

# DIE ROLLE DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNG IN DER NATIONALEN KREISLAUFWIRTSCHAFTSSTRATEGIE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCH- LAND

IM AUFTRAG DER ITAD, DER INTERESSENGEMEINSCHAFT DER THERMISCHEN ABFALLBEHAND-  
LUNGSANLAGEN DEUTSCHLANDS E.V.



*Interessengemeinschaft der  
Thermischen Abfallbehandlungsanlagen  
in Deutschland e.V.*

VORGELEGT VON



**NACHHALTIGKEITSBERATUNG**  
DR. FRIEGER & PARTNER

Mai 2024

## Inhalt

<b><u>DIE ROLLE DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNG IN DER NATIONALEN KREISLAUFWIRTSCHAFTSSTRATEGIE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>TEIL 1: THERMISCHE ABFALLBEHANDLUNG IN DER NATIONALEN KREISLAUFWIRTSCHAFTSSTRATEGIE - EINFÜHRUNG .....</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>TEIL 2: WESENTLICHE AUFGABEN DER TABS – HEUTE UND MORGEN.....</u></b>	<b><u>10</u></b>
<b>SCHUTZFUNKTION VON TAB .....</b>	<b>10</b>
SCHUTZ VOR SEUCHEN .....	10
DOWNCYCLING .....	10
ZIRKULARITÄT VERSUS SCHADSTOFFVERSCHLEPPUNG .....	11
ENTSORGUNG VON SCHADSTOFFEN IN TAB .....	12
<b>TAB ALS QUELLE FÜR SEKUNDÄRRÖHSTOFFE .....</b>	<b>14</b>
SCHLACKEN .....	14
AUSBLICK: POTENTIALE DER SCHLACKENAUFBEREITUNG .....	16
BEHANDLUNG VON FILTERSTÄUBEN .....	18
<b>TAB ALS ENERGIELIEFERANT - BEITRÄGE ZUM KLIMASCHUTZ .....</b>	<b>20</b>
PRODUKTION VON STROM UND WÄRME.....	20
ZUNEHMENDE BEDEUTUNG DER TAB FÜR DIE STABILISIERUNG DER STROMNETZE.....	21
ENTWICKLUNG DES FERNWÄRME- UND FERNKÄLTE-MARKTS .....	22
ENTWICKLUNG DER TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN DURCH TAB .....	22
<b><u>TEIL 3: POSITIONIERUNG DER TAB IN ZUKUNFT .....</u></b>	<b><u>25</u></b>
<b>ENTWICKLUNG DES RESTABFALLAUFKOMMENS IN DEUTSCHLAND.....</b>	<b>25</b>
ERWEITERUNG DER GETRENNTEN SAMMLUNG .....	26
SAMMLUNG UND VERWERTUNG VON BIOABFÄLLEN .....	27
VORSORTIERUNG GEMISCHTER SIEDLUNGSABFÄLLE .....	28
„CIRCULAR ECONOMY“ .....	29
ÄNDERUNGEN VON RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DEN INTERNATIONALEN HANDEL .....	30
PROGNOSEN.....	30
<b>KLIMAOPTIMALE UND UMWELTVERTRÄGLICHE ABFALLBEHANDLUNG IN EUROPA.....</b>	<b>31</b>
<b><u>FAZIT: ZUKUNFT DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNG .....</u></b>	<b><u>34</u></b>
<b><u>QUELLENANGABEN .....</u></b>	<b><u>36</u></b>

### Autoren:

Hon.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Henning Friege, Voerde  
Dr. rer. pol. Angela Sabac-el-Cher, Odenthal

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Strategien der "Circular Economy" mit Bezug auf den Nutzungszyklus von Produkten.....	5
Abbildung 2: Verhältnis ökologischer Aufwand (Energie- und/oder Materialverbrauch) zu Recyclingquote (schematisch, nach [Bunge 2016]) .....	7
Abbildung 3: Durchschnittliche Massen- und Energiebilanz der deutschen TAB-Anlagen bezogen auf eine Menge von 1.000 kg Abfall .....	8
Abbildung 4: Jahresmittelwerte der Emissionen der RMVA Köln [AVG 2023] im Vergleich zu den Grenzwerten der 17. BImSchV.....	13
Abbildung 5: Beispiel für die Elimination von Schadstoffen aus dem Rauchgas und deren Verbleib (Beispiel: Quecksilber, MVA Schweinfurt) .....	14
Abbildung 6: Massenfraktion der wiedergewonnenen Metallfraktionen und ihr Beitrag zum Klimaschutz [Mehr et al. 2021] .....	16
Abbildung 7: Möglichkeiten des Einsatzes der Bestandteile aus TAB-Schlacken.....	18
Abbildung 8: Prognose der Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Behandlung von Abfällen, fossiles / regeneratives CO <sub>2</sub> in Mio. t.....	24
Abbildung 9: Entwicklung der Siedlungsabfallmenge in NRW 1995 - 2020 [LANUV 2022, eigene Grafik.].....	26
Abbildung 10: Behandlung von Siedlungsabfällen in den EU-Mitgliedsländern im Jahr 2020.....	32
Abbildung 11: Verfehlen der Zwischenziele der EU-Abfallwirtschaft 2025.....	33

## Teil 1: Thermische Abfallbehandlung in der nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie - Einführung

Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) – ein Vorhaben aus dem Koalitionsvertrag [Koalitionsvertrag 2021] für die laufende Legislaturperiode - hat die Senkung des primären Rohstoffverbrauchs zum Ziel und verweist auf die Vision „geschlossener Stoffkreisläufe“. Im Einklang mit den Plänen der EU-Kommission sollen „Produkte (...) langlebig, wiederverwendbar, recycelbar und möglichst reparierbar sein.“ Die Kommission kündigte im „Circular Economy Action Plan“ an [EU 2020], dass sie „Nachhaltigkeitsgrundsätze“ mit den folgenden Zielen einführen will:

- „Verbesserung der Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Nachrüstbarkeit und Reparierbarkeit von Produkten,
- Umgang mit dem Vorhandensein gefährlicher Chemikalien in Produkten sowie Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von Produkten;
- Erhöhung des Rezyklatanteils in Produkten bei gleichzeitiger Gewährleistung von deren Leistung und Sicherheit;
- Ermöglichung der Wiederaufarbeitung und eines hochwertigen Recyclings; Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und des ökologischen Fußabdrucks...“

Die bislang einzige Legaldefinition der „Circular Economy“ findet sich in der Taxonomie-Verordnung der EU: ... „ein Wirtschaftssystem, bei dem der Wert von Produkten, Materialien und anderen Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich erhalten bleibt und ihre effiziente Nutzung in Produktion und Verbrauch verbessert wird, wodurch die Auswirkungen ihrer Nutzung auf die Umwelt reduziert und das Abfallaufkommen sowie die Freisetzung gefährlicher Stoffe in allen Phasen ihres Lebenszyklus minimiert werden, auch durch Anwendung der Abfallhierarchie.“ [EU 2020b]. Diese Definition stellt die Werterhaltung von Ressourcen, also ihre längere Nutzung, Verwertung nach Gebrauchsende für weitere Produkte und generell die Nutzungseffizienz in den Mittelpunkt. Gleichzeitig ergibt sich aus der Definition eine Verbindung zum europäischen Abfallrecht: Nach der sogenannten Abfallhierarchie steht die „Prävention“ (Abfallvermeidung) vor der Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfallbestandteilen vor dem Recycling (stoffliche Verwertung), vor sonstigen Verwertungsschritten, u.a. der energetischen Verwertung und letzten Endes einer Beseitigung, also etwa der Deponierung. Allerdings fehlt die energetische Verwertung von Abfällen in der europäischen Aufzählung der „nachhaltigen“ Strategien, ist aber im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) verankert.

Die NKWS soll nach Aussagen von Vertretern der beteiligten Ministerien eng mit der Rohstoffstrategie verzahnt werden [EUWID 2023]. Die thermische Abfallbehandlung spielt in der NKWS keine eigenständige Rolle, sondern wird allenfalls bei der Betrachtung der Stoffströme lt. BMUV „mitgedacht“. Daher wird die Bedeutung der Thermischen Abfall Behandlungsanlagen (TAB = Müllverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke) als Teil der Circular Economy wie auch der NKWS in dieser Studie näher beschrieben.

Der in Europa verwendete Begriff „Circular Economy“ geht weitgehend auf das vom World Business Council entwickelte wirtschaftliche und industrielle Modell zurück, mit dem Wachstum und Ressourcenverbrauch entkoppelt werden sollen. Es setzt auf eine regenerative Nutzung von Ressourcen

u.a. im Sinne „technischer Kreisläufe“. Entsprechende Strategien setzen an unterschiedlichen Stellen im Lebensweg von Produkten an, um die Nutzung der im Produkt enthaltenen Ressourcen auf möglichst hohem Niveau zu verlängern (siehe z.B. [EU 2020a], [EMF o.D.]). Dies lässt sich schematisch in Anlehnung an eine vom niederländischen Planbureau voor de Leefomgeving entwickelte Kategorisierung [Potting et al. 2017, Friege 2022] darstellen (Abb. 1)<sup>1</sup>. Die Strategien R0 bis R2 zielen auf eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch entsprechende Gestaltung des Produkts bzw. seiner Gebrauchsweise. Sie sorgen also für die Verringerung oder Vermeidung von Abfällen. Die Strategien R3 bis R9 setzen ein, sobald das Produkt nicht mehr gebraucht wird, beschädigt ist oder als Abfall entsorgt werden soll. Die Wiederverwendung ohne weitere Änderungen am fraglichen (Alt-)Produkt hat im Sinne der Abfallhierarchie wie auch des KrWG Priorität; die Entstehung von Abfällen kann damit noch über den Zeitraum der Zweitnutzung aufgeschoben werden. Alle Schritte nach Vermarktung eines Produkts können als Stufen einer Kaskade aufgefasst werden, bei der die Gebrauchsdauer durch Reparatur oder nachträgliche Umbaumaßnahmen verlängert oder in einer vorletzten Stufe Materialien zurückgewonnen werden sollen. Die Werthaltigkeit des Produkts nimmt im Regelfall mit jeder Stufe ab.

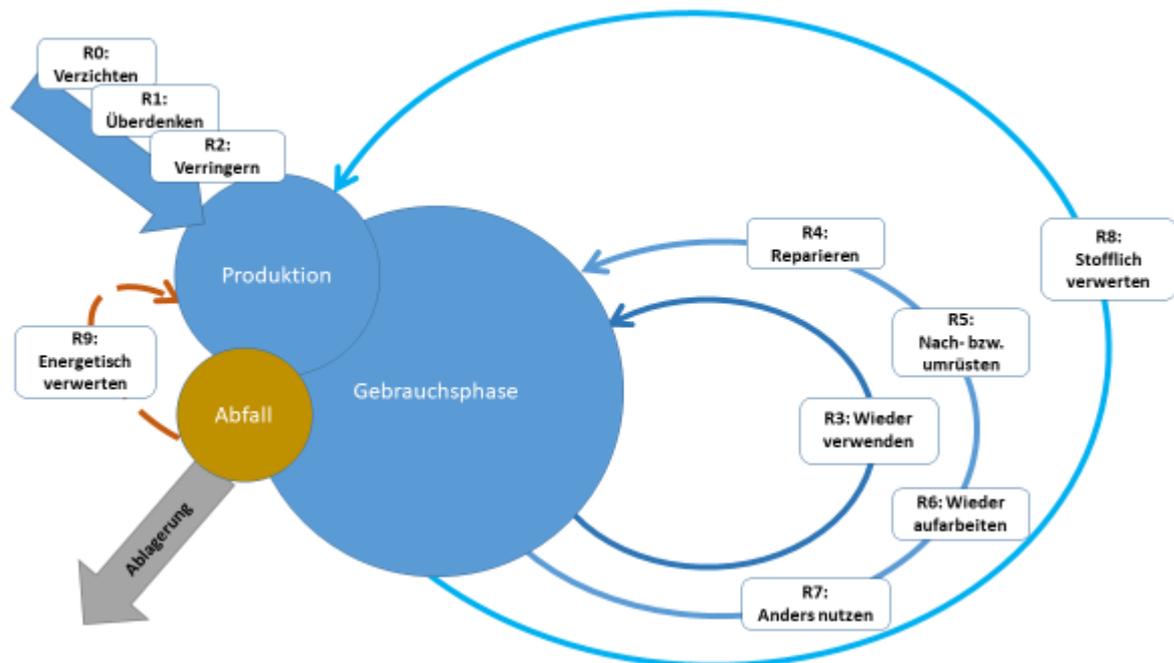


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Strategien der "Circular Economy" mit Bezug auf den Nutzungszyklus von Produkten

Im Rahmen der Strategien R4 bis R8 entstehen Abfälle. Dies sind bei der stofflichen Verwertung (R8) Sortierreste wie verschmutzte Altprodukte, nicht identifizierbare Materialien, der jeweiligen Fraktion falsch zugeordnete Abfallbestandteile, nicht zerlegbare Verbundmaterialien, nicht abtrennbare Schadstoffe:

- Bei Reparaturen (R4 – Beispiel Elektrogeräte) fallen defekte Teile an.
- Im Fall der Nach- oder Umrüstung bereits gebrauchter Produkte (R5 – Beispiel Gebäude- renovierung) und Wiederaufarbeitung gebrauchter Produkte oder Produktbestandteile (R6 – Beispiel Ersatzteile aus Altfahrzeugen) sind Produktionsreste und ggf. Teile des ursprünglichen Produkts zu entsorgen.

<sup>1</sup> Siehe auch [Hirsch / Schempp 2019]

- Bei der Umnutzung (R7 – Beispiel getragene Uniformen zu Taschen) können ggf. Teile des ursprünglichen Produkts nicht mehr genutzt werden.

Die Abnutzung von Materialien und ihre abnehmende Reinheit infolge Vermischung mit anderen Stoffen bestimmen die Möglichkeiten der Nutzung in Sekundärprodukten und verringern ggf. auch deren Gebrauchsdauer und Recycling-Möglichkeiten (Beispiel Kunststoff-Recycling).

Anlagen zur TAB (R 8 und R9) werden innerhalb dieser Kaskade immer dann benötigt, wenn andere Möglichkeiten der „Circular Economy“ ausgereizt sind bzw. an physikalische, chemische oder ökonomische Grenzen stoßen. **Die thermische Abfallbehandlung mit möglichst optimaler Rückgewinnung der in den Abfällen enthaltenen Energie sowie von Metallen und mineralischen Bestandteilen bei minimalen Emissionen ist daher integraler Bestandteil der „Circular Economy“.** Dies wird in der wissenschaftlichen Literatur (z.B. [Brunner / Rechberger 2015]) wie auch von wissenschaftlichen Vereinigungen betont: Die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW) stuft die Abfallverbrennung als „unabdingbar für Kreislaufwirtschaft, Klimaschutz und Verhütung von Umweltverschmutzung“ ein [DGAW 2022]. Die International Solid Waste Association (ISWA) bezeichnet TAB bzw. WtE (Waste-to-Energy) als letzte Stufe einer Kaskade, wenn die Rückgewinnung brauchbarer Sekundärrohstoffe (d.h. vor der Verbrennung) nicht mehr möglich ist. [ISWA 2015] Die kommunalen Spitzenverbände, der Verband kommunaler Unternehmen (VKU) sowie zahlreiche deutsche und europäische Fachverbände sehen WtE als „essentiell“ zur „Erfüllung der Dienstleistungen der Daseinsvorsorge sowie für eine nachhaltige und sichere Kreislaufwirtschaft“ an [VKU u.a. 2021]. Sofern im Rahmen des CCU-Konzepts (Carbon Capture and Use) CO<sub>2</sub> aus Rauchgas bei TAB gewonnen würde (siehe Abb. 1), kann das abgeschiedene CO<sub>2</sub> zur Synthese von Chemie-Rohstoffen oder alternativen Treibstoffen eingesetzt werden. Die Deponierung ist – obwohl für inerte, nicht verwertbare Restabfälle unverzichtbar – kein strategischer Schritt, weil von dort keine Rückführung von Materialien erfolgt.

Laut der Abfallhierarchie ist die Behandlung durch TAB (R9) gegenüber der stofflichen Verwertung (R8) und anderen mehr „werterhaltenden“ Strategien nachrangig (Art. 4 Abs. 1 Abfallrahmenrichtlinie [EU 2018]). Diese Prioritätenfolge gilt aber nicht absolut, denn laut Art. 4 Abs. 2 sind diejenigen Optionen zu wählen, die „das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen“. Als Maßstab wird „Lebenszyklusdenken hinsichtlich der gesamten Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung dieser Abfälle“ empfohlen. Ähnlich wird dies im § 6 des KrWG als Leitfaden für die Anwendung der Abfallhierarchie formuliert [BMUV 2017].

In welchen Fällen TAB (R9) die – aus ökologischer Sicht – im Vergleich mit stofflicher Verwertung (R8) und den Strategien R4 bis R7 günstigste Behandlungsstrategie für Abfälle darstellen, ergibt sich nach Prüfung zahlreicher Randbedingungen, vor allem aus dem Zusammenspiel der Dimensionen Ressourcen, Umweltschutz, Energie und Klima. Da alle Strategien von R4 bis R8 nicht ohne Einsatz von Energie und zusätzlichen Materialien sowie weiterer Erzeugung von Abfällen und Emissionen zum Ziel kommen, kann etwa bei Recycling-Prozessen (R8) ein Vergleich mit der Alternative TAB (R9) anhand der jeweiligen Energiebilanz und den bei beiden Prozessen emittierten Treibhaus Gasen (THG) vorgenommen werden (siehe Kasten, nach [Bunge 2016]).

### 100% Recycling funktioniert nicht

In Abb. 2 findet sich eine schematische Darstellung des ökologischen Nutzens und Aufwands beim Recycling – ein 100%iges Recycling aus Abfällen ist aus physikalischer Sicht unmöglich, weil der dafür benötigte Energieaufwand bei 100% unendlich groß wird: Der ökologische Aufwand (Energie- und/oder Materialverbrauch) nimmt mit steigender Recyclingquote überproportional zu und übersteigt den ökologischen Nutzen (schematisch, nach [Bunge 2016])

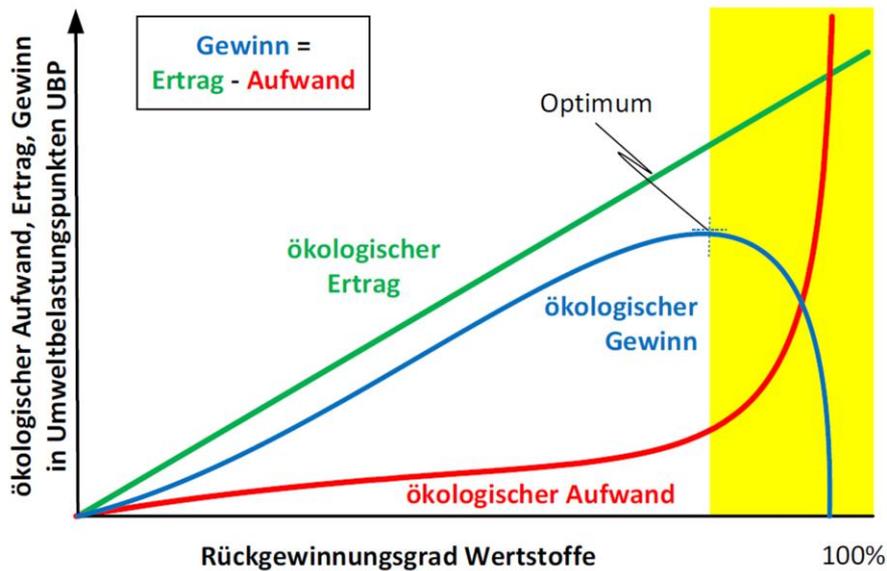


Abbildung 2: Verhältnis ökologischer Aufwand (Energie- und/oder Materialverbrauch) zu Recyclingquote (schematisch, nach [Bunge 2016])

Ein Recycling-Prozess, dessen Energieverbrauch und dessen THG-Emissionen zur Herstellung eines Sekundär-Materials höher sind als die eines Primär-Materials, würde also gegen den „Do not significant harm“-Grundsatz der Taxonomie-Verordnung verstoßen. Diese Abwägung ist auch im Fall anderer R-Strategien sinnvoll. Alle genannten Strategien sind nicht Ziel, sondern Instrumente zur Werterhaltung von Ressourcen.

Bei der Entscheidung für eine der R-Strategien ist der Verbleib von Schadstoffen und deren mögliche Wirkung bei der weiteren Nutzung von erheblicher Bedeutung. („...wodurch die Auswirkungen ihrer Nutzung auf die Umwelt reduziert und das Abfallaufkommen sowie die Freisetzung gefährlicher Stoffe in allen Phasen ihres Lebenszyklus minimiert werden ...“).

Es gilt, eine Abwägung zwischen der durch Recycling erzielbaren Schonung natürlicher Ressourcen und einer möglichen Verschleppung von Schadstoffen zu treffen. Nicht ohne weiteres abtrennbare schädliche Stoffe führen dazu, dass die Strategien R3 bis R8 aus ökologischen Überlegungen heraus nicht mehr angewendet werden können oder sollen. Die thermische Abfallbehandlung (R9) wird dann als sichere Schadstoffsенke benötigt. Die Funktion einer Schadstoffsенke für organische Materialien und einige toxische Metalle wird durch Verbrennung der Abfälle, Reinigung der Rauchgase und Verwertung oder Beseitigung der festen Rückstände nach dem Stand der Technik sichergestellt. Die Anforderungen an die Emissionen der TAB sind im europäischen Regelwerk definiert und in Deutschland in der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (17. BImSchV) und anderen immissionsschutz- und wasserrechtlichen Regelungen umgesetzt und werden sicher eingehalten. (Siehe Abschnitt „TAB zum Schutz vor Schadstoffen“).

Neben Schadstoffen stellen Verunreinigungen von Wertstoff-Fractionen, z.B. im Fall von Leichtverpackungen oder Bioabfall, ein großes Problem für die Abfallwirtschaft dar. Dadurch wird die Sortierung erschwert, verteuert, führt zu einer großen Menge an Sortierresten oder verhindert sogar eine stoffliche Verwertung gänzlich. Die unzureichenden Trennerfolge bei den Wertstoffen führen auch dazu, dass zahlreiche noch verwertbare Materialien im Restabfall verbleiben [Dornbusch et al., 020]. Da eine auch nur annähernd 100%-ige stoffliche Verwertung unmöglich ist, zielt die aktuelle Diskussion u.a. auf die Verringerung des Ressourceneinsatzes [BUND 2023]

Abb. 3 zeigt die durchschnittliche Massenbilanz deutscher TAB-Anlagen [Treder 2024]<sup>2</sup>: Die organischen Materialien werden mineralisiert, also in Kohlendioxid, Wasserdampf und weitere gasförmige Produkte, u.a. Chlorwasserstoff, Stickoxide umgewandelt. Die bei diesen Reaktionen frei gesetzte Energie wird so weit möglich genutzt. Metalle, Glas und mineralische Stoffe werden in der Schlacke und den Rückständen der Rauchgasreinigung abgeschieden. Mit der Rückgewinnung von Metallen aus den Rückständen wird ein Beitrag zur Versorgung mit Sekundärrohstoffen geleistet. Der Einsatz der mineralischen Reststoffe (Rostasche/Schlacke) aus der Abfallverbrennung ist durch die Ersatzbaustoff-Verordnung (EBV) [Bundesregierung 2021] geregelt. Das in der TAB entstehende CO<sub>2</sub> stammt zum Teil aus fossilen und mineralischen, wie auch zum Teil aus regenerativen (biogenen) Quellen. CO<sub>2</sub> kann aus dem Reingas abgeschieden und in einer zukünftigen Chemieproduktion, die weitestgehend auf „erneuerbarem Kohlenstoff“ („renewable carbon“) aufbaut, verwertet werden. (Siehe Abschnitt „TAB als Quelle für Sekundärrohstoffe“)

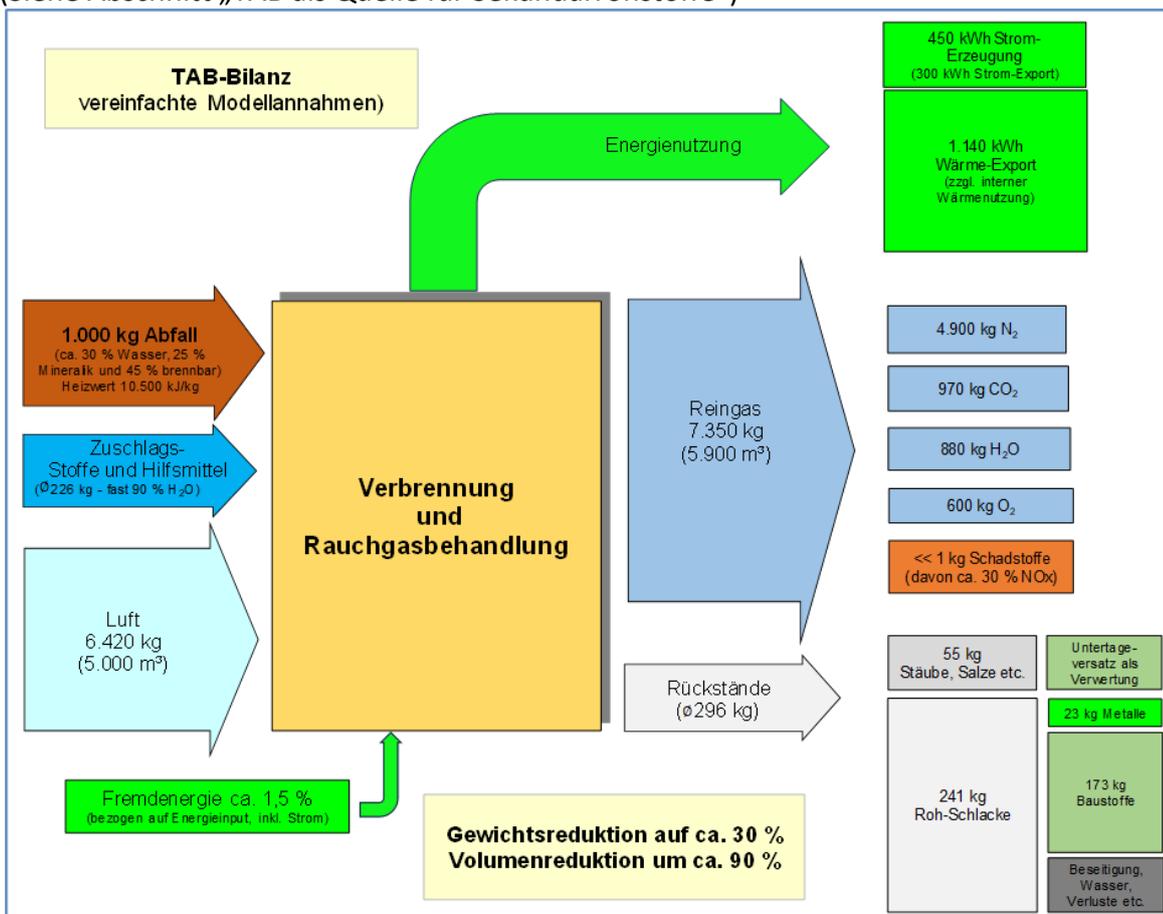


Abbildung 3: Durchschnittliche Massen- und Energiebilanz der deutschen TAB-Anlagen bezogen auf eine Menge von 1.000 kg Abfall

<sup>2</sup> Die Massen- und Energiedaten wurden aus den Angaben von 90 Anlagen (entsprechend etwa 90% der ITAD-Mitglieder und ca. 95% der Kapazität) für 2022 ermittelt. Es handelt sich um ungewichtete Mittelwerte. Zur Plausibilisierung wurde lt. ITAD ein Abgleich mit Daten der ENVERUM Ingenieurgesellschaft durchgeführt.

**Eine stärker zirkulär ausgerichtete Wirtschaft muss wie bisher auch hygienisch problematische Abfälle beherrschen**, etwa aus den Bereichen Gesundheitswesen, Kinder- und Altenpflege, Straßenreinigung. Schwere hygienische Mängel in den Großstädten des 19. Jahrhunderts waren Anlass für die Entwicklung erster Abfallverbrennungsanlagen. Für die zuverlässige Entsorgung hygienisch bedenklicher Abfälle gilt die TAB nach wie vor als beste Lösung.

Die Aufgaben der TAB im Rahmen der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) umfassen mithin:

- **Die Hygienisierung und Mineralisierung von Abfällen**
- **Die Zerstörung bzw. Ausschleusung von Schadstoffen**
- **Die Nutzung der Metalle und mineralischen Reststoffe**
- **Die Nutzung der in Abfällen enthaltenen Energie**
- **Sowie zukünftig einen Beitrag zum Kohlenstoff-Kreislauf.**

Diese Aufgaben werden in dieser Studie in den folgenden Abschnitten näher beschrieben und analysiert. Wie oben angeführt, umfassen die TAB sowohl Müllverbrennungsanlagen (MVA) als auch Ersatzbrennstoff-Kraftwerke (EBS-Kraftwerke). Anlagen zur Monoverbrennung von Sonderabfällen, Altholz und Klärschlamm sowie die Mitverbrennung in Kohlekraft- und Zementwerken werden nicht gesondert betrachtet, wiewohl der thermische Prozess und die immissionsschutzrechtlichen Regelungen vergleichbar mit TAB sind. Das chemische Recycling mit Pyrolyse, Solvolyse oder Vergasung spezieller Reststoffe wird im Rahmen des Abschnitts „Entwicklung des Restabfallaufkommens“ ansatzweise beleuchtet.

## Teil 2: Wesentliche Aufgaben der TABs – heute und morgen

### Schutzfunktion von TAB

Mitte des 19. Jahrhunderts bildeten sich infolge der Industrialisierung innerhalb kurzer Zeit engst besiedelte Ballungsräume aus, in denen heute unvorstellbare Lebensbedingungen herrschten. Da der dort anfallende Abfall unsortiert und unkontrolliert in die umliegende Peripherie transportiert und abgelagert wurde, entstanden regelmäßig unkontrollierte Brände, es kam zu Ungezieferbefall, und die „Kippen“ sorgten für erhebliche Emissionen, vor allem Staub [Breer / Mlodoch 2021]. Diese hygienischen Probleme waren Anlass für die Einführung einer regelmäßigen Abfallsammlung und erster Anlagen zur Müllverbrennung.

### Schutz vor Seuchen

Erste Anlagen zur Abfallverbrennung entstanden ab 1870 in England. In Deutschland führte ein Cholera-Ausbruch in Hamburg im Jahr 1892 zu der Einsicht, dass die bisher praktizierte Praxis der unkontrollierten Abfallverbringung und –„entsorgung“ geändert werden müsse – die erste Müllverbrennungsanlage wurde 1896 am Bullerdeich in Hamburg in Betrieb genommen. Die unkontrollierte und ungesicherte Deponierung ist in den meisten Ländern immer noch Realität [Kaza et al. 2018]. Selbst in der EU werden noch rund 100 Mio. t Abfall deponiert (siehe Abschnitt „Fazit“) – in der Regel aber auf geordneten Deponien. Damit verbunden ist der Eintrag von Abfall und Schadstoffen in die Umweltmedien und Ökosysteme.

**Thermische Behandlung ist die geeignete Form für die sichere Zerstörung von pathogenen Keimen und Viren.** Dies zeigte sich in besonderem Maße in der SARS-Cov-2-Pandemie: Medizinische Materialien vom Teströhrchen, Schutzkleidung bis hin zur Maske wurden in TAB sicher entsorgt; ein Entsorgungsnotstand konnte knapp vermieden werden. Die Entsorgung von potentiell belasteten Abfällen aus dem Gesundheitsdienst erfolgt gemäß allen in Frage kommenden Abfallschlüssel-Nummern ausschließlich thermisch: diese Abfälle dürfen weder sortiert noch stofflich verwertet werden [LAGA 2021]. Angesichts der zunehmenden Gefahr der Übertragung von Krankheiten von Tieren auf die Spezies Mensch (Zoonosen) infolge des globalen Bevölkerungswachstum [UNEP 2021] und des Welthandels stellen TAB eine gesicherte Form der Entsorgung infektiöser und kontaminierter Abfälle dar.

Aber auch Medikamentenrückstände, Reste von Pestiziden oder bestimmte Pflanzenreste oder Schädlinge müssen weiterhin thermisch entsorgt werden. Zu letzteren gehören die Raupen des Eichenprozessionsspinners mit ihren allergenen und toxischen sogenannten Brennhaaren. Die Nester werden daher durch Spezialfirmen abgesaugt. Sowohl die hierbei vorgeschriebene Arbeitskleidung als auch das Filtergut sind TAB zuzuführen [Niedersächs. Landesregierung u.a. 2019].

### Downcycling

**Das (stoffliche) Recycling von Abfällen ist und wird entgegen allen Bestrebungen und Bekenntnissen kein geschlossener Kreislauf: Zero Waste ist unmöglich** (siehe z.B. [de Man 2022, Bunge 2016]). Zum einen kostet jede stoffliche Verwertung Energie und somit auch weitere Ressourcen, zum anderen bleiben auf der materiellen Ebene Reststoffe und Gemische zurück, die nicht weiter aufgetrennt werden können. Dies gilt z.B. für Verbundstoffe, bei denen unterschiedliche Materialien fest z.B. durch Verkleben oder Löten miteinander verbunden sind. Um hier das Potenzial des stofflichen Recyclings auszubauen, sind Ansätze am Beginn der Wertschöpfungskette, vor allem die Beachtung

des Prinzips „Design for Recycling“ bei der Produktentwicklung, sinnvoll. Ein klassisches Beispiel für Verbundstoffe aus dem Bereich „Verpackungen“ ist der Getränkekarton, der außen aus laminierten und bunt bedruckten Papierlagen besteht, innen aus einer Polyethylen- sowie einer Aluminiumfolie. Eine direkte Wiederverwendung als Getränkekarton scheidet aus lebensmittelhygienischen Gründen aus, der Papieranteil wird aktuell recycelt, die restliche Fraktion wird überwiegend als „Sortierrest“ thermisch verwertet [Gebhard 2023], wobei der Metallanteil sich in der Schlacke wiederfindet (siehe Abschnitt „Rückgewinnung von Metallen“). Der „Sortierrest“ bei Leichtverpackungen insgesamt liegt bei etwa 32-Gewichts-% zuzüglich einer im Wesentlichen nur als Ersatzbrennstoff verwerteten Mischfraktion [Franke et al. 2016].

Heterogene Abfallgemische mit höchst unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung lassen sich stofflich nur mit ganz erheblichen Qualitätsverlusten „recyclen“. Hochwertiges Recycling, das die Eigenschaften des Ausgangsmaterials nicht bereits im ersten Schritt massiv verringert, gelingt nur bei geringer Verschmutzung und unvermischten Qualitäten, die möglichst an der Quelle, z.B. in der Produktion oder über Rücknahmestellen, erfasst werden (z.B. PET-Getränkeflaschen). Ausnahme bilden im gewissen Umfang Metalle – durch hohe Temperaturen bei der Schmelze werden organische Schadstoffe zerstört, jedoch kommt es zu Vermischungen der Metalle, sodass auch hier Qualitätsverluste eingeplant werden müssen.

Darüber hinaus sind fertigungs- und abnutzungsbedingte Materialverluste unvermeidbar. Produkte werden verbraucht bzw. weiträumig verteilt. Weil eine vollständige Kreislaufführung von bis zu 100 % also aus verschiedenen Gründen nicht möglich ist, muss das Ziel sein, den Ressourcenverbrauch so weit wie möglich zu reduzieren.

Aber auch dann, wenn Recycling möglich und sinnvoll sind, muss eine „Senke“ gewährleistet sein: Das Recycling von Abfallfraktionen ist (siehe oben) begrenzt. Für Sortierreste und nicht verwertbare Produkte muss am Ende ihrer Nutzung eine gesicherte Entsorgungsmöglichkeit bereitgestellt werden. Für mittel- bis hochkalorische Rezyklate und Papierschlämmen ist die TAB das Mittel der Wahl, bei nicht weiter verwertbaren mineralischen Abfällen ist es eine dafür geeignete Deponie.

### Zirkularität versus Schadstoffverschleppung

**Auch bei chemisch weitgehend einheitlichem Material (Monofractionen) ist stoffliches Recycling dann nicht möglich, wenn in dem Material selbst Schad- bzw. Störstoffe enthalten sind, die nicht aus dem Produkt abgetrennt werden können.** Zu den störenden Substanzen gehören z.B. bestimmte Zusatzstoffe in Kunststoffen wie Weichmacher, Stabilisatoren, Pigmente, Flammhemmer, die fest in die Polymer-Struktur eingebunden sind und die im „Rezyklat“ die weitere Verarbeitung (z.B. Extrusion) stören bzw. sogar verhindern können. Solche Materialien zählen zu den Sortierresten oder den nur energetisch nutzbaren Mischkunststoffen [Carney et al. 2023].

Maximal 55% aller Kunststoff-Rezyklate aus im Haushalt anfallenden Plastikabfällen sind beim neuesten Stand der Sortier- und Aufbereitungstechnik unter Berücksichtigung der in der EU gültigen Grenzwerte für Schadstoffe verkehrsfähig [Eriksen et al. 2018]. Daher ist der überwiegende Teil, also mindestens 45%, des bei der Sortierung entstehenden „neuen“ Stoffstroms nicht zu separieren und wird daher weitestgehend thermisch behandelt.

Die unkontrollierte Verteilung von Schadstoffen wie den „Persistent Organic Pollutants“ (POPs) muss unterbunden werden, eben auch durch Abfallverbrennungsanlagen. Dies gilt z.B. für HBCDD:

dieser in Polystyrol-Schäumen als Flammschutzmittel eingesetzte und seit 2015 verbotene Stoff kann bisher nicht vom Trägermaterial Polystyrol abgelöst und nur thermisch zerstört werden<sup>3</sup>.

Ähnliches gilt für zahlreiche als sehr bedenklich erkannte Stoffe der PFAS-Familie. Die positiven Gebrauchseigenschaften dieser Chemikalien, die z.B. in Outdoor-Kleidung oder in Kosmetika verwendet werden, führen in der Umwelt durch ihre Persistenz und teilweise auch Toxizität zu erheblichen Problemen und zu bisher ungelösten und signifikanten Entsorgungsfragen [Brunn et al. 2023]. Die Zerstörung bzw. Ausschleusung der Chemikalien ist nur durch thermische Verfahren weitestgehend sicher möglich.

Ein Beispiel für die unerwünschte Verschleppung von Schadstoffen ist die stoffliche Verwertung von Autoreifen als Sportplatzbelag. Im Langzeitversuch zeigte sich, dass enthaltene Schadstoffe ausgewaschen werden und der Abrieb als Feinstaub gesundheitsgefährdend ist [Traas et al. 2020]. Hier ist aus öko- und humantoxikologischen Überlegungen die (thermische) Behandlung sinnvoller.

TAB sind in der Lage, auch ein weiteres hygienisches Problem zu lösen: Nano-Partikel, die in der Zwischenzeit ubiquitär vorhanden sind, sammeln sich im abgeschiedenen Filterstaub der TAB [Förster et al. 2016] und können so wenigstens zu großen Teilen entsorgt werden (siehe zum Filterstaub Abschnitt „TAB als Quelle für Sekundärrohstoffe“).

Es ist oft schwierig, beim stofflichen Recycling eine Dissipation oder sogar Anreicherung von Schadstoffen in Sekundärrohstoffen zu verhindern [De Blaeij 2019, Friege / Kümmerer 2022]. Zum einen liegen unzureichende Informationen über die im Ausgangsmaterial vorhandenen Stoffe (Inhalt und Konzentration) vor. Zum anderen fehlen verbindliche und grenzüberschreitend anerkannte Entscheidungswege bzw. Grenzwerte, wie mit Stoffen in oder aus Abfällen zu verfahren ist. Die europäische REACH<sup>4</sup>-Verordnung für Stoffe bzw. deren Einsatz in Produkten gilt nicht für Abfälle, und deren Systematik ist nicht auf Abfälle übertragbar [Friege et al. 2019]. Die Schnittstelle zwischen Chemikalien und Abfallrecht - „End of Waste“ – ist nur für wenige anorganische Massenabfälle wie Eisen-, Aluminium und Kupferschrotte sowie Bruchglas definiert und außerordentlich kompliziert. Die mit dem Recycling und der Rückführung in den Wirtschaftsprozess befassten Unternehmen befinden sich aktuell häufig „in einer rechtlichen Grauzone“ (exemplarisch für drei Stoffströme siehe [D’Adamo et al. 2019]).

### Entsorgung von Schadstoffen in TAB

TAB unterliegen wie andere Industrieanlagen der European Industrial Emissions Directive (IED) und dem Bundes-Immissions-Schutz-Gesetz (BImSchG). Dieses umfassende Gesetz (1974 in Kraft gesetzt – mehrfach aktualisiert) verfolgt einen medienübergreifenden Schutzansatz. Es sollen nicht nur

---

<sup>3</sup> Die maximal zulässige Konzentration von HBCDD in Produkten liegt bei 1 g/kg; damit sind früher verwendete Dämmstoffe mit ca. 7 g/kg nicht verwertbar. Die Polystyrol- und damit die HBCDD-Mengen im Abfall nehmen –entsprechend dem früheren Verbrauch (Maximum 6.500 t im Jahr 2011) kontinuierlich zu und erreichen voraussichtlich einen Höhepunkt zwischen 2030 und 2060 [RIVM & Ramboll 2019].

Die seit etwa 2018 geplante PS-Loop-Anlage in den Niederlanden für eine Abtrennung von HBCD mit einer geplanten Kapazität von 3.300 t p.a. ist nach Insolvenz der Gründerfirma erst 2023 in Betrieb gegangen und hat einen Durchsatz von 5 t pro Woche erreicht.

<sup>4</sup> Registration, evaluation and authorisation of chemicals (REACH)

Menschen Tiere und Pflanzen, sondern auch Boden, Wasser und Atmosphäre vor nachteiligen Immissionen, vor allem aus Lärm, Erschütterung und Luftverschmutzung schützen, was eventuell auch auf das Schutzgut „Klima“ ausgedehnt werden könnte [Bundesregierung 2023], was weitreichende Folgen bis hin ggfs. zur Implementierung von THG-Emissionsgrenzwerten haben könnte.

Das BImSchG wird kontinuierlich an die europäischen Richtlinien angepasst und das untergesetzliche Regelwerk (mitgeltende Verordnungen) novelliert. Für TAB gilt insbesondere die 17. BImSchV, deren erneute Novellierung im Februar 2024 in Kraft getreten ist. In § 8 der 17. BImSchV sind Grenzwerte im Reingas, der über den Schornstein in die Umwelt emittiert wird, für Schadparameter definiert, die im Anlagenbetrieb kontinuierlich einzuhalten sind. Die kontinuierlichen Messwerte werden im Regelfall online an die Überwachungsbehörde übermittelt. Der Anlagenbetrieb ist somit für die Behörden transparent; einige Anlagenbetreiber stellen diese Werte auch direkt („real-time“) ins Internet. Weitere Grenzwerte für Schwermetalle und einige krebserregende Stoffe, die nur diskontinuierlich gemessen werden können, sind vom Anlagenbetreiber und unabhängigen Institutionen in einem vorgegebenen Turnus zu überwachen.

Als Ergebnis der in den 80er Jahren einsetzenden Nachrüstung der TABs mit aufwändigen Rauchgasreinigungssystemen (über den Elektrofilter hinaus mit Wäscher, trockener Rauchgasreinigung mit Kalk oder Bicarbonat, weiteren Gewebe- oder Aktivkohlefiltern) gehören TAB heute zu den emissionsärmsten Industrieanlagen weltweit. Die nachfolgende Grafik zeigt exemplarisch für eine Anlage, die der RMVA Köln, die verlässliche Einhaltung bzw. meist erhebliche Unterschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV im Jahre 2023 [AVG 2023]:

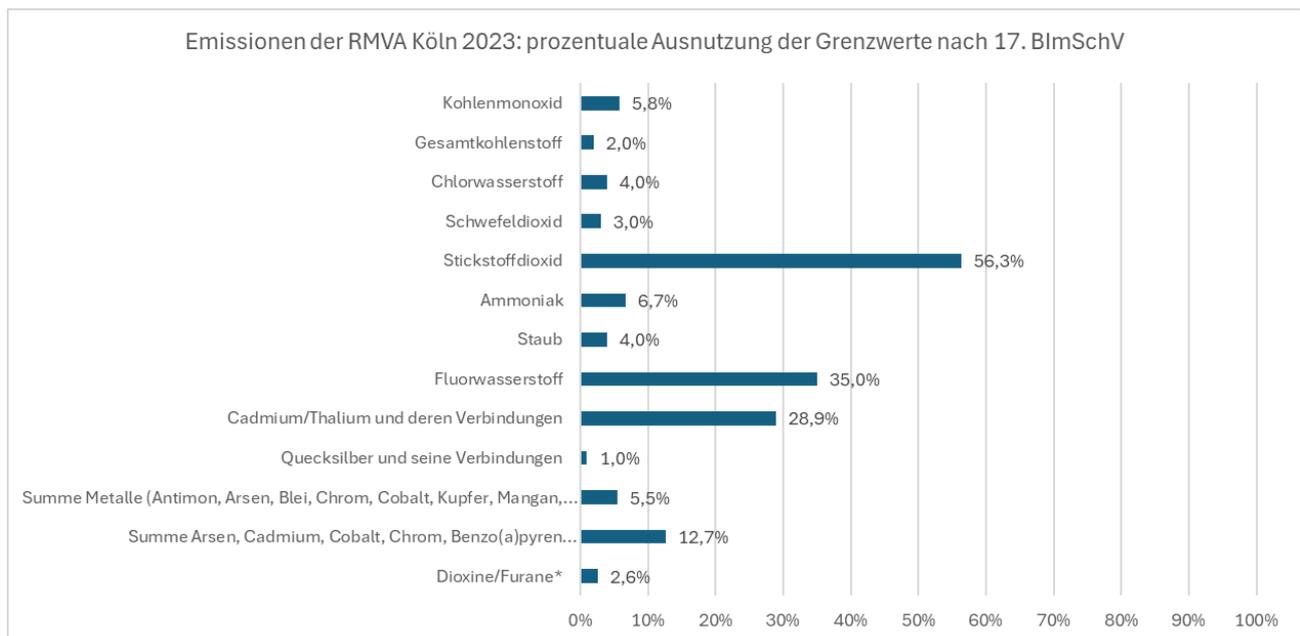


Abbildung 4: Jahresmittelwerte der Emissionen der RMVA Köln [AVG 2023] im Vergleich zu den Grenzwerten der 17. BImSchV

Alle deutschen TAB erfüllen sicher und zuverlässig die vom Gesetzgeber festgelegten Grenzwerte. Durch die mehrstufige Rauchgasreinigung fungieren TAB zudem als Schadstoffsenke, unter anderem für das toxische Metall Quecksilber [Reinig / Warnecke 2018].

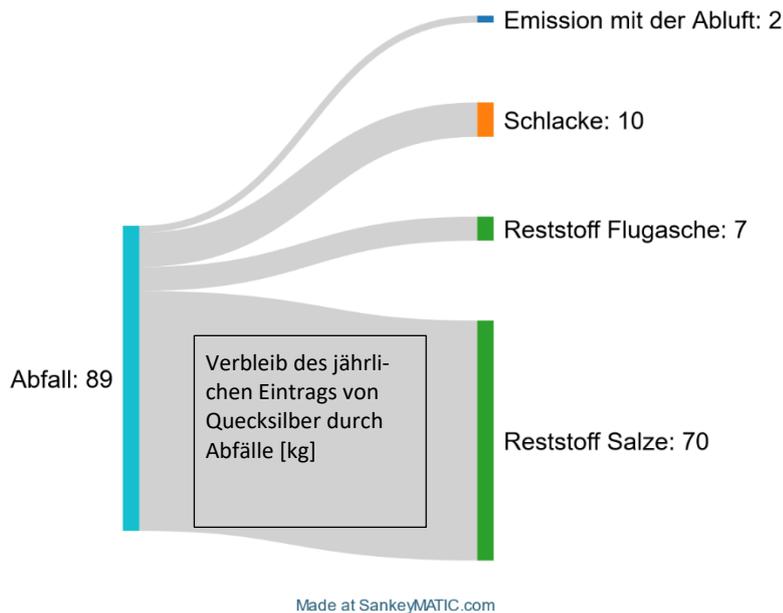


Abbildung 5: Beispiel für die Elimination von Schadstoffen aus dem Rauchgas und deren Verbleib (Beispiel: Quecksilber, MVA Schweinfurt)

**TABs sind in der Lage, die im Abfall enthaltenen Schadstoffe weitestgehend mit Hilfe technischer Maßnahmen sicher zu entfernen: Die TAB ist eine Schadstoffsenke.**

## TAB als Quelle für Sekundärrohstoffe

Die thermische Abfallbehandlung führt zu einer Mineralisierung des eingebrachten Materials. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Abfälle fallen Reststoffe an, die bei < 15% des eingebrachten Abfallvolumens und etwa 20 bis 30 Gewichts-% bezogen auf die eingebrachte Abfallmenge liegen. Beim Verbrennungsprozess entstehen Schlacke bzw. Rostaschen<sup>5</sup> sowie Kesselasche, aus der Rauchgasreinigung vorwiegend Filterstäube und weitere Restprodukte. In diesen Restabfällen aus TAB sind die anorganischen Bestandteile des Abfalls enthalten, also mineralische Komponenten und Salze, darunter (Schwer-)Metalle und Metallverbindungen. Aus den Rückständen der TAB lassen sich mit geeigneten Aufbereitungsverfahren Ressourcen zurückgewinnen.

## Schlacken

Laut der letzten Jahresabfrage für das Jahr 2022 der ITAD bei den 91 TAB-Anlagen fielen im Mittel 240 kg Rohschlacke pro Tonne Abfall an. Bei 24,99 Mio. Tonnen Abfall entspricht das somit 6,02 Mio. t Rohschlacke. Diese Schlacken werden für 6 bis 20 Wochen gelagert, bevor sie weiter aufbereitet werden. Während der Lagerung wird CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre fest an die Schlacke gebunden (Carbonatisierung). Hierdurch verringert sich die Reaktionsfähigkeit der Schlacke; eine später mögliche Auslaugung von Salzen durch Wasser wird reduziert [Meinfelder / Wirich 2008].

<sup>5</sup> Die Temperaturen im Verbrennungsraum einer TAB reichen nicht für einen Schlackenfluss aus, der als glasartiges Material erstarrt. Deshalb ist der Begriff Rostasche korrekt, wird aber selten verwendet.

### *Mineralischer Anteil: Ersatzbaustoffe*

Durch die nachfolgende Aufbereitung (mit mehreren Siebschritten, teilweise Windsichtung, Magnetabscheider, Wirbelstromabscheider) werden ein als Tiefbaumaterial verwertbarer Baustoff sowie Eisen- und Nichteisenmetalle gewonnen.

Aufbereitete Schlacke aus der TAB kann als Ersatzbaustoff verwendet werden und natürlich vorkommende Baustoffe wie Kies, Splitt und Sand ersetzen. Ihr Einsatz trägt unmittelbar zum Ressourcenschutz bei, da die für den Abbau nicht erforderlichen Ressourcen, vorwiegend Wasser und Energie nicht eingesetzt werden müssen und die hiermit verbundenen Abfälle (Abraum) vermieden werden.

Die Einsatzgebiete der Schlacke aus TAB sind in der EBV<sup>6</sup> geregelt und in Abhängigkeit von Wasserschutzbereichen, der grundwasserfreien Sickerstrecke und der Ausführung der Deckschicht limitiert. Der Recycling-Rohstoff ist aus bautechnischer Hinsicht geeignet für Bauprojekte im Erdbau, hier vor allem im Unterbau, für Bodenverbesserungsmaßnahmen, Dämme, Wälle und Anschüttungen. Nach der letzten Erhebung der ITAD aus 2020 wurden rund 71 % der Rohschlacke als Ersatzbaustoff verwendet [ITAD 2023].

### *Rückgewinnung von Metallen*

Trotz aller Bemühungen um getrennte Sammlung enthalten Restabfälle noch Metalle in Konzentrationen, die teilweise weit über denen aktueller Primärvorkommen liegen. Die MVA-Schlacken aus europäischen Anlagen enthalten beispielsweise 3,4 bis 11,8 % Eisen, 3,1 bis 7,5 % Aluminium, 0,07 bis 1,8 % Kupfer, 0,1 bis 0,9 % Zink [Beckmann et al. 2022]. Die aus der Rohschlacke zurückgewonnenen Metalle bestehen zu ca. 75 % aus eisenhaltigen Fraktionen unterschiedlicher Qualitäten [Kuchta / Enzner 2015, S. 8], ferner den NE-Fraktionen Kupfer, Aluminium und Messing und der sog. Metall-Mischfraktion.

Durch Verbesserungen des Aufbereitungsprozesses, vor allem infolge einer kaskadenartigen Anordnung der Siebschnitte und der Behandlung auch des abgeseibten Feinkorns sowie manueller Nachlese konnten die Metallausbeute in den vergangenen Jahren deutlich erhöht werden [Quicker et al. 2022].

Nach der letzten Erhebung der ITAD aus 2020 wurden zwischen 8 und 11 % Metalle bezogen auf die anfallende Masse an Schlacken zurückgewonnen, wobei diese etwa 78 % der in der Schlacke vorhandenen Metalle ausmachen. Diese Quote dürfte vor allem in Folge weiterer Siebschnitte bis hin zum Aufschluss von 2 mm-Fraktionen weiter zunehmen [Kuchta / Enzner 2015, S. 33], [Allegrini et al. 2014].

Neben dem Beitrag zur Versorgung der Industrie mit Sekundärmetallen ergibt sich ein positiver Beitrag zum Klimaschutz durch die Vermeidung der Gewinnung von primären Rohstoffen (Abbau, Aufbereitung, Verhüttung etc.). Diese Beiträge zum Klimaschutz beliefen sich 2012 auf rund 700.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente [Kuchta / Enzner 2015, S. 34]. Die beim Abbau einer entsprechenden Menge von (Primär-) Metallen teilweise erheblichen Auswirkungen für die Umwelt (gemessen in „Comparative Toxic Units of ecotoxicity“ – CTUe) und für die menschliche Gesundheit („Comparative Toxic Units of human toxicity“ – CTUh) können so reduziert und vermieden werden. Zudem sind Metalle als nicht-regenerative Ressourcen auf unserem Planeten nur begrenzt verfügbar; dies lässt

---

<sup>6</sup> In der EBV wird der Begriff „Hausmüllverbrennungsanlagen“ verwendet.

sich durch den Indikator „Abiotic Depletion Potential“ – ADP, Einheit kg Sb-eq) abbilden. Die Verbesserungen, die durch das Recycling der in der Schlacke enthaltenen Metalle gegenüber der Gewinnung von Primärrohstoffen erzielt werden können, zeigt die nachfolgende Grafik:<sup>7</sup>

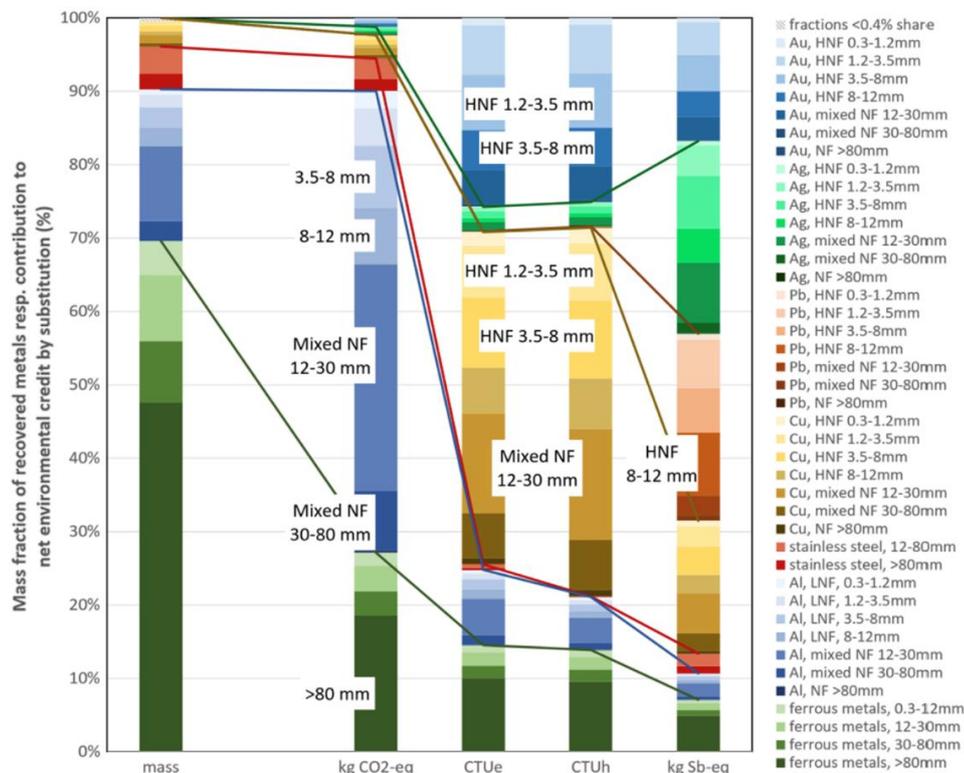


Fig. 4. Mass fraction of recovered metals as well as their contribution to the total net environmental benefit for four impact categories. Metals are divided by colour, additionally subdivided by produced metal fraction. Mass fractions < 0.4% wt. are summarised. Most relevant fraction contributions are additionally labelled.

Abbildung 6: Massenfraktion der wiedergewonnenen Metallfraktionen und ihr Beitrag zum Klimaschutz [Mehr et al. 2021]

Hierin zeigt sich, dass insbesondere die Rückgewinnung von Eisen und Aluminium zu einer Netto-Entlastung in Bezug auf die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz führt: In Bezug auf Eisen führt das Recycling zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mehr als die Hälfte.

Für die Metalle Aluminium, Edelstähle, Kupfer, Blei, Silber und Gold liegt der positive Hebel vor allem in einer gesteigerten Aufbereitungstiefe über verschiedene Siebschnitte hinweg. Zwar ist der Anteil der entsprechenden Metalle in der Schlacke im Ausgangsmaterial „Schlacke“ recht gering (in Summe ca. 30 %); allerdings ist die Gewinnung dieser Metalle aus Primärerzen mit signifikant höheren Auswirkungen für die Umwelt verbunden; dies gilt z.B. für Kupfer. Gut erkennbar sind auch die Knappheitsindikatoren für Gold und Silber. Die ökologischen und sozialen Folgen der Exploration von Primärmetallen an vielen Standorten lassen sich bisher nicht adäquat abbilden.

Zudem werden gut erschließbare Minen zunehmend rarer, weshalb die Rückgewinnung von Metallen aus Schlacke an ökonomischer Attraktivität gewinnen kann [Beckmann et al. 2022, S. 38].

### Ausblick: Potentiale der Schlackenaufbereitung

<sup>7</sup> Die Darstellung bezieht sich auf eine Trockenentschlackung. In Deutschland weit verbreitet ist die Nassentschlackung.

Der wirtschaftliche Hebel zur Verbesserung der Schlackenverwertung liegt vor allem in der Erhöhung des Anteils an zurückgewonnen Metallen. Die ökonomische Grenze lässt sich näherungsweise an dem Energieeinsatz festmachen, der einerseits bei der Extraktion von natürlichen Vorkommen und andererseits bei dem „Sekundärvorkommen“ aufzuwenden ist [Schmidt 2021]: Solange die Konzentration von Metallen in Primärvorkommen höher ist als in sekundären Quellen wie Schlacken aus TAB, ist ein Recycling aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

Aus Sicht der europäischen Rohstoff-Strategie [EU 2023a] kann es dennoch erforderlich sein, auch seltene Metalle, die in sehr geringen Konzentrationen in Schlacken und Stäuben (s.u.) vorhanden sind, zurückzugewinnen. Die Aufbereitungstechniken dafür stehen grundsätzlich zur Verfügung.

Dessen ungeachtet sollte das erhebliche Aufkommen an Schlacken aus TAB als Rohstoffquelle begriffen und der Fokus darauf gerichtet werden, diese Quelle besser zu nutzen:

Neuere Entwicklungen mit einer weiteren Zerkleinerung der Schlacke mit anschließender Auftrennung zeigen, dass weitere Mengen von Aluminium und Kupfer zurückgewonnen werden können; zudem scheint das Recycling von Platin und Palladium möglich. Auch die weitere Aufbereitung der Schlacken zur Metallrückgewinnung durch biologische und chemische Verfahren, vor allem für die Edelmetalle Gold und Silber, scheint erfolgsversprechend. Hierzu bedarf es jedoch noch weiterer, großtechnischer Pilotvorhaben.

Aber auch bei dem größten Mengenstrom aus der Schlackenaufbereitung, der Mineralik, sind noch weitere Verbesserungen in der Erprobung. Neben den aktuellen Verwertungswegen (vor allem als untere Tragschicht für Straßen oder zum Wegebau auf Deponien) ist die Entwicklung von qualitätsgesicherten (Ersatz-) Bau- und Einsatzstoffen eine zukunfts-gewandte Aufgabe. Hierzu bedarf es der Bereitschaft der Bauindustrie wie auch öffentlicher Verwaltungen, die in § 45 Abs. 2 KrWG geforderte Verwendung von Recycling-Rohstoffen umzusetzen. Schlacke könnte nach geeigneter Aufbereitung auch als Substitut für Hüttensand in der Zementindustrie eingesetzt werden [Heidemann et al. 2022]. Ein ähnlicher Ansatz wird auch durch das ENSARZEM-Projekt intensiv untersucht [Dyckerhoff 2024].

Weitere Forschungsansätze gehen dahin, die mineralische Fein-Fraktion als Zuschlagsstoff in Beton zu verwenden und so den hierfür erforderlichen Sand- und Zementeinsatz zu reduzieren [Fraunhofer IPB 2024].

Unter Berücksichtigung der niederländischen Gesetzgebung (CUR Aanbeveling 116) wurde durch eine Beteiligung der deutschen Firma REMEX in den Niederlanden ein Waschverfahren entwickelt, das zum einen die Metallausbeute, vor allem von NE-Metallen, erhöht. Zum anderen erreicht der mineralische Anteil nach einem zweistufigen Waschverfahren eine gütekontrollierte Qualität, die diesen Bestandteil zum Einsatz als Beton-Substitut befähigt. Durch entsprechende Beimischungsverhältnisse kann der aufbereitete Ersatzbaustoff (Markenname granovo REMEX). auch in höherwertigen und höherpreisigen Baustoffen eingesetzt werden.

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht die potentiell für sinnvoll erachteten Einsatzmöglichkeiten [ZAR 2021]:

Nr.	Materialien / Verwertung	Nutzenpotenzial betreffend Klimaschutz	Nutzenpotenzial betreffend Umwelt allgemein	Technische Machbarkeit
1	Ca-haltige Schlackenkomponenten als Rohmehlersatz in der Klinkerproduktion	extrem hoch	hoch	Mit Optimierungen möglich
2	Ca-haltige Holzasche als Rohmehlersatz/ Korrekturstoff in der Klinkerproduktion	hoch	vorhanden	Gegeben
3	Fe-haltige Schlackenkomponenten als Korrekturstoff in der Klinkerproduktion	vorhanden	vorhanden	Gegeben
4	Fein gemahlene Schlackenanteile als Zumahlstoffe in der Zementproduktion	hoch	hoch	Absehbar, noch Fortschritte nötig
5	Gips aus der Rauchgaswäsche als Zumahlstoff in der Zementproduktion	vorhanden	sehr hoch	Gegeben
6	Gemahlene Schlackenanteile als Zuschlagstoff in der Betonproduktion	mittel	hoch	Absehbar, noch Fortschritte nötig
7	Gips und Fe-haltige Rückstände aus dem Phos4life-Verfahren als Korrektur- bzw. Zumahlstoff in der Zementproduktion	vorhanden	hoch	Mit Optimierungen möglich

Abbildung 7: Möglichkeiten des Einsatzes der Bestandteile aus TAB-Schlacken

Insgesamt ist eine verstärkte Dynamik bei den Bestrebungen zur verbesserten Nutzung der Schlacke als Rohstoff zu beobachten. Die bisherigen Projekte scheinen grundsätzlich erfolgsversprechend, bedürfen jedoch noch der großtechnischen Umsetzung und Validierung.

**Zukunft Trockenentschulung?**

Für die Metallrückgewinnung scheint eine Trockenentschulung (überwiegend in der Schweiz im Einsatz) deutlich sinnvoller, da bei der Nassentschulung (überwiegend in Deutschland im Einsatz) die Metalle häufig „verbacken“ werden. Allerdings fallen bei der Trockenentschulung höhere Mengen an Stäuben an, die zumindest in Deutschland im Untertage-Versatz verwertet werden. Ob sich der Umbau von der Nass- in eine Trockenentschulung lohnt, bedarf weiterer Untersuchungen und Bewertungen auch im Hinblick auf den nicht geringen Wasserverbrauch bei der Nassentschulung.

**Behandlung von Filterstäuben**

Weniger als 5 Gewichts-% des thermisch behandelten Abfalls fallen als Rauchgasreinigungsrückstände – auch unter Zuhilfenahme von Additiven (Kalk, Aktivkohle, Natriumbicarbonat etc.) an. Neben den Filter-/Kesselstäuben sind dies Produkte aus der chemischen/physikalischen Rauchgasreinigung. Die Filterstäube entstehen vor allem als Rückstand aus Elektro- sowie Gewebefiltern und damit als „erwünschtes“ Nebenprodukt der aufwändigen Rauchgasreinigung. Auf Basis der für 2022 gemeldeten Verbrennungsmenge von 24,99 Mio. t handelt es sich somit um einen Massenstrom von ca. 1 Mio. t Filterstäuben.

Die chemischen Eigenschaften dieser Filterstäube, insbesondere die Salzfracht, das Vorliegen persistenter organischer Verbindungen, unter anderem von Dioxinen, und die Aufkonzentrierung von einigen Metallen mit toxischen Eigenschaften gegenüber dem Ausgangsstoff „Abfall“, führen zu einer Einstufung der Filterstäube als gefährlicher Abfall (AVV 19 01 13\*). In Deutschland werden diese Filterstäube als Versatzmaterial in unterirdische Hohlräume verbracht. Hierbei werden die Stäube teilweise mit Bindemitteln versetzt und in geologisch geeigneten Hohlräumen und Kavernen, die bei der Steinsalz- oder Kaliförderung entstanden sind, eingelagert. Die Abfälle dienen so zum Schutz von senkungsgefährdeten Bereichen an der Erdoberfläche („Bergschäden“) und zur Stabilisierung des Grubengebäudes. Diese Abfälle werden somit dauerhaft und gesichert der Ökosphäre entzogen.

Mit den Regelungen zum Bergversatz, die seit mehr als 20 Jahren in Deutschland gelten, wurde sichergestellt, dass schadstoffhaltige Abfälle nur noch in trockene Salzgesteinsformationen eingebracht werden, die über einen Langzeitsicherheitsnachweis verfügen. Damit werden die gleichen Anforderungen gestellt wie für die Beseitigung von Abfällen in Untertagedeponien. Die Einbringung der Filterstäube aus der TAB in weniger sichere, z.B. durch den Kohleabbau entstandene, Hohlräume ist nicht gestattet. In der sog. Versatzverordnung sind in deren Anlage 1 Grenzparameter für Metallinhalte angegeben: sollte der Filterstaub hierüber liegen, ist zwingend eine vorherige Extraktion des Metallinhaltes erforderlich.<sup>8</sup>

Mit der aufgrund der Geologie möglichen Einbringung in Salzbergwerke beschreitet Deutschland einen Sonderweg. Im (europäischen) Ausland werden die Filterstäube aus TAB aufbereitet bzw. übertägig deponiert. Bei der Aufbereitung kommen insbesondere Waschverfahren, teilweise mit Wasser und / oder Schwefel- oder Phosphorsäure, zum Einsatz. Dadurch wird nicht nur die Salzfracht der Stäube reduziert, sondern die in dem Filterstaub vorhandenen Schwermetalle wie Zink, Blei, Chrom und Kupfer extrahiert. Insgesamt wurden in Filterstäuben bis zu 65 Elemente nachgewiesen [Fabricius et al. 2020]. Thermische Aufbereitungsverfahren von Filterstäuben haben vor allem zum Ziel, die Schadstoffe in Filterstäuben sicher einzubinden; die Verfahren sind erprobt und bekannt, erfordern jedoch erhebliche zusätzliche Energie [Kanhar et al. 2020].

#### **Aufbereitung von Filterstäuben in der Schweiz**

In der Schweiz ist die Aufbereitung von Filterstäuben seit 2021 bzw. ab 2026 vorgeschrieben. Dies geschieht zum größten Teil über den FLUWA-Prozess („Flugaschenwäsche“), bei dem über eine saure Wäsche, teilweise unter Einsatz von Wasserstoffperoxid, die Salze der Filterstäube ausgewaschen und die enthaltenen Metalle zu einem großen Anteil zurückgewonnen werden: Das FLUWA-Verfahren nutzt das saure Wasser aus der Quenche der Rauchgasreinigung, um Salze und Metalle aus den Flugaschen herausgelöst. Die Aschensuspension wird anschließend mit einem Vakuumbandfilter in ein schwermetallhaltiges Filtrat und einen schwermetallarmen Filterkuchen aufgetrennt. Die Schwermetalle im Filtrat werden durch die Zugabe von Kalkmilch gefällt. Zur Rückgewinnung des Zinks aus dem Hydroxid-Schlamm wird unter anderem das sog. FLUREC-Verfahren angewandt, das in einer zentralen Anlage im Kanton Solothurn etabliert wurde.

In Deutschland arbeitet EEW (Energy from Waste GmbH) an einer Kombination von Laugung mit anschließenden thermischen Verfahren. Ziele sind eine Reduzierung der Masse der Flugasche um rd. 30% und die Gewinnung von Zink und Blei zur Verhüttung [Manns 2023]. Die übrigen in der Flugasche enthaltenen Metalle (auch die, die von der EU für die Wirtschaft als „kritisch“ betrachtet werden) könnten grundsätzlich mit Königswasser extrahiert werden [Fabricius et al. 2020, S. 12].

<sup>8</sup> Z.B. werden Stäube aus Filteranlagen der Stahlindustrie aufgrund des hohen Zink-Gehaltes seit Jahren zunächst metallurgisch aufbereitet.

Die Verwertung der Flugasche unter Rückgewinnung der darin enthaltenen Metalle sowie Reduzierung des Schadstoffpotentials sind aufgrund der sicheren Einbringung in Salzbergwerke in Deutschland bisher nicht üblich.

Im Zuge der europäischen Rohstoff-Strategie und der nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie ist davon auszugehen, dass TAB-Anlagen derartige Verfahren in Zukunft angehen werden.

**Auch die Verwertung von Filterstaub aus TAB kann in Zukunft einen Beitrag zur Gewinnung von Sekundärmetallen leisten.**

## TAB als Energielieferant - Beiträge zum Klimaschutz

**Anlagen zur TAB sind technisch ähnlich wie klassische Kraftwerke konzipiert. Sie erzeugen Dampf, der zur Erzeugung von Strom und / oder Fernwärme eingesetzt wird oder direkt als Prozessdampf für benachbarte industrielle Abnehmer genutzt wird.**

Alle TAB in Deutschland nutzen die Energie aus dem Prozess der Abfallverbrennung. Erzeugter Strom wird als Bestandteil der Grundlast ins Netz eingespeist, der jeweilige Heizwert des Abfalls und der Bestand im Bunker sind wesentliche Steuerungskomponenten für den Betrieb.

### Produktion von Strom und Wärme

Um die mit den Abfällen in die TAB eingebrachte Energie möglichst vollständig zu nutzen, haben sich folgende Konzepte bewährt:

- Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), also Nutzung der Abwärme zur Produktion von Fernwärme (Anlagen in oder in der Nähe von Siedlungsschwerpunkten),
- Ausschließliche Verwertung des Prozessdampfs zur Übergabe an große Energieverbraucher wie Kraftwerke (beispielsweise in Bonn, Heringen, Ludwigshafen, Berlin), Papierfabriken (beispielsweise in Glückstadt, Schwarza) und Chemieparks (beispielsweise in Leuna, Hürth),
- Deckung des Eigenbedarfs an Strom und Wärme (u.a. für den Betrieb der Rauchgasreinigung und Luftvorwärmung) aus der erzeugten Energie.

Weiter an Bedeutung gewinnt der Ausbau der Abwärmenutzung aus TAB in Form von Fernwärmeanschlüssen. Der Anteil der Nutzung von Abwärme aus Abfällen für die Heizwärme-Versorgung liegt bereits bei etwa 18% [AGFW 2024] und stellt nach Erdgas den zweitgrößten Energiebeitrag dar. Die (unvermeidbare) Abwärme aus der thermischen Behandlung von Abfällen ist nach dem Wärmeplanungsgesetz (WPG) den erneuerbaren Energien zur Zielerreichung gleichgesetzt. Somit besteht die Abwärme aus TAB zu rund 50 % aus erneuerbaren Energien (aufgrund des biogenen Abfallanteils) und ca. 50 % (fossiler Abfallanteil als „unvermeidbare Abwärme“).

Wegen der bei TAB-Anlagen wesentlich geringeren Effizienz bei der Stromerzeugung im Vergleich zu Kohle- oder Gaskraftwerken (geringere Dampftemperaturen und Dampfdrücke der TAB, um Korrosion vorzubeugen) und des durchgängigen Betriebs stellt die Fernwärme-Auskopplung für die meisten Anlagen eine sehr sinnvolle Energieverwertung dar. Wärmeversorgung aus TAB wird mit einem Primärenergiefaktor von Null und einen Emissionsfaktor von 20 g/kWh (lt. Anlage 9 zum GEG, siehe auch [AGFW 2021]) im Markt ökologisch hoch bewertet. Langfristig kann sich in Folge der Installation von CO<sub>2</sub>-Abscheideanlagen allerdings ein Zielkonflikt ergeben, da die Abscheidung z.B. mit Hilfe von Aminen zu einem erheblichen Wärmebedarf führt (s.u.).

## Zunehmende Bedeutung der TAB für die Stabilisierung der Stromnetze

Im Zuge der Energiewende werden immer mehr Kohle-Kraftwerke außer Betrieb genommen oder nur noch als Reserve vorgehalten. Die Stromerzeugung aus Kernbrennstoffen wurde in Deutschland am 15. April 2023 beendet. Der als Ersatz angedachte Neubau von Gaskraftwerken oder Umbau bestehender Kraftwerke kommt bisher kaum voran, da die Verzinsung dieser Investitionen ohne einen sogenannten Kapazitäts-Bonus nicht gesichert ist. Der Bau von Laufwasserkraftwerken ist an natürliche Grenzen gestoßen. Damit stehen immer weniger grundlastfähige Kraftwerke zur Verfügung

Die Grundlast, also die ständig benötigte Stromerzeugung liegt bei etwa 40 bis 60 GW, die Spitzenlast bei über 80 GW. **Die installierte Leistung der TAB liegt bei ca. 2,15 GW [ITAD 2024]; diese Leistung wird in Zukunft für die Bereitstellung von Kapazität in der gesicherten Grundlast immer wichtiger. In Zeiten der „kalten Dunkelflaute“, also mangelnder Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie, gehören sie zum Rückgrat der Stromproduktion.**

Neben der kontinuierlichen Einspeisung von Strom ins Netz sind zahlreiche TAB auch als sogenannte Systemdienstleister präqualifiziert. Stromeinspeisende **TAB unterstützen die Stabilisierung der Übertragungs- und Verteilnetze durch die sogenannte Minutenreserve, Schwarzstartfähigkeit wie auch bei der Aufrechterhaltung der Frequenz von 50 Hz:**

- Im Stromnetz müssen Einspeisung und Abnahme von Strom ständig präzise ausgeglichen werden. TAB, die sich für die Minutenreserve qualifiziert haben, müssen die zusätzlich benötigte Leistung 15 Minuten nach Aufforderung für mindestens 60 Minuten bereitstellen. Dies gilt auch umgekehrt, wenn ein Überangebot an produzierter Energie im Netz vorliegt: dann werden die stromerzeugenden Turbinen heruntergeregelt. Lt. Auskunft der ITAD [2024] können ca. 25 präqualifizierte TAB damit zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen.
- Ebenso wichtig ist die Aufrechterhaltung einer Frequenz von 50 Hz im Netz, da bereits Schwankungen um +/- 1 Hz zum Zusammenbruch des Übertragungs- und Verteilnetzes führen können („Blackout“). Die für die Stromerzeugung bei TAB genutzten Turbinen tragen mit ihrer Massenträgheit zur Stabilisierung der Netzfrequenz auf 50 Hz bei.<sup>9</sup>

Energie aus der TAB wird zu einem überwiegenden Anteil aus regenerativen Materialien (Abfall-Biomasse und somit erneuerbar) erzeugt. Der EuGH stärkte daher die Stellung dieser Anlagen gegenüber anderen Kraftwerken, indem sie im Umfang des Anteils der erneuerbaren Energiequellen als EEG-Anlagen eingestuft werden sollen<sup>10</sup>.

Um Energie aus TAB in stärkerem Umfang zur Abdeckung von Stromspitzen einzusetzen, müssten der erzeugte Strom oder Wärme für die Rückverstromung gespeichert werden. Angesichts der aktuell hohen Kosten für Speichersysteme dürfte dies jedoch in näherer Zukunft kaum eine realistische Option sein. In Fällen hoher Stromüberschüsse bei intensiver Sonneneinstrahlung und/oder Wind könnte Strom aus TAB direkt an der Anlage für die

- Umwandlung von Strom in Wärme
- Gewinnung von Wasserstoff durch Elektrolyse,
- Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas (CC-Anlagen)

genutzt werden.

---

<sup>9</sup> Um die stabilisierende Wirkung wegfallenden Großkraftwerke zu kompensieren, sind erhebliche Investitionen in technische Lösungen wie rotierende Phasenschieber erforderlich, die für die kurzfristige Korrektur von Netzschwankungen eingesetzt werden.

<sup>10</sup> EuGH-Urteil vom 20.04.2023 auf ein Vorabentscheidungsersuchen des BGH (C-580/21). Eine für Deutschland bindende BGH-Entscheidung steht noch aus.

## Entwicklung des Fernwärme- und Fernkälte-Markts

Überschuss-Wärme lässt sich für eine gewisse Zeit speichern und damit im Winter oder nachts zur Überbrückung besonders kalter Temperaturen bzw. als Systemdienstleister für Stromnetze einsetzen. Dafür sind beispielsweise Phasenwechsel-Speicher auf der Basis von Salzhydraten geeignet oder (Langzeit-)Speicher auf Wasser- oder Feststoffbasis. Derartige technische Entwicklungen werden durch die veränderten Marktstrukturen (höhere Energiepreise, Klimarelevanz, komplexere Systeme) beschleunigt.

Um überschüssige Abwärme aus TAB im Sommer zu nutzen, kann diese mit Hilfe von Absorptionskältemaschinen im Fernwärmenetz lokal beim Nutzer in Kälte, z.B. für Klimaanlage umgewandelt werden. Eine Absorptionskältemaschine an der TAB lässt sich zur Erzeugung von „Fernkälte“ einsetzen, wie dies bereits in Wien umgesetzt wird (siehe Berechnung für eine dänische Anlage [M. Fabricius et al. 2020]). Fernkälte-Systeme sind in großen Städten durchaus vorhanden, z.B. in Berlin, München, Wien, Barcelona. Die technische Nutzung von TAB-Abwärme für die Fernkälte ist wie die Fernwärme eng an örtliche Abnehmer geknüpft, z.B. Krankenhäuser und Bürokomplexe (Klimatisierung) oder Logistikstandorte (Kühlhäuser). Eine Modellrechnung für europäische Städte kommt zu dem Ergebnis, dass der Energiebedarf für Kühlung in Zukunft den Energiebedarf für Heizung um ca. 33% übersteigen wird. Diese Energie würde von TAB ortsnah ergänzend zu anderen Kraftwerken bereitgestellt werden, am besten verbunden mit Wärmespeichern [Matak et al. 2021].

Die optimierte energetische Nutzung von Abfällen wird weiterhin an Siedlungsschwerpunkten betrieben werden, aber zusätzliche systemfremde Anlagen am Standort im Sinne der Sektorenkopplung (z.B. Erzeugung von Wasserstoff für kommunalen Busbetrieb o.dgl.) integrieren können [Flamme et al. 2018]. Optimale Energieauskopplung wird sich neben dem Bunkerstand als wichtigste Betriebsweise der Anlagen etablieren. Die Nähe entsprechender Wärme- bzw. Dampfverbraucher ist entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg, wobei sich Synergien durch die Kombination verschiedener Anlagen zur Ver- und Entsorgung erzielen lassen<sup>11</sup>.

Darüber hinaus könnte die Gewinnung von Wasserstoff aus Überschuss-Strom und dessen Einsatz als transportable gespeicherte Energie – z.B. durch Beimischung in regionale Gasnetze<sup>12</sup> - oder Umsetzung mit CC-Anlagen in synthetische Kohlenwasserstoffe (Chemierohstoff, Treibstoff) weitere Synergien bieten. Es ist daher notwendig, den Bau von H<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Netzen zusammen zu betrachten.

**Insgesamt trägt die TAB zu der für die Energiewende notwendigen Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Verkehr bei** (Siehe zur Sektorenkopplung: [Ausfelder 2017]).

## Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen durch TAB

Jede Verbrennung kohlenstoffhaltigen Materials wie auch Kompostierung oder Vergärung führen notwendigerweise zur Bildung C-haltiger Gase, vorwiegend CO<sub>2</sub>. Bedeutsam ist der Beitrag an fossilem CO<sub>2</sub>, da dies bilanziell zu einer Erhöhung der THG-Konzentration in der Atmosphäre führt. **Auf**

---

<sup>11</sup> Vorhandene bzw. geplante Beispiele: TAB + Kläranlage in Krefeld, TAB + Biogas-Erzeugung in Augsburg (Abluft-Verbrennung), TAB + Klärschlamm-Verbrennungslinie, ggfs. mit Phosphor-Rückgewinnung in Offenbach

<sup>12</sup> Zusatz von bis zu 20 % H<sub>2</sub> ins Gasnetz möglich [DVGW 2021]

**Grund der Zusammensetzung des Restabfalls bestehen die CO<sub>2</sub>-Emissionen von TAB zu etwa gleichen Teilen aus fossilem und regenerativem CO<sub>2</sub><sup>13</sup>, wobei der fossile Anteil im Wesentlichen aus der Verbrennung von Kunststoffen stammt.** Die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus TAB werden aktuell mit etwa 19 bis 21 Mio. t [Treder 2023] bzw. 21,2 Mio. t [Schebek et al. 2022] angegeben.

Bei fortschreitender „Defossilisierung“ der Chemie-Produktion sinkt auch im Reingas der TAB-Anlagen der fossile Anteil an CO<sub>2</sub> zugunsten des regenerativen Anteils. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie die Anlagen verbleibende Emissionen an CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen vermeiden können. Hierzu stehen grundsätzlich verschiedene Wege zur Verfügung:

1. Verbesserung der getrennten Sammlung (siehe auch Abschnitt „Schadstoffe und störende Materialien“) – dies liegt aber nicht im Einflussbereich der des TAB-Betreibers
2. Abtrennung von Plastikabfällen aus dem Restabfall direkt vor dem Bunker der TAB-Anlage (siehe Abschnitt „Entwicklung der Restabfallmengen“) – diese müsse dann anderweitig verwertet oder beseitigt werden.
3. Entfernung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas.

Die beiden zuerst genannten präventiven Möglichkeiten stoßen allerdings bei hoher Verschmutzung der Reststoffe sowie bei Schadstoffen in den Plastikabfällen an ihre Grenze – hier wird die TAB als Stör- und Schadstoffsinke gebraucht. (Siehe dazu Abschnitt „Schutzfunktion von TAB“)

Für die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas liegen Erfahrungen aus Pilotprojekten bei Großkraftwerken und aus der Chemieindustrie vor. Die Anlage zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung im RWE-Kraftwerk Niederaußem (300 kg CO<sub>2</sub> pro Stunde) wurde über 100.000 Betriebsstunden betrieben. Diese Erfahrungen könnten jetzt teilweise auf TAB übertragen werden. Alle Abscheidetechniken sind energieintensiv. Für die kommerziell verfügbare Amin-Wäsche werden je nach Anlagentyp zwischen 0,144 und 1,08 GJ / t CO<sub>2</sub> (40 - 300 kWh) an elektrischer Energie sowie 3,2 bis 6,5 GJ / t CO<sub>2</sub> Bedarf an Heizdampf angegeben [Karpf / Dütge 2016], wobei noch Verbesserungen der Effizienz zu erwarten sind. Bei einer Abscheiderate von 90% im kontinuierlichen Betrieb würde die von einer TAB-Anlage ins Netz einzuspeisende Leistung an Strom und Wärme erheblich reduziert. Daher gilt es, die Reduktion von THG an der TAB-Anlage selbst und die indirekte Reduktion durch vermiedene Emissionen im Bereich Strom- und Wärme- bzw. Kälteversorgung gegeneinander abzuwägen, ökologisch wie ökonomisch. Anlagen, die in Fernwärme-Netzen integriert sind, könnten beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Abscheidung zunächst auf die Sommermonate beschränken.<sup>14</sup>

Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung bei TAB-Anlagen ist bisher nur an zwei Standorten im großtechnischen Maßstab realisiert (Twence und Duiven, Niederlande). Mehrere Projekte, meist basierend auf einer Amin-Wäsche, befinden sich in der Planung:

- MVA Oslo (Norwegen): Die Anlage soll zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem gesamten Rauchgas dienen (400.000 t pro Jahr), die in ausgebeuteten Gasfeldern eingelagert werden (Carbon Capture and Storage - CCS). Die Investitionen werden mit 620 Mio. € angegeben; die norwegische Regierung subventioniert die Hälfte der benötigten Baukosten und trägt die Kosten für Transport und Einlagerung des CO<sub>2</sub>. Zur Zeit wird die Planung allerdings nicht weiter verfolgt. [Anonym 2023]

---

<sup>13</sup> Dabei ist zu beachten, dass sich die THG-Emissionen von Anlagen zur stofflichen Verwertung (R4 bis R8, siehe erster Abschnitt) bei weiterer Durchdringung des Energiemarkts mit erneuerbaren Energieträgern tendenziell verringern. Auf der anderen Seite nimmt die Emission von CO<sub>2</sub> fossilen Ursprungs bei den Anlagen zur TAB ab, weil durch Verbesserung des Recyclings von Produkten aus Kunststoffen weniger Plastikabfälle anfallen sollten. Letzten Endes kommt es darauf an, THG unabhängig von ihrem Ursprung mit möglichst geringem Material- und Energieaufwand zu vermeiden.

<sup>14</sup> Durch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung vermindert sich das Rauchgasvolumen, so dass die Konzentration – nicht aber der Massenstrom – von nach BImSchG begrenzten Schadstoffen steigt.

- TAB Delfzijl (Niederlande): Die EEW plant für ihre Anlage am Rand des Chemieparks in Delfzijl in einem ersten Schritt zwei Amin-Wäscher zur Abscheidung von 270.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr, dies sind etwa 65% der gesamten THG-Emissionen der Anlage. Das abgeschiedene Gas soll teilweise mit Wasserstoff aus einem im Chemiapark geplanten Elektrolyseur zu Methanol verarbeitet werden (Carbon Capture and Utilization – CCU), das in der Chemieindustrie eingesetzt wird [Jakob 2023].
- Die WtE-Anlage Ferrybridge in Yorkshire soll nach Angaben des Betreibers mit einer CCS-Anlage zur Abtrennung von 1,2 Mio. t CO<sub>2</sub> (Investition: ca. 800 Mio. €) ausgerüstet werden [Enfium 2023].
- RABA Zella-Mehlis: Der kommunale Betreiber der Anlage plant eine Amin-Wäsche, mit der knapp 10% des im Rauchgas vorhandenen CO<sub>2</sub> absorbiert werden sollen. Parallel dazu wird eine Wasser-Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff errichtet, um direkt vor Ort aus beiden Produkten 7.500 t Methanol pro Jahr zu erzeugen. Strom und Niederdruck-Dampf aus der RABA sollen möglichst effizient zum Betrieb der Anlagenkombination eingesetzt werden [Stöckmann 2023]. Das Genehmigungsverfahren wurde positiv abgeschlossen.

Außerdem wollen die MVA's Twence und Duiven auf Basis ihrer Erfahrung mit den aktuellen Projekten größere Anlagen zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> errichten [Jakob 2023].

Wenn die Energiewende wie geplant bis zum Jahr 2045 gelingen sollte, wird in Folge der Defossilisierung aller Industriezweige ein Mangel an verfügbarem Kohlenstoff entstehen. CO<sub>2</sub> aus TAB-Anlagen könnte als Ersatz genutzt werden. Die in Zukunft in TAB-Anlagen anfallenden Mengen im Rauchgas hängen natürlich von den verbrannten Abfallmengen ab (siehe Abschnitt Mengenentwicklung). Im Rahmen der strategischen Studie für die deutsche Chemieindustrie C4C [VCI / VDI 2023, Anhang 7.5] wurden folgende Massenströme an CO<sub>2</sub> abgeschätzt:

	Thermische Abfallbehandlung	Sonderabfall-verbrennung	Biogas	Klärschlamm-Mono-verbrennung
2020	14,07 / 14,23	0,75 / 0,75	0 / 10	0 / 1,0
2030	13,68 / 14,5	0,7 / 0,8	0 / 10	0 / 1,25
2045	2,8 / 25,2	0,3 / 1,2	0 / 10	0 / 1,5

Abbildung 8: Prognose der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Behandlung von Abfällen, fossiles / regeneratives CO<sub>2</sub> in Mio. t

Die technische bzw. wirtschaftliche Verfügbarkeit dieser Mengen für die Chemieindustrie unterliegt allerdings zahlreichen, heute schwer abschätzbaren Rahmenbedingungen:

- Die Entwicklung der Preise für Strom und Kapazitätsangebote unter Überschuss- (viel Wind und Sonne) und Mangelbedingungen (Dunkelflaute) im Vergleich zu den Kosten für THG-Emissionszertifikate und natürlich die Nachfrage nach den aus CO<sub>2</sub> erzeugbaren Rohstoffen (im Wesentlichen Umsetzung mit Wasserstoff zu Methanol und daraus Synthese von Olefinen bzw. Aromaten) sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas.
- Sofern kein Abnehmer für CO<sub>2</sub> in der Nachbarschaft existiert (Chemieparks, Metallurgie, Treibstoffproduktion), muss das Gas entweder über Pipelines zu Kunden transportiert oder vor Ort verarbeitet werden, was wegen der dezentralen Struktur der TAB schwierig ist. Hilfreich wären der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur bzw. eines CO<sub>2</sub>-Pipelinenetzes.

- Zahlreiche rechtliche Grundlagen müssen überarbeitet werden, damit CO<sub>2</sub> abgeschieden, transportiert und verwertet (CCU) oder ggf. in geeigneten Kavernen bzw. Gesteinsschichten verpresst (CCS) werden kann.<sup>15</sup>

Die vitale Bedeutung der Versorgung Chemieindustrie mit nicht-fossilen Kohlenwasserstoffen lässt erwarten, dass die technischen und rechtlichen Grundlagen mit Hochdruck geklärt werden.

**Die Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus Rauchgasen der TAB ist technisch möglich und wird versuchsweise bisher bei nur wenigen Anlagen eingeführt. Die dazu erforderlichen Energiemengen sind allerdings hoch, ebenso Bau- und Betriebskosten. Darüber hinaus sind besonders rechtliche Grundlagen anzupassen.**

## Teil 3: Positionierung der TAB in Zukunft

### Entwicklung des Restabfallaufkommens in Deutschland

Die Entwicklung der unterschiedlichen Restabfallströme bestimmt maßgeblich den Kapazitätsbedarf für die thermische Behandlung. Denn nur eine Behandlung bei hohen Temperaturen über 800° C führt zur fast vollständigen Zerstörung des organischen Anteils in Restabfällen, Sortierresten und ähnlichem Abfall. Derartig vorbehandelte Abfälle mit einem sehr geringen organischen Anteil dürfen auf einer Deponie abgelagert werden oder können – bei entsprechender Qualität – auch stofflich verwertet werden, z.B. als Produkt der Aufbereitung von Schlacken. Die Deponieverordnung begrenzt den Gehalt an organischem Material in Abfällen zur Ablagerung auf 1% (Deponieklasse 0 und I) bzw. 3% (Deponieklasse II)<sup>16</sup>.

Die Entwicklung der kommunalen Restabfallmengen wird mit Prognosen abgeschätzt, die auf der Ebene der Länder und der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (öRE) regelmäßig für die Aufstellung der Abfallwirtschaftspläne (AWP) benötigt werden. Ziel der Abfallwirtschaftsplanung ist es u.a., „Entsorgungssicherheit“ für einen Zeitraum von fünf bis zehn Jahren zu bewerten und ggf. herzustellen. Dies führt zu einer Verpflichtung der öRE, für diese Planung Kapazitäten für Abfallsammlung, Recycling und eine entsprechende Behandlung vorzuhalten oder vertraglich zu sichern. Derartige Planungen gibt es auf der nationalen Ebene nicht.

Detaillierte Erhebungen (und folglich auch Planungen) sind jedoch nur für die Abfälle vorhanden, die den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern angedient werden (müssen). Für gewerbliche Abfälle fehlen Planungsdaten; auch existiert nur eine mangelhafte Erhebung von abfallwirtschaftlichen Kenndaten. Die Kapazitäten der TAB werden jedoch zu mehr als 50 % durch andere Abfälle genutzt, z.B. Gewerbeabfälle und Sortierreste aus Recyclinganlagen für Verpackungen, Papier und Kartonaugen etc..

---

<sup>15</sup> Im Rahmen der Carbon Management Strategie der Bundesregierung, die derzeit in Bearbeitung ist, sollen die Fragen beantwortet werden. Es zeichnet sich ab, dass die Residualemissionen aus der TAB als „unvermeidbar“ angesehen werden und somit auch die Technologie gefördert wird, analog der dem Positionspapier des UBA (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/carbon-capture-storage-diskussionsbeitrag>).

<sup>16</sup> Bestimmt als TOC (gesamter organischer Kohlenstoff) lt. Anhang 3 zur Deponieverordnung vom 27.04.2009; die Ablagerungsfähigkeit für DK 0 / DK I kann auch durch einen Glühverlust von maximal 3% bzw. für DK II von maximal 5% nachgewiesen werden. Für die Ablagerung von Abfällen aus mechanisch-biologischer Behandlung gibt es Ausnahmen, die sich an der restlichen biologischen Abbaubarkeit dieses Materials (gemessen als Atmungsaktivität – AT4 oder Gasbildungsrate im Gärtest – GB21) orientieren.

Im Rahmen der NKWS ist diese wichtige Funktion einer geordneten und funktionierenden Verwertungskaskade für Abfälle aus Haushalten, Handel, Handwerk, Infrastruktur und Industrie, wenn auch nur ansatzweise und geschätzt, zu berücksichtigen.

Welche Faktoren beeinflussen die künftige Entwicklung der Menge an Restabfällen in Deutschland für die thermische Behandlung?

Zu denken ist an:

- Die Bevölkerungsentwicklung
- Verstärkung der getrennten Sammlung insbesondere von Bioabfall und Alttextilien bei Kommunen bzw. Optimierung der Getrenntsammlung bei Unternehmen
- Optimierung der Erfassung von „Wertstoffen“ (nur getrennt erfassen, was recyclingfähig ist) und Verbesserung der Sortierergergebnisse vor allem bei Leichtverpackungen
- Einführung des „chemischen Recyclings“ für nicht-sortenreine Kunststofffraktionen
- Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Rahmen einer „Circular Economy“
- Veränderungen in rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die den Export von Abfällen betreffen.

Und wie wirken sie sich aus? Im Folgenden wird dies an einigen Beispielen erörtert:

### Erweiterung der getrennten Sammlung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Entwicklung der Haushaltsabfälle, also rund 50 % der aktuellen TAB-Auslastung, im Bundesland NRW: Die spezifische Menge an Haushaltsabfällen ist seit 1995, wenn auch nur leicht, angestiegen. Der Anteil an (thermisch zu verwertendem) Haus- und Sperrmüll ist kontinuierlich gesunken – vorwiegend zugunsten einer ansteigenden Quote der erfassten Bio- und Grünabfälle sowie Leichtverpackungen (LVP). Dies war nur durch eine Erweiterung der Sammelsysteme möglich: Zu der grauen Hausmülltonne gesellten sich Biotonne, Altpapier- und gelbe Tonne/ gelber Sack.

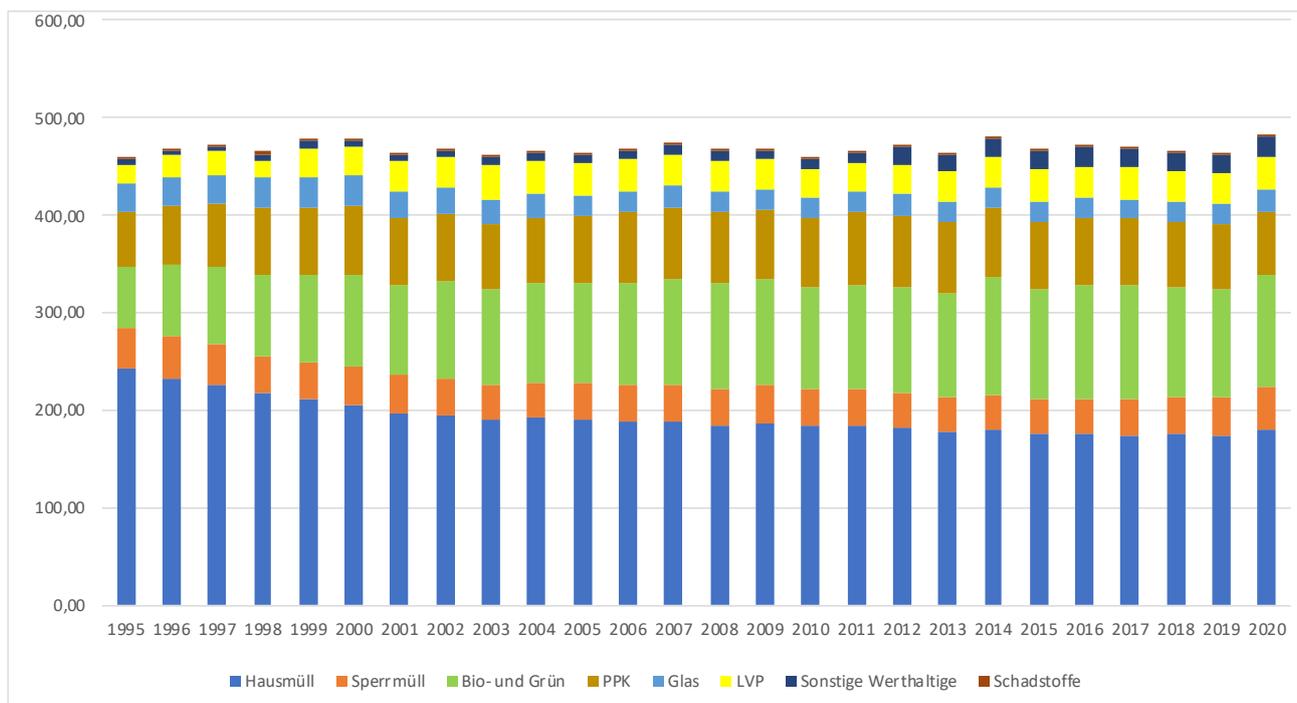


Abbildung 9: Entwicklung der Siedlungsabfallmenge in NRW 1995 - 2020 [LANUV 2022, eigene Grafik.]

Das System der haushaltsnahen Trennung ist aufgrund von Akzeptanz- und Raumproblemen nicht beliebig erweiterbar: der weiteren Auffächerung der erfassten Abfallströme sind quantitative Grenzen gesetzt. Zudem stößt die - abfallpolitisch sinnvolle – Erhöhung der getrennten Sammlung und Verwertung auch in qualitativer Hinsicht an Grenzen, wie sich an einer hohen Zahl an Fehlwürfen bei der „Gelben Tonne“ bzw. bei Bioabfällen zeigt.

2022 wurden Deutschland 2,7 Mio. t LVP erfasst und 1,6 Mio. t aussortiert [Stiftung Zentrale Stelle 2023]. Die Erhöhung des Mengenstroms, sei es durch eine Ausweitung auf stoffgleiche Nicht-Verpackungen (StNVP) oder durch Reduzierung des LVP-Anteils im Restabfall-Anteil der grauen Tonne wird als wichtiger Erfolgsfaktor für die Erreichung der Klimaschutzziele der Abfallwirtschaft gesehen. Allerdings verbleiben aus der LVP-Fraktion sogenannte Mischkunststoffe sowie Sortierreste, die in TAB oder als Ersatzbrennstoffe vorwiegend in der Zementindustrie eingesetzt werden, insgesamt knapp 65% [Vogt et al. 2023, S. 81] (siehe auch Abschnitt „Schutz vor Schadstoffen“). Davon ist ein großer Teil auf Fehlwürfe (=Restabfall) in der „Gelben Tonne“ [Schopen 2022] zurückzuführen. Die Verwertung von LVP soll in Zukunft auch durch das „chemische Recycling“ (siehe Kasten) zu einer Verbesserung der Klimabilanz führen.

### Sammlung und Verwertung von Bioabfällen

Die getrennte Sammlung von Bio- und Grünabfällen wird seit Jahrzehnten praktiziert und ist mittlerweile in der EU verpflichtend eingeführt. Deutschland hat diese Pflicht bereits 2015 umgesetzt. Die Verwertung von Bioabfällen als Kompost oder Gärückstand dient der Bodenverbesserung und damit der Sequestrierung von Kohlenstoff – der dann nicht kurzfristig als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangt.

Biogas aus Vergärungsanlagen stellt eine regenerative Energiequelle dar. Im Jahr 2021 wurden 13,65 Mio. t Abfälle biologisch behandelt, davon 5,3 Mio. t aus der getrennten Sammlung von Bioabfällen, das sind 64 kg pro Einwohner [BMUV 2024]. In Prognosen für das Umweltbundesamt aus den Jahren 2014 bzw. 2020 wurde die zusätzliche Erfassung von 6,4 und 9,1 Mio. t/a, je nach realisiertem Anschlussgrad von 70 % bis 100 % [Krause et al. 2014], bzw. etwa 50 kg je Einwohner und Jahr zusätzlich [Dornbusch et al. 2020], also ca. 4 Mio. t angegeben. Um wesentliche Steigerungen zu erreichen, ist es erforderlich, die Trennung der Bioabfälle auch in dicht besiedelten Wohngebieten und engen Innenstädten durchzusetzen. Dies ist außerordentlich anspruchsvoll aufgrund der räumlichen Gegebenheiten und der Akzeptanz. Die Zunahme der Anlieferung von organischen Abfällen an Anlagen zur Bioabfallbehandlung nimmt in den letzten Jahren nur noch langsam zu [UBA 2023].

Was als Kompost oder Gärückstand direkt in Böden eingearbeitet wird, darf nur geringste Fremdstoffanteile (insbes. Kunststoffe) enthalten – entsprechende Vorgaben zur Güteüberwachung finden sich in § 12 KrWG. „Fehlwürfe“ (andere Restabfälle, Plastiktüten usw.) machen jedoch in einigen Städten bis zu 16 % des Inhalts der Biotonne aus [Kranert et al. 2016]. Die Qualität verschlechtert sich u.a. in Abhängigkeit von der Siedlungsdichte [Bauer 2017]. Bei einer Vorsortierung lassen sich diese Stör- und Schadstoffe nicht vollständig entfernen. Dies gilt u.a. für kleine Kunststoffpartikel, die den Boden als Mikroplastik kontaminieren. Die Bundesregierung hat daher über die Bioabfallverordnung einen Grenzwert von Kunststoffen von 0,5 % (Durchschnitt) bzw. 1 % (nur Biotonne) für die Bioabfallbehandlung am Eingang der Anlagen festgelegt. Dieser wird auch bei guter Überwachung nicht durchgängig erreicht werden können.

## Vorsortierung gemischter Siedlungsabfälle

Die Gewinnung von Wertstoffen direkt aus Haushaltsabfällen ist eine schon seit Jahrzehnten immer wieder diskutierte Vision.<sup>17</sup> Eine automatische Sortierung von Siedlungsabfällen wurde zeitweise als Alternative zur Vortrennung von Verpackungsabfällen diskutiert und auch mit Hilfe vorhandener Sortieranlagen für Leichtverpackungen getestet. Es erwies sich aber schnell, dass die Anlagen der Heterogenität, der hohen Feuchtigkeit, Glasbruch usw. nicht gewachsen waren.

Erfahrungen mit der Trennung von gemischten Siedlungsabfällen wurden über etwa 25 Jahre mit der Mechanisch-biologischen Anlagen (MBA) gesammelt. Heutiges Ziel der MBA ist allerdings lediglich die Abtrennung von Metallen und heizwertreichen Bestandteilen; letztere werden entweder direkt thermisch behandelt oder daraus ein Sekundärbrennstoff hergestellt. Die verbleibende, weitgehend organische Fraktion wurde nach einer biologischen Behandlung (Rotte, Vergärung) auf Deponien abgelagert. Da sich herausstellte, dass diese Fraktion oft nicht die Anforderungen der Deponieverordnung (s.o.) erreichte, wurde eine Zielsetzung der MBA nicht erreicht. Auch die Sortierung von gemischten Gewerbeabfällen [Knappe et al. 2023] führt derzeit noch zu einem nur für TAB verwertbaren Output von etwa 60 % auf Grund mangelnder Wirtschaftlichkeit der stofflichen Verwertung.

### ZRE Hamburg

Bei dem in Bau befindlichen „Zentrum für Ressourcen und Energie“ der Stadtreinigung Hamburg [SRH 2023] sollen neben Polyolefinen auch Glas, Metalle und Papier sowie Kartonagen abgetrennt werden. Diese Sortierung dient dazu, eine heizwertarme und eine heizwertreiche Fraktion für die beiden entsprechend ausgelegten Kessel der TAB herzustellen. Die Anlage wird u.a. über Brecher und Trommelsiebe verfügen, in denen Anteile von 80 bis 100 bzw. 100 bis 250 mm ausgesiebt werden. Die Aussortierung von Plastikabfällen erfolgt dann mit Hilfe von NIR-Identifikationssystemen. Die Stadtreinigung Hamburg geht davon aus, dass der Energiebedarf für die Vorsortierung weniger als 50 kWh / t beträgt und damit weniger als 5% der nutzbaren Energie der thermischen Behandlung ausmacht. Die geplante Entnahme von Kunststoffen liegt bei etwa 1% bezogen auf den der Anlage zugeführten Abfall, um eine ausreichende Qualität für die stoffliche Verwertung sicherzustellen.

Ein ähnliches Konzept wird in der Restabfallbehandlungsanlage Köln, die von der AVG Köln betrieben wird, umgesetzt.

Am Beispiel des ZRE Hamburg lassen sich aktuelle Anstrengungen erkennen, Wertstoffe aus gemischten Siedlungsabfällen vor der thermischen Behandlung auszusortieren. Damit soll vor allem der Anteil an fossilem Kohlenstoff in den Restabfällen gesenkt werden (siehe Abschnitt „TAB als Energielieferant / Beiträge zum Klimaschutz“), sodass ggfs. CO<sub>2</sub>-Zertifikate eingespart werden können und der Heizwert abgesenkt wird, um die Durchsatzleistung zu erhöhen. Darüber hinaus können aussortierte Teilströme kostengünstiger entsorgt werden, und große Störstoffe (Baumwurzeln etc.) gelangen nicht in den Bunker der TAB. Insgesamt hofft man durch die Maßnahmen einen wirtschaftlichen Erfolg zu erzielen.

Außerdem ist absehbar, dass die von der EU-Abfallrahmenrichtlinie [EU 2018] für 2025 vorgegebene „Recyclingquote“ von 65% bezogen auf das Siedlungsabfallaufkommen in Deutschland alleine durch die Verbesserung bestehender Systeme kaum erreicht werden kann, insbesondere nicht nach der

<sup>17</sup> Selbstverständlich können einzelne, brauchbar erscheinende Gegenstände aus dem Siedlungsabfall manuell aussortiert werden. Dies ist in Ländern mit hohen Einkommensdifferenzen der Fall, in denen Menschen aus sozial besonders schwache Schichten ihren Lebensunterhalt durch Sortierung von Abfällen auf Deponien verdienen („waste pickers“, „catadores“...). Unfälle und mangelnde Hygiene sind Ursachen von Krankheiten und erhöhter Sterblichkeit.

Novellierung der Berechnungsmethode. Daher zielt die Vorsortierung direkt vor den Anlagen zur TAB vor allem auf Kunststoffabfälle, die im Hausmüll einen Anteil von 6,7 % ausmachen (lt. Siedlungsabfallanalyse des UBA [Dornbusch et al. 2020]). Ähnliche Überlegungen gibt es auch in anderen europäischen Ländern, vor allem in den Niederlanden und Schweden. In beiden Ländern ist allerdings der Anteil an Kunststoffabfällen im Restabfall deutlich höher als in Deutschland [Obermeier / Lehmann 2023]

### „Circular Economy“

Mit Hilfe von Geschäftsmodellen der „Circular Economy“ (siehe Abschnitt „TAB in der nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie“) sollen Ressourcen im Sinne eines Kaskadensystems deutlich länger und besser genutzt werden.

Die EU-Kommission sucht durch verschiedene Maßnahmen zur Verringerung von Einweg-Verpackungen, die Erhöhung der Recyclingquoten für Siedlungsabfälle sowie schärfere Anforderungen in produktspezifischen Richtlinien die Restabfall-Menge zu verringern. Die Wirkungen dieser Maßnahmen werden abgesehen vom Verbot einiger Plastik-Einwegprodukte nur langfristig sichtbar werden. Eine Intensivierung der stofflichen Verwertung („R8“ in Fig. 1) ist durch die Pflicht zur Nutzung eines „Mindestanteils an Rezyklaten“ in neuen Kunststoffprodukten zu erwarten. Da Grundstoffe, die aus dem „chemischen Recycling“ stammen, zusätzlichen Einsatz fossiler Rohstoffe vermeiden, besteht eine Motivation für die Chemieindustrie zum Bau solcher Anlagen. Aktuell ist für das chemische Recycling erst eine Kapazität von ca. 100.000 t pro Jahr in Europa verfügbar, die bis 2025 auf etwa 1,2 Mio. t wachsen soll [Nageler-Petritz 2023]. In der o.a. C4C-Studie [VCI / VDI 2023, S. 74-79] werden die maximal verfügbaren Recyclingkapazitäten im Jahr 2045 in Deutschland mit 2,23 Mio. t für das „chemische Recycling“ und 3,16 Mio. t für die „mechanische“ Verwertung angegeben; für alle weiteren Plastikabfälle stünde die TAB zur Verfügung.

#### „Chemisches Recycling“

Unter diesem Sammelbegriff werden zahlreiche Verfahren zusammengefasst, bei denen Monomere oder chemische Grundstoffe gewonnen werden können. Anstelle der bei der thermischen Abfallbehandlung notwendigen vollständigen Oxidation organischer Abfälle im Wesentlichen zu CO<sub>2</sub> und Wasserdampf werden jedoch Öle bzw. Syngas für die Verarbeitung in Raffinerien produziert. Gemischte und verschmutzte Kunststoffreste eignen sich allerdings auch nur begrenzt für Pyrolyse- und Vergasungsanlagen, so dass weitere Aufbereitungsschritte erforderlich sind, die diesen Weg erheblich verteuern. Dies gilt erst recht für die Gewinnung von Monomeren; hier können bisher nur sortenreine Kunststoffabfälle eingesetzt werden, die in der Regel dann auch direkt mechanisch aufbereitet werden könnten. Versuche zeigten, dass mit dem heute nicht mehr zulässigen Flammschutzmittel HBCDD belastete Polystyrol-Abfälle mit spezifischen Lösemittelgemischen aufbereitet werden können (CreaSolv-Verfahren). Eine erste Pilotanlage in den Niederlanden für Polystyrol hat kürzlich ihren Betrieb aufgenommen. (Zu Pyrolyse und Vergasung siehe [Quicker et al. 2017].)

Geschäftsmodelle der „Circular Economy“ und Produktdesign müssen Hand in Hand gehen, damit ökonomisch interessante Nutzungskaskaden entstehen. Daher hängt der Geschäftserfolg auch von Materialvielfalt bzw. Produktzusammensetzung ab, die Verwertbarkeit, Reparierbarkeit oder einen Austausch von Modulen begünstigen. Dies wird von der EU durch entsprechende Änderungen der Ökodesign-Richtlinie [EU 2022] wie auch durch Fortschritte bei der Standardisierung (Beispiel Kunststoff-Recycling und Rezyklate, CEN/TC249 [CENELEC 2023]) der „R“-Strategien auf der Produkt-

ebene unterstützt. Weitere Fortschritte sind von der Digitalisierung zu erwarten, u.a. durch den Einsatz „künstlicher Intelligenz“ zur Erkennung gebrauchter Produkte oder Kunststoffsorten im Abfallstrom.

Die bisherigen Erfahrungen mit solchen Geschäftsmodellen sprechen für höhere Akzeptanz bei B2B- und weniger bei B2C-Beziehungen. Es bedarf erheblicher Änderungen von Konsumgewohnheiten wie auch ökonomischer Anreize, damit Waren aus zweiter Hand, instandgesetzte Gebrauchtgeräte usw. ihren Marktanteil steigern können. Sofern Verbraucher dadurch Kosten einsparen, ist der „Rebound-Effekt“ zu berücksichtigen, d.h.: ersparte Mittel können für den Erwerb oder Nutzung anderer Produkte oder Ressourcen eingesetzt werden, also ggf. zusätzlichen Ressourcenverbrauch zur Folge haben. Zirkuläre Geschäftsmodelle beziehen sich in der Regel auf höherwertige Produkte, vor allem Elektro- und Elektronikgeräte oder Fahrzeuge, die ohnehin nicht über die „graue Tonne“ gesammelt werden. Daher werden die Strategien „R4“ bis „R7“ zu der – dringend benötigten – Verringerung des Ressourcenverbrauchs, aber nur wenig zu einer Senkung der Hausmüllmenge oder Gewerbeabfall-Menge beitragen.

### Änderungen von Rahmenbedingungen für den internationalen Handel

Behandelte (Siedlungs-) Abfälle werden zumeist mit der Abfallschlüsselnummer (ASN) 19 12 12 deklariert („sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen ...“). Restriktive Politik zum Export von Abfällen oder entsprechende Änderungen der Basel-Konvention führen zu einem höheren Aufkommen von zu behandelnden Abfällen in Europa. Der Einfuhrstopp, den China im Jahre 2018 für eine Vielzahl von Materialien wie Altkunststoffe und bestimmte Altpapierqualitäten verhängte, führte neben einer Umlenkung der Exporte in andere Länder wie Malaysia und Vietnam auch zu einer höheren Auslastung der inländischen TAB [Reichert 2021].

### Prognosen

In der Prognos-Studie „Perspektiven der TAB – Roadmap 2040“ wurde ein Rückgang an thermisch zu behandelnden Abfällen um 4 bis 6 Mio. t pro Jahr bis 2040 prognostiziert. Die Autoren gehen von einer stringenteren Umsetzung der rechtlichen Vorgaben, vor allem in Bezug auf Verpackungs-, Gewerbe- und Bioabfälle, aus. Durch Schließung von Kohlekraftwerken, in denen bisher heizwertreiche Abfallfraktionen mitverbrannt wurden, notwendige Vorbehandlung von Klärschlämmen zur Phosphor-Rückgewinnung und weitere Effekte wird allerdings eine zusätzliche Kapazität von etwa 3 Mio. t / a. benötigt [Hoffmeister et al. 2020].

Im Jahr 2019 veröffentlichte das Öko-Institut Darmstadt [Dehoust / Alwast 2019] eine Studie, in der in drei Szenarien die aktuelle Struktur, die Auslastung von MVA's und EBS-Kraftwerken, getrennt nach Regionen, Eigentümerstruktur und Modernisierungsbedarf dargestellt wurde. Die Autoren gehen von einer potentiellen Reduktion des Inputs in TAB in Höhe von rund 6,0 Mio. t pro Jahr aus; auch hier wird vor allem die Bioabfall-Verwertung als wesentlicher Hebel gesehen.

In der für das UBA erstellten Studie zur Prognose für das Jahr 2030 [Vogt et al. 2023] wird ausgehend von der EU-Vorgabe für die Verwertung des Siedlungsabfalls eine Verringerung des Restmüll-Aufkommens von aktuell rd. 20,8 Mio. t auf 14,8 Mio. t errechnet. Entsprechend erhöht sich (bei einem konstanten Siedlungsabfall-Aufkommen) der Anteil der abgetrennten Wertstoffe. Die TAB bleibt

auch in diesen Überlegungen relevant; die Autorinnen und Autoren rechnen mit einer entsprechenden Verminderung des Abfallaufkommens für TAB, aber prognostizieren auch eine Verschiebung von Restabfällen aus bisheriger Mitverbrennung in Kohlekraftwerken (v. a. EBS, Rejekte aus PPK-Verwertung) in TAB-Anlagen.

In der Studie zu einer klimaneutralen Chemiewirtschaft in Deutschland wird von einer möglichst vollständigen Umstellung der Rohstoffbasis auf nachwachsende Ressourcen und Rezyklate ausgegangen, wobei TAB mit einer Kapazität von ca. 28 Mio. t pro Jahr angesetzt wurden (siehe Abb. 8 im Abschnitt „Energie aus TAB / Beiträge zum Klimaschutz“ [VCI / VDI 2022]). Dies entspricht in etwa der heute vorhandenen Kapazität an MVA und EBS-Kraftwerken.

Entgegen früheren Prognosen, die eine Verringerung des Restabfallaufkommens oder Verbesserungen bei der Sortierung von Abfallfraktionen vorhersagten, so etwa die mehrfachen Anläufe zur Verbesserung des Verpackungsrecyclings, sank die spezifische Abfallmenge nicht signifikant oder gar nicht. Auch die Vorhersage des Bundesumweltministeriums, dass ab 2020 keine Deponien mehr benötigt würden [Radde 2005], gehört in die Kategorie politischer Wünsche, die an physikalischen bzw. technischen Realitäten scheiterten. Die vom NABU herausgegebene Studie [Alwast 2009] aus dem Jahr 2009, die thermische Überkapazitäten von 7 bis 22 % auf Grund des Rückgangs von Haus- und Sperrmüll bzw. Gewerbeabfall von 23 bzw. 7 Mio. t (bereits im Status quo-Szenario) für das Jahr 2020 prognostizierte, lag ebenfalls aus heutiger Sicht falsch. Hier hatte man insbesondere die Umsetzung von Potenzialen des werkstofflichen Recyclings deutlich überschätzt.

Schad- und Störstoffe werden weiterhin die Herstellung qualitativ brauchbarer Rezyklate behindern, zumal in den kommenden Jahrzehnten belastete Abfälle u.a. aus dem Baubereich zur Entsorgung anstehen.

Im Gegenzug werden die Ausdehnung der getrennten Sammlung vor allem für Bioabfälle, bessere Sortiertechniken, Verfahren des „chemischen Recyclings“ und Geschäftsmodelle der „Circular Economy“ mittel- bis langfristig zu einer Verringerung des Restabfalls beitragen.

Es ist daher davon auszugehen, dass die thermisch zu behandelnden Abfallmengen nur langsam abnehmen. Gleichzeitig wird die Umstellung der chemischen Industrie auf nachwachsende Rohstoffe den Anteil von CO<sub>2</sub> fossilen Ursprungs in Anlagen zur TAB langfristig senken.

## Klimaoptimale und umweltverträgliche Abfallbehandlung in Europa

Die Europäische Union erlässt Regelungen für die Abfallwirtschaft der Mitgliedstaaten. Diese Richtlinien – u.a. die Abfallrahmenrichtlinie, die Deponierichtlinie, die Verpackungsrichtlinie - werden von den Mitgliedstaaten in ihre jeweilige Gesetzgebung implementiert. Die in den Richtlinien gesetzten Ziele werden jedoch von vielen Ländern nicht erreicht. So ging die Kommission 2011 in ihrem „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ davon aus, dass „spätestens 2020 Abfall als Ressource bewirtschaftet [wird]. Das Pro-Kopf-Abfallaufkommen sinkt in absoluten Zahlen (...). Mehr und mehr Werkstoffe, besonders solche, die erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben, und kritische Rohstoffe, werden recycelt (...). Die energetische Verwertung ist auf nicht recyclingfähige Werkstoffe begrenzt, Deponierungen gibt es praktisch nicht mehr, und ein hochwertiges Recycling ist sichergestellt.“ [EU 2011]

Tatsächlich wurden die Ziele weit verfehlt: Das durchschnittliche Abfallaufkommen pro Kopf sinkt nicht, und biologisch abbaubare Abfälle werden weiterhin in großem Umfang deponiert (siehe Abb. 10 [CEWEP 2023]).

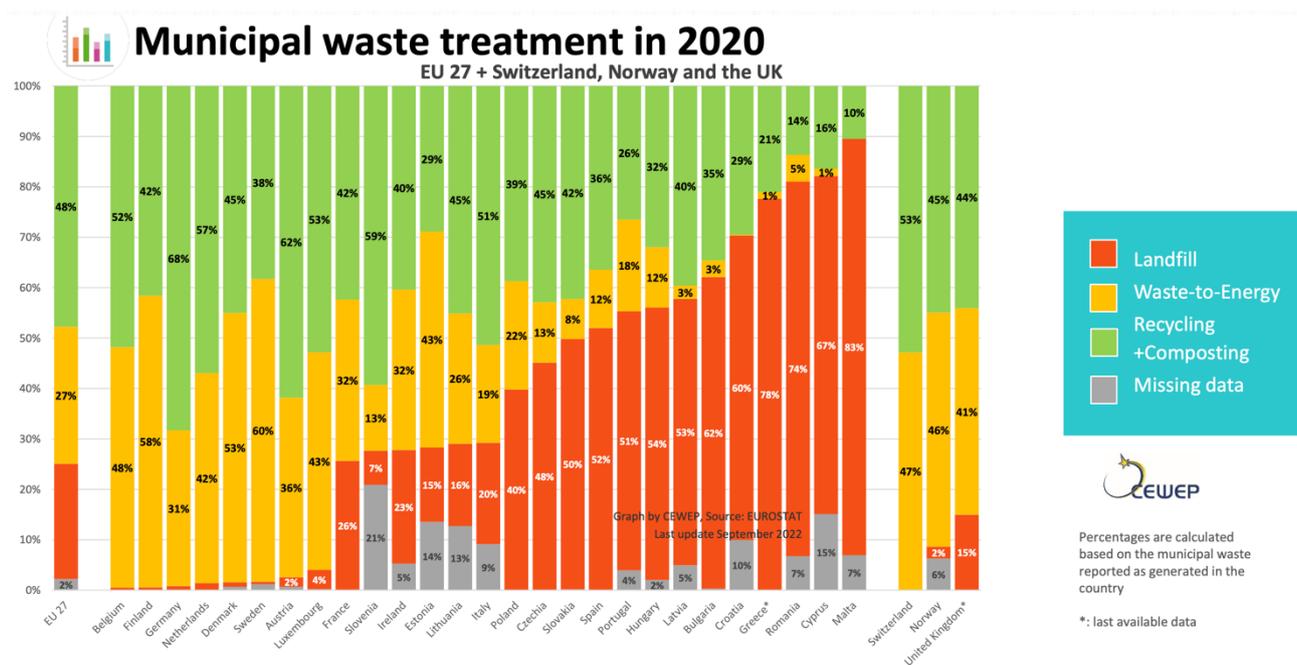


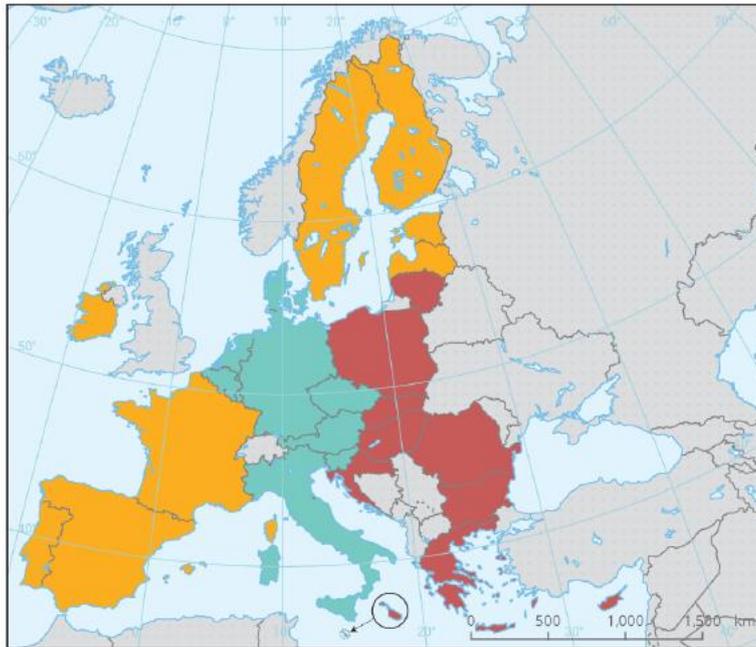
Abbildung 10: Behandlung von Siedlungsabfällen in den EU-Mitgliedsländern im Jahr 2020

Nach derzeitiger Rechtslage dürfen 2035 nur noch maximal 10 % des Siedlungsabfalls abgelagert werden, allerdings keine getrennt gesammelten Abfälle oder Bioabfall. Zwar sank der Anteil des deponierten Siedlungsabfall von 61 % (1990) auf 23 % (2020), doch damit landen immer noch ca. 53,5 Mio. t häuslicher Abfälle auf Deponien [EU 2023b] mit einem hohen Anteil an Bioabfall sowie weitere ca. 80 Mio.t Gewerbeabfälle [EEA 2023]. Aus der europäischen Abfallwirtschaft emittiertes Methan, 98 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entsprechend, umfasst fast 24% aller Methan-Emissionen in Europa [EEA 2022].<sup>18</sup>

Die UNEP sieht die Minderung der Deponierung als einfachsten Weg der Emissionsverringderung von Methan in Europa an [UNEP & Climate Air Coalition 2021]. Deponien mit reaktivem Inhalt wie Siedlungsabfall oder organischen Gewerbeabfällen stellen darüber hinaus eine erhebliche Gefahr für das Grundwasser dar. Ihre Schließung ist also vordringlich und wäre ein großer Beitrag zu der von der EU seit 2015 mit vielen Programmen vorangetriebenen „Circular Economy“ und der Methan-Strategie.

Wie eine jüngst erschienene Studie der europäischen Umweltagentur zeigt [EU 2023b], werden bereits die für 2025 gesetzten Zwischenziele von 55% stofflich verwerteten Siedlungsabfällen sowie 65% Verwertungsquote speziell für Verpackungsabfälle nicht erreicht. In der folgenden Abbildung wird das Verfehlen der Ziele dokumentiert.

<sup>18</sup> Die Daten wurden dem aktuellen GHG Emissions Inventory entnommen.



Referenzdaten: ©ESRI

- Mitgliedstaaten, bei denen im Hinblick auf beide Zielvorgaben keine Gefahr der Verfehlung besteht
- Mitgliedstaaten, bei denen im Hinblick auf die Zielvorgabe für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen eine Gefahr der Verfehlung besteht, nicht aber im Hinblick auf die Zielvorgabe für das Recycling aller Verpackungsabfälle
- Mitgliedstaaten, bei denen im Hinblick auf beide Zielvorgaben eine Gefahr der Verfehlung besteht
- Nicht erfasst

Abbildung 11: Verfehlen der Zwischenziele der EU-Abfallwirtschaft 2025

Selbst unter der Voraussetzung, dass die Ziele des Circular Economy Package der EU mit 65 % Recyclingquote der Siedlungsabfälle 2035 sowie zusätzlich eine stoffliche Verwertung von 68 % der Industrie- und Gewerbeabfälle erreicht werden, verbleiben ca. 142 Mio. t Restabfälle pro Jahr. Allerdings stehen dieser Menge im Jahr 2035 vermutlich nur eine TAB-Kapazität von 90 Mio. t sowie eine Kapazität von 11 Mio. t in Anlagen zur Mitverbrennung von Abfällen (Zementwerke etc.) gegenüber [CEWEP 2019].

Laut einer Studie zur Behandlung neun wichtiger Abfallströme in Europa lassen sich Emissionen von 137 Mio. t Treibhausgasen (gemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) bei konsequentem Vollzug des EU-Rechts vermeiden. Abfallwirtschaft und Recyclingindustrie sehen darüber hinaus Potenziale zu höherer Verwertung von Verpackungen, Abbruchabfällen und Elektronikschrott – die Techniken dafür sind vorhanden oder in der Entwicklung [CE Delft / Prognos 2023].

Wenn es gelingt, bei den abfallwirtschaftlichen „Vorreitern“ Deutschland, Benelux, Skandinavien und Österreich durch Übererfüllung der vorgegebenen Ziele Kapazitäten zur TAB freizubekommen, wäre es im Sinne des europäischen Klimaschutzes geboten, diese zur Deckung des Bedarfs in anderen EU-Mitgliedstaaten einzusetzen. Damit könnte das Verbot der Deponierung von Siedlungsabfällen flankiert und die Methan-Emissionen aus Deponie schneller reduziert werden. Nach wie vor gibt es Mitgliedsländer, in denen so gut wie keine getrennte Sammlung von verwertbaren Abfällen stattfindet. Es ist daher dringlich, Recycling-Anlagen wie auch TAB-Kapazitäten dort zu planen, wo stoffliche Verwertung bisher wenig erfolgreich ist.

## Fazit: Zukunft der thermischen Abfallbehandlung

Die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) wie auch der europäische Circular Economy Action Plan sollten zu einem zunehmenden Ersatz von Primärressourcen durch Rohstoffe aus der Verwertung von Abfällen bzw. Altprodukten führen. Eine Verlangsamung des Verbrauchs von Ressourcen sollte auch durch die Verlängerung der Gebrauchsdauer von Produkten und Verbesserung des Produktdesigns mit dem Ziel besserer (stofflicher) Verwertbarkeit nach Gebrauch erreicht werden.

Dies wird perspektivisch zu einer Verringerung des Restabfallaufkommens und damit zu einer geringeren Auslastung von Anlagen zur TAB führen. Der Umfang der Verringerung lässt sich nicht verlässlich prognostizieren, weil

- der Erfolg von Geschäftsmodellen der „Circular Economy“ von zahlreichen ökonomischen und sozialen Rahmenbedingungen abhängt, u.a. Verbraucherverhalten, Durchsetzung der Produzentenverantwortung, Kosten des Primärmaterials und damit von der tatsächlich erreichten Recycling-Quote,
- unklar ist, welche Stoffströme z.B. infolge von verändertem stofflichen oder chemischen Recycling entstehen und wie diese behandelt werden können,
- noch nicht abschließend geklärt ist, ob Einsatzquoten für Kunststoff-Rezyklate (lt. Entwurf für eine EU-Verpackungsverordnung) in welcher Höhe eingeführt werden,
- ggf. weitere hygienische bzw. chemikalienrechtliche Anforderungen der stofflichen Verwertung entgegenstehen,
- Menge und Zeitpunkt des Anfalls von zu beseitigenden Produkten (mit PFAS, HBCD usw. belastete Materialien) aus langfristigen Anwendungen, vor allem bei Gebäuden, nicht bekannt sind,
- Prognosen zur Entwicklung der Mengen und der Zusammensetzung von Abfällen aus früheren Jahren gravierende Fehleinschätzungen aufwiesen und die anfallenden Mengen oft massiv unterschätzt wurden,
- in früheren Jahren politische Visionen mit z.T. zweifelhaftem technischen Hintergrund für Kapazitätsplanungen herangezogen wurden.

TAB spielen in der NKWS eine unverzichtbare Rolle bei der Beseitigung hygienischer Risiken, der sicheren Zerstörung von schadstoffbelasteten Abfällen und der energetischen Nutzung von Abfällen anderer Strategien der Circular Economy. Die Optimierung der Gewinnung von Metallen aus Schlacken sowie perspektivisch aus Rauchgasreinigungsprodukten und eine verbesserte Aufbereitung der Rückstände für den Baubereich stellen zusätzliche Beiträge für ein nachhaltigeres Ressourcenmanagement dar.

Aus Sicht der Energiewirtschaft unterstützt der kontinuierliche Betrieb von TAB die Absicherung der Grundlast im Stromnetz und die Stabilisierung der Netzfrequenz. Entsprechend qualifizierte TAB-Anlagen stellen darüber hinaus Minutenreserve für die Spitzenlast bereit. Mit etwaigen Stromüberschüssen können TAB-Anlagen in die Produktion von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) aus Elektrolysen einsteigen, wenn die rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst werden. Unter welchen Rahmenbedingungen dies wirtschaftlich tragfähig ist, könnten Pilotprojekte zeigen.

Lokal spielen TAB-Anlagen eine bedeutende Rolle in der Wärmeversorgung durch Auskopplung von Fernwärme und Prozessdampf. Im Verbund mit anderen Energieträgern können TAB-Standorte („Sektorenkopplung“) ihre wichtige Rolle für die Energieversorgung, namentlich in der Fernwärmeversorgung als Grundlast, ausbauen. Auch beim Ausbau von Fernkältenetzen können TAB eine wesentliche Rolle spielen.

Mit zunehmendem Einsatz von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen und Rezyklaten, vor allem bei Kunststoffen, wird sich auch der Charakter des CO<sub>2</sub> im Abgas der Abfallverbrennung verändern. Diese Entwicklung wird nur langsam vorangehen, weil langfristig genutzte Produkte aus dem „fossilen Zeitalter“ noch über Jahrzehnte zur thermischen Behandlung anstehen werden. Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> und dessen Nutzung als Baustein für eine „defossilisierte“ Chemieindustrie sind daher sinnvolle Schritte im Sinne der deutschen Klimastrategie. Die derzeit verfügbaren Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung, insbesondere die Aminwäsche, weisen einen hohen Energiebedarf auf, sodass sich hier der Beitrag der TAB zur Energieversorgung deutlich verringern könnte. Die Nutzung von CO<sub>2</sub> wie auch von H<sub>2</sub> sollte möglichst ortsnah erfolgen, um lange und ggf. aufwendige Transportwege zu vermeiden.

Es ist mithin sinnvoll, Umbau, Neubau und Rückbau von TAB ebenso wie die Entwicklung von Anlagen zur Sortierung, Verwertung oder Wiedernutzung von Abfällen unter Setzung von klaren politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen dem Markt zu überlassen. Notwendig sind

- an realistischen Rahmenbedingungen orientierte Ziele
- effizientes Monitoring der Güter- und Abfallströme zur Messung der Zielerreichung
- Überprüfung der verschiedenen NKWS-Maßnahmen im Zusammenspiel mit der TAB
- Unterstützung einer technikoffenen Entwicklung durch politische Vorgaben
- sektorübergreifende Betrachtungsweise
- Neubau von Anlagen nur dort, wo nachhaltige Synergien z. B. durch Abwärmenutzung entstehen
- ggf. auch die Förderung von innovativen CO<sub>2</sub>-Abscheideverfahren.

Die Dynamik in der Kreislaufwirtschaft im Zusammenhang mit der Energiewirtschaft und der Transformation der Industrie zur Klimaneutralität ist gewaltig. Dies sollte bei der Integration der TAB in die NKWS beachtet werden und wird bei der Fortschreibung dieser Standortbestimmung Berücksichtigung finden.

## Quellenangaben

AGFW (2021): AGFW-Merkblatt 309 Teil 6 - Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte - Emissionsfaktoren nach Arbeitswert- und Carnotmethode

AGFW (2024): Fragen und Antworten zur Fernwärme; <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/energie-wende-politik/ueberblick-fakten-und-antworten-zu-fernwaerme>, aufgesucht am 06.05.2024

AVG (2023): Emissionswerte der AVG Köln 2023, eigene Grafik. [https://www.avgkoeln.de/umwelt/umweltschutz/Pflichtanzeige\\_Emissionen\\_2023.pdf](https://www.avgkoeln.de/umwelt/umweltschutz/Pflichtanzeige_Emissionen_2023.pdf), abgerufen am 25.04.2024

E. Allegrini, A. Maresca, M.E. Olsson (2014): Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes, *Waste Management* **34** (9) 1627-1636; <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.003>

H. Alwast (2009): Ergebnisse aus der durch die Prognos AG durchgeführten Untersuchung: "Der Abfallmarkt in Deutschland und Perspektiven bis 2020". [https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/091105\\_nabu\\_alwast\\_dialogforum\\_kreislaufwirtschaft.pdf](https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/091105_nabu_alwast_dialogforum_kreislaufwirtschaft.pdf), aufgesucht am 20.06.2023

Anonym (2023): <https://bellona.org/news/industry/2022-03-oslo-leading-by-example-worlds-first-co2-capture-and-storage-on-waste-incinerator-to-become-reality-in-2026>, aufgesucht am 03.05.2023 sowie <https://waste-management-world.com/waste-to-energy/waste-to-energy-an-industry-reinventing/>, aufgesucht am 23.12.2013

F. Ausfelder et al. (2017): »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München

Bauer, Eva-Maria (2017): Die Qualität der Bioabfallsammlung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur und dem Sammelssystem im Bezirk Graz-Umgebung urn:nbn:at:at-ubg:1-110815

M. Beckmann, P. Danz, R. Deike et al. (2022): Abfallverbrennung in der Zukunft. Positionspapier der ProcessNet-Fachgruppe „Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung“, S. 36 (Hrsg.: DECHEMA und VDI-GVC) Frankfurt

BMUV (2017): [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/kwrg\\_leitfaden\\_abfallhierarchie\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/kwrg_leitfaden_abfallhierarchie_bf.pdf), aufgesucht am 27.03.2024

BMUV (2024): <https://www.bmuv.de/themen/kreislaufwirtschaft/statistiken/bioabfaelle> , aufgesucht am 23.02.2024

R. Breer, S. Mlodoch (2021): Schutz der Gesundheit und der Umwelt durch Hygienisierung und Neutralisierung von Krankheitserregern und Schadstoffe, <https://www.vku.de/themen/infrastruktur-und-dienstleistungen/publikation-bedeutung-der-thermischen-abfallbehandlung-fuer-die-oeffentliche-hygiene/>, aufgesucht am 12.05.2023

H. Brunn et al. (2023): PFAS: Forever chemicals – persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites, *Environ Sci Eur* **35**: 20; <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>

P. H. Brunner, H. Rechberger (2015): "Waste to energy – key element for sustainable waste management", *Waste Management* **37**, 3–12.

BUND (2023): Ressourcenschutz heißt drastische Verringerung des Ressourcenverbrauchs, BUND-Positionen74, Berlin; [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/ressourcen\\_und\\_technik/ressourcen-schutz-verbrauch-position-bund.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/ressourcen-schutz-verbrauch-position-bund.pdf); aufgesucht am 12.12.2023

Bundesregierung (2021): Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV)

Bundesregierung (2023): Entwurf eines Gesetzes zur Verbesserung des Klimaschutzes beim Immissionsschutz, zur Beschleunigung immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren und zur Umsetzung von EU-Recht, BT-Drs. 20/7502, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/075/2007502.pdf>

R. Bunge (2016): Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser – oder nicht? BERLINER RECYCLING- UND ROHSTOFFKONFERENZ 2016, S. 79-91 (vivis, Berlin)

B. Carney, A. Tridibesh Dey, T. Karlsson, M. Wang (2023): Chemical simplification and tracking in plastics, Science **382**, Issue 6670, 525; DOI: 10.1126/science.adk9846, abgerufen am 16.02.2024

CE Delft & PROGNOS: CO<sub>2</sub> reduction potential in European waste management (Studie im Auftrag von FEAD, CEWEP, Dutch Waste Management Association, RDF Industry Group), 2022. [https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2022/01/CO2-Study\\_Final\\_202201.pdf](https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2022/01/CO2-Study_Final_202201.pdf), aufgesucht am 7.3.2023

CENELEC (2023): Work Programme 2023, <https://www.cenelec.eu/media/CEN-CENELEC/News/Publications/2023/workprog2023.pdf>

CEWEP (2019): <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2019/07/CEWEP-residual-waste-calculation-explanations-final.pdf>, aufgesucht am 18.6.2023

CEWEP (2023): Municipal waste treatment, abgeleitet aus den EuroStat-Daten lt. [www.cewep.eu](http://www.cewep.eu), abgerufen am 21.06.2023

I. D'Adamo, M. Mazzanti, P. Morone, P. Rosa (2022): Assessing the relation between waste management policies and circular economy goals, Waste Management **154**, 27-35, ISSN 0956-3X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.031>.

A. De Blaeij et. al. (2019): Clean Material Recycling Project – Study for the development of an evidence-based approach as support to regulators when assessing how to manage the presence of substances of concern in recycled materials. Study commissioned by DG Environment. European Commission, Brussels.

G. Dehoust, H. Alwast (2019): Kapazitäten der energetischen Verwertung von Abfällen in Deutschland und ihre zukünftige Entwicklung in einer Kreislaufwirtschaft. Hrsg: Öko-Institut Darmstadt

R. de Man (2022): Circularity dreams denying physical realities. In “The Impossibilities of the Circular Economy - Separating Aspirations from Reality” (Eds.: Harry Lehmann, Christoph Hinske, Victoire de Margerie, and Aneta Slaveikova Nikolova), 3-10, Routledge (2022); ISBN: 978- 1- 032- 15443- 5

DGAW (2022): “Is the EU taxonomy leading us into a waste treatment emergency?” [https://www.dgaw.de/de/news-presse/presseerklarungen/details-1?tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&tx\\_news\\_pi1%5Bcontrol%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=796&cHash=037e9df05f1883c6327ecdbf0febde8f](https://www.dgaw.de/de/news-presse/presseerklarungen/details-1?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontrol%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=796&cHash=037e9df05f1883c6327ecdbf0febde8f), aufgesucht am 12.06.2023

H. J. Dornbusch et al. (2020): “Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien“, UBA Texte 113/2020, Dessau

DVGW (2021): Die Gasnetze sind bereit für Wasserstoff; [https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energie-wende/h2-wochen-factsheet-gasnetze-ready-for\\_h2-dvgw.pdf](https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energie-wende/h2-wochen-factsheet-gasnetze-ready-for_h2-dvgw.pdf)

Dyckerhoff (2024): Müllverbrennungsasche als Rohstoffkomponente in der Zementherstellung. BMBF-Projekt ENSAR-ZEM. [www.dyckerhoff.com](http://www.dyckerhoff.com), abgerufen am 28.04.2024

EEA (2022): Methane emissions in the EU: the key to immediate action on climate change; <https://www.eea.europa.eu/publications/methane-emissions-in-the-eu>; aufgesucht am 22.02.2024

EEA (2023): Amounts and share of waste deposited in landfills, by type of waste category, EU-27; <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/amounts-and-share-of-waste-3>; aufgesucht am 27.03.2024

Enfinium (2023): <https://enfinium.co.uk/enfinium-announces-plans-for-up-to-800m-investment-in-carbon-capture-project/>, aufgesucht am 26.04.2024

EU (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa, KOM (2011) 571 endgültig, 20.09.2011; [https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009\\_2014/documents/com/com\\_com\(2011\)0571\\_/com\\_com\(2011\)0571\\_de.pdf](https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/com/com_com(2011)0571_/com_com(2011)0571_de.pdf), aufgesucht am 18.06.2023

EU (2018): RICHTLINIE (EU) 2018/851 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Amtsblatt L 150/109-140 v. 14.06.2018

EU (2020a): Mitteilung der Kommission: Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa vom 11.03.2020, COM (2020) 98 final

EU (2020b): REGULATION (EU) 2020/852 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088, OJ L 198/13-43

EU (2022): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte...; COM(2022), 142 final

EU (2023a): REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL Establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020, Proposal, COM (2023) 160 final, 16.03.2023

EU (2023b): Ermittlung der Mitgliedstaaten, bei denen die Gefahr besteht, dass sie die Zielvorgaben für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen bis 2025, für das Recycling von Verpackungsabfällen bis 2025 und für die Verringerung der Deponierung von Abfällen bis 2035 nicht erreichen. COM (2023) 304 final von 08.06.2023

EUWID (2023): "BMUV skizziert erste Eckpunkte für Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie", EUWID Recycling und Entsorgung vom 03.03.2023

EMF (oD): Ellen McArthur Foundation: "Circular Economy Introduction", <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>, aufgesucht am 17.04.2023

M.K. Eriksen, A. Damgaard, A. Boldrin, T.F. Astrup (2018): Quality Assessment and Circularity Potential of Recovery Systems for Household Plastic Waste, J. Ind. Ecol. 23 (1):156-168

A.L. Fabricius, M. Renner, M. Voss et al. (2020): Municipal waste incineration fly ashes: from a multi-element approach to market potential evaluation; Environ Sci Eur **32**, 88 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00365-y>

M. Fabricius, D. Ø. Tarp, T. W. Rasmussen, A. Arabkoohsar (2020): Utilization of Excess Production of Waste-Fired CHP Plants for District Cooling Supply, an Effective Solution for a Serious Challenge; Energies **13**: 3319; doi:10.3390/en13133319

S. Flamme, J. Hanewinkel, P. Quicker, K. Weber (2018): Energieerzeugung aus Abfällen. Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. UBA Texte 51/2018, Dessau

H. Förster, Th. Thajudeen, Ch. Funk, W. Peukert (2016): Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants, Waste Management, Volume 52, 2016, Pages 346-352, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.050>.

M. Franke, K. Reh, P. Hense (2016): Ökologische Bewertung der stofflichen und energetischen Verwertung von Alt-kunststoffen. Vortrag bei der Fachkonferenz „Kunststoffverwertung als Erfolgsfaktor der Kreislaufwirtschaft“ (Akademie Dr. Obladen), Dortmund

Fraunhofer IPB (2024): ASHCON – Aufbereitete Müllverbrennungsgasche als Ausgangstoff bei der Betonherstellung; <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/ashcon.html>, aufgesucht am 12.05.2023

- H. Friege, B. Kummer, K. G. Steinhäuser, J. Wuttke, B. Zeschmar-Lahl (2019): How should we deal with the interfaces between chemicals, product and waste legislation? *Environ Sci Eur* 31: 51 (2019)  
<https://doi.org/10.1186/s12302-019-0236-7>
- H. Friege (2022): "Chancen und Grenzen der „Circular Economy“: Erkenntnisse aus der BMBF-Fördermaßnahme ReziProK", *Müll und Abfall* 54 (11), 609-619.
- H. Friege, K. Kümmerer: Practising Circular Economy: Stumbling Blocks for Circulation and Recycling. In "The Impossibilities of the Circular Economy - Separating Aspirations from Reality" (Eds.: Harry Lehmann, Christoph Hinske, Victoire de Margerie, and Aneta Slaveikova Nikolova), 259 - 271, Routledge (2022); ISBN: 978- 1- 032- 15443- 5
- H. S. Gebhard (2023): Analyse von verpackungsbezogenen Nachhaltigkeitsstrategien ausgewählter Unternehmen der Milchindustrie in Bezug auf die neue Verpackungs- und Verpackungsabfallverordnung der Europäischen Union. Masterarbeit an der Universität Wien.
- A. Heidemann et al. (2022): Patent DE 10 2021 108 322.2 Bindemittel für Baustoffe, Herstellungsverfahren dafür und Anlage zur Ausführung dieses Verfahrens <https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/register?AKZ=1020211083222&CURSOR=0>
- P. Hirsch, C. Schempp (2020): "Categorisation System for the Circular Economy", (ed.: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation), Brussels, 2020. [https://ec.europa.eu/info/publications/categorisation-system-circular-economy\\_en](https://ec.europa.eu/info/publications/categorisation-system-circular-economy_en), aufgesucht am 25.11.2022
- J. Hoffmeister, B. Birnstengel, A. Häusler, M. Faulstich (2020): Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung - Roadmap 2040, Düsseldorf (Auftraggeber: ITAD)
- ISWA Task Force on Resource Management (2015): „Circular Economy: Circles, Loops, and Cascades“, (Ed.: ISWA), Wien
- ITAD (2023): Jahresbericht der ITAD 2022
- ITAD (2024): Mitteilung der ITAD vom 19.01.2024
- J. Jakob (2023): CCU/CCS – CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie für die thermische Abfallbehandlung, in „Bioabfall- und stoffliche Verwertung V“ (Hrsg.: K. Wiemer, M. Kern, T. Raussen), S. 301-306, Witzenhausen
- S. Kaza, L. Ya, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden. (2018): "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050." Overview booklet. World Bank, Washington, DC. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
- A.H. Kanhar, Shaoqing Chen, Fei Wang (2020): Incineration Fly Ash and Its Treatment to Possible Utilization: A Review. *Energies* 13(24): 6681 <https://doi.org/10.3390/en13246681>
- R.H. Karpf, V. Dütge (2016): Wo treibt uns der CO<sub>2</sub>-Wahnsinn hin? Ist eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung hinter Abfallverbrennungsanlagen wirklich zielführend?, *Energie und Abfall* 13 (2016); <https://www.ask-eu.de/default.asp?Menue=20&ArtikelPPV=27982>, aufgesucht am 03.05.2023
- F. Knappe, N. Muchow, R. Oetjen-Dehne et al. (2023): Erarbeitung von Grundlagen für die Evaluierung der Gewerbeabfallverordnung, Umweltbundesamt TEXTE 47/2023
- P. Krause, R. Oetjen-Dehne, I. Dehne, D. Dehnen, H. Erchinger: Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen. UBA-Texte 84/2014, Dessau
- Koalitionsvertrag (2021): Mehr Fortschritt wagen. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)
- M. Kranert, L. Böhme, A. Fritzsche et al. (2016): Einflussgrößen auf die separate Bioguterfassung unter besonderer Berücksichtigung der Qualität. Köln (Hrsg.: EdDE e.V.)

K. Kuchta und V. Enzner (2015): Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen - Bewertung der Ressourceneffizienz; EdDE-Dokumentation Nr. 17, S. 8

LAGA (2021): Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes der Bund-/ Ländergemeinschaft Abfall (LAGA Nr. 18), Anlage 1 (Stand Juni 2021)

LANUV (2022): Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen 2020, Fachbericht 141

J. Manns (2023): Konzepte zur integrierten Verwertungsanlage der Zukunft. In: „Energie aus Abfall“, Band 20, 216-228 (Hrsg: S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky, P. Quicker, A. Gosten)

N. Matak, T. Tomi, D. R. Schneider, G. Krajacic (2021): Integration of WtE and district cooling in existing Gas-CHP based district heating system - Central European city perspective, Smart Energy **4**: 100043.

T. Meinfelder, U. Richers (2008): Entsorgung der Schlacke aus der thermischen Restabfallbehandlung, Forschungszentrum Karlsruhe 2008 (Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7422), S. 29 ff.

J, Mehr, M. Haupt, S. Skutan, L. Morf, L. R, Adrianto, G. Weibel, S. Hellweg (2021): The environmental performance of enhanced metal recovery from dry municipal solid waste incineration bottom ash. Waste Management 119, 330 – 334

H. Nageler-Petritz: Mechanical vs. Chemical: Rivals or Partners, Waste Management World 2/2023, 13-19

Niedersächsische Landesregierung u.a. (2019): Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners - Handreichung für die kommunale Praxis

T. Obermeier, S. Lehmann (2023): Ausschleusung von Wertstoffen vor der thermischen Verwertung, Stand und Perspektiven, in „Bioabfall- und stoffliche Verwertung V“ (Hrsg.: K. Wiemer, M. Kern, T. Raussen), S. 291-300, Witzenhäuser

J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer (2017): Circular Economy: “Measuring Innovation in the Product Chain”, Policy Report (Hrsg. PBL) The Hague

P. Quicker et al. (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen, Umweltbundesamt, TEXTE 17/2017, Dessau.

P. Quicker (2022): Verbrennungsrückstände, in: Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft (Hrsg.: Kurth, P./ Oexle, A./ Faulstich, M.), 779-808 Springer Verlag, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-36262-1>

C.A. Radde (2005): Deponiefreie Siedlungsabfallwirtschaft – Zielstellung 2020 – Utopie oder realistische Aufgabe?, Müll Handbuch (Hrsg.: B. Bilitewski, W. Schnurer, B. Zeschmar-Lahl), Kz. 0151, Lfg. 6/05

I. Reichert (2021): So wirkt sich Chinas Einfuhrverbot auf unseren Plastikmüll aus; <https://www.quarks.de/umwelt/muell/so-wirkt-sich-chinas-einfuhrverbot-auf-unseren-plastikmuell-aus/>

Reinig, D., Warnecke, R. (2018): Schadstoffe in der Abfallhierarchie, VDI-Fachkonferenz Feuerung und Kessel, 26.06.2018; <https://www.gks-sw.de/images/pdf2018/203-VDI-FuK-18-Schadstoffsenke%20-%20Reinig%20-%20Pres.pdf>

RIVM & Ramboll (2019): CleaR - Clean material Recycling project (Auftraggeber: European Commission), 2019 und dort zitierte Quellen (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/26e22c04-5b62-11e9-9c52-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF>)

L. Schebek et al. (2022): Vorstudie zur Klimaneutralität der Entsorgungswirtschaft, Studie im Auftrag der EdDE, Darmstadt.

M. Schmidt (2021): The Resource-Energy Nexus as a Key Factor for Circular Economy. Chemie Ingenieur Technik, **93**, 1707-1716. <https://doi.org/10.1002/cite.202100111>

A. Schopen (2022): Wie Fehlwürfe das Recycling behindern; <https://www.kunststoff-magazin.de/zerkleinerung-recycling/gelbe-tonne-oder-gelber-sack-wie-fehlwuerfe-das-recycling-behindern.htm>; aufgesucht am 23.02.2024

SRH (2023): <https://www.stadtreinigung.hamburg/zre/>

Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (2023): [https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/Auswertungen/ZSVR\\_Auswertung\\_Recyclingquoten\\_2018\\_-\\_2022.pdf](https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/Auswertungen/ZSVR_Auswertung_Recyclingquoten_2018_-_2022.pdf)

M. Stöckmann (2023): Methanolsynthese zur CO<sub>2</sub>-Nutzung aus dem Rauchgas einer Müllverbrennung, in „Bioabfall- und stoffliche Verwertung V“ (Hrsg.: K. Wiemer, M. Kern, T. Raussen), S. 307-311, Witzenhausen

T.P. Traas et al. (2020): Towards sustainable recycling. A method for comparing the safety and sustainability of the processing of residual flows. RIVM letter report 2020-0217, S. 39ff

M. Treder (2023): Wie viel CO<sub>2</sub> entsteht bei der Abfallverbrennung? ENTSORGA 1/2023, 22-29

M. Treder (2024): Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund des Emissionshandels und der Wärmeplanung, in: Bioabfall- und stoffspezifische Verwertung VI (Hrsg.: K. Wiemer, M. Kern, T. Raussen), 291-308, Witzenhausen

Umweltbundesamt (2023): Bioabfälle, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/bioabfaelle#bioabfalle-gute-qualitat-ist-voraussetzung-fur-eine-hochwertige-verwertung>, aufgesucht am 29.02.2024

UNEP (2020): Preventing the next pandemic: zoonotic diseases and how to break the chain of transmission. <https://www.unep.org/resources/report/preventing-future-zoonotic-disease-outbreaks-protecting-environment-animals-and>, aufgesucht am 31.05.2023

UNEP & Climate and Clean Air Coalition (2021): Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions, S. 33, Nairobi. ISBN: 978-92-807-3854-4

VCI und VDI (2023): Chemistry 4 Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann; <https://www.vci.de/themen/energie-klima/chemistry4climate/chemistry4climate.jsp> (aufgesucht am 04.05.2023)

VKU u.a. (2021): „Energetische Abfallverwertung / Waste-to-Energy. Ein unverzichtbarer Pfeiler der Abfallwirtschaft und wertvoller Beitrag zur Kreislaufwirtschaft“, gemeinsames Positionspapier, 30.11.2021, [https://www.itad.de/wissen/energetische-abfallverwertung-ein-unverzichtbarer-pfeiler-der-abfallwirtschaft-und-wertvoller-beitrag-zur-kreislaufwirtschaft/positionspapier\\_wte\\_de.pdf](https://www.itad.de/wissen/energetische-abfallverwertung-ein-unverzichtbarer-pfeiler-der-abfallwirtschaft-und-wertvoller-beitrag-zur-kreislaufwirtschaft/positionspapier_wte_de.pdf), aufgesucht am 15.04.2023

R. Vogt et al. (2023): Ermittlung der Klimaschutzpotentiale in der Kreislaufwirtschaft für Deutschland und die EU, Teilbericht Deutschland, Umweltbundesamt TEXTE 83/2023

ZAR (2022): Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung, Geschäftsbericht 2021