplementäre Innovationen im Maschinenbau und neue regulatorische Ansätze angewiesen.

Die vorliegende Kurzstudie widmet sich der Beschreibung der oben genannten Problematik und analysiert die zur Zeit vorhandenen und in Entstehung befindlichen digitalen Instrumente vor dem Hintergrund der gegenwärtigen Herausforderungen und den zukünftigen Plänen für einen energie- und ressourceneffiziente Kunststoffkreislaufwirtschaft. Hierzu wird zunächst die Kunststoffkreislaufwirtschaft als Zielsystem und in ihrem jetzigen Stand beschrieben. Sodann werden gegenwärtige Barrieren und Entwicklungsperspektiven aufgezeigt. Bereits zur Verfügung stehende bzw. in Entwicklung befindliche digitale Lösungsansätze werden daraufhin beschrieben. Die Studie schließt mit einer Diskussion der Befunde und der Ableitung von Handlungsnotwendigkeiten.

## 2 Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie: Status quo und Entwicklungsperspektiven

### 2.1 Status Quo

Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft würde zum einen die Abhängigkeit von Rohstoff- oder Kunststoffimporten vermindern und ist zum anderen Voraussetzung für eine klimaschonendere Kunststoffindustrie, die in den nächsten zwei Jahrzehnten umgesetzt werden muss, um zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C beizutragen (Garcia und Robertson 2017; Heinrich-Böll-Stiftung 2019). Zudem wird das Ziel der Reduktion von Makro- und Mikroplastikeinträgen in verschiedenste Ökosystemen immer wieder als Motivation für eine Kreislaufwirtschaft genannt. Dies wird aber langfristig nur von Erfolg sein, wenn es auch eine Motivation gibt, Kunststoffabfälle global großskalig für ein Recycling einzusammeln (Garcia und Robertson 2017).

Im Kunststoffrecycling in Deutschland wird zur Zeit ein stoffliche *Recyclingquote* von privaten Post-Consumer Abfällen von 33 % erreicht (Conversio Market & Strategy 2020, 91). Sie wird ergänzt durch die *Rezyklatquote*, die angibt welcher Anteil der Produktion von Kunststoffprodukten mit Rezyklaten erfolgt. Die Rezyklatquote liegt derzeit gemittelt über alle Branchen bei 13,7 % und damit weit entfernt von einer echten Kreislaufwirtschaft (Conversio Market & Strategy 2020, 57).

### 2.2 Die Wertschöpfungskette der Kunststoffkreislaufwirtschaft

Wie eingangs schon erwähnt, sind in der Wertschöpfungskette von Rezyklatkunststoffen verschiedene Akteure beteiligt. Vereinfacht beschrieben schließt sich der Nutzungsphase durch die Konsumierenden die Reverse Logistics im Rahmen der Abfallwirtschaft an. Systembeteiligungspflichtige Abfälle (§3 Abs. 8 VerpackG) werden in Deutschland durch die Dualen Systeme sortiert und aufbereitet bzw. entsorgt, gewerbliche Abfälle werden von privatwirtschaftlichen Entsorgern sortiert und aufbereitet. Zudem werden manche Produkte direkt in Pfand- oder Rücknahmesystemen zurückgenommen und dann entsprechend verwertet. Die sortierten, gereinigten Abfälle werden entweder von den Entsorgern selbst oder von spezialisierten Recyclern zu Regranulat verarbeitet, welches dann von Kunststoffverarbeitern für die Produktion neuer Produkte eingesetzt werden kann. Die Wertschöpfungskette des Kunststoffkreislaufes ist in Abbildung 1.

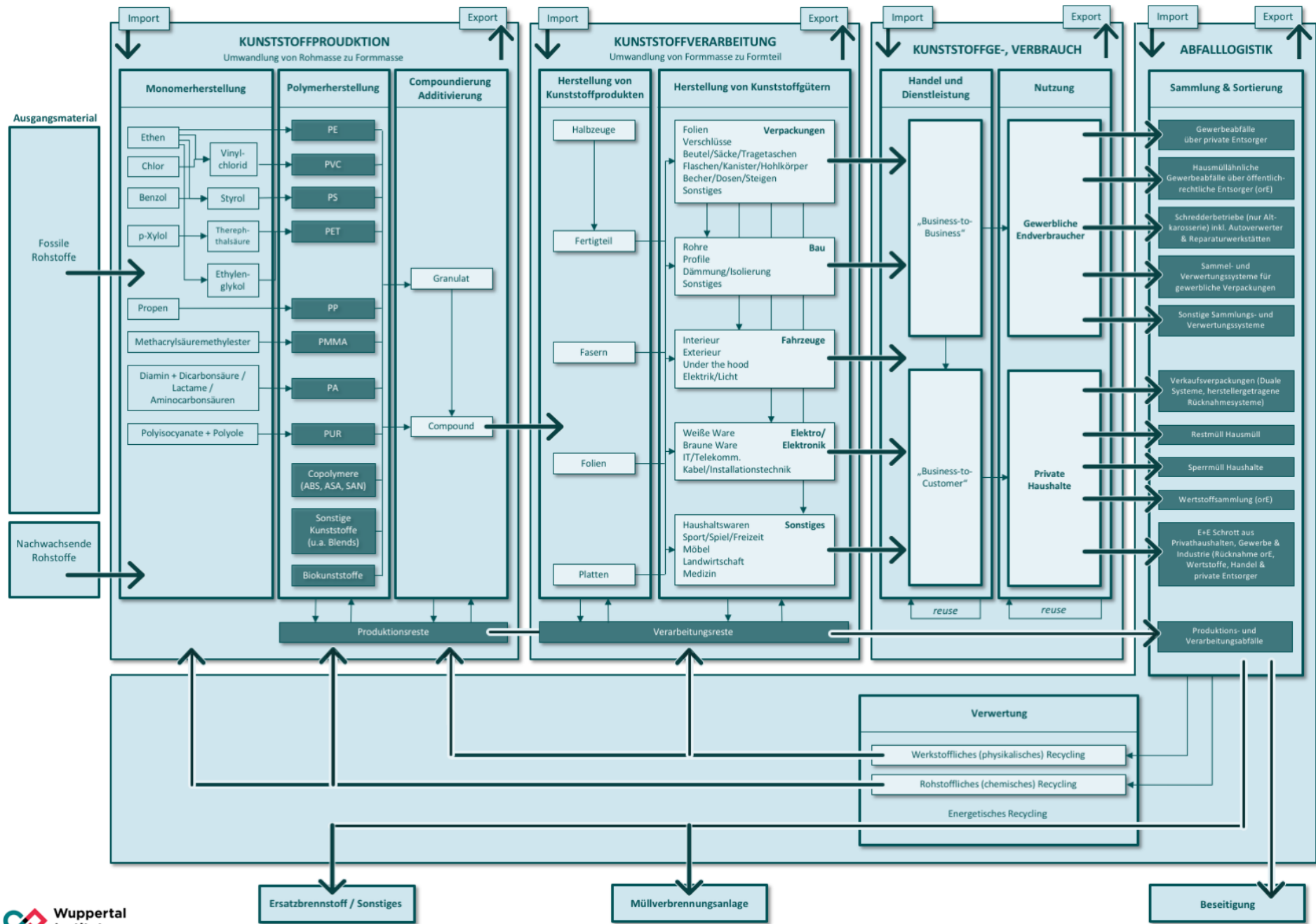


Abbildung 1: Wertschöpfungsnetzwerk in der Kunststoffverarbeitung auf der folgenden Seite abgebildet

Je nach Anfallstelle der Abfälle unterscheidet sich die Qualität der Abfallströme bezüglich ihrer Eignung für ein anschließendes Recycling stark. Ausschlaggebend hierfür sind unter anderem die Sortenreinheit der Verschmutzungsgrad und die Farbreinheit, aber auch der vorgesehene Einsatzzweck spielt ggf. eine Rolle, da nicht alle Anwendungen gleiche Anforderungen stellen. Generell gilt, je reiner und sauberer der Materialstrom, desto höher die Chancen für ein hochwertiges Recycling. (PlasticsEurope o. J.; UBA 2016) Verschiedene Kunststoffe sind dabei für das Recycling in unterschiedlicher Weise geeignet:

- Die in *institutionalisierten Rücknahmesystemen* wie z.B dem PET-Pfandsystem anfallenden Abfälle liefern bspw. sehr hochwertige Stoffströme, da die Materialien sortenrein gesammelt werden können.
- *Post-Consumer Abfälle* bspw. aus dem Dualen System sind dagegen verschiedenster Qualität und müssen entsprechend aufwändig sortiert werden. Teilweise, wie z.B. für hochwertige HDPE Fraktionen, können die erhaltenen Rezyklate wieder in hochwertigen Anwendungen genutzt werden, während Abfallfraktionen wie bspw. recyclinginkompatible Multimaterialien als Ersatzbrennstoff verwendet oder der Abfallverbrennung (thermische Verwertung) zugeführt werden (Plasteverband 2019; Schüler 2019).
- *Gewerblich entsorgte Abfälle* weisen eine große qualitative Bandbreite bezüglich Sortenreinheit und Verschmutzungsgrad auf. Sauberes, unbedrucktes Material desselben Kunststoffes kann gut recycelt werden und wird vergleichsweise hochpreisig weiterverkauft. Andere, grob verschmutzte, heterogene Kunststofffraktionen mit Kontamination durch Fremdmaterialien müssen dagegen (ggf. als Ersatzbrennstoff) verbrannt werden.
- Während der Produktion beim Kunststoffverarbeiter anfallende *Produktionsreste und Nebenprodukte* wie Anfahrstücke oder Randbeschnitte sind von bekannter, hoher Qualität und werden zum Großteil recycelt. Dies geschieht entweder unmittelbar durch den verarbeitenden Betrieb selbst oder durch externe Recycler.

Durch die relativ geringen Preise von Neuware Commodity-Kunststoffen und dem hohen Aufwand für Sammlung, Sortierung und Aufbereitung bei der Herstellung von Regranulaten liegt der Preis von Regranulaten derzeit nicht weit unter dem der Kunststoffneuware bzw. ist gelegentlich sogar teurer. Der finanzielle Anreiz zur Nutzung von Regranulaten für die Hersteller ist nach Ansicht von Branchenkennern damit nur gering oder nicht vorhanden.<sup>1</sup>

### 2.3 Gegenwärtige Barrieren des Kunststoffrecycling

Wie bereits dargestellt, ist das Kunststoffrecycling mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, die im Folgenden jeweils kurz dargestellt werden.

Im Rahmen von Expertengesprächen mit Mitgliedern der Kunststoffindustrie konnten folgende Punkte identifiziert werden:

- *Mangelndes Vertrauen* in recycelte Kunststoffe und die Recycler. Dieses Problem besteht vor allem in der Beziehung zwischen Recyclern und kunststoffverarbeitenden Betrieben. Probleme ausvorhergegangenen Prozessen und Vorurteile prägen diesen Punkt. (Berg 2020)

---

<sup>1</sup> Anzumerken ist hier, dass die Märkte für Kunststoffrezyklate in Europa in Folge der Corona Krise massiv gestört sind. Ursächlich hierfür sind u.a. ein stark schwankender Ölpreis sowie eine hochvariable Nachfrage auf außereuropäischen Märkten.



- *Mangelndes Wissen* über die Qualitäten und Eigenschaften von Rezyklaten. Den Abnehmer\*innen und verarbeitenden Betriebe sind nicht über die gegenwärtigen Möglichkeiten des Rezyklateinsatzes informiert. Auch dies führt zu Rückgriffen auf Primärmaterial.
- *Mangelnde Transparenz* zu Materialeigenschaften: Die beschriebenen Probleme werden durch die bisher oft wenig transparenten Eigenschaften konkreter Chargen verstärkt, da Informationen über Sorten- und Farbreinheit etc. nicht immer voll verfügbar sind oder zuverlässig mitgegeben werden.
- *Unklare Verfügbarkeit*: Mangelnde Datenverfügbarkeit und -austausch lassen potentielle Abnehmer im Unklaren hinsichtlich zuverlässiger Rezyklatverfügbarkeit.
- *Strenge Produkthanforderungen* der Nachfrageseite verhindern den umfassenden Einsatz von Rezyklat.
- *Ökonomische Faktoren*: Rezyklate verfügen zumeist nur über einen geringen Preisvorteil gegenüber Neuware, erfordern gleichzeitig aber mehr Aufwand in der Fertigung, sodass ihr Einsatz wirtschaftlich unattraktiv ist. Zusammen mit einer höheren Unsicherheit zu verfügbaren Mengen am Markt ist das auch für Unternehmen, die der Idee einer Kreislaufwirtschaft positiv gegenüberstehen, eine substantielle Hürde.

Im weiteren Verlauf der Kurzstudie wird untersucht, welche dieser und weiterer Barrieren mit Hilfe digitaler Instrumente überwunden werden können.

### 2.3.1 Unzureichende Umsetzung des Design-for-Recyclings

Eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten in hochwertigen Anwendungen und damit für eine echte Kreislaufwirtschaft ist die Recyclingfähigkeit der Produkte. Diese muss schon bei der Produktgestaltung mitgedacht werden. Multimaterialien, großflächige Bedruckung, schwarze Kunststoffe oder nicht wasserlösliche Kleber sind einige der Beispiele für "Fehler" beim Produktdesign, die ein hochwertiges Recycling erschweren oder unmöglich machen (Cyclos-htp 2019). Ein Problem für das Design-for-Recycling ist allerdings, dass ein Mehraufwand für den Hersteller der Kunststoffprodukte entstehen kann, den Nutzen jedoch ggf. ein Recycler oder eine andere dritte Partei zieht. So ist der Anreiz für den Hersteller klein, das Design-for-Recycling konsequent umzusetzen. Mit § 21 des Verpackungsgesetz wird dies zumindest für systempflichtige Kunststoffverpackungen verbessert, indem durch Beteiligungsentgelte Anreize geschaffen werden, um möglichst gut recycelbare Verpackungen zu fördern.

### 2.3.2 Fehlendes Vertrauen der Kunststoffverarbeiter in Rezyklatqualität und -verfügbarkeit aufgrund von Informationsdefiziten

Durch die, besonders in der Vergangenheit, heterogene Qualität von Rezyklatkunststoffen hat sich bei Kunststoffverarbeitern ein Bild von minderwertiger Ware etabliert, das nur schwer zu korrigieren ist - auch wenn heutzutage vorwiegend Rezyklate mit gleichbleibender, hoher Qualität angeboten werden. Eine weitere, ähnliche Hürde sind die Befürchtungen der Kunststoffhersteller, dass es durch ein fluktuierendes Angebot von Rezyklaten zu Engpässen kommen kann. Bisher sind die Datenverfügbarkeit und Datenqualität zur Ausräumung derartiger Vorbehalte und Befürchtungen durch geeignete Informationsaufbereitung und -transfer allerdings oft noch zu gering ausgeprägt. (Bastian u. a. 2020; Berg 2020)

### 2.3.3 Rezyklatfarben

Vor allem Rezyklat aus Post-Consumer Quellen ist nur in begrenzten Farben verfügbar. Gerade transparentes Material ist schwer realisierbar. Qualitätseinbußen bezüglich der Verarbeitbarkeit und der Produkthanforderungen sind mit dieser eng verfügbaren Farbpaletten nicht notwendig verbunden. Hier ist ein Kulturwandel nötig, Endkunden und Designabteilungen müssen auch Rezyklatkunststoff als Werkstoff einsetzen und mit den farblichen Einschränkungen arbeiten. (Plasteverarbeiter 2019)

### 2.3.4 Bedruckbarkeit

Je nach Rezyklatreinheit kann die Migration organischer, niedermolekularer Verunreinigungen an die Oberfläche des Werkstückes die Bedruckbarkeit des Recyclingwerkstoffes erschweren oder verhindern. (Circular Print o. J.; Expertengespräch 2021)

### 2.3.5 Aufwand für die Sortierung

Je höher die Qualitätsanforderungen an das Rezyklat werden, desto aufwändiger und damit teurer wird das Sortierverfahren für einen heterogenen Input-Strom. Für eine echte Kreislaufführung mit minimalem Downcycling muss allerdings eine möglichst hohe Rezyklatqualität angestrebt werden. Hochleistungsfähige Sortierprozesse sind daher eine Grundvoraussetzung für das Recycling insbesondere von Post-Consumerkunststoffabfällen. (Lindner und Hoffmann 2015)

### 2.3.6 Anforderungen bei Lebensmittelverpackungen

Besonders im Bereich der Lebensmittelverpackung bestehen begründeterweise hohe Anforderungen an die Reinheit des Rezyklates. Eine Diffusion von Schadstoffen und Gerüchen in das Packgut muss sicher ausgeschlossen werden können, regulatorische Ansprüche an Lebensmittelverpackungen sind in verschiedenen europäischen oder nationalen Gesetzen und Verordnungen festgelegt.<sup>2</sup> Für diese und neu zu verabschiedende Regularien gilt, dass zwar eine Kontamination von Lebensmitteln ausgeschlossen werden muss, der Rezyklateinsatz aber nicht prinzipiell untersagt werden darf.

### 2.3.7 Preis von Kunststoffneuware

Wie im vorherigen Abschnitt schon beschrieben, sind Rezyklatkunststoffe preislich nur bedingt konkurrenzfähig. Die fehlende Internalisierung der Umweltkosten bei der Herstellung von Kunststoffneuware z.B. durch zu geringe Bepreisung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist ein Hauptgrund für die geringe Bepreisung von Kunststoffneuware (AVGU 2020; Runkel und Mahler 2017). Ein deutlicher Preisrückgang von Rezyklatkunststoffen aufgrund von Skaleneffekten bei steigender Rezyklatquote ist hingegen gegenwärtig nicht zu erwarten.

---

<sup>2</sup>Lebensmittelbedarfsgegenstände: Verordnung (EG) Nr. 1935/2004, Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB, Bedarfsgegenständeverordnung - BedGgstV; Materialien: Verordnung (EU) Nr. 10/2011, Verordnung (EG) Nr. 282/2008.

### 2.3.8 Hohe Such- und Transaktionskosten

Such- und Transaktionskosten für Rezyklatkunststoffe sind hoch. Dies liegt an dem Fehlen wichtiger Informationen zur Qualität bzw. Verfügbarkeit (räumlich, zeitlich und mengenmäßig) von Rezyklaten. Diese Informationsdefizite erschweren wiederum die Beschaffung und erfordern einen erhöhten Testaufwand für Rezyklate vor-, während und/oder nach der Herstellung von Kunststoffbauteilen. Dies hat in der Vergangenheit wiederum zu den bereits oben erwähnten Vorbehalten und Vertrauensverlusten in den Einsatz von Rezyklaten geführt. Je nach Anforderungen an das Material kann der Aufwand für den Ersatz eines funktionierenden Neuwerekunststoffes damit wirtschaftlich nur schwer darstellbar sein.

### 2.3.9 Duroplaste und Elastomere

Ein werkstoffliches Recycling ist für Duroplaste und Elastomere nicht möglich. Die Verwendung als Ersatzbrennstoff oder das Schreddern und die anschließende Verwendung als Füllstoff stellt nur eine Übergangslösung dar. Hier werden große Hoffnungen in das chemische Recycling gesetzt, allerdings sind bisher keine großskaligen Verfahren für diese Kunststoffe etabliert. Eine Depolymerisation ist in den meisten Fällen nicht zielführend möglich und Pyrolyse ist bei hohen Füllstoffgehalten schwer darstellbar. Ob eine Umstellung von vorhandenen petrochemischen Anlagen in der nötigen Größenordnung und dem gebotenen Zeithorizont gelingen kann, ist nicht sicher.

### 2.3.10 Additive

Additive und Füllstoffe erfüllen die unterschiedlichsten Aufgaben in der Herstellung von Kunststoffprodukten, können allerdings auch das Recycling erschweren. Zum einen finden sich im Rezyklat verschiedenste Füllstoffe und Additive mit den entsprechenden Auswirkungen auf das Eigenschaftsprofil des Rezyklates zum anderen schließen bestimmte Additive, wie z.B. Schadstoffe die Verwendung des Rezyklates für eine Reihe von Anwendungen aus. Die notwendige Analytik zur Detektion der Additive in Rezyklaten ist relativ aufwändig, für eine Identifizierung der Substanzen kommen vor allem massenspektrometrische Methoden in Frage, für eine quantitative Bestimmung muss diese Analytik in der Regel noch erweitert werden (Meyer-Dulheuer u. a. 2000).

### 3 Entwicklungsperspektiven

Die EU-Kreislaufstrategie sowie das Ziel der Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zur Klimaneutralität 2050 verlangen eine massive Steigerung des Rezyklateinsatzes in kurzer Zeit. Der Anteil der Treibhausgasemissionen der Kunststoffproduktion beträgt global nur ca. 2 % (CIEL 2019, 80; Hausfather 2019). Die Emissionen des Kunststoffsektors fallen damit hinter anderen Sektoren zurück, sind aber nichtsdestotrotz relevant und müssen im Zuge der Dekarbonisierung vermieden werden. Eine Umstellung auf erneuerbare Energien im Herstellungsprozess würde dabei schon einen hohen Anteil der Emissionen vermeiden. Auch der Rezyklateinsatz vermindert Emissionen im zweistelligen Prozentbereich. Gerade im Angesicht der zu erwartenden steigenden Kunststoffproduktion ist die schnelle Implementierung einer Kreislaufwirtschaft also dringend notwendig.

Damit Recycling einen größeren Beitrag für Klimaschutz und Nachhaltigkeit leisten kann, muss eine weitere Steigerung erfolgen, sodass nur marginale Mengen an Abfällen als Ersatzbrennstoff verwendet werden müssen und andere Entsorgungsformen nach Möglichkeit vermieden werden. Es ist dabei davon auszugehen, dass das werkstoffliche Recycling langfristig die günstigste Relation zwischen Aufwand und GHG-Emissionen hervorbringt (Worzewski 2020). Für das chemische Recycling steht der Nachweis der ökologischen Vorteilhaftigkeit aktuell noch aus (Vogel u. a. 2020). Der Aufwand für die letzten Prozente der Recyclingquote steigt naturgemäß überproportional an. Eine "einfache" technologische Weiterentwicklung wie bisher wird nur einen Teil dieser Anforderungen erfüllen können, hier ist zu hoffen, dass mit Hilfe des Einsatzes digitaler Technologien eine grundlegende Transformation der Wertschöpfungskette stattfindet.

## 4 Digitale Lösungsansätze - Einsatz digitaler Technologien in Kunststoffkreisläufen: Recycling ermöglichen und skalieren

Dieses Kapitel beleuchtet digitale Ansätze zur Lösung einiger der vorgenannten Probleme. Digitale Lösungen sind dabei für folgende Problemstellungen besonders relevant:

1. Behebung des Fehlendes Vertrauen der Kunststoffverarbeiter in Rezyklatqualität und -verfügbarkeit aufgrund von Informationsdefiziten durch Bereitstellung von Informationen
2. Verbesserung von Sortierergebnissen
3. Reduktion von Such- und Transaktionskosten, Herstellen von Markttransparenz
4. Verbesserung des allgemeinen Wissensstandes zu Nutzung und Einsatz von Kunststoffrezyklaten
5. Entwicklung geeigneter Design-for-Recycling Ansätze

Tabelle 1: Digitale Lösungsansätze für die verschiedenen beschriebenen Barrieren des Kunststoffrecyclings

<b>Problematik</b>	<b>Digitale Lösungsansätze</b>
Unzureichende Umsetzung des Design-for-Recyclings	Website und oder App als zentrale Stelle für die Wissensvermittlung zum Design-for-Recycling, für Best-Practice Beispiele und zur Vernetzung
Fehlendes Vertrauen der Kunststoffverarbeiter in Rezyklatqualität und -verfügbarkeit aufgrund von Informationsdefiziten	Automatisches Erfassen qualitätsbezogener Daten in der Produktion und Weitergabe dieser Daten entlang der Wertschöpfungskette Möglichkeit zur Darstellung dieser Daten in digitalen Rezyklat/Altkunststoff-Märkten
Rezyklatfarben	automatisierte Sortierung des Altkunststoffes
Bedruckbarkeit	siehe Design-for-Recycling
Aufwand für die Sortierung	Optimierte Prozesstechnik im Sortierungsverfahren
Anforderungen bei Lebensmittelverpackungen	Kennzeichnung und Verfolgbarkeit von Materialien über die gesamte Wertschöpfungskette, z.B. durch digitale Wasserzeichen
Preis von Kunststoffneuware	digitale Märkte für Altkunststoff sowie Rezyklate, evtl. mit automatischem Matching von Angeboten und Nachfrage und damit Verringerung der Such- und Transaktionskosten
Hohe Such- und Transaktionskosten	siehe Preis von Kunststoffneuware
Duroplaste und Elastomere	keine
Additive	verbessertes Design-for-Recycling

#### 4.1 Behebung von Informationsdefiziten durch Datenerzeugung, -analyse und -transfer sowie Tracing- und Trackingverfahren

Die Bedenken der Kunststoffhersteller bezüglich des Einsatzes von Rezyklaten können mithilfe digitaler Messtechnik ausgeräumt werden, gleichzeitig kann dies dazu dienen, Such- und Transaktionskosten zu senken, da Qualitätsnachweis sicher erfolgen können, denn ein Recycler kann durch diese Instrumente ein konstant hohes Qualitätsniveau der gesamten Charge dokumentieren und gegenüber dem Käufer nachweisen.

Verschiedene Verfahren sind hierfür in der Entwicklung bzw. werden etabliert. Das Forschungsprojekt "Di-Link-Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe" entwickelt bspw. im Rahmen des BMBF FONIA-Förderprogramms ReziProk eine sensorgestützte Qualitätsnachweisführung in der Produktion u.a. durch Schlagzähigkeitsmessung und Spektrometrie. Die gewonnenen Daten werden gekoppelt mit einer für die Nachweisweitergabe entwickelten Softwareumgebung, welche wiederum in eigens entwickelte Unternehmensökosysteme hineinwirkt. Im Ergebnis können Recycler die Messwerte zum Nachweis von Qualifikationsparametern in ihren Rezyklaten ihren Kunden gegenüber verwenden und an diese weitergeben. (Di-Link o. J.)

Das InterregNWE-Projekt Di-Plast beschäftigt sich mit der Entwicklung von digitalen Instrumenten für eine Stärkung des hochwertigen Rezyklateinsatzes u.a. durch Data Science-Ansätze. Aus und während der Produktion gewonnene Daten werden bspw. verwendet um in Echtzeit Anomalie-Entwicklung nachzuweisen und so frühzeitig Probleme im Produktionsprozess feststellen und beheben zu können. Gleichzeitig entsteht ein Instrument, welche für Matchingprozesse entwickelt wird und es den Unternehmen erlaubt, sichere Entscheidungen zur Auswahl von Rezyklaten zu treffen. In diesem Instrument werden die Anforderungen an einen Kunststoff bspw. auf Basis der Auswahl eines Primärkunststoffs verwendet, um automatisiert alternative Sekundärkunststoffe vorzuschlagen. (Di-Plast o. J.)

Andere Ansätze verfolgen Möglichkeiten zur sicheren digitalen Nachverfolgung von Kunststoffen u.a. mit dem Ziel bessere Sortenerkennung im Sortierprozess zu erreichen und damit die für ein hochwertiges Recycling notwendige Sortenreinheit hervorzubringen. Zu nennen ist hier u.a. das Projekt "Holy Grail". In diesem durch zahlreiche Unternehmen durchgeführten Projekt wurden chemische Tracertechnologien und digitale Wasserzeichen zur eindeutigen Erkennung von Kunststoffen im Sortierprozess entwickelt. Inzwischen wird diese Initiative im Rahmen von "Holy Grail 2.0" fortgesetzt (AIM o. J.). Auch das Projekt MaReK war auf die Zielsetzung der Entwicklung automatisiert detektierbarer Tracertechnologien ausgerichtet (HS Pforzheim o. J.).

#### 4.2 Reduktion von Such- und Transaktionskosten, Herstellen von Markttransparenz durch Online-Plattformen

Digitale Online-Marktplätze für Rezyklate können durch eine Übersicht über das Angebot verschiedener Recycler sowie durch Filter- und Sortierfunktionen bezüglich der Produktspezifikationen die Suche nach passenden Materialien erleichtern. Das vermindert den Aufwand für den Einkauf von passenden Rezyklaten. Es ist zu hoffen, dass auch der Preis für den Hersteller von Kunststoffprodukten geringer ausfällt da er Rezyklat mit für die Anwendung passender Qualität kaufen kann.

Handelsplattformen bieten die Möglichkeit, einige der genannten Hürden zu umgehen. Fehlendes Vertrauen der Kunststoffverarbeiter kann durch "user ratings" wie sie auf verschiedensten online

Plattformen üblich sind zumindest zum Teil aufgebaut werden. Der Käufer erhält einerseits Informationen darüber ob der Verkäufer in vorherigen Transaktionen qualitativ hochwertige Ware geliefert hat, bei Erhalt von Minderwertiger Ware erhält er die Möglichkeit, dies öffentlich zu machen. Das erhöht den Anreiz für den Verkäufer die Warenqualität so zu liefern, wie sie im Angebot beschrieben wurde. Such- und Transaktionskosten können durch Handelsplattformen gesenkt werden. Es ist anzunehmen, dass Ware mit genauer Beschreibung inklusive technischer Materialkennwerte und begleitender Analytik zur Qualitätssicherung über diese Handelsplattformen leichter verkauft werden kann und höhere Preise erzielen kann. Mit Hilfe digitaler Instrumente während des Recyclingprozesses erzeugte Daten können damit zu Informationen werden, die den Rezyklateinsatz und -verkauf besser ermöglichen.

Dies stößt einen positiven Kreislauf an, indem Händler dazu animiert werden, entsprechende Daten zu erheben und anzugeben. So wird es den Käufern wiederum ermöglicht, das angebotene Material schon im Voraus gut einschätzen zu können und es werden spätere zeit- und arbeitsintensive Anpassungen des Produktionsprozesses minimiert. Diese Maßnahmen können zusammengenommen die Barriere für den Einsatz von Rezyklaten deutlich senken. In anderen Handelsplattformen hat sich gezeigt, dass die einfache Vergleichbarkeit der Angebote untereinander durch gestiegene Markttransparenz auch die Preise für die angebotene Ware sinken lässt.

Zur Etablierung einer Handelsplattform ist es notwendig, einen Schwellenwert an Angeboten und Kaufinteressenten zu erreichen, sonst ist das Angebot zu klein um für Käufer interessant zu sein bzw. der Kreis der potentiellen Käufer ist zu klein, um den Aufwand für die Anbieter zu rechtfertigen. Zurzeit versuchen verschiedene Akteure eine entsprechende Handelsplattform zu etablieren. Bestehende Plattformen sind unter anderem cirplus, Plasticker, Plastship, und SAP-Plastics Cloud.

#### 4.3 Verbesserung von Sortierergebnissen durch Sensorik und Bilderkennung

Im Bereich der Abfallsortierung hat die Digitalisierung bzw. Automatisierungstechnik schon zu weitreichenden Verbesserungen und Optimierungen bezüglich Qualität und Durchsatz der Sortieranlagen beigetragen. Insbesondere die Near-Infrared (NIR) Sortierung bei hohen Bandgeschwindigkeiten ist hier zu nennen.

Eine Grundvoraussetzung für die Etablierung einer hochwertig funktionierenden Kreislaufwirtschaft ist, dass Rezyklate möglichst in vergleichbaren Anwendungen eingesetzt werden. Es soll also ein echter Kreislauf entstehen und Downcycling soweit wie möglich vermieden werden. Dafür muss eine möglichst sortenreine Trennung der Abfälle in der Sortierung erfolgen. Hierfür kommen verschiedene digitale Technologien zum Einsatz. Anschließend an "konventionelle" mechanische Trennverfahren wie z.B. Siebe oder Windsichter schließt sich eine digitale, sensorgestützte Sortierung an. Mithilfe von NIR-Sortierung kann bspw. zwischen verschiedenen Kunststofftypen unterschieden werden. Für die NIR Sortierung werden die Kunststoffabfälle vereinzelt auf ein Förderband aufgegeben, die Bandgeschwindigkeit liegt typischerweise im Bereich um 3 m/s. Auf dem Förderband werden die Abfälle dann von einer Infrarot-Lichtquelle beleuchtet und aus dem reflektierten Licht ein Absorptionsspektrum erhalten. Mithilfe dieses Spektrums können verschiedene Kunststoffsorten und auch Unterarten unterschieden werden. Die Auswertung erfolgt dabei durch einen Computer der für jedes Abfallobjekt eine Klassifizierung vornimmt. Über Druckluftdüsen wird dann der Abfallstrom in verschiedene Fraktionen getrennt. Für diese Aufgabe ist eine enorm schnelle Verarbeitung der großen Menge an durch die Sensoren erfassten Daten notwendig.

Digitale Lösungsansätze - Einsatz digitaler Technologien in Kunststoffkreisläufen: Recycling ermöglichen und skalieren

Eine weitere Anwendung digitaler Technik bei der Sortierung von Kunststoffabfällen ist die Verwendung von Bilderkennung bzw. -klassifizierung durch künstliche Intelligenz. So können z.B. Silikonkartuschen mit einer Negativsortierung ausgetragen werden oder das Handklauben wird durch Pick-and-Place Roboter unterstützt.

Zu weiteren in der Entwicklung befindlichen Technologien siehe auch "Behebung von Informationsdefiziten durch Datenerzeugung, -analyse und -transfer sowie Tracing- und Trackingverfahren".

#### 4.4 Digitale Produkt- und Materialpässe

Digitale Produkt- bzw. Materialpässe (Im Folgenden vereinfacht digitaler Produktpass bzw. DPP) dienen der Daten- bzw. Informationssammlung und -weitergabe über den Lebenszyklus eines Produkts bzw. Materials hinweg. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit definiert den digitalen Produktpass wie folgt: "Der digitale Produktpass ist ein Datensatz, der die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen oder auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst. Die Daten stammen aus allen Phasen des Produktlebenszyklus und können in all diesen Phasen für verschiedene Zwecke genutzt werden (Design, Herstellung, Nutzung, Entsorgung).

Die Strukturierung umweltrelevanter Daten in einem standardisierten, vergleichbaren Format ermöglicht allen Akteuren in der Wertschöpfungs- und Lieferkette, gemeinsam auf eine Kreislaufwirtschaft hinarbeiten. Der digitale Produktpass ist zugleich eine wichtige Grundlage für verlässliche Konsumentinformation und nachhaltige Konsumententscheidungen im stationären wie auch im Online-Handel." (BMU o. J.) Illustriert wird der Produktpass in der folgenden Abbildung 2:

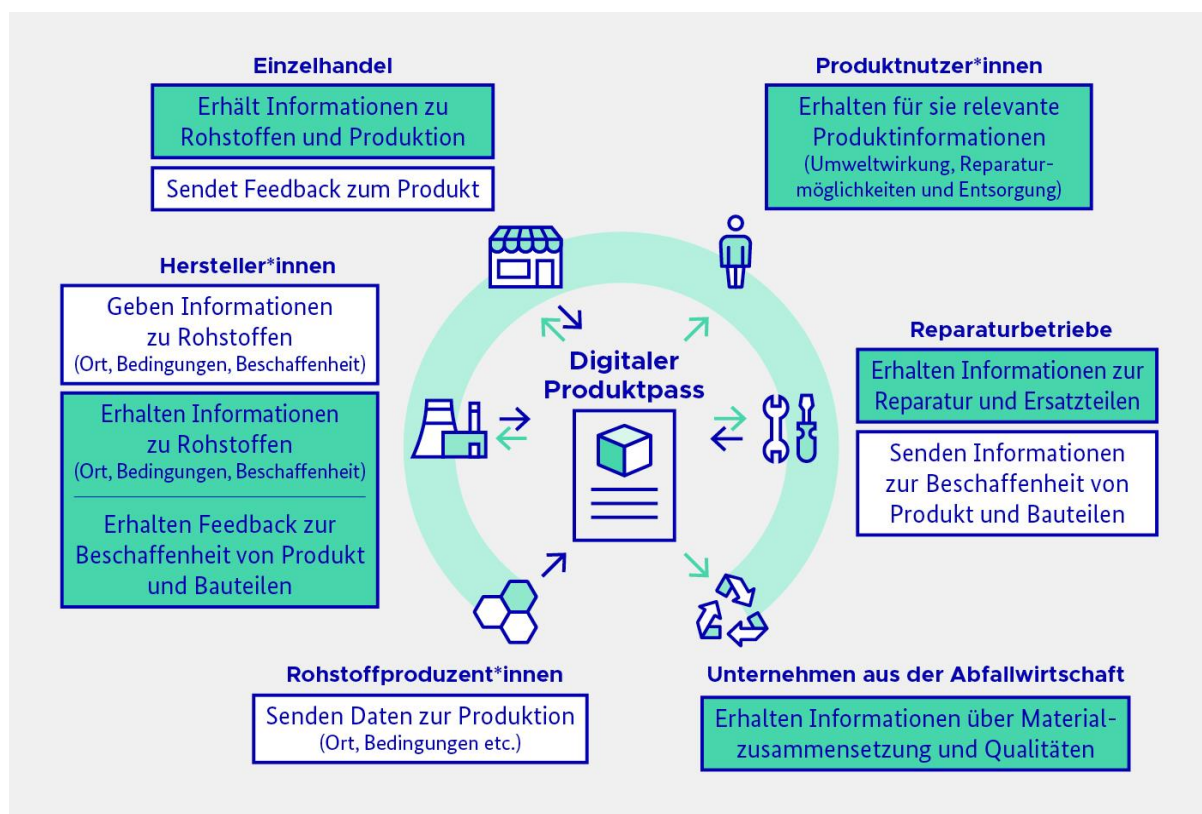


Abbildung 2: Darstellung der mit Hilfe des DPP genutzten und zur Verfügung gestellten Informationen für verschiedene Akteure in der Kreislaufwirtschaft (BMU o. J.).



## Digitale Lösungsansätze - Einsatz digitaler Technologien in Kunststoffkreisläufen: Recycling ermöglichen und skalieren

---

Abbildung 2 zeigt zugleich den umfassenden Anspruch des Konzepts als auch seine Komplexität. Das Ziel, des mehr oder weniger lückenlosen Nachverfolgens und Dokumentierens ist auf eine erhebliche digitale Leistungsfähigkeit des dahinter befindlichen Systems angewiesen. Nur dann kann es gelingen Produzenten, Reparaturbetriebe und Unternehmen aus der Abfallwirtschaft über Zusammensetzungen, Verschleiß, Reparaturen und Veränderungen zu informieren und den Endkonsumenten Hinweise zur Nachhaltigkeit und zum nachhaltigen Umgang mit Produkten und Materialien zu geben. Der Produktpass ist hier eng mit der Entwicklung der Industrie 4.0 und Konzepten wie dem Referenzarchitekturmodell (RAMI 4.0) verbunden. Dieser Umstand hebt die Realität und Herausforderung der sogenannten “Twin Transition” des gleichzeitigen Übergangs in eine digitale und nachhaltigere Wirtschaft hervor (European Commission 2021).

Gefordert werden DPP zurzeit in allen relevanten EU Strategien. Darunter befinden sich der European Green Deal, der New Circular Economy Action Plan und ein dazu gehöriger Beschluss des europäischen Parlaments (European Commission 2020a; European Commission 2019; European Parliament 2021). Eine erste verpflichtende Einführung eines derartigen Passes auf EU-Ebene ist im Bereich der Batterien geplant. Für Batterien mit einer Speicherkapazität von über 2 kWh soll gemäß des Entwurfs für die “Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries” ab 2026 ein DPP verpflichtend werden (European Commission 2020b).

Für den Bereich des Kunststoffrecyclings stellt der DPP eine Zusammenfassung und Erweiterung einiger der bereits aufgeführten digitalen Ansätze dar. So soll er Tracing und Tracking ermöglichen, ist aber gleichzeitig auf die entsprechenden Technologien angewiesen. Ebenso kann er in den Märkten und digitalen Plattformen der besseren Vermarktung und einem effizienteren Einsatz dienen. Dem Endkonsumenten können Hinweise zur Verlängerung der Lebensdauer und zur richtigen Entsorgung gegeben werden. Im Recyclingprozess selbst können geeignetere Entscheidungen zur Sortierung und weiteren Verwendung getroffen werden.

Der DPP besteht allerdings noch auf einer konzeptionellen Ebene. Seine Umsetzung verlangt neben der Entwicklung eines geeigneten digitalen Systems auch der weiteren Konzeptionierung von Gesichtspunkten wie sicheren Datentransfers und sicherer Datenspeicherung sowie der Festlegung von Informationspflichten. In welcher Form Produkt- bzw. Materialpässe tatsächlich realisiert werden ist daher eine noch offene Fragestellung.

### 4.5 Verbesserung des allgemeinen Wissensstandes zu Nutzung und Einsatz von Kunststoffrezyklaten

Einige der oben genannten Hürden können mit dem notwendigen Fachwissen umgangen werden. Die Vermittlung dieses Wissens kann über digitale Kanäle einfach und günstig erfolgen. Durch die Möglichkeit, digitale Inhalte ohne große Mehrkosten zu vervielfältigen kann eine Große Zielgruppe erreicht werden. So kann z.B. das notwendige Wissen für Design-for-Recycling oder zu Grundlagenthemen deren Verständnis beim Rezyklateinsatz notwendig ist, digital und frei zur Verfügung gestellt werden.

Zurzeit werden Material- und Matchingdatenbanken aufgebaut und entwickelt, die Unternehmen bei der Auswahl geeigneter Rezyklate unterstützen sollen. Ausgehend von der Beobachtung, dass viele Kunststoffverarbeiter unsicher sind, welche Regranulate als Substitute für Primärkunststoffe sicher verwendet werden können, erlauben diese Datenbanken eine Auswahl in Frage kommender Rezyklate.

Digitale Lösungsansätze - Einsatz digitaler Technologien in Kunststoffkreisläufen: Recycling ermöglichen und skalieren

---

Basis hierfür kann die Eingabe von Spezifikationen des bisher genutzten Primärmaterials sein. Das InterregNWE-Projekt Di-Plast entwickelt zurzeit unter dem Label "Matrix Tool" eine solche Funktionalität. Derartige Instrumente können zusätzlich eine Stärkung der Rezyklatmärkte erlauben, da sie die Kunststoffhersteller über eine Bandbreite anwendbarer Rezyklate informieren können und so die Abhängigkeit von einem spezifischen Recycler reduzieren können. (Di-Plast o. J.)

#### 4.6 Entwicklung geeigneter Design-for-Recyclingansätze

Insbesondere im Bereich des Design-for-Recycling bietet es sich an das notwendige Wissen dazu als in digitaler Form leicht, ansprechend aufzubereiten und leicht Verfügbar zu machen. Damit sinkt die Hürde zur Umsetzung dieser Maßnahmen im Produktdesign. Für den Fall von PET-Flaschen wird ein entsprechender Ansatz bereits von der "European PET-Bottle Plattform" verfolgt (EPBP o. J.).

## 5 Implikationen

Wie gezeigt können digitale Ansätze die Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe massiv voranbringen. Die hier gezeigten Instrumente können unter anderem dazu dienen, Prozesse zu verbessern, Informationsdefizite zu beheben, Transaktionskosten zu senken und Märkte zu stabilisieren. Im Folgenden sollen Empfehlungen zur weiteren Intensivierung und Förderung von Recycling gegeben werden. Wie im gesamten Text beschränken wir uns dabei auf das werkstoffliche Recycling. Die gegebenen Empfehlungen adressieren politische Entscheidungsträger, Unternehmen und die Forschung.

Allgemein sie zuvor bemerkt, dass diese Kurzstudie zwar den Bereich des Recyclings fokussiert hat, die Kunststoffkreislaufwirtschaft jedoch nicht auf diesen beschränkt ist. Auch Fragen der Abfallvermeidung, Ressourceneffizienz in der Produktion, des Refurbishment usw. können durch digitale Instrumente unterstützt werden und sollten berücksichtigt werden, da diese Felder häufig einen mindestens ebenso hohen Impact aufweisen können, wie das Kunststoffrecycling.

### 5.1 Implikationen zu einer Digitalpolitik für die Kunststoffkreislaufwirtschaft

Für die Politik bestehen verschiedene Mechanismen mit denen sie ein hochwertiges, umfassendes Recycling durch digitale Technologien unterstützen kann. Hervorzuheben bleibt an dieser Stelle die von der EU als “Twin Transition” bzw. Twin Challenge” formulierte Herausforderung der Gleichzeitigkeit der Digitalen Transformation mit der Transformation zu nachhaltigen, kreislaufgestützten Industrien. Tatsächlich muss es gelingen, die Wirtschaft als Ganzes und die Unternehmen im Besonderen zu einer Teilnahme an den digitalisierten Märkten zu befähigen und dabei den Aufbau eines nachhaltigen Industriesystems zu bewirken. Die Twin Transition muss daher als ein konsistenter, integrierter Prozess betrachtet werden an dessen Ende eine digital ermöglichte Kreislaufwirtschaft steht.

### 5.2 Recycling durch die Unterstützung digitaler Ansätze ermöglichen

Die Einführung von Material- bzw. Produktpässen kann zum “Game Changer” in der Kunststoffkreislaufwirtschaft werden, wenn diese es ermöglicht lückenlosen Aufschluss über die Zusammensetzung und Verwendung von Kunststoffen zu geben. Informationsdefizite ließen sich damit deutlich reduzieren und Transaktionskosten senken. Gleichzeitig können diese Pässe als Grundlage für viele weitere Schritte und Maßnahmen bspw. in der Konsument\*inneninformation, der CO<sub>2</sub>-Bepreisung und dem Schadstoffnachweis dienen. Allerdings ist ihre Umsetzung, wenn auch in zahlreichen EU-Dokumenten bereits gefordert, durchaus voraussetzungsreich (siehe oben) und bedarf daher einer umfangreichen Vorbereitung. Dazu gehört es auch, die Begrenzungen dieses Ansatzes aufzuzeigen. Gleichzeitig sollten in diesem Zusammenhang die technologischen Möglichkeiten der Nachverfolgung auf Produkt- und Materialebene geprüft und politisch unterstützt werden

Der Einsatz von toxikologisch bedenklichen Stoffen in Kunststoffprodukten mit langer Nutzungsdauer kann die Qualität des Rezyklatkunststoffes in ferner Zukunft beeinflussen. Werden solche Stoffe heutzutage verwendet und erst nach Jahren oder Jahrzehnten wieder recycelt, besteht ein Problem, wenn die Verwendung dieser Stoffe bis dahin verboten oder eingeschränkt wurde. Hier kann als digitale Lösung der digitale Material- oder Produktpass Abhilfe schaffen. Wenn dort auch die verwendeten Additive registriert sind, können die betreffenden Güter dem mechanischen Recycling entzogen werden und der Verbrennung oder, falls verfügbar, einem anderweitigen physikalischen oder chemischen

## Implikationen

---

Recyclingverfahren zugeführt werden. Der nicht unerhebliche Aufwand für den Einsatz eines solchen digitalen Passes bewirkt allerdings, dass dessen Einsatz nur einen Teil der betroffenen Produkte erfassen wird (s.o.). Auch ist die Lösung auf Ebene des Materials anspruchsvoller, da Material in der Regel in eine große Zahl unterschiedlicher Anwendungen gelangen kann und hierzu behandelt wird, was eine Nachverfolgung auf dieser Ebene erschwert. Deswegen sollten Übergangsfristen von Verboten solcher toxikologisch bedenklichen Substanzen kurz gehalten werden, die neuen Grenzwerte sollten sinnvoll gestaltet werden.

Um Recycling zu ermöglichen, müssen zudem die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen und bestehende regulatorische Hürden abgebaut werden. Auf das für die Herstellung von Neuwere-Kunststoffen (Primärmaterial) verwendete Erdöl muss derzeit kein CO<sub>2</sub>-Preis gezahlt werden. So kann sich der ökologische Vorteil beim Einsatz von Rezyklat nicht im Preis niederschlagen. Die CO<sub>2</sub>-Abgabe sollte wie auch vom VDMA und anderen Verbänden gefordert, auch für diese Primärmaterialien angewendet werden (VDMA 2021). Die digitalen Grundlagen für diese Lösung sind mit dem European Union Emissions Trading System (EU ETS) bereits vorhanden, auch wenn das System selber sowie dessen IT-Sicherheit immer wieder in der Kritik stand. Ein Anschluss an dieses System sollte geprüft und falls möglich umgesetzt werden. Zur Vermeidung von Marktverzerrungen ist ein EU-weiter Ansatz notwendig, auch müssen importierte Kunststoffe einen entsprechenden Aufpreis enthalten. Andernfalls sollte ein alternatives digitales System zur Internalisierung der Umweltkosten entwickelt werden und durch entsprechende Regulierungen eingeführt werden. Insbesondere können die Einnahmen aus der Abgabe dafür genutzt werden, die digitale Infrastruktur für das Kunststoffrecycling auf- und auszubauen.

Design-for-Recycling sollte über die gesamte Kunststoff-Produktpalette, wie im Bereich der Dualen-Systeme schon geschehen vom “nice-to-have” zum “must-have” werden. Als digitale Lösung ist hier eine Wissensdatenbank denkbar, die das verfügbare Wissen zielgruppengerecht aufbereitet frei zur Verfügung stellt. Zusätzlich können best-practice Beispiel, bewährte Techniken, erfolgreich umgesetzte Projekte mit positiver Gesamtbilanz für den Hersteller und Austauschmöglichkeiten für die Industrie gesammelt werden. So wird die “Angst” vor einem Einstieg in das Thema genommen, Hersteller werden zum Nachahmen motiviert und vor allem wird der Aufwand für das Design der Produkte verringert. Die Einrichtung sowie der Betrieb einer entsprechenden Plattform kann von politischer Seite initiiert und finanziert werden.

Durch die Erforschung neuer technologischer Ansätze zur Verbesserung des Recyclings können weitere Möglichkeiten zur hochwertigen Nutzung von Kunststoff-Rezyklaten erschlossen werden. Dies erfolgt auch durch die Anwendung digitaler Technologien für den Kunststoffbereich. Hier sollte von Seiten der Politik zum einen die entsprechenden Schwerpunkte in der Forschungsförderung gesetzt werden, zum anderen sollte eine Vernetzung der Kunststoff- und Kreislaufwirtschaftsforschung mit Akteuren aus dem Bereich der industriellen Digitalisierung gefördert werden, um gemeinsame Entwicklungen anzustoßen. Für die aus der Forschung hervorgehenden Entwicklungen sollten in der initialen Phase eine finanzielle Förderung vorgehalten werden. So kann eine schnelle Etablierung der Technologie am Markt und letztendlich eine hohe Marktdurchdringung erreicht werden.

Um Recycling zu fördern, sollte weiterhin von staatlicher Seite eine Rezyklateinsatzquote festgelegt werden bzw. deren Einführung auf europäischer Ebene gefordert und durchgesetzt werden. Die Erfüllung der Auflagen kann im Rahmen der Produktpässe nachverfolgt werden. So kann eine ausreichende Nachfrage geschaffen werden um funktionierende Märkte hervorzubringen. Gleichzeitig werden

## Implikationen

---

damit die nötigen Prozesse und Investitionen auf Seiten der Kunststoffhersteller angestoßen. Branchenverbände aus verschiedensten Industriekreisen sowie Umweltorganisation befürworten die Einführung einer solchen Quote. Diese muss auf europäischer Ebene umgesetzt werden um Marktverzerrungen zu vermeiden. Die EU ist mit Überlegungen hierzu bereits befasst. Die Umsetzung einer solchen Quote wird auch digitale Technologien verwenden und z.B. über ein entsprechendes digitales Handelssystem umgesetzt werden.

Ein weiterer durch die staatliche Seite zu gestaltender Bereich betrifft Infrastrukturen und Standardisierungen. Die beschriebenen digitalen Ansätze sind bspw. vielfach auf die Existenz geeigneter Kommunikationsnetze angewiesen. Die Bereitstellung dieser Infrastrukturen sollte durch die Politik mit Priorität vorangetrieben werden. Ihre Notwendigkeit erstreckt sich letztlich auf alle Bereiche der Twin Transition. Ferner bilden verbindliche Standards im Material- und auch im Technologiebereich eine unabdingbare Voraussetzung. So wird zur Zeit die DIN SPEC 91446 - "Standards für den (internetbasierten) Handel mit und Verarbeitung von Kunststoffabfällen und Rezyklaten" erarbeitet. Derzeit stellen fehlende bzw. inkompatible Schnittstellen und mangelnde Dateninteroperabilität ein bedeutendes Hindernis in der Herstellung von mehr Transparenz dar. Die Festlegung von Standards in diesem Bereich bzw. das Gebot offener Schnittstellen und die Verpflichtung zur Interoperabilität erscheint vor diesem Hintergrund besonders wichtig. Hier sind kartellrechtliche Gesichtspunkte zu beachten. Kreislaufwirtschaft verlangt naturgemäß eine stärkere Kooperation zwischen Unternehmen und eben auch gemeinsame Ansätze zur Standardisierung. Die Einräumung dieser Möglichkeit unter Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfreiheit könnte eine Herausforderung darstellen.

Ein genereller Gesichtspunkt zunehmender Digitalisierung ist das Entstehen deutlicher Abstände in der Digitalisierung zwischen Unternehmen innerhalb derselben Branche. Dies liegt an vielen Gründen wie mangelnden Kenntnissen und Wissen, mangelnden Investitionsmitteln aber auch organisationaler Trägheit; vor allem kleine und mittlere Unternehmen sind hiervon betroffen. Ein Investitions- und Unterstützungsprogramm zur Umsetzung der digital ermöglichten Kunststoffkreislaufwirtschaft kann hier von besonderer Wichtigkeit sein und bspw. in den Rahmen künftiger Klimaschutzpolitik eingebettet werden.

### 5.3 Implikationen für Unternehmen

Wie dargestellt, bekommt Kunststoffrecycling auch auf Unternehmensebene zunehmende Bedeutung. Ein verstärktes Bewusstsein der Unternehmen für Nachhaltigkeit, Materialknappheit, schwankende Preise, geopolitische Unsicherheit, öffentlichen Druck, Regulierung und weitere Aspekte treiben diesen Trend. Digitalisierung kann wesentlich zum Gelingen dieses Hochskalierens von Kunststoffrecycling beitragen. Die Nutzung digitaler Technologien kann Unternehmen daher entscheidend auf diesem Wege weiterbringen.

Eine wichtige Perspektive hierfür ist eine Supply Chain-weite Sichtweise auf die Digitalisierung auf Unternehmensebene, welche Digitalisierung und Recycling beinhaltet. Die digitale Bereitstellung und Weitergabe von Informationen ist hier der wichtigste Faktor, um Recycling zu ermöglichen. Entsprechen müssen Unternehmen auf die Möglichkeit des medienbruchfreien Datentransfers durch geeignete Schnittstellen im Unternehmen und auch zu Zulieferern und Kunden achten. Hier kann eine stärkere Kooperation über Unternehmensgrenzen hinweg hilfreich sein, um gemeinsame Grundlagen zu schaffen. Kartellrechtliche Aspekte sind allerdings zu beachten und könnten dem im Wege stehen (s.o.).

## Implikationen

---

Unternehmen sollten daher auch Möglichkeiten zur Stärkung ihrer Kreislaufwirtschaftsfähigkeit in ihre digitalisierungsbezogenen Investitionspläne einbeziehen. Insbesondere vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen und zunehmenden Drucks zu mehr Rezyklateinsatz kann dies zusätzliche Chancen schaffen, aber auch das Risiko nachträglicher, oftmals teurer Zusatzinvestitionen senken. Entsprechende Business Cases sind vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen zu prüfen.

Ähnliches gilt für den Einsatz digitaler Technologien und die Nutzung digitaler Services. Da nicht von "one-size-fits-all-Lösungen" auszugehen ist, muss jeweils geprüft werden, welche Technologie welchen Nutzen bringt und wie sie in die digitale Architektur des Unternehmens und der Branche bzw. Teilbranche passt. Nutzen und Relevanz sind daher im Vorfeld kritisch zu hinterfragen und ein dynamischer, anpassungsfähiger Ansatz ist notwendig. Der Aspekt der Twin Transition verweist hier darauf, dass Unternehmen in zweierlei Hinsicht den Anschluss nicht verlieren dürfen: Im Hinblick auf digitale Technologien und - nun in direktem Zusammenhang - auch im Hinblick auf die Etablierung nachhaltiger Praktiken wie dem Recycling.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Steigerung des werkstofflichen Kunststoffrecyclings ein zentraler und drängender Aspekt in der Kreislaufwirtschaft ist. Nicht nur aufgrund der Umweltbelastung durch Littering und Ocean Plastic, sondern weil hier auch ein substantieller Beitrag zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Erhöhung der Ressourceneffektivität möglich ist. Kunststoffe können in vielen Anwendungen anderen Materialien aus ökologischer Sicht überlegen sein, insbesondere, wenn Recycling umgesetzt wird und ein konsequenter Einsatz von Rezyklaten verfolgt wird. Die Komplexität dieser Werkstoffe sorgt jedoch für hohe Ansprüche an alle Prozesse, die mit dem Kunststoffrecycling verbunden sind, beginnend mit geeignetem Design. Diese Herausforderungen können, wie in dieser Kurzstudie gezeigt, mit Hilfe digitaler Instrumente behoben oder erleichtert werden. Sie stellen einen der zentralen Schlüssel zur Ermöglichung und Skalierung des Kunststoffrecyclings dar. Ihre Weiterentwicklung und Einsatz muss durch Politik, Forschung und Unternehmen gestützt werden, um zeitnahe Erfolge zu ermöglichen.

## Literaturverzeichnis

- AIM (o. J.): Pioneering Digital Watermarks. <https://www.aim.be/priorities/digital-watermarks/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- ALBA (2011): Recycling für den Klimaschutz. [https://nekar-alb.alba.info/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Neckar-Alb\\_Recycling\\_fu\\_\\_r\\_den\\_Klimaschutz.pdf](https://nekar-alb.alba.info/fileadmin/_migrated/content_uploads/Neckar-Alb_Recycling_fu__r_den_Klimaschutz.pdf).
- AVGU (2020): Gesetzliche Mindestquoten für Rezyklate in Kunststoffverpackungen? [https://www.google.com/url?q=https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2020/06/Diskussionspapier\\_AGVU\\_IK\\_-Mindesteinsatzquoten-f%25C3%25BCr-Kunststoff-Rezyklate-FINAL.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590233000&usg=AOvVaw3sUYk5t1gE\\_ZVW99uYp5oZ](https://www.google.com/url?q=https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/wp-content/uploads/2020/06/Diskussionspapier_AGVU_IK_-Mindesteinsatzquoten-f%25C3%25BCr-Kunststoff-Rezyklate-FINAL.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590233000&usg=AOvVaw3sUYk5t1gE_ZVW99uYp5oZ).
- Bastian, Martin; Eckert, Daniela; Bendix, Phillip (2020): Kein Kreislauf von Kunststoffen ohne Digitalisierung. <https://www.k-zeitung.de/kein-kreislauf-von-kunststoffen-ohne-digitalisierung/>.
- Berg (2020): Stärkung des Kunststoffrecyclings – Lessons learned aus Recherche und Unternehmensbefragung. [https://www.google.com/url?q=https://www.di-link.de/app/download/12198527960/DiLink\\_Policy%2BBrief\\_1.pdf?t%3D1590494375&sa=D&source=editors&ust=1621495590241000&usg=AOvVaw2TD0fnFaW-ecKnzIKEGGAb](https://www.google.com/url?q=https://www.di-link.de/app/download/12198527960/DiLink_Policy%2BBrief_1.pdf?t%3D1590494375&sa=D&source=editors&ust=1621495590241000&usg=AOvVaw2TD0fnFaW-ecKnzIKEGGAb).
- BMU (o. J.): Ein Pass für den gesamten Produktkreislauf. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit <https://www.bmu.de/digitalagenda/so-funktioniert/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021)a).
- BMU (o. J.): Umweltpolitische Digitalagenda: Digitaler Produktpass. [bmu.de https://www.bmu.de/FQ143](https://www.bmu.de/FQ143) (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021)b).
- CIEL (2019): Plastic and climate - the hidden cost of a plastic planet. [www.ciel.org](http://www.ciel.org).
- Circular Print (o. J.): Gelöste Problemstellungen. <https://www.circular-print.eu/cms/index.php/de/circular-print/troubleshooting>.
- Conversio Market & Strategy (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019.
- Cyclos-htp (2019): Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. [https://www.google.com/url?q=https://sc10d7d3c6be8f168.jimcontent.com/download/version/1606834951/module/7233341859/name/Anforderungs-%2520und%2520Bewertungskatalog%2520Version%25204.0.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590226000&usg=AOvVaw0DXJ3EyUr8sXOyo9R\\_rui1](https://www.google.com/url?q=https://sc10d7d3c6be8f168.jimcontent.com/download/version/1606834951/module/7233341859/name/Anforderungs-%2520und%2520Bewertungskatalog%2520Version%25204.0.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590226000&usg=AOvVaw0DXJ3EyUr8sXOyo9R_rui1).
- Di-Link (o. J.): Di-Link Homepage. <https://www.di-link.de/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- Di-Plast (o. J.): Digital Circular Economy for the Plastics Industry - Homepage. <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/di-plast-digital-circular-economy-for-the-plastics-industry/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- EPBP (o. J.): European PET Bottle Platform - Design Guidelines. <https://www.epbp.org/design-guidelines> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- European Commission (2020a): A new Circular Economy Action Plan - For a cleaner and more competitive Europe. European Commission, Brussels.

- European Commission (2020b): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020. Brussels.
- European Commission (2019): The European Green Deal. European Commission, Brussels.
- European Commission (2021): Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a stronger Single Market for Europe's recovery. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-industrial-strategy-update-2020\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-industrial-strategy-update-2020_en.pdf).
- European Parliament (2021): European Parliament resolution of 10 February 2021 on the New Circular Economy Action Plan (2020/2077(INI)). [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0040\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0040_EN.html) (Zuletzt abgerufen am 19.03.2021).
- Expertengespräch (2021): Expertengespräch zu Barrieren beim Kunststoffrecycling.
- Garcia, Jeannette M.; Robertson, Megan L. (2017): The future of plastics recycling. *Science* 358(6365), 870–872. <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aaq0324> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- Hausfather (2019): Analysis: Global fossil-fuel emissions up 0.6% in 2019 due to China. *Carbon Brief* <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-fossil-fuel-emissions-up-zero-point-six-percent-in-2019-due-to-china> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- Heinrich-Böll-Stiftung (2019): Plastikatlas: Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. <https://www.boell.de/de/2019/05/14/plastikatlas> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- HS Pforzheim (o. J.): MaReK - Entwicklung eines Markerbasierten Sortier- und Recyclingsystems für Kunststoffverpackungen. <https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec/projekte/marek/>.
- Lindner, Christoph; Hoffmann, Oliver (2015): Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. <https://docplayer.org/24614382-Endbericht-analyse-beschreibung-der-derzeitigen-situation-der-stofflichen-und-energetischen-verwertung-von-kunststoffabfaellen-in-deutschland.html>.
- Meyer-Dulheuer, Tim; Pasch, Harald; Geissler, Margit (2000): Direct analysis of additives in polymeric materials by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=790698>.
- Plasteverarbeiter (2019): Hochwertiges Rezyklat aus dem Gelben Sack – geht das. <https://www.plastverarbeiter.de/88432/hochwertiges-rezyklat-aus-dem-gelben-sack-geht-das/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- PlasticsEurope (o. J.): Abfallsammlung, Vorbehandlung und Sortierung. <https://www.plasticseurope.org/de/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/waste-collection-pre-treatment-and-sorting> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).
- Runkel, Matthias; Mahler, Alexander (2017): Steuerliche Subventionierung von Kunststoffen. [https://www.google.com/url?q=https://foes.de/pdf/2017-01-FOES-Studie-Stoffliche-Nutzung-Rohbenzin.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590234000&usg=AOvVaw03PnRmZ9W2MizVt68F0\\_bQ](https://www.google.com/url?q=https://foes.de/pdf/2017-01-FOES-Studie-Stoffliche-Nutzung-Rohbenzin.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590234000&usg=AOvVaw03PnRmZ9W2MizVt68F0_bQ).



## Literaturverzeichnis

---

Schüler (2019): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2017. [https://www.google.com/url?q=https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/2019\\_11\\_19\\_aufkommen\\_u\\_verwertung\\_verpackungsabfaelle\\_2017\\_final.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590256000&usg=AOvVaw0a-x8hVmOacQKOMyUyIR2h](https://www.google.com/url?q=https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/2019_11_19_aufkommen_u_verwertung_verpackungsabfaelle_2017_final.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590256000&usg=AOvVaw0a-x8hVmOacQKOMyUyIR2h).

Statista (2021): Kunststoffproduktion weltweit und in Europa bis 2018. Statista <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).

UBA (2016): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. [https://www.google.com/url?q=https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601\\_uba\\_pos\\_kunststoffrecycling\\_dt\\_bf.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590220000&usg=AOvVaw1LdBJMLRbyG5Fjrf7CT0pV](https://www.google.com/url?q=https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601_uba_pos_kunststoffrecycling_dt_bf.pdf&sa=D&source=editors&ust=1621495590220000&usg=AOvVaw1LdBJMLRbyG5Fjrf7CT0pV).

VDMA (2021): Kreisläufe neu denken: Wie die Lücke bei Kunststoffen geschlossen werden kann. <https://art.vdma.org:443/viewer/-/v2article/render/63436141> (Zuletzt abgerufen am 20.05.2021).

Vogel, Julia; Krüger, Franziska; Fabian, Matthias (2020): Chemisches Recycling - UBA Hintergrund. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17\\_hgp\\_chemisches-recycling\\_online.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf).

Worzewski, Tamara (2020): Plastikmüll: Zurück in den Kreislauf. <https://www.spektrum.de/news/loest-chemisches-recycling-das-plastikproblem/1777014> (Zuletzt abgerufen am 8.06.2021).