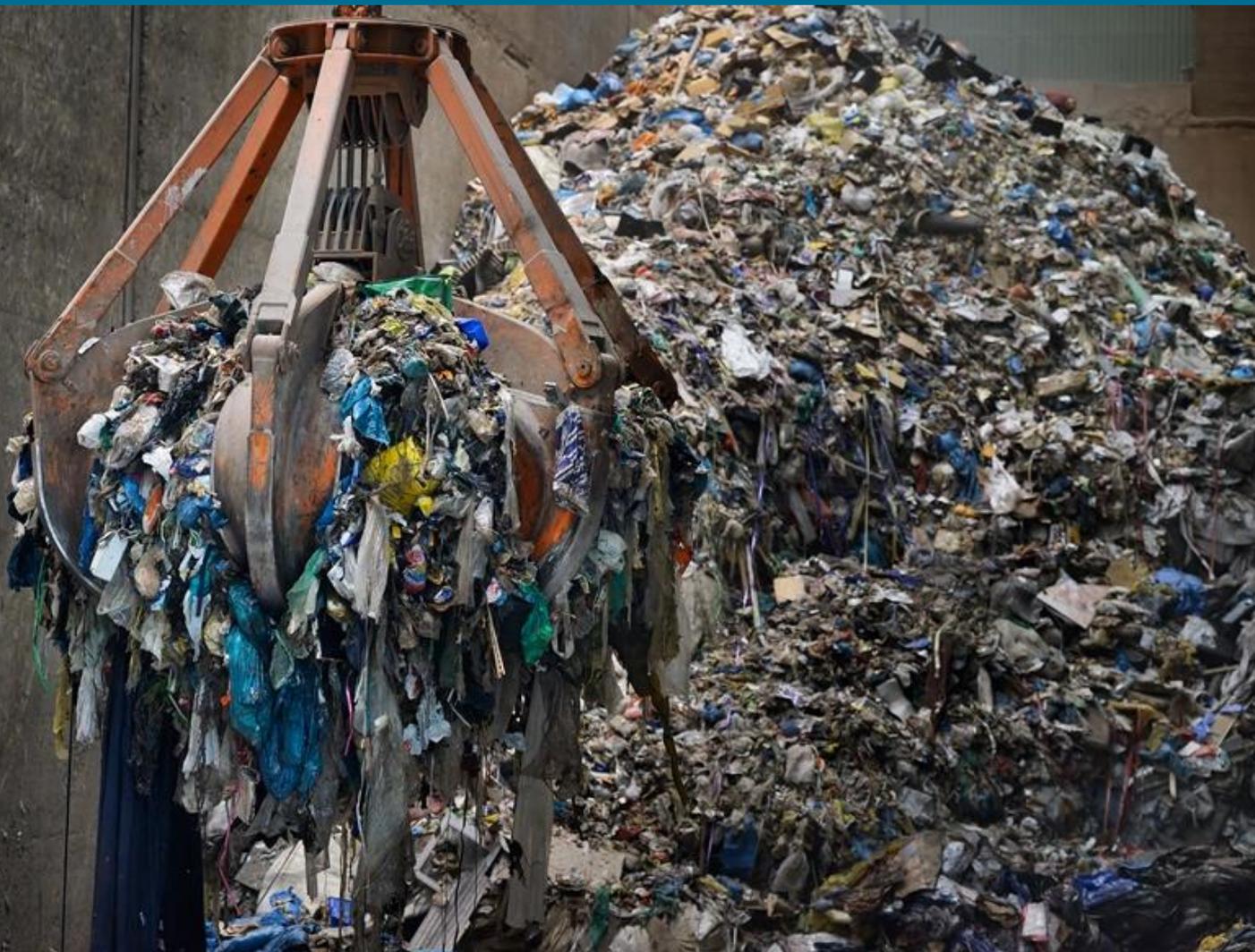


ZUR ROLLE DER THERMISCHEN ABFALL- BEHANDLUNG IN DER CIRCULAR ECONOMY



ZUR ROLLE DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNG IN DER CIRCULAR ECONOMY

Kurztitel: MVA und Circular Economy

Vorgelegt von: **Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT**
Institutsleiter
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Für: **AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH**
Frau Dr. Susanne Raedeker
Im Emscherbruch 11
45699 Herten

Projektteam: Dr.-Ing. Markus Hiebel*, Jochen Nühlen, Jürgen Bertling
**Projektleitung*

Zitierhinweis: Hiebel, M.; Nühlen, J.; Bertling, J.: Zur Rolle der thermischen Abfallbehandlung in der Circular Economy, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Kurzstudie im Auftrag der AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH, Oberhausen, August 2017

Bildnachweis Titelseite: Greifer im Müllbunker © AGR

Oberhausen, August 2017

Inhalt

1	Zusammenfassung (Management Summary)	2
2	Ansatz der Studie	4
3	Circular Economy	5
4	Rolle der thermischen Abfallbehandlung	8
4.1	Thermische Abfallbehandlung in der Abfallwirtschaft	8
4.2	Ausgesuchte Stoffstrombetrachtung	13
4.3	Thermische Abfallbehandlung in der Circular Economy	16
5	Empfehlungen und Ausblick	21
6	Tabellenverzeichnis	23
7	Abbildungsverzeichnis	23
8	Quellenverzeichnis	23

1 Zusammenfassung (Management Summary)

Zielstellung und Vorgehen der Studie	In dieser Kurzstudie wird die Rolle der thermischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund der Circular Economy eingeordnet. Die Ergebnisse der Arbeit beruhen auf einer Literaturrecherche und Praxisangaben der AGR Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet mbH.
Circular Economy	Die Idee hinter dem Konzept der Circular Economy (zirkuläre Wirtschaft) ist folgende: Durch intelligentes Produktdesign sollen Waren/Stoffe im Kreislauf geführt werden (durch Wiederverwendung, Weiternutzung, Recycling etc.). Dadurch sollen Arbeitsplätze und Wertschöpfung vor Ort generiert werden (z. B. zur Reparatur) sowie idealerweise keine Abfälle mehr anfallen. Die notwendigen Voraussetzungen und Prinzipien (insbesondere das Produktdesign) werden in vielen Wirtschaftsbereichen (noch) nicht berücksichtigt, so dass eine Umsetzung einer flächendeckenden zirkulären Wirtschaft bislang noch nicht erkennbar ist.
Rechtliche Lage: Ziele des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)	In §1 des KrWG sind die Förderung der Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherstellung des Schutzes von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen als oberster Zweck der Kreislaufwirtschaft rechtlich verankert. In §6 des KrWG ist dafür eine Abfallhierarchie festgeschrieben, die Instrumente zur Zielerreichung festlegt [KrWG-2012].
Einordnung der thermischen Abfallbehandlung	Die thermische Abfallbehandlung ist heute ein zentraler Bestandteil der Abfallwirtschaft: Sie führt zur Inertisierung, Hygienisierung sowie Konzentrierung von Schadstoffen zur kontrollierten und gesicherten Ausschleusung aus der Wertschöpfungskette. Die thermischen Abfallbehandlungsanlagen nutzen dabei die je nach Inputmaterial schwankenden Energiegehalte in Form von Wärme und Strom und stellen weiterhin Sekundärrohstoffe aus den Verbrennungsrückständen bereit (z. B. Metalle und Ersatzbaustoffe). Im Bereich der Abfall- und Kreislaufwirtschaft werden in Deutschland nach wie vor große Anteile des Abfalls, der Abfallbehandlungsanlagen erreicht, verbrannt. Beim Bezug auf behandlungsbedürftige Siedlungsabfälle in NRW zeigt sich ein Anteil der Verbrennung von fast 97 %.
Beispiel RZR Herten: Hoher Anteil von Sortierresten	Die exemplarische Zusammensetzung von Gewerbeabfällen des RZR Herten zeigt, dass Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, gemischte Bau- und Abbruchabfälle und gemischte Verpackungen mehr als 75 % der angenommenen Abfälle ausmachen. Sortierreste haben damit einen nennenswerten Anteil am insgesamt stofflich sehr heterogenen Inputstrom.
Verwertungspfade von Kunststoffabfällen	Eine Betrachtung des Abfallaufkommens und der Verwertungspfade von Kunststoffabfällen in Deutschland zeigt ein differenziertes Bild: Sortenreine Abfälle werden eher stofflich verwertet, während Gemische und Verbundstoffe hauptsächlich in Verbrennungsanlagen behandelt werden. Stofflich inhomogene Abfallfraktionen ziehen prinzipiell einen hohen Sortieraufwand nach sich, dessen ökologische und ökonomische Notwendigkeit auch vor dem Hintergrund der Vision einer Circular Economy zu rechtfertigen sein muss.

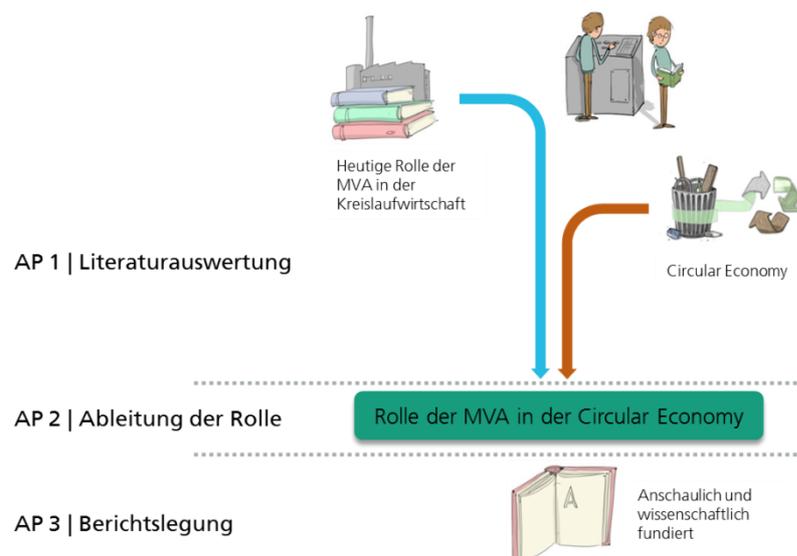
Thermische Abfallbehandlung als wichtige Schadstoffsenke	Stoffe, die bedingt durch ihren Verwendungszweck und eine spezifische Produkteigenschaft eine Schadstoffquelle am Ende des Produktlebenszyklus darstellen oder darstellen können, müssen auch in einer zirkulären Wirtschaft einer Behandlung unterzogen werden. Um eine ungewollte Akkumulation von Schadstoffen in späteren Produkten zu vermeiden, sind thermische Abfallbehandlungsanlagen in ihrer Funktion als Schadstoffsenken heute unverzichtbar.
Umgang mit nicht kreislauffähigen Produkten	Trotz enormer Fortschritte im Bereich der Erfassung und Behandlung von Abfällen sind wesentliche Anteile der durch den Menschen produzierten Waren nur bedingt stofflich hochwertig zu recyceln oder kreislauffähig. Das bestehende anthropogene Lager an nicht recyclingfähigen Produkten ist immens und bedarf einer sicheren Entsorgung. Die thermische Abfallbehandlung ergänzt stoffliche Recyclingverfahren, die die heute anfallenden Stoffströme des anthropogenen Lagers (hauptsächlich nicht recyclinggerechte Produkte) verwerten.
Differenzierte Betrachtung des optimalen Verwertungswegs notwendig	Begleitend zur Entwicklung der für eine zirkuläre Wirtschaft notwendigen Innovationen im Bereich der Sammlungs-, Sortier- und Trennverfahren helfen Verbrennungskapazitäten dabei, die Verwertung sicherzustellen und entsprechende Schadstoffsenken bereitzustellen. Je nach Aufwand des Recyclings ist eine differenzierte Betrachtung des optimalen Verwertungswegs nötig. Die EU-Abfallhierarchie lässt hier Freiheiten: Die Vorteilhaftigkeit des gewählten Abfallbehandlungsverfahrens muss aber beim Abweichen von der Abfallhierarchie belegt werden.
Änderungen Produktdesign, Gesetze, Nutzerverhalten und Innovationen in der Abfallwirtschaft → Flexibilität der Anlagen notwendig	Der Produktionsbereich (Materialzusammensetzungen und Designinnovationen), Änderungen im gesetzlichen Bereich und verändertes Nutzungsverhalten (Sharing, Leasing) werden qualitativ und quantitativ Einfluss auf die Mengen und Zusammensetzung der zukünftigen Abfälle haben. Die Verbrennungsanlagen müssen flexibel reagieren können, und die Betreiber sollten stetig die Trends auf der Konsumenten- und Produktseite beobachten. Gleiches gilt für Innovationen und Anpassungen im Bereich der Erfassung, Sortierung und Aufbereitung von (recyclinggerechten) Produkten. Diese Punkte müssen auch bei der Kapazitätsplanung und dem Anlagendesign von bestehenden Abfallverbrennungsanlagen Einfluss finden.
Ressourcen- und Klimaschutz	Die thermischen Abfallbehandlungsanlagen produzieren Strom und Wärme und recyceln Metalle aus den anfallenden Schlacken des Verbrennungsprozesses. Sie leisten damit einen relevanten Beitrag zur Ressourcenschonung und zum Klimaschutz. Dieser Beitrag muss in Zukunft ausgeweitet werden durch eine Verbesserung der Nutzung der in den Abfällen enthaltenen Energie und der Aufbereitung der enthaltenen Metalle und, falls möglich, die Nutzung von inerten Schlacken aus dem Prozess in möglichst hochwertigen Anwendungen. Der grüner werdende Energiemix in Deutschland und die sich ändernde Abfallzusammensetzung (Anteil biogener Stoffe) müssen in zukünftige Betrachtungen einbezogen werden.
Fazit	Betrachtet man den aktuellen Stand der Produktentwicklung und des menschlichen Konsums im heutigen Wirtschaftssystem sowie das bestehende anthropogene Lager, so wird die thermische Abfallbehandlung auch langfristig ein wichtiger Baustein der Behandlung von Abfällen bleiben, auch vor dem Hintergrund der Vision einer Circular Economy. Voraussetzung dafür ist eine ergebnisoffene Bewertung des optimalen Verwertungswegs.

2 Ansatz der Studie

Die Vision Konzept der Circular Economy (zirkuläres Wirtschaften) wird seit einiger Zeit u. a. von der Ellen MacArthur-Foundation stark in die politische Debatte eingebracht [Braungart-2007], [EMF-2016]. So war die Circular Economy auch ein Thema des Weltwirtschaftsforums 2017 in Davos [WEF-2017]. Die Idee hinter dem Konzept ist folgende: Durch intelligentes Produktdesign sollen Waren/ Stoffe im Kreislauf geführt werden (durch Wiederverwendung, Weiternutzung, Recycling etc.). Dadurch sollen Arbeitsplätze und Wertschöpfung vor Ort generiert werden (z. B. zur Reparatur) sowie idealerweise keine Abfälle mehr anfallen. In diesem Kontext wurde im Jahr 2016 eine Studie des Landes NRW zur zirkulären Wertschöpfung veröffentlicht [MWEIMH-2016]. Das Konzept der Circular Economy steht stark im Fokus des Kreislaufwirtschaftspakets der Europäischen Union und wird damit Auswirkungen auf Legislativvorschläge in Deutschland haben. Die thermische Behandlung von Abfällen in Abfallkraftwerken¹ ist ein Element im System der bestehenden Behandlungsanlagen. Daher stellt sich die Frage nach der Rolle der thermischen Behandlung von Abfällen in der Circular Economy. Die vorliegende Kurzstudie widmet sich der Beantwortung dieser Kernfragestellung faktenbasiert, neutral und ergebnisoffen.

Fraunhofer UMSICHT hat im Rahmen dieser Kurzstudie eine Literaturrecherche durchgeführt, um die Rolle der thermischen Behandlung von Abfällen in der Circular Economy zu beschreiben und zu diskutieren. Die Schlussfolgerungen der Studie wurden grafisch illustriert und allgemeinverständlich ausgearbeitet. Die Betrachtung erfolgte, wo es möglich und sinnvoll ist, stoffstromspezifisch. Die Zusammensetzung des Gewerbeabfalls des RZR Herten dient dabei als Basis. Bild 2-1 zeigt das Schema des Vorgehens.

Bild 2-1:
Projektstruktur und
Vorgehen



¹ Im weiteren Verlauf mit dem gebräuchlichen Begriff der »MVA« (Müllverbrennungsanlage) bezeichnet

3 Circular Economy

In dieser Kurzstudie werden die Rolle der thermischen Abfallbehandlung im bestehenden Wirtschaftssystem sowie deren Aufgabe im Rahmen einer Circular Economy diskutiert. Nachfolgend werden die Grundzüge der Idee und ihre Entwicklung bis hin zum heutigen Verständnis kurz dargestellt.

»Die Erde ist zu einem einzigen Raumschiff geworden, auf dem alle Vorratslager, die man anzapfen oder verschmutzen könnte, begrenzt sind, so dass der Mensch seinen Platz in einem zyklischen ökologischen System finden muss, dem ständige Reproduktion in materieller Form möglich ist, wozu es allerdings Energieinput braucht.« [Boulding-1966]

Das Zitat zeigt, dass der Grundgedanke einer Circular Economy nicht neu ist und spätestens mit dem Schlagwort »Raumschiff Erde« (Spaceship Earth) in der Umweltbewegung etabliert wurde. Ausgehend aus Wasser- und Forstwirtschaft, wurden bereits in den 1960er Jahren erstmals Ideen in dieser Richtung publiziert (vgl. z. B. [Poehlmann-1957], [Gleitsmann-1982]). Um die 1990er Jahre wurden mit dem Begriff des »Industrial Metabolism« insbesondere auch Vergleiche zur Biosphäre angestellt. In diesem Zusammenhang sind auch erstmals offensiv die Grenzen einer Kreislaufführung, bedingt durch dissipative Materialverluste benannt [Ayres-1989], [Ayres-1994]. Die Begrifflichkeit der Circular Economy ist in einem wirtschaftswissenschaftlichen Konzept von David W. Pearce aus dem Jahre 1990 erwähnt [Pearce-1990] und wurde im Nachgang auch zunehmend in die Umweltdiskussion als Gegenentwurf zur linearen Durchlaufwirtschaft aufgenommen [Eyerer-1996], [Pflaum-1998], [Zahn-1996]. Methodische Ansätze zur Umsetzung wie bspw. *Stoffstrommanagement* [Enquete-1998], [Friege-1998], [Schmidt-1995], *ökologische Produktgestaltung* [Kreibich-1994], *Integrierte Produktpolitik*, *Ökoeffektivität* [Braungart-1999], [Braungart-2007] und *Industrial Ecology* [Gleich-2008] folgten. Ausgelöst durch die wissenschaftliche Diskussion wurde in der ersten Fassung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes die Relevanz einer kreislauffähigen Produktgestaltung explizit ausgeführt und bis zum heutigen Gesetzestext des Kreislaufwirtschaftsgesetzes fortgeführt (§23) [KrWG-2012]. In der Zwischenzeit wurden in der Kreislauf- und Abfallwirtschaft zwar viele technische Verbesserungen im Hinblick auf Aufbereitung und Recycling erreicht und rechtliche Rahmen gesetzt, jedoch ist das Grundprinzip der linearen Durchlaufwirtschaft nach wie vor global vorherrschend [Hiebel-2016].

Nicht zuletzt aus Gründen des Klima- und des vorsorgenden Umweltschutzes, aber auch begründet durch stark volatile Primärrohstoffpreise, unsichere Märkte und die Abhängigkeit von ausländischen Lieferanten im Spannungsfeld geopolitischer Machtgefüge, erfährt die Vision der Circular Economy in den vergangenen Jahren eine Renaissance in Wirtschaft, Wissenschaft und Politik (vgl. u. a. [EMF-2012], [EMF-2016], [UNEP-2016], [UBA-2016c], [BMUB-2016b], [EC-2015a]). Auf dieser Grundlage können letztlich folgende Prinzipien eine Circular Economy zusammenfassen.

Tabelle 3-1: Prinzipien einer Circular Economy nach Fraunhofer UMSICHT [Hiebel-2016]

Idealtypische Prinzipien einer Circular Economy

1. Die Verringerung des Ressourcenbedarfs durch Kreislaufführung von Rohstoffen.
2. Eine möglichst lange Nutzungsdauer von Produkten und ihre schnelle Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer.
3. Eine möglichst effiziente Verwertung durch mehrstufige Wieder- und Weiterverwendung, werkstoffliches und rohstoffliches Recycling.
4. Eine Gestaltung von Produkten, die ihre Kreislaufführung bei minimalen Verlusten in Bezug auf Menge, Wert und Qualität ermöglicht.
5. Die Vermeidung von Kreislaufverlusten sowie eine energetische Verwertung oder ausreichend gute Abbaubarkeit von Stoffen, bei denen sich Kreislaufverluste nicht vermeiden lassen.
6. Die Vermeidung einer Anreicherung von Inhaltsstoffen, die zu späteren Zeitpunkten als Schadstoff² wirken oder die Kreislaufführung erschweren.
7. Die Minimierung des Energieeinsatzes zur Aufrechterhaltung des Kreislaufsystems und seiner Teilbereiche bei gleichzeitiger Verwendung erneuerbarer Ressourcen (bei Biomasse: nachhaltige Erzeugung).
8. Die Anwendbarkeit des Konzepts auf Regionen, Branchen, Unternehmen und Produkte gleichermaßen.

Vor dem Hintergrund der globalen Entwicklung wird in den nächsten 50 Jahren die Etablierung von möglichst geschlossenen und effizienten Rohstoffkreisläufen eines der prägenden Themen der Gesellschaft sein (vgl. u. a. [Deike-2016]). Dass die Umsetzung der Vision einer zirkulären Wirtschaft und der Industrie 4.0 (vgl. u. a. [Deerberg-2016]) mit einem Umbruch des aktuellen linearen Wirtschaftssystems hin zu einer stärker auf Kreisläufe und Sharing Economy ausgerichteten Sichtweise einhergeht und in vielen Bereichen noch Nachholbedarf besteht, ist jedoch bereits wissenschaftlich belegt (vgl. [Haas-2015]).

Die Vision einer zirkulären Wirtschaft kennt keinen Abfall im heutigen Sinne. Reststoffe sind Rohstoffe für weitere Prozesse. Güter sind bereits im Produktdesign sowohl im Hinblick auf Reparierbarkeit, Demontagefähigkeit sowie die Materialzusammensetzung auf die Verwertung am Ende des Produktlebenszyklus ausgelegt. Im Rahmen der Diskussion wird dabei häufig das bestehende anthropogene Lager außer Acht gelassen. Seit den letzten 150 Jahren findet im Zuge der Industrialisierung die Umwandlung von geogenen Rohstoffen in verschiedenste Produkte und Güter statt (vgl. z. B. [Tanikawa-2015]), die **nicht** nach den Prinzipien einer Circular Economy designt wurden. Auch heute noch ist der wesentliche Anteil der durch den Menschen produzierten Waren nur bedingt stofflich hochwertig zu recyceln oder kreislauffähig. Dies hat sowohl technologische, wirtschaftliche als auch gesellschaftliche Gründe.

² Stoff, der bestimmte gefährliche Stoffeigenschaften z. B. karzinogen (krebserzeugend), mutagen (erbgutverändernd) oder reproduktionstoxisch (fortpflanzungsgefährdend) oder PBT-Eigenschaften (persistent, bioakkumulierbar und toxisch) aufweist. Die vollständige Definition ist [UBA-2011] zu entnehmen.

Beim Design von recyclingfähigen Produkten können Zielkonflikte auftreten. Diese Zielkonflikte äußern sich darin, dass z. B. eine Produkteigenschaft im Sinne einer Circular Economy optimiert wird und zugleich eine andere dadurch bedingt schlechter werden kann. Beispiele hierfür sind Performanceverluste durch alternative, recyclinggerechtere Materialien (etwa erhöhter Kraftstoffverbrauch bei Autoreifen mit recyclinggerechter Materialzusammensetzung) oder eine mögliche Verringerung der Produktsicherheit (z. B. beim Verzicht auf Flammenschutzmittel in Kunststoffen) bis hin zu Wettbewerbsnachteilen, die ggf. im Vergleich zu anderen Herstellern auftreten, die konventionelle Produkte (Design und Herstellung ohne Berücksichtigung einer Circular Economy) vertreiben.

Der Weg zu einer zirkulären Wirtschaft ist mit einer Verschiebung von Marktanteilen verbunden, umso mehr vor dem Hintergrund des globalen Welthandels. Daher müssen die oben beispielartig genannten Zielkonflikte (Trade-offs) offensiv im gesamtgesellschaftlichen Diskurs angegangen werden. Bei allen Entscheidungen zur Circular Economy sollten daher alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden, um unerwünschte Trade-offs zu erkennen und soweit wie möglich zu vermeiden.

Das Maß der Zirkulärität der weltweiten Wirtschaft bzw. der EU ist aus heutiger Sicht ernüchternd. Dass noch ein weiter Weg zur Umsetzung der Vision einer zirkulären Wirtschaft vor der Industriegesellschaft liegt, zeigt ein Modell von [Haas-2015]. Bezogen auf die gesamte global eingesetzte Materialmenge (Bezugsjahr 2005) betrug der Recyclinganteil weltweit ca. 6,5 % und in der EU-27 13 % (vgl. [Haas-2015] und [Hiebel-2016]). Auf Deutschland bezogen sind dies unter Annahme des Bezugsjahrs 2014 überschlagsmäßig 17 %; bezieht man die nicht verwertete inländische Entnahme mit ein nur 7,6 % (Daten aus [DESTATIS-2016]). Die flächendeckende Umsetzung einer zirkulären Wirtschaft ist daher noch nicht erkennbar und die notwendigen Voraussetzungen und Prinzipien (insbesondere das Produktdesign) (vgl. Tabelle 3-1) werden in vielen Wirtschaftsbereichen (noch) nicht berücksichtigt.

4 Rolle der thermischen Abfallbehandlung

4.1 Thermische Abfallbehandlung in der Abfallwirtschaft

In der europäischen Abfallrahmenrichtlinie ist »[...] das oberste Ziel jeder Abfallpolitik [...], die nachteiligen Auswirkungen der Abfallerzeugung und -bewirtschaftung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu minimieren. Die Abfallpolitik sollte auch auf die Verringerung der Nutzung von Ressourcen abzielen und die praktische Umsetzung der Abfallhierarchie fördern« (vgl. (6) [EU-2008/98-2008]).

Die EU-Abfallrahmenrichtlinien wurde im Kreislaufwirtschaftsgesetz in nationales Recht umgesetzt. Zweck des Gesetzes ist, »[...] die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den **Schutz von Mensch und Umwelt** bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen« (vgl. §1) [KrWG-2012]. Die thermische Abfallbehandlung hat im heutigen System der Abfallwirtschaft die primäre Aufgabe der sicheren Entsorgung von Stoffen, die aufgrund ihrer durch die Nutzung veränderten Eigenschaften oder ihrer Schadstoffgehalte am Ende ihres Lebenszyklus keiner weiteren stofflichen Verwertung mehr zuzuführen sind – z. B. aus rechtlichen, technischen, ökologischen, ökonomischen oder auch kulturellen Gründen. Der Schutz von Mensch und Umwelt ist somit auch in einer zirkulären Wirtschaft die rechtliche Basis und muss auf dem Weg zur Umsetzung dieser Vision sichergestellt werden.

Neben dem in §1 KrWG festgeschriebenen Zweck der Abfallbehandlung ist in §6 des KrWG eine Abfallhierarchie festgelegt. Die Hierarchie der Instrumente der Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung sind neutral vor dem Zweck des Schutz von Mensch und Umwelt anzuwenden. Um die thermische Abfallbehandlung im Zuge der Vision einer Circular Economy sowie im Hinblick auf die Unterschiede der Abfallwirtschaftssysteme der Mitgliedsstaaten einzuordnen, hat die EU im Januar 2017 ein Positionspapier veröffentlicht. Dieses hebt insbesondere die rechtlich gesetzte Abfallhierarchie (vgl. §6 [KrWG-2012] und (7) [EU-2008/98-2008]) als übergeordneten Rahmen hervor und stellt die thermische Abfallbehandlung als Brückentechnologie zu einer zirkulären Wirtschaft dar [EC-2017].

Abfallhierarchie nach §6 Absatz 1 und 2 KrWG [KrWG-2012]

Die gesetzlich festgeschriebene Abfallbewirtschaftung folgt der Abfallhierarchie Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (insbes. energetische Verwertung und Verfüllung), Beseitigung.

Von der Hierarchie darf unter Anwendung von Abwägungskriterien **abgewichen** werden, wenn die andere Maßnahme unter Berücksichtigung des ganzen Lebenszyklus besser für Mensch und Umwelt ist. Zur Bewertung werden Emissionen, Schonung von Ressourcen, einzusetzende bzw. zu gewinnende Energie und die Anreicherung von Schadstoffen herangezogen. Dass die energetische Verwertung einer Fraktion geeigneter ist als das Recycling, muss jedoch nachgewiesen werden. Sowohl die technische Möglichkeit, wirtschaftliche Zumutbarkeit und die sozialen Folgen der Abfallbewirtschaftungsmaßnahme sind zu beachten.

Die Einordnung der thermischen Abfallbehandlung als Brückentechnologie gilt vorausgesetzt dann, wenn die zirkuläre Wirtschaft vollumfänglich sowohl in allen Mitgliedsstaaten als auch in den Volkswirtschaften der globalen Handelspartner umgesetzt ist, aus denen der europäische Binnenmarkt Produkte bezieht. Dies ist zum heutigen Zeitpunkt nicht erkennbar. Auf dem Weg der Umsetzung einer zirkulären Wirtschaft erlaubt die Abfallhierarchie das stoffliche Recycling durch vorherige fundierte Betrachtung möglicher Schadstoffakkumulationen und Abwägung von energie- und treibhausgasintensiven Recyclingverfahren gegenüber anderen Instrumenten der Hierarchie. Die Methoden zur Bewertung der Hierarchiestritte und der jeweiligen Verfahren müssen jedoch stets kritisch, ergebnisoffen und neutral diskutiert werden. Methoden, die besagen, wann welches Abfallbehandlungsverfahren vorteilhaft ist, werden etwa in aktuellen Normen dargestellt, die eine vergleichende Bewertung ermöglichen (vgl. [VDI-2016]). Ein probates Mittel stellt die Technik der Ökobilanzierung dar.

Stoffe, die bedingt durch Ihren Verwendungszweck innerhalb eines Produkts und einer spezifischen Produkteigenschaft eine Schadstoffquelle am Ende des Produktlebenszyklus darstellen oder darstellen können, müssen auch in einer zirkulären Wirtschaft einer Behandlung unterzogen werden. Die thermische Abfallbehandlung stellt im aktuellen System der Industriegesellschaft eine nach heutigen Maßstäben unverzichtbare Schadstoffsенke dar (vgl. [UBA-2016d], [Destatis-2016]).

Definition »Thermische Abfallbehandlungsanlagen« [Destatis-2017]

Anlagen zur teilweisen oder vollständigen Beseitigung von festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen oder Gegenständen durch Verbrennen (z. B. Abfallverbrennungsanlagen), Anlagen zur thermischen Zersetzung brennbarer fester oder flüssiger Stoffe unter Sauerstoffmangel (Pyrolyseanlagen) sowie Anlagen zur Rückgewinnung von einzelnen Bestandteilen aus festen Stoffen durch Verbrennen (z. B. Anlagen zur Veraschung von Leiterplatten). Hauptzweck der thermischen Abfallbehandlungsanlage ist die Beseitigung des Schadstoffpotentials des Abfalls. Hierzu zählen auch Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht, ungeachtet deren Energieeffizienz.

Für Verbrennungsanlagen gelten hohe Standards zur Luftreinhaltung sowie zur eingesetzten Technologie. Den rechtlichen Rahmen setzt die EU Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen »IE-Richtlinie« [EU-2010/75-2010], welche in Deutschland durch die 17. BImSchV zur Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen geregelt und in nationales Recht umgesetzt ist [17. BImSchV-2013]. Für die thermische Abfallbehandlung gelten z. T. strengere Emissionsbegrenzungen (z. B. für CO, SO₂ oder auch Schwermetalle) als für andere Industriezweige mit vergleichbaren Großfeuerungsanlagen mit festen Brennstoffen (geregelt in der 13. BImSchV). Darauf aufbauend gelten die BVT-Merkblätter, die die beste verfügbare Technik zusammenstellen und als Leitfaden zur Planung, Steuerung und Betrieb umweltrelevanter Industrieanlagen herangezogen werden müssen. Durch die rechtlichen Auflagen wird sichergestellt, dass die thermische Abfallbehandlung insbesondere die prioritäre Aufgabe der Inertisierung, Hygienisierung sowie Konzentrierung von Schadstoffen zur kontrollierten Ausschleusung aus der Wertschöpfungskette übernehmen kann.

Als eine der heute tragenden Säulen der Abfallentsorgung nutzen thermische Abfallbehandlungsanlagen auch den Energiegehalt im Inputmaterial. Dabei ist zu beachten, dass thermische Abfallbehandlungsanlagen primär für den Zweck der Schadstoffentfrachtung und sicheren Verbrennung heterogener Abfälle konstruiert sind und nicht mit auf elektrische Wirkungsgrade optimierten Kraftwerken auf Basis fossiler Energieträger konkurrieren sollen. Die bei der thermischen Behandlung unter Nutzung der brennbaren Anteile im Abfall anfallende Wärme wird sowohl zur Stromerzeugung als auch zu Heizzwecken genutzt [UBA-2016d]. Des Weiteren fallen bei der Verbrennung Reststoffe aus der Rauchgasreinigung und Schlacken an. Diese Stoffe werden abgetrennt, je nach Wertstoffpotenzial aufbereitet und als Sekundärrohstoff weitervermarktet (z. B. REA-Gips³ in der Baustoffindustrie, Metalle in der Verhüttung und Schlacken als Ersatzbaustoff). Die nicht mehr verwertbaren Materialien werden, durch den thermischen Prozess inertisiert, stabilisiert und im Volumen reduziert, unter geltenden Auflagen auf Deponien abgelagert, so dass von diesen keine Schädigung der Ökosphäre sowie der Anthroposphäre ausgehen kann (z. B. durch belastete Sickerwasser und treibhauswirksame Deponiegase). Bereits seit Juni 2005 darf Siedlungsabfall aufgrund der hohen Organikanteile nicht mehr ohne entsprechende Vorbehandlung deponiert werden [BMUB-2006]. Grundlage war die damals geltende Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) und deren ergänzende Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV), welche seit 2009 in der geltenden Deponieverordnung (DepV) zusammengefasst sind.

Auf Basis der dargestellten Grundlagen lassen sich somit folgende Punkte ableiten und festhalten, aus denen die Relevanz der thermischen Behandlung für die Abfallwirtschaft hervorgeht:

Grundsätze der thermischen Behandlung

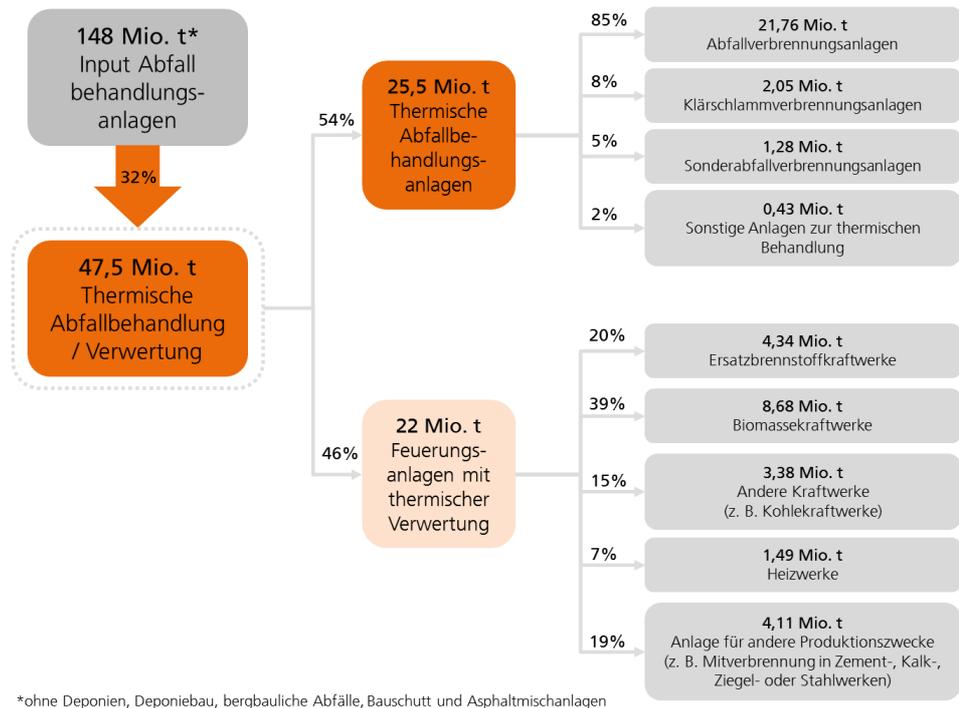
- Die thermische Behandlung von Abfällen stellt die Inertisierung, Hygienisierung sowie Konzentrierung von Schadstoffen zur kontrollierten Ausschleusung aus der Wertschöpfungskette sicher.
- Bei der Verbrennung anfallende Reststoffe des Prozesses mit Wertstoffpotenzial werden soweit möglich als Sekundärrohstoffe weitervermarktet.
- Die bei der thermischen Behandlung unter Nutzung der brennbaren Anteile im Abfall anfallende Wärme wird sowohl zur Stromerzeugung als auch zu Heizzwecken genutzt.
- Die Verbrennung reduziert das Volumen des Inputmaterials und schont somit letztlich Flächen und Deponiekapazität.

Laut aktueller amtlicher Statistik wurden im Jahr 2015 deutschlandweit rund 148 Mio. Tonnen Abfall⁴ von Abfallbehandlungsanlagen angenommen (siehe Bild 4-1). In thermischen Abfallbehandlungs- und Feuerungsanlagen wurden davon 46,8 Mio. Tonnen behandelt, darunter 25,5 Mio. Tonnen in thermischen Abfallbehandlungsanlagen (z. B. Abfallverbrennungsanlagen) und 22,0 Mio. Tonnen in Feuerungsanlagen mit thermischer Verwertung (z. B. Biomassekraftwerke) [Destatis-2017]. Der Fokus dieser Studie liegt auf den thermischen Abfallbehandlungsanlagen.

³ REA-Gips ist Gips, der aus den Rückständen von Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) gewonnen wird

⁴ Ohne Deponien, Deponiebau, bergbauliche Abfälle, Bauschutt und Asphaltmischanlagen

Bild 4-1:
Input Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland 2014, eigene Darstellung nach Daten [Destatis-2017]

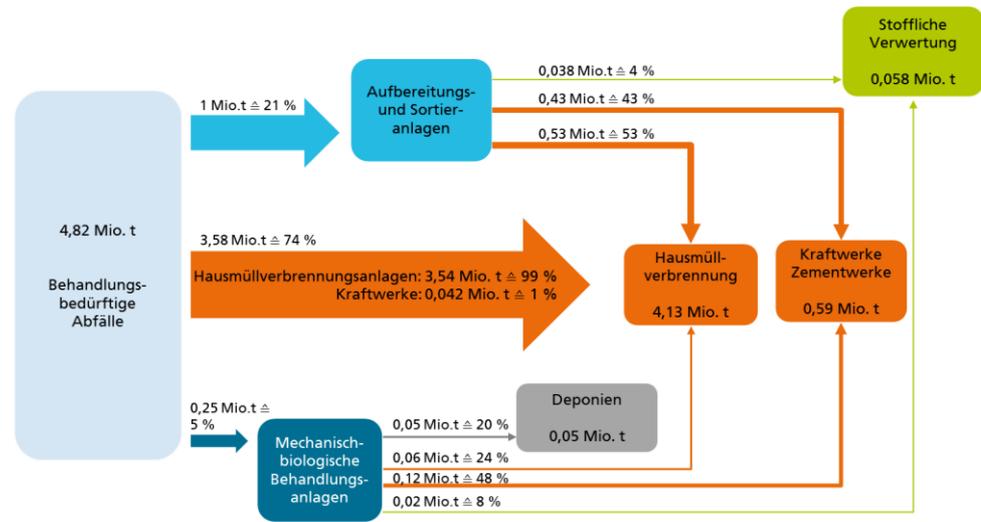


Die nicht über alle Datenquellen harmonisierte Kategorisierung und dementsprechende Zählweise der verschiedenen thermischen Abfallbehandlungsanlagen wurde bereits in Publikationen behandelt (vgl. [Huneke-2017]) und wird an dieser Stelle nicht näher thematisiert. Deutschlandweit sind insgesamt 848 Anlagen zur thermischen Behandlung von Abfällen, sowohl Feuerungsanlagen mit thermischer Verwertung Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung, installiert [Destatis-2017]. Nach aktuellen Branchenzahlen existieren 66 Abfallverbrennungsanlagen⁵ mit einer Gesamtkapazität von rund 20 Mio. Tonnen [Hoffmeister-2016]. Die höchste Konzentration der MVA ist dabei in Nordrhein-Westfalen mit 16 Anlagen und einer Kapazität von 6,5 Mio. Tonnen zu finden. Danach folgen die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg mit zusammen 4,7 Mio. Tonnen [BDE-2016].

Blickt man auf die Länderebene, so zeigt sich ebenfalls die heute hohe Relevanz der thermischen Behandlung in der heutigen Abfallwirtschaft. Allein in den Privathaushalten in Nordrhein-Westfalen fallen pro Jahr rund 8 Mio. Tonnen Abfall an [MKULNV-2016a]. Etwa die Hälfte davon wird in Form der Fraktionen etwa Glas, Papier oder Biomüll getrennt gesammelt und stofflich verwertet. Der Rest wird direkt oder indirekt einer thermischen Verwertung zugeführt und damit einer Abfall- und Abfallmitverbrennung. Die folgende Grafik zeigt die Verwertung der thermischen Abfallbehandlung mit anderen Anlagen für behandlungsbedürftige Abfälle in NRW.

⁵ Stand 2016

Bild 4-2:
Entsorgungswege
behandlungsbedürftiger
Siedlungsabfälle in
NRW 2015 [MKULNV-
2016a]



In NRW fielen im Jahr 2015 4,82 Mio. t behandlungsbedürftige Abfälle⁶ an. Davon flossen ca. 74 % direkt (ohne Vorbehandlung) in Hausmüllverbrennungsanlagen und ein kleiner Teil in Kraftwerke (z. B. Holz und Sperrmüll). Bei Addition der ausgeschleusten Fraktionen aus mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen und aus den Aufbereitungs- und Sortieranlagen erhöht sich der Anteil zur Verbrennung (inkl. der Verbrennung in Zementwerken und Kraftwerken) auf fast 97 %.

Unter 2 % der behandlungsbedürftigen Abfälle wurden stofflich verwertet, ca. 2 % wurden deponiert. Dies zeigt die große Rolle, die die Verbrennungsanlagen im Abfallwirtschaftssystem spielen⁷. In der Abfallbilanz NRW wird die Rolle der Verbrennungsanlagen ergänzend wie folgt beschrieben: »Ein großer Teil der Abfälle, die zunächst an Aufbereitungs- und Sortieranlagen angeliefert werden, wird anschließend in Hausmüllverbrennungsanlagen thermisch behandelt« [MKULNV-2016a].

Im nachfolgenden Kapitel finden eine differenzierte Betrachtung der Verwertungswege sowie die Einordnung der thermischen Abfallbehandlung in die in Kapitel 3 definierte Circular Economy statt.

⁶ Definition behandlungsbedürftiger Siedlungsabfälle: »Abfälle, die vor ihrer endgültigen Entsorgung bzw. Ablagerung eine mechanische, mechanisch-biologische oder thermische Behandlung erfordern, werden im Folgenden als behandlungsbedürftig bezeichnet. Bio- und Grünabfälle, werthaltige Abfälle oder mineralische Bau- und Abbruchabfälle, die mit dem Ziel der stofflichen Verwertung sortiert und aufbereitet werden, zählen nicht zu den behandlungsbedürftigen Siedlungsabfällen« [MKULNV-2016a].

⁷ Ein Blick ins benachbarte Ausland unterstützt die Aussage. Der aktuelle Bundesabfallwirtschaftsplan in Österreich 2017 zeigt, dass dort ca. 1,7 Mio. Tonnen gemischter Siedlungsabfall und Sperrmüll anfallen, von denen ca. 81 % thermisch behandelt werden. Bei Altstoffen und Elektroaltgeräten liegt der thermisch behandelte Anteil bei ca. 23 % [BMLFUW-2017].

Bild 4-4:
Beispielhaftes Bild der
Materialfraktion
191212, wie sie an der
AGR angeliefert wird



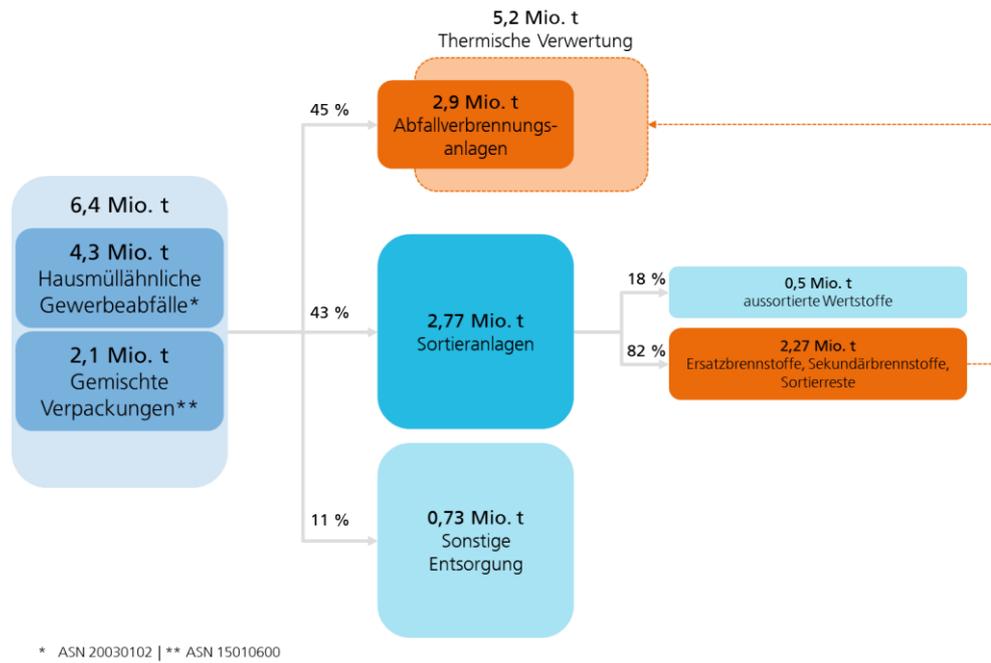
Die Fraktion der ASN **170904** umfasst die bei einem Abbruch oder einer Kernsanierung von Bauwerken anfallenden Abfälle. Unter dem Sammelbegriff »Baumischabfall«, setzt sich diese Fraktion aus stofflich heterogenen organischen und anorganischen Reststoffen zusammen und ist meist ein Gemisch aus Holz, Bauschutt, Metallen, Estrich, Kartonagen, Kabelresten, Folien, Papier, Teppeten oder auch Resten von Kunststoffen (Rohre, Drainagen).

Die drittgrößte Menge der verwerteten Abfälle der AGR stellt die unter der ASN **150106** zusammengefasste heterogene Fraktion der gemischten Verpackungen aus Industrie und Gewerbe dar, welche hauptsächlich Holz, PPK⁸ und Folien umfassen.

Die mit **ASN 200301** bezeichneten gemischten Siedlungsabfälle stellen die viertgrößte Fraktion der Anlage in Herten dar. Diese hausmüllähnlichen Abfälle sind ein Gemisch aus verschiedenen Stoffen, angefangen von PPK über Holzabfälle, Metalle, Verpackungsabfälle und Textilien bis hin zu Kunststoffen. Im Gegensatz zum privaten Siedlungsabfall schwankt die Zusammensetzung des hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls je nach Herkunft und Tätigkeitsfeld des verursachenden Industriebetriebs stark. Die bundesweit anfallenden Mengen an gewerblichen Siedlungsabfallgemischen inkl. Verpackungsgemischen werden hauptsächlich thermisch verwertet (siehe auch [BMUB-2016a]) und nur geringe Mengen aussortierter Wertstoffe werden zurück in die stoffliche Verwertung geführt. Dies können je nach Zusammensetzung und Qualität des Inputstroms sowie eingesetzter Sortiertechnologie z. B. noch Reste von Metallen oder Kunststoffen sein.

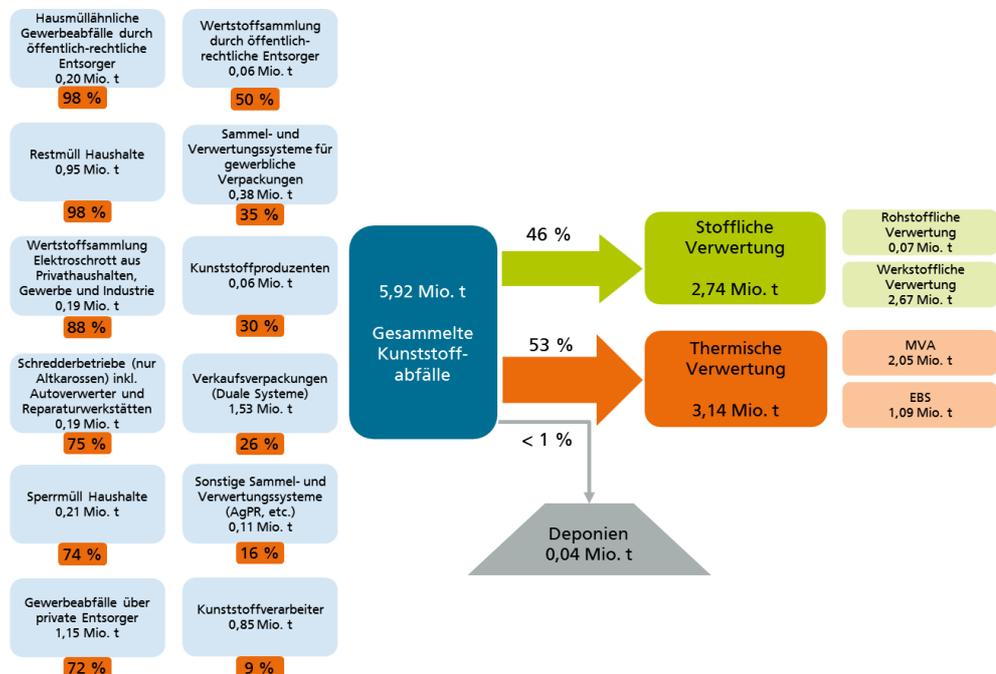
⁸ **P**apier, **P**appe, **K**artonage

Bild 4-5: Entsorgungspfade von gewerblichen Siedlungsabfallgemischen, eigene Darstellung nach Datengrundlage [UBA-2016b]



Betrachtet man die Fraktion der Kunststoffabfälle, worunter auch die durch die Dualen Systeme erfassten Verpackungsabfälle fallen, so wurden im Jahr 2015 mehr als die Hälfte der erfassten Menge von 5,92 Mio. Tonnen in Abfall- und Abfallmitverbrennungsanlagen thermisch verwertet (siehe folgende Grafik).

Bild 4-6: Abfallaufkommen und Verwertungspfade von Kunststoffabfällen in Deutschland 2015, eigene Darstellung nach [UBA-2017], Daten [Consultic-2016]



Betrachtet man die einzelnen Kunststoffabfallfraktionen und deren spezifische Verwertungswege genauer, so zeigen sich Unterschiede im Hinblick auf die thermische und stoffliche Verwertung in den unterschiedlichen Anfallbereichen. Die erfassten Kunststoffmengen in den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen sowie die im Restmüll von Haushalten erfassten Kunststoffe gehen zu 98 % in die thermische Verwertung. Die Menge der erfassten Gewerbeabfälle werden zu 72 % einer Verbrennung zugeführt.

Bei Sammel- und Verwertungssysteme für gewerbliche Verpackungen (auch Transport und Umverpackungen), bei Branchenlösungen sowie in der Kunststoffverarbeitung (sortenreine Abfälle aus Extrusion, Spritzgießen oder Fensterbau) stehen mehr Möglichkeiten zum Recycling zur Verfügung. Bei sortenreinen Stoffströmen wie z. B. Polyethylen oder Polypropylenkunststoffabfällen zeigt sich die Vorteilhaftigkeit des Recyclings in Bezug auf Ressourcenschonung und Treibhausgaseinsparung bereits.

Eine Getrenntsammlung mit entsprechender Recyclinginfrastruktur zeigt entsprechend positive Tendenzen bei der Umsetzung einer Circular Economy. In den Anfallstellen, in denen die Kunststoffe jedoch am Ende des Produktlebenszyklus insbesondere in Endkonsumentenbereich zu finden sind, sind die Anteile der thermischen Verwertung hoch. Dies liegt vorrangig daran, dass die Kunststoffe in einem heterogenen Materialgemisch vorliegen, in Verbundwerkstoffen eingebaut und in den meisten Fällen durch den Nutzungsprozess sowie die Funktion während der Nutzungsphase verunreinigt oder gealtert vorliegen. Eine Trennung und ein Recycling sind ökonomisch und ökologisch als auch technisch zur Zeit (noch) nicht darstellbar.

4.3 Thermische Abfallbehandlung in der Circular Economy

Einige Abfälle sind für Mensch und Natur gefährlich und die thermischen Abfallbehandlung hilft als **Schadstoffsenke**, indem sie umweltgefährdende Stoffe aus dem Kreislauf ausschleust. Klassische Beispiele hierfür sind etwa mit Flammschutzmitteln, Schmiermitteln oder schwermetallhaltigen Stabilisatoren und Farbpigmenten behandelte Kunststoffe, etwa PVC in Fensterrahmen, oder Kunststoffbeschichtungen basierend auf Polytetrafluorethylen (PTFE). Bekannte Beispiele für bioakkumulierende Chemikalien sind etwa PFC⁹ oder chlororganische chemische Verbindungen (PCB¹⁰). Diese für viele weitere organische und anorganische Schadstoffe beispielhaft genannten Bestandteile von Produkten kontrolliert zu zerstören und die in den Produkten enthaltene Energie zu nutzen, ist die notwendige Senkenfunktion der Abfallverbrennung [Bertram-2017].

Das anthropogene Lager enthält vielfältige Produkte, die zum Herstellungszeitpunkt mit Additiven und Materialien hergestellt wurden, die den damaligen rechtlichen Anforderungen entsprachen, jedoch heute als schädlich für Mensch und Umwelt eingestuft werden. Sie **behindern das werkstoffliche Recycling** und erfordern stattdessen eine sichere Entsorgung. Viele dieser Verbindungen sind mittlerweile völkerrechtlich bindend unter der Stockholmer Konvention als

⁹ Organische Fluorverbindungen, per- und polyfluorierte Chemikalien

¹⁰ Polychlorierte Biphenyle, u. a. in Altkunststoffen als Weichmacher.

POP¹¹ zusammengefasst und dürfen nur in Ausnahmefällen in heutigen Produkten angewendet werden. Diese Ausnahmeregelungen gelten etwa im Bereich der Beschichtungen von Halbleiterelementen oder auch für Hydraulikflüssigkeiten in der Luftfahrt sowie definierte medizinische Anwendungen [BUND-2015]. Sie werden daher auch heute noch aus Gründen der technischen Notwendigkeit und den von Gesetz und Konsument **geforderten Produkteigenschaften in der Nutzungsphase** eingesetzt. Die Liste der POP wurde zuletzt im Juli 2017 um weitere Chemikalien ergänzt (inkl. spezifischer Ausnahmeregelungen für den Einsatz) und wird stetig aktualisiert [United Nations-2017].

Um keine ungewollte Akkumulation von Schadstoffen in späteren Produkten zu erreichen, ist insbesondere vor dem Hintergrund der Umsetzung einer zirkulären Wirtschaft bei vielen Stoffströmen eine **differenzierte Betrachtung des optimalen Verwertungswegs** notwendig. Für die Umsetzung der Vision einer Circular Economy ist demnach aus Abfallsicht die Sicherstellung einer Schadstoffausschleusung zwingend erforderlich. Aus Produktdesignsicht ist es jedoch ebenso notwendig, dass in Zukunft Produkte vor dem Hintergrund der späteren Recyclingfähigkeit in den Wirtschaftskreislauf eingebracht werden. Dass jedoch auch die **Wiederaufbereitung von Produkten** die sich am Lebensende befinden ein vielversprechender Weg ist, zeigen aktuelle Studien zum Thema IT-Refurbishment, die ein zweites Leben für PCs und Laptops ermöglichen und so die Lebensdauer von rohstoff- und treibhausgasintensiven Produkten verlängern (vgl. [Interseroh-2017]).

Eine im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen einer Studie erstellte Umfrage zeigt jedoch, dass die Gesellschaft von einer echten stofflichen Verwertung insbesondere von Altkunststoffen, die nach dem Gebrauch in Haushalten und Gewerbe anfallen, noch entfernt ist [UBA-2016a] (vgl. auch Bild 4-6). Darunter fallen auch Kunststoffe, die nicht vor dem Hintergrund der genannten Schadstoffthematik behandelt werden müssen. Gründe hierfür liegen insbesondere in der **komplexen Mischung** von Kunststoffarten im Abfallstrom, in der Verwendung mechanisch nicht trennbarer Kunststoffverbunde oder dem Gehalt an Additiven, die während der Nutzungsphase erwünschte Eigenschaften gewährleisten, jedoch ein Recycling erschweren und teils unmöglich machen.

Darüber hinaus erzeugen die überwiegend mechanischen Verfahren, die einer stofflichen Verwertung vorausgehen, bei vielen Verpackungen heute eine **Restfraktion** von bis rund 45 Gew.-%, die stofflich nicht verwertet werden kann und nicht zur Herstellung neuer Produkte nutzbar ist (vgl. Bild 4-5 sowie [UBA-2016a]). Die in Bild 4-6 gezeigte Input-Menge der werkstofflichen Verwertung ist demnach in der Praxis geringer und um die Aufbereitungsverluste zu mindern. Die Entsorgung und Ausschleusung der Restfraktion erfolgt letztlich durch die thermische Abfallbehandlung und wird so nach aktuellen Vorgaben gesichert verwertet. Betrachtet man den heutigen Stand der Produktentwicklung und des menschlichen Konsums im heutigen Wirtschaftssystem sowie das bestehende anthropogene Lager, so wird die **thermische Abfallbehandlung noch langfristig eine wesentliche Ergänzung** auf dem Weg zur Implemen-

¹¹ Langlebige organische Schadstoffe (engl. **p**ersistent **o**rganic **p**ollutants – POP)

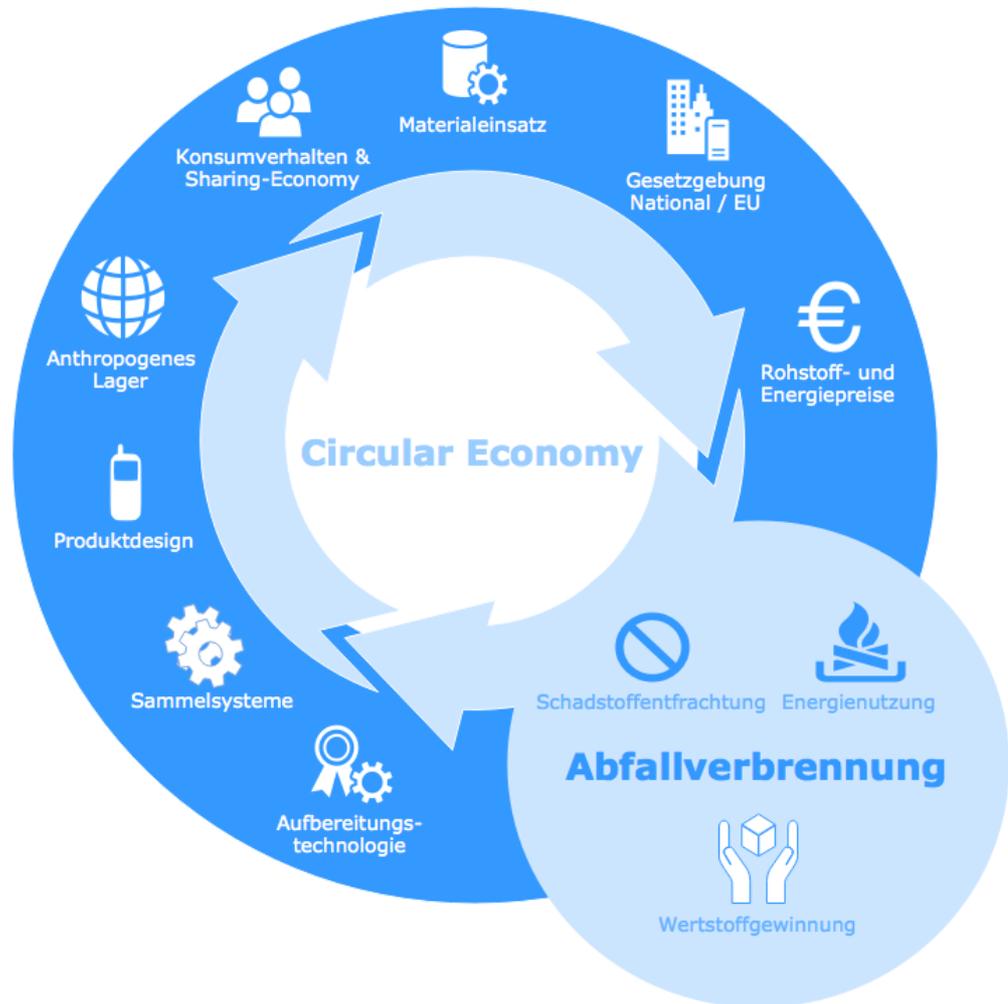
tierung einer zirkulären Wirtschaft sein. Wenn Produkte nicht vor dem Hintergrund zirkulärer Prinzipien (vgl. Tabelle 3-1) designt und produziert werden sowie am Ende des ersten Lebenszyklus ohne Umweltschutzbedenken wieder- oder weiterverwertet werden können, werden thermische Behandlungsverfahren tragende Bestandteile der Wirtschaftssysteme sein. Durch die Dienstleistung der Inertisierung von Abfällen, der Schadstoffentfrachtung sowie der Energie- und Sekundärrohstoffgewinnung aus nicht stofflich verwertbaren Abfällen hilft die thermische Abfallbehandlung dabei, Zielkonflikte dort zu mindern, wo zirkuläre Produktion und Denkweisen heute an wirtschaftliche, rechtliche und stoffliche Grenzen stoßen. Damit steht die Verbrennung nicht im Widerspruch zur, sondern ist eine Ergänzung der Circular Economy.

In Europa gilt grundsätzlich das Prinzip der Nähe, welches besagt, dass Abfälle nach Möglichkeit so nah wie möglich am Entstehungsort entsorgt werden sollen. Eine zirkuläre Wirtschaft kann jedoch nur funktionieren und erfolgreich implementiert werden, wenn **Stoffströme** zwischen Wirtschaftsräumen sowohl lokal, regional als auch international **zirkulieren**. Kreisläufe müssen resiliente Systeme sein und entsprechend dynamisch nach Bedarf im Hinblick auf Menge und Qualitäten der zirkulierten Materialien angepasst werden können. Dies gilt sowohl auf Seiten der Abfallquellen (welche Materialien werden für welche Produkte eingesetzt?) als auch auf Seiten der Senken (ggf. neue Entsorgungswege oder auch neue Anwendungsmöglichkeiten für Sekundärrohstoffe). Hierbei ist zu beobachten, inwieweit sich das Prinzip der Nähe und eine intelligente Steuerung von (Rest-)Stoffströmen in europäischem Kontext unter marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Zukunft zueinander verhalten. Die Vision der Zirkularität ist eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung, die in einer globalisierten Handelswelt über Landesgrenzen hinweg funktionieren und entsprechend implementiert werden muss.

Die bestehenden Verbrennungskapazitäten könnten europaweit genutzt werden und so Schadstoffe ausschleusen und die sichere Entsorgung gewährleisten. Somit besteht die Chance, durch den gezielten Einsatz von Verbrennungskapazitäten Verfahren zur zirkulären Wirtschaft in Ländern ohne ausreichende Senkenkapazität zu unterstützen. Dies schließt jedoch auch mit ein, dass alle Anlagenstandorte kontinuierlich auf ihre Zukunftsfähigkeit im Hinblick auf aktuellste Anlagentechnologie und optimale Nutzung der Energiegehalte im Abfall überprüft und veraltete Anlagen aus dem Portfolio genommen werden müssen (vgl. [NABU-2017]).

Auf Basis der zusammengestellten Informationen können relevante Faktoren, die die thermische Abfallbehandlung im Rahmen der zirkulären Wirtschaft beeinflussen und deren Rolle auf dem Weg zur Umsetzung der Vision in folgender Grafik zusammengefasst werden.

Bild 4-7:
Thermische Abfallbe-
handlung als Teil der
Circular Economy,
eigene Darstellung



Einordnung der thermischen Abfallbehandlung in der Circular Economy am Beispiel heutiger Gewerbeabfallströme

- Unter Berücksichtigung der aktuellen Statistiken ist eine zirkuläre Wirtschaft insbesondere im Bereich der Gewerbeabfallströme aus heutiger Sicht **noch weit von einer Umsetzung entfernt**.
- Die heutige Herstellung der meisten Produkte sowie deren heutige Erfassung und Aufbereitung am Ende ihres geplanten Lebenszyklus sind **nicht ausgelegt auf eine zirkuläre Wirtschaft** ohne thermische Abfallbehandlung.
- Die Gesellschaft ist durch das **bestehende anthropogene Lager** als langfristiges Reservoir von **nicht kreislaufgerechten Produkten** auf eine thermische Abfallbehandlung angewiesen, um sowohl Schadstoffe auszuschleusen als auch die ggf. im Abfall enthaltene Energie sinnvoll zu nutzen.
- Gefährliche Abfälle müssen behandelt und die enthaltenen Schadstoffe ausgeschleust werden (**Schadstoffsenke, Nierenprinzip**, vgl. [Bertram-2017]).
- Ein Recycling darf sowohl heute als auch in Zukunft **keine Schadstoffanreicherung** nach sich ziehen oder unter wirtschaftlich und energetisch unzumutbaren Anstrengungen stattfinden.
- Aus **hygienischen Gründen** müssen bestimmte Abfallfraktionen auch in

einer zirkulären Wirtschaft verbrannt werden.

- **Stofflich inhomogene Abfallfraktionen** ziehen prinzipiell einen hohen Sortieraufwand nach sich, dessen ökologische und ökonomische Notwendigkeit auch vor dem Hintergrund der Vision einer Circular Economy zu rechtfertigen ist.
- Die thermische Abfallbehandlung stellt die Technologie dar, die bei **Zielkonflikten zwischen zirkulärer und linearer Wirtschaft interagiert**, einen gesicherten Verwertungsweg darstellt und im Falle einer ausgeschlossenen stofflichen Nutzung die im Abfall enthaltene Energie nutzt.
- Die thermische Behandlung von Abfällen ist als **notwendige** (Schadstoffsenke) **und sinnvolle** (Energienutzung) **Technologie** noch langfristig ein Bestandteil der Circular Economy.

Die thermische Abfallbehandlung ist auch in einer zirkulären Wirtschaft als Dienstleister zu betrachten, der die Umsetzung der Vision einer Gesellschaft ohne Abfall flankiert. Das Ziel in einer zirkulären Wirtschaft muss sein, dass möglichst viele Produkte so konstruiert werden, dass am Ende des Lebenszyklus wertstoffhaltiges Material zurückgewonnen werden kann. Dabei sind die Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zu beachten. Die thermische Nutzung von Abfällen ergänzt bei gleichzeitiger Sicherung der Schadstoffentfrachtung und Nutzung der im Abfall enthaltenen Energie die zirkuläre Wirtschaft.

Die verschiedenen Verfahren der Abfallbehandlung müssen abhängig vom Abfallstrom neutral unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten untersucht werden. **Dabei darf es weder zu einem unbegründeten Ausschluss noch zu einer unbegründeten Bevorzugung von Verfahren kommen.** Es müssen immer die Grundpflichten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§1) betrachtet werden. Dabei muss die gesamte Prozesskette berücksichtigt werden inklusive des Aufwands des Recyclings (Energie- und Ressourcenaufwand bei der Aufbereitung) sowie der späteren Nutzungsmöglichkeiten der gewonnenen Stoffe u. a. unter der Fragestellung, wo die Stoffe wieder hochwertig in Produkten eingesetzt werden können.

Das bestehende anthropogene Lager an nicht recyclingfähigen Produkten ist immens und bedarf einer sicheren Entsorgung. Begleitend zur Entwicklung der für eine zirkuläre Wirtschaft notwendigen Innovationen im Bereich der Sammlungs-, Sortier- und Trennverfahren, helfen Verbrennungskapazitäten dabei, die Verwertung sicherzustellen und entsprechende Senken bereitzustellen. Notwendige Innovationen in Bezug auf rezyklierbare Produkte dürfen nicht durch ökonomisch gefestigte Pfadabhängigkeiten ausgebremst werden (durch niedrige Annahmepreise von MVA). Ebenso darf das Ausklammern der wichtigen Senkenfunktion und sicheren Entsorgung von Schadstoffen bei der Umsetzung der Vision einer zirkulären Wirtschaft nicht zugelassen werden. Die thermische Abfallbehandlung und die Implementierung der zirkulären Wirtschaft schließen sich nicht aus.

5 Empfehlungen und Ausblick

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt aus Sicht der Autoren, welche Herausforderungen eine zirkuläre Wirtschaft für die Unternehmen der thermischen Abfallbehandlung bringt und welche strategischen Handlungsfelder in Zukunft betrachtet werden müssen.

- Die Gesetzgebung im Produkt- und im Abfallrecht auf nationaler, internationaler und europäischer Ebene hat wesentlichen Einfluss auf die thermische Abfallbehandlung und wird insbesondere auf dem Weg in eine zirkuläre Wirtschaft von großer Bedeutung sein. Aktuelle Beispiele dafür sind die deutsche Mantelverordnung, die die Verwendung mineralischer Recycling-Baustoffe aus Bau- und Abbruchabfällen, Schlacken aus der Metallherzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen regelt, sowie die **europaweite Umsetzung des Deponieverbots oder die Ökodesignrichtlinie**. In der Folge verschieben sich Mengen und es treten regionale Ungleichgewichte zwischen Behandlungskapazität und Abfallaufkommen auf. Die Nutzung von Schadstoffsenken in einer zirkulären Wirtschaft und Gesellschaft muss in wissenschaftlichen Studien kritisch reflektiert werden, um Transportmehraufwände einordnen zu können.
- Stetiges Monitoring der in Neuprodukten eingesetzten Materialzusammensetzungen und Designinnovationen sowie aktive Teilnahme und Einbringung von abfallwirtschaftlichem Know-how in die **Produktgestaltungsprozesse**: Der Materialeinsatz in Neuprodukten hat direkten Einfluss auf die Verbrennungstechnik sowie die dazugehörige Abgasreinigung (aktuelles Beispiel: kohlefaserverstärkte Kunststoffe, Sandwichbauweisen und Multi-materialsysteme). Das Produktdesign und veränderte Nutzungsarten (Reuse, Refurbishment...) am Ende des ersten Lebenszyklus wirken sich sowohl auf die Lebensdauer der Produkte als auch auf deren generelle Verwertungsmöglichkeiten aus. Damit einhergehend haben Nutzungsmodelle wie Leasing oder Sharing Auswirkungen auf den Rücklauf des Materials.
- Auch ausgelöst durch die zunehmende Digitalisierung der Wertschöpfungskette und dem Bewusstsein für im Produkt enthaltene Wertstoffe bei den Produzenten, führen neue Gebrauchs- und Nutzungsmodelle in der Konsequenz zu anderen Geschäftsbeziehungen. Durch Leasing- und Sharing-Modelle als auch getrieben durch Konzepte der Industrie 4.0 verändern sich die bekannten Besitzverhältnisse. Inhaber von Produkten am Ende des Lebenszyklus sehen sich zunehmend auch als Inhaber von Sekundärrohstoffen und behalten das Wissen über den Produktzustand (z. B. Digital Twin¹² bei Maschinen). Der Impact der Abfallvermeidung, des Materialeinsatzes sowie des Produktdesigns und des **Nutzerverhaltens** müssen vor diesem Hintergrund genauer analysiert werden. Welche Produkte und Materialien sind zu erwarten?
- Trends und Möglichkeiten im Bereich der **Erfassung, Sortierung und Aufbereitung** müssen dazu parallel beobachtet werden. Leichter zu erfassen

¹² Digitaler Produktzwilling; virtuelles Abbild einer Maschine, welches mit Sensoren aus dem Betrieb den Zustand während der Nutzungsphase auch nach der Auslieferung erfasst.

sende und zu recycelnde Materialien werden eine **Umlenkungen von Stoffströmen** in stoffliche Verwertungswege ermöglichen. Sowohl zu erwartende Mengen als auch Materialien am Ende des Lebenszyklus müssen genauer prognostiziert werden können, um strategische Entscheidungen zu thermischen VerwertungsKapazitäten treffen zu können. Etwaige Überkapazitäten sowohl auf Seiten der thermischen als auch auf der stofflichen Behandlungsverfahren, die ökonomische und ökologische Fehlanreize auslösen, müssen frühzeitig erkannt und vermieden werden.

- Einhergehend mit den Sortierungs- und Aufbereitungsverfahren muss die **Nutzung und Herstellung von Sekundärrohstoffen** (Metalle aus Schlacken, Aufbereitung von Rückständen aus der Rauchgasreinigung, mineralische Ersatzbaustoffe) aus dem anthropogenen Lager als wesentlicher Bestandteil der thermischen Abfallverwertung verstanden und als Baustein einer zirkulären Wirtschaft gefestigt werden. Die Beteiligung an Forschung und Entwicklung, um Reststoffe der thermischen Behandlung zu Sekundärrohstoffen aufzubereiten, unter geltenden Normen in Produkte zu bringen und somit **Deponien und Primärrohstofflagerstätten zu entlasten**, muss ausgebaut werden. Dazu ist eine aktive Kommunikation zwischen Sekundärrohstoffproduzent und Produktherstellung unabdingbar und muss ausgebaut werden.
- Auch die Circular Economy benötigt Energie. Die bereits thematisch in anderen Studien [Huneke-2017] behandelte **Rolle der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in der Energiewende** muss weiter wissenschaftlich analysiert und Ergebnisse müssen in die Praxis umgesetzt werden. Abwärmekonzepte, Dienstleistungen zur Netzstabilität sind Bestandteile einer zirkulären Wirtschaft. Die Steigerung der Energieeffizienz und Energienutzung aus stofflich nicht verwertbaren Materialien werden auch in Zukunft wesentliche Herausforderungen insbesondere für ältere Abfallverbrennungsanlagen sein. In Zukunft ist zu beachten, dass durch den Anstieg von erneuerbaren Energien im Strommix die Substitutionsmöglichkeit von CO₂-intensivem Strom geringer wird und damit im Vergleich geringere CO₂-Einsparungen erzielt werden können. Die Entwicklung des biogenen Anteils im Hausmüll sollte ebenfalls beobachtet werden, um auch in Zukunft fundierte Aussagen zu fossilem und biogenen CO₂ bei der Verbrennung treffen zu können.

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Prinzipien einer Circular Economy nach Fraunhofer UMSICHT [Hiebel-2016]	6
--------------	---	---

7 Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1:	Projektstruktur und Vorgehen	4
Bild 4-1:	Input Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland 2014, eigene Darstellung nach Daten [Destatis-2017]	11
Bild 4-2:	Entsorgungswege behandlungsbedürftiger Siedlungsabfälle in NRW 2015 [MKULNV-2016a]	12
Bild 4-3:	Exemplarische Zusammensetzung von Gewerbeabfällen des RZR Herten aus dem Jahr 2016; Datengrundlage AGR 2017	13
Bild 4-4:	Beispielhaftes Bild der Materialfraktion 191212, wie sie an der AGR angeliefert wird	14
Bild 4-5:	Entsorgungspfade von gewerblichen Siedlungsabfallgemischen, eigene Darstellung nach Datengrundlage [UBA-2016b]	15
Bild 4-6:	Abfallaufkommen und Verwertungspfade von Kunststoffabfällen in Deutschland 2015, eigene Darstellung nach [UBA-2017], Daten [Consultic-2016]	15
Bild 4-7:	Thermische Abfallbehandlung als Teil der Circular Economy, eigene Darstellung	19

8 Quellenverzeichnis

[17. BImSchV-2013]	17. BImSchV (2013): Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV)
[Ayres-1989]	Ayres, R. U. (1989): Industrial metabolism. In: <i>Technology and environment</i> , S. 23–49
[Ayres-1994]	Ayres, R. U. (1994): Industrial Metabolism: Theory and Policy. In: Allenby, B. R.; Richards, D. J. (Hrsg.): <i>The Greening of Industrial Ecosystems</i> ; 1994. Washington, D.C.: National Academy Press, S. 23–37
[BDE-2016]	BDE (14.03.2016): EU-Kreislaufwirtschaftspaket: BDE veröffentlicht Stellungnahme. Zuletzt geprüft am: 13.09.2016. https://bde.de/assets/newsletterpdfs/pressemitteilung/2016/PM-16-03-14-Krw-Paket.pdf
[Bertram-2017]	Bertram, H.-U. (2017): Fehlentwicklung verhindern – Eine nachhaltige Abfallwirtschaft braucht das Nierenprinzip und Senken für schadstoffhaltige Abfälle, (30. Jahrgang, Vol. 1/2017), S. 4–9
[BMLFUW-2017]	BMLFUW (2017): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich - Bundesabfallwirtschaftsplan 2017

- [BMUB-2006] BMUB (2006): Siedlungsabfallentsorgung in Deutschland
- [BMUB-2016a] BMUB (2016): Abfallwirtschaft in Deutschland 2016 – Fakten, Daten, Grafiken
- [BMUB-2016b] BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen
- [Boulding-1966] Boulding, K. E. (1966): The Economics of the Coming Spaceship Earth. Zuletzt geprüft am: 02.12.2016.
<http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsprometheus/BOULDING.pdf>
- [Braungart-1999] Braungart, M.; McDonough, W. (1999): Die nächste industrielle rEvolution. In: *Politische Ökologie*, 17(62), S. 18–22
- [Braungart-2007] Braungart, M.; McDonough, W.; Bollinger, A. (2007): Cradle-to-cradle design: Creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. In: *Journal of Cleaner Production*, 15(13-14), S. 1337–1348
- [BUND-2015] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2015): Studie »Fluor: Praktisch, langlebig und giftig«
- [Consultic-2016] Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015: Kurzfassung. Alzenau. Zuletzt geprüft am: 22.11.2016. http://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Consultic_2015__23.09.2016__Kurzfassung.pdf
- [Deerberg-2016] Deerberg, G.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S.; Mrotzek-Blöß, A.; Müller, T. (2016): Industrie 4.0 - Bedeutung für die Abfallwirtschaft. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): *Energie aus Abfall*; 2016
- [Deike-2016] Deike, R. (2016): Bedeutung energieintensiver metallurgischer Betriebe unter dem Aspekt des Recyclings von Eisen, Stahl und NE-Metallen. In: *Recycling und Rohstoffe, Band 9, Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.)*, S. 419–435
- [Destatis-2016] Destatis (2016): Abfallentsorgung - Fachserie 19 Reihe 1 - 2014: Stand 07.12.2016
- [DESTATIS-2016] Statistisches Bundesamt DESTATIS (2016): Statistisches Jahrbuch 2016 – Teil 18 Umwelt. Wiesbaden
- [Destatis-2017] Statistisches Bundesamt (2017): Abfallentsorgung - Fachserie 19 Reihe 1 - 2015
- [EC-2015a] Europäische Kommission (2.12.2015): Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft: Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel. Zuletzt geprüft am: 10.08.2016
- [EC-2017] Europäische Kommission (2017): Der Beitrag der energetischen Verwertung von Abfällen zur Kreislaufwirtschaft

- [EMF-2012] Ellen MacArthur Foundation (2012): Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Zuletzt geprüft am: 29.09.2016. <http://www.c2c-centre.com/sites/default/files/Towardsa%20Circular%20Economy.pdf>
- [EMF-2016] Ellen MacArthur Foundation (2016): Circular Economy. Zuletzt geprüft am: 03.06.2016. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy>
- [EMF-2016] Ellen MacArthur Foundation (2016): The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics
- [Enquete-1998] Deutscher Bundestag (1998): Abschlussbericht der Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung«: Konzept Nachhaltigkeit. Vom Leitbild zur Umsetzung
- [EU-2008/98-2008] EU-2008/98 (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [EU-2010/75-2010] EU-2010/75 (2010): Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)
- [Eyerer-1996] Eyerer, P. (Hrsg.) (1996): Ganzheitliche Bilanzierung: Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Friege-1998] Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K. O. (Hrsg.) (1998): Das Management von Stoffströmen: Geteilte Verantwortung - Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Gleich-2008] Gleich, A. v.; Gößling-Reisemann, S. (2008): Industrial Ecology: Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen ; [dieses Buch basiert auf einer Ringvorlesung an der Universität Bremen]. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- [Gleitsmann-1982] Gleitsmann, R. J. (1982): Die Haubergswirtschaft des Siegerlandes als Beispiel für ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft. In: *Scripta Mercatoriae*, (16), S. 21–54
- [Haas-2015] Haas, W.; Krausmann, F.; Wiedenhofer, D.; Heinz, M. (2015): How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), S. 765–777
- [Hiebel-2016] Hiebel, M.; Bertling, J.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Somborn-Schulz, A.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S. (2017): Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie: Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW. Oberhausen
- [Hoffmeister-2016] Hoffmeister, J. (2016): Abfallverbrennung im Wandel: Im Rahmen der Veranstaltung »Wissensforum« der Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG. Iserlohn. Zuletzt geprüft am: 22.05.2017. <https://www.lobbe.de/wp->

- content/uploads/2016/11/Abfallverbrennung-im-Wandel_Dr.-J.-Hoffmeister.pdf
- [Huneke-2017] Huneke, F.; Linkenheil, C.; Lenck, T.; Heddrich, M.-L.; Treder, M. (2017): Beitrag thermischer Abfallbehandlungsanlagen zur Energiewende
- [Interseroh-2017] Interseroh (2017): Zero Waste Solutions - Nachhaltigkeitsmagazin 2016,(.))
- [Kreibich-1994] Kreibich, R. (1994): Ökologische Produktgestaltung und Kreislaufwirtschaft. In: *Umweltwirtschafts-Forum*, UWF 4, Heidelberg
- [KrWG-2012] Deutscher Bundestag (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG): KrWG. Zuletzt geprüft am: 29.07.2016. <http://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>
- [LAU-Sachsen-2012] Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (2012): Abfallsteckbrief ASN 191209 und 191212 - Mineralien und sonstige Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, Stand 24.10.2012. Zuletzt geprüft am: 12.06.2017. http://abfallbewertung.org/repgen.php?char_id=1912_Sort&report=ipa&kapitel=1&lang_id=de&avv=&synon=>active=no%20-%20TAB_11
- [MKULNV-2016a] Ministerium für Klimaschutz; Umwelt; Landwirtschaft; Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2016a): Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2015
- [MWEIMH-2016] Scheelhaase, T.; Zinke, G. (2016): Bericht: Potenzialanalyse einer zirkulären Wertschöpfung im Land Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf
- [NABU-2017] NABU (2017): Auslaufmodell Müllverbrennung. Zuletzt geprüft am: 20.07.2017. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/verbrennung/21106.html>
- [Pearce-1990] Pearce, D. W.; Turner, R. K. (1990): Economics of natural resources and the environment. Baltimore: Johns Hopkins University Press
- [Pflaum-1998] Pflaum, H. (1998): Entwicklung der Modellstruktur für ein betriebliches Umweltinformationssystem (BUIS) im Hinblick auf die Anwendung in der stoffverarbeitenden Industrie. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. (UMSICHT-Schriftenreihe/Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, UMSICHT, Bd. 9)
- [Poehlmann-1957] Poehlmann, H. (1957): Die Rationalisierung der industriellen Wasserwirtschaft, dargestellt am Beispiel der Eisenhütten. In: *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 19(1), S. 88–93
- [Schmidt-1995] Schmidt, M.; Schorb, A. (1995): Stoffstromanalysen: In Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- [Tanikawa-2015] Tanikawa, H.; Fishman, T.; Okuoka, K.; Sugimoto, K. (2015): The Weight of Society Over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945-2010. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), S. 778–791

- [UBA-2011] Umweltbundesamt (2011): Karzinogene, mutagene, reproduktionstoxische (CMR) und andere problematische Stoffe in Produkten: Identifikation relevanter Stoffe und Erzeugnisse, Überprüfung durch Messungen, Regelungsbedarf im Chemikalienrecht. Zuletzt geprüft am: 23.01.2017. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4092.pdf>
- [UBA-2016a] Umweltbundesamt (2016): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe. TEXTE 65/2016
- [UBA-2016b] Umweltbundesamt (2016): Gewerbliche Siedlungsabfälle. Zuletzt geprüft am: 14.06.2017. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallarten/gewerbliche-siedlungsabfaelle>
- [UBA-2016c] Umweltbundesamt (2016): Schwerpunkte 2016 - Jahrespublikation des Umweltbundesamtes
- [UBA-2016d] Umweltbundesamt (2016): Umweltbundesamt - Thermische Abfallbehandlung. Zuletzt geprüft am: 12.06.2017. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#textpart-1>
- [UBA-2017] Umweltbundesamt (2017): Verwertung und Entsorgung ausgewählter Abfallarten - Kunststoffabfälle (Stand 09/2016). Zuletzt geprüft am: 14.06.2017. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#textpart-1>
- [UNEP-2016] United Nations Environmental Programme (2016): Global Material Flows and Resource Productivity: An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel. Paris
- [United Nations-2017] United Nations (2017): Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) - The 16 New POPs: An introduction to the chemicals added to the Stockholm Convention as Persistent Organic Pollutants by the Conference of the Parties
- [VDI-2016] VDI (2016): VDI-Richtlinie: 3925 Blatt 1 Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren
- [WEF-2017] WEF (2017): Platform for Acceleration the Circular Economy. Zuletzt geprüft am: 26.07.2017. <https://www.weforum.org/projects/circular-economy>
- [Zahn-1996] Zahn, E.; Dogan, D. (1996): Umweltschutz im Wertschöpfungssystem. In: Eyerer, P. (Hrsg.): *Ganzheitliche Bilanzierung*. Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen; 1996. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 48–64