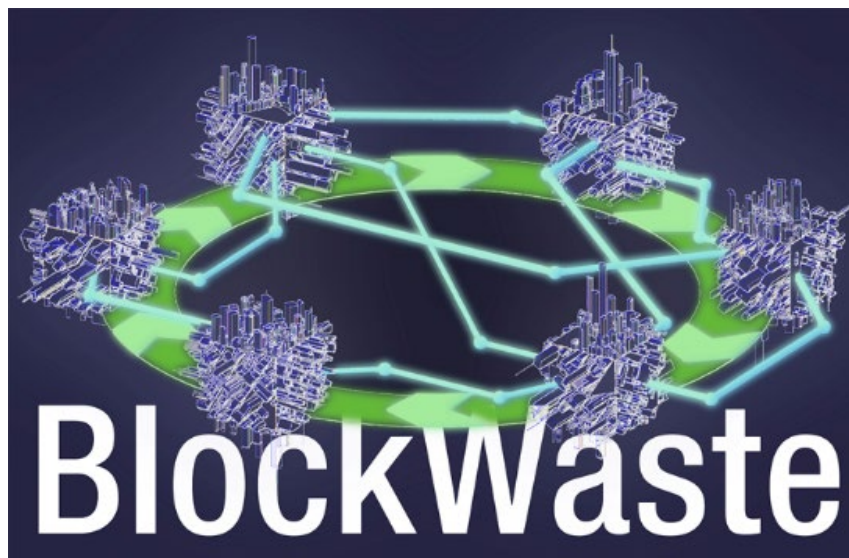


**O1.A3 Handbücher zu Kreislaufwirtschaftsstrategien, die auf die kommunale Abfallwirtschaft mit Blockchain-Technologie angewendet werden**

***Handbuch 1: Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft***



**Haftungsausschluss**

Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung trägt ausschließlich die Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Informationen.

## Factsheet zur Ausgabe:

<b>Förderprogramm</b>	Erasmus+ Programm der Europäischen Union
<b>Finanzierung von NA</b>	EL01 Griechische Staatsstipendiat-Stiftung (IKY)
<b>Vollständiger Projekttitel</b>	Innovative Schulungen auf Basis der Blockchain-Technologie für die Abfallwirtschaft - BLOCKWASTE
<b>Angezeigt</b>	KA2 - Zusammenarbeit für Innovation und Austausch bewährter Praktiken KA203 - strategische Partnerschaften für die Hochschulbildung
<b>Projektnummer</b>	2020-1-EL01-KA203-079154
<b>Projektdauer</b>	24 Monate
<b>Startdatum Des Projekts</b>	01-10-2020
<b>Enddatum Des Projekts:</b>	30-09-2022

## Ausgabedetails:

**Ausgabebetitel:** O1: Lernmaterialien für interdisziplinäre Blockchain-MSW

**Titel Der Aufgabe:** O1/A3. Handbücher zu Kreislaufwirtschaftsstrategien, die auf die kommunale Abfallwirtschaft mit Blockchain-Technologie angewendet werden

**Ausgangsleitung:** NTUA

**Leiter der Aufgabe:** Saxion UAS

**Autor(en):** Maria Menegaki, menegaki@metal.ntua.gr, Dimitris Damigos, damigos@metal.ntua.gr, Athanassios Mavrikos, mavrikos@metal.ntua.gr, Nationale Technische Universität von Athen, Griechenland, Viktoria Voronova, Technische Universität Tallinn, viktor.voronova@taltech.ee, Estland, Juana María Torrecilla, Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, juanamari-toabril@ctmarmol.es, Spanien

**Geprüft von:** Rainer Lenz, rlenz@fh-bielefeld.de, Fachhochschule Bielefeld, Deutschland, David Caparros Perez, Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales, david.caparros@ctmarmol.es, Spanien

## Dokumentenkontrolle

Dokumentversion	Version	Änderung
V0.1	31/03/2022	Endgültige Version - 29/04/2022

# Inhalt

Zusammenfassung.....	v
1 Einführung.....	1
1.1 Kurze Projektbeschreibung.....	1
1.2 Ziele und methodischer Ansatz.....	2
2 Kommunaler Fester Abfall.....	3
2.1 Definition.....	3
2.2 Klassifizierung.....	4
2.3 MSW-Stream-Eigenschaften.....	4
2.3.1 Methoden zur Charakterisierung von MSW.....	5
2.3.2 Materialien in MSW nach Gewicht.....	6
2.3.3 Variabilität der MSW-Generierung.....	9
2.4 MSW und die Umwelt.....	12
2.4.1 Umweltauswirkungen von MSW.....	14
2.4.2 Sicker gas und Biogas.....	16
3 Vorhandene MSW-Managementstrategien.....	19
3.1 Einführung in das MSW-Management.....	19
3.2 Abfallbewirtschaftungshierarchie.....	21
3.3 Gemeinsame Grundsätze im MSW-Management.....	22
3.4 MSW-Bestrahlung.....	23
3.4.1 Deponie.....	23
3.4.2 Verbrennung und Energierückgewinnung.....	24
3.4.3 Kompostierung und Biomethanisierung.....	25
3.4.4 Recycling.....	27
4 Kreislaufwirtschaft.....	28
4.1 Das lineare Modell von Produktion und Konsum.....	28
4.2 Kreislaufwirtschaft: Konzept, Ursprünge und Prinzipien.....	30
4.3 Herausforderungen und Vorteile von kreisförmigen Systemen.....	35
4.3.1 Herausforderungen.....	35
4.3.2 Vorteile.....	35
4.3.3 Transversale Strategien.....	37
4.3.4 Direkte Strategien.....	38
5 Kreislaufwirtschaft und MSW-Management.....	42
5.1 MSW-Management in einem CE.....	42

5.2	Richtlinien und Instrumente im MSW-Management gegenüber CE .....	43
5.3	Digitale Technologien für ein zirkuläres MSW-Management .....	45
6	Referenzen und Quellen für weitere Lektüre und Informationen .....	48
6.1	Referenzen .....	48
6.2	Weitere Quellen .....	51

## Liste der Tabellen

Tabelle 1: Politische Instrumente, die auf europäischer, regionaler und nationaler Ebene zur Abfallbewirtschaftung eingesetzt werden .....	45
Tabelle 2: Hauptbereiche der Digitalisierung im MSW-Management .....	46

## Liste der Abbildungen

Figure 1: Erzeugung kommunaler Abfälle EU-27, 2005-2020 (Quelle: Eurostat, 2021). .....	6
Figure 2: Globale Abfallzusammensetzung (Quelle: KAZA et. Al., 2018).....	7
Figure 3: Abfallzusammensetzung nach Einkommensniveau (Quelle: KAZA et. Al., 2018). ...	8
Figure 4: Abfallerzeugung aus Haushalten in der EU-27 nach Gewicht (in Tonnen) (Quelle: Eurostat, 2022 – eigener Redaktionsprozess).....	9
Figure 5: Abfallerzeugung aus Haushalten in der EU-27 nach Gewicht (in Tonnen) und Kategorie (Quelle: Eurostat, 2022 – eigener Redaktionsprozess).....	9
Figure 6: Eine Momentaufnahme der Entwicklung fester Abfälle während industrieller Revolutionen (Quelle: Mavropoulos und Nielsen, 2020). .....	12
Figure 7: Prognostizierte Abfallerzeugung nach Regionen (Quelle: <a href="https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html">https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html</a> ).....	13
Figure 8: Globale Behandlung und Entsorgung von Abfällen (Quelle: <a href="https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html">https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html</a> ).....	14
Figure 9: Das städtische Dandora-Dumpinggelände in Nairobi, Kenia (Quelle: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg</a> ) .....	15
Figure 10: Typischer Querschnitt einer modernen Sanitärdeponie (Quelle: <a href="https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump">https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump</a> ).....	16
Figure 11: Typische Zusammensetzung von Sickerflut aus irischen Deponien (Quelle: Kalyuzhnyi et al, 2003).....	17
Figure 12: Langfristiges Modell der Zusammensetzung des Deponiegases. I aerobe Phase, II saure Phase, III instabile Methanphase, IV stabile Methanphase, V langfristige Phase, VI Luftinfiltrationsphase, VII Methanoxidationsphase, VIII Kohlendioxid-Phase, IX Luftphase (Quelle: Wagner et al, 2007).....	17
Figure 13: Integriertes Abfallmanagement: Ein Lebenszyklus-Inventar (nach Zbizinski et al., 2006).....	20
Figure 14: Abfalldeponien in den EU-Mitgliedstaaten und anderen europäischen Ländern (Quelle: EWR, 2021).....	21
Figure 15: Abfallhierarchie. (Quelle: Abfallrahmenrichtlinie, 2008). .....	22

Figure 16: Ein typisches Schema der kommunalen Brennkammer für feste Abfälle (nach Worell & Vesilind, 2012). .....	24
Figure 17: Anaerobe Verdauung (Grafik von Sara Tanigawa, EESI).....	26
Figure 18: Recyclingquoten in Europa nach Abfallströmen (Quelle: EWR, 2022). .....	27
Figure 19: Rohstoffverbrauch (RMC) (Quelle: Europäisches Umweltbüro 2012). .....	28
Figure 20: Lineares Wirtschaftssystem (Quelle: BIMgreen 2019).....	29
Figure 21: Umriss des linearen Wirtschaftsmodells (Quelle: Marmor- und Steintechnologiezentrum, 2018). .....	30
Figure 22: Umriss des kreisförmigen Wirtschaftsmodells (Quelle: Marmor- und Steintechnologiezentrum, 2018). .....	31
Figure 23: Die von der EG angesprochene Entkopplung (Quelle: Europäisches Umweltbüro, 2015).....	34
Figure 24: Skizzieren des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft (Quelle: Caparrós-Pérez, D., 2017).....	37
Figure 25: Ein vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft für Materialien und Energie (Quelle: EWR, 2017).....	42

## Zusammenfassung

Die kommunale Abfallwirtschaft (MWM) durchläuft große Veränderungen, die sich aus umweltpolitischen, wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen und Herausforderungen ergeben.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, haben EU-Institutionen, nationale Gesetzgeber und Abfallbewirtschaftungsorganisationen erhebliche Anstrengungen unternommen, um einen Rahmen für Regulierung, Klassifizierung, Standardisierung und Empfehlungen zu schaffen, die eine Harmonisierung und Verbesserung der Umwelt und der Wirtschaft ermöglichen. Es hat sich ein detailliertes, EU-weit anerkanntes Repertoire an Abfallklassifizierungen herausgebildet, das die Bewirtschaftung, Behandlung, Überwachung und Wertschöpfung von Abfällen ermöglicht.

Auch die kommunalen Abfallströme selbst haben sich mit einem Trend zu weniger Gewicht pro Einheit, mehr Verpackungen, mehr Papier und mehr E-Abfall erheblich verändert. Lebensmittel und grüne Abfälle machen jedoch weiterhin einen großen Teil (44 %) des gesamten kommunalen Abfallvolumens aus.

Die Pro-Kopf-Erzeugung von Siedlungsabfällen variiert in der EU erheblich, wobei zwischen Ländern mit hohem und geringem Volumen ein Unterschied von 250 % besteht. Obwohl die Zunahme der kommunalen Abfallmengen in der EU ein großes Problem darstellt, weisen andere Teile der Welt ein noch schnelleres Wachstum auf, so dass die Auswirkungen der kommunalen Abfälle insgesamt dramatische Ausmaße angenommen haben, da Sickerwasser und Methan die größten Bedrohungen für sauberes Wasser und saubere Luft darstellen.

Die derzeitige Abfallwirtschaft hat versucht, diesem Trend entgegenzuwirken, indem sie integrierte Abfallwirtschaftssysteme einführte, die auf Interventionshierarchien wie der Abfallpyramide beruhten, die eine Reduzierung der Umweltauswirkungen an den Grenzen der technologischen Machbarkeit, der wirtschaftlichen Machbarkeit und der sozialen Akzeptanz sicherstellen.

Versuche, die Suche nach großangelegten Lösungen für das Wachstum der Abfallmenge zu beschleunigen, haben das Vertrauen in lineare Abfallbewirtschaftungsmodelle untergraben und stellen Circular Economy-Modelle in den Fokus von MWM. Die Vorteile liegen darin, dass sie der Wiederverwendung, der Rückgewinnung und dem Recycling gegenüber der Entsorgung, der Verbrennung und der Deponierung Vorzug geben, indem lineare Stoffströme durch Kreisläufe ersetzt werden. Die Abkehr von 'einer „take-make-dispose“-Logik hin zu einer Entkopplung von wirtschaftlicher Entwicklung und Umweltauswirkungen von der Ressourcennutzung erfordert eine dramatische Wende nicht nur in der Abfallwirtschaft, sondern auch in den grundlegenden Prozessen einer Wirtschaft. Dies erfordert und führt zu zirkulären Output-Modellen, zirkulären Innovationsmodellen und zirkulären Use-Modellen.

Dies erfordert wiederum entschlossenes politisches Handeln und Regulierung, beginnend auf EU-Ebene, aber auch einen dramatischen Wandel in der Denkweise einer Gesellschaft, der die Idee von Abfall als 'Problem' in Abfall als 'wertvolle Ressource' verwandelt. Das Management von MSW muss dann zu einem wichtigen Bestandteil der Kreislaufproduktion und des Kreislaufverbrauchs werden.

# 1 Einführung

## 1.1 Kurze Projektbeschreibung

Das BlockWASTE-Projekt zielt darauf ab, die Interoperabilität zwischen Abfallwirtschaft und Blockchain-Technologie anzugehen und deren ordnungsgemäße Behandlung durch Schulungen zu fördern, so dass die gesammelten Daten in einer sicheren Umgebung geteilt werden, in der es keinen Raum für Unsicherheit und Misstrauen zwischen allen Parteien gibt, die an Abfallketten oder -im Recycling beteiligt sind.

Zu diesem Zweck sind die Ziele des BlockWASTE-Projekts wie folgt:

- Forschung zu Haushaltsabfällen, die in Städten entstehen und wie diese verwaltet werden, um eine Informationsbasis für bewährte Praktiken zu schaffen, um Abfälle wieder in die Wertschöpfungskette einzuführen und die Idee der intelligenten kreisförmigen Städte zu fördern.
- Die Vorteile der Blockchain-Technologie im kommunalen Abfallmanagement (MSW) zu identifizieren.
- Einen Studienplan zu erstellen, der die Ausbildung von Lehrern und Fachleuten von Organisationen und Unternehmen des Sektors ermöglicht, in der Überschneidung der Bereiche Abfallwirtschaft, Kreislaufwirtschaft und Blockchain-Technologie.
- Entwicklung eines interaktiven Tools auf Basis der Blockchain-Technologie, das es ermöglicht, das Management von Daten aus Siedlungsabfällen in die Praxis umzusetzen, so dass die Art und Weise, wie die Daten in der Blockchain implementiert werden, visualisiert und die Nutzer in die Lage versetzt werden, verschiedene Formen des Managements zu bewerten.

BlockWASTE hat sich zum Ziel gesetzt, transnational neue Bildungsinhalte zu implementieren, mit dem Ziel, seine Studenten in den Partnerländern auszubilden und ihnen die notwendigen Grundkenntnisse zu vermitteln, die es ihnen ermöglichen, sich beruflich als zukünftige Arbeitnehmer in der Branche zu verhalten. Hinzufügen digitaler Kompetenzen, die von Unternehmen benötigt werden, die den Prozess der digitalen Transformation nutzen. In diesem Sinne richtet sich das Projekt an:

- Unternehmen und KMU, IT-Profis, Urbanisten und Abfallwirtschaft.
- Universitäten (Professoren, Studenten und Forscher).
- Öffentliche Einrichtungen.

Das Projekt umfasst vier Intellectual Outputs wie folgt:

- O1. Lernmaterialien für interdisziplinäre Blockchain-MSW
- O2. Europäischer gemeinsamer Lehrplan über die Anwendung von Blockchain-Technologien auf Strategien der Kreislaufwirtschaft in MSW
- O3. E-Learning-Tool auf Blockchain-MSW-Basis mit Fokus auf Kreislaufwirtschaft
- O4. BlockWASTE Open Educational Resource (OER)



## 1.2 Ziele und methodischer Ansatz

In diesem Dokument werden die wichtigsten Definitionen und Eigenschaften von kommunaler fester Abfälle (MSW), Managementpraktiken sowie Richtlinien und Instrumente für die Verwaltung von MSW gegenüber CE vorgestellt.

## 2 Kommunalen Fester Abfall

### 2.1 Definition

In der EU-Deponierichtlinie 1999/31 wird kommunaler fester Abfall (MSW) definiert als „Abfälle aus Haushalten sowie andere Abfälle, die aufgrund ihrer Art oder Zusammensetzung dem Abfall aus Haushalten ähneln“. Gemäß der Richtlinie 2018/851 bedeutet Siedlungsabfall:

A) gemischte und getrennt gesammelte Abfälle aus Haushalten, einschließlich Papier und Pappe, Glas, Metalle, Kunststoffe, Bioabfälle, Holz, Textilien, Verpackungen, Elektro- und Elektronik-Artgeräten, Altbatterien und -Akkumulatoren sowie Sperrmüll, einschließlich Matratzen und Möbel;

B) gemischte und getrennt gesammelte Abfälle aus anderen Quellen, wenn diese Abfälle in ihrer Art und Zusammensetzung dem Abfall aus Haushalten ähneln.

Siedlungsabfälle stammen aus Haushalten, Handel und Gewerbe, kleinen Unternehmen, Bürogebäuden und Institutionen (Schulen, Krankenhäuser, Regierungsgebäude) und werden durch traditionelle Sammelverfahren (gemischte Haushaltsabfälle) von Tür zu Tür gesammelt, wobei bestimmte Fraktionen separat für die Verwertung gesammelt werden (durch die Abholung von Tür zu Tür und/oder durch freiwillige Einlagen). Zu diesem Abfallstrom gehören auch Abfälle aus denselben Quellen und ähnlichen Ursprungs, die direkt vom privaten Sektor gesammelt werden (hauptsächlich getrennte Sammlung zu Zwecken der Verwertung) und nicht im Auftrag von Kommunen und Abfälle aus ländlichen Gebieten, die nicht von einer regulären Abfallwirtschaft bedient werden. Zu den Siedlungsabfällen gehören keine Abfälle aus Produktion, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei, Klärgruben und Klärwerken und -Behandlung, einschließlich Klärschlamm, Altfahrzeugen oder Bau- und Abbruchabfällen.

Die oben genannte Definition wird in praktisch allen Partnerländern befolgt. In Deutschland wird kommunaler fester Abfall im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes § 5a (KrWG2020) definiert als gemischter oder getrennter Abfall, der aus folgenden Bereichen gesammelt wird: i) private Haushalte, insbesondere Papier und Pappe, Glas, Metall, Kunststoffe, organische Stoffe, Holz, Textilien, Verpackungen, Elektro- und Elektronikgeräte, Batterien, Sperrmüll einschließlich Matratzen und Möbel und (ii) andere Quellen, wenn dieser Abfall von Natur aus und in seiner Zusammensetzung mit dem Hausmüll vergleichbar ist. In Griechenland umfasst die MSW-Kategorie nach Angaben der Hellenischen Statistischen Behörde Haushalts- und ähnliche Abfälle, die über das städtische Sammelsystem oder über Dritte gesammelt werden. In Estland (Abfallgesetz, §2,7) umfasst der Siedlungsabfall Abfälle aus Haushalten und Abfälle, die im Handel, bei der Erbringung von Dienstleistungen oder anderswo hergestellt werden und aufgrund ihrer Zusammensetzung oder Eigenschaften dem Abfall aus Haushalten ähneln. In den Niederlanden werden Siedlungsabfälle als Haushaltsabfälle definiert: Abfallstoffe, die aus privaten Haushalten stammen, mit Ausnahme der Bestandteile dieses Abfalls, die als gefährlicher Abfall bezeichnet wurden.

Schließlich wird in Spanien MSW als Abfall definiert, der in Haushalten aufgrund von häuslicher Tätigkeit und ähnlichen Abfällen in Dienstleistungen und Industrie entsteht. Dazu gehören auch Abfälle, die in Haushalten aus Elektro- und Elektronikgeräten, Bekleidung, Batterien, Akkumulatoren, Möbeln und Armaturen entstehen, sowie Abfälle und Schutt aus kleineren Bau- und Reparaturarbeiten in Haushalten. Darüber hinaus werden Abfälle aus der Reinigung von öffentlichen Straßen, Grünflächen, Erholungsgebieten und Stränden, toten

Haustieren und verlassenen Fahrzeugen als Hausmüll betrachtet (Gesetz 22/2011 vom 28. Juli über Abfälle und kontaminierte Böden).

## 2.2 Klassifizierung

Der Siedlungsabfall besteht laut Eurostat (2017) aus den folgenden Kategorien:

A. getrennt gesammelte Abfälle aus Haushalten:

- Papier und Karton
- Textilien
- Kunststoffe
- Glas
- Metalle
- Organische Materialien aus HH (Küchenabfälle, Gartenabfälle - Heimkompostierung wird nicht berücksichtigt).
- Gefährliche Haushaltsabfälle (z. B. verbrauchte Lösungsmittel, Säuren, Laugen, Photochemikalien, Pestizide, Altöle, Farben, WEEE, Batterien und Akkumulatoren, Reinigungsmittel, Usw.)
- Andere Abfälle (z. B. Speiseöl und Fett, Gummiabfälle usw.)
- Sperriger Abfall

B. Restmüll:

- Gemischte Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen, mit Ausnahme von getrennt gesammelten Fraktionen.

C. Abfall aus kommunalen Dienstleistungen:

- Bio-Materialien aus der Gemeinde Dienstleistungen
- Abfälle aus öffentlichen Mülleimern und Straßenkehrungen
- Reinigungsabfälle auf dem Markt
- Friedhofsmüll

In Deutschland (Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012, geändert 2020, KrWG2020), Griechenland (nationaler Abfallbewirtschaftungsplan, Amtsblatt 185/A/29-09-2020), Estland (Abfallwirtschaftsgesetz, 2004, geändert 01.01.21), den Niederlanden (nationaler Abfallbewirtschaftungsplan 2017) und Spanien (Gesetz 22/2011) wird praktisch dieselbe Klassifizierung befolgt.

## 2.3 MSW-Stream-Eigenschaften

Die Charakterisierung von kommunalen Festabfällen (MSW) stellt ein wichtiges Instrument für kommunale Regierungen und sanitäre Einrichtungen dar, um Ziele für die Recycling- und Verwertung von Abfällen festzulegen und zu erreichen. In dieser Richtung ist die Durchführung einer vollständigen Analyse der Eigenschaften und Zusammensetzung von Haushaltsabfällen ein wichtiges Element nationaler, regionaler und lokaler Strategien (Ciuta et. Al., 2015).

### 2.3.1 Methoden zur Charakterisierung von MSW

Es gibt zwei primäre Methoden zur Durchführung einer Abfallcharakterisierung. Der erste ist ein standortspezifischer Ansatz, bei dem die einzelnen Bestandteile des Abfallstroms beprobt, sortiert und gewogen werden. Diese Methode ist bei der Definition eines lokalen Abfallstroms nützlich, insbesondere wenn eine große Anzahl von Proben über mehrere Jahreszeiten entnommen wird.

Die Ergebnisse der Probenahme erhöhen auch das Wissen über Variationen aufgrund von klimatischen und saisonalen Veränderungen, Bevölkerungsdichte, regionalen Unterschieden usw. Darüber hinaus können Mengen von MSW-Komponenten wie Lebensmittelreste und Außenbeschnitt nur durch Probenahmen und Wägestudien geschätzt werden.

Obwohl diese Methode für die Definition eines lokalen Abfallstroms nützlich ist, kann die Extrapolation aus einer begrenzten Anzahl von Studien ein verzerrtes oder irreführendes Bild erzeugen, wenn beispielsweise atypische Umstände während der Probenahme aufgetreten sind. Diese Umstände könnten eine ungewöhnlich feuchte oder trockene Jahreszeit, die Lieferung einiger ungewöhnlicher Abfälle während des Testzeitraums oder Fehler in der Testmethode umfassen. Alle Fehler dieser Art werden sich erheblich vergrößern, wenn eine begrenzte Anzahl von Proben entnommen wird, um den gesamten Abfallstrom einer Gemeinschaft für ein Jahr darzustellen. Die Vergrößerung von Fehlern könnte noch gravierender sein, wenn man sich auf eine begrenzte Anzahl von Proben für die nationalen Schätzungen von MSW verlassen würde. Außerdem wären umfangreiche Probennahmen für die Erstellung nationaler Schätzungen unerschwinglich teuer. Ein weiterer Nachteil von Stichprobenstudien ist, dass sie keine Informationen über Trends liefern, es sei denn, sie werden über einen langen Zeitraum konsistent durchgeführt (EPA, 1998).

Die zweite Methode wird als „Materialfluss-Methode“ bezeichnet. Die Idee für diese Methodik wurde Anfang 1970s bei der EPA entwickelt. Diese Methode basiert auf Produktionsdaten (nach Gewicht) für die Materialien und Produkte im Abfallstrom. Zur Schätzung der Erzeugungsdaten werden spezifische Anpassungen an den Produktionsdaten für jede Material- und Produktkategorie vorgenommen. Es werden Anpassungen für Importe und Exporte sowie für Abweichungen von MSW vorgenommen (z. B. für Baumaterialien aus Kunststoff und Pappe, die zu Bau- und Abbruchschutt werden). Auch die Lebensdauer der Produkte wird angepasst. Schließlich werden Lebensmittelabfälle, Außenverkleidungen und eine kleine Menge verschiedener anorganischer Abfälle durch die Zusammenstellung von Daten aus einer Vielzahl von Abfallprobenentnahmen berücksichtigt.

Ein Problem bei der Materialflussmethode besteht darin, dass Produktrückstände, die mit anderen Artikeln in MSW (in der Regel Behältern) in Verbindung stehen, nicht berücksichtigt werden. Zu diesen Rückständen gehören beispielsweise Lebensmittel, die in einem Glas zurückgelassen wurden, Waschmittel, die in einer Schachtel oder Flasche zurückgelassen wurden, und getrocknete Farbe in einer Dose. Einige gefährliche Haushaltsabfälle (z. B. Pestizide, die in einer Dose zurückgelassen wurden) sind ebenfalls Teil dieser Produktrückstände.

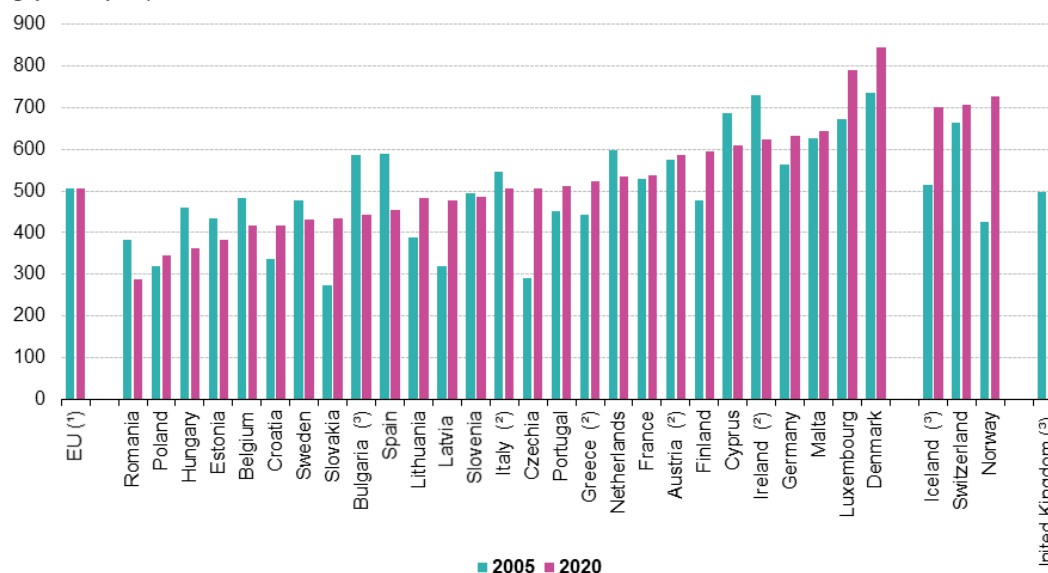
### 2.3.2 Materialien in MSW nach Gewicht

Im Jahr 2018 belief sich der Gesamtabfall, der in den EU-27 durch alle wirtschaftlichen Aktivitäten und Haushalte entstanden ist, auf 2.337 Millionen Tonnen. In der EU-27 trugen die Haushalte 8,2 % des gesamten Abfallaufkommens bei. Obwohl Siedlungsabfälle weniger als 10 % des gesamten in der EU erzeugten Abfalls ausmachen, scheint er aufgrund seines komplexen Charakters, seiner Zusammensetzung, seiner Verteilung auf viele Abfallquellen und seiner Verbindung zu den Verbrauchsmustern zu einer der umweltfreundlichsten Abfallarten zu gehören.

Im Jahr 2020 variieren die Gesamtmengen der kommunalen Abfallerzeugung erheblich und reichen von 282 kg pro Kopf in Rumänien bis zu 845 kg pro Kopf in Dänemark, mit einem Durchschnitt von etwa 500 kg in der EU-27. Die Unterschiede spiegeln Unterschiede in den Verbrauchsmustern und dem wirtschaftlichen Wohlstand wider, hängen aber auch davon ab, wie Siedlungsabfälle gesammelt und verwaltet werden.

#### Municipal waste generated, 2005 and 2020

(kg per capita)



Note: Countries are ranked in increasing order by municipal waste generation in 2020.

(\*) Estimated.

(²) Ireland, Italy, Greece, Austria, 2019 data.

(³) Bulgaria, Iceland, United Kingdom 2018 data.

eurostat

Figure 1: Erzeugung kommunaler Abfälle EU-27, 2005-2020 (Quelle: Eurostat, 2021).

Für die Partnerländer hatte Deutschland im Jahr 2019 die höchste kommunale Abfallerzeugung pro Kopf (d. h. 609), gefolgt von Griechenland (524 kg) und den Niederlanden (508 kg). Die Pro-Kopf-Erzeugung kommunaler Abfälle in Spanien (476 kg) lag unter dem EU-27-Durchschnitt (d. h. 502 kg). Estland produziert, wie bereits erwähnt, weit weniger Abfall (d. h. 73,5 % des EU-Durchschnitts oder 369 kg pro Kopf).

Die Abfallzusammensetzung ist die Kategorisierung von Materialarten in kommunalen Festabfällen. Auf internationaler Ebene sind Lebensmittel und grüne Abfälle die größte Abfallkategorie, die 44 Prozent des weltweiten Abfalls ausmacht (Abbildung 2). Trockene Recyclingmaterialien (Kunststoff, Papier und Pappe, Metall und Glas) machen weitere 38 Prozent des Abfalls aus. Die Abfallzusammensetzung variiert erheblich je nach Einkommensniveau. Der Anteil organischer Stoffe an Abfällen sinkt mit steigenden Einkommen. Verbrauchte Waren in Ländern mit höherem Einkommen umfassen mehr Materialien wie Papier und Kunststoff als in Ländern mit niedrigerem Einkommen (Abbildung 3). Die Granularität der Daten zur Abfallzusammensetzung, wie z. B. detaillierte Angaben zu Gummi- und Holzabfällen, steigt ebenfalls nach Einkommensniveau (Kaza et. Al., 2018).

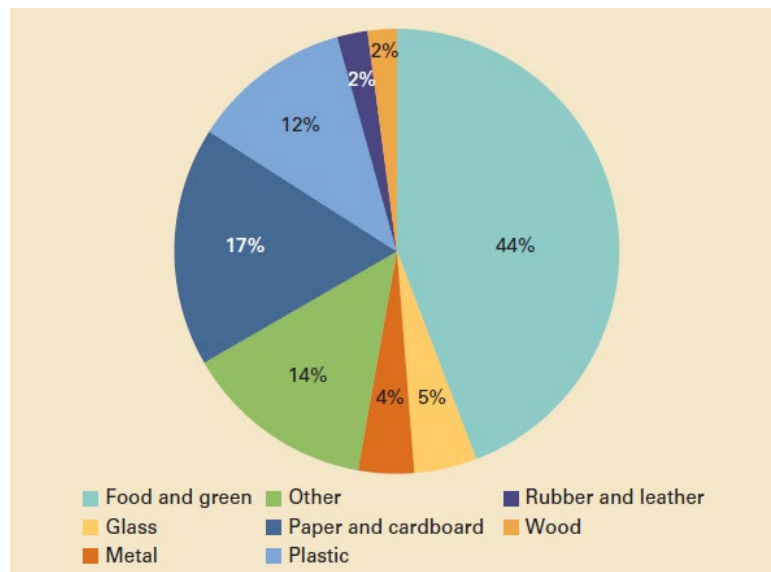


Figure 2: Globale Abfallzusammensetzung (Quelle: KAZA et. Al., 2018).

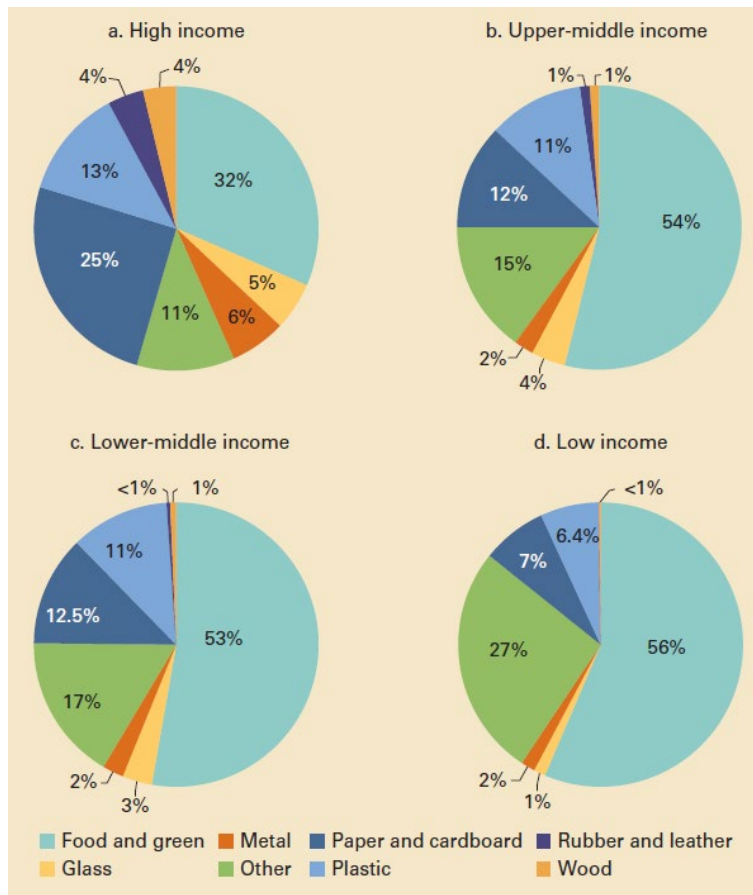


Figure 3: Abfallzusammensetzung nach Einkommensniveau (Quelle: KAZA et. Al., 2018).

Die Mengen der Gesamtabfälle (gefährlich und ungefährlich), die aus Haushalten in der EU-27 stammen, sind in Abbildung 4 dargestellt.

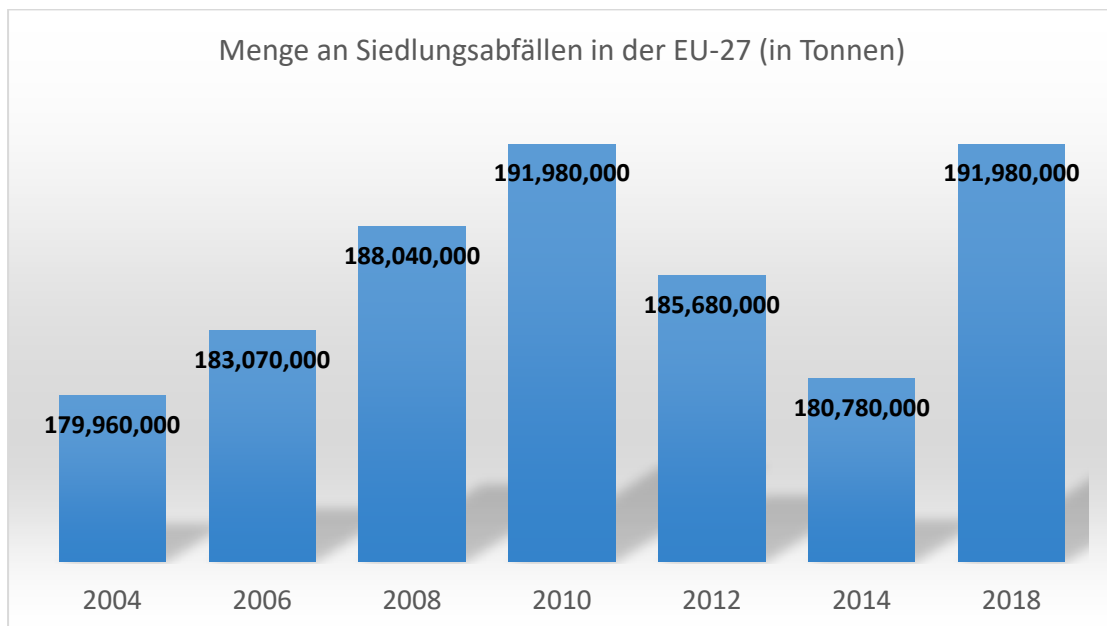


Figure 4: Abfallerzeugung aus Haushalten in der EU-27 nach Gewicht (in Tonnen) (Quelle: Eurostat, 2022 – eigener Redaktionsprozess).

Die Mengen bestimmter Kategorien von Abfällen, die aus Haushalten gesammelt werden, sind in Abbildung 5 dargestellt.

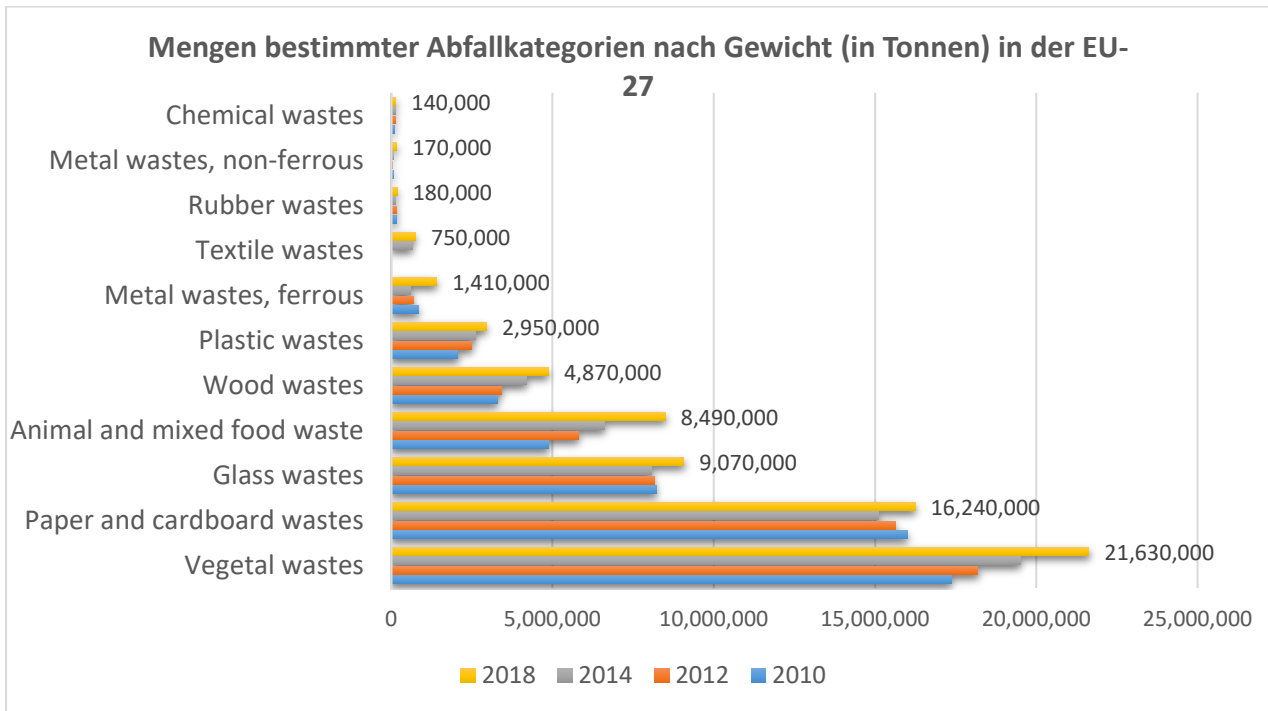


Figure 5: Abfallerzeugung aus Haushalten in der EU-27 nach Gewicht (in Tonnen) und Kategorie (Quelle: Eurostat, 2022 – eigener Redaktionsprozess).

### 2.3.3 Variabilität der MSW-Generierung

#### 2.3.3.1 Gewerblicher und häuslicher Abfall

Im Allgemeinen sind sich die Menschen am meisten der Abfälle bewusst, die aus ihren eigenen Häusern kommen, ob Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser oder andere Wohnmöglichkeiten. Große Mengen an Abfall entstehen jedoch auch dort, wo Menschen arbeiten, einkaufen, reisen, Kurse besuchen oder andere Aktivitäten ausüben. Diese letzteren Abfälle werden im Allgemeinen als gewerblich eingestuft. Um die Verwirrung noch zu erhöhen, klassifizieren Abfallverbrenner Abfälle, die aus Wohnhäusern gesammelt werden, oft als gewerblich, obwohl die Art der Abfälle der von Einfamilienhäusern sehr ähnlich sein kann (Tchobanoglous und Kreith, 2002).

#### 2.3.3.2 Lokale/Regionale Variabilität

Kommunale Manager für feste Abfälle sind sich im Allgemeinen einig, dass es im ganzen Land Unterschiede in der Menge und den Eigenschaften von MSW gibt, obwohl es nicht einfach ist,



mit einem gewissen Grad an Zuverlässigkeit zu verallgemeinern. Einige Beobachtungen auf der Grundlage von Erfahrungen können jedoch gemacht werden (ebd.).

Erstens gibt es eine gewisse Übereinstimmung, dass Siedlungsabfälle von Standort zu Standort weniger variieren als gewerbliche Abfälle (Hunt, 1990). Die Menschen im ganzen Land neigen dazu, viel die gleichen Arten von Waren zu kaufen, egal ob sie in ländlichen oder städtischen Gebieten oder in verschiedenen Klimazonen leben. Ausnahmen von dieser Verallgemeinerung sind:

- *Außenverkleidungen.* Yard Trimmings sind in der Regel viel häufiger in wärmeren, düsteren Teilen des Landes. Darüber hinaus gibt es deutliche Unterschiede in der Art und Weise, wie die Außenbeschneidungen gehandhabt werden.
- *Lebensmittelabfälle.* Die Entsorgung von Lebensmittelabfällen in MSW variiert je nach Prävalenz der Lebensmittelentserger, die die Lebensmittelabfälle in das Abwasserbehandlungssystem einspeisen.
- *Zeitungen.* Zeitungen, die meist aus Wohnheimen ausrangiert werden, variieren stark in ihrer Größe und tragen somit zu regionalen und städtischen/ländlichen Variationen in der MSW-Generation bei.

Die Erzeugung von MSW in einem bestimmten Ort wird stark von der kommerziellen Aktivität in dem Gebiet beeinflusst. Eine Konzentration von Bürogebäuden wird Büropapiere und andere Abfälle produzieren. Einkaufszentren, Lagerhäuser und Fabriken erzeugen große Mengen an Wellpappenbehältern und anderen Abfällen. Schulen, Krankenhäuser, Flughäfen, Bahn- und Busbahnhöfe, Hotels und Motels sowie Sporteinrichtungen tragen alle zum kommerziellen Abfallstrom bei. Daher werden kleine Städte und ländliche Gebiete ohne Konzentration von kommerziellen Aktivitäten in der Regel weniger MSW pro Person erzeugen als städtische Gebiete.

#### 2.3.3.3 Saisonale Variationen

Ein weiteres bekanntes Phänomen in der kommunalen Abfallwirtschaft sind saisonale Schwankungen in der Abfallerzeugung. In den meisten Gemeinden sind die Beschneidungen von Gärten im Allgemeinen die wichtige Variable, da die saisonalen Bereinigungen von Höfen und Garagen häufig zu Wochenspitzen bei der Erzeugung beitragen. Der späte Frühling und der Herbst sind in vielen Gemeinden Spitzengenerationsphasen, während die Erzeugung von Gartenbeschnitten in den Wintermonaten in kalten Klimazonen auf Null ansetzen kann. Touristische Gebiete zeigen auch saisonale Schwankungen je nach Art des Urlaubs, die jede Region bietet.

#### 2.3.3.4 Änderungen im Laufe der Zeit

Die Entstehung von Siedlungsabfällen führt zu Schwankungen in der Zeit zwischen den verschiedenen Materialien. Ein Verständnis dieses Phänomens ist besonders wichtig, um Prognosen zur Entstehung von MSW zu erstellen und Abfallentsorgungseinrichtungen zu planen.

Einige Faktoren, die zur Steigerung der MSW-Generierung führen, sind:

- *Wachsende Bevölkerung.* Offensichtlich nutzen und entsorgen mehr Menschen mehr Dinge.
- *Zunehmender Wohlstand.* Es besteht eine recht starke Korrelation zwischen der Erzeugung von MSW und der Wirtschaftstätigkeit, gemessen am Bruttoinlandsprodukt

(BIP) oder den Ausgaben für den Eigenverbrauch (PCE). Die Erzeugung von Papier- und Kartonprodukten ist besonders anfällig für wirtschaftliche Aktivitäten. Die Gründe liegen auf der Hand: Wenn Bestellungen für Waren fallen, werden weniger Kartons und andere Verpackungen für den Versand bestellt. Auch die Werbung in Zeitungen und Zeitschriften nimmt während einer Rezession ab.

- *Veränderungen im Lebensstil.* Veränderungen im Lebensstil stehen in gewisser Weise im Zusammenhang mit Wohlstand. Zum Beispiel kaufen alleinlebende Menschen, Familien mit zwei Lohnabhängigen und Familien mit einem Elternteil mehr abgepackte Lebensmittel und essen mehr, oft in Fast-Food-Betrieben, die Einwegverpackungen verwenden. Sie können auch mehr durch Kataloge einkaufen, was die Menge der zu Hause empfangenen und entsorgten Post erhöht. Außerdem muss jeder neue Haushalt, egal wie klein er auch sein sollte, über einige Geräte und Einrichtungsgegenstände verfügen.
- Die explosionsartige Zunahme von Informationen und Einkaufsmöglichkeiten durch elektronische Online-Kommunikation führt auch zu Veränderungen bei der Abfallerzeugung. Beispielsweise nimmt die Leserschaft von Zeitungen ab, aber Menschen mit Computern zu Hause können mehr Büropapier erzeugen, wenn sie Informationen und E-Mail-Kommunikation ausdrucken.
- *Neue Produkte.* Neue Einmalprodukte können die generierten Mengen an MSW erhöhen. Wegwerfwindeln sind ein Beispiel für dieses Phänomen.

Während die MSW-Generation im Laufe der Zeit erhöht wurde, neigen einige Faktoren dazu, die MSW-Generation zu verringern. Zu diesen Faktoren gehören:

- *Neugestaltung der Produkte.* Einige Produkte in MSW sind im Laufe der Jahre sogar leichter geworden. Ein Beispiel dafür sind Geräte wie Kühlschränke, die vor allem auf Veränderungen in der Isolierung und den Einsatz von leichteren Kunststoffen zurückzuführen sind. Ein weiteres Beispiel sind Gummireifen, die nicht nur kleiner, sondern länger halten. Zeitungspapier, das zur Veröffentlichung von Zeitungen verwendet wurde, wurde leichter, und manchmal wurde die Seitengröße verringert. Außerdem wurden viele Arten von Verpackungen im Laufe der Jahre leicht gewichtet, oft um Transportkosten zu sparen.

Kunststoffabfälle haben in letzter Zeit viel Aufmerksamkeit erregt, insbesondere die Einweg-Kunststoffströme, vor allem aufgrund der massiven Forschungsergebnisse zu den Auswirkungen von Plastikverschmutzungen auf die Ozeane<sup>1</sup>. Die EU hat 2018 ihre Plastikstrategie gestartet, mit der sichergestellt werden soll, dass alle Kunststoffverpackungen bis 2030 wiederverwendbar oder recyclebar sind. Außerdem wird gefordert, dass bis 2025 90 % aller Plastikflaschen recycelt werden. Es wird erwartet, dass diese Strategie die Art und Weise verändern wird, wie Kunststoffprodukte in der EU entwickelt, verwendet, produziert und recycelt werden (Mavropoulos and Nielsen, 2020)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Davies, S. die große Pferdemit-Krise von 1894 | Stephen Davies <https://fee.org/articles/the-great-horse-manure-crisis-of-1894/> (abgerufen am 13. Februar 2020)

<sup>2</sup> Mavropoulos A. und Nielsen A.W., 2020, Industrie 4,0 und Kreislaufwirtschaft: Towards a Wasteless Future or a Wastful Planet?, Wiley, ISBN: 978-1-119-69927-9

- *Substitution von Materialien.* Insbesondere in der Verpackung hat es in vielen Anwendungen eine Tendenz gegeben, leichtere Materialien zu ersetzen. So wurden Aluminiumdosen Stahldosen in Getränkeverpackungen ersetzt und Kunststoffflaschen durch Glas ersetzt. Dies spiegelt sich in der rückläufigen oder „flachen“ Generation von Stahl- und Glasverpackungen wider, während Aluminium und Kunststoffe ein rasantes Wachstum verzeichnen. Kunststoffe haben in vielen Anwendungen auch Papier ersetzt. Obwohl beispielsweise die Generation der Papierverpackungen insgesamt gewachsen ist, ist die Generation der Papiertüten und -Säcke zurückgegangen, vor allem aufgrund des erhöhten Einsatzes von Kunststofftüten, die viel leichter sind.

Abbildung 6 zeigt, wie sich Abfall verändert, während sich die Welt von einer industriellen Revolution zur anderen bewegt.

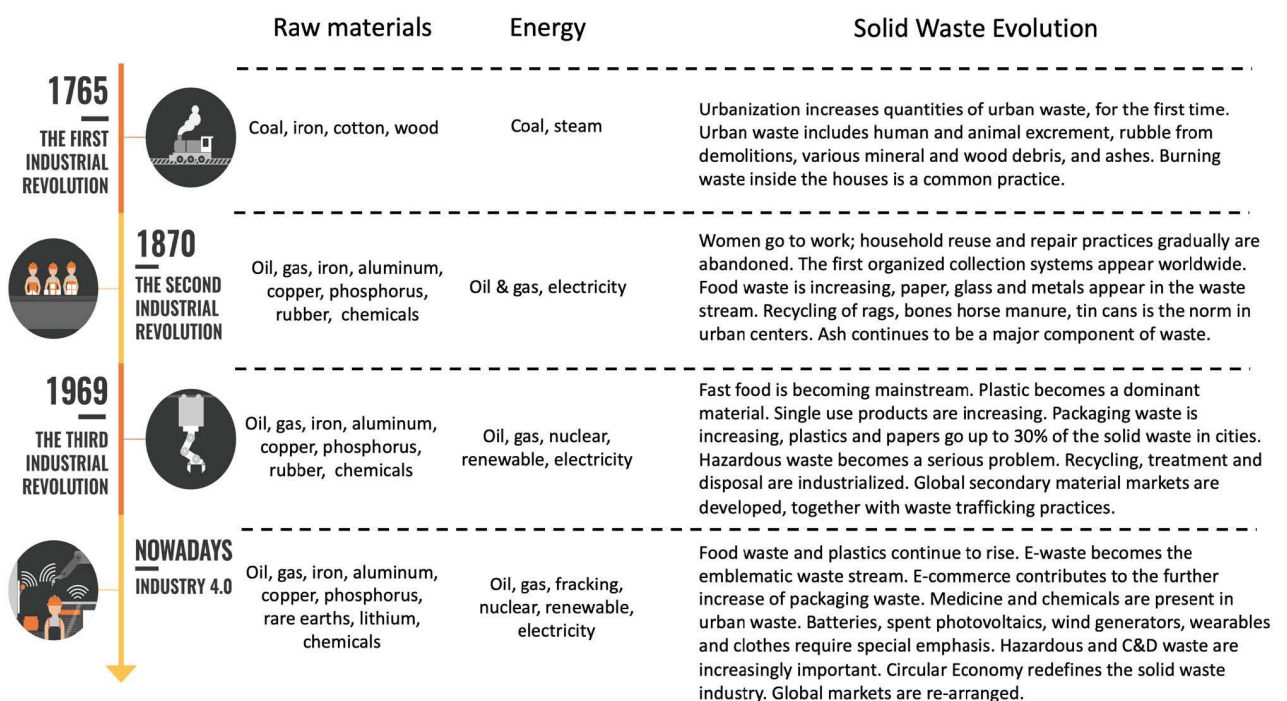


Figure 6: Eine Momentaufnahme der Entwicklung fester Abfälle während industrieller Revolutionen (Quelle: Mavropoulos und Nielsen, 2020).

## 2.4 MSW und die Umwelt

Kommunaler fester Abfall (MSW), besser bekannt als Abfall oder Abfall, besteht aus alltäglichen Gegenständen, die von Menschen verwendet und dann weggeworfen werden, wie Produktverpackungen, Grasschnitt, Möbel, Kleidung, Flaschen, Lebensmittelreste, Zeitungen, Geräte, Farben und Batterien. Die Quellen von MSW sind Haushalte, Schulen, Krankenhäuser und Unternehmen<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/>

Nach Angaben der Weltbank<sup>4</sup> erzeugt die Welt jährlich 2,01 Milliarden Tonnen kommunaler fester Abfälle, wobei konservative Schätzungen besagen, dass mindestens 33 % dieser Zahl nicht umweltgerecht bewirtschaftet werden. Weltweit liegt der pro Person und Tag erzeugte Abfall im Durchschnitt bei 0,74 Kilogramm, liegt aber weit von 0,11 bis 4,54 Kilogramm. Obwohl sie nur 16 % der Weltbevölkerung ausmachen, erzeugen Länder mit hohem Einkommen etwa 34 % oder 683 Millionen Tonnen des weltweiten Abfalls. Für die Zukunft erwarten die Prognosen, dass die Abfallmengen bis 2050 auf 3,40 Milliarden Tonnen ansteigen werden, was mehr als das Doppelte des Bevölkerungswachstums im gleichen Zeitraum darstellt (Abb. L 7, S. Insgesamt gibt es eine positive Korrelation zwischen Abfallerzeugung und Einkommensniveau. Die tägliche Pro-Kopf-Abfallerzeugung in Ländern mit hohem Einkommen wird bis 2050 voraussichtlich um 19 % zunehmen, verglichen mit Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen, in denen sie voraussichtlich um etwa 40 % oder mehr zunehmen wird.

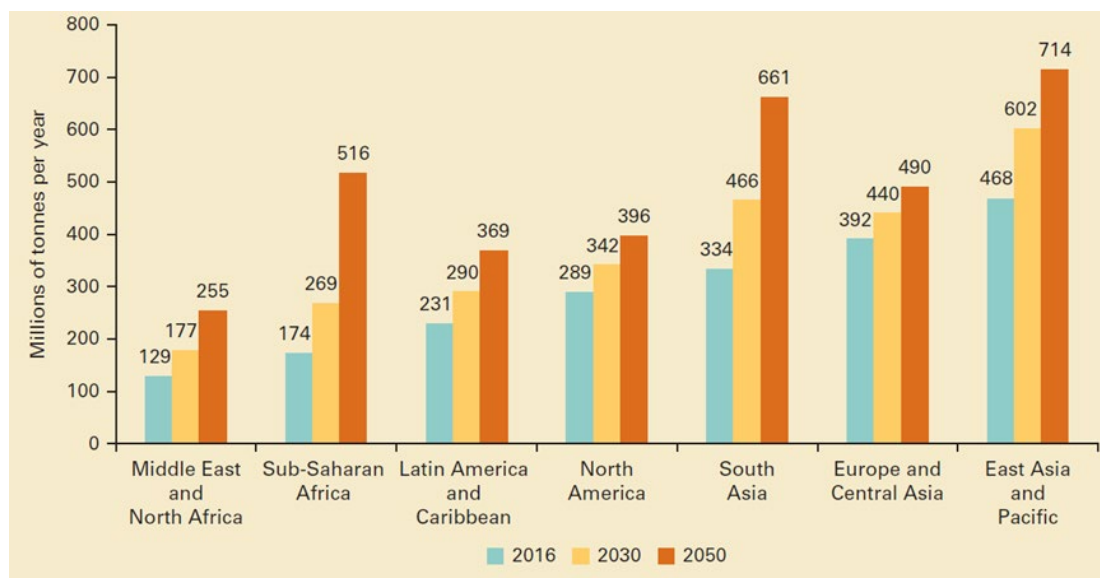


Figure 7: Prognostizierte Abfallerzeugung nach Regionen (Quelle: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)).

Nach der Erzeugung muss MSW durch Wiederverwendung, Recycling, Lagerung, Behandlung und/oder Entsorgung verwaltet werden. Weltweit werden die meisten Abfälle derzeit in Form einer Deponie deponiert oder entsorgen. Etwa 37 % der Abfälle werden in irgendeiner Form auf Deponien deponiert, 8 % davon werden auf sanitären Deponien mit Deponiegassammelsystemen deponiert. Unkontrollierte Deponien machen etwa 31 % der Abfälle aus, 19 % werden durch Recycling und Kompostierung zurückgewonnen und 11 % werden zur Endlagerung verbrannt (Abb. L 8, S. Eine angemessene Abfallentsorgung oder -Behandlung, wie kontrollierte Deponien oder stärker betriebene Anlagen, findet sich fast ausschließlich in Ländern mit hohem und mittlerem Einkommen. Länder mit geringerem Einkommen sind im Allgemeinen auf offenes Dumping angewiesen (Abb. 9): 93 % der Abfälle werden in Ländern mit niedrigem Einkommen und nur 2 % in Ländern mit hohem Einkommen

<sup>4</sup> [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)

deponiert. Die Verbrennung wird vor allem in Ländern mit hoher Kapazität, hohem Einkommen und Land-Beschränkungen<sup>5</sup>eingesetzt.

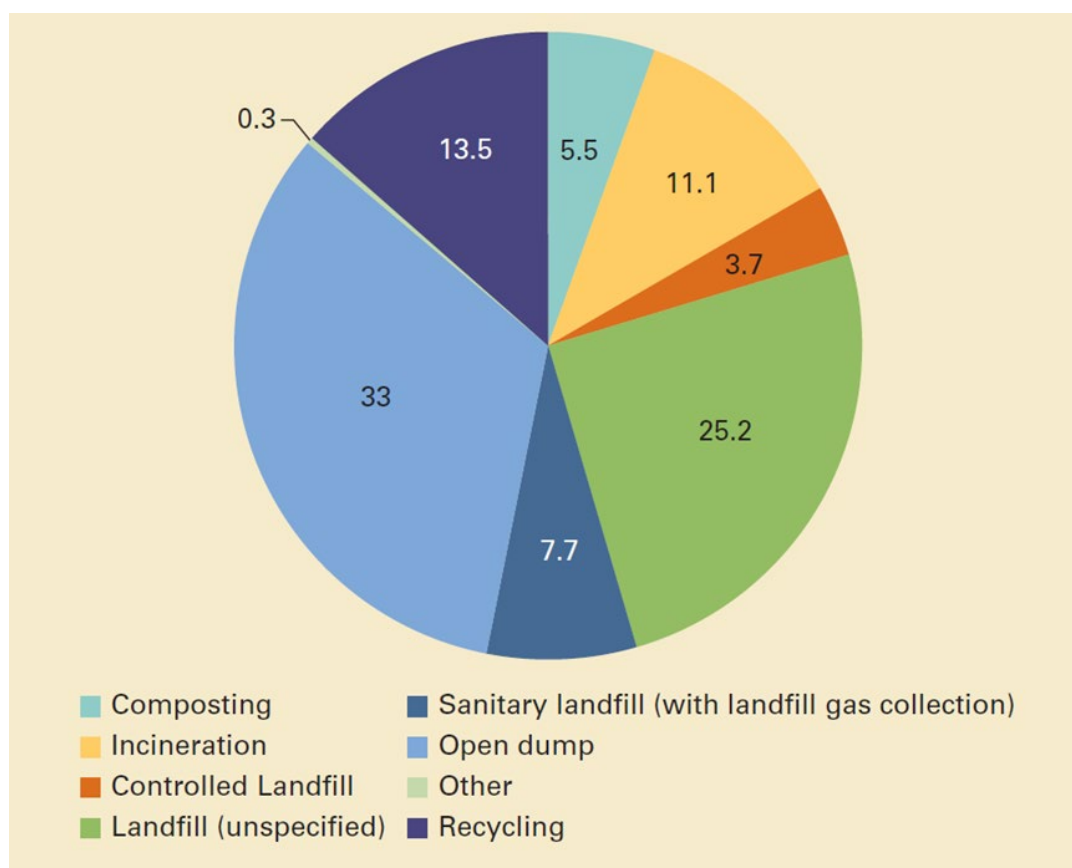


Figure 8: Globale Behandlung und Entsorgung von Abfällen (Quelle: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)).

#### 2.4.1 Umweltauswirkungen von MSW

Die Abfallwirtschaft ist ein universelles Thema, das jeden einzelnen Menschen auf der Welt betrifft. Eine unsachgemäße Entsorgung kann zu gesundheitsschädlichen Folgen führen, beispielsweise durch Wasser-, Boden- und Luftverunreinigungen. Gefährliche Abfälle oder unsichere Abfallbehandlung, wie z. B. offenes Brennen, können Müllarbeiter oder andere Menschen, die an der Abfallverbrennung beteiligt sind, und Nachbargemeinden direkt schädigen. Gefährdete Gruppen wie Kinder haben ein erhöhtes Risiko für gesundheitsschädliche Wirkungen<sup>6</sup>. Schlecht bewirtschaftete Abfälle verseuchen die Weltmeere, verstopfen die Abflüsse und verursachen Überschwemmungen, übertragen Krankheiten durch die Züchtung von Vektoren, erhöhen Atemwegsprobleme durch

<sup>5</sup> [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html)

<sup>6</sup> [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who\\_compendium\\_chapter4\\_v2\\_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc\\_5](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who_compendium_chapter4_v2_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc_5)

luftgetragene Partikel durch die Verbrennung von Abfällen, schädigen Tiere, die unwissentlich Abfall konsumieren, und beeinträchtigen die wirtschaftliche Entwicklung<sup>7</sup>.

Etwa 54 Millionen Tonnen Elektroschrott, wie Fernseher, Computer und Telefone, werden jährlich erzeugt (2019 Daten), mit einem erwarteten Anstieg auf 75 Millionen Tonnen bis 2030. Im Jahr 2019 wurden nur 17 % der E-Abfälle als ordnungsgemäß gesammelt und recycelt dokumentiert. Die Exposition gegenüber unsachgemäß gehandhabten E-Abfällen und deren Komponenten kann vor allem bei Kleinkindern zahlreiche negative Auswirkungen auf die Gesundheit und die Entwicklung haben<sup>6</sup>.



Figure 9: Das städtische Dandora-Dumpinggelände in Nairobi, Kenia (Quelle: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora\\_2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Dandora#/media/File:Dandora_2.jpg))

In der Regel enthalten kommunale feste Abfälle verschiedene Schadstoffe und gefährliche Stoffe. Eine Art Deponie ist weltweit die primäre Methode für kommunale feste Abfälle<sup>8</sup>. Ohne die Bedeutung der Trennung von Abfallquellen zu ignorieren, um beispielsweise die Entsorgung von Batterien oder anderen gefährlichen Stoffen auf einer Deponie zu vermeiden, sind die beiden drängendsten Umweltprobleme in Bezug auf Deponien Sickerwasser und Methangas (Abb. L 10, S.

<sup>7</sup> <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>

<sup>8</sup> Mavropoulos, A., (2015). Wasted Health: Der tragische Fall von Müllhalden, ISWA (verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/281774422\\_Wasted\\_Health\\_the\\_tragic\\_case\\_of\\_dumpsites](https://www.researchgate.net/publication/281774422_Wasted_Health_the_tragic_case_of_dumpsites))



Figure 10: Typischer Querschnitt einer modernen Sanitärdeponie (Quelle: <https://www.baltimorecountymd.gov/departments/publicworks/recycling/theresource/today-s-landfill-not-your-grandpa-s-dump>).

## 2.4.2 Sickergas und Biogas

Sickerwasser, eine Flüssigkeit, die durch Niederschlagswasser entsteht, das durch das Abfallvolumen von Deponien geleitet wird, kann hohe Ammoniakwerte enthalten (Abb. L 11, S. Wenn Ammoniak seinen Weg in Ökosysteme findet, wird es nitrifiziert, um Nitrat zu produzieren. Dieses Nitrat kann dann in nahe gelegenen Wasserquellen Eutrophierung oder Sauerstoffmangel aufgrund eines erhöhten Wachstums der Pflanzenlebensdauer verursachen. Die Eutrophierung schafft „tote Zonen“, in denen Tiere aufgrund von Sauerstoffmangel nicht überleben können. Zusammen mit Ammoniak enthält Lauge Giftstoffe wie Quecksilber aufgrund des Vorhandenseins gefährlicher Stoffe in Deponien<sup>9</sup>. Methangas wird freigesetzt, wenn die organische Masse in Deponien zerfällt (Abb. L 12, S. Methan absorbiert die Sonnenwärme 84 Mal effektiver als Kohlendioxid und ist damit eines der stärksten Treibhausgase und ein großer Beitrag zum Klimawandel. Neben Methan produzieren Deponien auch Kohlendioxid und Wasserdampf und verfolgen Mengen an Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und organischen Verbindungen ohne Methan. Diese Gase können auch zum Klimawandel beitragen und Smog erzeugen, wenn sie unkontrolliert bleiben<sup>7</sup>.

<sup>9</sup> <https://www.colorado.edu/center/2021/04/15/hidden-damage-landfills>

Parameters	Overall values		Overall range	
	Median	Mean	Minimum	Maximum
pH value	7.1	7.2	6.4	8.0
Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	7,180	7,789	503	19,200
Alkalinity (as $\text{CaCO}_3$ )	3,580	3,438	176	8,840
COD (mg/l)	954	3,078	<10	33,700
BOD <sub>20</sub> (mg/l)	360	>834	4.5	>4,800
BOD <sub>5</sub> (mg/l)	270	>798	<0.5	>4,800
TOC (mg/l)	306	717	2.8	<5,690
Fatty acids (as C) (mg/l)	5	248	<5	3,025
Kjeldahl-N (mg/l)	510	518	1	1,820
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	453	491	<0.2	1,700
Nitrate-N (mg/l)	0.7	2.4	<0.2	32.8
Nitrite-N (mg/l)	<0.1	0.2	<0.1	1.4
Sulphate (mg/l)	70	136	<5	739
Chloride (mg/l)	1,140	1,256	27	3,410
Phosphate (mg/l)	1.1	3.0	<0.1	15.8
Sodium (mg/l)	688	904	12	3,000

\* National Waste Database (1998)

Figure 11: Typische Zusammensetzung von Sickerflut aus irischen Deponien (Quelle: Kalyuzhnyi et al, 2003).

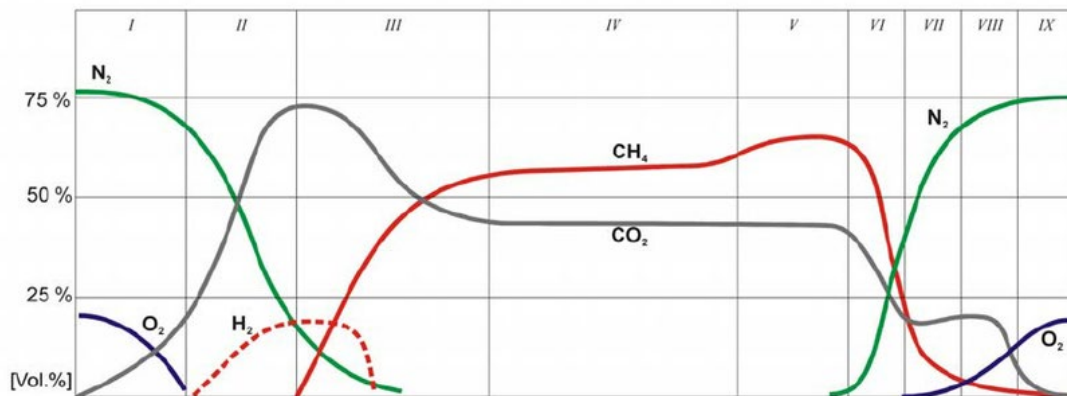


Figure 12: Langfristiges Modell der Zusammensetzung des Deponiegases. I aerobe Phase, II saure Phase, III instabile Methanphase, IV stabile Methanphase, V langfristige Phase, VI Luftinfiltrationsphase, VII Methanoxidationsphase, VIII Kohlendioxid-Phase, IX Luftphase (Quelle: Wagner et al, 2007).

Darüber hinaus können Deponien auch mit sozialen Auswirkungen verbunden sein. Emissionen aus Deponien stellen eine Bedrohung für die Gesundheit derjenigen dar, die in der Umgebung von Deponien leben und arbeiten. Große Deponien verringern im Durchschnitt den Wert des angrenzenden Landes um 12,9 %. Schließlich bergen Deponien Gefahren wie Geruch, Rauch, Lärm, Insekten und Wasserversorgungskontamination<sup>7</sup>.

Eine weitere gemeinsame Strategie für den Umgang mit MSW ist die Verbrennung. Durch die Verbrennung werden feste Abfallmengen (bis zu 70 %) und Mengen (bis zu 90 %) für Deponien



reduziert und gleichzeitig Krankheitserreger getötet. Diese Vorteile werden jedoch durch die Emissionen von Kohlenstoffoxiden, Schwefeloxiden, Partikeln, Schwermetallen und anderen Schadstoffen aus den Verbrennungsanlagen ausgeglichen. In der Regel werden für jede Tonne MSW, die verbrannt wird, 15–40 kg gefährliche Abfälle produziert, die einer weiteren Behandlung<sup>10</sup>bedürfen. Heute verwenden Verbrennungsanlagen fortschrittliche Luftreinigungskontrollen und können Technologien umfassen, die 99 % der bei der Verbrennung emittierten Dioxine und Furane<sup>11</sup>entfernen. Darüber hinaus kann die Verbrennung mit Energierückgewinnung zu einer Nettoeinsparung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Massenverbrennung von MSW führen, obwohl die Robustheit dieser Option entscheidend von der ersetzten Energiequelle<sup>12</sup>abhängt.

---

<sup>10</sup> <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-018-0175-y>

<sup>11</sup> <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/municipal-solid/environment.html>

<sup>12</sup> [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate\\_change\\_xsum.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate_change_xsum.pdf)

## 3 Vorhandene MSW-Managementstrategien

### 3.1 Einführung in das MSW-Management

Die Abfallmenge steigt weltweit aufgrund des Bevölkerungsbooms, des Wirtschaftswachstums, der raschen Urbanisierung und des Anstiegs des menschlichen Lebensstandards.

Abfall ist auch ein Problem für jedes europäische Land und seine Menge nimmt weiter zu. Auf kommunale feste Abfälle (MSW) entfallen etwa 10 % der gesamten in Europa erzeugten Abfälle (Eurostat, 2022). Die Sammlung und Verwaltung von MSW ist jedoch aufgrund der gemischten Zusammensetzung von Abfällen, der Verteilung auf viele Quellen und der Abhängigkeit von den Verbrauchsmustern eine schwierige Aufgabe.

Im Jahr 2020 wurden in der EU mehr als 225 Millionen Tonnen MSW gesammelt, was einem Durchschnitt von 505 kg pro Kopf entspricht (Eurostat, 2022). Die Erhebung von MSW variiert erheblich zwischen den Ländern und liegt im Bereich von 282 kg/Kopf in Rumänien bis zu 845 kg/Kopf in Dänemark (Eurostat, 2022). Diese Unterschiede spiegeln Unterschiede in den Verbrauchsmustern und dem wirtschaftlichen Wohlstand wider, hängen aber auch vom nationalen Ansatz für die Sammlung und Behandlung von Abfällen ab. Generell steigt in Ländern mit einem höheren BIP auch die Abfallerzeugung, obwohl in diesen Ländern fortschrittlichere Abfallbewirtschaftungsprozesse eingesetzt werden (STOA, 2017).

Ein schlechtes Management von MSW führt zu ernststen Umweltbelastungsproblemen, wie der Kontamination von Wasser, Boden und Atmosphäre, negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und deren Beitrag zum Klimawandel. In der Vergangenheit wurde MSW in der Regel auf Mülldeponien oder in Verbrennungen deponiert. Beide Methoden weisen erhebliche Nachteile auf, da Giftstoffe aus Deponien auslaugen oder die Luftverschmutzung durch Verbrennung verursacht wird. Moderne Entsorgungstechnologien haben das Potenzial für Umweltbelastungen verringert, jedoch zielt die EU-Abfallpolitik auf die Schaffung einer Kreislaufwirtschaft ab, in der Materialien und Ressourcen so lange wie möglich in der Wirtschaft erhalten bleiben und in der die Abfallentsorgung und die Verbrennung, die am wenigsten bevorzugten Optionen der Abfallbewirtschaftung sind.

Heute erfordert die Verwaltung von MSW einen komplexen Ansatz, um die Ressourceneffizienz zu maximieren und technisch angemessene, wirtschaftlich tragfähige und sozial akzeptable Lösungen für Abfallbewirtschaftungsprobleme zu fördern. So wurde das Konzept des Integrierten Abfallmanagements (IWM) entwickelt.

IWM konsolidiert Abfallströme, Abfallsammlung, Transport, Verarbeitung und Entsorgung in einem komplexen Abfallmanagementsystem. Jedes IWM-System ist einzigartig und kombiniert eine Mischung aus Abfallbewirtschaftungstechniken, um die verschiedenen Abfallarten auf eine Art und Weise zu behandeln, die ökologisch, finanziell und sozial nachhaltig ist. Daten zur Abfallerzeugung und -Verwaltung spielen im IWM eine wichtige Rolle. Das Wissen über verschiedene Technologien und ihre negativen Auswirkungen auf die Umwelt sowie die Schätzung der Menge und Zusammensetzung der erzeugten Abfälle zusammen mit Prognosen für das Bevölkerungswachstum helfen den lokalen Regierungen, geeignete Technologien zur Abfallsammlung und -Behandlung auszuwählen und für die

zukünftige Nachfrage zu planen (Sharma and Jain, 2020). Die Auswahl geeigneter IWM-Abfallbehandlungstechniken basiert auf den Grundsätzen der Abfallhierarchie.

Zur Bewertung der ökologischen und wirtschaftlichen Leistung von IWM-Systemen werden Tools wie Life Cycle Inventory (LCI) verwendet.

Die Vielfältigkeit der Aufgabe und die Anzahl der vorläufigen Annahmen ist in Abbildung 13 dargestellt. Life Cycle Inventory untersucht verschiedene Wege des Abfallstroms und dessen Umwandlung sowie begleitende Umweltauswirkungen.

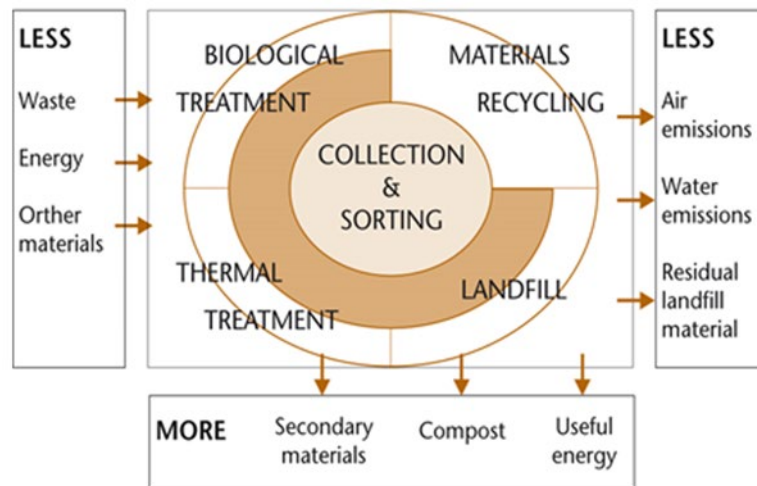


Figure 13: Integriertes Abfallmanagement: Ein Lebenszyklus-Inventar (nach Zbizinski et al., 2006).

Ein wesentliches Ziel der EU-Abfallpolitik besteht darin, die Effizienz der Abfallbewirtschaftung zu erhöhen und die Menge der Abfälle zu verringern, die auf Deponien verbracht werden. Insgesamt ist die Menge der Deponieabfälle in Europa zurückgegangen (im Jahr 2018 lag sie um 7,6 % unter dem Wert von 2010), obwohl die Gesamtmenge der erzeugten Abfälle weiter zunimmt. Bei MSW und ähnlichen Abfällen wurde zwischen 2010 und 2018 eine Verringerung um 51 % zur Umleitung von Abfällen aus der Deponie vorgenommen (EWR, 2021). Gemäß der EU-Deponierichtlinie müssen die Mitgliedstaaten jedoch die Menge der auf Deponien entsandten Siedlungsabfälle auf 10 % oder weniger der Gesamtmenge der bis 2035 erzeugten Siedlungsabfälle reduzieren. Im Jahr 2019 hatten nur neun Mitgliedstaaten dieses Ziel erreicht (Österreich, Belgien, Dänemark, Finnland, Deutschland, Luxemburg, die Niederlande, Slowenien und Schweden) sowie Norwegen, wobei mehrere dieser Länder erhebliche Mengen an Siedlungsabfällen verbrennen (Abbildung 14).

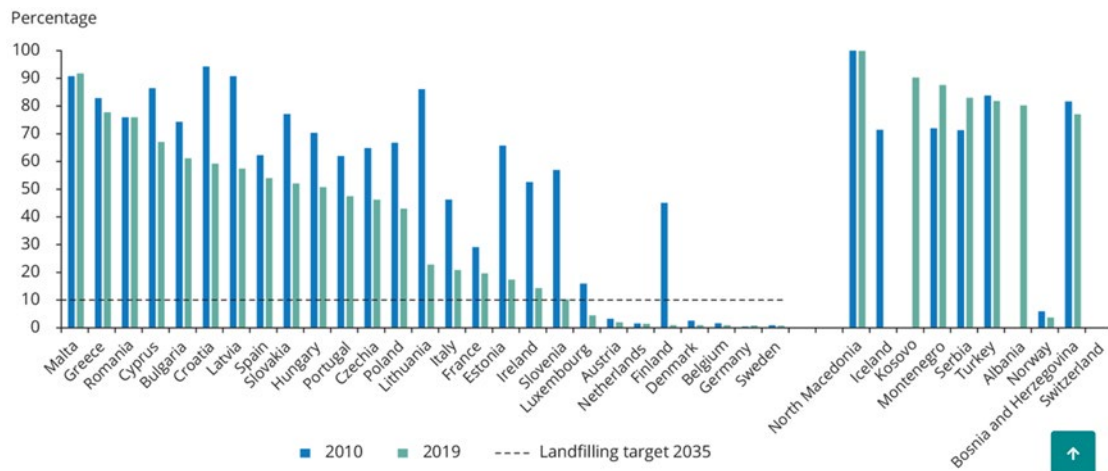


Figure 14: Abfalldeponien in den EU-Mitgliedstaaten und anderen europäischen Ländern (Quelle: EWR, 2021).

Zu den Abfallpolitiken, die sich bei der Reduzierung der Deponieabfüllung als erfolgreich erwiesen haben, gehören auch die Deponiesteuern Innerhalb der EU-Mitgliedstaaten haben nur Zypern, Deutschland, Kroatien und Malta (sowie Norwegen) keine Deponiesteuer. Die Steuersätze variieren zwischen den Mitgliedstaaten erheblich von 5 €/t in Litauen bis zu mehr als 100 €/t in Belgien (CEWEP, 2021). Zwischen Deponiesteuer und Deponieabfüllung besteht ein gewisser Zusammenhang, wobei ein klares Muster niedriger Deponiemengen besteht, da die Deponiesteuer tendenziell ansteigt (STOA, 2017).

Weitere wichtige politische Maßnahmen, die zur Verlagerung der Abfallhierarchie beitragen, umfassen das Verbot der Deponierung biologisch abbaubarer Siedlungsabfälle oder nicht vorbehandelter Siedlungsabfälle, die obligatorische getrennte Sammlung von Siedlungsabfällen für die Verwertung von Siedlungsabfällen oder die wirtschaftliche Unterstützung für den Aufbau einer Infrastruktur für die Sammlung und das Recycling von Abfällen. So gelang es Deutschland beispielsweise, eine der höchsten Recyclingquoten von Siedlungsabfällen in Europa zu erreichen, ohne eine Deponiesteuer zu erheben, aber mit einer Kombination aus anderen politischen und finanziellen Instrumenten.

Einige Länder erheben auch Steuern für die Müllverbrennung. Für eine detailliertere Analyse werden interessierte Leser auf die BlockWASTE-Leistungsbeschreibung „[01.A1 - Comparative study of Municipal Solid Waste \(MSW\) Management Regulations in each country](#)“ verwiesen.

### 3.2 Abfallbewirtschaftungshierarchie

Das fünfstufige Abfallhierarchie-System wurde zum ersten Mal durch die EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) eingeführt und wurde weithin als Schlüssel für Entscheidungen zur Abfallbewirtschaftung auf lokaler, nationaler und internationaler Ebene eingesetzt (Abbildung 15).

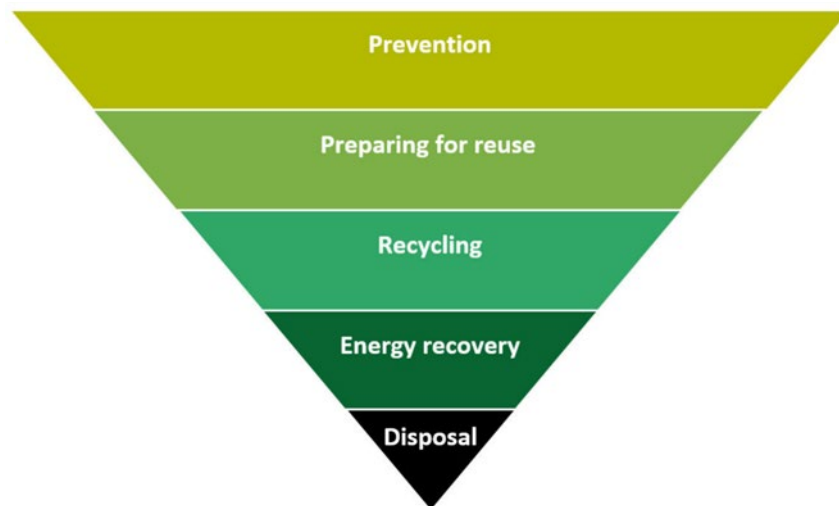


Figure 15: Abfallhierarchie. (Quelle: Abfallrahmenrichtlinie, 2008).

Die Abfallhierarchie veranschaulicht die Umweltauswirkungen verschiedener Abfallbewirtschaftungsmethoden und hat Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Abfallwirtschaft.

Die Abfallvermeidung steht ganz oben der Abfallhierarchie. Bei der Abfallentsorgung wird der Vorbereitung für die Wiederverwendung, dem Recycling (einschließlich Kompostierung) und der weiteren Verwertung (z. B. der Energierückgewinnung) Priorität eingeräumt, während die Abfallentsorgung über Deponien die allerletzte Option ist. Die EU-Abfallvorschriften haben auch spezifische Ziele, um die Wiederverwertung bestimmter Abfallströme wie elektronische Geräte, Autos, Batterien, Bau-, Abriss-, Kommunale und Verpackungsabfälle sowie die Reduzierung der Deponierung von biologisch abbaubaren Abfällen (Europäische Kommission, 2022).

### 3.3 Gemeinsame Grundsätze im MSW-Management

Das moderne MSW-Management basiert auf mehreren Prinzipien:

#### **Ressourceneffizienz**

Ressourceneffizienz bedeutet die Reduzierung der Umweltauswirkungen durch die Produktion und den Verbrauch von Waren, von der endgültigen Rohstoffgewinnung bis zur letzten Nutzung und Entsorgung. Aus Sicht der Abfallwirtschaft bedeutet dies, dass die Abfallerzeugung nicht nur ein Umweltproblem, sondern auch ein wirtschaftlicher Verlust ist. Das MSW-Prinzip besteht daher darin, die Produktions- und Verbrauchsmuster zu ändern, um weniger Abfall zu produzieren und dabei alle erzeugten Abfälle als Ressource zu nutzen. Dieser Ansatz spiegelt sich auch in der Abfallhierarchie wider – um die Entstehung von Abfällen als solche zu verhindern, Abfall als neue Ressource zu nutzen und die Menge der Abfälle, die auf Deponien entsorgen werden, zu minimieren. Ressourceneffizienz im Abfallmanagement steht auch im Zusammenhang mit Kreislaufwirtschaftsprinzipien, bei denen Ressourceneingaben, Emissionen und Energieverluste durch die Optimierung aller Prozesse minimiert und die Abfallerzeugung auf das absolute Minimum reduziert werden.

#### **Verursacher zahlt und erweiterte Herstellerverantwortung**

Der Verursacher ist ein einfaches Prinzip, das bedeutet, dass diejenigen, die Verschmutzung verursachen, dafür verantwortlich sind und dafür zahlen müssen, um Schäden für die menschliche Gesundheit und/oder die Umwelt zu vermeiden. Im Bereich der Abfallwirtschaft bezieht sich das Verursacherprinzip auf die Forderung, dass ein Abfallerzeuger für eine angemessene Entsorgung nicht wiederherstellbaren Materials aufkommen muss. Das erweiterte System der Herstellerverantwortung ist eine praktische Methode zur Umsetzung des Verursacherprinzips. Es wird zum Beispiel für Elektro- und Elektronik-Altgeräte, Fahrzeuge, Batterien, Verpackungsabfälle, Agrarabfälle. Für die Flaschenabholung umfasst dieses System ein System zur Erstattung der Kautions.

**„Pay as you Throw“-Prinzip (PAYT):** In diesem Modell wird die Entsorgung von MSW nach der Stückzahl des Abfallmaterials und nicht nach einer Pauschale berechnet. Dieser wirtschaftliche Anreiz ist in einigen Mitgliedstaaten gut etabliert und hat erhebliche Auswirkungen auf das Verhalten der Menschen.

## 3.4 MSW-Bestrahlung

### 3.4.1 Deponie

Die Entsorgung von Abfällen ist laut Abfallhierarchie eine der am wenigsten bevorzugten Optionen heutzutage. Die Ablagerung von festen Abfällen an Land wird als Deponie oder Dumping (Worell & Vesilind, 2012) bezeichnet, was bis 1960 eine der ursprünglichen Methoden fast für alle Binnengemeinden war Ende der 1960-er Jahre begannen die Industrieländer, entwickelte Lösungen für die Abfallentlagerung zu verwenden, was zur Entwicklung von sanitären Deponien führt. Zu den sanitären Deponien gehören Bodeneinlagen, Sickersäulensysteme, Sickerstoffaufbereitung, Gassammlung, Gasaufbereitung, Abschlussabdeckungen sowie Luft- und Wasserüberwachungssysteme (EREF, 2022). In einer Deponie erfolgt der Abbau von Abfällen aufgrund der komplexen chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse. Diese Prozesse werden durch Umweltbedingungen (wie Temperatur, pH, das Vorhandensein von Giftstoffen, Feuchtigkeitsgehalt und das Oxidations-Reduktionspotenzial) beeinflusst. Als Ergebnis dieser Prozesse werden Abfälle abgebaut oder transformiert. Die Abbaurate hängt auch von der Zusammensetzung des Abfalls ab und führt zur Bildung von Sickergas und Deponiegas.

Das Laugen wird durch die Durchsickerung des Wassers durch den Abfall nach der Platzierung erzeugt und beinhaltet auch, dass die Feuchtigkeit im Abfall vor der Entsorgung zurückgehalten wird (EREF, 2022). Die Qualität des Laugungsgutes in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Feststoffabfalls, der Niederschlagsrate, der Hydrologie des Standorts, der Verdichtung, der Abdeckungskonstruktion, Abfallalter, Testverfahren, Wechselwirkung von Sickerwasser mit der Umwelt sowie Planung und Betrieb von Deponien (Worell & Vesilind, 2012). Nach der Entnahme muss das Sickerwasser vor Ort behandelt oder zur weiteren Behandlung an die kommunale Kanalisation geschickt werden.

Das Deponiegas, das bei der biologischen Zersetzung kommunaler fester Abfälle (MSW) entsteht. Mathematische und Computermodelle können die Zusammensetzung des Deponiegases vorhersagen, das hauptsächlich auf der Zusammensetzung der Deponieabfälle und dem Feuchtigkeitsgehalt basiert.

Die Europäische Union versucht, die Menge der Abfälle, die auf Deponien verbracht werden, auf ein Minimum zu begrenzen. Das wichtigste Gesetz, das 1999 in Kraft trat, war die Deponierichtlinie. Die Deponierichtlinie legt strenge betriebliche Anforderungen für Deponien fest, mit dem Ziel, sowohl die menschliche Gesundheit als auch die Umwelt zu schützen (EG, 2022).

### 3.4.2 Verbrennung und Energierückgewinnung

Die meisten MSW sind brennbar und können mit Energierückgewinnung in Verbrennungsanlagen für Massenverbrennungen verbrannt werden, um die Abfallmenge zu reduzieren. Solche Brennkammern verfügen über einen Lagerbereich für feste Abfälle zur Lagerung und Sortierung des ankommenden Abfalls, einen Kran zur Verladung des Abfalls in den Verbrennungsblock, eine Brennkammer aus Bodenrosten, das Wärmerückgewinnungssystem aus Rohren, in dem Wasser in Dampf umgewandelt wird, das Aschefördersystem, und das Luftreindämungssystem, das Wäscher und Sackhausfilter für die Entfernung von Flugasche und Partikeln umfasst.

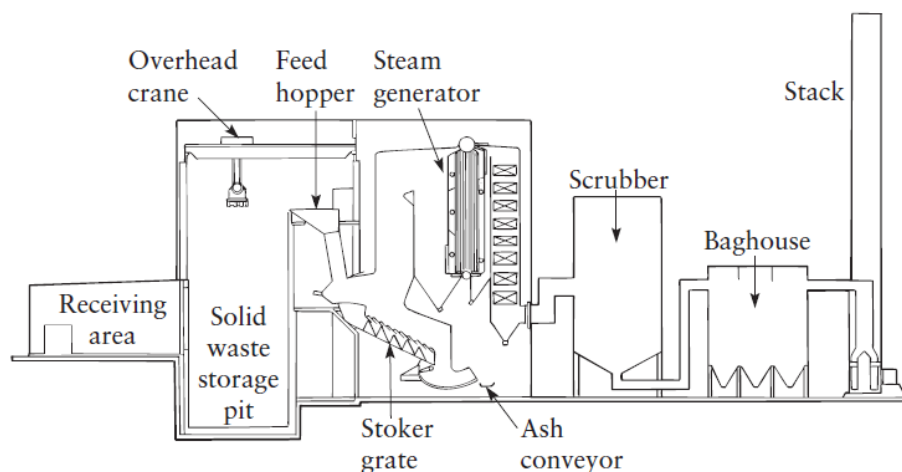


Figure 16: Ein typisches Schema der kommunalen Brennkammer für feste Abfälle (nach Worell & Vesilind, 2012).

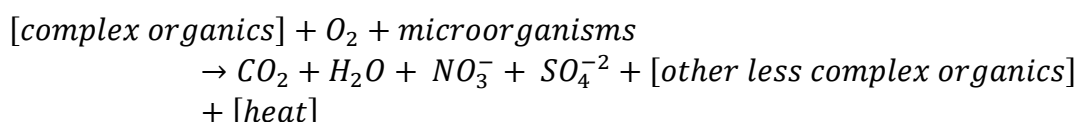
Waste to Energy (Wte) oder Energy - From - Waste (EFW) ist definiert als ein Prozess der Verbrennung von Abfällen mit Energierückgewinnung. Zu den wichtigsten Arten von Wte-Prozessen gehören:

- Mitverbrennung von Abfällen in Verbrennungsanlagen (z. B. Kraftwerken) und in der Zement- und Kalkproduktion;
- Müllverbrennung und Mitverbrennung in speziellen Anlagen;
- Anaerobe Verdauung biologisch abbaubarer Abfälle
- Herstellung von abfallgewonnenen festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen und
- Andere Verfahren, einschließlich der indirekten Verbrennung nach einer Pyrolyse oder Vergasung;

In Bezug auf die KOM(2017)34 der Europäischen Kommission zur Rolle von Abfall-zu-Energie in der Kreislaufwirtschaft wird gemäß der Abfallhierarchie nur die anaerobe Vergärung mit Biogasproduktion als Recyclingoption positioniert. Alle anderen Arten von WtE-Prozessen sind hauptsächlich mit der Recovery-Option verbunden. Die Verbrennung und Mitverbrennung mit begrenzter Energierückgewinnung werden zusammen mit der Deponierung von Abfällen an die unterste Stelle der Hierarchie gestellt. Der offene Brennprozess in der Europäischen Union wird aufgrund der Probleme, die mit einer hohen Luftverschmutzung verbunden sind, abgeraten.

### 3.4.3 Kompostierung und Biomethanisierung

Kompostierung kann als Abbauprozess von organischem Material in Anwesenheit der Mikroorganismen zu Wasser, Kohlendioxid und mikrobieller Biomasse definiert werden. Bei der Kompostierung wandeln Mikroorganismen organische Materialien in ein wertvolles Produkt namens „Humus“ um. Die grundlegende Reaktion ist wie folgt (Worell & Vesilind, 2012):



Die Kompostierung erfolgt hauptsächlich in vier Phasen:

- a) **Mesophile Anfangsphase** - in der mesophilen Anfangsphase beginnen sich die Bakterien, die organische Substanz zersetzen, intensiv zu vermehren, die kompostierbare Masse erwärmt sich und der pH-Wert sinkt.
- b) **Thermophilen Phase** - während der thermophilen Phase, in der die Temperatur auf 60-70 Grad ansteigt, werden die meisten Krankheitserreger, Schädlinge und Parasiten im Abfall getötet und die Unkrautsamen zerstört.
- c) **Mesophile Reifungsphase** - in der mesophilen Reifungsphase bleibt die Temperatur bei 35-55 Grad und beginnt aufgrund der Nährstoffdepletion zu sinken. Der Gehalt an persistenten Verbindungen nimmt mit der Zeit ab.
- d) **Abkühlung und nach der Reifungsphase** - während der Abkühlungs- und Reifungsphase wird die mikrobiologische Aktivität weiter reduziert. Die Temperatur steigt nicht mehr über 40 Grad Celsius, selbst wenn der Kompost gemischt wird. Regenwürmer erscheinen im Kompost. Während der Nachreifung reift der Kompost und es bildet sich der wertvollste „Humus“.

Zu den wichtigsten Kompostierungssystemen gehören (Atalia et al., 2015):

- Offene Schwaden – eine Mischung aus organischen Abfällen muss in lange, schmale Stapel gelegt werden.
- Belüfteter statischer Stapel – organischer Abfall wird in einen Stapel gelegt, der belüftet wird, indem in regelmäßigen Abständen Luft durch die perforierten Rohre geleitet wird.
- In der Behälterkompostierung – Kompostierung erfolgt in verschiedenen Reaktoren. Diese Systeme enthalten in der Regel Vorkehrungen für die Belüftung, das Mischen, die Temperaturkontrolle und die Eindämmung von Gerüchen.



- Vermicomposting - kombinierte Aktivität von Mikroorganismen und Regenwürmern.
- Biomineralisierung - die Nährstoffe in Form von löslichen Mineralien werden verwendet, die vom Wurzelsystem aus fruchtbarem, gut mineralisiertem Kompostboden aufgenommen werden.

### Biomethanisierung

Der anaerobe Abbau organischer Stoffe (ohne Sauerstoff) wird auch als Biomethanisierung bezeichnet. Zu den wichtigsten Endprodukten gehören Methan (CH<sub>4</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), geringe Mengen Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und einige andere (Worell & Vesilind, 2012).

Der Prozess der anaeroben Verdauung kann in drei Phasen beschrieben werden:

- Hydrolyse, d. h. Bakterien bauen hochmolekulare organische Verbindungen zu niedermolekularen Verbindungen (Monomeren) auf.
- Acidogenis, acetogene Bakterien wandelt in der ersten Phase erschienen degradierte Produkte zu flüchtigen Fettsäuren, Kohlendioxid und Wasserstoff.
- Methanogenese, Bakterien wandelt organische Säuren und Alkohole in Essigsäure und molekularen Wasserstoff. Am Ende dieser Phase wird Methan aus Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid gewonnen.

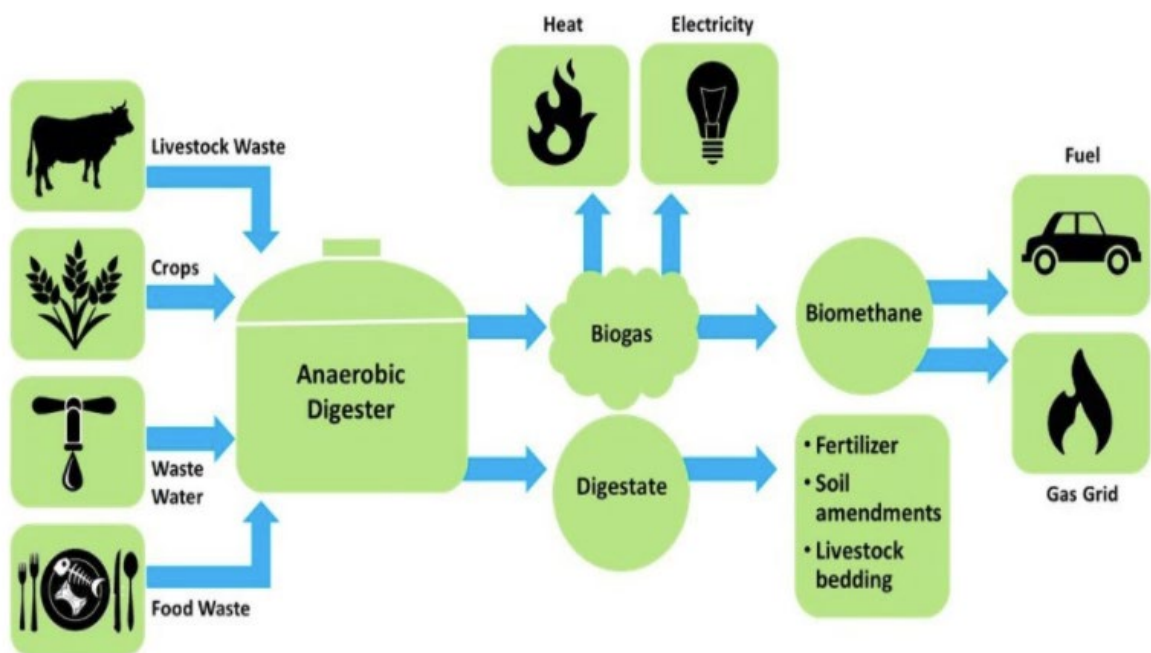


Figure 17: Anaerobe Verdauung (Grafik von Sara Tanigawa, EESI).

Zu den wichtigsten Rohstoffen für den anaeroben Verdauungsprozess gehören Lebensmittelabfälle, Tierabfälle, Pflanzenrückstände und Klärschlamm aus Kläranlagen.

Das erzeugte Biogas kann in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genutzt werden oder Biogas kann einfach mit einem Verbrennungsmotor, einer Brennstoffzelle oder einer Gasturbine in Strom

umgewandelt werden. Darüber hinaus kann es durch die Entfernung von Kohlendioxid, Wasserdampf und anderen Spurengasen zu erneuerbarem Erdgas (RNG) oder Biomethan modifiziert werden. RNG kann in das bestehende Erdgasnetz (einschließlich Pipelines) eingespeist und austauschbar mit herkömmlichem Erdgas verwendet werden (EESI, 2017). Wie herkömmliches Erdgas kann RNG als Fahrzeugkraftstoff verwendet werden, nachdem es in komprimiertes Erdgas (CNG) oder flüssiges Erdgas (LNG) umgewandelt wurde.

### 3.4.4 Recycling

Das Hauptprinzip der Abfallbewirtschaftung in der EU, um die Erzeugung von MSW zu verhindern, wiederzuverwenden oder zu recyceln, wobei dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft folgt und die negativen Auswirkungen der Nutzung von Primärressourcen durch den Austausch dieser Ressourcen durch Sekundärmaterialien minimiert werden sollen (EWR, 2022).

Nach der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG ist Recycling jeder Rückgewinnungsvorgang, bei dem Abfallstoffe zu Produkten, Materialien oder Stoffen, sei es für den ursprünglichen oder anderen Zweck, wiederverarbeitet werden. Es umfasst die Wiederaufbereitung von organischem Material, jedoch nicht die Energierückgewinnung und die Wiederaufbereitung zu Materialien, die als Brennstoffe oder für Rückfüllarbeiten verwendet werden sollen. In Europa ist die Tendenz zum Recycling verschiedener Abfallströme innerhalb der letzten 10 Jahre gestiegen (Abbildung 18).

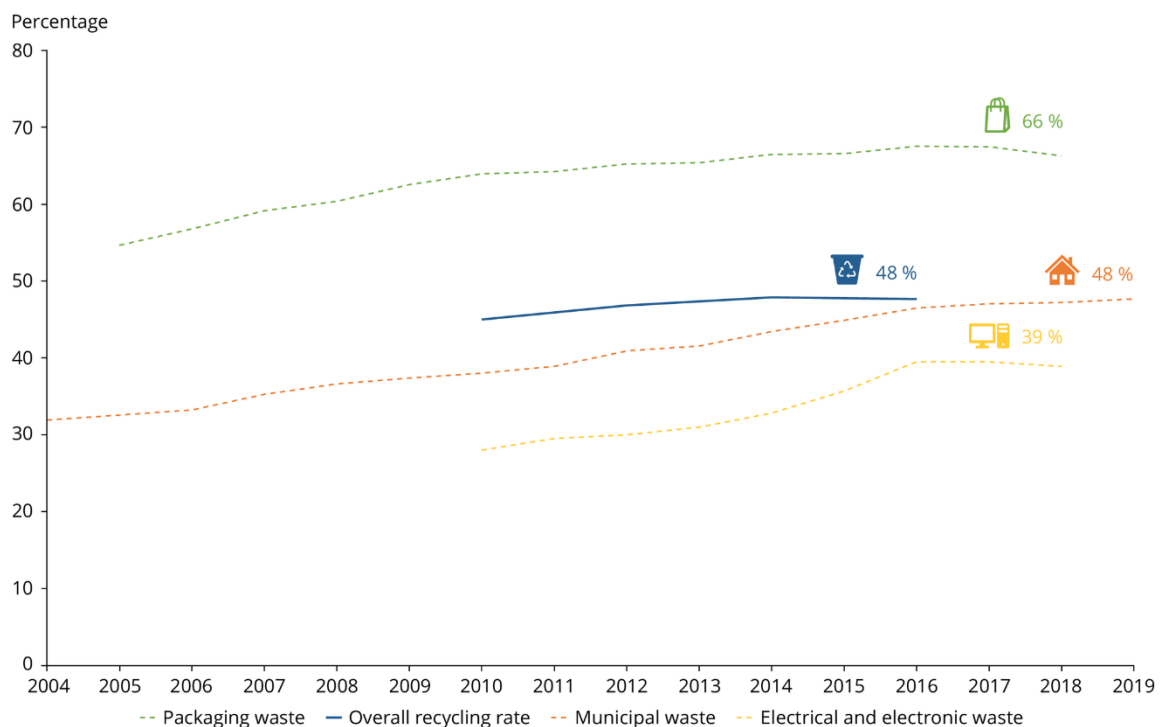


Figure 18: Recyclingquoten in Europa nach Abfallströmen (Quelle: EWR, 2022).

## 4 Kreislaufwirtschaft

### 4.1 Das lineare Modell von Produktion und Konsum

Das Wachstum der Bevölkerung zwingt dazu, die bisher durchgeführten Managementsysteme zu verändern. Die Bevölkerung in der EU ist seit dem Jahr 1970s um fast 100 Millionen Menschen gewachsen. Diese Tatsache hat direkte Auswirkungen auf die Abfallerzeugung: Mehr Bevölkerung, mehr Abfall. Trotz nationaler und EU-Bemühungen nimmt die Menge der erzeugten Abfälle nicht ab. Die Abfallerzeugung aus allen Wirtschaftstätigkeiten in der EU beläuft sich auf 2,5 Milliarden Tonnen pro Jahr, und jeder Bürger produziert im Durchschnitt eine halbe Tonne Siedlungsabfall.

Gemäß der Richtlinie 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates machen Siedlungsabfälle etwa 7 bis 10 % des gesamten Abfallaufkommens in der Europäischen Union aus.

Dieser Abfallstrom gehört jedoch zu den komplexesten zu bewirtschaften, und die Art und Weise, wie er verwaltet wird, gibt im Allgemeinen einen guten Hinweis auf die Qualität des gesamten Abfallbewirtschaftungssystems eines Landes.

Der gesamte EU-Ressourcenverbrauch, gemessen in der Masse, ist in Abb. 19.

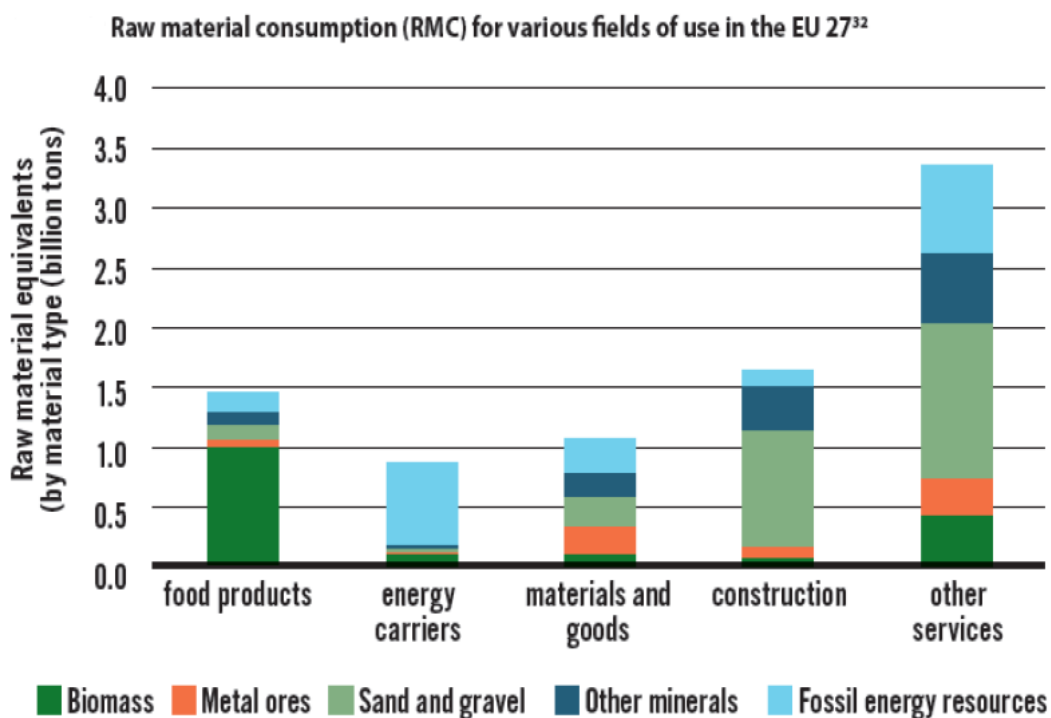


Figure 19: Rohstoffverbrauch (RMC) (Quelle: Europäisches Umweltbüro 2012).

Die traditionelle lineare Wirtschaft, die auf "take-make-dispose" und dem Verbrauch großer Mengen an Energie und billigen Rohstoffen basiert, die einfach zu liefern sind, war das

grundlegende Element der sozialen und industriellen Entwicklung und hat ein beispielloses Wachstum in der Geschichte der Menschheit erzeugt.

Das traditionelle lineare Wirtschaftsmodell zeichnet sich vor allem durch folgende Merkmale aus:

- Günstige und leicht erhältliche Ressourcen.
- Fossile Brennstoffe.
- Extraktion-Produktion-Verwendung-Entsorgung.
- Übernutzung des Rohstoffs.
- Hohe Abfallmenge erzeugt.



Figure 20: Lineares Wirtschaftssystem (Quelle: BIMgreen 2019).

Das lineare Modell hat in Bezug auf Umweltfragen unterschiedliche Auswirkungen auf Ressourcen, Verbrauch und Produktion.

#### **Ressourcenbezogen:**

- Große Abfallmenge.
- Herkömmliche Ausbeutungssysteme.
- Einmalige Verwendung von Rohstoffen (nur einmal).
- Unkontrollierte Ausnutzung ohne vorheriges Design.
- Hohe Umweltbelastung.
- Erschöpfung der natürlichen Ressourcen und fossiler Brennstoffe.

#### **Verbrauchsbezogen:**

- Unkontrollierter Verbrauch.
- Keine Produktwiederverwendung.

#### **Produktionsbezogen:**

- Geringe Effizienz von Ressourcen und Energie.
- Traditionelle Geschäftsmodelle.

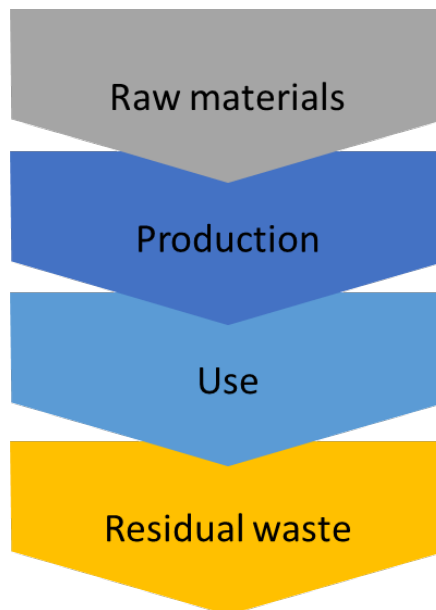


Figure 21: Umriss des linearen Wirtschaftsmodells (Quelle: Marmor- und Steintechnologiezentrum, 2018).

Die lineare 'take-make-dispose'-Wirtschaft stößt an ihre Grenzen:

- Setzt auf große Mengen billiger, leicht zugänglicher Materialien und Energie.
- 2025: Wachsende Weltbevölkerung (1,1 Mrd.) und wachsende Mittelschicht (3 Mrd.):
  - 24 % höherer Lebensmittelkonsum.
  - 47 % mehr Verpackung.
  - 41 % mehr Altmaterial (Abfall).
- Ressourcenbezogene Herausforderungen für Unternehmen und Volkswirtschaften, die ebenfalls wachsen:
  - Der Druck auf die natürlichen Ressourcen nimmt zu.
  - Niedriges und schlechtes Recycling -> nicht in der Lage, die Vorräte an hochwertigen Materialien zu halten.
  - Höhere Preisvolatilität -> höhere Unsicherheit bei den Unternehmensinvestitionen.
  - Die Rohstoffpreise stiegen im Jahr 2002-2010 um 150 % (Metalle, Lebensmittel und nicht-Lebensmittel aus der Landwirtschaft).

## 4.2 Kreislaufwirtschaft: Konzept, Ursprünge und Prinzipien

Die planetarische Wirtschaft ist in einem System blockiert, in dem alles, von der produktiven Wirtschaft und dem Contracting bis hin zur Regulierung und dem Verhalten der Menschen, das lineare Modell der Produktion, der Verteilung und des Konsums begünstigt. Diese Blockade wird jedoch aufgrund des Drucks, der durch das Auftreten starker disruptiver Tendenzen ausgeübt wird, immer schwächer. Es ist notwendig, diese günstige Kombination aus wirtschaftlichen, technologischen und sozialen Faktoren zu nutzen, um den Übergang zu einer zirkulären, restaurativen und regenerativen Wirtschaft zu beschleunigen, in der

Produkte, Nebenprodukte und Abfälle so lange wie möglich im Produktionszyklus gehalten werden und immer wieder wiederverwendet werden.

In einer Kreislaufwirtschaft entwerfen Hersteller Produkte, die wiederverwendbar sind. Beispielsweise sind elektrische Geräte so ausgelegt, dass sie leichter zu reparieren sind. Auch Produkte und Rohstoffe werden so weit wie möglich wiederverwendet. Zum Beispiel durch Recycling von Kunststoff zu Pellets für die Herstellung neuer Kunststoffprodukte. In einer Kreislaufwirtschaft gehen wir verantwortungsvoll mit unserer Umwelt um. Zum Beispiel durch die Vermeidung von Müll auf der Straße oder in der Natur.

Eine Kreislaufwirtschaft arbeitet nach dem 3R Ansatz von „Reduzieren, Wiederverwenden & Recyceln“. Die Materialextraktion wird, wenn möglich, durch den Einsatz von weniger Material reduziert, Produkte werden aus wiederverwendeten Teilen und Materialien hergestellt und nach der Entsorgung eines Produkts werden Materialien und Teile recycelt. In einer Kreislaufwirtschaft wird Wert durch die Konzentration auf die Werterhaltung geschaffen. Indem ein Materialstrom während der gesamten Wertschöpfungskette so rein wie möglich gehalten wird, bleibt der Wert dieses Materials erhalten. Reine Materialströme können mehrfach verwendet werden, um eine bestimmte Funktionalität oder einen bestimmten Service bereitzustellen, während nur eine Investition getätigt wird.



Figure 22: Umriss des kreisförmigen Wirtschaftsmodells (Quelle: Marmor- und Steintechnologiezentrum, 2018).

In einer Kreislaufwirtschaft wird die Nachhaltigkeit durch die Verbesserung der Ökoeffizienz des Systems verbessert. Das bedeutet, dass neben der Minimierung der negativen Auswirkungen des Systems der Fokus auf die Maximierung der positiven Auswirkungen des Systems durch radikale Innovationen und Systemwechsel gelegt wird.

In einer Kreislaufwirtschaft soll die Wiederverwendung so hochwertig wie möglich sein. Ein Reststrom sollte für eine Funktion wiederverwendet werden, die gleich (funktionale

Wiederverwendung) oder von einem höheren Wert (Upcycling) als die ursprüngliche Funktion des Materialstroms ist.

Dadurch wird sichergestellt, dass der Wert des Materials erhalten oder gesteigert wird. Beton kann zum Beispiel zu Körnern geschliffen werden, die verwendet werden, um eine ähnliche Wand wie zuvor zu schaffen, oder sogar ein stärkeres konstruktives Element.

Kreislaufwirtschaft – ein neues Konzept zeichnet sich vor allem durch:

- Unterscheidung zwischen technischen und biologischen Kreisen.
- Kreisförmiges Design.
  - Modulare Produkte, reinere Materialflüsse, einfachere Demontage.
- Immer mehr Menschen, die in städtischen Gebieten leben, erleichtern das Teilen, Reparieren und Recycling.
- Innovative Geschäftsmodelle: Vom Ownership bis hin zu Performance- und zugangsbasierten Service-Systemen.
- Kernkompetenzen und Technologien entlang umgekehrter Zyklen und Kaskaden: RFID-Tags zur leichteren Identifizierung und Wiederverwertung; 3D-Druck für Ersatzteile.

Die wichtigsten Merkmale der Kreislaufwirtschaft sind:

- Verbesserung der Wirtschaftsleistung bei gleichzeitiger Reduzierung des Ressourcennutzes.
- Bekämpfung des Klimawandels und Verringerung der Umweltauswirkungen der Ressourcennutzung.
- Umstellung von fossilen Brennstoffen auf die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.
- Wiederverwendung und Reparatur: Eine zweite Lebensdauer für verschlechterte Produkte finden.
- Energetische Nutzung von Abfall, der nicht recycelt werden kann.
- Erhalt und Verbesserung des natürlichen Kapitals, um durch Vielfalt Resilienz zu erreichen.
- Optimieren Sie den Einsatz von Ressourcen und fördern Sie die Verwendung von biobasierten Materialien.

Es gibt einige Konzepte, die für die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsmodells notwendig sind:

- **Umweltkonzept:** Es berücksichtigt die Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts und integriert sie von seiner Konzeption an.
- **Industrielle und territoriale Ökologie:** Die Schaffung einer Art der industriellen Organisation im gleichen Gebiet, die durch eine optimierte Verwaltung der Bestände und der Fluss von Materialien, Energie und Dienstleistungen gekennzeichnet ist.
- **Die Ökonomie der „Funktionalität“:** Den Gebrauch gegen den Besitz, den Verkauf einer Dienstleistung gegen eine Ware zu privilegieren.
- **Die zweite Verwendung:** Die Produkte, die nicht mehr den anfänglichen Bedürfnissen der Verbraucher entsprechen, wieder in den wirtschaftlichen Kreislauf einführen.

- **Die Wiederverwendung:** Verwenden Sie bestimmte Abfälle oder Teile davon wieder, die noch für die Entwicklung neuer Produkte funktionieren können.
- **Reparatur:** Finden Sie ein zweites Leben für die beschädigten Produkte.
- **Recycling:** Nutzen Sie die im Abfall gefundenen Materialien.
- **Valorisierung:** Nutzen Sie Energieverschwendung, die nicht recycelt werden kann.

Die Kreislaufwirtschaft entsteht aus der immer offensichtlicher werdenden Ressourcenknappheit, der steigenden Nachfrage nach Rohstoffen und der Tatsache, dass einige von ihnen endlich sind, was zu einer Abhängigkeit von Drittländern führt.

Ein weiterer Grund für den Aufstieg der Kreislaufwirtschaft sind die Auswirkungen auf die Umwelt. Die Gewinnung und Verwendung von Rohstoffen bedeuteten einen Anstieg des Energieverbrauchs und eine Erhöhung der Schadstoffemissionen.

Die Kreislaufwirtschaft ist sowohl für die Umwelt als auch für die Gesellschaft von Vorteil, da sie eine Möglichkeit darstellt, die Nutzung von Ressourcen zu erhalten und zu optimieren und die Effizienz des Systems zu fördern.

Die Grundsätze und behaupteten Ergebnisse durch die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft sind:

- Produkte, Komponenten und Materialien stets auf höchstem Nutzen und Wert zu halten.
- Kontrolle der Bestände endlicher Materialien und Ausgleich der Ströme erneuerbarer Ressourcen.
- Entkopplung der globalen Wirtschaftsentwicklung vom endlichen Ressourcenverbrauch.

#### **Vorteile der Kreislaufwirtschaft:**

Die Kreislaufwirtschaft hat viele Vorteile. Die Reduzierung von Abfällen und die Wiederverwendung von Materialien führt zu erheblichen Einsparungen bei gleichzeitiger Reduzierung der jährlichen Treibhausgasemissionen.

Die Verbraucher profitieren zudem von langlebigeren Produkten, was höhere Einsparungen und eine höhere Lebensqualität bedeuteten.

#### **Nachteile der Kreislaufwirtschaft:**

Eine Kreislaufwirtschaft zu erreichen und den Ressourceneinsatz zu reduzieren bedeutet wiederum, den Energieverbrauch zu begrenzen und die Abfallproduktion zu reduzieren. Für viele ist diese Neuausrichtung der globalen Produktivität schwer zu erreichen.

Eines der Probleme, vor denen wir stehen müssen, ist, dass einige Produkte schwer recycelt werden können, weil diejenigen, die sie entwerfen, die Abfallwirtschaft nicht schätzen. Auf der anderen Seite erfordert dieses Modell eine intensive Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, die viele Unternehmen nicht übernehmen wollen.

Entkopplung von wirtschaftlicher Entwicklung, Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen:



The two-level 'decoupling' addressed by the European Commission's Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources (2006)

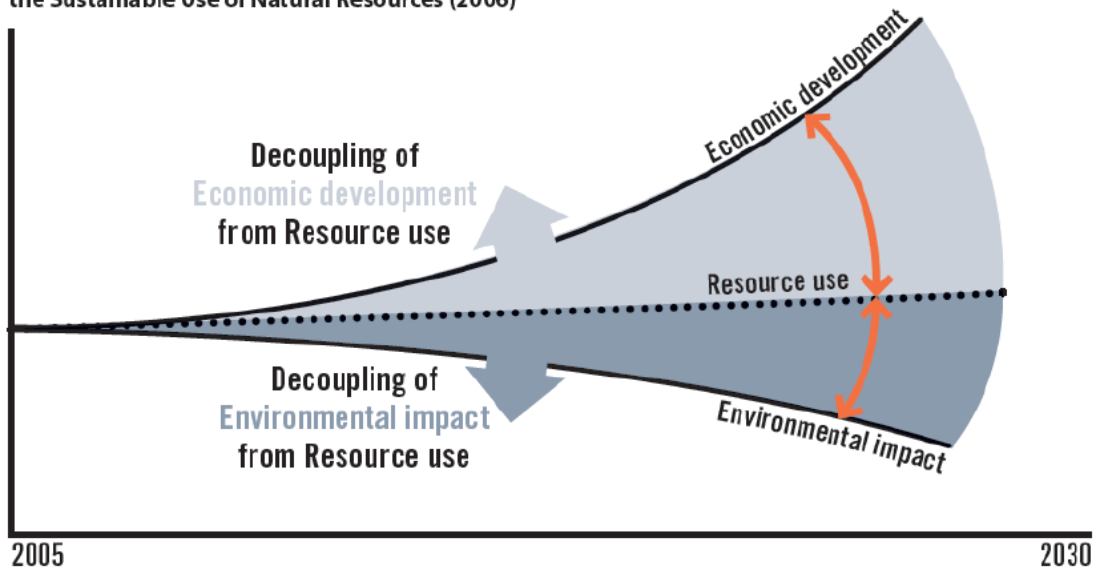


Figure 23: Die von der EG angesprochene Entkopplung (Quelle: Europäisches Umweltbüro, 2015).

Eines der Hauptprinzipien der Kreislaufwirtschaft ist das **Design**. Design in allen Phasen und/oder Aspekten des Lebenszyklus von Produkten.

#### Design und Materialien:

- Vermeiden Sie Schwermetalle wie Cadmium, Blei und gefährliche Stoffe (RoHS).
- Verwendung von recycelten Materialien (Metalle usw.).
- Wiederverwertbarkeit und Wiederverwertbarkeit.
- Gewichtsreduzierung (Dematerialisierung).

#### Design, Haltbarkeit und Reparatur:

- Modulares Design, Standardkomponente, einfach zu reparieren und zu modularisieren.
- Einfache Demontage mit gängigen Werkzeugen.
- Stückliste (BOM).
- Monomaterialien und wenige verschiedene Materialien.

#### Design für End-of-Life:

- Vermeiden Sie Substanzen, die das Recycling teuer/problematisch machen.
- Produktrücklauf + Abfallströme organisieren, um ein Abschalten zu vermeiden.
- Wiederverwendung von Komponenten.

## 4.3 Herausforderungen und Vorteile von kreisförmigen Systemen

### 4.3.1 Herausforderungen

Derzeit wird zunehmend klar, dass die lineare Ökonomie kein tragbares Modell mehr innerhalb der Grenzen unseres Planeten ist. Die Nachteile der linearen Wirtschaft verdeutlichen die Dringlichkeit eines alternativen Modells, das als Chance für die Kreislaufwirtschaft interpretiert werden kann. Die Hauptnachteile einer linearen Wirtschaft liegen in dem Mangel an Lösungen für den wachsenden Materialmangel, die zunehmende Verschmutzung, die erhöhte Materialnachfrage und die wachsende Nachfrage nach verantwortungsvollen Produkten.

In einer linearen Wirtschaft wächst die Unsicherheit über die Materialverfügbarkeit. Diese Unsicherheit beruht auf der Tatsache, dass der Planet über eine begrenzte Anzahl von Materialien verfügt und deren Verfügbarkeit von mehreren Mechanismen abhängt. Diese Unsicherheit wird durch steigende Preisschwankungen, das Wachstum von Industrien, die von kritischen Materialien abhängig sind, die Verknüpfung von Produkten und Prozessen und geopolitische Entwicklungen gefüllt.

#### *Abbau von Ökosystemen*

Nach dem linearen Modell der 'take-make-dispose' entsteht Abfall. Während der Produktionsprozesse und durch die Entsorgung von Produkten entstehen große Materialströme, die nicht genutzt, sondern verbrannt oder auf einer Mülldeponie zurückgelassen werden. Dies wird letztendlich dazu führen, dass überschüssige, nicht nutzbare materielle Berge die Ökosysteme überlasten. Dadurch wird sichergestellt, dass das Ökosystem bei der Bereitstellung wesentlicher Ökosystemleistungen (wie der Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Baumaterialien und Unterkünften sowie der Verarbeitung von Nährstoffen) behindert wird.

#### *Die Lebensdauer der Produkte wird verringert*

In den letzten Jahren ist die Lebensdauer der Produkte drastisch zurückgegangen. Dies ist eine der treibenden Kräfte hinter dem steigenden Materialverbrauch in der westlichen Welt. Die Lebensdauer der Produkte nimmt durch ein positives Feedback immer noch ab: Die Verbraucher wollen häufiger neue Produkte und verwenden ihre „alten“ Produkte für einen kürzeren Zeitraum. Dies führt zu einem verringerten Bedarf an Qualitätsprodukten, die langfristig verwendet werden können, was die Verbraucher dazu anregt, neue Produkte noch schneller zu kaufen.

### 4.3.2 Vorteile

Eine Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftssystem, in dem Produkte und Dienstleistungen 'geschlossenen Schleifen oder „Zyklen“' gehandelt werden. Eine Kreislaufwirtschaft ist als eine Wirtschaft charakterisiert, die in ihrer Struktur regenerativ ist, mit dem Ziel, möglichst viel Wert von Produkten, Teilen und Materialien zu bewahren. Das bedeutet, dass das Ziel darin bestehen sollte, ein System zu schaffen, das eine lange Lebensdauer, optimale Wiederverwendung, Sanierung, Wiederaufbereitung und Recycling von Produkten und Materialien ermöglicht.

#### *Schließen Von Schleifen*

In der Kreislaufwirtschaft werden Stoffkreisläufe am Beispiel natürlicher Ökosysteme geschlossen: Giftige Substanzen werden eliminiert, es gibt keinen Abfall, da alle Restströme als Ressource wertvoll sind, Produkte nach der Verwendung zur Reparatur und Wiedernutzung zurückgenommen werden, um die Produkte ein zweites, drittes oder viertes Mal wiederzuverwenden und Restströme werden in einem biologischen und technischen Zyklus getrennt.

### *Systemdenken*

Die Kreislaufwirtschaft verlangt nach Systemdenken. Alle Akteure (Unternehmen, Personen, Organismen) sind Teil eines Netzwerks, in dem die Handlungen eines Akteurs andere Akteure beeinflussen. In der Kreislaufwirtschaft wird dies in Entscheidungsprozessen berücksichtigt, indem sowohl kurz- als auch langfristige Konsequenzen einer Entscheidung berücksichtigt werden, die Auswirkungen der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt werden und die Schaffung eines widerstandsfähigeren Systems angestrebt wird, das in jeder Größenordnung wirksam ist.

### *Entkopplung des Wirtschaftswachstums*

Das Ziel einer Kreislaufwirtschaft ist es, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch abzukoppeln, indem es sich auf die Werthaltigkeit konzentriert. Um die Ökosysteme und das natürliche Kapital zu sichern, auf die wir uns verlassen, ist mehr als Finanzkapital von Wert.

Auch das Sozialkapital und das Naturkapital spielen eine Rolle für die Stabilität unserer Systeme. In der Kreislaufwirtschaft spiegeln sich diese Werte in den Kosten von Produkten und Dienstleistungen wider. Die Energie, die für diesen Kreislauf benötigt wird, sollte von Natur aus erneuerbar sein.

Es werden mehrere Strategien vorgeschlagen, um den Übergang von der linearen zur Kreislaufwirtschaft zu erreichen:

#### **Transversale Strategien**

- Vorschriften.
- R&T&D.

#### **Direkte Strategien**

- Abfallmanagement.
- Wirtschaftsakteure.
- Verbraucher.

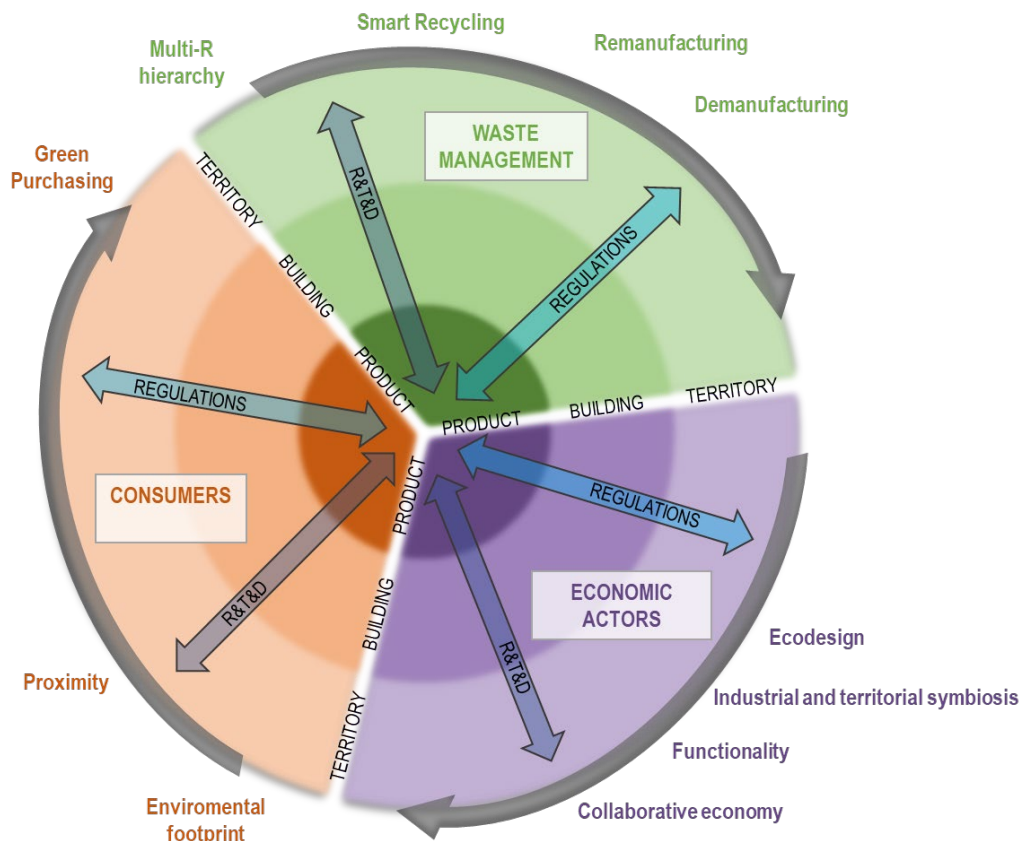


Figure 24: Skizzieren des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft (Quelle: Caparrós-Pérez, D., 2017).

### 4.3.3 Transversale Strategien

Im Jahr 2015 verabschiedete die Europäische Kommission den EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (Dezember 2015) mit dem Ziel, auf die verschiedenen Maßnahmen (bis zu insgesamt 54) hinzuweisen. Die Europäische Kommission schätzt, dass in den nächsten 5 Jahren Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft erforderlich sind. In dieser Richtung wurden von der Kommission fünf Bereiche als Prioritäten festgelegt (Kunststoffe, Lebensmittelabfälle, kritische Rohstoffe, Bau- und Abbrucharbeiten, Biomasse und biobasierte Produkte), die in den folgenden Mitteilungen behandelt wurden:

- MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN.

Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Null-Abfall-Programm für Europa /\* KOM/2014/0398 endg. \*/

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52014DC0398>

- MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN (KOM/2015/0614 ENDG.).

Closing the Loop – ein EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614&qid=1524124780099>

- BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN (KOM/2017/033 ENDG.).

Zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaftsaktion

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0033&qid=1524125695611>

- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN. KOMMUNIKATIONSNR 29, 2018. ÜBERWACHUNGSRAHMEN FÜR DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT; KOM-NR. 29.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A29%3AFIN>

- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN. KOMMUNIKATIONSNR 98, 2020. EIN NEUER AKTIONSPLAN FÜR DIE KREISLAUFWIRTSCHAFT FÜR EIN SAUBERERES UND WETTBEWERBSFÄHIGERES EUROPA.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Außerdem fördern zahlreiche europäische Initiativen die Zirkularität durch Aufforderungen zur Einreichung von Vorschlägen und Programmen. Die Europäische Kommission hat im März 2020 den neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (CEAP) angenommen. Es ist einer der wichtigsten Bausteine des Europäischen Green Deal, Europas neuer Agenda für nachhaltiges Wachstum. Der Übergang der EU zu einer Kreislaufwirtschaft wird den Druck auf die natürlichen Ressourcen verringern und nachhaltiges Wachstum und Arbeitsplätze schaffen. Sie ist auch eine Voraussetzung, um das Ziel der EU für 2050 in Sachen Klimaneutralität zu erreichen und den Verlust an biologischer Vielfalt zu stoppen.

Der neue Aktionsplan kündigt Initiativen entlang des gesamten Produktlebenszyklus an. Sie zielt darauf ab, wie Produkte gestaltet werden, fördert Kreislaufwirtschaftsprozesse, fördert nachhaltigen Konsum und soll sicherstellen, dass Abfälle vermieden werden und die verwendeten Ressourcen in der EU-Wirtschaft so lange wie möglich aufbewahrt werden. Der Aktionsplan enthält legislative und nichtlegislative Maßnahmen, die sich auf Bereiche konzentrieren, in denen Maßnahmen auf EU-Ebene einen echten Mehrwert bieten.

#### 4.3.4 Direkte Strategien

Unter den Mitarbeitern, die sich aller am Prozess beteiligten Agenten bewusst sind, werden drei Kategorien von zirkulären Geschäftsmodellen identifiziert:

- Modelle Mit Kreisförmigem Ausgang.
- Zirkuläre Innovationsmodelle.
- Modelle Zur Kreisförmigen Verwendung.

##### 4.3.4.1 Abfallmanagement

*Modelle Mit Kreisförmigem Ausgang*

Diese Geschäftsmodelle konzentrieren sich auf die Produktion und den Mehrwert der After-Use-Phase eines Produkts. In diesen Geschäftsmodellen wird der Umsatz durch die Umwandlung von After-Use-Produkten in neue Produkte oder nützliche Ressourcen generiert, um Mehrwert zu schaffen, Kosten zu senken oder Abfall zu reduzieren. Die Entwicklung der Reverse Logistics ist für dieses Modell unerlässlich.

Beispiele für Geschäftsmodelle in dieser Kategorie:

- Lieferant für gezüchtetem Material: Verkauft wiederhergestellte Materialien und Komponenten, die anstelle von Neuware oder recyceltem Material verwendet werden sollen.
- Sanierung Und Wartung: Überholt und wartet gebrauchte Produkte, um sie zu verkaufen.
- Recycling-Anlage: Wandelt Abfall in Rohstoffe um. Durch Pionierarbeit in der Recyclingtechnologie können zusätzliche Einnahmen erzielt werden.
- Recovery-Anbieter: Bietet Rücknahme-Systeme und Abholservice zur Wiederherstellung nützlicher Ressourcen aus entsorgten Produkten oder Nebenprodukten;
- Support-Lebenszyklus: Verkauft Verbrauchsmaterialien, Ersatzteile und Zubehör, um den Lebenszyklus langlebiger Produkte zu unterstützen.

#### 4.3.4.2 *Wirtschaftsakteure*

##### *Zirkuläre Innovationsmodelle*

Circular Innovation Modelle konzentrieren sich auf die Entwicklungsphase eines Produkts. Die Produkte sind so konzipiert, dass sie länger haltbar sind und einfach zu warten, zu reparieren, zu aktualisieren, aufzurüsten, zu reproduzieren oder zu recyceln sind. Darüber hinaus werden neue Materialien entwickelt und bezogen, z. B. biobasierte oder vollständig recycelbare Materialien.

Beispiele für Geschäftsmodelle in dieser Kategorie:

- Produktdesign: Bietet Produkte, die für eine lange und nützliche Lebensdauer und/oder eine einfache Wartung, Reparatur, Aufrüstung, Aufarbeitung oder Wiederaufarbeitung ausgelegt sind.
- Prozessdesign: Entwickelt Prozesse, die das Wiederverwendungspotenzial und die Recyclingfähigkeit von industriellen und anderen Produkten, Nebenprodukten und Abfallströmen erhöhen.
- Rundmaterial: Liefert Eingangsmaterialien wie erneuerbare Energien, biobasierte, weniger ressourcenintensive oder vollständig recycelbare Materialien.

#### 4.3.4.3 *Verbraucher*

##### *Modelle Zur Kreisförmigen Verwendung*

Diese Geschäftsmodelle konzentrieren sich auf die Nutzungsphase, indem sie das Produkt optimal nutzen und den Mehrwert erhalten. Diese Geschäftsmodelle ermöglichen es, das Eigentum am Produkt zu behalten (z. B. durch Wartung eines Produkts statt durch Verkauf) und die Verantwortung für das Produkt während seiner gesamten Nutzungsdauer zu übernehmen (z. B. durch Wartungsleistungen oder Add-ons zur Verlängerung der Lebensdauer eines Produkts).

Beispiele für Geschäftsmodelle in dieser Kategorie:

- Produkt-as-a-Service: Bietet durch eine Kombination aus Produkt und Services Produktleistung statt des Produkts selbst. Das Eigentum am Produkt bleibt beim Dienstleister erhalten.
- Verkauf und Rückkauf: Verkauft ein Produkt auf der Grundlage, dass es nach einem bestimmten Zeitraum zurückgekauft wird.
- Gemeinsame Nutzung von Plattformen (Access Provider): Ermöglicht eine höhere Auslastung von Produkten durch die Aktivierung oder Bereitstellung von gemeinsamer Nutzung, Zugriff oder Eigentumsrechten.
- Verlängerung der Lebensdauer: Verlängert die Nutzungsdauer von Produkten und Komponenten durch Reparatur, Wartung oder Upgrade.
- Tracing-Funktion: Erbringung von Dienstleistungen zur Erleichterung der Rückverfolgung, Vermarktung und des Handels mit Sekundärrohstoffen.

#### 4.3.4.4 Endgültige Ziele

Die folgenden Maßnahmen werden für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft gefördert:

- Fortschritte bei der **Reduzierung der Verwendung nicht erneuerbarer natürlicher Ressourcen**, Wiederverwendung im Produktionszyklus der im Abfall enthaltenen Materialien als Sekundärrohstoffe, wenn die Gesundheit der Menschen und der Schutz der Umwelt gewährleistet sind.
- Die Analyse des Lebenszyklus der Produkte und die Berücksichtigung von Kriterien für das Ökodesign zu fördern, die Einführung schädlicher Stoffe bei ihrer Herstellung zu verringern, die Reparierbarkeit der hergestellten Waren zu erleichtern, ihre Nutzungsdauer zu verlängern und ihre Verwertung am Ende zu ermöglichen.
- Förderung der **wirksamen Anwendung des Grundsatzes der Abfallhierarchie**, Förderung der Vermeidung der Erzeugung, Förderung der Wiederverwendung, Stärkung des Recyclings und Förderung der Rückverfolgbarkeit.
- Förderung von Leitlinien zur **Steigerung der Innovation** und der **Gesamteffizienz von Produktionsprozessen** durch die Annahme von Maßnahmen wie der Einführung von Umweltmanagementsystemen.
- Förderung innovativer Formen des **nachhaltigen Konsums**, einschließlich nachhaltiger Produkte und Dienstleistungen, sowie der Nutzung digitaler Infrastrukturen und Dienstleistungen.
- Förderung eines Modells **eines verantwortungsvollen Konsums**, das auf der Transparenz von Informationen über die Merkmale von Waren und Dienstleistungen, deren Dauer und Energieeffizienz beruht, unter Verwendung von Maßnahmen wie der Verwendung des Umweltzeichens.
- Die Schaffung geeigneter Kanäle zu erleichtern und zu fördern, um den **Informationsaustausch** und die Koordinierung mit den Verwaltungen, der wissenschaftlichen und technologischen Gemeinschaft sowie den wirtschaftlichen und sozialen Akteuren zu erleichtern und Synergien zu schaffen, die den Übergang begünstigen.

- Verbreitung **der Bedeutung des Umzuges von der linearen Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft**, Förderung der Transparenz der Prozesse, des Bewusstseins und der Sensibilisierung der Bürger.
- Förderung der Verwendung **gemeinsamer, transparenter und zugänglicher Indikatoren**, die es ermöglichen, den Grad der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu kennen.
- Förderung der Einbeziehung von **Indikatoren für soziale und ökologische Auswirkungen**, die sich aus dem Betrieb von Unternehmen ergeben, um über den wirtschaftlichen Nutzen, den sie aufgrund ihres Engagements für die Kreislaufwirtschaft erzielen, hinaus zu bewerten.



## 5 Kreislaufwirtschaft und MSW-Management

### 5.1 MSW-Management in einem CE

Das aktuelle ökonomische Modell von Produktion und Verbrauch bleibt bislang linear, d.h. Ressourcen werden extrahiert, verarbeitet, genutzt und am Ende ihrer Lebensdauer größtenteils in der Regel durch Verbrennung oder Deponie beseitigt. Folglich werden Materialien aus dem Kreislauf genommen und zerstört, auch wenn die thermische Nutzung zumindest Energie erzeugt (Hollins et al., 2017). In dieser Hinsicht ist die Verwaltung kommunaler fester Abfälle (MSW) ein wichtiger Bestandteil des EU-Plans für den Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft (CE).

Die zentrale Herausforderung in der CE besteht darin, die Wahrnehmung zu etablieren, dass Abfall nicht als 'Problem', sondern als 'wertvolle Ressource' angesehen werden sollte. Die Grundidee ist es, Materialien und Produkte so lange wie möglich und so hoch wie möglich im Produktions- und Verbrauchssystem auf Basis von "... zu halten *Gemeinsame Nutzung, Leasing, Wiederverwendung, Reparatur, Sanierung und Recycling, In einem (fast) geschlossenen Kreislauf...*" (Bourguignon, 2016). Um diese Perspektive zu erreichen, muss das Management von MSW in einem CE zu einem integralen Bestandteil eines zirkulären Produktions- und Verbrauchsmodells werden, wie in Abbildung 25 gezeigt.

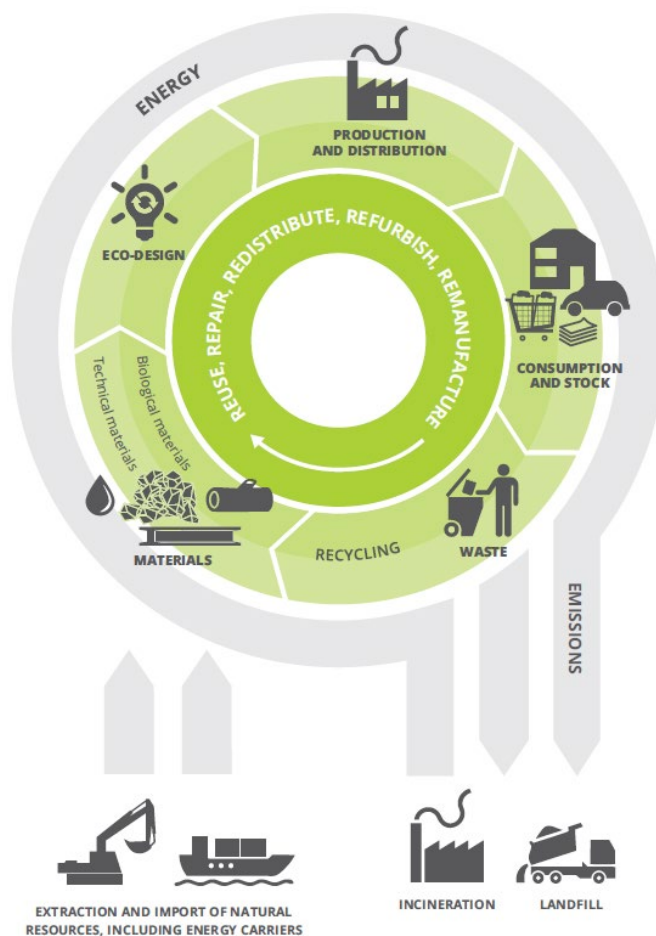


Figure 25: Ein vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft für Materialien und Energie (Quelle: EWR, 2017).

Im Einklang mit den Grundsätzen von CE ist die Grundlage der Abfallwirtschaft der EU gemäß der Abfallrahmenrichtlinie die fünfstufige „Abfallhierarchie“, die eine Präferenzordnung für die Bewirtschaftung und Entsorgung von Abfällen festlegt.

Die Abfallvermeidung wurde als Priorität festgelegt, wobei die Reduzierung als oberste Priorität über die Abfallhierarchie festgelegt wurde, die darauf folgt, dass die Lebensdauer wertvoller Ressourcen durch Wiederverwendung, Reparatur, Sanierung oder Wiederaufarbeitung verlängert wird, was für die Förderung von CE von entscheidender Bedeutung ist. Infrastrukturelle Lock-in-Strukturen sollten überwunden werden, insbesondere wenn die Nachfrage nach Energieerzeugung und -Recycling mit der Priorisierung von Wiederverwendung, Reparatur und Sanierung konkurriert (Hollins et al., 2017). Allerdings kann es keine CE ohne funktionierende Märkte für Sekundärmaterialien geben, obwohl Neuware heute in vielen Fällen billiger ist als die wiederhergestellten (Silva Filho et al., 2021). Durch die Einführung der Abfallhierarchie wurde das Abfallmanagement von der Verarbeitung von großvolumigen, minderwertigen Materialien auf hochwertige Materialien verlagert (Berg et al., 2020).

## 5.2 Richtlinien und Instrumente im MSW-Management gegenüber CE

Aufbauend auf den seit 2015 geleisteten Arbeiten hat die Europäische Kommission am 11. März 2020 einen neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft angenommen, der Maßnahmen für den gesamten Zyklus von der Produktion und dem Verbrauch über die Abfallwirtschaft bis hin zum Markt für Sekundärrohstoffe umfasst. Bei der Abfallbewirtschaftung liegt der Fokus auf der Vermeidung von Abfällen insgesamt und der Umwandlung in einen qualitativ hochwertigen und gut funktionierenden Markt für Sekundärrohstoffe. In dieser Richtung legt der Aktionsplan ein EU-weites, harmonisiertes Modell für die getrennte Sammlung von Abfällen und die Kennzeichnung fest und legt Maßnahmen zur Minimierung der EU-Ausfuhren von Abfällen und zur Bekämpfung illegaler Verbringungen vor.

Der Aktionsplan umfasst vier legislative Maßnahmen, die neue Ziele für die Abfallbewirtschaftung in den Bereichen Wiederverwendung, Recycling und Deponierung einführen, die Bestimmungen zur Abfallvermeidung stärken und die Herstellerverantwortung erweitern sowie Definitionen, Berichtspflichten und Berechnungsmethoden für Ziele straffen.

Die wichtigsten und jüngsten Rechtsakte<sup>13</sup> in Bezug auf MSW-Management und CE sind die folgenden:

---

<sup>13</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass zwischen den EU-Richtlinien, Verordnungen, Entscheidungen und Empfehlungen gewisse Unterschiede bestehen ([https://europa.eu/european-union/law/legal-acts\\_en](https://europa.eu/european-union/law/legal-acts_en)). Die meisten EU-Rechtsvorschriften 'Bezug auf die Kreislaufwirtschaft und MSW bestehen aus Richtlinien und bieten den nationalen EU-Mitgliedstaaten viel Spielraum, um das Ziel und die Geschwindigkeit der Umsetzung zu erreichen, indem sie die „Umsetzung“ den nationalen Gesetzgebern überlassen.

- KOM(2020) 798/3, Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 2019/1020
- KOM/2020/98 final, Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen
- Delegierte Verordnung (EU) 2020/2174 der Kommission vom 19. Oktober 2020 zur Änderung der Anhänge IC, III, IIIA, IV, V, VII und VIII der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verbringung von Abfällen
- Richtlinie 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 zur Verringerung der Umweltauswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte
- Richtlinie 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle
- Richtlinie 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle
- Richtlinie 2018/850 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien
- Richtlinie 2018/849 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinien 2000/53/EG über Altfahrzeuge, 2006/66/EG über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und -Akkumulatoren sowie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte
- KOM(2017) 34 endg., *die Rolle der Energieverschwendung in der Kreislaufwirtschaft*, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen

Auf der Grundlage der neuesten Richtlinien und ihrer Änderungen wurde der folgende Zeitplan festgelegt:

- Getrennte Sammlung von Bioabfällen bis 31/12/2023 und von Textilien und gefährlichen Abfällen aus Haushalten bis 1/1/2025
- Vorbereitung auf die Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen bis 2025 auf mindestens 55 Gew.-%, bis 2030 auf 60% und bis 2035 auf 65%
- Recycling von Verpackungsabfällen auf mindestens 65 % bis zum 31. Dezember 2025 und 70 % bis 31/12/2030
- Reduzierung der Deponie auf maximal 10 % der erzeugten Siedlungsabfälle bis 2035
- Ab 2030 Verbot der Deponierung von recycelbaren Abfällen
- Recyclingquote pro Material bis 2025: Kunststoffe: 50 %; Holz: 25 %; Eisenmetalle: 70 %; Aluminium: 50 %; Glas: 70 %; Papier und Karton: 75 %
- Recyclingquote pro Material bis 2030: Kunststoffe: 55 %, Holz: 30 %, Eisenmetalle: 80 %, Aluminium: 60 %, Glas: 75 %, Papier und Karton: 85 %
- Separate Sammlung von Kunststoffflaschen bis zu 3 l, um bis 2029 ein Recycling von 90 % zu erreichen und bis 2025 ein Zwischenziel von 77 % zu erreichen. Diese Flaschen sollten bis 2025 mindestens 25 % recycelte Kunststoffe als Rohstoff enthalten (für PET-Flaschen) und bis 2030 mindestens 30 % (für alle Flaschen).

Zur Erreichung der oben genannten Ziele werden auf europäischer, regionaler und nationaler Ebene verschiedene Instrumente eingesetzt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Politische Instrumente, die auf europäischer, regionaler und nationaler Ebene zur Abfallbewirtschaftung eingesetzt werden

<b>Politisches Instrument</b>	<b>Beispiele für die Abfallwirtschaft</b>
<i>Gesetzgebung</i>	Richtlinien und Verordnungen wurden verwendet, um: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Legen Sie Ziele für und Berichtsanforderungen für einzelne Abfallströme fest               <ul style="list-style-type: none"> <li>● (Z. B. Recyclingziele und Reduktionsziele für Deponien)</li> <li>● Einführung erweiterter Regelungen zur Herstellerverantwortung</li> <li>● Schaffung wirtschaftlicher Instrumente</li> <li>● Fördern Sie ein verbessertes Umweltdesign</li> </ul> </li> </ul>
<i>Wirtschaftliche Anreize</i>	Investitionen in die Abfallsammelinfrastruktur, die über den Kohäsionsfonds, Mittel für F&E und Innovation unterstützt werden
<i>Marktbasierte Instrumente</i>	Deponiesteuer und Gate-Gebühren, Verbrennungssteuer und Gebühren, Plastiktüten-Steuern; Pay as you Throw (PAYT)-Systeme
<i>Informationsanforderungen</i>	Recycling-Informationen für Verbraucher über Verpackungen, freiwillige Meldung der Abfallproduktion und Zielfestsetzung durch Unternehmen
<i>Freiwillige Tools</i>	Sensibilisierungskampagnen für die Öffentlichkeit, freiwillige Verpflichtungen der Industrie, Produktdesign und -Kennzeichnung (z. B. durch das EU-Umweltzeichen), Bereitstellung von Informationen über bewährte Verfahren, von Unternehmen geleitete Initiativen

Für eine detailliertere Analyse werden interessierte Leser auf die BlockWASTE-Leistungsbeschreibung „[01.A1 - Comparative study of Municipal Solid Waste \(MSW\) Management Regulations in each country](#)“ verwiesen.

### 5.3 Digitale Technologien für ein zirkuläres MSW-Management

Der Übergang des MSW-Managementsektors zum CE wird zweifellos die Anwendung von Industrie 4,0-Technologien erfordern, die die derzeit verwendeten Technologien und Prozesse ergänzen oder in einigen Fällen ersetzen werden (Mastos et al., 2021). Heutzutage werden verschiedene Technologien, die hauptsächlich mit der Rückgewinnung der Materialströme in Verbindung stehen, gut zitiert. Zum Beispiel mechanische Sortiertechnologien, z. B. Trommelsiebe, magnetische und elektromagnetische Wirbelstromabscheider, Flotationstanks, Röntgen- und Infrarot- oder NIR-Sensoren usw. Werden in MBA-Anlagen (Mechanical Biological Treatment) zur Bekämpfung von Mischabfällen eingesetzt, um die technischen Materialien und die biologische Phase zu trennen und die Restmenge für die

Deponie zu begrenzen. Basierend auf ihrer Konfiguration können MBT-Anlagen die erforderliche Recycling-, Rückgewinnungs- und biologisch abbaubare Abzweigungsleistung erbringen. Ähnliche Sortiertechnologien werden in Leichtverpackungen und Kunststoffsortieranlagen eingesetzt. Leichtverpackungsanlagen können verschiedene Arten von Verpackungsabfällen sortieren und klassifizieren, die als vereinzelte Recyclingströme gesammelt wurden, und Kunststoffsortieranlagen können verschiedene Arten und Sorten von Kunststoffpolymeren sortieren (Hollins et al., 2017). Neben der Trennung gibt es etablierte Recyclingtechnologien für die Verarbeitung und das Recycling technischer Materialien wie Glas, Aluminium, Stahl und sogar Kunststoff (hauptsächlich PET und HDPE). Im Falle von Kunststoffen wird beispielsweise in der Regel mechanisches Recycling eingesetzt, während hochentwickelte Technologien zur Entfernung von Schadstoffen und zur Umwandlung von wiederverwertbaren Kunststoffen in lebensmitteltaugliche Polymere entwickelt werden (Hollins et al., 2017). Schließlich gibt es verschiedene Technologien, um aus Bioabfällen (im allgemeineren Sinne) Werte zu generieren, wie die anaerobe Verdauung, Kompostierung und Verwertung (obwohl viele der Technologien zur Abfallverwertung entstehen und derzeit nicht in großem Umfang eingesetzt werden). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Verbesserung der sowohl qualitativen als auch quantitativen CE-Ziele unabhängig von den verwendeten Technologien mehr oder weniger die getrennte Sammlung von Abfallströmen erfordert. Aus diesem Grund wird die getrennte Sammlung hervorgehoben und durch die einschlägigen Rechtsvorschriften vorgeschrieben.

Die 4. Industrielle Revolution (Industrie 4,0) wird voraussichtlich in vielerlei Hinsicht zu einem besseren Management von MSW im Rahmen der CE beitragen. Berg et al (2020) identifizierte drei Hauptbereiche der Digitalisierung im MSW-Management: Kommunikation, Abfallsammlung und interne Prozesse (Tabelle 2).

Tabelle 2: Hauptbereiche der Digitalisierung im MSW-Management

Kommunikation	Abfallsammlung	Interne Prozesse
Websites	Mit Sensoren ausgestattete Fahrzeuge	Abrechnung
Mobile Apps	Routenplanung	Buchhaltung
Integration in andere Services	Ressourcenplanung	Controlling
Social-Media-Apps von Drittanbietern	Bestandsverfolgung	Bestellprozess
	Dokumentation	Dokumentation

(Quelle: Berg et al., 2020)

Berg et al (2020) argumentieren, dass die Abfallwirtschaft hauptsächlich von sechs digitalen Technologien betroffen sein wird:

- Robotik: Es wird die Produktion von hochreinen Abfallströmen ermöglichen und den Sammelprozess und die Logistik bei der Abfallhandhabung erleichtern.
- Internet of Things (IoT): Es verbessert die Logistik durch sensorgestützte Behälter und Container, die elektronische Bearbeitung der Dokumentation und die Vernetzung von Altfahrzeugen.

- Cloud-Computing: Es kann bei der Speicherung und Verarbeitung von Sensordaten oder Softwarelösungen für die Verwaltung, Sammlung, Verwaltung und Dokumentation helfen.
- Künstliche Intelligenz und neuronale Netze: KI und NN können Lösungen für Sortieranwendungen durch den Einsatz von Bilderkennung, autonomen Fahrzeugen und Kehrrobotern, bei der Optimierung der Abfallsammlung, im Kundenservice, in Bürgerinformationsdiensten usw. bereitstellen
- Datenanalyse: Sie unterstützt die Entsorgung von Abfallsammelfahrzeugen, die Auswertung von Sensordaten für automatisierte Sortieranlagen, die Kontrolle von Müllverbrennungsanlagen, die Erfassung von Abfallmengen und Materialflüssen usw.
- Distributed-Ledger-Technologie („Blockchain“): Sie erleichtert die Rückverfolgung von Materialflüssen und die Weitergabe von Daten zu Materialien und Produkten in der Lieferkette, da der Lebenszyklus eines Produkts in der Blockchain gespeichert wird.

Mavropoulos und Nilsen (2020) erwähnen, dass die digitale Revolution die Abfallwirtschaft zumindest in gewissem Maße verändert hat. So liefern GPS-Tracker in den letzten Jahren im Logistikbetrieb Echtzeit-Informationen zu Müllwagen und Containern. Sensoren messen die Abfallmengen in Behältern und Behältern und schaffen so neue Möglichkeiten zur Routenoptimierung. Roboter, Scanner und optische Erkennungsalgorithmen finden ihren Weg in automatisierten MSW-Sortieranlagen. Newton (2021) weist darauf hin, dass Innovationen aus Industrie 4,0 wichtige Verbesserungen im Abfallwirtschaftssektor bringen, indem sie Abfallquellen und -Muster identifizieren, Abfallinfrastruktur in einwandfreiem Zustand halten und den Energieverbrauch unter anderem durch IoT-Sensoren und Datenanalysealgorithmen senken. Jamrozik (2019) liefert ein Beispiel aus New York City, wo es IoT-betriebene Behälter mit Echtzeitüberwachung und Benachrichtigungen geschafft haben, die gesamte Müllkapazität um fast 200 % zu erhöhen und gleichzeitig die Häufigkeit der Sammlung pro Behälter um 50 % zu verringern.

## 6 Referenzen und Quellen für weitere Lektüre und Informationen

### 6.1 Referenzen

- Atalia K.R., Buha D.M., Bhavsar K.A., Shah N.K., (2015). Eine Übersicht über die Kompostierung von kommunalen festen Abfällen. Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT). E-ISSN: 2319-2402,p- ISSN: 2319-2399.Band 9, Ausgabe 5 Version I (Mai. 2015), S. 20-29. DOI: 10,9790/2402-095 12029
- Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P.p, Le Blevenec, K., Vrancken, K. (2020). Digital Waste Management, Eionet Report - ETC/WMGE 2020/4, European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy, Mol, Belgien.
- Bourguignon, D. (2016). Schließen der Schleife: Neues Paket zur Kreislaufwirtschaft. European Parliamentary Research Service (EPRS), Briefing an das Europäische Parlament. ([https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS\\_BRI%282016%29573899\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI%282016%29573899_EN.pdf)) abgerufen am 30. September 2021
- Caparrós-Pérez D. (2017). Machbarkeit, um nachhaltige Gebiete zu schaffen. Umweltfreundliche Anwendung von Materialien und Bausystemen in der Stadtentwicklung und -Rehabilitation.
- CEWEP, (2021). Übersicht über die Deponiesteuern und -Verbote in den EU-Mitgliedstaaten. Verfügbar unter: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2021/10/Landfill-taxes-and-bans-overview.pdf>
- Ciuta, S., Apostol, T. & Rusu, Valentin. (2015). Urbane und ländliche MSW-Stream-Charakterisierung zur Verbesserung der separaten Sammlung. Nachhaltigkeit. 7. 916-931. 10,3390/su7010916. ([https://www.researchgate.net/publication/271528610\\_Urban\\_and\\_Rural\\_MS\\_W\\_Stream\\_Characterization\\_for\\_Separate\\_Collection\\_Improvement](https://www.researchgate.net/publication/271528610_Urban_and_Rural_MS_W_Stream_Characterization_for_Separate_Collection_Improvement)) abgerufen am 2021. September.
- Davies, S. die große Pferdemit-Krise von 1894 | Stephen Davies <https://fee.org/articles/the-great-horse-manure-crisis-of-1894/> (abgerufen am 13. Februar 2020)
- EG, (2022). Deponieabfälle. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/landfill-waste\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/landfill-waste_en)
- EWR, (2021). Umleitung von Abfällen von Deponien in Europa. Europäische Umweltagentur. Verfügbar unter:<https://www.eea.europa.eu/ims/diversion-of-waste-from-landfill>
- EWR, (2022). Abfallrecycling in Europa. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/ims/waste-recycling-in-europe>
- EESI, (2017). Fact Sheet Biogas: Umwandlung von Abfall in Energie. Verfügbar unter: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy>
- EREF, (2022). Einführung in die Deponierung von Siedlungsabfällen. Verfügbar unter: <https://erefdn.org/introduction-municipal-solid-waste-landfilling-2/>

- Ergene Şentürk, D., & Alp, E. (2016). Planung der Schließung unkontrollierter Deponien in der Türkei zur Reduzierung von Umweltauswirkungen, Abfallmanagement und Forschung: The Journal of the International Solid Waste and Public Cleansing Association, ISWA, 34(11), 1173–1183, <https://doi.org/10.1177/0734242X16665915>.
- Europäische Kommission KOM(2017) 34. Die Rolle der Energieverschwendung in der Kreislaufwirtschaft. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034&from=EN#footnote17>
- Europäische Kommission, (2022). Abfallvermeidung und -Management. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm)
- Europäische Umweltagentur (2017). Kreisförmig im Design. Produkte in der Kreislaufwirtschaft. EWR-Bericht Nr. 6/2017, Kopenhagen (<https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design>) abgerufen am 29. September 2021
- Richtlinie 1999/31/EG des Rates der Europäischen Union vom 26. April 1999 über die Abfalldeponie (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj>)
- Europäische Union, Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Text von Bedeutung für den EWR) (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>)
- Eurostat (2021). Statistiken Zu Siedlungsabfällen. ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)) abgerufen am 20. Januar 2022.
- Eurostat (2022). Abfallerzeugung nach Abfallkategorie, Gefährlichkeit und NACE Rev. 2 Aktivität ([http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env\\_wasgen](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env_wasgen)) abgerufen am 29. Januar 2022.
- Eurostat, (2022). Statistiken über kommunale Abfälle. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)
- Hollins, O., Lee, P., Sims, E., Bertham, O., Symington, H., Bell, N., Pfaltzgraff, L. und Sjögren, S. (2017). Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft - Abfallwirtschaft in der EU. Europäisches Parlament. ([https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS\\_STU%282017%29581913\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/581913/EPRS_STU%282017%29581913_EN.pdf)) abgerufen am 29. September 2021
- Hunt, R. G. et al., (1990). Schätzungen des Volumens von MSW und ausgewählten Komponenten in Abfallbehältern und Deponien. Franklin Associates, Ltd., mit dem Garbage Project für den Council for Solid Waste Solutions.
- Jamrozik, N. (2019). Intelligente Abfallwirtschaft (<https://medium.com/@NadJam/smart-waste-management-17db1bd5bc6b#>;) Abgerufen Am 16. November 2021
- Kalyuzhnyi, Sergey & EPOV, A & Sormunen, Kai & Kettunen, R & Rintala, Jukka & Privalenko, V & Nozhevnikova, Alla & Pender, S & Colleran, E. (2003). Bewertung des aktuellen Status von Betriebs- und geschlossenen Deponien in Russland, Finnland und Irland im Hinblick



auf Wasserverschmutzung und Methanemissionen. *Water Science and Technology: Eine Zeitschrift der International Association on Water Pollution Research*. 48. 37-44 (<https://iwaponline.com/wst/article-abstract/48/4/37/10950/Evaluation-of-the-current-status-of-operating-and?redirectedFrom=fulltext>).

KAZA S., Yao, L., Perinaz Bhada-Tata, P. und Van Woerden, F. (2018). Was für eine Verschwendung 2,0. Eine globale Momentaufnahme der Abfallwirtschaft bis 2050. Weltbank-Gruppe. (<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>) Zugriff auf 15 Septmber 2021.

Klundert, A. van de, Anschutz, J. (2001) Integriertes nachhaltiges Abfallmanagement - das Konzept. Gouda, 2001, 44 p.

Mastos, T. D., Nizamis, A., Terzi, S., Gkortzis, D., Papadopoulos, A., Tsagkalidis, N., Ioannidis, D., votis, K. und Tzovaras, D. (2021). Einführung einer Anwendung einer Industrie-4,0-Lösung für das zirkuläre Supply Chain Management. *Journal of Cleaner Production*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126886>

Mavropoulos, A., (2015). Wasted Health: Der tragische Fall von Müllhalden, ISWA ([https://www.researchgate.net/publication/281774422\\_Wasted\\_Health\\_the\\_tragic\\_case\\_of\\_dumpsites](https://www.researchgate.net/publication/281774422_Wasted_Health_the_tragic_case_of_dumpsites)). Abgerufen Am 25. Januar 2022.

Mavropoulos, A. und Nilsen, A.W. (2020). Industrie 4,0 und Kreislaufwirtschaft: Auf dem Weg zu einer wastlosen Zukunft oder einem verschwenderischen Planeten?. *International Solid Waste Association Series*, Wiley, New York, S. 448.

Newton, E. (2021). Wie optimiert Industrie 4,0 die Abfallwirtschaft? *Das IOT Magazine* (<https://theiotmagazine.com/how-is-industry-4-0-optimizing-the-waste-industry-bfd4d35770f4>) hat am 15. Dezember 2021 zugegriffen

Shaoli De, Biswajit Debnath, (2016). Prävalenz von Gesundheitsgefahren im Zusammenhang mit der Entsorgung fester Abfälle – Eine Fallstudie von Kalkutta, Indien, *Procedia Environmental Sciences*, Band 35, S. 201-208, ISSN 1878-0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.081>.

Sharma, K.D. and Jain, S. (2020), "Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The Global Scenario", *Social Responsibility Journal*, Vol. 16 No. 6, pp. 917-948. <https://doi.org/10.1108/SRJ-06-2019-0210>

Silva Filho, C. RV, Appelqvist, B. und Woolridge, A. (2021). Die Zukunft der Abfallwirtschaft - Trends, Chancen und Herausforderungen für die Dekade 2021-2030. *International Solid Waste Association – ISWA*. (<https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2021/10/ISWA-The-Future-of-Waste-Management-1.pdf>) abgerufen am 15. November 2021

STOA, (2017). Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft – Abfallwirtschaft in der EU. Bewertung der Optionen für Wissenschaft und Technologie. EPRS/Europäischer Parlamentarischer Forschungsdienst. 140 Seiten doi: 10.2861/978568

Tamiru, A., (2001). Auswirkungen der unkontrollierten Abfallentsorgung auf die Oberflächenwasserqualität in Addis Abeba, Äthiopien, *SINET: Ethiopian Journal of Science*, Vol. 24 No. 1, <https://doi.org/10.4314/sinet.v24i1.18177>

- Tchobanoglous, G. und Kreith, F. (2002). Handbuch zur Abfallentsorgung. Ausgabe 2., McGraw Hill Handbooks. New York.
- US-Umweltschutzbehörde (1998). Charakterisierung von Siedlungsabfällen in den Vereinigten Staaten: Update 1997, Abteilung für feste Abfälle in Stadt und Industrie, Bericht Nr. EPA530-R-98-007.
- Vinti G, Bauza V, Clasen T, Medlicott K, Tudor T, Zurbrügg C, Vaccari M., (2021). Kommunale Abfallbewirtschaftung und gesundheitsschädliche Ergebnisse: Eine systematische Überprüfung. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(8):4331. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084331>.
- Wagner, Jean-Frank & Rettenberger, G & Reinert, P. (2007). Moderne Deponietechnik – Deponieverhalten mechanisch-biologischer vorbehandelter Abfälle, Proceedings Sardinia 2007, 11. International Waste Management and Depony Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italien, 1. - 5. Oktober 2007 ([https://www.researchgate.net/publication/267996591\\_MODERN\\_LANDFILL\\_TECHNOLOGY\\_-\\_LANDFILL\\_BEHAVIOR\\_OF\\_MECHANICAL-BIOLOGICAL\\_PRE-TREATED\\_WASTE](https://www.researchgate.net/publication/267996591_MODERN_LANDFILL_TECHNOLOGY_-_LANDFILL_BEHAVIOR_OF_MECHANICAL-BIOLOGICAL_PRE-TREATED_WASTE)).
- Warell, W.A. & Vesilind , P.A., (2012). Zweite Ausgabe der Abfalltechnik. Lernen Mit Cengage. ISBN-13: 978-1-4390-6215-9.
- Abfallrahmenrichtlinie, (2008). Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und die Aufhebung bestimmter Richtlinien (Text von Bedeutung für den EWR). Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- Zbicinski, I., Stavenuiter, J., Kozłowska, B., van de Coevering, H., (2006). Produktdesign und Lebenszyklusbewertung. The Baltic University Presse © 2006. Gedruckt bei Nina Tryckeri, Uppsali 2006. ISBN 91-975526-2-3
- Ziraba, A.K., Haregu, T.N. & Mberu, B., (2016). Eine Überprüfung und ein Rahmen für das Verständnis der potenziellen Auswirkungen einer schlechten Bewirtschaftung fester Abfälle auf die Gesundheit in Entwicklungsländern. Arch Public Health 74, 55, <https://doi.org/10.1186/s13690-016-0166-4>.

## 6.2 Weitere Quellen

### Videos

Webinar: Einführung in Smart Waste Management | WasteHero:

<https://www.youtube.com/channel/UCbKk5uAsVfRmkJLOg0DsdXQ>

Kreislaufwirtschaft und Abfallwirtschaft: <https://www.youtube.com/watch?v=1UePkisQqJs>

Kreislaufwirtschaft in der Abfallwirtschaft:

<https://www.youtube.com/watch?v=fpDrUwd1uq4>

Kann Eine Kreislaufwirtschaft Müll obsolet machen?:

[https://www.youtube.com/watch?v=JgcWmE\\_2T6Q](https://www.youtube.com/watch?v=JgcWmE_2T6Q)

Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft - Abfallwirtschaft in der EU:

[https://www.youtube.com/watch?v=8pxM0\\_uRzbE](https://www.youtube.com/watch?v=8pxM0_uRzbE)

Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft bei POLIMI (Teil 1):

[https://www.youtube.com/watch?v=yQJOkBEJhQc&list=RDCMUcOKtBGblWKIkE-Klf-S0Fvg&start\\_radio=1&rv=yQJOkBEJhQc&t=36](https://www.youtube.com/watch?v=yQJOkBEJhQc&list=RDCMUcOKtBGblWKIkE-Klf-S0Fvg&start_radio=1&rv=yQJOkBEJhQc&t=36)

Abfallwirtschaft 4,0 und Tech Trends – Abfallmessung Powered by AI:

<https://www.youtube.com/watch?v=H95YRZydiig>

Recycling-Roboter - Unternehmen wenden sich an Roboter, um Recycling-Materialien und Abfälle zu sortieren - Abfall Robotik:

<https://www.youtube.com/watch?v=QbKA9uNgzYQ>

Robotics & AI Innovation Network | mit RAI zur Unterstützung der Abfallwirtschaft:

<https://www.youtube.com/watch?v=YI62S5BU178>

Fallstudie: IoT-basiertes Abfallmanagement für Santander Smart City:

<https://www.youtube.com/watch?v=Imk9kMO4MsY>

Ein neuartiges IOT- und KI-basiertes Smart Waste Management System:

<https://www.youtube.com/watch?v=WVWyvcisdIA>

Umweltauswirkungen von Deponieflut: <https://www.youtube.com/watch?v=QYBvntdO6YM>

Wie funktioniert eine Deponie?

<https://www.youtube.com/watch?v=n8KdoMYYWnE>

Lernen Sie die Prinzipien der Deponiegaserzeugung kennen:

<https://www.youtube.com/watch?v=p-CQqXf5N4E>

Wie Gase und Flüssigkeiten aus Deponien abgeleitet werden:

[https://www.youtube.com/watch?v=QHWxQgbmo\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=QHWxQgbmo_k)

Vor- und Nachteile der Abfallverbrennung:

<https://www.youtube.com/watch?v=6vzcbgBAewU>

Auswirkungen und Einschränkungen des Recyclings:

<https://www.youtube.com/watch?v=1biGAcRIM3I>

Was für eine Verschwendung 2,0: Alles, Was Sie Über Die Abfallwirtschaft Wissen Sollten:

<https://www.youtube.com/watch?v=1CSm4GG2VrU>

Warum verbrennen wir nicht einfach unseren Müll?:

<https://www.youtube.com/watch?v=OPVUrO-7SM>

Video zur Abfallhierarchie:

<https://www.youtube.com/watch?v=LaT07IeDVR4>

Kurze Einführung in Deponien:

<https://youtu.be/2Ot2C4FKzts>

Abbau organischer Stoffe in einer Deponie:

<https://youtu.be/A2J74wxQ9-4>

Deponieablauge:

<https://youtu.be/C-j1jGB8CiM>

Deponiegas:

<https://youtu.be/8z7lbX5CSQo>

Abfall in Energie – Prozessklärung:

<https://youtu.be/DROZUstnsnw>

Energieverschwendung: Im SYSAV-Werk in Malmö, Schweden:

[https://youtu.be/l8\\_i1gU3gRg](https://youtu.be/l8_i1gU3gRg)

Prozess Zur Umwandlung Von Abfall In Energie-Pyrolyse:

<https://youtu.be/7P5WF53Kfdl>

Abfall zu Energie durch fortschrittliche Vergasung:

<https://youtu.be/vVvCEkKxWs0>

Vortrag "RDF aus kommunalen Feststoffabfällen" von Dirk Lechtenberg:

<https://youtu.be/MwT3lepTFag>

Behandlung von organischen Abfällen (18videos) verfügbar:

[https://youtube.com/playlist?list=PLNG\\_YQG6XtkXxCFHJCy2APfkxYJwsrRrj](https://youtube.com/playlist?list=PLNG_YQG6XtkXxCFHJCy2APfkxYJwsrRrj)

Recycling von Siedlungsabfällen:

<https://youtu.be/bxF3-wdxUKk>

Lineares Economy-Modell:

<https://youtu.be/eETqWSDwCh4>

Die Kreislaufwirtschaft erklären und wie die Gesellschaft Fortschritt neu denken kann | Animierter Videoaufsätze: <https://youtu.be/zCRKvDyyHml>

Kreislaufwirtschaft: Mehr Als Recycling:

<https://youtu.be/eOgXxTj5kGk>

Was ist ein lineares Wirtschaftsmodell?

[https://youtu.be/q\\_6GalOImPc](https://youtu.be/q_6GalOImPc)

Definition der linearen vs. Kreislaufwirtschaft:

[https://youtu.be/ff\\_H07BrJOE](https://youtu.be/ff_H07BrJOE)

Wie Sie von einer linearen Wirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft wechseln:

<https://youtu.be/ECHiWnSvklo>

EU-Politik, -Gesetzgebung und -Instrumente

Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft: [https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en)

Abfall und Recycling: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling_en)

Abfallrahmenrichtlinie: [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en)

Closing the Loop - ein EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft KOM/2015/0614 endg.: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>

Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators/monitoring-framework>

Europäische Kommission. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Mitteilung Nr. 398, 2014. Auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Zero Waste-Programm für Europa; KOM-Nr. 398; Europäische Kommission: Brüssel, Belgien, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52014DC0398>

Europäische Kommission. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Mitteilung Nr. 614, 2015. Closing the Loop – ein EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft; COMno. 614; Europäische Kommission: Brüssel, Belgien, 2015. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>

Europäische Kommission. BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN (KOM/2017/033 endg.) - über die Durchführung der Aktion zur Kreislaufwirtschaft, 2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0033&qid=1524125695611>

Europäische Kommission. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Mitteilung Nr. 29, 2018. Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft; KOM-Nr. 29; Europäische Kommission: Brüssel, Belgien, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A29%3AFIN>

Europäische Kommission. Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Mitteilung Nr. 98, 2020. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa; KOM-Nr. 98; Europäische Kommission: Brüssel, Belgien, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Europäische Kommission. Abfallgesetz. [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-law\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-law_en)

Studie zur Modellierung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des Rohstoffverbrauchs: [https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource\\_efficiency/pdf/RMC.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/RMC.pdf)

### Bücher/Papiere/Berichte

Berg, H., Bendix, P., Jansen, M., Le Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., Pohjalainen, E. und Wahlström, M. (2021). Enlocking the Potential of Industry 4,0 to reduce the Environmental Impact of Production, Eionet Report - - ETC/WMGE 2021/5, European Topic Centre Waste and Materials in a Green Economy, Mol, Belgien. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/unlocking-the-potential-of->

[industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production/@@download/file/Final%20for%20website.pdf](#)

Europäische Umweltagentur - EWR (2016). Kommunale Abfallwirtschaft in allen europäischen Ländern. Europäische Umweltagentur.  
<https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste>

Europäische Umweltagentur (2016). Mehr aus weniger – Materialressourceneffizienz in Europa. 2015 Überblick über Politiken, Instrumente und Ziele in 32 Ländern, EWR-Bericht, Nr. 10/2016. <https://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less>

Europäische Umweltagentur - EWR (2020). Abfallmanagement. Europäische Umweltagentur.  
<https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/waste-management>

Europäische Umweltagentur - EWR (2020). Recycling von Siedlungsabfällen. Europäische Umweltagentur. <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/recycling-of-municipal-waste>

Europäisches Umweltbüro – EEB (2018). Auf dem Weg zu einem EU-Produktpolitikrahmen, der zur Kreislaufwirtschaft beiträgt. <https://eeb.org/publications/79/resource-efficiency/89942/briefing-on-the-eu-product-policy-framework.pdf>

ISWA (2019). Wie Industrie 4,0 den Abfallsektor verändert, International Solid Waste Association. [https://www.pac.gr/bcm/uploads/ind\\_4-0\\_final\\_compressed\\_web.pdf](https://www.pac.gr/bcm/uploads/ind_4-0_final_compressed_web.pdf)

World Business Council for Sustainable Development – WBCSD (2018). LINEARE RISIKEN. [https://docs.wbcsd.org/2018/06/linear\\_risk\\_report.pdf](https://docs.wbcsd.org/2018/06/linear_risk_report.pdf)

## Andere Quellen

<https://www.epa.gov/landfills/municipal-solid-waste-landfills#whatis>

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000Q3ZF.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976%20Thru%201980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C76THRU80%5CTXT%5C00000004%5C2000Q3ZF.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1>

[https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/msw\\_infographic\\_jan2021-sm.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/msw_infographic_jan2021-sm.pdf)

<https://www.eea.europa.eu/soer/2015/countries-comparison/waste>

<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/challenges-to-the-solid-waste-sector.html>

<https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends-in-solid-waste-management.html>

<https://www.iswa.org/climate-change-and-waste-management/?v=f214a7d42e0d>

<https://www.colorado.edu/ecenter/2021/04/15/hidden-damage-landfills>

<https://www.epa.gov/report-environment/wastes>

[https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate\\_change\\_xsum.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/climate_change_xsum.pdf)

<https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-018-0175-y>

Weltgesundheitsorganisation, (2021). Fester Abfall. In: Kompendium der WHO und anderer UN-Leitlinien für Gesundheit und Umwelt, Genf. ([https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who\\_compendium\\_chapter4\\_v2\\_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc\\_5](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/who-compendium-on-health-and-environment/who_compendium_chapter4_v2_01092021.pdf?sfvrsn=b4e99edc_5)). Abgerufen Am 26. Januar 2022.

In den Jahren 2005 und 2020 [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics) wurden in den EU-Ländern kommunale Abfälle (kg/Kopf) erzeugt [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/policy-context>

„Generation Awake“ – die Sensibilisierungskampagne der Europäischen Kommission zur Ressourceneffizienz:

[https://ec.europa.eu/environment/generationawake/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/generationawake/index_en.htm)

Beispiel für ein Einlagensystem in Estland: <https://eestipandipakend.ee/en/how-does-the-deposit-system-work/>

Stiftung für Umweltforschung und -Bildung (EREF) - Einführung in die Deponierung von festen Siedlungsabfällen: <https://erefdn.org/introduction-municipal-solid-waste-landfilling-2/>

lonet Portal - Bewertung der Kapazität der Müllverbrennung und der Abfalltransporte in Europa: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/assessment-of-waste-incineration-capacity-and-waste-shipments-in-europe>

Springer Link - Status und Möglichkeiten der Energierückgewinnung aus kommunalen Festabfällen in Europa: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12649-018-0297-7>

Bioabfall in Europa - <https://www.compostnetwork.info/policy/biowaste-in-europe/>

Argumente für ein wachsendes Recycling: Abschätzung des Recyclingpotenzials in Europa: <https://www.eea.europa.eu/publications/the-case-for-increasing-recycling>

Grenzen des Recyclings 2020: <https://trinomics.eu/project/2119-limits-of-recycling/>

Integriertes Abfallmanagement für eine intelligente Stadt:

<https://www.classcentral.com/course/youtube-integrated-waste-management-for-a-smart-city-47757/classroom>