

Kunststoffe und deren Verwertung – einige Aspekte



VDI-Statusreport
Juni 2020

Geleitwort des VDI-Strategiekreises Kunststofftechnik

Die zunehmende Verbreitung von Kunststoffabfällen und Mikroplastik in der terrestrischen und aquatischen Umwelt ist zu einer globalen Herausforderung geworden und erfordert umgehendes Handeln der industrialisierten Welt. Dieser Verantwortung hat sich der VDI-Strategiekreis Kunststofftechnik gestellt und vor etwa eineinhalb Jahren das Projekt „Marine Litter“ im VDI gestartet, das auch den Anstoß für das aktuelle VDI-Fokusthema „Zirkuläre Wertschöpfung“ im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft gegeben hat.

Neben der Auseinandersetzung mit der besorgniserregenden Umweltbelastung müssen vor allem auch die volkswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Probleme erkannt und angegangen werden, die aus der

ungeordneten Verteilung wertvoller Rohstoffe in der Umwelt resultieren, denn dadurch werden der produzierenden Wirtschaft Millionen Tonnen wertvoller Sekundärrohstoffe entzogen. Ein Prozess, der nur durch eine geänderte Philosophie zum Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen in einer Kreislaufwirtschaft gestoppt werden kann.

Der VDI-Strategiekreis Kunststofftechnik sieht in diesem VDI-Statusreport ein hervorragendes Werkzeug für die interessierte Fachwelt, aber auch den interessierten Laien, um in die sehr komplexe Themenwelt einzusteigen und auf entsprechendes Zahlenmaterial zu Marine Litter und zur Kreislaufwirtschaft zugreifen zu können.

Düsseldorf, im Juni 2020

VDI-Strategiekreis Kunststofftechnik

Vorwort

Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, obwohl als Themen nicht neu, sind zu globalen Arbeitsgebieten überragender Bedeutung geworden. Die Flut von Aktivitäten und Veröffentlichungen aus Industrie, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft ist kaum noch zu überblicken und wächst täglich an. Dieser Statusreport hat das Ziel, unser Wissen und unsere langjährigen Erfahrungen auf diesen Gebieten mit dem Fokus

auf der Kunststoffindustrie in komprimierter Form weiterzugeben. Wir sind uns bewusst, dass jede Komprimierung notwendigerweise auch Verkürzen und Weglassen bedeutet. Wir hoffen aber, die wesentlichen Themen genannt und beschrieben zu haben, um damit der interessierten Leserschaft einen Überblick und einen schnellen Einstieg in das komplexe Themenfeld zu ermöglichen.

Köln, im Oktober 2019

Peter Orth und Manfred Rink

Autoren

Dr. Peter Orth, OPC – Orth Plastics Consulting

Dipl.-Ing. Manfred Rink – Senior Consultant

In Kooperation mit den Mitgliedern des VDI-Strategiekreises Kunststofftechnik

Dipl.-Ing. Wolfram Beyerlein VDI, Direktor a. D. Siemens AG, München

Dipl.-Ing. Michael Bode VDI, Bode Verwaltungs GmbH, Hamburg

Hans-Volker Buchholz, Geschäftsführung Toyoda Gosei Meteor GmbH, Bockenem

Dr.-Ing. Erwin Bürkle VDI, Consultant, Benediktbeuern

Dr. Eberhard Duffner, Bereichsleiter ARBURG GmbH + Co KG, Lossburg

Achim P. Eggert PhD VDI, VDI-Gesellschaft Materials Engineering, Düsseldorf

Dipl.-Ing. Siegfried Elbracht VDI, Vorstand a. D. Dynamit Nobel AG, Weißenburg

Dr.-Ing. Klaus Esser VDI, Direktor a. D. Kautex Textron GmbH & Co KG, Bonn

Dr.-Ing. Werner Feistkorn, CEO Dr. Feistkorn AG, Grünstadt

Sandra Füllsack, CEO motan holding gmbh, Konstanz

Dipl.-Ing. Kurt Gebert, CEO Allod Werkstoff GmbH & Co. KG, Burgbernheim

Prof. Dr.-Ing. Hans-Günther Haldenwanger VDI, Bereichsleiter a. D. AUDI AG, Ingolstadt

Dr.-Ing. Peter Heidemeyer VDI, CEO C4PP Consulting for Polymer Processing, Kitzingen

Dipl.-Ing. Günter Hofmann VDI, Geschäftsführer Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH, Lichtenfels

Dipl.-Ing. Rainer Holzmann VDI, Vorstand a. D. Kautex Werke GmbH, Bonn

Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann VDI, Leiter Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen

Dr.-Ing. Willy Bert Hoven-Nievelstein VDI, Group Vice President a. D. BASF AG, Ludwigshafen

Prof. Ansgar Jaeger VDI, Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, Würzburg

Dr.-Ing. Jürgen Jahn VDI, Bereichsleiter a. D. Miele & Cie KG, Warendorf

Dipl.-Ing. Albert Krämer VDI, Bereichsleiter a. D. BASF AG, Ludwigshafen

Dipl.-Ing. Walter Kurtz VDI, Geschäftsführer Kurtz Holding GmbH, Hasloch

Dipl.-Ing. Ullrich Mast, Geschäftsführer Mast Kunststoffe GmbH & Co. KG, Bad Waldsee

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli, ehem. Leiter Institut für Kunststoffverarbeitung, Aachen

Dr. Peter Orth, OPC Orth Plastics Consulting, Köln

Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Predöhl VDI, CEO a. D. Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH, Hamburg

Dipl.-Ing. Torsten Ratzmann VDI, Geschäftsführung egeplast international GmbH, Greven

Dipl.-Ing. Arno Schneiders VDI, Abteilungsleiter a. D. BASF AG, Ludwigshafen

Dipl.-Ing. Frank Schüller VDI, Geschäftsführer Mauser Maschinentechnik GmbH, Brühl

Prof. Dr. Rudolf Stauber VDI, Leiter Fraunhofer-Institut für Silicatforschung IWKS, Alzenau

Dr.-Ing. Ludwig Vollrath, FISITA Vice President Europe und President EAEC, Stansted, UK

Dr. Stephanie Waschbüsch, Dr. Gupta Verlag, Ratingen

Prof. Dr.-Ing. Anton Weber VDI, Direktor a. D. BASF AG, Ludwigshafen

Dr. rer. nat. Kurt Weirauch VDI, Direktor a. D. Bayer AG, Leverkusen

Dr.-Ing. Hans Wobbe VDI, Wobbe-Partner, Hitzacker

Dr.-Ing. Gottfried Wübken VDI, Abteilungsleiter a. D. Bayer AG, Leverkusen

Inhalt

Geleitwort des VDI-Strategiekreises Kunststofftechnik	1
Vorwort	2
Zusammenfassung	6
1 Einleitung zur Kunststoffproduktion	7
1.1 Mengenaspekte	7
1.2 Kunststoffsorten	7
1.3 Rohstoffbasis	8
1.4 Regionale Aspekte	9
1.5 Unternehmen und Kunststofferzeuger	10
1.6 Prognosen	10
1.7 Datenbank „Polyglobe“	11
2 Märkte und Anwendungen	12
2.1 Märkte in 2017	12
2.2 Beispielhafte Anwendungen	12
3 Kunststoffe und ihre Eigenschaften	13
3.1 Kunststoff – ein nachhaltiger Werkstoff	13
3.2 Physikalische Eigenschaften	13
3.3 Gebrauchseigenschaften und Anwendungen	14
3.4 Lebenszyklen	14
3.5 Wirtschaftlichkeitsaspekte	14
4 Zur Struktur der Kunststoffindustrie	16
4.1 Kunststoffindustrie und Kunststoffwirtschaft	16
4.2 Erzeugung	16
4.3 Maschinenbau	16
4.4 Verarbeitung	16
4.5 Andere	16
4.6 Wertschöpfungsketten	17
4.7 Dienstleister	17
4.8 Wissenschaft	17
4.9 Verbandsorganisationen u. a.	18
5 Zum Kunststoff-Abfallregime	19
5.1 Lebenswegbetrachtung	19
5.2 Deponieren (Land Filling, Marine Litter, Mikroplastics)	19
5.3 Energetische Verwertung (Energy Recovery)	20

5.4	CCU – Carbon Capture and Usage	20
5.5	Werkstoffliches Recycling (Mechanical Recycling)	21
5.6	Rohstoffliche Verwertung (Feedstock Recycling)	22
5.7	Gesamt mengenbetrachtung	23
5.8	Produktgestaltung	24
6	Life Cycle Assessment und Kreislaufwirtschaft	25
6.1	Ziel	25
6.2	Methodik	25
6.3	Bedeutung	25
6.4	Herausforderungen	25
7	Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft	26
7.1	Bedeutung	26
7.2	Verwertung	26
7.3	Automatisierung	26
7.4	Synergien	26
7.5	Life Cycle Assessment (LCA)	26
8	Logistik und Kreislaufwirtschaft	27
8.1	Bedeutung der Logistik für die Kreislaufwirtschaft	27
8.2	Beschaffungslogistik	27
8.3	Produktionslogistik	27
8.4	Absatz- oder Distributionslogistik	27
8.5	Rücknahme- oder Entsorgungslogistik	27
8.6	Bedeutung der Logistik für die deutsche Wirtschaft.	27
8.7	Regulatorischer Rahmen	28
	Literatur	30
	Abkürzungsverzeichnis	31

Zusammenfassung

Polymere werden heute zu mehr als 95 % aus den fossilen Rohstoffen Öl und Gas hergestellt. Der Einsatz von Kohle als Rohstoff für Polymere hat heute praktisch keine Relevanz mehr. Ebenso spielen biogene Rohstoffe bei der gesamten Herstellungsmenge nur eine untergeordnete Rolle.

Im Jahr 2017 wurden weltweit etwa 350 Mt Polymere produziert, in die Märkte gegeben und eingesetzt. Der Begriff Polymere steht hier für die Gesamtheit aller synthetischen makromolekularen Substanzen – Kunststoffe, Kautschuke, Lacke, Fasern, Kleber etc., die als Werkstoffe, Dämmstoffe, Oberflächenbeschichtungen, Gewebe, Textilien etc. eingesetzt werden. Bei dieser Betrachtungsweise stellen Kunststoffe den mit Abstand größten Mengenanteil dar.

Etwa 70 % der Kunststoffe sind thermoplastisch und können zur weiteren Verarbeitung aufgeschmolzen werden (Recycling), um anschließend mit verschiedenen Verarbeitungsverfahren wie dem Extrudieren, Spritzgießen oder Blasformen zu Produkten weiterverarbeitet zu werden. Etwa 30 % der Kunststoffe sind duroplastischer, elastomerer oder anderer Natur, bei denen die weitere Formgebung in der Regel mit einer Vernetzung einher geht, sodass sie sich nicht wieder aufschmelzen und umformen lassen.

Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, obwohl als Themen nicht neu, sind unter anderem wegen der Ressourcenknappheit zu globalen Arbeitsgebieten von überragender Bedeutung geworden. Die Flut von Aktivitäten und Veröffentlichungen aus Industrie, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft ist kaum noch zu überblicken und wächst täglich an. Dieser Status-

report verfolgt das Ziel, dass Wissen und die langjährigen Erfahrungen auf diesen Gebieten mit dem Fokus auf der Kunststoffindustrie in komprimierter Form zu fassen.

Die zunehmende Verbreitung von Kunststoffabfällen und „Mikroplastik“ in der terrestrischen und aquatischen Umwelt ist zu einer globalen Herausforderung geworden und erfordert umgehendes Handeln der industrialisierten Welt. Neben der Auseinandersetzung mit der besorgniserregenden Umweltbelastung müssen vor allem auch die volkswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Probleme erkannt und angegangen werden, die aus der ungeordneten Verteilung wertvoller Rohstoffe in der Umwelt resultieren, denn dadurch werden der produzierenden Wirtschaft Millionen Tonnen wertvoller Sekundärrohstoffe entzogen. Ein Prozess, der nur durch eine geänderte Philosophie zum Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen in einer Kreislaufwirtschaft gestoppt werden kann.

Dieser Verantwortung hat sich der VDI-Strategiekreis Kunststofftechnik gestellt und vor etwa eineinhalb Jahren das Projekt „Marine Litter“ im VDI gestartet, das auch den Anstoß für das aktuelle VDI-Fokus-thema „Zirkuläre Wertschöpfung“ im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft gegeben hat.

Dieser VDI-Statusreport gibt der interessierten Fachwelt, aber auch den interessierten Laien, ein hervorragendes Werkzeug an die Hand, um in die sehr komplexe Themenwelt einsteigen und auf entsprechendes Zahlenmaterial zu Marine Litter und zur Kreislaufwirtschaft zugreifen zu können.

1 Einleitung zur Kunststoffproduktion

1.1 Mengenaspekte

Im Jahr 2017 wurden weltweit etwa 350 Mt Polymere (Gattungsbegriff) produziert [1], in die Märkte gegeben und eingesetzt (Bild 1).

Der Begriff Polymere steht hier für die Gesamtheit aller synthetischen makromolekularen Substanzen – Kunststoffe, Kautschuke, Lacke, Fasern, Kleber etc., die als Werkstoffe, Dämmstoffe, Oberflächenbeschichtungen, Gewebe, Textilien etc. eingesetzt werden. Im Folgenden sei aber der Einfachheit halber von Kunststoffen gesprochen, da diese den mit Abstand größten Mengenanteil stellen.

Etwa 70 % der Kunststoffe sind thermoplastischer Natur; hier liegen die Makromoleküle diskret vor, so dass sie sich zum Zwecke der Verarbeitung bzw. der Formgebung wieder aufschmelzen, extrudieren oder umformen lassen. Etwa 30 % der Kunststoffe sind duroplastischer, elastomerer oder anderer Natur, bei diesen geht die Formgebung in der Regel mit einer Vernetzung einher, sodass sie sich nicht wieder aufschmelzen und umformen lassen.

Der Chemiker unterscheidet bei den Kunststoffen zusätzlich zwischen „Polymeren“ (Beispiel: Polyethylen), „Polykondensaten“ (Beispiel: Polyester) und „Polyaddukten“ (Beispiel: Polyurethan), womit die Natur der Bindung beim Aufbau (der chemischen Aufbaureaktion) der Polymeren aus den Monomeren beschrieben wird. Dies ist bedeutsam für die Stabilität der Kunststoffe in ihren Anwendungen (Korrosions-

verhalten) und für allfällige Abbaumöglichkeiten (chemisches und/oder rohstoffliches Recycling (siehe Abschnitt 5.6).

Kunststoffe haben ein durchschnittliches spezifisches Gewicht (Dichte) von etwa 1 g/cm^3 ; eine Tonne hat also ein Volumen von 1 m^3 . Zum Vergleich: Stahl hat eine durchschnittliche Dichte von etwa 8 g/cm^3 . Eine Tonne Stahl hat also ein Volumen von $0,125 \text{ m}^3$. Kunststoffe sind mithin um einen Faktor 8 „sichtbarer“ und „präsender“ als Stahl (Bild 2).

1.2 Kunststoffsorten

(Erwähnt werden nur Kunststoffsorten mehr als 1 Mt Jahresproduktion.)

Größte einzelne Gruppe unter den Kunststoffen sind die thermoplastischen Polyolefine Polyethylen (HDPE, LDPE, LLDPE) und Polypropylen (PP), aktuell etwa 45 % bis 50 % der gesamten produzierten Menge.

Nächstgrößere Gruppe sind die thermoplastischen Kunststoffe Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC) sowie Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET).

Es folgen die technischen Thermoplaste Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polycarbonat (PC) und Polyoxymethylen (POM); dann die Gruppe der Polyurethane (PUR) sowie die Duroplaste (Thermosets), von denen die Styrol- und die Epoxi-Harze genannt seien.

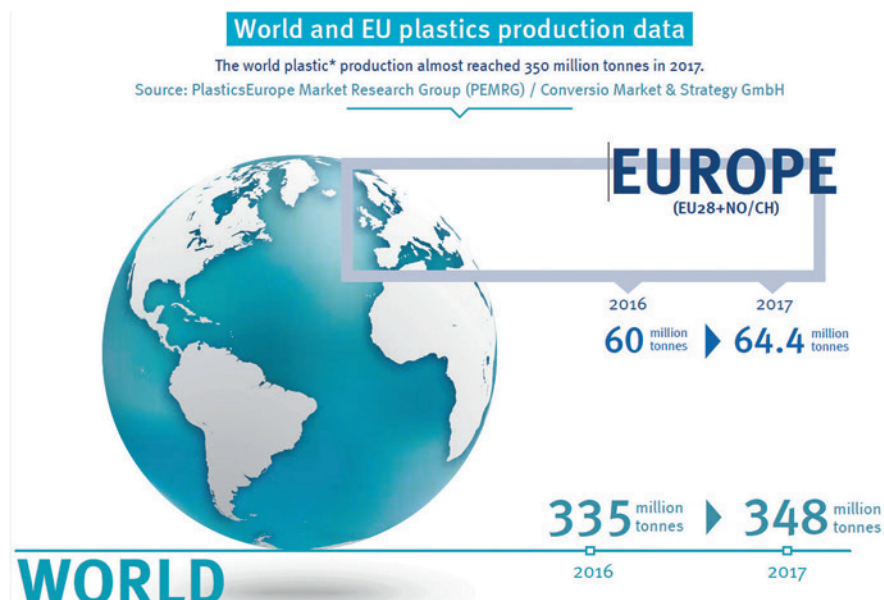
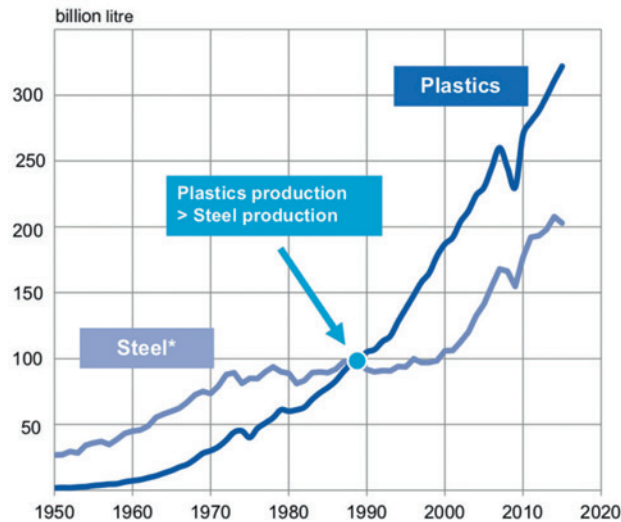


Bild 1. World and EU plastics production data (Quelle: „Plastics – The Facts 2018“, PlasticsEurope – Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.)



- Plastics in 1989, passed steel production by volume

Global Production 2015 :

- Plastics: 322 Mio. t = 322 billion litre
- Steel: 1,623 Mio. t = 203 billion litre
- Calculation Model: 1 kg plastics = 1 litre
8 kg steel = 1 litre

Bild 2. World Benchmark Plastics/Steel 2015 (Quelle: Präsentation „The Plastic Industry Berlin Aug 2016“, PlasticsEurope - Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.)

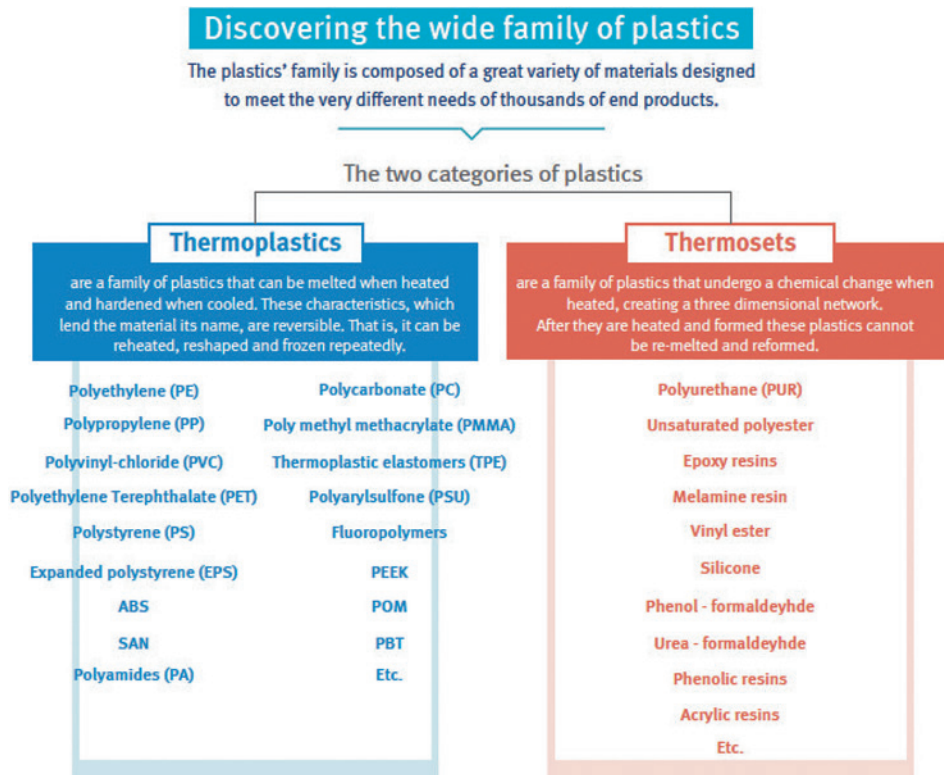


Bild 3. Discovering the wide family of plastics, published in „Plastics – The Facts 2018“, PlasticsEurope - Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.

Schließlich die Kautschuke (Rubbers – Kürzel: R), von denen Naturkautschuk (NR), Butadien- und Styrolbutadienkautschuke (BR bzw. SBR) sowie Chlor- und Nitrilkautschuke (CR bzw. NBR) genannt seien.

1.3 Rohstoffbasis

Polymere werden heute zu > 95 % aus den fossilen Rohstoffen Öl und Gas hergestellt. Der Einsatz von

Kohle als Rohstoff ist praktisch eingestellt (Bild 4). Biogene Rohstoffe spielen keine größere Rolle (s. u.)

Öl ist der mit Abstand wichtigste Rohstoff für die Herstellung von Kunststoffen (im Folgenden: Kunststoffherzeugung). Durch fraktionierte Destillation werden in Raffinerien daraus das Roh- oder Leichtbenzin Naphtha sowie die Kohlenwasserstoffe Methan, Ethan und LPG (Gemisch aus im Wesentlichen Propan und Butan) gewonnen, aus denen wiederum durch Steam Cracking die wichtigsten Monomeren Ethylen, Propy-

len und die sogenannte C4-Fraktion erzeugt werden; Methanol wird direkt aus Methan hergestellt.

Von zunehmender Bedeutung ist natürlich vorkommendes Ethan, das als Shale Gas durch Fracking gewonnen wird und das als Nebenprodukt bei der Ölförderung anfällt – und als unerwünschtes Nebenprodukt (Strand Gas) in der Vergangenheit oftmals verbrannt (abgefackelt) wurde. Das Ethan wird in „Crackern“ zu Ethylen großtechnisch dehydriert.

Produkte eines zukünftigen rohstofflichen Recyclings werden in geeigneter Weise in diese großtechnisch etablierten Prozesse einfließen müssen.

Trotz massiver staatlicher Förderung in manchen Ländern werden biogene Rohstoffe derzeit nur zur Herstellung zweier Produkte größeren Volumens eingesetzt: das Latex-Vorprodukt für den oben genannten Naturkautschuk stammt aus Gummibaumplantagen in Südostasien, Polyethylen brasilianischer Herkunft (Braskem) wird teilweise auf Basis von Zuckerrohr hergestellt.

1.4 Regionale Aspekte

Wir konzentrieren sich in diesem Beitrag auf die Kunststoffregion Europa, da sie nur hierfür die notwendige Expertise besitzen, wenn diese auch wegen unterschiedlichster Entwicklungen anderswo relativ an Bedeutung verliert (Bild 5). Hier werden derzeit noch etwa 20 % der Weltproduktion in existierenden Anlagen erzeugt; ein Neubau von Anlagen findet nur noch in untergeordnetem Maße (Ersatzinvestitionen) statt.

Wichtigste Ölförderregion ist der Mittlere Osten, namentlich Saudi-Arabien und die Emirate am persisch-arabischen Golf; aufgrund der jüngeren politischen Entwicklungen spielen Irak und Iran derzeit nur eine eher untergeordnete Rolle. Seit etwa 20 Jahren verfolgen die dortigen Regierungen erfolgreich die Politik, einen größeren Teil der Wertschöpfung im Lande zu halten, also Kunststoffe vor Ort zu produzieren. Aktuell dürften dort etwa 10 % der Weltproduktion beheimatet sein.

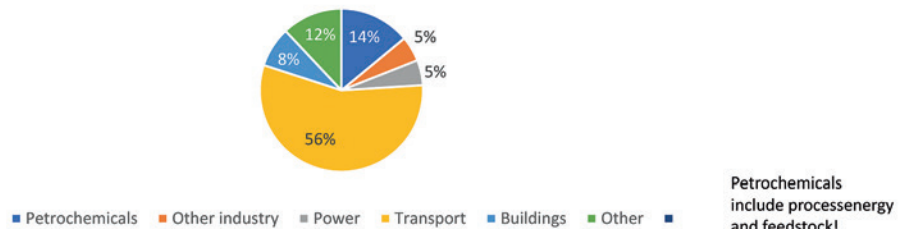
China ist mittlerweile zum größten Kunststoffproduktionsstandort geworden und steht für aktuell etwa 30 % der Weltproduktion, wofür große Mengen Rohstoffe importiert werden. Zusätzlich werden enorme Mengen Kunststoffe aus anderen Regionen und Ländern importiert, um den stetig wachsenden Bedarf der chinesischen kunststoffverarbeitenden Industrie zu decken. Weitere etwa 20 % werden in Japan, Indien,

The diagrams are based on data published in “The Future of Petrochemicals” by IEA

The largest oil companies by revenue, based on revenue totals from 2014 are:

1. China Petroleum and Chemical Corp., or “Sinopec” (\$455.06 billion)
2. China National Petroleum Corp. (\$432 billion)
3. Royal Dutch Shell (\$422 billion)

Primary Oil - Demand by sectors in 2017



Natural Gas - Demand by sectors in 2017

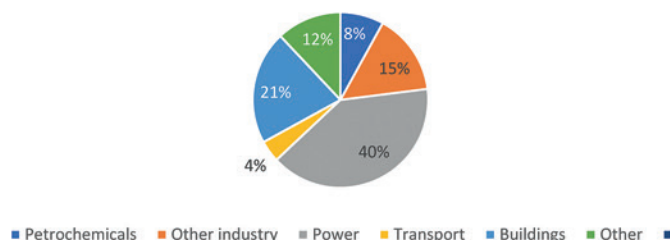


Bild 4. Primary Oil and Natural Gas – Demands by sectors (Quelle: VDI e.V., April 2020)

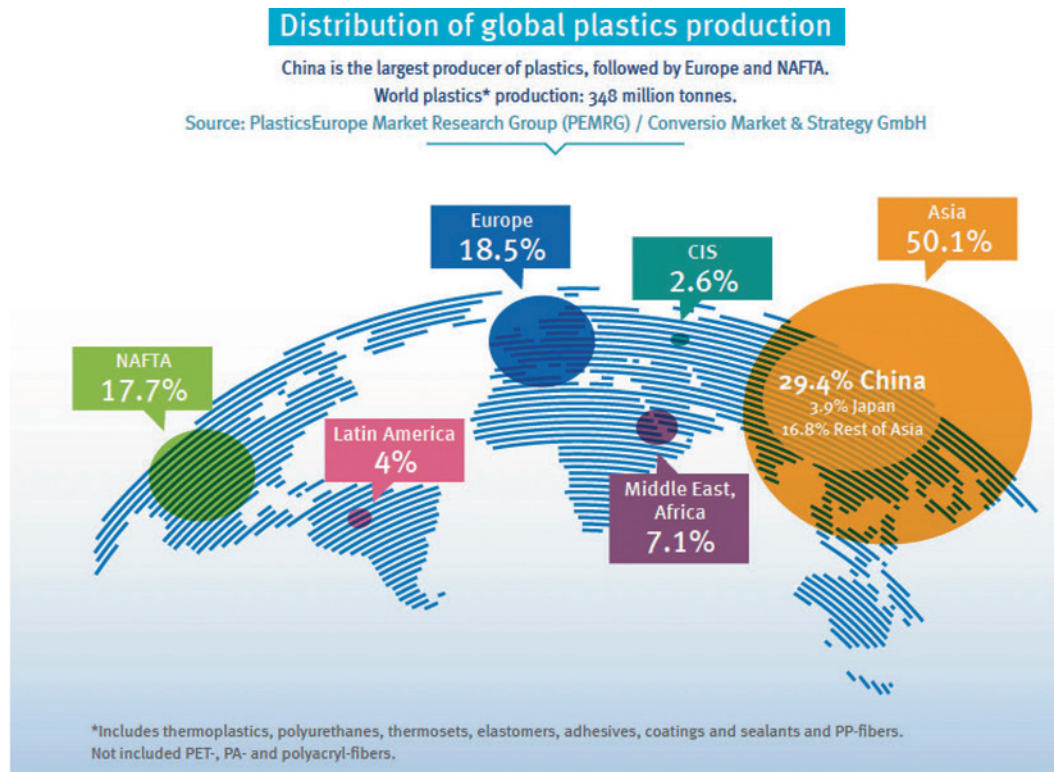


Bild 5. Distribution of global plastics production 8Quelle: „Plastics – The Facts 2018“, PlasticsEurope – Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.)

Malaysia, Singapur, Südkorea, Taiwan und Thailand produziert. In Asien stehen heute also etwa 50 % der Weltproduktionskapazitäten.

Eine Renaissance erlebt derzeit die Kunststoffherzeugung in Nordamerika, aufgrund der massenhaften Verfügbarkeit billigen Shale Gas⁴, das für die dortige Kunststoffwirtschaft wie eine Droge wirkt, sodass auch in dieser Region (inklusive Südamerika) wieder etwa 20 % der Weltproduktion erzeugt werden. Darüber hinaus wird Shale Gas (Ethan) verflüssigt und exportiert.

Verbleibende Mengen werden in u. a. Brasilien, Russland und Südafrika produziert [1].

1.5 Unternehmen und Kunststoffherzeuger

Die wichtigsten Polyolefinherzeuger sind mittlerweile (wieder) die Kunststoff- oder Chemietöchter der großen Ölkonzerne wie ExxonMobil, ChevronPhillips (auch in JVs mit dem Scheichtum Qatar), OMV (Borealis), Total, Repsol, ENI (Versalis) und Saudi Aramco (Sabic) sowie petrochemische/chemische Mischkonzerne wie Dow DuPont, LyondellBasell und Ineos einerseits und Asahi und Sumitomo sowie Mitsubishi und Mitsui, LG und SK andererseits (Bild 6). Hinzu kommen mit wachsender Bedeutung chinesische Unternehmen wie Sinopec, Petrochina, ChemChina und Reliance (Indien) sowie Petrobras

(Braskem), PTT sowie SCG (Thailand) und Formosa Plastics (Taiwan).

Unternehmen wie BASF (Polyamide und PUR) sowie die aus dem Bayer-Konzern hervorgegangene Covestro (Polycarbonate und PUR) sind Spezialisten geworden – allerdings Weltmarktführer mit ihren jeweiligen Produkten. Evonik und Lanxess haben bezogen auf die Volumina ihrer Kunststoffproduktion eher untergeordnete Bedeutung.

Dieser Markt befindet sich in ständiger Bewegung, da fortwährend akquiriert, desinvestiert und gegründet wird. Tabellarische Darstellungen wie in Bild 6 sind daher immer nur Momentaufnahmen.

1.6 Prognosen

Wir gehen aktuell davon aus, dass das Volumen der weltweiten Kunststoffherzeugung im Jahr 2025 bei etwa 500 Mt liegen dürfte (Bild 7).

Eine lineare Extrapolation des aktuellen Per-capita-Verbrauchs in den Industrieländern von 150 kg/a auf die zu erwartende Weltbevölkerung von 10 Mrd. Menschen im Jahr 2050 ergibt eine Produktion von etwa 1.500 Mt [2].

Die Internationale Energieagentur (IEA – International Energy Agency) prognostiziert für das Jahr 2030, dass etwa 35 % des geförderten Öls zur Herstellung

von Petrochemikalien für die Chemie und die Kunststoffherzeugung eingesetzt werden, bei sinkenden relativen Anteilen von Straßenverkehr, Luft- und Schifffahrt: Damit korreliert ein steigender Energieverbrauch und wachsende CO₂-Emissionen à Konto Chemie und Kunststoffherzeugung [3].

1.7 Datenbank „Polyglobe“

Eine umfassende und aktuelle Übersicht und Beurteilung von Anbietern, Wettbewerbern und Marktdaten zum Thema liefert die Online-Kapazitäten-Datenbank „Polyglobe“ des KI-Verlags, Bad Homburg (1.900 Rohstoffproduzenten, über 5.000 Anlagen, fast 1.050 Standorte).

Rang 2017 ↕	Rang 2016 ↕	Unternehmen ↕	Umsatz mit Chemikalien in Mrd. US-\$ (2017) ↕	Umsatz in Mrd. Euro ↕	Sitz ↕
1	1	BASF	69,196	60,98	Deutschland, Ludwigshafen am Rhein
2	/	DowDuPont	62,484	55,06	Vereinigte Staaten, Midland, Michigan
3	3	Sinopec	55,324	48,75	Volksrepublik China, Peking
4	4	SABIC	37,621	33,15	Saudi-Arabien, Riad
5	6	Ineos	34,635	30,52	Vereinigtes Königreich, London
6	5	Formosa Plastics	32,118	28,3	Taiwan, Taipeh
7	7	ExxonMobil	28,694	25,29	Vereinigte Staaten, Irving, Texas
8	8	LyondellBasell	28,319	24,96	Niederlande, Rotterdam
9	9	Mitsubishi Chemical	26,423	23,28	Japan, Tokio
10	12	LG Chem	23,217	20,46	Südkorea, Seoul
11	11	Air Liquide	22,618	19,93	Frankreich, Paris
12	20	Reliance Industries	17,555	15,47	Indien, Mumbai
13	10	DuPont ^[3]	17,281	15,23	Vereinigte Staaten, Wilmington, Delaware
14	13	Linde AG	16,938	14,93	Deutschland, München
15	15	Toray Industries	16,904	14,9	Japan, Tokio
16	14	AkzoNobel	16,471	14,51	Niederlande, Amsterdam
17	17	Evonik Industries	16,295	14,36	Deutschland, Essen
18	19	Covestro	15,977	14,08	Deutschland, Leverkusen
19	16	Braskem	15,438	13,6	Brasilien, São Paulo
20	18	PPG Industries	14,750	13	Vereinigte Staaten, Pittsburgh

Bild 6. Plastics Producers with their Total Turnovers (Quelle: Dr. Peter Orth and Manfred Rink, November 2019)



Bild 7. Plastic converter demand (Quelle: „Plastics – The Facts 2018“, PlasticsEurope – Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.)

2 Märkte und Anwendungen

2.1 Märkte in 2017

Bei der Betrachtung der Märkte konzentrieren wir uns hier auf Europa und insbesondere auf Deutschland (Bild 7). Für die anderen Regionen stehen uns aktuell die notwendigen Daten nur eingeschränkt zur Verfügung. Wichtige Märkte/Anwendungsbereiche für Kunststoffe seien hier tabellarisch dargestellt [1].

Tabelle 1. Wichtige Märkte/Anwendungsbereiche für Kunststoffe

Angaben in %	Deutsch- land	Eu- ropa	Thai- land (z. B.)
Verpackung	31	40	48
Bau	25	20	14
Automobil	11	10	8
Elektro und Elektronik	6	6	15
Living Environment	7	4	?
Landwirtschaft	4	4	?
Andere	15	15	15

2.2 Beispielhafte Anwendungen

Verpackung

- extrudierte Folien (LDPE, LLDPE, PP)
- blasgeformte Hohlkörper, Flaschen etc. (HDPE, PET)
- tiefgezogene Blister, Becher, Schalen etc. (PP, PET)
- Schäume und Flocken (expandiertes PS, PE etc.)

Bau

- Schläuche, Rohre, Fittings (PE, PP, PVC)
- Schäume (EPS, XPS, PUR, PE)

- Folien (PE, PP, PVC)
- Platten (PVC, PMMA, PC)

Automobil

- Stoßfänger (PP)
- Innenraumteile (PP, ABS, PC/ABS, PUR)
- Beleuchtung (PC, PMMA)
- Motorraum (PA, PP)
- Elektrik (PVC, PP, PA)

Elektro und Elektronik

- Kabel (PVC, PP, TPE)
- Gehäuse (PP, ABS, PC/ABS)
- Befestigungselemente (PE, PP, PA, PBT)
- Leiterplatten (EP, UP, PI)

Living Environment

- Teppiche (PP, PA)
- Schäume (PUR, PE, NR)
- Möbel (PP, PC, ABS, PUR)
- Farben und Lacke (Acrylate, PUR)
- Küchenkleinteile (PE, PP, Melamin)
- Textilien (PE, PP, PET, PA, PAN)
- Schuhe (PUR)
- Sportgeräte (CFK u. v. a. m.)

Landwirtschaft

- Folien (PE)
- Behälter (HDPE)
- Netze (PP, PA)
- Platten (PVC, PMMA, PC)

3 Kunststoffe und ihre Eigenschaften

3.1 Kunststoff – ein nachhaltiger Werkstoff

Kunststoff wird bisweilen als „Werkstoff des 21. Jahrhunderts“ bezeichnet [1]. Dieser Slogan hebt ab auf die schier unendliche Variabilität und Funktionalität dieser kohlenstoffbasierten Werkstoffklasse. Kunststoffe sind in unzähligen ihrer Anwendungen aus sozialen, ökonomischen und ökologischen Gründen unverzichtbar und unersetzlich geworden, ein nachhaltiger Werkstoff mithin (Bild 8). Insofern ist die aktuelle Polemik gegen Kunststoffe als „Einwegplastik“ – so verständlich sie in mancher Beziehung sein mag – nicht nur billig, sondern auch gefährlich.

3.2 Physikalische Eigenschaften

■ Dichte

Wie bereits erwähnt, haben Kunststoffe eine nur geringe Dichte: Polyolefine $< 1 \text{ g/cm}^3$, verstärkte Kunststoffe (GFK, CFK) $> 1 \text{ g/cm}^3$. Mit der Kombination von geringer Dichte und hoher Festigkeit ist Kunststoff damit der Leichtbauwerkstoff schlechthin.

■ Form und Gestalt

Mit Verfahren wie dem Spritzgießen, dem Tiefziehen, dem Reaction Injection Moulding (RIM) u. a. lassen sich Kunststoffe mit relativ geringem Aufwand bei vergleichsweise niedriger Temperatur in Form bringen, wobei in einem Arbeitsgang komplexe Gestaltung erfolgt. Mit der noch relativ jungen „Additiven Fertigung“ (3-D-Druck) wird dies Spektrum unter Verzicht auf ein Werkzeug noch erweitert.

■ Elastizität und Zähigkeit

Kunststoffe sind in der Regel elastisch, machen also eine von außen hervorgerufene Formänderung aus eigener Kraft rückgängig, und zäh, also

widerstandsfähig gegen Bruch oder Rissausbreitung.

■ Korrosion und Beständigkeit

Viele Kunststoffe – insbesondere die Polyolefine PE, PP, PVC und die Kautschuke – sind langzeit- und witterungsbeständig, korrodieren also nicht; es findet praktisch kein chemischer Abbau statt. Dieser augenscheinliche Vorteil verkehrt sich bei Kunststoffabfällen, die ungeordnet in die Umwelt gelangen, in sein Gegenteil, da sie dort nicht abgebaut werden können.

■ Farbe

Insbesondere thermoplastische Kunststoffe werden zur Farbeinstellung mit entsprechenden Pigmenten, deren Palette ständig erweitert wird, mittels Compoundierung eingefärbt. Praktisch jede denkbare Farbe ist so machbar.

■ Transparenz

Amorphe Thermoplaste wie PC oder PMMA sind transparent, also lichtdurchlässig, sodass sie sich für eine Vielzahl optischer Anwendungen sowie für „Verglasungen“ eignen.

■ elektromagnetische Eigenschaften

Die meisten Kunststoffe sind Isolatoren, besitzen also eine nur geringe elektrische Leitfähigkeit, lassen sich aber durch Integration leitfähigen Materials bedingt zu elektrischen Leitern modifizieren.

■ Oberfläche

Die im Spritzgießverfahren hergestellten Bauteile bilden exakt die Oberfläche des Werkzeugs ab – von hochglänzend bis zu fast jeder gewünschten Struktur.



Bild 8. Plastic Products Are Integral to Modern Societies (Quelle: „Plastics – The Facts 2018“, PlasticsEurope – Mit freundlicher Genehmigung von PlasticsEurope Deutschland e.V.)

3.3 Gebrauchseigenschaften und Anwendungen

■ Schutz

Mengenmäßig wichtigster Anwendungsbereich von Kunststoffen ist die Verpackung und damit der Schutz von Gütern aller Art, insbesondere von Lebensmitteln. Relevante Eigenschaften hierfür sind die Freiheit der Formgebung, die geringe Dichte, die einfache Oberflächenmodifizierung, die (partielle) Undurchlässigkeit für Licht, Gase (Sauerstoff insbesondere), Keime etc. In einer WWF-Studie [4] von 2015 wird ausgeführt, dass die Verluste an Lebensmittel entlang der Wertschöpfungskette, einschließlich der Verbraucher, weltweit zwischen 30 % bis 40 % liegen. Diese Verluste können nur durch verbesserte Verpackungen, Transporte und Lagerungen in und mit Kunststoffen deutlich reduziert werden.

■ Transport und Distribution

Säcke und Flaschen, Container und Boxen aus Kunststoff ermöglichen leichte, sichere und robuste Portionierung, Lagerung und Transport von Gütern aller Art und Menge im gewerblichen und privaten Bereich. Sie sind die Grundlage einer effizienten und wirtschaftlichen Distribution von Waren – von der Herstellung bis zum Endverbraucher. Hierzu gehören auch die in Anbetracht der weiterwachsenden Urbanisierung bedeutsamen Kühlketten.

■ Gehäuse

Artikel und Geräte erhalten Schutz und Form durch Kunststoffgehäuse. Farbe, Oberfläche und Design sind gleichermaßen Markenbotschafter wie Gestaltungselement unserer Lebensumgebung.

■ Dämmung und Komfort

Weiche und harte Schäume aus PE und PS, PUR oder Kautschuken finden sich in zahllosen Bauanwendungen, wo sie z. B. der Wärme- und Kältedämmung, der Hohlraumversiegelung oder der Formgebung dienen, ebenso finden sie sich aus Komfortgründen in Möbelpolstern, Matratzen oder Autositzen wieder.

■ Stabilität

Chemikalien- und Witterungsbeständigkeit prädestinieren insbesondere PVC und die Polyolefine für den Einsatz als Löse- oder Betriebsmittelbehälter (Benzintanks), als Bojen, Taue oder Netze in maritimer Umgebung oder als Abdeckbahnen und -planen von Gebäuden oder Nutzfahrzeugen.

■ Strukturwerkstoffe

Insbesondere nach Verstärkung mit Glas- oder Kohlenstofffasern zur gezielten Einstellung

höherer E-Module werden viele Kunststoffe auch als Strukturwerkstoffe eingesetzt. Mit Kurzglasfasern verstärkte Thermoplaste lassen sich spritzgießen, mit Glasfasergeflechten getränkte Harze werden im SMC- oder BMC-Verfahren in Form gebracht und ausgehärtet. Kohlenstofffasern können u. a. in thermoplastische Matrices eingebettet werden und gelangen als Halbzeuge in den Markt. Solche Materialien erreichen E-Module, die die der Metalle übertreffen, und besitzen sehr günstige Festigkeits-/Gewichtsverhältnisse. Sie sind allerdings vergleichsweise hochpreisig und werden daher eher als Leichtbauwerkstoffe im Flugzeugbau eingesetzt.

Nicht alle der beschriebenen Eigenschaften können in einem einzigen Werkstoff realisiert werden und nicht alle werden für eine bestimmte Anwendung benötigt. Um diese und andere Anforderungen zu erfüllen wurde eine enorme Vielfalt verschiedener Kunststofftypen entwickelt – eine Entwicklung, die ungebrochen ist. Was zunächst ein großer Vorteil ist, erweist sich bei der Verwertung als Nachteil: wir sollten nicht von Kunststoff- Recycling sprechen, sondern vom Recycling von Kunststoffen.

3.4 Lebenszyklen

Abhängig von Markt und Anwendung haben Kunststoffe sehr unterschiedliche Lebenszyklen (Bild 9), die nicht nur vom Kunststoff selbst, sondern von der Haltbarkeit oder der Gebrauchsdauer des jeweiligen Einsatzprodukts determiniert werden:

- medizinische Artikel – oft Einwegmaterial
- Verpackungen – wenige Tage (Lebensmittel) bis mehrere Jahre (Transportbehälter)
- technische Anwendungen (Fahrzeuge, Elektrogeräte) – mehrere Jahre bis mehrere Jahrzehnte
- Bauanwendungen (Gebäude, Straßen, Gas- und Wassernetze) – Jahrzehnte bis Jahrhunderte

3.5 Wirtschaftlichkeitsaspekte

Die überwiegende Menge der Kunststoffe kommt zu Preisen um 2 Euro/kg auf den Markt. Hinzu kommt: Sie lassen sich vergleichsweise einfach und bei niedrigen Temperaturen in Form bringen. Kunststoffverarbeitungsmaschinen bestechen daher mit relativ niedrigen Investitionskosten und niedrigem Energieverbrauch. Dies hat die Entstehung einer stark mittelständisch strukturierten Kunststoffwirtschaft gefördert, die heute in nahezu allen Ländern der Welt beheimatet ist und Millionen Menschen Arbeitsplätze bietet – sowohl in der sprichwörtlichen Garage als auch wie im Großbetrieb.





Packaging		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Business/companies: regional/global ▪ Product life cycle time: short ▪ Value chain: less complex
Building & Construction		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Business/companies: local/regional ▪ Product life cycle time: long ▪ Value chain: very complex
Automotive		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Business/companies: global ▪ Product life cycle time: medium ▪ Value chain: rather complex
Electrical & Electronics		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Business/companies: global ▪ Product life cycle time: short/medium ▪ Value chain: complex

Bild 9. Value Chains and Product Life Cycles (Quelle: Dr. Peter Orth, April 2020)

4 Zur Struktur der Kunststoffindustrie

4.1 Kunststoffindustrie und Kunststoffwirtschaft

Als Kunststoffindustrie im engeren Sinne bezeichnet man seit etwa 20 Jahren die Gesamtheit der drei sehr unterschiedlichen Branchen Kunststoffherzeugung (Teil der chemischen Industrie), Kunststoffmaschinenbau (Teil des Maschinenbaus) und Kunststoffverarbeitung. Die Kunststoffindustrie in Europa/Deutschland hat mehr als 1,5 Mio./400.000 Beschäftigte, mehr als 60.000/3.300 Unternehmen (zumeist KMU – s. u.) und generiert einen Umsatz von mehr als 350/90 Mrd. Euro (Zahlen für 2017) [1].

Die Kunststoffwirtschaft (kein feststehender Begriff) umfasst zusätzlich Distributeure, Compoundeure und Hilfsmittelhersteller; Logistik, Messegesellschaften, Verlage u. v. a. Dienstleister; schließlich auch die einschlägige Wissenschaft.

4.2 Erzeugung

Wie oben ausgeführt, sind die Unternehmen der kunststofferzeugenden Industrie in der Regel Teile entweder der chemischen oder der petrochemischen Industrie (siehe auch Bild 6). Sie sind heute zumeist global aufgestellt. Die Produktion ist standortsensibel (Brown Sites), kapitalintensiv (World Scale Units von typischerweise 500 kt Jahresproduktion im Falle der Polyolefine oder der Isocyanate) und daher logistisch extrem anspruchsvoll. Die Konsolidierung dieses Industriezweigs ist weit fortgeschritten, aber nicht abgeschlossen. Die Spannweite der Jahresumsätze in der Kunststoffherzeugung reichen von 1 Mrd. bis etwa 25 Mrd. Euro. In der Regel handelt es sich um börsennotierte Publikumsgesellschaften.

4.3 Maschinenbau

Spezialmaschinen sind notwendig zur Verarbeitung und Formgebung der meist als Granulat oder Flüssigkeiten vorliegenden Kunststoffe. Wichtigste Gattungen sind Extruder zum Aufschmelzen und Compoundieren sowie zur Extrusion von Halbzeugen (Folien und Platten, Schläuche, Rohre, Profile), Tiefziehmaschinen zur Herstellung von offenen Hohlkörpern (Becher, Schalen, Töpfe, Blister ...), Spritzgießmaschinen zur Herstellung von Formteilen mit Durchmessern vom mm- in den m-Bereich. Werkzeuge, Pressen, Kalander, Ablege- und Wickelgeräte,

Autoklaven, Blasformmaschinen etc. sind weitere Formgebungsaggregate. Die Liste der Peripheriegeräte und der entsprechenden Hersteller ist schier unendlich. Die deutschsprachigen Länder in Mitteleuropa (DACH) sind das technologische Zentrum des Kunststoffmaschinenbaus und größter Exporteur, größter Hersteller ist aber mittlerweile China. Die Branche ist eher mittelständisch strukturiert; einige wenige Unternehmen (meist Spritzgießmaschinenbauer) haben Jahresumsätze in der Größenordnung von 1 Mrd. Euro. Das typische Maschinenbauunternehmen befindet sich im Familienbesitz und ist in Europa oder sogar weltweit unterwegs.

4.4 Verarbeitung

Das Herzstück der Kunststoffindustrie ist sicherlich die Kunststoffverarbeitung (Bild 10). Hier wird der als Rohstoff angelieferte Kunststoff auf den genannten Maschinen in die Form gebracht, in der er dem Verbraucher begegnet. Ergänzt um Distributeure, Compoundeure, Hilfsmittelhersteller, Logistik, Messegesellschaften, Verlage, Dienstleister und Wissenschaft ergibt dies die Kunststoffwirtschaft (siehe Abschnitt 4.1). Die aus kleinen und mittelständischen Unternehmen bestehende Branche zählt nach unserer Schätzung in Deutschland wohl 10.000 Unternehmen, macht einen Jahresumsatz von etwa 65 Mrd. Euro und beschäftigt etwa 400.000 Mitarbeiter. Die kleinen Spezialisten setzen 1 Mio. bis 2 Mio. Euro um, die großen Packmittelhersteller (Folien) bringen es auf 1 Mrd. Euro und mehr. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, handelt es sich auch in dieser Branche um familiengeführte Unternehmen, die meist nur national, bisweilen europäisch tätig sind. Manche der größeren Unternehmen gehören zu internationalen Gruppen, sind international tätig und börsennotiert.

4.5 Andere

(Chemie-)Handelshäuser und Logistiker spielen eine wichtige Rolle in der Distribution und Vermarktung von Kunststoffen. Die großen Kunststofferzeuger konzentrieren sich in der Regel auf die Compoundierung und Konfektionierung einiger weniger Typen ihrer Produkte, die sie in möglichst großen Gebinden (Containern, Silofahrzeugen) zu ihren großen Kunden transportieren lassen. Kleinere Gebinde für kleinere Kunden vertreiben sie in der Regel über ihre Distributionspartner, die oftmals auch als Compoundeure kleinerer Typen und Spezialitäten tätig sind.

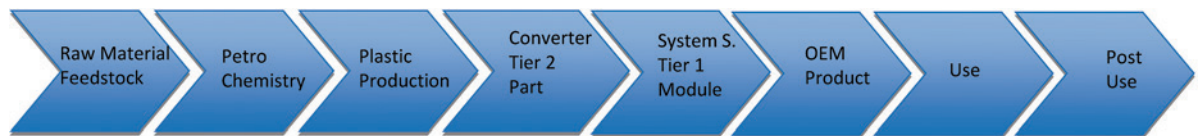


Bild 10. The linear Automotive Value Chain (simplified) (Quelle: Dr. Peter Orth and Manfred Rink, November 2019)

Die weiteren Inhaltsstoffe (neben dem reinen Kunststoff) der Compounds liefern Spezialisten, die sehr oft ausschließlich das kunststoffbezogene Geschäft betreiben: Verstärkungsfasern (Glas- und Kohlenstofffasern ...), Füllstoffe (CaCO_3 , Talk, Silikagel, Ruß ...), Pigmente, Stabilisatoren, Flammenschutzmittel, Verarbeitungshilfsmittel u. v. a. m. Systemhäuser unterstützen das Geschäft der PUR-Rohstoffhersteller bei der Formulierung, der Distribution, der Kundenberatung etc.

4.6 Wertschöpfungsketten

Typisch für die Kunststoffindustrie ist die Organisation in linearen Wertschöpfungsketten (Bild 10) – so für die Automobilindustrie, Packmittelherstellung, Elektroindustrie, medizintechnische Industrie etc. Solche Ketten werden von beiden Enden her organisiert, leben von direkten, oft langjährigen Kontakten und der vertraglichen Verpflichtung nahezu aller ihrer Mitglieder untereinander, der Kooperation mit erfahrenen Logistikern, die oftmals selber IT-Unternehmen sind oder diese einbinden. Solche Ketten sind nur noch selten national oder regional organisiert, in vielen Fällen handelt es sich heute um globale Organisationsstrukturen, deren Komplexität insbesondere KMU vor große Herausforderungen stellt. Erste zirkuläre Wertschöpfungsketten sind erfolgreich etabliert (PET-Flaschen) oder befinden sich im Aufbau, so in einigen Bereichen der Bauindustrie, vorangetrieben von der PVC-Industrie, bei Bodenbelägen oder manchen Polyolefin-Anwendungen, sind aber nicht die Regel.

4.7 Dienstleister

An dieser Stelle seien die großen Kunststoffmessen erwähnt, insbesondere die globale Leitmesse K, die Chinaplas und die National Plastics Exhibition (NPE) in den USA.

Die Internationale Kunststoffmesse **K** findet im Dreijahresrhythmus in Düsseldorf statt – zuletzt 2019. Etwa 3.500 Unternehmen (überwiegend Maschinenbau und Rohstoffhersteller) stellen auf 175.000 m² Hallenfläche aus und erwarten etwa 220.000 Besucher (mehr als die Hannovermesse). Die Leitmesse K ist

nach wie vor der Treffpunkt der Branche schlechthin, traditionell beheimatet in Deutschland, dem technologischen Zentrum der Kunststoffindustrie. Der Veranstalter, die Messe Düsseldorf, hat ein Portfolio von insgesamt neun Kunststoffmessen weltweit, sie dürfte damit Weltmarktführer in diesem Bereich sein.

Die Internationale Messe **Chinaplas** findet jährlich im Wechsel in Shanghai und Guangzhou statt, mit folgenden Zahlen für Shanghai 2018: Ausstellungsfläche: 320.000 m², Aussteller: mehr als 3.400, Fachbesucher: mehr als 150.000. Die Chinaplas repräsentiert den größten und dynamischsten Markt der Kunststoffindustrie.

Eher regionale Bedeutung haben die **NPE** in Orlando/FL (Nordamerika) und die **Fakuma** in Friedrichshafen (Europa). Erwähnt sei auch die **JEC** (Journées Européennes des Composites) in Paris, die weltgrößte Messe für Verbundwerkstoffe.

Diese Messen erfüllen wichtige Funktionen als Marktplätze und Informationsbörsen, sie sind Treffpunkte und Kommunikationszentren und natürlich und vor allem zeigen sie Innovation im Wettbewerb, ermöglichen also den direkten Vergleich für den Kunden und sind oft Trendsetter.

4.8 Wissenschaft

In Deutschland, Österreich und der Schweiz gibt es eine große und vielfältige Wissenschaftslandschaft, die sich mit praktisch allen oben genannten Aspekten des Werkstoffs Kunststoff befasst.

Hochschulen

Die Polymerwissenschaften mit den Schwerpunkten Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik sind an mehr als 50 Hochschulen in Deutschland und Österreich mit ca. 150 Professoren in Forschung und Lehre vertreten. An vielen dieser Hochschulen gibt es eigenständige Studiengänge in den genannten Disziplinen (und darüber hinaus), deren Absolventen in der Landschaft der einschlägigen Wirtschaftsunternehmen, Behörden und Wissenschaft Arbeit findet. Der

Anteil von Studierenden aus dem europäischen und internationalen Ausland wächst stetig; gehen diese dann in ihre Heimatländer zurück, werden sie Teil eines bisweilen globalen Netzwerks.

Außeruniversitäre Forschung

Eng mit den Hochschulen in Deutschland verknüpft (die meisten Instituts- oder Abteilungsleiter haben heute auch Hochschullehrstühle) sind die in den vier großen Wissenschaftlichen Gesellschaften (Max Planck, Fraunhofer, Leibniz, Helmholtz) organisierten Institute und Arbeitsgruppen (ca. 40). Entsprechend dem Charakter der jeweiligen Gesellschaft sind diese in der Grundlagenforschung oder der angewandten Forschung engagiert. In den allermeisten Fällen sind sie über Projekte oder Gremienmitgliedschaften mit der Kunststoffindustrie verbunden.

Ausdrücklich erwähnt sei der Fraunhofer-Exzellenzcluster „Circular Economy Plastics“ [12].

Natürlich kann hier keine abschließende Betrachtung erfolgen. Zusammenfassend sei seitens der Verfasser jedoch bemerkt, dass das in Deutschland bzw. in Mitteleuropa vorhandene wissenschaftliche Potenzial weltweit (noch) einzigartig ist. Es trägt ganz wesentlich zur technologischen Spitzenstellung der Kunststoffindustrie in Europa bei.

4.9 Verbandsorganisationen u. a.

Die deutsche Kunststoffwirtschaft ist in zahlreichen Verbänden und ähnlichen Organisationen (meist Vereine) organisiert. Schwerpunktmäßig sind dies:

- PlasticsEurope Deutschland – Verband der Kunststoffherzeuger, Teil eines in Brüssel ansässigen paneuropäischen Verbands, dem globalen Charakter dieses Industrieteils entsprechend, in Deutschland Fachverband im VCI (Verband der Chemischen Industrie e.V.)
- Fachverband Kunststoff- und Gummimaschinen im VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V.), Federführer des entsprechenden europäischen Verbands Euromap (European Plastics and Rubber Machinery)
- GKV – Gesamtverband der Kunststoffverarbeitenden Industrie e.V., BDI-Mitglied und Dachverband einer Reihe von Fachverbänden, namentlich Industrievereinigung Kunststoffpackmittel e.V. – IK, Tecpart (Technische Teile), Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe e.V. – AVK, Pro K (Halbzeuge und Konsumprodukte), Fachverband Schaumkunststoffe e.V. – FSK (Schaumkunststoffe und Polyurethane)
Unabhängig vom GKV gibt es weitere Verbände der kunststoffverarbeitenden Industrie, so den KRV (Kunststoffrohrverband e.V.).
- regionale Verbände u. a. in NRW (Kunststoffland NRW), Sachsen, Franken, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt
- Organisationen der Verwertung und Entsorgung
 - BDE – Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft (große Unternehmen inklusive einiger Dualer Systeme)
 - bvse – Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (KMU)
 - BKV (Beteiligungs- und Kunststoffverwertungsgesellschaft mbH), RIGK (Gesellschaft zur Rückführung industrieller und gewerblicher Kunststoffabfälle mbH) – Organisationen der Kunststoffindustrie
 - Duale Systeme
 - Register: ZSVR – Zentrale Stelle Verpackungsregister
 - EAR – Stiftung Elektro-Altgeräte Register

5 Zum Kunststoff-Abfallregime

5.1 Lebenswegbetrachtung

Obige Ausführungen zeigen das Beispiel einer erfolgreichen und dynamischen Grundstoffbranche, die im Wesentlichen linear organisiert ist (lineare Wertschöpfungsketten) und in deren Geschäftsmodellen das Lebensende ihrer Produkte, abgesehen von wenigen Ländern und Regionen, nur eine untergeordnete Rolle spielt. Aus einem billigen, massenhaft verfügbaren Rohstoff – prototypisch: Ethan/Ethylen – entsteht eine Vielzahl komplexer Produkte meist als Materialkombination durch

- Formulierung – Compounds, Blends oder Verbünde,
- Konstruktion und Montage,
- Gebrauch – Verschmutzung, Kontamination und
- Sammlung und Aufbereitung – gelber Sack, Shredderleichtfraktion

mit maximaler Dissipation – für jeden Zweck, an jedem Ort, den Bedürfnissen der Kunden entsprechend.

Thermodynamisch ausgedrückt ist dies eine systematische Entropieerhöhung. Es entstehen Produkte, die an ihrem Gebrauchs-/Lebensende zu Abfall werden, als eher wertlos betrachtet werden und derer sich der Nutzer eigentlich nur entledigen will. Dieser Weg erweist sich zunehmend als problematisch, denn im linearen Modell hat der Abfall weder eine Funktion noch einen Wert und es gibt oftmals weder Zuständigkeiten noch Verantwortlichkeiten der Wirtschaftsteilnehmer. Anders ausgedrückt: Das lineare Modell hat ein Abfallproblem.

5.2 Deponieren (Land Filling, Marine Litter, Mikroplastics)

Aber natürlich muss man sich des Abfalls entledigen, im einfachsten Fall, indem man ihn in die Umwelt entlässt.

In der EU gelangten 2016 ca. 60 Mt Kunststoffe in den Markt, ca. 27 Mt wurden als Kunststoffabfälle erfasst, kommen also kontrolliert zurück, was einem Anteil von 45 % entspricht. Hiervon wurden ca. 25 % deponiert, mit deutlichem Gefälle von Mittel- und Nordeuropa (Deponierate nahe 0) nach Osten, Süden und Westen, wo noch bis zu 75 % deponiert werden [1; 2]. Etwa 33 Mt wurden nicht erfasst, bleiben – abhängig vom Lebenszyklus der jeweiligen Produkte –

im Gebrauch oder gelangen direkt in Umwelt, werden also unkontrolliert – „wild“ – deponiert.

Da die Nutzungsphase je nach Anwendung unterschiedlich lang ist, siehe auch Bild 9 (z. B. Dämmung an Gebäuden: 20 bis 40 Jahre, Verpackung: ein Tag bis sechs Monate), gibt es keinen direkten oder einfachen Zusammenhang der Jahreszahlen von Produktion, Nutzung und Abfall. Auch bei einer regionalen Zuordnung ist zu beachten, dass Produktion, Nutzung, Verwertung, Verbrennung oder Deponierung nicht immer in der gleichen Region stattfinden.

In Deutschland gelangten 2017 11,8 Mt Kunststoffe in den Markt, 6,2 Mt (53 %) Kunststoffabfälle wurden erfasst und verwertet, lediglich 40 kt (0,3 %) wurden deponiert [5], 5,6 Mt blieben mithin in Gebrauch oder gelangen direkt in die Umwelt.

Marine Litter: Drastisch sichtbar wird die ungeordnete Entledigung in einigen Regionen der Welt an der stetig wachsenden Verschmutzung der Meere mit Plastikmüll, dem Marine Litter. 2017 wurden ca. 80 % des in die Weltmeere eingetragenen Kunststoffs durch zehn Flüsse in Asien und in Afrika eingespült [14].

Mikroplastics: Unter Mikroplastics werden Kunststoffteilchen kleiner 5 mm verstanden, die zum großen Teil durch die Fragmentierung größerer Kunststoffbauteile, Abnutzung von Funktionskleidung, dem Reifenabrieb sowie aus Kosmetika oder der natürlichen Zersetzung von Kunststoffen in der Umwelt herühren. Die Schätzungen über die Mengen weichen stark voneinander ab. Das FhG-UMSICHT schätzt [6], dass allein in Deutschland etwa 330 kt pro Jahr, zum Teil über die Abwässer, unkontrolliert in die Umwelt gelangen. Mikroplastics werden mittlerweile an den unterschiedlichsten Orten der Welt nachgewiesen: im antarktischen Eis wie in der Nahrungskette.

Ziele

- 1 Für die industrialisierten Regionen der Welt (Beispiel EU) muss es kurzfristiges Ziel sein, wildes Deponieren von Kunststoffabfällen vollständig zu unterbinden und mittelfristig Deponieren nur noch zur Beseitigung unvermeidlicher Verwertungsabfälle zu nutzen. Wir schätzen den Bedarf hierfür auf 1 % (Größenordnung) der in den Markt gehenden Mengen ab. Der Aufbau entsprechender, leistungsfähiger Abfallwirtschaftssysteme ist zu forcieren.

- 2 Für die weniger industrialisierten Regionen muss es mittelfristiges Ziel sein, zunächst einmal die Kunststoffabfälle zu erfassen und wilde Deponieren zu unterbinden. Mittel- und langfristig sind auch hier Abfallwirtschaftssysteme aufzubauen, die es gestatten, mit Siedlungsabfällen aller Art angemessen zu verfahren, mithin also auch Kunststoffabfälle einer Verwertung zuzuführen.

5.3 Energetische Verwertung (Energy Recovery)

Aufgrund ihrer molekularen Struktur sind Kunststoffe hochkalorische Materialien, die sich für eine energetische Verwertung (Verbrennung unter Energieauskopplung) eignen. Um diesen Verwertungsweg zu gehen, bedarf es zweier Voraussetzungen, die heute allerdings nur in den industrialisierten Regionen gegeben sind:

- Verfügbarkeit hierfür ausgelegter Kraftwerke bzw. Verbrennungsanlagen (mit Rauchgasreinigung), in denen damit Verbrennungsmaterialien aus fossilen Rohstoffen substituiert werden können
- ein funktionierendes Abfallwirtschaftssystem, das die Sammlung und kontinuierliche Bereitstellung definierter Mengen für diese Anlagen ermöglicht

Nachteil der Verbrennung ist die Entstehung von Kohlenstoffdioxid als wichtigstem Verbrennungsprodukt, das dabei in die Atmosphäre entlassen wird. Die Atmosphäre wird hierbei als gasförmige Deponie genutzt. Im Hinblick auf den Klimaschutz ist dies nicht nur unerwünscht, sondern zukünftig sicher auch unattraktiv, da durch Kunststoffe verursachte CO₂-Emissionen von Verbrennungsanlagen entweder bepreist oder besteuert werden dürften. Sollte es gelingen, das CO₂ aus den Rauchgasen abzufangen und stofflich zu nutzen, könnte dieser Verwertungsweg gegebenenfalls weiter genutzt werden, da er dann klimaneutral wäre (CCU, s. u.).

In der EU wurden 2016 von den oben genannten 27 Mt etwa 11,2 Mt (42 %) energetisch verwertet, was CO₂-Emissionen von etwa 35 Mt entspricht (berechnet auf Basis von Polyethylen).

In Deutschland wurden 2017 etwa 3,6 Mt, mithin 58 % der oben genannten 6,2 Mt erfasster Kunststoffabfälle, energetisch verwertet [1].

Hiervon gingen 2,1 Mt in die meist kommunalen Siedlungsabfallverbrennungsanlagen (Müllverbrennungsanlagen – MVA), die in Deutschland nach der 17. Bundesimmissionsschutz-Verordnung (BImSchV) zugelassen sind, also u. a. mit der notwendigen

Rauchgasreinigung ausgestattet sind. Die MVA sind integraler Bestandteil der in den meisten EU-Ländern installierten Abfallwirtschaftssysteme. Welchen Weg die Politik zur Erreichung der CO₂-Reduktionsziele hier gehen wird, ist derzeit offen. Offen ist also auch die zukünftige Validität dieses Verwertungswegs für Kunststoffabfälle.

Die verbleibenden 1,5 Mt wurden als Ersatzbrennstoffe in der Stahl- und der Zementindustrie genutzt, wo sie fossile Rohstoffe substituieren. Bei der Stahlherzeugung wird mit Kunststoffabfällen Koks im Hochofen substituiert, in den Drehrohröfen der Zementindustrie sind es fossile Rohstoffe ganz allgemein. Beide Prozesse sind derzeit wegen ihrer CO₂-Emissionen Teil der Klimaschutzdiskussion; die Stahlindustrie arbeitet am Ersatz des Reduktionsmittels Kohlenstoff durch Wasserstoff, welchen Weg die Zementindustrie gehen kann, deren Basisprozess das thermische Austreiben des im Kalkstein (CaCO₃) gebundenen CO₂ ist, ist noch offen. Jedenfalls werden wohl beide Prozesse mittelfristig als Senke für Kunststoffabfälle ausscheiden.

Wir schätzen, dass ca. 10 % aller Kunststoffabfälle aus unterschiedlichen Gründen auch zukünftig energetisch verwertet werden müssen, sollen sie nicht deponiert werden. Medizinische Einwegprodukte müssen aus Sicherheitsgründen kontrolliert verbrannt werden, ebenso kontaminierte Pflanzenschutzmittelbehälter und auch die Vielzahl von Sortierresten, die auf keinen sinnvollen Verwertungsweg gebracht werden können. Und irgendwann erreicht das Makromolekül sein Lebensende. Nach mehrfachem Wiederaufschmelzen auf einer Schnecke eines Extruders ist es soweit abgebaut, dass es rohstofflich oder energetisch verwertet werden sollte, um im Kreislauf zu bleiben. Auf Basis heutiger Mengen (EU: 60 Mio. t, Deutschland: 12 Mio. t; Fließgleichgewicht vorausgesetzt) müssten also thermische Verwertungskapazitäten von etwa 6 Mt (EU) bzw. etwa 1,5 Mt (Deutschland) für Kunststoffabfälle zugänglich bleiben. Die entsprechenden CCU-Kapazitäten (s. u.) liegen bei etwa 19 Mt (EU) bzw. etwa 5 Mt (Deutschland) [1].

5.4 CCU – Carbon Capture and Usage

CO₂ (Kohlenstoffdioxid) ist das höchste Oxidationsprodukt von Kohlenstoff, wichtigstes Produkt eines jeden Verbrennungsprozesses, ein reaktionsträges, chemisch stabiles Molekül, das mit einem Anteil von etwa 400 ppm an der Erdatmosphäre als Spurengas gilt, jedoch einen erheblichen Treibhauseffekt hat. Die Reduktion anthropogener CO₂-Emissionen ist eine der wesentlichen aktuellen Herausforderungen für die Erdbevölkerung. Das Pariser Klimaabkommen von 2015 hat Ziele hierfür festgelegt, zu deren

Einhaltung sich die allermeisten Signatarstaaten verpflichtet haben.

Wer zukünftig CO₂ generiert, wird es nicht einfach in die Atmosphäre entlassen können, sondern wird hierfür bezahlen müssen, es sei denn, es wird abgefangen und genutzt. Die Braunkohle verfeuernden Energieerzeuger haben dies mit der Installation von Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) in ihren Kraftwerken exemplarisch für das Auffangen und die Verwertung von SO₂ vorexerziert (Bild 11); daraus ist eine veritable Industrie entstanden, die Teile des Baugewerbes revolutionierte (Trockenbau mit Gipskartonplatten). Das abgefangene CO₂ ist zu reduzieren (zu Methan, Methanol, Formaldehyd oder Ameisensäure) und kann dann in der Chemie und Kunststoffherzeugung wieder genutzt werden. Im Ergebnis kann der Kohlenstoff wieder in den Kreislauf eingespeist werden. Damit kann die Verbrennung letztlich zu einer stofflichen Nutzung führen.

Entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind im Gange (Kopernikus, Power-to-Gas etc.), sie sind in einem ganzheitlichen Konzept der Kunststoffabfallverwertung zu berücksichtigen, da anders die energetische Verwertung nicht stofflich verwertbarer Abfälle keine Perspektive hat.

5.5 Werkstoffliches Recycling (Mechanical Recycling)

Das werkstoffliche Recycling (Bild 14) ist aktuell der Königsweg für die Kreislaufführung thermoplastischer Kunststoffe, da sie wieder aufgeschmolzen und neu in Form gebracht werden können. Im Idealfall

wird dabei ein Sekundärrohstoff (Rezyklat – Recycled Material) einem Primärrohstoff (Neuware – Virgin Material) auf einem Extruder beigemischt, substituiert diesen also. Resultat ist eine rezyklathaltige Neuware, eine R-Type, wie sie viele Kunststoffherzeuger mittlerweile im Sortiment haben, die spezifiziert ist und sich wie gewohnt verarbeiten lässt.

Beide Verfahrensschritte erfolgen auf der Schnecke eines Extruders, wo die unterschiedlichen Materialien elektrisch aufgeheizt und homogenisiert werden. Es ist dies ein wiederholter mechanischer und thermischer Energieeintrag (mechanisch-thermische Belastung), der zu vielen Kettenabbrüchen (physikalischer Abbau/Degradation) in den Makromolekülen des Materials führt. Tendenziell verschlechtern sich dadurch die Werkstoffeigenschaften. Dem kann aus heutiger Sicht mit verschiedenen Maßnahmen begegnet werden:

- möglichst schonende Extrusion (Schnecken-geometrie, Temperaturführung etc.)
- Einsatz von Inhibitoren – Chemikalien zur Minimierung des Kettenabbruchs
- parallele Kettenaufbaureaktionen – vorzugsweise bei Polykondensaten wie PA, PET
- Rezepturoptimierung – Verdünnungsstrategie

Voraussetzung für die Substitution von Neuware und die Aufnahme in ein Liefersortiment ist die konstante Verfügbarkeit aufbereiteter, sauberer und sortenreiner Kunststoffabfälle. Diese sind kontinuierlich zu sammeln, zu sortieren, zu reinigen bzw. zu dekontaminieren, zu mahlen, zu agglomerieren oder zu compoundieren, zu prüfen, schließlich zu spezifizieren.

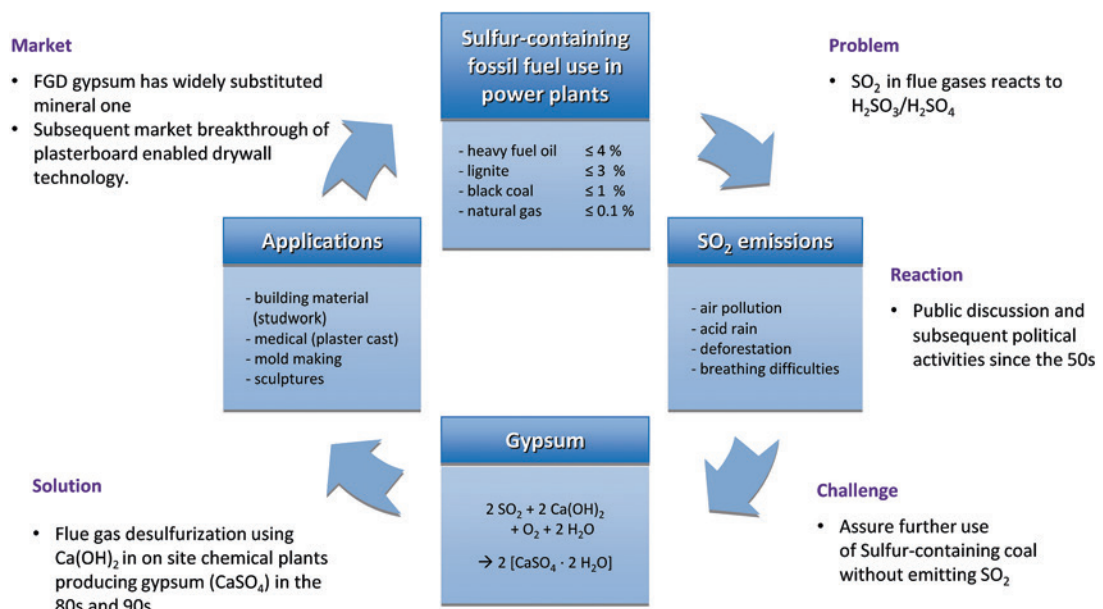


Bild 11. Learning from the Past (Quelle: Dr. Peter Orth and Manfred Rink, November 2019)

Exemplarisch verwirklicht ist die Generierung eines solchen qualitätsgesicherten Rohstoffs aus Kunststoffabfällen für PET-Getränkeflaschen. Daraus hergestelltes Rezyklat wird mittlerweile routinemäßig – der Neuware beigemischt – für die Herstellung der Flaschen-Preforms eingesetzt. In diesem Zuge ist es auch zu einer weitgehenden Standardisierung der PET-Neuware gekommen. Eine Entwicklung, die nach unserer Einschätzung ohne den Druck großer Getränkeabfüller und Einzelhändler kaum stattgefunden hätte und die zum Prototyp eines geschlossenen Kreislaufs geworden ist.

Der Automobilhersteller Renault setzte 2016 in seinen Neufahrzeugen etwa 60 kt Rezyklat wieder ein, ganz überwiegend PP, daneben aber auch PE, PA, PET und ABS. Das PP stammt aus Stoßfängern, der größten Kunststoffanwendung im Auto, die in der Regel in Werkstätten gesammelt werden. In dieser Anwendung wird seit einigen Jahren nur mehr weitgehend standardisiertes PP eingesetzt, sodass die Typizität des Materials gewahrt bleibt. Hinderlich für den Recycling-Prozess ist jedoch die von Styling und Markt gewünschte Lackierung der Stoßfänger in Wagenfarbe. Der Lack ist eine Kontaminante im Kunststoff, die aufwendig entfernt werden muss, was nur mit hohem Aufwand vollständig gelingt. PP-Rezyklate dieser Herkunft können daher kaum wieder in Stoßfängern eingesetzt werden.

In Deutschland, wie in weiten Teilen Europas, sammeln die Verbraucher ihre Leichtverpackungsabfälle in Gelben Säcken oder Tonnen, damit leisten sie Sortierarbeit, ein wichtiger energetischer Beitrag zur Reduzierung der Entropie. Im Gelben Sack findet sich die Gesamtheit aller Kunststoffverpackungsabfälle, behaftet mit den unterschiedlichsten Problemen:

- sortenreine Kunststoffe wie PE (Folien, Flaschen ...), PP (Folien, Schalen, Becher Kapfen ...), PET (Flaschen, Schalen, Blister ...), SAN (Schalen ...), PS (Becher, Schäume ...) u. v. a. m. als Mischung
- Verbünde unterschiedlicher Kunststoffe (Folien oder Behälter), in Form von Etiketten oder Bänderolen, Paper-/Aluminium/Kunststoffverbünde (Getränkekartons), RFIDs u. v. a. m.
- Pigmente und andere Füllstoffe sowie Druckfarben, die der Eigenschaftseinstellung, der Markenidentität, der Verbraucherinformation oder weniger sinnvollen Zwecken dienen
- Füllgüter aller Art oder Lebensmittelreste

Die meisten dieser Probleme lassen sich während der verschiedenen Verfahrensschritte des Recyclings lösen, jedoch muss der Aufwand ökonomisch und ökologisch gerechtfertigt werden. Nicht alle Rezyklate

taugen derzeit zur Neuwaren-Substitution, für sie sind eigenständige Anwendungen zu finden.

Von den 2016 in der EU erfassten Kunststoffabfällen von 27 Mt wurden 8,4 Mt werkstofflich verwertet, hiervon 5,3 Mt (20 %) innerhalb der EU, 3,1 Mt (11 %) außerhalb der EU [1]. Die entsprechenden Zahlen für Deutschland 2017 [5]: Von 6,2 Mt erfassten Kunststoffabfällen wurden 1,9 Mt (31 %) im Inland und 0,6 Mt (10 %) im Ausland werkstofflich verwertet. Die innerhalb der EU bzw. innerhalb Deutschlands hergestellten Rezyklate gingen zurück in den Markt. Die Auslandsmengen gingen überwiegend zur Verwertung in die VR China, die jedoch den Import von Kunststoffabfällen zu Beginn 2018 stoppte. Andere Länder in Südostasien, vor allem die, die seither einen Teil davon übernahmen, schließen nacheinander ihre Grenzen. In der Konsequenz muss mehr energetisch verwertet oder es müssen zusätzliche Recycling-Kapazitäten aufgebaut werden.

5.6 Rohstoffliche Verwertung (Feedstock Recycling)

Aus heutiger Sicht wird ein sehr großer Teil der Kunststoffabfälle nicht werkstofflich verwertet werden können. Aus unserer Sicht werden dies mehr als 40 % sein. Wie oben bereits angesprochen, ist der dafür zu treibende Aufwand für Sammlung, Demontage, Sortierung, Auftrennung von Verbünden aller Art, Reinigung und Dekontamination, Qualitätssicherung, Sortierung etc. weder ökonomisch noch ökologisch vertretbar. Typische Kontaminationen sind Lebensmittelreste, wie bei Verpackungen, oder Betriebsmittel, wie bei Kunststoffkraftstoffbehältern. Manche Kunststoffteile korrodieren, der Werkstoff ist also einem Abbauprozess unterworfen. Auch Kunststoffgemenge lassen sich nicht immer sinnvoll trennen. Dann bietet sich der Verwertungsweg des rohstofflichen Recyclings an, also des gezielten Abbaus der Makromoleküle durch Pyrolyse oder Vergasung und die Einspeisung in petrochemische Prozesse für Chemie oder Kunststoffherzeugung, also die Kreislaufschließung.

Eine Reihe der oben genannten Unternehmen der Kunststoffherzeugung, Chemie und Petrochemie hat daher Projekte zur rohstofflichen Verwertung von entweder sortenreinen oder gemischten Kunststoffabfällen aufgelegt. Dies sind oft Kooperationen mit Chemie-Start-ups, Konsortien von Unternehmen verschiedener interessierter Branchen, Projekte mit Forschungsinstitutionen etc. Abhängig von der Problemstellung sind die Ziele sehr unterschiedlich:

- Im Falle sortenrein anfallender Polyaddukte (typischerweise PUR) ist es möglich, Vorprodukte (Building Blocks) durch Methanolyse oder Glykolyse zurückzugewinnen, die mit vertretbarem

Aufwand wieder in die chemische Produktion einfließen können.

- Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Hersteller von Polystyrol, die beabsichtigen, aus diesem Polymer durch katalysierten Abbau Styrol bzw. Ethylbenzol zurückzugewinnen, das ebenfalls wieder in die Neuwaren-Synthese einfließen soll.
- Gemischte und verunreinigte Kunststoffabfälle werden einem pyrolytischen Abbauprozess unterworfen, mit dem Ziel, Pyrolysegase bzw. -öle mit möglichst hohem Anteil kurzkettiger Kohlenwasserstoffe zu erzeugen, die in die oben genannten petrochemischen Prozesse einfließen und somit als universeller Rohstoff für die Kunststoffherzeugung fungieren sollen.
- Gemischte und verunreinigte Kunststoffabfälle werden einem Vergasungsprozess unterworfen (Festbett-, Wirbelschicht oder Flugstromvergasung) mit dem Ziel, Synthesegas zu erzeugen, das wiederum zur Methanol-Synthese eingesetzt werden kann.

Manche dieser Arbeiten stehen noch relativ am Anfang (Pyrolyse), andere können auf vielfältige Erfahrungen zurückgreifen (Vergasung). TRL (Technology Readiness Level) wurden in einer kürzlich erschienen Studie von KIT und Conversio abgeschätzt [12]. Ihr Schwerpunkt liegt auf der chemischen und verfahrenstechnischen Entwicklung, die – so erfolgreich – langfristig zur Konzipierung und zum Bau chemischer Großanlagen führen wird. Entsprechende Förderprogramme auf nationaler und EU-Ebene sollten dies unterstützen. Von den Unternehmen, die sich auf diesem Gebiet engagieren, seien die BASF, Borealis/OMV, Neste, Sabic und Total sowie Ube/Ebara genannt.

5.7 Gesamt mengen betrachtung

Wir beschäftigen sich in diesem Kontext regelmäßig nur mit den jährlich erfassten Kunststoffabfällen in Deutschland und der EU – große Mengen, zweifellos, aber doch nur ein Bruchteil der in unserer Region und anderswo in den Markt gelangenden Kunststoffmengen. Jambeck et al. [2] betrachten hingegen die Gesamtheit der weltweit produzierten und vermarkteten Kunststoffe und ihren Verbleib:

- **Vergangenheit:** Zeitraum von 1950 (dem Beginn der industriellen Produktion von Kunststoffen) bis 2015
Bislang wurden insgesamt 8.900 Mt Kunststoffe (8.300 Mt Neuware, 600 Mt Rezyklat) produziert, von denen 2.600 Mt (29 %) noch in Gebrauch sind, während 6.300 Mt (71 %) zu Abfällen wurden. Hiervon gelangten 4.900 Mt auf Deponien

aller Art oder auch unkontrolliert in die Umwelt, während 800 Mt energetisch verwertet oder schlicht verbrannt und 600 Mt stofflich verwertet wurden.

- **Zukunft:** auf Grundlage halbwegs plausibler Annahmen für den Zeitraum von 2015 bis 2050, also für die nächste Menschengeneration, um einen traditionellen Zeitbegriff zu gebrauchen
Die erwartete Gesamtmenge der zu produzierenden Kunststoffe wird zu 43.000 Mt abgeschätzt, davon 34.000 Mt Neuware (80 %) und 9.000 Mt Rezyklate (20 %). Hiervon sollen 2050 noch 10.000 Mt in Gebrauch (23 %) sein, während 33.000 Mt (77 %) zu Abfällen geworden sein werden. Von diesen wiederum werden 12.000 Mt in die Umwelt gelangen, weitere 12.000 Mt werden verbrannt werden und 9.000 Mt schließlich stofflich verwertet werden.

Die Annahmen (s. o.) und unsere daraus resultierenden Ergebnisse werden kontrovers diskutiert, sie bilden jedoch den ersten publizierten Ansatz dieser Art und vermitteln jedenfalls eine Vorstellung von der Dimension der Herausforderungen vor denen Gesellschaft, Wirtschaft und Industrie und jeder einzelne Bürger stehen. Wir alle haben ein gigantisches Umweltproblem, das sich aufgrund unseres Handelns stetig vergrößert, das wir aber nur lösen werden, wenn wir den dissipierten Kunststoff in all seinen Erscheinungsformen nicht mehr nur als Abfall, also als Problem, sondern als Rohstoff, also als Chance verstehen, und alle Anstrengungen unternehmen, diesen Rohstoff wieder zu nutzen.

In einem utopischen Szenario wäre der Markt eines Tages gesättigt und der dann benötigte Kunststoff könnte ganz überwiegend durch stoffliche Verwertung und Einsatz von Sekundärrohstoffen erzeugt werden. Vor dem Hintergrund der Endlichkeit der Ressourcen unseres Planeten und der räumlichen Beschränktheit unserer Ökosphäre ist diese Utopie eine schlichte, aber für viele auch bittere Notwendigkeit.

Laut einer anlässlich der K 2019 im Oktober 2019 veröffentlichten Conversio-Studie für 2018 wurden weltweit etwa 360 Mt Polymere (Neuware) plus 30 Mt Rezyklat, also insgesamt 390 Mt Polymere produziert und etwa 385 Mt zur Produktion in die Märkte gegeben und eingesetzt. Im selben Jahr fielen 250 Mt Kunststoffabfälle an, von denen 173 Mt gesammelt wurden. Davon wurden 50 Mt werkstofflich rezykliert, bei 51 Mt der Energieinhalt durch Verbrennung genutzt und 72 Mt wurden deponiert. 77 Mt wurden unkontrolliert in die Umwelt gegeben, sei es als Verlust während der Produktion oder während oder nach der Nutzung. Zu beachten ist, dass kein exklusiver Zusammenhang zwischen der 2018 produzierten und der für das gleiche Jahr genannten

Kunststoffabfallmenge (bedingt durch die zum Teil mehrjährige Nutzungsdauer) besteht.

Wäre 2018 keine Neuware produziert worden, so wären doch Kunststoffe als Abfall angefallen. (Laut Jambeck et al. [2] wurden bis 2015 4.900 Mt Kunststoffe in der Umwelt belassen, also das 13-Fache der Neuwareproduktion 2018 – ein gigantisches Reservoir.)

5.8 Produktgestaltung

Die jeweiligen Wertschöpfungsketten und ihre produzierenden Glieder haben wesentlichen Einfluss auf die Verwertbarkeit ihrer Produkte und dafür zu treibenden finanziellen, logistischen und energetischen Aufwand. In diesem Zusammenhang wird an anderer Stelle die nachsorgende Produzentenverantwortung zu diskutieren sein.

Im Folgenden seien Beispiele für eine ganzheitlich orientierte Produktgestaltung aufgeführt:

- Standardisierung – Festschreibung bestimmter Typen für bestimmte Anwendungen, z. B. für blasgeformte Hohlkörper (Flaschen, Kanister etc.), siehe das oben genannte Beispiel PET
- Monomaterial-Lösungen – Ersatz komplexer Multimaterialverbünde (Fleisch-/Käseverpackungen, Verbundkartons) durch intelligente Kombination verschiedener Typen einer Kunststoffsorte, z. B. bei der Folienextrusion
- Farbgestaltung – Verzicht auf funktionslose farbliche Differenzierung von Behältern etc. und damit auf den daraus resultierenden Zwang, schwarz eingefärbte Rezyklate zu produzieren
- Kennzeichnung – Erkennbarkeit von Kunststoffsorten durch Kennzeichnung auf molekularer Ebene, z. B. eine Codierung mit Fluoreszenzfarbstoffen
- Oberflächenveredlung – ursprünglicher Sinn einer Lackierung, Verchromung etc. – ist der Schutz des Substrats vor Umwelteinflüssen, auf aufwendige Lackierung vieler Kunststoffteile kann verzichtet werden (z. B. Stoßfänger, s. o.)
- Demontage – Verzicht auf nicht demontierbare Verkleidungen und Gehäuse, stattdessen Verwendung einfacher konstruktiver Lösungen
- Reparierbarkeit – einfacher und preiswerter Austausch von Verschleißteilen, z. B. Akkus oder Glasabdeckungen bei Smartphones

Die genannten Vorschläge beziehen sich ausschließlich auf das Design-for-Recycling von Kunststoffanwendungen. Ein ganzheitlicher Ansatz muss u. a. Prozesse in Produktion, Distribution (stationärer Handel und Online-Handel), Logistik, Abfallwirtschaft betrachten. Darüber hinaus sind rechtliche Fragen zu stellen, Konsumgewohnheiten und das Verbraucherverhalten zu berücksichtigen und gegebenenfalls zu korrigieren und zu guter Letzt eine ganzheitliche Öko- und Kostenbilanzierung vorzunehmen.

6 Life Cycle Assessment und Kreislaufwirtschaft

6.1 Ziel

Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment – (LCA), Bild 12, oder Ökobilanz hat zum Ziel, die umweltrelevanten Auswirkungen von Produktion, Nutzung und Entsorgung von Waren und Dienstleistungen zu berechnen sowie sichtbar und vergleichbar zu machen.

6.2 Methodik

Es gibt verschiedene Leitfäden und Methoden, basierend auf DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044, die international nicht immer harmonisiert sind [7]. Die Durchführung von LCAs wird von verschiedenen Unternehmen im Markt angeboten. Grundlage jedes LCAs sind Daten und Algorithmen. Bei den Daten wird zwischen Primär- und Sekundärdaten unterschieden. Primärdaten werden direkt an der eigenen Maschine gemessen, Sekundärdaten stammen von Lieferanten oder aus einer (kommerziellen) Datenbank. Auf Basis dieser Daten berechnet eine Software (Algorithmus) dann die Auswirkung auf verschiedene Umweltauswirkungen wie CO₂-Belastung, Ressourcenverzehr oder Landverbrauch.

6.3 Bedeutung

LCAs sind für die Kreislaufwirtschaft von kaum zu überschätzender Bedeutung, da nur fundierte und

allgemein akzeptierte Berechnungen der Umweltwirkung von Produktion und Gebrauch von Waren und Dienstleistungen die Grundlage für eine sinnvolle, umweltfreundliche Optimierung der Lebenszyklen bieten. Auch bieten sie, entsprechend aufbereitet, das Potenzial für eine verlässliche Orientierung für Verbraucher und die Partner in der Lieferkette. Darüber hinaus bieten LCAs firmenintern Nutzen in der Strategieentwicklung, in Forschung und Entwicklung, in der Produktion sowie im Einkauf, im Marketing und im Vertrieb. Nur mit LCAs werden wir in der Lage sein, die notwendigen Entscheidungen in zirkulären Wertschöpfungsketten zu treffen.

6.4 Herausforderungen

Neben der Beherrschung der Komplexität der Stoffströme (Art und Menge der benötigten Energie, der Werkstoffe und Herstellverfahren, zeitliche und räumliche Zuordnung) sowie der Beurteilung der jeweiligen Umweltauswirkungen ist oft der Zugang zu den (Sekundär-)Daten sehr schwierig, da damit vertrauliches Firmenwissen verbunden sein kann.

Wir sehen mit den Fortschritten in der Digitalisierung (Industrie 4.0) und damit verbundenen neuen Möglichkeiten der Datenerfassung und -interpretation – im Gegensatz zu früheren Ansätzen – die Chance, LCAs zu einer auch in mittelständischen Unternehmen etablierten und akzeptierten Methode werden zu lassen.

LCA is a methodology to assess environmental impacts associated with all the stages of a product's life

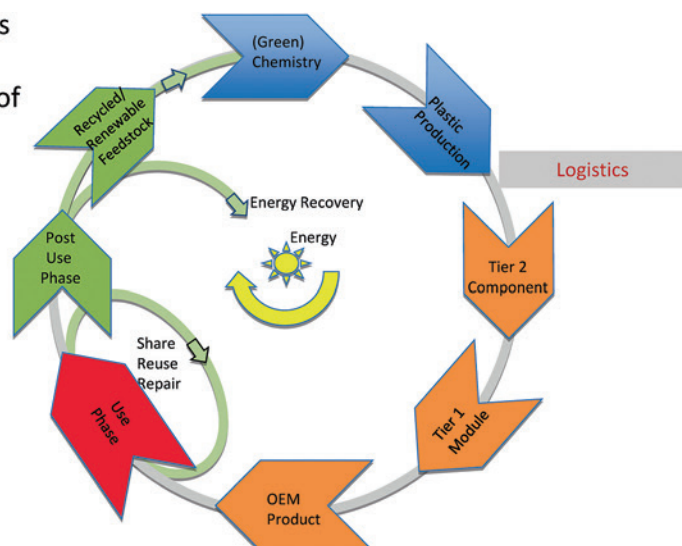


Bild 12. Circular Economy – Life Cycle Assessment (Quelle: Dr. Peter Orth and Manfred Rink, November 2019)

7 Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft

7.1 Bedeutung

Um die Ziele einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft zu erreichen, sind neben einer recyclinggerechten Konstruktion von Bauteilen und Komponenten sowie einem schonenden Umgang mit den Produkten während der Nutzungsphase effiziente Sammlungs- und Sortierschritte notwendig. Für die Optimierung dieser Prozesse sowie die sich daran anschließende Verwertung ist eine Vielzahl von Informationen über die Produkte und Prozesse im Kreislauf notwendig. Schon heute sind in den linearen Wertschöpfungsketten neben den eigentlichen Produkten die dazugehörigen Informationen das wichtigste Gut. In jedem Schritt des gesamten Lebenszyklus eines Produkts werden Informationen zu den verwendeten Werkstoffen sowie den Herstellverfahren generiert und zum Teil heute schon für vorhandene firmeninterne und externe Datenbanken (z.B. Produktdatenblätter, LCAs, REACH) zur Verfügung gestellt. Diese Informationen müssen nicht nur gesammelt, sondern auch so bearbeitet werden, dass sie den jeweiligen Kreislaufbeteiligten rechtzeitig und sinnvoll aufbereitet, für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen.

Eine Studie des BMUB von 2016 [8] verweist darauf, dass kein Umweltleitmarkt so stark von der Digitalisierung profitieren könne wie die Kreislaufwirtschaft – und dass gleichzeitig kein Sektor bisher so schlecht aufgestellt sei [9].

7.2 Verwertung

Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen ist nur möglich, wenn die Daten der Zusammensetzung, also der Typ des Kunststoffs und der eingesetzten Zuschlagstoffe, bekannt sind. Es ist eine große Heraus-

forderung, diese Informationen an das Produkt so zu koppeln, dass auch nach vielen Jahren des Gebrauchs eine eindeutige Identifizierung möglich ist. Nachträglich lassen sich diese Informationen ansonsten nur mit aufwendigen Analysen generieren.

7.3 Automatisierung

Automatisierte Verfahren werden zunehmend in der Sortierung von Kunststoffabfällen eingesetzt. Dabei spielen optische Erkennungs- und Identifizierungssysteme, die auf entsprechende Datenbanken zurückgreifen, eine wichtige Rolle.

7.4 Synergien

Die Digitalisierung eröffnet Möglichkeiten für eine bessere Vernetzung und Abstimmung der Akteure innerhalb zukünftiger zirkulärer Wertschöpfungsketten und für daraus resultierende neue Geschäftsmodelle. Nicht alle der heutigen Akteure in den Wertschöpfungsketten sind aber auf die Möglichkeiten und Herausforderungen einer digitalisierten Kreislaufwirtschaft vorbereitet.

7.5 Life Cycle Assessment (LCA)

Die Beurteilung der Umweltwirkung von Produkten kann über LCAs durchgeführt werden (s. o.). LCAs sind essenziell für die Entwicklung und Durchführung von Kreislaufwirtschaftssystemen und umweltfreundliche Produkte. LCAs sind ohne entsprechende Daten über z. B. die verwendeten Werkstoffe und Herstellverfahren nicht machbar. Die Digitalisierung eröffnet hier neue Möglichkeiten.

8 Logistik und Kreislaufwirtschaft

8.1 Bedeutung der Logistik für die Kreislaufwirtschaft

Ohne Logistik keine Kreislaufwirtschaft. Logistikdienstleister (LDL) verbinden die einzelnen Glieder jeder Wertschöpfungskette durch Steuerung der Waren- und Informationsflüsse sowie dem Transport der Güter und ihrer Lagerung. Dabei wird unterschieden zwischen Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik mit jeweils darauf spezialisierten Unternehmen. Die Kreislaufwirtschaft stellt hinsichtlich ganzheitlicher Vorgehensweise, Effizienz und Sicherheit neue Herausforderungen an die LDL. Dabei planen, steuern und kontrollieren LDL schon jetzt zunehmend übergreifend die Wertschöpfungsketten und sind damit ein wesentlicher Faktor zur Etablierung effizienter Kreislaufsysteme. Die richtige Wahl umweltfreundlicher Transport- und Verpackungsmittel, optimierter Routen und energieeffizienter Logistikumschlags- und Lagerzentren sind dabei, neben Pünktlichkeit, niedrigen Kosten und Sicherheit, von zunehmender Bedeutung.

8.2 Beschaffungslogistik

Der Begriff umfasst den Prozess vom Wareneinkauf bis zum Transport des Materials oder der Bauteile zum Eingangslager oder zur Produktion. Mit dem Wareneinkauf wird wesentlich auf die Umweltfreundlichkeit der weiteren Schritte Einfluss genommen. Informationen über die Kreislauffähigkeit und Umweltwirkung der eingekauften Waren werden zunehmend bedeutsam.

8.3 Produktionslogistik

Damit sind im Wesentlichen die innerbetrieblichen Transport-, Umschlag-, und Lagerprozesse gemeint. In der Kunststoffproduktion und -verarbeitung kommt es dabei immer wieder zu unkontrollierten Verlusten von Kunststoffgranulat in die Umwelt. Über die Abwasserentsorgung können diese dann letztlich ins Meer (Marine Litter) gelangen. Mit der „Zero Pellet Loss Initiative“ ist die europäische Kunststoffindustrie dieses Problem angegangen.

8.4 Absatz- oder Distributionslogistik

Sie verbindet die Produktion mit der nächsten Stufe in der Wertschöpfungskette, z. B. den Spritzgießbetrieb mit dem Systemlieferanten, OEM oder direkt mit dem Verbraucher. Hier werden zunehmend, neben allgemeinen Informationen zu der Ware, kreislaurelevante Informationen (Art der verwendeten Werkstoffe und deren Inhaltsstoffe, Demontagehinweise etc.) angefordert und weiterzugeben sein.

8.5 Rücknahme- oder Entsorgungslogistik

In Europa sind die Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten dazu verpflichtet, sämtliche Geräte zurückzunehmen und zu verwerten. Dies regelt die EU-Richtlinie WEEE. In Deutschland wurde hierfür ein sogenanntes Elektroaltgeräteregister (EAR) aufgebaut. Dazu bieten Firmen wie GEODIS die Übernahme der Rücknahmelogistik sowie der Aufbereitung und Verwertung an. Falls möglich, werden Geräte repariert und wiederverkauft oder, falls nicht ökonomisch reparierbar, werden die verbauten Werkstoffe separiert und in den Kreislauf zurückgeführt. Diese Vorgehensweise wird auch in anderen Branchen, wie der Automobilindustrie angewandt und orientiert sich an den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft.

8.6 Bedeutung der Logistik für die deutsche Wirtschaft.

Die Logistik ist in Deutschland mit rund 267 Mrd. Euro Umsatz in 2017 der größte Wirtschaftsbereich nach der Automobilwirtschaft und dem Handel [11]. Nur knapp die Hälfte der logistischen Leistungen, die in Deutschland erbracht werden, besteht in der gemeinhin sichtbaren Bewegung von Gütern durch Dienstleister. Die andere Hälfte findet in der Planung, Steuerung und Umsetzung innerhalb von Unternehmen statt. Im Bereich der logistischen Dienstleistungen agieren etwa 60.000 Unternehmen, die ganz überwiegend mittelständisch geprägt sind, zu denen aber auch sehr große internationale Marktführer gehören, wie Deutsche Post DHL (Deutschland 9 Mrd. Euro, EU 25 Mrd. Euro), DB Mobility Logistics AG (Deutschland 7,3 Mrd. Euro), Kühne + Nagel (Deutschland 2,7 Mrd. Euro) (Zahlen für 2016) [10], siehe auch Bild 13.

68 Milliarden € Umsatz	712.000 Beschäftigte	1/4 aller Logistikzentren	9 von 25 in NRW
348.500 Beschäftigte in der 24.000 deutschen Logistikunternehmen erwirtschaften einen Umsatz von 68 Milliarden €	Inklusive der Logistikaufgaben in Handel und Industrie beschäftigt die Branche über 712.000 Menschen.	Rund ein Viertel aller Logistikzentren in Deutschland befindet sich in NRW, wie zum Beispiel Amazon, Esprit, TK Maxx, Zalando.	Von den Top 25 der größten Logistikunternehmen in Deutschland (nach Inlandsumsatz) haben 9 ihren Hauptsitz in NRW.

Bild 13. Quick Facts zur Logistik in NRW (Quelle: VDI e.V., April 2020)

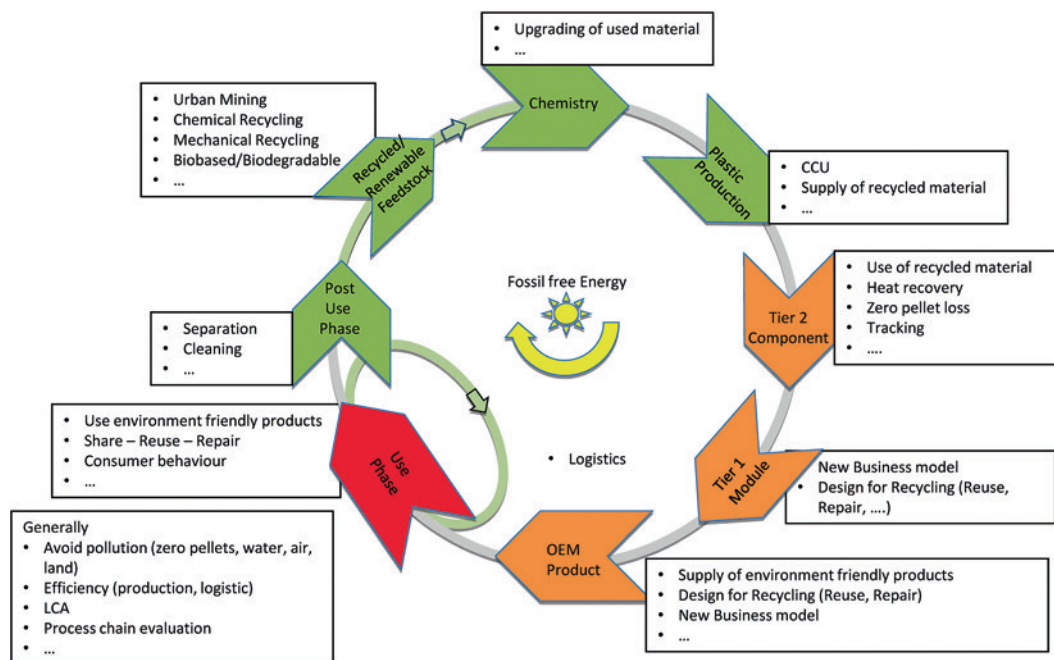


Bild 14. A Circular Economy needs Research and Education (Quelle: Dr. Peter Orth and Manfred Rink, November 2019)

8.7 Regulatorischer Rahmen

Am Anfang (1986) stand das mit dem Namen des damaligen Bundesumweltministers Klaus Töpfer verbundene „Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz“ (KrWAG), mit dem zwar der Begriff Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) in die Welt kam, dass aber eigentlich das erste umfassende Abfallgesetz in Europa war. Es setzte den Rahmen für das heute in Deutschland etablierte Abfallwirtschaftssystem. Das KrWAG wurde zuletzt novelliert 2012 und trägt seither den etwas irreführenden Namen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Zweck des KrWG ist die Schonung natürlicher Ressourcen u. a. durch Recycling und sonstiger stofflicher Verwertung von Abfällen. Diese sollen zunächst vermieden, gegebenenfalls stofflich oder energetisch verwertet, Reste behandelt und nach Volumenreduktion beseitigt werden. Wertstoffe sollen getrennt, gesammelt und gegebenenfalls sortiert werden. Nicht verwertbare Sortierreste sind zur Vernichtung von Schadstoffen zu verbrennen, die Schlacke ist zu beseitigen. Die im Rahmen dieses Konzepts errichteten Müllverbrennungsanlagen unterliegen dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und hier

insbesondere der 17. BImSchV für Abfallverbrennungsanlagen. Wegweisend war die Formulierung der Produzentenverantwortung nach dem Verursacherprinzip – mit dem Vorläufer Verpackungsverordnung – und sich daraus ergebender Rücknahmeverpflichtungen, wofür der Grüne Punkt des Dualen System Deutschland (DSD) zum Symbol wurde – nach und nach in fast ganz Europa, siehe auch Bild 14.

Die „Abfallrahmenrichtlinie“ (Waste Framework Directive – WFD, Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle) war die erste Rahmenrichtlinie der EU, in der diese Ansätze konsequent aufgegriffen und fortentwickelt wurden. Im Zentrum steht die sogenannte Abfallhierarchie:

- Vermeidung
- Wiederverwendung
- Recycling (werkstoffliche Verwertung)
- sonstige Verwertung (energetische Verwertung)
- Beseitigung

Sie wurde zum Paradigma aller folgenden europäischen Richtlinien und nachfolgender nationaler Gesetzgebungen, so für Verpackungsabfälle (VerpackG (s. u.) sowie Richtlinie 94/62/EG), Altfahrzeuge (Altfahrzeugverordnung sowie Richtlinie 2000/53/EG; IMDS-System der Automobilindustrie), Elektro- und Elektronikgeräte (Elektrogeräte-Gesetz – ElektroG basierend auf der WEEE-Richtlinie; Elektroaltgeräte-register der E&E-Industrie – EAR) u. v. a. m.

Im Rahmen ihrer strategischen Planung Umwelt ist die EU auf weiteren, dem Abfallregime (End-of-life regulation) verwandten Feldern aktiv, so:

- Green Procurement
- Resource Efficiency Regulation
- Product Safety Regulation (REACH)
- Energy Efficiency Regulation (Eco-Design)
- Climate Protection Regulation
- Plastics in a Circular Economy (2018)

Letztere (European Strategy for Plastics in a Circular Economy) formuliert ein ganzes Bündel von Maßnahmen und Empfehlungen an nationale und regionale Behörden sowie Aufforderungen an die Industrie, u. a.:

- Verbesserung des Produktdesigns
- Erhöhung des Rezyklatanteils
- Verbesserung der getrennten Sammlung von Kunststoffabfällen
- Verringerung von Einwegkunststoffen
- Vermeidung des Eintrags von Abfällen in die Meere
- kompostierbare und biologisch abbaubare Kunststoffe
- Eindämmung der Umweltverschmutzung durch Mikroplastik

Diese in der Weiterentwicklung befindliche Strategie wird seit 2018 mit einer Vielzahl von Richtlinien, Verordnungen und Kommunikationen der Kommission verfolgt und sukzessive in nationales Recht umgesetzt, hat also bindenden Charakter. Die Industrie aller Bereiche wird zu Selbstverpflichtungen aufgefordert, wo dies nicht erfolgt, wird Regulierung ange-

kündigt. Auch dieser Prozess ist in Gang gekommen, eine Reihe von Selbstverpflichtungen – einschließlich eines Verpflichtungsrahmens – aus der Europäischen Kunststoffindustrie liegen vor. So für:

- PVC (VinylPlus®),
- PET (PetcoreEurope)
- PE/PP (Polyolefins Circular Economy Platform Europe – PCEP Europe)
- Bodenbeläge (Circular Carpet Platform – Polyester, PP and PA)
- Weitere in Vorbereitung

Das zum 01.01.2019 – in Nachfolge der Verpackungsverordnung (VerpackV) – in Kraft getretene deutsche Verpackungsgesetz (VerpackG) ist auf dem oben skizzierten Weg weit fortgeschritten. Es richtet sich an Hersteller, Online-Händler und Unternehmen, die wiederverwertbare Verpackungen in Umlauf bringen und verpflichtet diese, sich in der Zentralen Stelle Verpackungsregister (ZSVR) zu registrieren. Diese hoheitlich beliehene, private Stiftung von Kunststoffindustrie und Handel übernahm zum 01.01.2019 eigenverantwortlich Organisation, Umsetzung und Überwachung der gesetzlichen Vorgaben.

Die wichtigsten Regelungen

- Quoten für werkstoffliche Verwertung (Recycling) von Verpackungen,
 - davon Kunststoffe:
 - 58,5 % ab 2019
 - 63,0 % ab 2022
- Einweg-/Mehrwegkennzeichnung
- neue Pfandregelungen
- Registrierung bei der „Zentrale Stelle Verpackungsregister“
- Systembeteiligung bei einem Dualen System
- Differenzierung der Grüne-Punkt-Lizenzgebühr nach Rezyklierbarkeit
- Vertriebsverbote und Bußgelder bei Verstößen

Literatur

- [1] PlasticsEurope: Plastics the Facts, 2018
- [2] Geyer, Jambeck, Law: Sci. Adv. 2017; 3:e1700782 19 July 2017
- [3] IEA: The Future of Petrochemicals
- [4] WWF: Das große Wegschmeissen, 2015
- [5] Conversio: Global Plastics Flow 2018, October 2019
- [6] FhG-Umsicht: Kunststoffe in der Umwelt Mikro- und Makroplastik, 2018
- [7] Henkel: Einführung in die Lebenszyklusanalyse
- [8] BMUB: Digitalisierung der GreenTech-Branche lohnt sich. Pressemitteilung Nr.297/16
- [9] Wuppertal Institut: inbrief 04/2017
- [10] Fraunhofer Statista 2017: Top 25 der größten Logistikunternehmen in Deutschland/Logistik-Watchblog
- [11] Bundesvereinigung Logistik BVL Website 2019
- [12] FhG-UMSICHT: Website 2019
- [13] Lebreton et al: River plastic emissions to the world's oceans, Nature Comm. 8, 2017

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol – thermoplastischer Kunststoff	PA	Polyamid – thermoplastischer Kunststoff
BMC	Bulk Moulding Compoind – Glasfaserpressmasse mit duroplastischer Matrix	PAN	Polyacrylnitril – thermoplastischer Kunststoff
BR	Butadiene Rubber – Butadienkautschuk	PBT	Polybutylenterephthalat – thermoplastischer Kunststoff
CFK	kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe	PC	Polycarbonat – thermoplastischer Kunststoff
CR	Chlorine Rubber – chlorierter Kautschuk	PET	Polyethylenterephthalat – thermoplastischer Kunststoff
C4-Fraktion	Olefin-Fraktion mit vier C-Atomen (Butan, Iso-Butan, Buten, Isopren, Butadien)	PI	Polyimid – duroplastischer Kunststoff
ENI	Ente Nazionale Idrocarburi – italienischer Öl- und Petrochemiekonzern	PMMA	Polymethylmethacrylat – thermoplastischer Kunststoff
EP	Epoxid-Harz – duroplastischer Kunststoff	POM	Polyoxymethylen – thermoplastischer Kunststoff
EPS	expandiertes Polystyrol – „Styropor“	PP	Polypropylen – thermoplastischer Kunststoff
E-Modul	Elastizitätsmodul – Materialkennwert der mechanischen Spannung	PS	Polystyrol – thermoplastischer Kunststoff
FhG	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der Angewandten Forschung e.V.	PTT	PTT PCL – Thailändischer Öl- und Petrochemiekonzern
GFK	glasfaserverstärkte Kunststoffe	PUR	Polyurethan
HDPE	High Density Polyethylene – Polyethylen hoher Dichte	PVC	Polyvinylchlorid – thermoplastischer Kunststoff
Helmholtz	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.	R	Rubber – Kautschuk
IMDS	International Material Data System	REACH	Registration Evaluation and Authorization – eur. Chemikaliengesetzgebung
KI	Kunststoff Information Verlagsgesellschaft mbH	RFID	Radio Frequency Identification – Transponder zur Identifizierung mit elektromagn. Wellen
kt	Kilotonnen = Tausend Tonnen – Dimension im SI-System	SAN	Styrol-Acrylnitril – thermoplastischer Kunststoff
LDPE	Low Density Polyethylen – Polyethylen niedriger Dichte	SBR	Styrol Butadiene Rubber – Styrolbutadien-Kautschuk
Leibniz	Leibniz-Gemeinschaft e.V.	SCG	Siam Cement Group PCL – thail. Grundstoffkonglomerat
LLDPE	Linear Low Density Polyethylen – lineares Polyethylen niedriger Dichte	SMC	Sheet Moulding Compound – Glasfaserpressmasse in Plattenform
LPG	Liquefied Petroleum Gas – Flüssiggas	TPE	thermoplastische Elastomere
Mt	Megatonnen = Millionen Tonnen – Dimension im SI-System	UP	ungesättigte Polyesterharze
NBR	Nitrile Butadiene Rubber - Nitrilkautschuk	WEEE	Waste from Electrical and Electronical Equipment – eur. Elektroaltgeräte-Richtlinie
NR	Natural Rubber – Naturkautschuk	XPS	extrudierter Polystyrol-Hartschaum
OEM	Original Equipment Manufacturer – Erstausrüster		
OMV	Oesterreichische Mineralölversorgung AG – Öl- und Petrochemiekonzern		

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Die Faszination für Technik treibt uns voran: Seit 160 Jahren gibt der VDI Verein Deutscher Ingenieure wichtige Impulse für neue Technologien und technische Lösungen für mehr Lebensqualität, eine bessere Umwelt und mehr Wohlstand. Mit rund 145.000 persönlichen Mitgliedern ist der VDI der größte technisch-wissenschaftliche Verein Deutschlands. Als Sprecher der Ingenieure und der Technik gestalten wir die Zukunft aktiv mit. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist der VDI Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

Weitere VDI-Statusreports zum kostenlosen Download

www.vdi.de/publikationen

VDI-Statusreport „Faserverbundwerkstoffe“

VDI-Statusreport „Arbeitswelt Industrie 4.0“

VDI Status Report “Industrie 4.0 Components – Modeling Examples”

VDI-Statusreport „Anwendungsszenario DDA – Durchgängiges und dynamisches Engineering von Anlagen“

VDI Status Report “Industrie 4.0 service architecture – basic concepts for interoperability”

VDI-Statusreport „Chancen mit Big Data – Best Practice“ (auch auf Englisch)

VDI-Statusreport „Geschäftsmodelle für Industrie 4.0 „Digitale Chancen und Bedrohungen“

VDI-Statusreport „Chancen mit Big Data – Use Cases“ (auch auf Englisch)

VDI-Statusreport „Fortentwicklung des Referenzarchitekturmodells für die Industrie-4.0-Komponente Struktur der Verwaltungsschale“

VDI-Handlungsfelder „Additive Fertigungsverfahren“