

Infrastruktursystem Abfall

Ergebnisse aus dem Resilienz-Radar



Nona Bledow
Christoph Kehl
Carolin Kahlisch
Michaela Evers-Wölk
Pauline Riousset

Juni 2026
Foresight-Report Nr. 7

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Übersicht über aktuelle Trends	8
2.1	Von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft: politische und regulatorische Vorgaben als strategische Treiber	9
2.2	Wandel in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft durch neue Verfahren und digitale Technologien	13
2.3	Transformation zu einem industriellen Wertschöpfungssektor	19
2.4	Wandel gesellschaftlicher Konsummuster	23
3	Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Abfall	28
3.1	Status quo der Gefährdungslagen und Entwicklungsdynamiken	28
3.2	Gefährdungslagen im Zuge der Transformation	40
4	Fokusthemen	45
4.1	Fokusthema 1: Digitale Technologien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft	45
4.2	Fokusthema 2: Vorausschauende Klimaanpassung und Krisenvorsorge im Infrastruktursystem Abfall	46
5	Methodik und Vorgehen	47
6	Literatur	49
7	Anhang	60
7.1	Abbildungen	60
7.2	Kästen	60

1 Einleitung

Das Infrastruktursystem Abfall erbringt zentrale Leistungen der Daseinsvorsorge: Es sorgt für die hygienisch sichere Erfassung, Behandlung und Entsorgung von Abfällen und schützt damit Umwelt und öffentliche Gesundheit. Ein Teil des Infrastruktursystems Abfall, die Siedlungsabfallentsorgung, ist seit 2021 als kritisches Infrastruktursystem eingestuft. Neben der sicheren Entsorgung erfüllt das System eine ressourcenpolitische Funktion. Durch Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling sowie durch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen trägt es zur Rohstoffversorgung und zur Minderung von Umwelt- und Klimabelastungen bei; nicht verwertbare Abfälle erfordern eine dauerhaft sichere Deponierung.

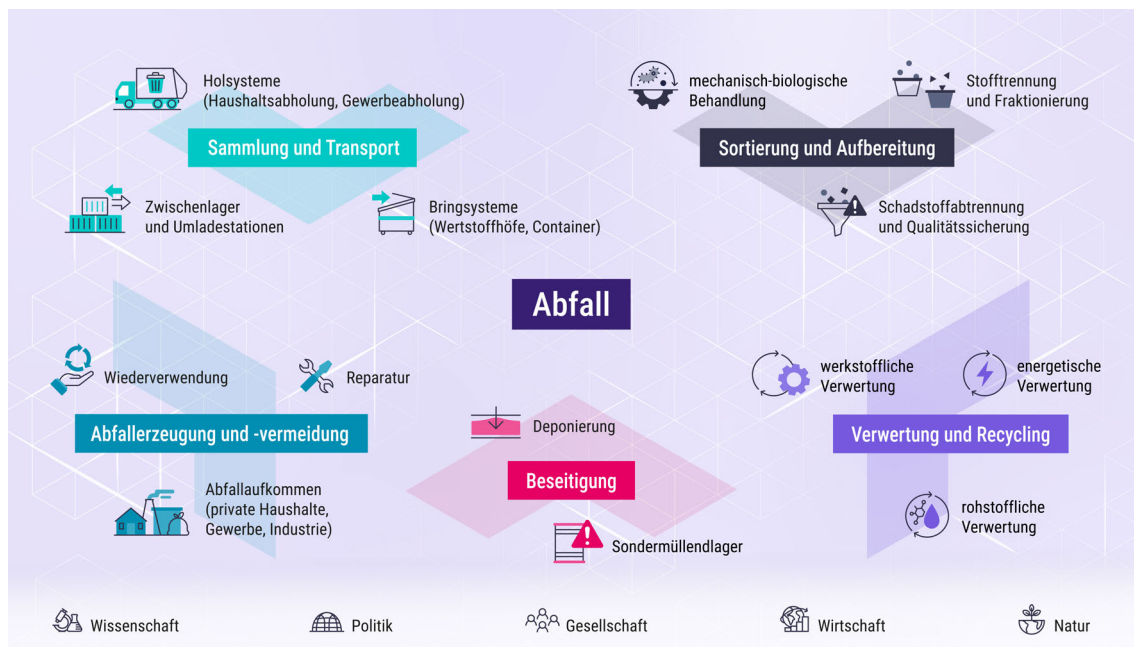
Das heutige Infrastruktursystem Abfall (Abbildung 1.1) ist Ergebnis einer jahrzehntelangen technischen, rechtlichen und organisatorischen Entwicklung. Es umfasst mehrere eng verzahnte Funktionsbereiche mit jeweils spezifischen Akteuren, Zuständigkeiten und Infrastrukturen. Die Bandbreite reicht von einfach strukturierten Sammelsystemen bis hin zu hoch technisierten Sortier-, Behandlungs- und Aufbereitungsanlagen. Entsprechend heterogen ist das Akteursfeld: Es reicht von kommunalen Entsorgern über spezialisierte Verwertungsbetriebe bis zu international agierenden Recycling- und Rohstoffkonzernen. Im Folgenden werden die zentralen Funktionsbereiche des Infrastruktursystems skizziert:

- *Abfallerzeugung und -vermeidung:* Abfälle fallen in privaten Haushalten, Gewerbe- und Industriebetrieben an. Bereits hier entscheiden Produktdesign, Konsumverhalten sowie Reparatur- und Wiederverwendungsinitiativen darüber, wie viele Rohstoffe überhaupt zu Abfall werden. Reparatur- und Wiederverwendungsinitiativen – etwa Second-Hand-Plattformen und Repaircafés im Haushaltsbereich sowie gewerbliche Sharing- und Leihmodelle (zum Beispiel Werkzeugpools, Betreibermodelle für Maschinen und Geräte) – tragen zur Abfallvermeidung bei. Wichtige Akteure sind Konsument/innen, produzierende Unternehmen, Einzelhandel, Umwelt-NGOs und kommunale Abfallberatungen.
- *Sammlung und Transport:* Die getrennte Erfassung erfolgt entweder als Holsystem (Abholung direkt am oder in der Nähe des Grundstücks) oder als Bringsystem, bei dem Haushalte Abfälle selbst zu Sammelstellen bringen – dazu zählen Wertstoff- und Recyclinghöfe ebenso wie ortsfeste Container. In Ballungsräumen ergänzen Zwischenlager und Umladestationen die Logistik. Hauptakteure sind die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger – in der Regel Landkreise und kreisfreie Städte –, die die Entsorgungspflicht für Siedlungsabfälle tragen, Abfuhrpläne erstellen, Gebühren erheben und die Qualität der Getrenntsammlung überwachen. Mit der operativen Durchführung – Sammlung und Transport – können sie kommunale Entsorgungsbetriebe oder privatwirtschaftliche Sammel- und Logistikunternehmen beauftragen.
- *Sortierung und Aufbereitung:* Eingesammelte Fraktionen werden in Sortier- und Aufbereitungsanlagen – betrieben von kommunalen Entsorgungsbetrieben, privatwirtschaftlichen Anlagenbetreibern sowie dualen Systemen (zum Beispiel im Bereich Verpackungen) – mechanisch sortiert und vorbehandelt, um möglichst reine Materialströme zu erhalten und Schadstoffe sicher abzutrennen. Restabfälle mit organischen Anteilen werden in mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen aufbereitet, um Volumen und Emissionspotenzial vor einer anschließen-

den Deponierung oder energetischen Verwertung zu reduzieren. Betreiber von Sortier- und Aufbereitungsanlagen arbeiten daraufhin, die Ausbeute an Sekundärrohstoffen zu maximieren.

- **Verwertung und Recycling:** Die Verwertungs- bzw. Recyclingphase gliedert sich in drei Hauptpfade: Erstens die werkstoffliche Verwertung, bei der die Abfälle stofflich recycelt und als Sekundärrohstoffe erneut in die Produktion eingebracht werden. Zweitens die rohstoffliche Verwertung durch chemische oder biologische Verfahren (zum Beispiel Pyrolyse, Vergasung, Vergärung), die mengenmäßig bislang eine untergeordnete Rolle spielt. Drittens die energetische Verwertung, bei der Restabfälle in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet und in Strom bzw. Wärme umgewandelt werden. Heizwertreiche Fraktionen werden zudem als Ersatzbrennstoffe in der Zement- und Stahlindustrie eingesetzt. Wesentliche Akteure sind Recyclingbetriebe, Kompostier- und Biogasanlagen, Energie- und Fernwärmeversorger sowie die Zement- und Stahlindustrie.
- **Beseitigung:** Für nicht verwertbare Reststoffe stehen Deponien und – bei besonders gefährlichen Abfällen – Sondermüllendlager zur Verfügung. Deponiebetreiber (häufig kommunal), spezialisierte Entsorger, Ingenieurbüros und Umweltbehörden sorgen für Genehmigung, Betrieb, Langzeitüberwachung sowie das Management von Deponiegas und Sickerwasser.

Abbildung 1.1 Systembild



Eigene Darstellung

Das Infrastruktursystem befindet sich in langfristigen Veränderungsprozessen, drei zentrale Transformationsziele konnten für das Infrastruktursystem identifiziert werden:

- **Stärkung zirkulärer Stoffströme und Abfallvermeidung:** Die klassische Abfallwirtschaft – mit dem Ziel der sicheren Beseitigung und Schadstoffkontrolle – wird zunehmend durch das Leitbild der Kreislaufwirtschaft ergänzt und erweitert, das Abfallvermeidung und die möglichst

vollständige Rückführung von Stoffen in den Produktionskreislauf in den Vordergrund stellt. Abfallvermeidung, Wiederverwendung und die Nutzung von Sekundärrohstoffen (plus High-Quality-Recycling, neues Recycling) sollen deutlich ausgebaut werden. Obwohl diese Prinzipien seit Langem in der Abfallhierarchie verankert sind, bleibt ihre konsequente Umsetzung weiterhin eine zentrale Aufgabe. Die Stärkung der Kreislaufwirtschaft durch die Entwicklung leistungsfähiger Recyclingstrukturen kann die Rohstoffsoveränität Deutschlands stärken und internationale Abhängigkeiten verringern.

- *Klimaschutz und Klimaanpassung:* Auch die Gewährleistung der ökologischen Nachhaltigkeit, insbesondere des Klimaschutzes, im Infrastruktursystem Abfall sowie die Anpassung an die Folgen des Klimawandels nach wie vor aktuell. Die Emissionen in allen Bereichen der Abfallwirtschaft müssen weiter reduziert werden und Schadstoffeinträge in die Umwelt vermieden werden. Die Nutzung von Sekundärrohstoffen in der Kreislaufwirtschaft leistet dabei auch einen Beitrag zum Klimaschutz, da dadurch Emissionen aus dem Rohstoffabbau und der -verarbeitung in anderen Sektoren gemindert werden. Zwar hat die Abfallwirtschaft ihre Treibhausgasemissionen in den vergangenen drei Jahrzehnten bereits deutlich verringert, dennoch entstehen beim Verbrennen fossiler Abfälle Emissionen, die nicht vollständig durch energetische Nutzung kompensiert werden können. Zudem müssen im Zuge der globalen Erwärmung Klimaanpassungsmaßnahmen umgesetzt werden – von der Absicherung von Sammelstellen bis hin zur Sicherung bestehender Anlagen und Deponien beispielsweise für den Fall von Überschwemmungen.
- *Digitale Integration und Datensteuerung:* Auch für die Abfallwirtschaft sind digitale Integration und Datensteuerung von großer Bedeutung. Der Digitalisierungsgrad ist derzeit noch geringer als in anderen Infrastruktursystem und unterscheidet sich zwischen unterschiedlichen Teilen des Systembilds und den unterschiedlichen Stoffströmen in der Abfallwirtschaft. Dennoch werden einerseits betriebliche Strukturen immer mehr digitalisiert, andererseits werden auch Verfahren, beispielsweise im Recycling, zunehmend von digitalen Technologien unterstützt. Für die Stärkung der Kreislaufwirtschaft ist eine systematische Datenerfassung und Vernetzung essenziell. Digitale Technologien und Anwendungen können Materialflüsse optimieren, Recyclingverfahren verbessern und Transportemissionen senken. Auch aus der Perspektive einer technologischen Vorreiterposition Deutschlands ist die Entwicklung von digitalen Technologien für die Abfallwirtschaft von großer Bedeutung.

Kernergebnisse

Prägende Entwicklungen

Vier Trendcluster prägen derzeit das Infrastruktursystem Abfall:

- Von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft: Verschärfte EU-/Bundesvorgaben (Quoten, Rezyklatqualität, Emissionen) und fiskalische Instrumente treiben den Umbau Richtung Kreislaufwirtschaft.
- Neue Verfahren und digitale Technologien: Digitalisierung sowie neue Recyclingverfahren verändern Prozesslogiken und Wertschöpfungsketten, während der Technologiewettbewerb zunimmt.
- Transformation zu einem industriellen Wertschöpfungssektor: Vor dem Hintergrund der zunehmend rohstoffstrategischen Bedeutung des Industriesektors verändern zunehmende Investitionen in Recyclingkapazitäten, der sich verschärfende Fachkräftemangel und globaler Wettbewerbsdruck die Marktstrukturen nachhaltig.
- Wandel gesellschaftlicher Konsummuster: Konsum- und Demografietrends verändern langfristig die Abfallmengen, die Zusammensetzung der Fraktionen und die Wiederverwendungsquoten.

Status quo der Gefährdungslagen

Die aktuelle Gefährdung des Infrastruktursystems durch systemische Risiken ist insgesamt als eher gering einzustufen. Gleichwohl gibt es einzelne Risiken mit einem erhöhten Gefährdungspotenzial. Hierzu zählen insbesondere Wetterextreme, aber auch Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit. Darüber hinaus bergen auch geopolitische Konflikte, Versorgungsengpässe sowie Pandemien und Epidemien derzeit ein erhöhtes Risiko für die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems.

Zukünftige Entwicklung der Gefährdungslagen

Für die kommenden Jahre ist davon auszugehen, dass für die Mehrzahl systemischer Risiken eine leicht zunehmende bis deutlich steigende Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall zu erwarten ist. Wesentliche Treiber dieser Entwicklung sind vor allem der fortschreitende Klimawandel sowie die Zunahme von Extremwetterereignissen. Darüber hinaus dürften der Fachkräftemangel, die fortschreitende Digitalisierung sowie die damit einhergehende Zunahme von Cyberkriminalität die Gefährdungslage künftig zusätzlich verstärken.

Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Die Umsetzung der zentralen Transformationsziele, insbesondere die Stärkung zirkulärer Stoffströme, das Voranbringen von Klimaschutz und Klimawandelanpassung sowie der Ausbau der digitalen Integration und Datensteuerung, wird durch Pfadabhängigkeiten erschwert. Hierzu zählen vor allem frühere Strukturentscheidungen und langfristig bindende Technologieinvestitionen, Verbraucherverhalten, wie unzureichende Abfalltrennung und -vermeidung, sowie etablierte Innovationspfade im Material- und Produktdesign.

Fokusthemen

Für eine Vertiefung im Resilienz-Check werden zwei Fokusthemen vorgeschlagen, die an die beschriebenen Entwicklungen anschließen: Fokusthema 1: Digitale Technologien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft sowie Fokusthema 2: Vorausschauende Klimaanpassung und Krisenvorsorge im Infrastruktursystem Abfall.

2 Übersicht über aktuelle Trends

Die Abfallwirtschaft weist mehrere Eigenheiten auf, die eine einheitliche Beschreibung ihrer Entwicklung erschweren. Sie ist stark durch unterschiedliche Stoffströme (zum Beispiel Siedlungsabfälle, Bau- und Abbruchabfälle, Gewerbe- und Industrieabfälle, Bio- und Kunststoffabfälle) geprägt, die jeweils eigenen technischen, organisatorischen und regulatorischen Logiken folgen. Trotz dieser Heterogenität zeigen übergreifende Indikatoren eine deutliche Entwicklung von einem entsorgungsorientierten System hin zu einem Verwertungssystem. So liegt die Verwertungsquote seit mehreren Jahren stabil bei rund 82 %, wobei allerdings die stoffliche Verwertung gegenüber der energetischen Verwertung seit etwa 2000 deutlich an Bedeutung gewonnen hat (2023: ca. 70 % stofflich, ca. 12 % energetisch) (UBA o. J.g). Dieser Wandel wurde maßgeblich durch die Richtlinie 2008/98/EG¹ sowie das Kreislaufwirtschaftsgesetz² vorangetrieben. Das Abfallaufkommen insgesamt ging zwischen 2000 und 2023 um rund 21 % zurück – hauptsächlich bedingt durch die Abnahme der Bau- und Abbruchabfälle (UBA o. J.c). Die deponierten Abfallmengen sanken im gleichen Zeitraum um knapp 45 % (UBA o. J.d). Insgesamt zeigt sich damit eine zunehmende Entkopplung des Abfallaufkommens vom Wirtschaftswachstum.

Die folgenden Abschnitte präsentieren die Ergebnisse der Trendanalyse entlang der STEEP-Kategorien (social, technological, economic, ecological, political) als heuristischem Raster. Für jede Kategorie wurden empirisch nachweisbare Trends identifiziert, die das Infrastruktursystem Abfall seit mindestens 3 Jahren prägen.³ Thematisch verwandte Trends wurden zu Trendclustern zusammengefasst, die jeweils übergeordnete Entwicklungslinien abbilden. Die Cluster orientieren sich an den STEEP-Kategorien, ohne diese strikt abzubilden; inhaltliche Überschneidungen sind unvermeidbar. Da Umweltschutz in der Abfallwirtschaft nicht externer Treiber, sondern zentraler Systemzweck ist, werden umweltbezogene Trends nicht als eigenständiges Cluster geführt, sondern innerhalb anderer STEEP-Kategorien verortet (zum Beispiel über verschärfte Qualitätsanforderungen, neue Emissionsstandards oder Recyclingziele). Insgesamt lassen sich vier zentrale Trendcluster unterscheiden:

- *Wandel gesellschaftlicher Konsummuster:* Wachsendes, aber im Verhalten kaum umgesetztes Umweltbewusstsein und zunehmende Repair- und Re-Use-Initiativen stehen einer Persistenz nicht nachhaltiger Konsummuster – beschleunigten Produktzyklen, steigenden Verpackungs- und Textilabfällen – sowie demografisch bedingten Veränderungen des Pro-Kopf-Abfallaufkommens gegenüber.
- *Neue Verfahren und digitale Technologien:* Digitalisierung von Sammlung, Sortierung und Verwaltung sowie innovative Recyclingverfahren – von chemischen und biologischen Methoden bis zu modularen Anlagenkonzepten – verändern Prozesslogiken und Wertschöpfungsketten bei intensiviertem internationalem Technologiewettbewerb.
- *Transformation zu einem industriellen Wertschöpfungssektor:* Stark wachsende Umsätze, Beschäftigung und Investitionen markieren den Übergang von kommunaler Entsorgung zu einem

¹ Richtlinie 2008/98/EG vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

² Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012, zuletzt am 2. März 2023 geändert

³ Radioaktive Abfälle (Atommüll) wurden in der Trendanalyse nicht behandelt. Für sie gelten hochspezialisierte rechtliche Rahmenbedingungen und technische Anforderungen; zudem sind die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft auf hochradioaktive Abfälle nicht anwendbar. Der nukleare Bereich bildet daher ein eigenständiges System außerhalb des hier betrachteten Untersuchungsgegenstands.

rohstoffstrategisch bedeutsamen Industriesektor; Fachkräftemangel und steigender Bedarf an kritischen Rohstoffen erhöhen den Handlungsdruck.

- *Von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft:* Verschärfte EU- und Bundesvorgaben zu Recyclingquoten, Rezyklatqualität und Emissionen sowie fiskalische Instrumente wie CO₂-Bepreisung und Plastikabgabe treiben den ordnungspolitischen Umbau zur Kreislaufwirtschaft voran.

Zu jedem Trendcluster wurden Emerging Issues identifiziert, also soziotechnische Entwicklungen, die sich noch nicht als stabile Trends verfestigt haben, aber als potenziell systemrelevant gelten. Berücksichtigt wurden insbesondere Zukunftsentwicklungen, die für die Resilienz wichtiger Funktionsbereiche des Systems bedeutsam werden könnten, deren Entwicklungsrichtung jedoch noch unsicher ist. Die Bewertung dieser Emerging Issues ist entsprechend mit höherer Unsicherheit behaftet als die Einschätzung der etablierten Trends.

2.1 Von der Entsorgungs- zur Kreislaufwirtschaft: politische und regulatorische Vorgaben als strategische Treiber

Politische und regulatorische Vorgaben auf EU-, Bundes- und kommunaler Ebene treiben den Wandel der Abfallwirtschaft in Deutschland von einer klassischen Entsorgungsbranche zu einem ressourcenorientierten, klimawirksamen und digitalisierten Sektor der Kreislaufwirtschaft voran. Die rechtlichen Vorgaben zu Abfallvermeidung, Recycling, Rezyklatqualität und Emissionen wurden in den letzten Jahren kontinuierlich verschärft und durch fiskalische Instrumente (zum Beispiel Plastikabgabe, CO₂-Bepreisung) zusätzlich unterstützt. Parallel dazu steigen die Bemühungen zur Governance der internationalen Abfallströme, während auf kommunaler Ebene zunehmend ambitionierte Zero-Waste-Strategien etabliert werden. Die Verschärfung politischer und regulatorischer Vorgaben wirkt langfristig und fungiert als strategischer Treiber für die gesamte Abfallwirtschaft und alle Teile des Systembilds.

Seit der Verabschiedung der Richtlinie 94/62/EG⁴ wurde das Abfallrecht kontinuierlich verschärft. Heute gelten für Schlüsselabfallströme wie Elektrogeräte, Batterien, Bau- und Abbruchabfälle sowie Kunststoffverpackungen verbindliche Recyclingquoten, die in den letzten Jahren stetig erhöht wurden. Die EU gibt dabei den rechtlichen Rahmen vor: Die Richtlinie 2008/98/EG bildet das Fundament, ergänzt durch materialspezifische Vorschriften. Mit dem europäischen Grünen Deal (EK 2019) und dem geplanten Circular Economy Act (EK o. J.) strebt die EU eine Vorreiterrolle in der Kreislaufwirtschaft an. Ein zentrales Ziel ist die Verdopplung der Kreislaufquote von derzeit etwa 12 auf 24 % bis 2030 (EK o. J.). Deutschland verfolgt mit der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie unter anderem dieselbe Zielsetzung (BMUV 2024b). Für viele Materialbereiche (insbesondere Kunststoffe,

⁴ Richtlinie 94/62/EG vom 20. Dezember 1994 über Verpackungen und Verpackungsabfälle

Verpackungen, Baustoffe) ist zudem ein Trend zu steigenden Qualitätsanforderungen erkennbar. Besonders bei sensiblen Anwendungen (Lebensmittelkontakt, technische Kunststoffe) wurden die Anforderungen an die Reinheit der Rezyklate zunehmend erhöht. Diese ambitionierten Vorgaben stellen Recyclingunternehmen vor neue Herausforderungen: Sie erfordern höhere Qualitätsstandards, Anpassungen der Behandlungsprozesse sowie Optimierungen in Sammel- und Transportlogistik. Neben regulatorischen Vorgaben greifen die zuständigen politischen Ebenen auf wirtschaftliche Steuerungsinstrumente zurück. So trat auf europäischer Ebene 2021 mit Beschluss (EU, Euratom) 2020/2053⁵ die Plastikabgabe in Kraft, die Hersteller von nicht recycelten Kunststoffverpackungen belastet. Auf nationaler Ebene führte Deutschland 2024 einen Einwegkunststofffonds ein, in den Hersteller bestimmter Einwegprodukte einzahlen müssen. Auch auf kommunaler Ebene werden zunehmend Verpackungssteuern erlassen – eine Entwicklung, deren Rechtmäßigkeit vom Bundesverfassungsgericht bestätigt wurde (DUH 2025; Fachpack 2025). Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung rücken in der Fachdebatte zunehmend marktorientierte Instrumente in den Blick, die gezielt den Einsatz von Rezyklaten stimulieren sollen (Kasten 2.1).

Kasten 2.1 Emerging Issue: Zertifikatehandel mit Kunststoffrezyklaten

Der TAB-Bericht „Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateeinsatzes“ zeigt, dass die Potenziale ökonomischer Instrumente in der deutschen Kreislaufwirtschaft bisher noch nicht ausgeschöpft werden (TAB 2024b). Ein zunehmend diskutiertes, aber für Rezyklate bislang institutionell nicht erprobtes ökonomisches Steuerungsinstrument ist der Zertifikatehandel. Insbesondere im Zusammenhang mit Überlegungen zur Einführung verbindlicher Rezyklateinsatzquoten für Kunststoffprodukte wird dieses Instrument als vielversprechende Option betrachtet. So wird etwa in der Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) auf die Notwendigkeit verwiesen, ein Zertifikatehandelssystem auf EU-Ebene zu prüfen (BMUV 2024b).

Die zentrale Idee besteht darin, Rezyklateinsatzquoten nicht ausschließlich über starre regulatorische Vorgaben umzusetzen, sondern diese durch einen flexiblen Mechanismus wie den Zertifikatehandel zu flankieren. Hierzu würde zunächst ein Gesamtziel für den Rezyklatgehalt bestimmter Anwendungen definiert. Hersteller oder Importeure, die über das vorgegebene Mindestniveau hinaus Rezyklate einsetzen, generieren Zertifikate, die sie an Marktakteure verkaufen können, die ihre Quote technisch oder wirtschaftlich nicht vollständig erfüllen können. Ein solches System verspricht eine besonders effiziente Zielerreichung, da der Handel dazu führt, dass Rezyklate dort eingesetzt werden, wo dies technisch am einfachsten und kostengünstigsten möglich ist. Dadurch sinken die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Quotenerfüllung erheblich (TAB 2024b). Zugleich verspricht ein funktionsfähiger Zertifikatemarkt Recyclingunternehmen eine zusätzliche Einnahmequelle, was Investitionen in Aufbereitungsanlagen unabhängiger von schwankenden Rohstoffpreisen macht.

⁵ Beschluss (EU, Euratom) 2020/2053 vom 14. Dezember 2020 über das Eigenmittelsystem der Europäischen Union und zur Aufhebung des Beschlusses 2014/335/EU, Euratom

Aufgrund der erheblichen Steigerungsanforderungen sehen Branchenakteure im Handel ein notwendiges Flexibilisierungsinstrument, um die ambitionierten Vorgaben wirtschaftlich umsetzen zu können (bvse 2025c). Kritische Stimmen warnen jedoch vor erheblichen Umsetzungsproblemen: Die große Heterogenität von Rezyklaten, die sich in stark variierenden Qualitätsniveaus widerspiegelt, erschwere die Einrichtung eines robusten Handelssystems erheblich. Zudem bestehe die Gefahr, dass ein Zertifikatehandel Investitionen in hochwertige mechanische, physikalische und chemische Recyclingverfahren verzögere, da Unternehmen ihre Quoten über den Handel erfüllen könnten, ohne tatsächlich qualitativ hochwertige Rezyklate einzusetzen (THINK-TANK Industrielle Ressourcenstrategien 2024).

Die Certified Recycled Content GmbH (CRC 2025) legte ein detailliertes Konzept für eine digitale Handelsplattform vor. Das System setzt auf Blockchaintechologie, um den Einsatz mechanisch hergestellter Post-Consumer-Rezyklate fälschungssicher zu dokumentieren. Das Konzept beschränkt sich dabei bewusst auf hochwertige Rezyklate, die Primärmaterial in anspruchsvollen Anwendungen wie Verpackungen oder technischen Bauteilen vollständig substituieren können. Auf diese Weise sollen Fehlanreize in Richtung Downcycling verhindert werden. Insgesamt macht die Debatte deutlich, dass sowohl die geeignete Ausgestaltung und rechtliche Rahmung eines Rezyklatehandels als auch technische Lösungen für Transparenz und Nachverfolgbarkeit – etwa über blockchainbasierte Systeme – entscheidende Voraussetzungen für die Wirksamkeit eines solchen Instruments sind.

Mit 613 kg pro Kopf im Jahr 2022 liegen die kommunalen Abfälle in Deutschland noch deutlich über dem EU-Durchschnitt von 511 kg (Destatis 2025e). Zugleich deutet sich ein Wandel in der Abfallpolitik an: Neben Verpackungssteuern und erweiterten Herstellerverpflichtungen setzen immer mehr Kommunen auf Zero-Waste-Initiativen. Zero Waste steht für das Bekenntnis zur Abfallvermeidung und setzt einen besonders starken Fokus auf Ressourcenschonung und geschlossene Stoffkreisläufe. In einem mehrjährigen Prozess verpflichten sich Kommunen, ihre Abfallmengen durch gezielte Maßnahmen systematisch zu reduzieren.⁶ Eine Zertifizierung ist im Rahmen des Zero-Waste-Cities-Programms möglich, das europaweit mittlerweile über 450 Kommunen umfasst.⁷ Der Dachverband Zero Waste Germany wurde 2021 gegründet. Bislang wurde Kiel als erste und einzige deutsche Stadt als Zero-Waste-City zertifiziert (seit 2023). Die Stadt will ihre Haus- und Geschäftsabfälle bis 2035 um rund 50 % und bis 2050 um rund 70 % gegenüber 2017 senken (Kiel.de o. J.). München, Leipzig und Düsseldorf haben sich zwar als Kandidatenstädte verpflichtet, diese Prozesse pausieren jedoch derzeit (McQuibban 2025). Andere Städte wie Berlin verfolgen eigene Zero-Waste-Strategien im Rahmen ihrer Abfallwirtschaftskonzepte, ohne sich dem offiziellen Zertifizierungsprogramm anzuschließen (Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt o. J.). Insgesamt ist der Anteil der Kommunen mit Zero-Waste-Ansatz noch gering, was sich auch durch wirtschaftliche und infrastrukturelle Pfadabhängigkeiten der etablierten Abfallwirtschaft erklären lässt (Weigel et al. 2024). Zero-Waste-Ansätze verstärken

⁶ <https://zerowastegermany.de/was-ist-zero-waste/> (18.6.2026)

⁷ <https://zerowasteurope.eu/our-work/zero-waste-cities/> (18.6.2026)

eine bereits sichtbare Entwicklung der Abfallwirtschaft weg von Deponierung und Verbrennung hin zu Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Kreislaufnutzung.

Der Transport, die Deponierung und Verbrennung von Abfällen sind mit einem erheblichen CO₂-Fußabdruck verbunden – zusätzlich entstehen dabei weitere Luftschadstoffe. Seit Jahren ist die Abfallwirtschaft mit einer systematischen Verschärfung der Emissionsvorschriften konfrontiert. Die Richtlinie (EU) 2024/1785⁸ setzt neue Maßstäbe durch striktere Emissionsgrenzwerte für Industrieanlagen (inklusive Abfallverbrennung), digitalisierte Genehmigungsverfahren und verstärkte Kontrollen. Die 2021 novellierte Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)⁹ erweiterte den Anwendungsbereich für die Abfallwirtschaft deutlich, etwa durch Einhausungspflichten für Bioabfallverwertungsanlagen. Sie wird derzeit überarbeitet, um die Vorgaben der Richtlinie (EU) 2024/1785 in deutsches Recht umzusetzen. Zusätzlich gelten seit 2024 Monitoring- und Berichtspflichten für Müllverbrennungsanlagen mit einer thermischen Leistung über 20 MW, während die EU-Kommission bis 2026 prüft, diese Anlagen vollständig in den EU-Emissionshandel (ETS) einzu beziehen. Deutschland hat mit der Novelle des Brennstoffemissionshandelsgesetzes¹⁰ ab 2024 die thermische Abfallbehandlung in die nationale CO₂-Bepreisung einbezogen – der CO₂-Preis (2024: 45 Euro/t; 2025: 55 Euro/t) gilt ausschließlich für die fossilen Anteile der Abfälle (also für petrochemisch hergestellte, nicht jedoch biogene Materialien). Die anfallenden Kosten werden von den Betreibern der Verbrennungsanlagen getragen und über die Entsorgungsunternehmen an die Endkund/innen weitergegeben, was zu höheren Abfallgebühren führt (Kommunen.NRW 2024). In Summe erhöhen die verschärften Emissionsvorschriften die Kosten der thermischen Abfallbehandlung und schaffen damit zusätzliche Anreize, Transportketten zu optimieren und Stoffströme von der Verbrennung hin zu Recycling und Abfallvermeidung zu verlagern.

Auf globaler Ebene verstärken sich die Bemühungen um eine Governance internationaler Abfallströme, insbesondere im Kunststoffbereich. So wird seit 2022 über ein umfassendes globales Plastikabkommen verhandelt, das den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffen adressieren soll und über reine Abfall- und Handelsregeln hinausgeht. Parallel zu diesen laufenden, bislang erfolglosen Verhandlungen bildet seit 1989 die Basler Konvention den zentralen völkerrechtlichen Rahmen für grenzüberschreitende Abfallbewegungen und zählt derzeit 188 Vertragsstaaten. Ein entscheidender Wendepunkt war die 2019 beschlossene und seit Januar 2021 geltende Erweiterung der Konvention auf Kunststoffabfälle. Mit diesen Plastic Waste Amendments werden grenzüberschreitende Kunststoffabfallströme strenger reguliert. Im Zusammenspiel mit strengeren Importbeschränkungen großer Abnehmerländer – insbesondere Chinas – führte dies zu einer dokumentierten Umstrukturierung globaler Handelsrouten (Li et al. 2025). In der Folge hat sich der Abfallhandel zunehmend innerhalb von Regionen mit ähnlichem Regulierungs- und Technologieniveau verlagert, etwa innerhalb der EU oder zwischen OECD-Ländern. Daten belegen diese Entwicklung: So sanken die Abfallexporte der OECD-Länder von 10,5 Mio. t im Jahr 2014 auf 5,5 Mio. t im Jahr 2023, während die Importe vergleichsweise stabil blieben (Brown et al. 2025). Die Menge der exportierten Kunststoffabfälle Deutschlands hat sich von 2013 bis 2023 mehr als halbiert (Abbildung 2.1) (Destatis 2023b). Die stark globalisierte Phase des Abfallhandels wird somit durch ein stärker kontrolliertes, regional ausgerichtetes System abgelöst. Mit dem Rückgang der Exporte

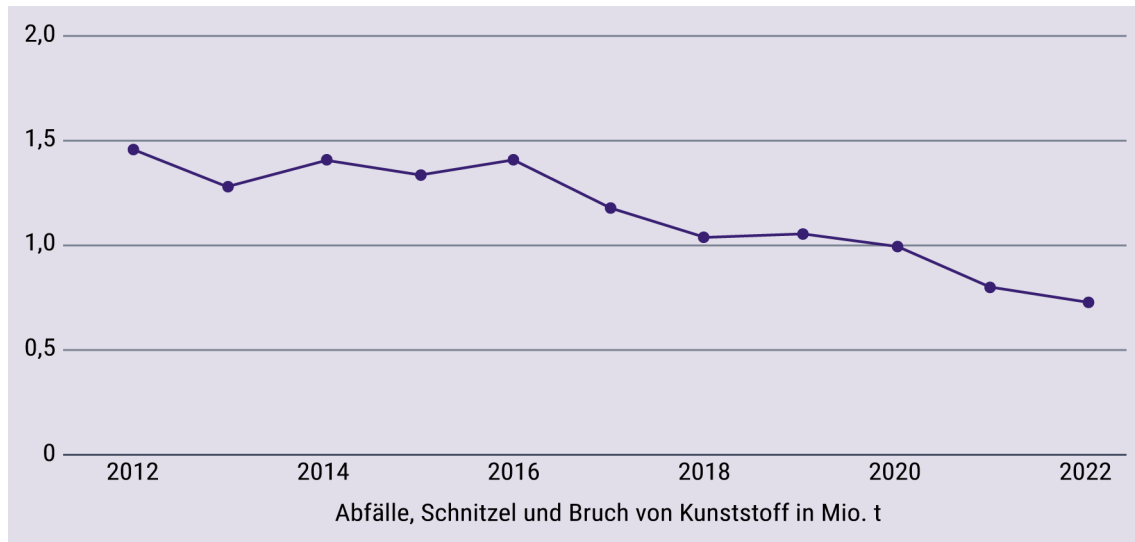
8 Richtlinie (EU) 2024/1785 vom 24. April 2024 zur Änderung der Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) und der Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien

9 Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021

10 Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019, zuletzt am 27. Februar 2025 geändert

verlagern sich Kunststoffabfälle zunehmend in nationale Verwertungskreisläufe, was den Bedarf an inländischen Recyclingkapazitäten erhöht.

Abbildung 2.1 Deutsche Exporte von Kunststoffabfällen



Quelle: nach Destatis (2023b)

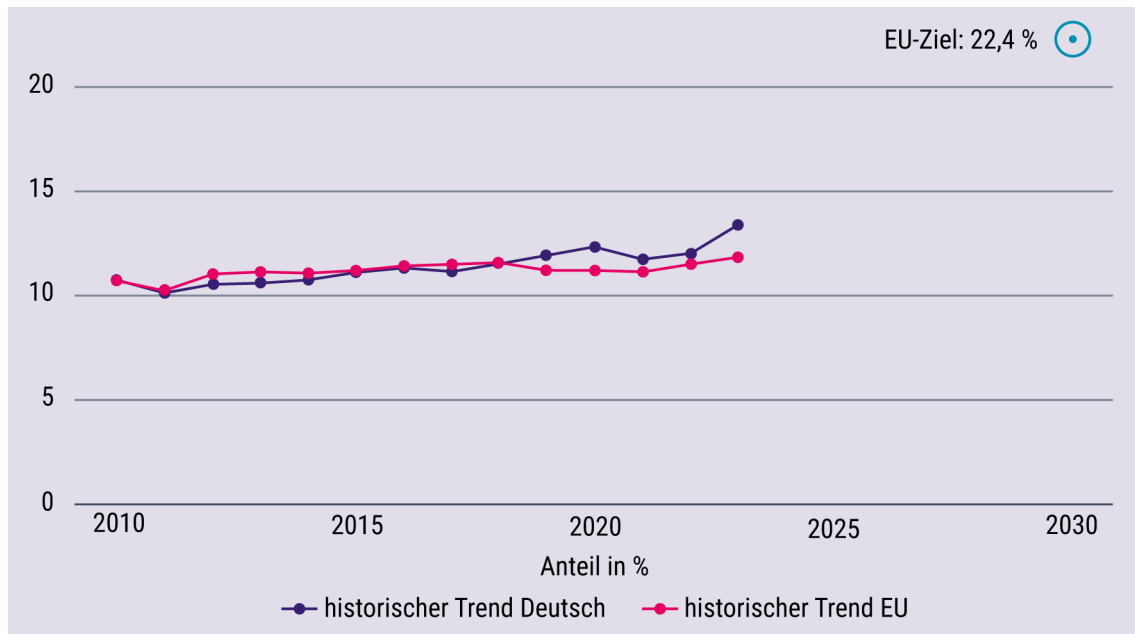
2.2 Wandel in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft durch neue Verfahren und digitale Technologien

Neue Verfahren und digitale Technologien verändern die Prozesse des Recyclings, der Sortierung und der Materialaufbereitung grundlegend. Insbesondere bei komplexen Materialverbünden – etwa Verbundkunststoffen oder Elektronikschrott – ermöglichen innovative Ansätze die Rückgewinnung hochwertiger Materialien, die mit konventionellen mechanischen Verfahren nicht oder nur eingeschränkt recycelbar sind. Gleichzeitig entstehen neue Herausforderungen, zu denen ein hoher Investitions- und Energiebedarf sowie der Ausbau der Infrastrukturen gehören. Diese Entwicklungen führen zu einer Neuausrichtung bestehender Wertschöpfungsketten und verstärken den globalen Wettbewerb um technologische Führungspositionen in der Kreislaufwirtschaft.

Digitale Technologien gelten zunehmend als Hebel, um die Leistungsfähigkeit der Abfallwirtschaft zu steigern. Zentrale Indikatoren wie die Recyclingquote für Siedlungsabfälle und die Circular Material Use Rate (CMU), definiert als der Anteil der im Wirtschaftskreislauf wiederverwendeten,

recycelten Materialien am gesamten Materialverbrauch, haben sich in den vergangenen Jahren nur geringfügig verbessert. Während Siedlungsabfälle zu etwa 67 % stofflich verwertet werden – ein Anstieg von rund 5 Prozentpunkten seit 2010 (UBA o. J.b) – liegt die CMU unter 15 % – ein Befund, der den Handlungsdruck für systemische Innovationen verdeutlicht (Abbildung 2.2).

Abbildung 2.2 Circular Material Use Rate Deutschlands im Zeitverlauf



Quelle: nach EEA (2025a)

Digitale Technologien versprechen einen besseren Informationsaustausch entlang der gesamten Wertschöpfungskette sowie eine datenbasierte Steuerung und Automatisierung der Entsorgungsprozesse (Schmidt/Weber 2024). Die Digitalisierung der Abfall- und Kreislaufwirtschaft wird von der EU und der Bundesregierung zunehmend gefördert. So wurde die Digitalisierung als eigenes Handlungsfeld im Rahmen der Nationalen Klimaschutzstrategie etabliert, außerdem hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Anfang 2025 das Programm „GreenTech Innovationswettbewerb – Digitale Technologien als Hebel für die Kreislaufwirtschaft“ gestartet. Damit sollen die Entwicklung und prototypische Erprobung innovativer Ansätze in den Bereichen KI-Systeme, digitale Zwillinge, Datenplattformen und der Digitale Produktpass gefördert werden. Auf EU-Ebene folgen der Grüne Deal und der dazugehörige Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (2020) dem Leitbild der Zwillingstransformation (Twin Transition). In diesem Modell kommt der Digitalisierung die Rolle des Wegbereiters für eine zirkuläre und damit nachhaltigere Wirtschaft zu (Eigenstetter 2025). Ein zentrales Instrument ist die geplante schrittweise Einführung des digitalen Produktpasses ab 2027, der Informationen über die Materialzusammensetzung und die Reparierbarkeit eines Produkts digital verfügbar macht (Schnicke 2025).

Die Entwicklung der Abfallwirtschaft wird von mehreren digitalen Trends geprägt, darunter die Optimierung logistischer Prozesse in den Bereichen Sammlung, Erfassung und Transport (zum Beispiel Behältersysteme mit Füllstandsmessung), die automatisierte Sortierung und Aufbe-

reitung von Abfällen (zum Beispiel KI- und sensorgestützte Erkennung von Störstoffen, Separationsverfahren mittels Robotik) sowie digital vernetzte Verwaltungs-, Planungs- und Kundenprozesse (zum Beispiel Entsorgung on demand, digitale Wertstoffhöfe) (Prognos AG/INFA GmbH 2024; Schmidt/Weber 2024; TAB 2023; Wilts et al. 2021). Die digitale Transformation betrifft damit potenziell alle Bereiche des Systembilds. In Deutschland steht die Umsetzung jedoch erst am Anfang (Borchard et al. 2021; Schmidt/Weber 2024; TAB 2023). Zwar kommen digitale Einzeltechnologien in verschiedenen Bereichen bereits verstärkt zur Anwendung, insbesondere in den Bereichen Abfalllogistik und Sortierung, jedoch mit unterschiedlicher Implementierungstiefe je nach Abfallstrom. Fortschrittliche Lösungen werden im Rahmen verschiedener Pilotprojekte zunehmend erprobt (DFKI 2025; HEB 2025; Remondis 2025). Für eine umfassende Digitalisierung werden jedoch noch Datenökosysteme für zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke benötigt, die eine Vernetzung und einen Informationsaustausch entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglichen würden (Schmidt/Weber 2024).

Neben der Digitalisierung sind eine zunehmende Entwicklung und Erprobung innovativer Recyclingverfahren zu beobachten. Klassische mechanische Verfahren – etwa Zerkleinern, Waschen und Aufschmelzen – stoßen beim Recycling bestimmter Wertstoffe, insbesondere komplexer oder stark verunreinigter Verbundstoffe, an physikalische und qualitative Grenzen. Für diese Stoffströme werden daher zunehmend spezialisierte Verfahren entwickelt, die je nach Abfallstrom variieren (Lang 2023; TAB 2024b):

- *Kunststoffe*: Das mechanische Recycling dominiert zwar weiterhin, doch werden chemische Verfahren wie Pyrolyse und Solvolyse technologisch und ökonomisch weiterentwickelt. Einige Anwendungen gelten bereits als kommerziell etabliert, während sich andere noch in der Demonstrations- und Skalierungsphase befinden.
- *Batterien und Elektronik*: Neben den etablierten pyrometallurgischen Verfahren gewinnen hydrometallurgische Prozesse (chemisches Auslaugen mit Säuren sowie Bioleaching mit säureproduzierenden Bakterien) an Bedeutung. Während erstere bereits im industriellen Maßstab betrieben werden, befinden sich Bioleachingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien bislang im Labor- und Pilotstadium.
- *Textilien*: Alternativen zum mechanischen Recycling, wie chemische oder biochemische Verfahren zur Faser-zu-Faser-Rückgewinnung, befinden sich überwiegend im Pilot- oder Kleinmaßstab. Geschlossene Stoffkreisläufe im industriellen Umfang bestehen bislang nur in wenigen, meist materialspezifischen Nischen (Bechlarz 2026; TAB 2025a).

Ein neuer Ansatz, der für unterschiedliche Stoffströme infrage kommt und als besonders umweltfreundlich gilt, ist das biologische Recycling (Kasten 2.2). Die Implementierung all dieser innovativen Verfahren ist technisch komplex und kapitalintensiv. Parallel dazu werden neue, modulare und teilweise mobile Anlagenkonzepte erprobt, die eine stärker dezentrale Aufbereitung spezialisierter Abfallströme ermöglichen (Kasten 2.3). Zentrale Treiber dieser neuen Verfahren und Anlagenkonzepte sind staatliche Förderprogramme,¹¹ verschärfte Umweltauflagen, steigende Rohstoffpreise und Transportkosten sowie ein zunehmendes Ressourcenbewusstsein in der Industrie.

¹¹ <https://www.ressource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/innovative-recyclingtechnologien/foerderprogramme-kreislaufwirtschaft/> (18.6.2026)

Kasten 2.2 Emerging Issue: biologisches Recycling

Unter biologischem Recycling werden Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abfällen verstanden, bei denen Mikroorganismen oder isolierte Enzyme (Biokatalysatoren) eingesetzt werden. Entsprechende Ansätze werden unter anderem für bestimmte Kunststoffe (insbesondere PET-/Polyester in Verpackungen und Textilien) sowie für die Rückgewinnung seltener und wertvoller Metalle aus Elektroschrott entwickelt. Je nach Abfallstrom unterscheiden sich die Verfahren, beruhen aber auf ähnlichen Prinzipien: Polymere werden enzymatisch in ihre Monomere depolymerisiert, oder Metalle werden durch mikrobielle Prozesse in Lösung überführt, um sie anschließend in reiner Form zurückzugewinnen (Damayanti et al. 2025; Dixit et al. 2023; Zimmermann 2025).

Im Vergleich zum rein mechanischen Recycling, das zu Qualitätsverlusten und Downcycling führt, können biokatalytische Prozesse Monomere und Metalle mit hoher Reinheit bereitstellen (Dixit et al. 2023; Zimmermann 2025). Zwar bleiben Sortier- und Vorbehandlungsschritte auch hier nötig, enzymatische Verfahren tolerieren jedoch in bestimmten Fällen komplexere oder stärker verunreinigte Ströme (zum Beispiel gefärbte bzw. kontaminierte PET-Abfälle oder komplexe Elektronikschrott-Fractionen) besser als klassische werkstoffliche Verfahren. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass biologische Prozesse unter moderaten Temperaturen und ohne stark korrosive Reagenzien ablaufen und damit prinzipiell einen geringeren Energie- und Chemikalieneinsatz als konventionelle chemische oder hydrometallurgische Verfahren ermöglichen – wobei die tatsächliche ökologische Bilanz stark von konkreter Prozessführung, Enzymkosten und Skalierung abhängt.

Technisch sind biokatalytische und biologische Recyclingverfahren derzeit vor allem für PET-/Polyesterströme und bestimmte E-Waste-Fractionen am weitesten entwickelt. Beim PET-Recycling sind die enzymatische Depolymerisation zu Monomeren und deren Wiederverwertung im Labormaßstab und in Pilotanlagen gut etabliert – mit ersten industriellen Implementierungen (Damayanti et al. 2025). Beim biologischen Recycling von E-Waste-Metallen dominieren bislang Labor- und Pilotprojekte, während großtechnische Anwendungen die Ausnahme sind (Dixit et al. 2023). Zentrale Hürden sind die Skalierbarkeit dieser Prozesse und ihre bislang nur begrenzt nachgewiesene wirtschaftliche und energetische Konkurrenzfähigkeit gegenüber etablierten mechanischen und chemischen Verfahren, insbesondere unter realen Bedingungen mit gemischten und verunreinigten Abfallströmen. Perspektivisch ist biologisches Recycling daher kein vollständiger Ersatz für bestehende Verfahren, sondern eine ergänzende Option für solche Abfallströme, die sich mechanisch nur mit Qualitätsverlust oder gar nicht hochwertig zurückgewinnen lassen (Zimmermann 2025).

Kasten 2.3 Emerging Issue: dezentrale, modulare Mikrorecyclingfabriken

In zentralisierten Recyclinginfrastrukturen müssen Abfälle häufig über große Distanzen zu Aufbereitungs- und Recyclinganlagen transportiert werden. Diese langen Transportwege erhöhen Transportkosten und transportbedingte Emissionen und können die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit eines hochwertigen Recyclings gegenüber Alternativen wie Verbrennung oder Deponierung verringern, sofern Effizienzvorteile zentraler Anlagen diese Mehrbelastungen nicht ausgleichen. Bei gefährlichen Abfällen kommen zusätzliche Sicherheits- und Unfallrisiken durch den Transport hinzu.

Ein innovatives, bislang nicht breit etabliertes Technologie- und Organisationskonzept für diese Problematik sind dezentrale, modulare Mikrorecyclingfabriken. Dabei handelt es sich um kompakte, häufig containerbasierte Anlagen, die Abfälle in unmittelbarer Nähe ihres Entstehungsortes bzw. in regionalen Sammelpunkten verarbeiten. Beispiele sind kompakte Containeranlagen zur dezentralen Kunststoffverölung (Pyrolyse) (Plastoil o. J.), mobil-modulare Aufbereitungskonzepte für Gewerbe-, Siedlungsabfälle und Sperrmüll (Doppstadt Umwelttechnik 2024) oder mobile Brechanlagen für Abbruchabfälle (Max Wild GmbH 2023). In Deutschland werden solche Anlagen erst vereinzelt eingesetzt.

Ziel ist es, Transportwege und damit verbundene Kosten und Emissionen deutlich zu reduzieren, spezialisierte Abfallströme hochwertig aufzubereiten und die lokale Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen – und damit die Rohstoffsouveränität von Kommunen – zumindest teilweise zu stärken. Studien zeigen für dezentrale Mikrorecyclingsysteme bei E-Waste-Kunststoffen, dass Transportkosten um bis zu 70 % und Emissionen um 60 bis 70 % reduziert werden können, verglichen mit zentralen Systemen (Singh et al. 2025). Durch die Containerbauweise können solche Anlagen relativ schnell an den Orten bzw. regionalen Sammelpunkten eingesetzt werden, an denen relevante Abfallmengen anfallen. Das ist insbesondere für voluminöse oder spezialisierte Stoffströme – etwa bestimmte Industrieabfälle, Altöl, PV-Module oder E-Waste-Kunststoffe – effizient (Alarcon-Gerbier et al. 2023; Singh et al. 2025).

Gleichzeitig stoßen dezentrale, kleinskalige Anlagen an systemische Grenzen. Großtechnische, hochautomatisierte Sortier- und Recyclinganlagen profitieren von erheblichen Skaleneffekten und können komplexe, in viele Fraktionen getrennte Stoffströme mit hoher Effizienz verarbeiten. Modellstudien zu mobilen Recyclinganlagen zeigen, dass sich kleine, containerbasierte Einheiten nur dort wirtschaftlich lohnen, wo hohe Transportkosten oder spezielle Abfallströme vorliegen. Steigen Produktions- und Fixkosten zu stark, sind zentrale Anlagen überlegen (Alarcon-Gerbier et al. 2023). Weitere Herausforderungen dezentraler Mikrorecyclingsystemen und urbaner Mikrofabriken sind Skalierung, einheitliche Produktqualität sowie Sicherstellung sortenreiner Sekundärströme (Silva 2025; Singh et al. 2025). Dezentrale Mikrorecyclingfabriken sind daher keine universelle Alternative, sondern eine komplementäre Lösung für spezifische Abfallströme und Kontexte, in denen Nähe und Transportentlastung die Skalenvorteile zentraler Anlagen überwiegen. Das Konzept kann die Resilienz des Abfallsystems erhöhen, indem es Dezentralität, Diversifikation und

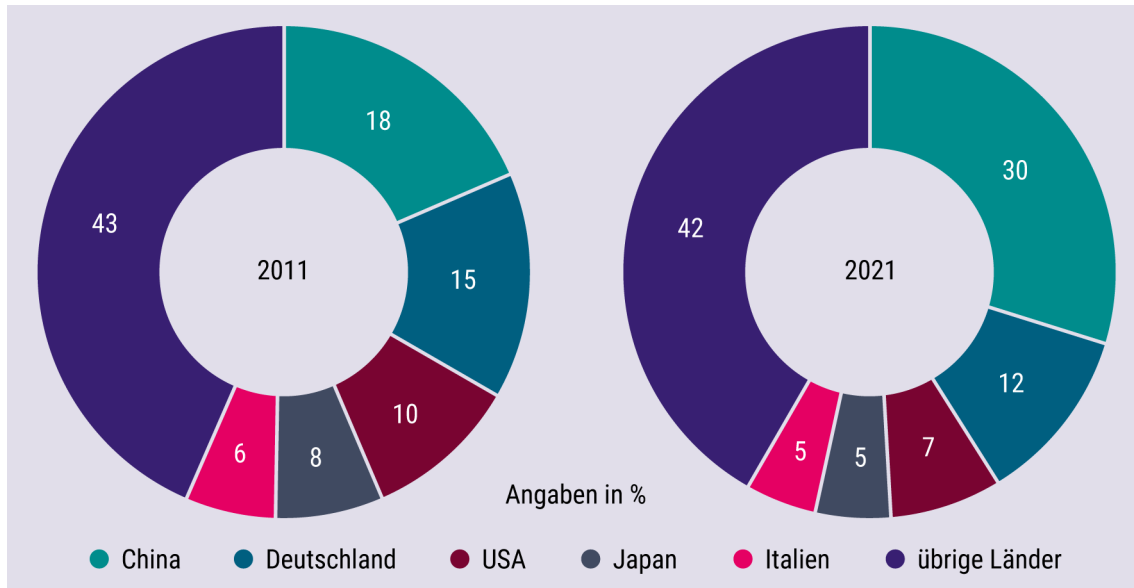
Anpassungsfähigkeit fördert. Für eine Ausschöpfung der Potenziale ist es jedoch entscheidend, dass Wirtschaftlichkeit, Qualitätsstandards und regulatorische Einbindung gesichert sind.

Ein ausschließlich auf immer aufwendigere Recyclingtechnologien fokussierter Ansatz stößt somit an ökonomische und ökologische Grenzen. Folglich rückt die Frage in den Vordergrund, wie Produkte so gestaltet werden können, dass sie sich mit vergleichsweise einfachen Verfahren hochwertig recyceln lassen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die umwelt- und recyclinggerechte Gestaltung von Produkten – insbesondere solcher, die werkstofflich verwertbar sind – an Bedeutung. Politische Förderung und Regulierung setzen hier verstärkt auf Ansätze wie Design for Recycling, unter anderem im Rahmen der Verordnung (EU) 2024/1781¹², die einen Rechtsrahmen für Anforderungen an Kreislauffähigkeit, Rezyklierbarkeit und den Einsatz von Rezyklaten schafft (TAB 2024b). Eine solche produktseitige Ausrichtung stärkt zugleich die Resilienz des Systems, da sie Stoffkreisläufe stabilisiert, die Abhängigkeit von Primärrohstoffen reduziert und die Anpassungsfähigkeit gegenüber Markt- und Lieferkettenrisiken erhöht.

Ein erkennbarer Trend ist die zunehmende internationale Wettbewerbsdynamik im Bereich der Abfall- und Recyclingtechnik. Deutschland zählt hier seit Jahren zu den führenden Standorten. Die Innovationskraft der deutschen Abfall- und Kreislaufwirtschaft spiegelt sich auch in der Patenttätigkeit wider (Milanović/Eric 2024). Mit einem Anteil von 14 % ist Deutschland nach den USA (22 %) der zweitwichtigste Anmelder von europäischen Patenten im Bereich Kreislaufwirtschaft (Prognos AG/INFA GmbH 2024, S. 121). Schwerpunkte bei Patentanmeldungen in Europa bilden Innovationen bei der stofflichen Verwertung (56 %) sowie der Anlagentechnik (21 %). Ein Blick auf die weltweiten Patente im Bereich Technik für die Abfallwirtschaft zeigt jedoch auch, dass der Anteil Deutschlands von 10,9 % im Jahr 2017 auf 8,5 % im Jahr 2020 gesunken ist. Dieser Rückgang fällt in eine Phase, in der China und die Republik Korea ihre Patentaktivitäten in diesem Segment deutlich ausbauen. So konnte China seinen Anteil an den weltweiten Patenten steigern und seinen Exportanteil in diesem Marktsegment im gleichen Zeitraum von 18 auf 30 % erhöhen. Im Gegensatz dazu ging der deutsche Marktanteil von 15 auf 12 % zurück (Abbildung 2.3) (Prognos AG/INFA GmbH 2024). Insgesamt deutet die Datenlage somit auf eine stark intensivierte internationale Konkurrenz um die Technologieführerschaft hin.

12 Verordnung (EU) 2024/1781 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG

Abbildung 2.3 Entwicklung der weltweiten Exportanteile im Marktsegment Technik für Abfallwirtschaft nach Ländern



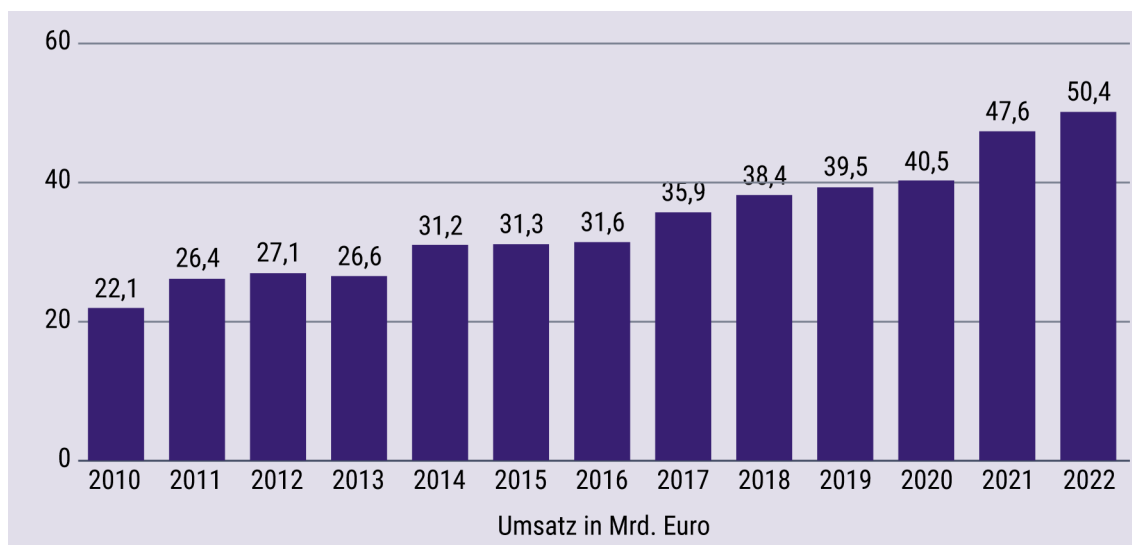
Eigene Darstellung nach Prognos AG/INFA GmbH (2024, S. 121)

2.3 Transformation zu einem industriellen Wertschöpfungssektor

Die Abfallwirtschaft in Deutschland durchläuft einen tiefgreifenden Strukturwandel: Neben den kommunal geprägten Entsorgungsaufgaben entsteht ein industrieller Wertschöpfungssektor mit strategischer Bedeutung für die nationale Rohstoffversorgung. Die Branche zeichnet sich durch dynamisches Wachstum, zunehmende Spezialisierung und Professionalisierung aus. Angesichts steigender Importabhängigkeiten bei mineralischen und kritischen Rohstoffen rückt hochwertiges Recycling verstärkt in den Fokus gesamtwirtschaftlicher Resilienz. Zunehmende Investitionen in Recyclingkapazitäten, der sich verschärfende Fachkräftemangel und globaler Wettbewerbsdruck verändern die Marktstrukturen nachhaltig und machen gezielte politische wie wirtschaftliche Weichenstellungen erforderlich.

Alle wirtschaftlichen Kennzahlen der Abfallwirtschaft deuten auf Wachstum hin: So stieg der Umsatz deutlich von 22,1 Mrd. Euro im Jahr 2010 auf 50,4 Mrd. Euro im Jahr 2022, während die Zahl der Beschäftigten im gleichen Zeitraum von 102.000 auf 192.000 Personen anstieg (Destatis 2025b, 2025g) (Abbildung 2.4).

Abbildung 2.4 Umsatz der Entsorgungswirtschaft in Deutschland von 2010 bis 2022



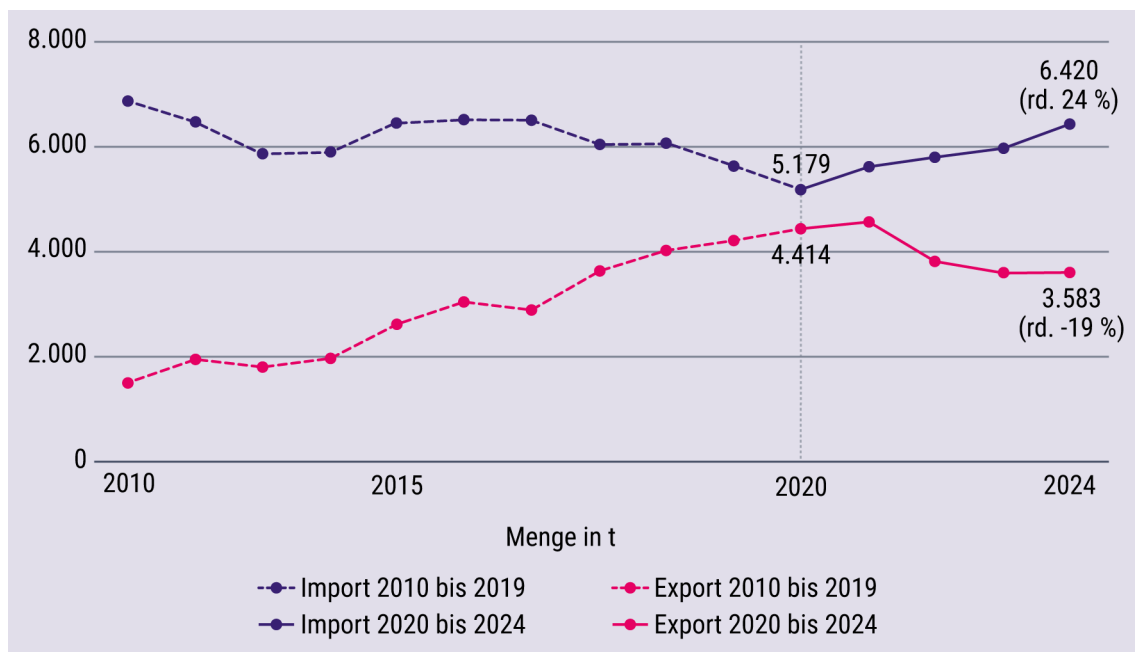
Quelle: nach Destatis (2025g)

Auch die Unternehmenslandschaft entwickelte sich kräftig: Die Zahl der Betriebe verdoppelte sich beinahe von 989 auf 1.814 (Destatis 2025h). Die Investitionen der Unternehmen in der Entsorgungswirtschaft verdreifachten sich nahezu und stiegen von 1.233 Mio. Euro im Jahr 2013 auf 3.183 Mio. Euro im Jahr 2023 (Destatis 2025d). Dieser stabile und über mehrere Jahre hinweg konsistente Trend verdeutlicht die zunehmende politische Bedeutung sowie die wachsende Förderung der Kreislaufwirtschaft (Kapitel 2.1). Für die kommenden Jahre wird weiteres Wachstum erwartet: Laut einer Prognose der Roland Berger GmbH wird der deutsche Leitmarkt der Kreislaufwirtschaft bis 2030 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 5,9 % expandieren (BMU 2021). Besonders dynamisch entwickelt sich die stoffliche Verwertung mit Wachstumsraten von über 13 % jährlich – deutlich über dem Branchendurchschnitt. Die Realisierung dieser Wachstumsraten setzt jedoch voraus, dass ausreichend qualifizierte Fachkräfte verfügbar sind. Der Personalbedarf steigt mittelfristig, getrieben durch höhere Anforderungen an Qualitätsmanagement, Digitalisierung und die Umsetzung verschärfter Umweltauflagen. Gleichzeitig trifft dieser zusätzliche Bedarf auf einen sich abzeichnenden Fachkräftemangel, unter anderem infolge des demografischen Wandels. Zwar zeigen die Indikatoren der Bundesagentur für Arbeit (2024) bisher nur geringe Anzeichen eines Fachkräfteengpasses. Branchenverbände berichten hingegen von zunehmenden Problemen bei der Gewinnung und Bindung qualifizierten Personals (eWaste 2024; Prognos AG/INFA GmbH 2024). Betroffen ist vor allem der Bereich Sammlung und Transport (eWaste 2024).

Die wirtschaftliche Dynamik der Abfall- und Kreislaufwirtschaft – gekennzeichnet durch steigende Umsätze, Investitionen und Beschäftigung – wird politisch durch Strategien wie die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie und die Deutsche Rohstoffstrategie begleitet. Beide Strategien verfolgen das Ziel, inländische Wachstumspotenziale zu mobilisieren und zugleich die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu verringern. Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie ordnet die Kreislaufwirtschaft explizit als Hebel zur Stärkung der Rohstoffsicherheit und zur Reduktion des Primärrohstoffbedarfs ein. Deutschland nimmt im internationalen Handel mit Abfällen und

Sekundärrohstoffen eine zentrale Rolle ein: Bei einem globalen Marktvolumen von 183 Mrd. US-Dollar (2021) ist es mit einem Weltmarktanteil von ca. 9 % der zweitgrößte Exporteur, weit hinter den USA (20 %), aber vor China, das in diesem Segment nur eine untergeordnete Rolle spielt (Prognos AG/INFA GmbH 2024). Gleichzeitig ist Deutschland ein Nettoimporteur: Zwischen 2020 und 2024 stiegen die Importe von recycelbaren Abfällen und Sekundärrohstoffen um 15 %, während die Abfallexporte um 8 % rückläufig waren (Destatis 2025f, 2025j) (Abbildung 2.5).

Abbildung 2.5 Grenzüberschreitende Verbringung notifizierungspflichtiger Abfälle



Quelle: nach Destatis (2025f, 2025j)

Über 90 % der deutschen Exporte und Importe von Sekundärrohstoffen entfallen auf europäische Partnerländer, was auf eine zunehmende Regionalisierung des Abfallhandels hindeutet (Kapitel 2.1). Ein erheblicher Anteil der Importe besteht aus Metallschrotten, insbesondere Kupfer, die für die deutsche Industrie – etwa in der Elektrotechnik oder Automobilproduktion – essenziell sind (bvse 2024a; Destatis 2025f, 2025j). Mit Digitalisierung und Energiewende steigt der Bedarf an mineralischen und kritischen Rohstoffen weiter an (Bastian et al. 2024; Cornelius et al. 2024; Köhler-Geib et al. 2024). Gleichzeitig zeigen Analysen der EU, dass der Versorgungsrisikoindeks für viele kritische Rohstoffe in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen ist – vor allem aufgrund hoher Importkonzentration, geopolitischer Spannungen und eines begrenzten Recyclings (Kapitel 3.1) (EEA 2025c). Vor diesem Hintergrund gewinnt der Auf- und Ausbau inländischer Kreislauf- und Recyclingkapazitäten strategische Bedeutung, um die Rohstoffsicherheit langfristig zu gewährleisten. Einen wichtigen Beitrag kann hier der Einsatz datengetriebener Verfahren, insbesondere von KI-Anwendungen für ein effizienteres Metallrecycling, leisten (Kasten 2.4).

Kasten 2.4 Emerging Issue: KI als Schlüssel für ein zirkuläres Metallmanagement

Die Rückgewinnung von Metallen ist technisch anspruchsvoll und mit erheblichen Investitions- und Prozesskosten verbunden, gewinnt aber angesichts begrenzter heimischer Verfügbarkeit und der Einstufung vieler Metalle (zum Beispiel Kupfer) als kritische Rohstoffe für die Rohstoffsicherheit stark an Bedeutung (TAB 2024b). Künstliche Intelligenz, einschließlich Computer Vision und autonomer Robotik gilt als zentraler Vorreiter für ein zirkuläres Metallmanagement, Unterstützungspotenziale zeigen sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette:

Produktdesign: Aktuelle Design-for-Recycling-Ansätze sind zentral für die industrielle Kreislaufwirtschaft, zielen aber oft nur auf ideale Produkte im Neuzustand und unterschätzen reale End-of-Life-Zustände (korrodierte Schrauben, defekte Komponenten etc.) (Formentini/Ramanujan 2023). Produkte sollten so designt werden, dass sie auch in ihrem realen End-of-Life-Zustand effizient (teil)demontiert und in höherwertige Recyclingpfade überführt werden können. KI-gestützte Zustandsbewertung (zum Beispiel von Batterien und Elektronik) kann die dafür nötigen Informationen über Restlebensdauer, Defekte und Wert liefern, um diese zirkulären Optionen gezielt zu nutzen (Holtmannspötter et al. 2025).

Reparatur und Wiederverwendung: KI kann sowohl für die automatisierte Zustandsbewertung gebrauchter Elektronik als Grundlage für Reparatur- und Refurbishmententscheidungen als auch für die Zustandsüberwachung einzelner Zellen in Second-Life-Batteriespeichern eingesetzt werden. In beiden Fällen ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Verschleiß oder Fehlfunktionen den gezielten Austausch oder die Instandsetzung kritischer Komponenten, was die Nutzungsdauer elektronischer Produkte und Anlagen verlängert. KI-basierte prädiktive Wartung ermöglicht zudem die kontinuierliche Überwachung von Maschinen und Industrieanlagen (zum Beispiel akustische Signale, Korrosionsdaten), wodurch sich die Nutzungsdauer metallhaltiger Komponenten und Anlagen verlängern lässt (Holtmannspötter et al. 2025).

Sortierung und Recycling: KI unterstützt die präzisere Identifikation und Klassifikation von Metallschrott – etwa die Trennung kupfer- von eisenhaltigen Fraktionen mittels Deep-Learning-basierter Bildverarbeitung –, die datengetriebene Optimierung und Automatisierung mechanischer Sortierprozesse sowie die (teil)automatisierte Demontage und Aufbereitung von Produkten und Baugruppen in Recyclingprozessen (Holtmannspötter et al. 2025; Koinig et al. 2024).

Die Kopplung mit IoT und Blockchain ermöglicht die Verfolgung von Metallen über Produktlebenszyklen, die Erkennung von Rückgewinnungspotenzialen und die optimierte Logistik zu Recyclinganlagen. KI kann somit als Schlüssel für ein zirkuläres Metallmanagement dienen und durch die verbesserte Rückgewinnung kritischer Rohstoffe die Versorgungssicherheit erhöhen. KI-Modelle in der Kreislaufwirtschaft stoßen derzeit allerdings vor allem an Grenzen der Datenverfügbarkeit und der Interoperabilität: Reviews zeigen, dass es an offenen, standardisierten Datensätzen mangelt und reale Daten stark heterogen sind, was robuste, generalisierbare Modelle erschwert (Jano et al. 2026). Dies gilt besonders für Bild- und Sensorsysteme in heterogenen Schrott- und Altgeräteströmen, die große, repräsentative und kuratierte Datensätze zur

Abbildung von Legierungen, Beschichtungen und Verbundmaterialien erfordern. Gleichzeitig wird KI in der Praxis überwiegend in isolierten Prozessschritten eingesetzt. Lösungen, die ganze Wertschöpfungsketten abdecken, sind derzeit noch selten, was zu Datensilos und Integrationsproblemen führt. In Kombination mit KI-Lösungen könnte die Blockchaintechnologie helfen, Datenhoheit, Nachvollziehbarkeit und Interoperabilität über Wertschöpfungsschritte und Unternehmensgrenzen hinweg zu verbessern und damit die fragmentierte Datensituation zu entschärfen (Jano et al. 2026; Rusch et al. 2023).

Besonders deutlich ist der Kapazitätsaufbau im Bereich des Batterierecyclings erkennbar. Mit der zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität entsteht in Form von ausgedienten Lithium-Ionen-Akkus eine neue Quelle für Abfall und wertvolle Ressourcen (T&E 2024). Die Verordnung (EU) 2023/1542¹³ schreibt ab 2025 verbindliche Sammel- und Recyclingquoten sowie Rezyklatanteile in neuen Batterien vor. Prognosen zufolge wird allein der deutsche Markt für das Recycling von Batterien für Elektrofahrzeuge von rund 22 Mio. US-Dollar (2023) auf 647 Mio. US-Dollar bis 2030 anwachsen (Saatkamp/Schmaltz 2023; Stephan 2025). In Europa werden derzeit große Recyclingkapazitäten aufgebaut, wobei Deutschland eine Vorreiterrolle einnimmt (Hartmann 2022). Die verfügbare Erstbehandlungskapazität für Altbatterien stieg von ca. 60.000 t im Jahr 2020 bis Ende 2023 auf 160.000 t pro Jahr (37 Anlagen) (Saatkamp/Schmaltz 2023). Bis 2025 sind Erweiterungen auf 400.000 t pro Jahr angekündigt, was einer Vervierfachung innerhalb von 5 Jahren entspricht. Während sich der Kapazitätsaufbau im Bereich der Solarmodule derzeit in einer Übergangsphase von Pilotprojekten zum industriellen Maßstab befindet (Jowett 2024; Wilfer 2025), verfügt Deutschland beim Metallrecycling für Basismetalle wie Kupfer, Aluminium und Stahl bereits über eine leistungsfähige Infrastruktur.¹⁴ Allerdings stößt die Rückgewinnung seltener Metalle aus komplex zusammengesetztem Elektronikschrott an technische und wirtschaftliche Grenzen und ist nur mit innovativen Lösungen bei Produktdesign, Demontageprozessen sowie Sortier- und Trennverfahren möglich.

2.4 Wandel gesellschaftlicher Konsummuster

Auf gesellschaftlicher Ebene verändern verschiedene Entwicklungen die Konsummuster und beeinflussen somit indirekt die Abfallmengen und -zusammensetzung. Insgesamt zeigt sich, dass das gesellschaftliche Umweltbewusstsein nach einem Höhepunkt im Jahr 2019 leicht rückläufig

13 Verordnung (EU) 2023/1542 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG

14 <https://recyclingatlas.dera.bgr.de/mapapps/resources/apps/recyclingatlas/index.html?lang=de> (18.6.2026)

ist und nicht nachhaltige Konsumpraktiken weiterhin dominieren. Verkürzte Nutzungsdauern bei Elektrogeräten und die Expansion des Onlinehandels führen zu einem kontinuierlichen Anstieg von Verpackungs-, Textil- und Elektroabfällen. Gleichzeitig wächst jedoch auch das zivilgesellschaftliche Engagement für Abfallvermeidung und Wiederverwendung, wodurch Repairkultur, Second-Hand-Märkte und kreislauforientierte Geschäftsmodelle an Bedeutung gewinnen. Auf soziodemografischer Ebene führt die Alterung der Bevölkerung zu kleineren Haushalten mit einem höheren Durchschnittsalter. Dies trägt unter anderem zu einem höheren Pro-Kopf-Abfallaufkommen bei. Diese Entwicklungen beeinflussen die Abfallmengen, die Zusammensetzung der Fraktionen und die Wiederverwendungsquoten, was sich wiederum auf die Sammellogistik, die Aufbereitung und das Recycling auswirkt.

Das Umweltbewusstsein der Bevölkerung wird seit 1996 alle 2 Jahre durch Befragungen im Rahmen der Umweltbewusstseinsstudie des Umweltbundesamtes (UBA) erhoben. Die Ergebnisse dieser Befragungen zeigen, dass das Umwelt- und Naturbewusstsein in der deutschen Bevölkerung im Langzeittrend gestiegen ist, mit einem Höhepunkt im Jahr 2019. Seither ist es jedoch wieder rückläufig. So sank der Anteil der Bevölkerung, der Umwelt- und Klimaschutz als sehr wichtig bewertet, von 65 % im Jahr 2020 über 57 % (2022) auf 54 % (2024) (UBA 2022b, 2023b, o. J.e). Die Bedeutung kreislaufwirtschaftsnaher Ziele wird jedoch durchgehend als hoch eingeschätzt. So bewerteten 2022 und 2024 jeweils große Mehrheiten die Förderung der Kreislaufwirtschaft (72 bzw. 70 %) sowie die Verringerung von Plastikmüll (75 bzw. 79 %) als sehr wichtig. Auch der vom IFH Köln (HDE/IFH Köln 2024) durchgeführte Konsummonitor Nachhaltigkeit zeigt ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein der Konsument/innen. Dies lässt insgesamt auf eine große öffentliche Unterstützung für Kernprinzipien der Kreislaufwirtschaft und entsprechende politische Maßnahmen schließen. Allerdings ist unklar, inwiefern sich diese Maßnahmen in nachhaltiges Verhalten in den Bereichen Abfallvermeidung und Wiederverwendung übersetzen. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass tatsächliche Verhaltensänderungen häufig hinter den angegebenen Einstellungen zurückbleiben (Attitude Behaviour Gap) (Bürker 2025).

Ein Teil dieses Nachhaltigkeitsbewusstseins offenbart sich in zivilgesellschaftlichen Initiativen zur Abfallvermeidung und Wiederverwendung. In Deutschland ist in den vergangenen Jahren eine deutliche Zunahme solcher Initiativen zu beobachten. Besonders gut belegt sind Aktivitäten im Bereich Reparatur sowie Re-Use-Initiativen. Die Stiftung anstiftung verzeichnete bis 2024 rund 2.000 Reparaturinitiativen (wie etwa Repaircafés), davon über 1.200 im Netzwerk Reparatur-Initiativen¹⁵ – mit weiterhin wachsender Tendenz. Auffällig ist, dass überdurchschnittlich viele dieser Initiativen erst in den letzten Jahren gegründet wurden (Netzwerk Reparatur-Initiativen 2025). Auch im Bereich Wiederverwendung zeigt sich ein dynamisches Wachstum: Laut Re-Use Deutschland stiegen die lokal wiederverwendeten Mengen innerhalb von 3 Jahren von 6.359 t (2021) auf 23.026 t (2024). Parallel dazu expandiert der Second-Hand-Markt in Deutschland

¹⁵ <https://www.reparatur-initiativen.de/> (18.6.2026)

deutlich. 2022 betrug der Umsatz mit dem Verkauf gebrauchter Waren rund 14,8 Mrd. Euro – ein erheblicher Anstieg gegenüber 8,3 Mrd. Euro im Jahr 2010 (HDE/IFH Köln 2024).

Ergänzend dazu entwickeln sich neue plattformbasierte Geschäftsmodelle in den Bereichen Wiederverwendung und Reparatur, etwa im Textilbereich (Kasten 2.5). Dazu zählen digitale Marktplätze für Sekundärprodukte und -services sowie eine zunehmende Professionalisierung des Reparatursektors, die unter anderem durch EU-Regulierungen wie das Recht auf Reparatur und Ökodesignvorgaben angestoßen wird. Studien mit Blick auf den Elektronikmarkt zeigen, dass dieses Segment zwar wächst, im Verhältnis zum Neugerätemarkt jedoch weiterhin klein bleibt. Qualitätsstandards und Garantien gelten als zentrale Hebel für eine breitere Marktdurchdringung (Circularity 2024; Gries et al. 2022). Gleichzeitig bleibt eine Persistenz nicht nachhaltiger Konsummuster deutlich erkennbar. In verschiedenen Konsumgütermärkten finden sich Hinweise auf beschleunigte Konsumzyklen und verkürzte Nutzungsdauern. Dies zeigt sich unter anderem in steigenden Mengen an Verpackungsabfällen (UBA o. J.f), steigenden Mengen in Verkehr gebrachter Elektrogeräte (UBA o. J.a) sowie einem steigenden Pro-Kopf-Konsum bei der Bekleidung (EEA 2025b). Auch der Onlinehandel und die Onlinelieferdienste verzeichneten während der COVID-19-Pandemie ein starkes Wachstum. Der Onlinehandel in Deutschland erzielte 2024 ein Umsatzplus von 3,8% auf 88,8 Mrd. Euro netto. Für 2025 wird eine Fortsetzung dieses Trends prognostiziert, mit einem erwarteten Wachstum von 4% auf rund 92,4 Mrd. Euro (Retail-News 2025). Dieses Wachstum trägt erheblich zu den steigenden Verpackungsabfallmengen bei. Parallel dazu nimmt die Zahl der Retouren weiter zu und erreichte 2025 mit 550 Mio. Rücksendungen einen neuen Höchststand (Handelsblatt 2025). Besonders dynamisch entwickelte sich im Zuge der COVID-19-Pandemie der Markt für Onlinelieferdienste im Bereich Lebensmittellieferungen. Der Anteil der Onlinebesteller/innen im Lebensmittelsektor stieg zwischen 2020 und 2024 von rund 7% auf etwa 25% (Bitkom 2020, 2024).

Kasten 2.5 Emerging Issue: Fashion as a Service

Die Textilindustrie ist in den letzten Jahren kontinuierlich gewachsen. Allerdings beruht dieses Wachstum größtenteils auf nicht nachhaltigen Geschäftsmodellen – typisch sind Billigproduktion, schnelle Produktionszyklen und niedrige Preise, auch Fast Fashion genannt, die mit Ausbeutung von Arbeitskräften und erheblicher Umweltverschmutzung einhergehen (Peake/Kenner 2020; TAB 2025a). Hinter der Ölindustrie gilt die Textilindustrie inzwischen als der zweitgrößte Verschmutzer weltweit (Herold/Prokop 2023). Mode verursacht 8 bis 10% der globalen CO₂-Emissionen und massive Wasser- und Ressourcenverbräuche. Hinzu kommen jährlich allein in Deutschland rund 175.000 t Textil- und Bekleidungsabfälle von privaten Haushalten, die über öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger eingesammelt wurden (Destatis 2025a).

Als nachhaltiges Gegenmodell zu Fast Fashion gilt Fashion as a Service (FaaS). Dabei wird Kleidung nicht verkauft, sondern temporär über Miet- oder Abo-Modelle zur Verfügung gestellt. Die Skalierung dieses Modells erfolgt über digitale Plattformen, Dateninfrastrukturen und

Trackingtechnologien. Zur Anwendung können dabei verschiedene Modelle und Dienstleistungen kommen, die sich teils an unterschiedliche Kundensegmente richten: Dazu gehören Kleidungsabonnements, Plattformen für den Verleih von Kleidung oder maßgeschneiderte Empfehlungen. Meist werden diese Dienstleistungen mit digitalen Technologien gekoppelt, um den Kund/innen möglichst personalisierte Angebote machen zu können (Herold/Prokop 2023). Das Geschäftsmodell FaaS zielt darauf ab, die Kundenbindung zu erhöhen und stabile Einnahmeströme zu generieren. Beispiele für FaaS sind Unternehmen wie Mud Jeans (Leasingmodell für Jeans) und Lena Fashion Library (Leihservice). Plattformen wie Rent the Runway oder Dienstleister wie CaaStle ermöglichen es Marken, eigene Mietmodelle aufzubauen, ohne die logistische Infrastruktur selbst entwickeln zu müssen.

Die Relevanz von FaaS für das Infrastruktursystem Abfall ergibt sich primär aus seinem Potenzial, die enormen Mengen an kurzlebigen Textilabfällen zu verringern, für die bestehende Entsorgungs- und Wiederverwendungspfade bislang nur begrenzt zufriedenstellende Lösungen bieten. Obwohl FaaS als zirkuläres Geschäftsmodellkonzept bereits intensiv diskutiert und in Pilotprojekten erprobt wurde, bleibt es im Verhältnis zur dominanten Fast-Fashion-Logik bislang ein Nischenphänomen. Zentrale Herausforderungen sind eine komplexe Logistik (robuste Systeme für Rücksendungen, Reinigung, Reparaturen und Bestandsmanagement) sowie erhebliche technologische Investitionen – sowohl in Software zur Verfolgung von Einzelstücken und ihres Zustands als auch in personalisierte Empfehlungssysteme und benutzerfreundliche Apps (Chakrawal/Bekal 2025; Poldner et al. 2022). Zudem ist es erforderlich, die mit FaaS verbundenen Umweltbelastungen – insbesondere durch Transport und Waschen der Kleidung – zu minimieren, damit die ökologischen Vorteile gegenüber konventionellen Fast-Fashion-Modellen realisiert werden können und FaaS nicht durch Reboundeffekte (Mehrtransporte, zusätzlicher Waschaufwand) zu einer zusätzlichen Belastung des Abfall- und Ressourcensystems wird. Hier kann eine effizientere Steuerung der Logistikprozesse mit digitalen Methoden – etwa Routenoptimierung, Bestands- und Zyklustracking sowie Prognosen für Nachfrage und Auslastung – helfen, zusätzliche Transporte und Waschgänge zu begrenzen.

Fast Fashion und FaaS illustrieren, wie sich Konsumentenverhalten und Geschäftsmodelle wechselseitig beeinflussen – bei Fast Fashion bereits empirisch als Massenphänomen zu beobachten, bei FaaS bislang vor allem als Nischenmodell. Letztlich wird sich FaaS nur durchsetzen, wenn Angebote zentrale Akzeptanzfaktoren wie Stil, Qualität/Passform, Vertrauen und Preis adressieren. Gleichzeitig kann FaaS über attraktive Angebote neue Routinen fördern (Testen statt Kaufen, geteilter Zugang statt Besitz) (Travasi/Musso 2023).

Neben veränderten Konsum- und Vertriebsmustern wirkt auch der demografische Wandel auf das Abfallaufkommen. Verschiedene demografische Faktoren beeinflussen dieses deutlich: die Bevölkerungszahl, die Altersstruktur, die durchschnittliche Haushaltsgröße und die Siedlungsstruktur (urban, suburban, ländlich) (UBA 2018). Ältere Menschen verursachen weniger Verpackungs- und Sperrmüll und konsumieren insgesamt sparsamer. Bei bestimmten Produkten, etwa Hygieneartikeln, verbrauchen sie jedoch höhere Mengen. Der demografische Wandel führt zudem zu

mehr Single- und Paarhaushalten ohne Kinder. 2022 waren 41 % aller Haushalte Einpersonenhaushalte (17 Mio.) gegenüber 19 % im Jahr 1950 (Destatis 2023a). Die durchschnittliche Haushaltsgröße sank 2024 auf 2,02 Personen (Destatis 2025c, 2025i). Prognosen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gehen davon aus, dass dieser Trend bis mindestens 2040 anhält (BBSR 2021). Mit sinkender Haushaltsgröße steigt das Pro-Kopf-Abfallaufkommen, weil Verpackungen und Lebensmittel nicht geteilt werden können. Für die Abfallwirtschaft ergeben sich daraus neue Herausforderungen. So sind Sammelsysteme erforderlich, die spezifisch an die Bedürfnisse einer alternden Gesellschaft angepasst sind. Zudem müssen die Entsorgungsstrukturen sowohl in schrumpfenden ländlichen Regionen, in denen eine sinkende Auslastung droht, als auch in urbanen Wachstumsräumen an die neuen Bedingungen ausgerichtet werden (UBA 2018).

3 Systemische Risiken und ihre Auswirkungen auf das Infrastruktursystem Abfall

Die in Kapitel 2 beschriebenen Entwicklungen machen deutlich, dass das Infrastruktursystem Abfall für Gesundheits-, Umwelt- und Rohstoffsicherheit von zentraler Bedeutung ist. Gerade diese Systemrelevanz geht mit einer besonderen Anfälligkeit für systemische Risiken einher: Störungen in einzelnen Funktionsbereichen können sich aufgrund enger technischer, organisatorischer und ökonomischer Verflechtungen schnell auf das Gesamtsystem ausweiten und kaskadierende Auswirkungen entfalten.

Systemische Risiken können die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems Abfall grundlegend beeinträchtigen. Sie stellen eine besondere Herausforderung dar, da sie nicht isoliert auf einzelne Komponenten eines Infrastruktursystems wirken, sondern dessen Funktionsfähigkeit insgesamt gefährden können. Sie bezeichnen komplexe Gefahren oder Bedrohungen, die durch nichtlineare Wechselwirkungen gekennzeichnet sind, geografische, sektorale und soziale Grenzen überschreiten und ihre Wirkung häufig durch Kaskaden- und Verstärkungseffekte entfalten. Zudem weisen sie stochastische Wirkungsketten auf und können beim Erreichen von Kippunkten abrupte und tiefgreifende Veränderungen auslösen. Charakteristisch sind ferner eine häufig verzögerte gesellschaftliche Wahrnehmung und Regulierung (Renn et al. 2022). Aufgrund dieser Eigenschaften wirken systemische Risiken selten isoliert, sondern betreffen häufig mehrere Infrastruktursysteme gleichzeitig, da multikausale Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte auftreten.

Für die nachfolgende Analyse wird eine heuristische Systematisierung systemischer Risiken zugrunde gelegt, die die Bereiche Gesellschaft, Technologie, Umwelt, Wirtschaft und Politik umfasst. Auf dieser Grundlage werden diejenigen systemischen Risiken betrachtet, die in der wissenschaftlichen Literatur und im fachlichen Diskurs als besonders relevant für das Infrastruktursystem Abfall herausgearbeitet wurden und daher als besonders gefährdend einzustufen sind. Kapitel 3.1 zeigt die Auswirkungen dieser Risiken entlang zweier miteinander verknüpfter Perspektiven: Zum einen wird der aktuelle Stand der Gefährdungslagen unter Berücksichtigung relevanter systemischer Risiken sowie deren absehbarer Entwicklungsdynamiken untersucht. Zum anderen wird analysiert, welche Risiken im Kontext laufender Transformationsprozesse mit Pfadabhängigkeiten verbunden sind und welche Implikationen sich daraus für die zukünftige Robustheit und Leistungsfähigkeit des Systems ergeben.

3.1 Status quo der Gefährdungslagen und Entwicklungsdynamiken

Das Infrastruktursystem Abfall ist durch eine Reihe systemischer Risiken gefährdet, die die einzelnen Systembereiche in unterschiedlichem Maße betreffen. Für jedes dieser Risiken wird im Folgenden die Gefährdungslage (gering, eher gering, mittel, eher hoch, hoch) auf Grundlage einer explorativen Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit, des potenziellen Schadensausmaßes

sowie der Anzahl der betroffenen Infrastruktursystembereiche bewertet. Auf Basis der Einzelbewertungen und unter Einbezug der ausgewerteten Quellen sowie der geführten Fachgespräche ergibt sich für das Infrastruktursystem insgesamt aktuell eine Gefährdungslage, die als eher gering einzustufen ist. Das Infrastruktursystem Abfall ist in Deutschland in vielen Bereichen weitgehend dezentral organisiert und bislang nur in Teilen digitalisiert. Dadurch bestehen aktuell hinsichtlich mehrerer systemischen Risiken eher geringe Verwundbarkeiten. Besonders Wetterextreme, aber auch Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit, geopolitische Konflikte, Versorgungsengpässe sowie Pandemien und Epidemien gefährden derzeit jedoch in vergleichsweise höherem Maß die Funktionsfähigkeit und Stabilität des Infrastruktursystems. Aufgrund von Entwicklungsdynamiken der systemischen Risiken sowie Veränderungen im Infrastruktursystem werden vor allem bei den systemischen Risiken Wetterextreme, globale Erwärmung, Cyberkriminalität, Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit sowie Versorgungsengpässe ein Anstieg und damit eine zukünftig höhere Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall erwartet.

Wetterextreme

Das Infrastruktursystem Abfall wird durch systemische Klima- und Umweltrisiken, insbesondere durch Wetterextreme, die sich infolge der globalen Erwärmung häufen, derzeit in einem eher hohen Ausmaß gefährdet. Deutschland ist bereits heute in erheblichem Umfang von Wetterextremen betroffen (Kunz 2025). Besonders relevant sind Starkregen und Hochwasser, die in ganzen Regionen erhebliche Schäden an der Siedlungsstruktur verursachen. Vor allem die Systembereiche Abfallerzeugung und -vermeidung, Sammlung und Transport, Sortierung und Aufbereitung sowie gegebenenfalls Verwertung und Recycling sind davon betroffen. In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten haben Hochwasserereignisse wiederholt die erhebliche Vulnerabilität des Infrastruktursystems Abfall deutlich gemacht. Auch Hitzewellen und Dürreperioden beeinflussen dessen Funktionalität und Stabilität, hier vor allem der Systembereiche Sammlung und Transport, Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung. Hitze und Trockenheit erhöhen das Brandrisiko bei zwischengelagerten Abfällen (Hübener 2025). Gleichzeitig führen Hitzewellen zu einer hohen körperlichen Belastung der Beschäftigten (Thieken et al. 2018; WDR 2025). Starke Stürme beeinträchtigen den Systembereich Sammlung und Transport und führen dort teilweise zu temporären Unterbrechungen und Ausfällen (Schwitalla 2020; Wochenblatt Reporter 2022).

Wie zuvor erwähnt, sind Hochwasserereignisse besonders relevant: Sie gefährden das Abfallsystem vor allem durch einen abrupt auftretenden, massiven Anstieg der Abfallmengen. Zunächst ist der Bereich Abfallerzeugung und -vermeidung von den großen Mengen flutbedingter Abfälle betroffen. Dabei fallen primäre Abfälle, wie mitgerissene Fahrzeuge, Wohnwagen, Baumstämme oder im Außenbereich gelagerter Hausrat, und sekundäre Abfälle, wie beschädigter Hausrat, zerstörte Elektrogeräte und Problemstoffe (zum Beispiel Farben, Lacke), an (Hurtenbach 2023). Je nach Verlauf des Hochwassers, regionalen Gegebenheiten und Maßnahmen gegen das Hochwasser können zudem erhebliche Mengen Sand anfallen (Landeshauptstadt Dresden 2005). Die Flut im Ahrtal verdeutlichte das Ausmaß solcher Belastungen: Allein zwischen Juli und November 2021 wurden im Kreis Ahrweiler über 300.000 t Sperrmüll entsorgt – ein Aufkommen, das sonst in rund 40 Jahren anfällt. Insgesamt fiel mehr als 1 Mio. t Abfälle an (Stand 2023), die gesammelt, transportiert und behandelt werden mussten (Hurtenbach 2023). Auch das Hochwasser in

Dresden im August 2002 führte zu außergewöhnlichen Abfallmengen, darunter 77.000 t Sperrmüll und 29.000 Sandsäcke (Landeshauptstadt Dresden 2005).

Neben den außergewöhnlichen Abfallmengen durch die Flut selbst staut sich auch das reguläre Müllaufkommen, da beschädigte Infrastrukturen die Entsorgung erschweren und den Bereich Sammlung und Transport beeinträchtigen. Im Ahrtal führten überflutete Straßen, beschädigte Brücken, enge Tallagen und verstopfte Straßen sowie der Mangel an Mülltonnen dazu, dass die Abfuhr immer wieder neu und oft kleinteilig organisiert werden musste. Zusätzliche Abfälle (vor allem Bio- und Restmüll) entstanden durch die große Zahl an Helfer/innen vor Ort (Hurtenbach 2023). Teilweise kam es zudem zu Koordinationsproblemen mit Hilfsdiensten, denen spezifische Kenntnisse über abfallwirtschaftliche Abläufe fehlten (Hurtenbach 2023).

Von den hohen Abfallmengen sind auch die Bereiche Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung und Recycling betroffen. In der Regel sind die Anlagen nicht auf derart große Abfallmengen ausgelegt und können bei solchen Extremlagen schnell an Kapazitätsgrenzen stoßen (Hurtenbach 2023). Im Ahrtal mussten daher neue Logistikflächen eingerichtet und der Brandschutz angepasst werden, da die örtlichen Anlagen für diese Belastung nicht dimensioniert waren (Hurtenbach 2023; Rinnert et al. 2021). Engpässe ergaben sich zudem bei benötigten Lagerflächen für Zwischenlagerungen, da diese mit anderen Flächenbedarfen, beispielsweise von Hilfsdiensten, konkurrierten (Hurtenbach 2023). Werden abfallwirtschaftliche Anlagen selbst von Hochwasser beschädigt, können regionale Behandlungskapazitäten vollständig ausfallen und große Rückstaumengen nach sich ziehen. Beispielsweise kam es im September 2024 in Österreich durch Hochwasser zu einem kompletten Ausfall der größten Müllverbrennungsanlage des Landes, wodurch bis November ein Rückstau von 80.000 t Restmüll entstand (Wilfer 2024).

Zudem führen Wetterextreme zu Personalengpässen. Im Ahrtal begrenzten arbeitszeitrechtliche Vorgaben wie Lenk- und Ruhezeiten zunächst den Einsatzumfang der Entsorgung, bevor Sonderregelungen geschaffen wurden (Hurtenbach 2023). Beschäftigte der Abfallwirtschaft wurden selbst von der Flut in Mitleidenschaft gezogen oder fielen aufgrund der Betroffenheit naher Angehöriger aus. 20 % der Beschäftigten des lokalen Entsorgers waren direkt betroffen. Die verbleibenden Beschäftigten leisteten erhebliche Überstunden und in der Folge stiegen krankheitsbedingte Ausfälle aufgrund traumatischer Belastungen an (Hurtenbach 2023).

Die enormen Abfallmengen, die bei Wetterextremen anfallen können, stellen Entsorgungsunternehmen schließlich auch vor wirtschaftliche Herausforderungen. Zwar können unmittelbare Kosten im Rahmen von Aufbauhilfen refinanziert werden, doch kurzfristig fehlen häufig liquide Mittel. Im Ahrtal musste der Landkreis Ahrweiler mit finanzieller Unterstützung aushelfen, wofür jedoch dessen eigener Finanzrahmen erst ausgeweitet werden musste (Hurtenbach 2023).

In den kommenden Jahren wird gemäß aktuellen fachlichen Einschätzungen die Gefährdungslage für die Abfallwirtschaft durch das systemische Risiko der Wetterextreme steigen. Der fortschreitende globale Klimawandel führt bereits heute zu einer messbaren Zunahme von Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, starken Frostepisoden, Winterstürmen, Gewittern und hochwasserrelevanten Starkregenereignissen (Kunz 2025) – ein Trend, der sich auch in Deutschland und Mitteleuropa weiter verstärken wird (Glaser, Rüdiger 2025; Hildebrandt/Lemaitre 2025). Trotz eingeleiteter Klimaanpassungsmaßnahmen nimmt damit auch künftig die Gefahr durch Extremwetterkatastrophen zu, gleichzeitig steigen die Versicherungsrisiken und -kosten (Grömling 2024; Stöver et al. 2025). Für die Abfallwirtschaft ergeben sich daraus neben der Belastung durch große

Abfallmengen neue Verwundbarkeiten: Wiederholte Starkregenereignisse können durch Erosion die Stabilität von Deponieschichten beeinträchtigen und häufiger auftretende Hochwasserereignisse erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass zentrale Anlagen der Abfallwirtschaft, wie Müllverbrennungsanlagen, die sich häufig in Flussnähe befinden, direkt von Hochwasser betroffen sind. Zudem führt die steigende Zahl von Hitzetagen zu einer erhöhten gesundheitlichen und körperlichen Belastung für Beschäftigte der Abfallwirtschaft, beispielsweise im Bereich Sammlung und Transport. Diese Risiken können sich vor dem Hintergrund einer alternden Belegschaft zusätzlich verschärfen (Kapitel 2.3). Insgesamt steigt damit die Eintrittswahrscheinlichkeit witterungsbedingter Funktionsstörungen sowie das Risiko von Folgewirkungen, wie unterbrochenen Entsorgungsprozessen, Verzögerungen in der Abfallbehandlung oder infrastrukturellen Schäden an Anlagen oder Deponien.

Globale Erwärmung

Die globale Erwärmung wirkt sich nicht nur durch die zunehmenden Wetterextreme, sondern auch direkt durch die im Mittel steigenden Temperaturen sowie häufigere und längere Wärme- und Trockenphasen auf das Infrastruktursystem Abfall aus. Zwischen 1881 und 2022 ist die mittlere Temperatur in Deutschland um 1,7 °C angestiegen, was 0,6 °C über dem globalen Temperaturanstieg liegt (UBA 2023a). Betroffen von dieser Entwicklung sind im Infrastruktursystem Abfall vor allem die Systembereiche Sortierung und Aufbereitung, Verwertung und Recycling sowie Beseitigung. Die Gefährdungslage durch globale Erwärmung direkt ist derzeit allerdings noch als eher gering einzuschätzen.

Die bestehende Gefährdung ergibt sich aus einem erhöhten Brandrisiko in Anlagen der Abfallwirtschaft. Längere Trockenperioden und hohe Temperaturen – verstärkt durch Wetterextreme wie Hitzewellen und Dürren – führen dazu, dass gelagerte Materialien, beispielsweise in Recyclingbetrieben, schneller austrocknen und dadurch leichter entzündlich werden. Schon geringe Wärmequellen oder Funken können einen Brand auslösen. Kommt es zu einem Brandereignis, steigt das Schadenspotenzial erheblich, da in vielen Verarbeitungs- und Sortieranlagen große Mengen brennbarer Stoffe sowie Staub aus dem Verarbeitungsprozess vorhanden sind (Hübener 2025). Durchgetrocknete gelagerte Stoffe erhöhen die Ausbreitungsgefahr zusätzlich. In offenen Lagerbereichen wird die Gefährdungslage durch trockene Winde verschärft, da sie die Ausbreitungs- und Intensitätsdynamik von Bränden erhöhen (Hübener 2025).

Gemäß aktuellen fachlichen Einschätzungen wird sich die Gefährdungslage für die Abfallwirtschaft durch das systemische Risiko globale Erwärmung in den kommenden Jahren erhöhen. Für den Zeithorizont von 2031 bis 2060 wird ein weiterer Anstieg der globalen Temperatur zwischen 0,8 und 2,3 °C, abhängig vom Umfang der Klimaschutzmaßnahmen, prognostiziert (UBA 2023a). Ein zentraler Treiber dieser Entwicklung ist, dass die Treibhausgasemissionen zu langsam sinken und abrupte Klimaänderungen drohen. Im Infrastruktursystem Abfall nimmt durch die globale Erwärmung die Eintrittswahrscheinlichkeit von hitze- und trockenheitsbedingten Brandereignissen zu. Auch neue Wirkmechanismen zeichnen sich ab: Steigende Temperaturen fördern eine intensivere Geruchs- und Keimentwicklung, was zu Folgeproblemen bei Sammlung und Transport führt. Herkömmliche Behältersysteme könnten unter den veränderten Bedingungen langfristig nicht mehr geeignet sein (Thieken et al. 2018). Verschiebungen und stärkere Schwankungen der Vegetationsperioden – beispielsweise durch Trockenheit und Wärme – können kurzfristig zu

Kapazitätsengpässen bei der Aufnahme und Verarbeitung von Grünabfällen führen. In urbanen Räumen können Klimaanpassungsmaßnahmen wie verstärkte Stadtbegrünung oder Vertical Farming (TAB 2025b) zudem die Mengen an biologischem Abfall vergrößern, wodurch mittelfristig die Anforderungen an die Sammel- und Behandlungskapazitäten steigen. Auch Deponien geraten zunehmend unter Druck: Bodentrockenheit und veränderte Vegetationsbedingungen können die Funktion isolierender Abdeck- und Abdichtungsschichten beeinträchtigen. Durch den Anstieg des Meeresspiegels und ein zunehmendes Risiko von Fluten und Versalzung steigt die Gefährdung aller küstennahen Anlagen der Abfallwirtschaft, einschließlich stillgelegter Deponien mit Altlasten.

Cyberkriminalität

Die Gefährdungslage durch Cyberkriminalität ist für das Infrastruktursystem Abfall derzeit als mittel einzustufen. Insgesamt ist der Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad der Abfallwirtschaft im Vergleich zu anderen Infrastruktursystemen noch eher gering, nimmt allerdings zu. Wie die Trendanalyse zeigt (Kapitel 2.2), werden in verschiedenen Bereichen der Abfallwirtschaft – etwa für Anlagensteuerung, Logistikprozesse, Datenmanagement oder die Erfassung von Abfallmengen – digitale Lösungen implementiert. Dadurch hat sich die Angriffsfläche für Cyberattacken bereits vergrößert, ebenso die Anfälligkeit für technische Störungen (TAB 2023). Mit Ausnahme von Abfallerzeugung und -vermeidung sind alle Bereiche des Systembilds davon betroffen. Im ersten Quartal 2025 verzeichnete das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI 2025a) zehn IT-Störungen im Bereich der Siedlungsabfallentsorgung. Gleichzeitig gibt es in der Abfallwirtschaft jedoch noch viele Bereiche und Prozesse, die nach wie vor wenig digitalisiert sind und sich teilweise auch nicht dafür eignen.

Trotz der derzeit eher geringen Gefährdungslage kann Cyberkriminalität die Funktionalität und Stabilität des Infrastruktursystems Abfall spürbar beeinträchtigen. Eine Gefahr ist der Diebstahl sensibler Daten: In Entsorgungsbetrieben werden teilweise Informationen über die Abfallmengen und -arten von Haushalten erhoben, was Rückschlüsse auf das Verbrauchs- und Entsorgungsverhalten erlaubt (TAB 2023). Bisher sind Unternehmen der Abfallwirtschaft vor allem von Ransomwareattacken betroffen, bei denen zentrale Systeme verschlüsselt oder blockiert und nur gegen Lösegeldzahlungen freigegeben werden. Ein Beispiel für einen Cyberangriff ist die Ransomware-attacke auf den auf Gewerbeabfälle spezialisierten Entsorger Otto Dörner im Jahr 2022. Die IT-Infrastruktur des Unternehmens war kaum noch nutzbar; Datenzugriffe sowie E-Mail- und Telefonverbindungen waren stark gestört (Mutzbauer 2022). Ein weiterer Angriff traf Eu-Rec, ein Recyclingunternehmen aus Rheinland-Pfalz, im April 2025. Die IT-Systeme fielen hier vollständig aus, sensible Kundendaten wurden entwendet und Lösegeld gefordert. In Folge des Cyberangriffs musste das Unternehmen, das zuvor schon mit wirtschaftlichen Herausforderungen zu kämpfen hatte, Insolvenz anmelden (IT Daily 2025). Solche Vorfälle zeigen, dass einzelne Angriffe zwar selten systemische Ausfälle verursachen, aber betriebliche Abläufe empfindlich stören, die Handlungsfähigkeit von Unternehmen einschränken und bei kleineren Betrieben im Extremfall die wirtschaftliche Existenz gefährden können.

Die Gefährdungslage für die Abfallwirtschaft durch das systemische Risiko der Cyberkriminalität wird sich nach aktuellen fachlichen Einschätzungen in den kommenden Jahren verschärfen. Die zunehmende Digitalisierung in der Abfallwirtschaft führt zu einer größeren Abhängigkeit von

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und erhöht die Angriffsfläche. Zunehmend digitalisierte Prozesse in den Bereichen Verwaltung und Kundendienste machen Unternehmen angreifbar – beispielsweise für Ransomwareattacken. Auch darüber hinaus werden digitale Lösungen vermehrt implementiert (Kapitel 2.2). Ein weiterer zentraler Treiber, der eine Verschärfung der Gefährdungslage zur Folge hat, ist die zunehmend professionelle Nutzung hochgradig skalierbarer KI-gestützter Angriffsmethoden für Phishing und Ransomware. Diese Entwicklung führt, vor dem Hintergrund anhaltender geopolitischer Spannungen und in Kombination mit der fortschreitenden Vernetzung sowie der wachsenden Professionalisierung staatlicher und privater Tätergruppen in der Cyberkriminalität, zu einem stetig wachsenden Angriffspotenzial.

Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit

Die Gefährdungslage durch Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit ist für das Infrastruktursystem Abfall derzeit als mittel einzuschätzen. Wie im Kontext des systemischen Risikos Cyberkriminalität erwähnt, nimmt der Digitalisierungsgrad der Abfallwirtschaft zwar zu (Kapitel 2.2), es gibt aber Bereiche und Prozesse, die auf absehbare Zeit nicht digitalisiert werden. Dennoch wirken sich Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit über unterschiedliche Mechanismen spürbar auf die Abfallwirtschaft aus. Digitalisierungsbestrebungen und die Implementierung innovativer technischer Verfahren (Kapitel 2.2) vergrößern die Abhängigkeit von funktionierenden Technikkomponenten. Einzelne Maschinenausfälle lassen sich meist kompensieren, es kann jedoch auch zu großflächigen Störungen kommen, die schwerer zu bewältigen sind. Auch hier sind alle Systembereiche mit Ausnahme von Abfallerzeugung und -vermeidung betroffen. Eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit zeigt sich auch bei Brandursachen. Technische Probleme sowie technische Elemente, die der Entsorgung falsch zugeführt werden, speziell Lithiumbatterien und Akkus, können Brände auslösen. Hiervon sind vor allem die Bereiche Sammlung und Transport sowie Sortierung und Aufbereitung betroffen.

Die Folgen von Technik- oder Bedienfehlern können im heute stärker integrierten und vernetzten Abfallsystem weitreichend sein, da Störungen einzelner Systemkomponenten in Teilsystembereichen schnell auf das Gesamtsystem übergreifen können (TAB 2023). Bisher sind allerdings meist keine systemischen Konsequenzen zu verzeichnen. Brände, die auf eine eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit zurückzuführen sind, stellen dagegen ein akutes Problem für die Funktionalität und Stabilität des Infrastruktursystems Abfall dar. Seit einigen Jahren häufen sich Brände in Entsorgungs- und Recyclinganlagen sowie Sammelfahrzeugen, die inzwischen täglich auftreten (bvse 2025a). Wie bereits beim systemischen Risiko der globalen Erwärmung beschrieben, können sich solche Brände in Anlagen der Abfallwirtschaft teilweise schnell ausbreiten (Hübener 2025). Eine derzeit häufige Brandursache sind Lithiumbatterien und Akkus bzw. von ihnen betriebene Elektrogeräte, beispielsweise (Einweg)E-Zigaretten, die falsch entsorgt werden und bislang nicht von Entsorgungsunternehmen aussortiert werden können. Die Zahl der Geräte, die mit Lithiumbatterien betrieben werden, wächst seit mehreren Jahren (bvse 2024b). Durch Druck, Reibung oder Pressen können sich solche Akkus entzünden (bvse 2025b; Hübener 2025). Hierbei entstehen erhebliche finanzielle Schäden, auch weil Versicherungsprämien stark steigen und sich Versicherer teilweise zurückziehen (bvse 2024b; Hübener 2025). Im Oktober 2025 kam es beispielsweise in einer süddeutschen Sortieranlage für gelbe Säcke zu einem Großbrand, der einen

Schaden von 2 Mio. Euro verursachte. Als Brandursache wurden falsch entsorgte Akkus oder Batterien identifiziert (Hilgert 2025).

Nach aktuellen fachlichen Bewertungen wird sich die Gefährdungslage des Infrastruktursystems Abfall durch das systemische Risiko Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit in den kommenden Jahren erhöhen. Zentrale Treiber dieser Entwicklung sind die fortschreitende Digitalisierung des Infrastruktursystems und die damit einhergehende Integration zunehmend komplexer technischer Systeme (Kapitel 2.2). Hierdurch ist mit einem Anstieg der Häufigkeit von Technik- oder Bedienfehlern zu rechnen, die sich großflächig auswirken können. Da batteriehaltige Produkte immer weiterverbreitet sind und dadurch mehr batteriebedingte Brände in der Abfallwirtschaft zu erwarten sind, nimmt auch die Gefährdung durch eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit zu. Die Einführung geeigneter Gegenmaßnahmen wie Pfandsysteme oder neuartige Sortier- und Detektionsverfahren (Fraunhofer-Gesellschaft 2025) kann dieses Risiko potenziell begrenzen. Zukünftig häufiger vorkommende Trocken- und Wärmephasen können allerdings das Schadensausmaß von Batteriebränden verstärken. In der Folge steigt sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit von technisch bedingten Unterbrechungen in Entsorgungsprozessen als auch das Risiko erheblicher Störungen und Schäden infolge batteriebedingter Brandereignisse.

Geopolitische Konflikte

Hinsichtlich geopolitischer Konflikte ist die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall aktuell als mittel einzuschätzen. Produkte und Stoffströme der Abfallwirtschaft sind eng in internationale Märkte eingebunden, auch wenn derzeit teilweise eine Regionalisierung des Abfallhandels zu beobachten ist (Kapitel 2.3). Dies betrifft sowohl Rezyklate als auch weitgehend unverarbeitete Abfälle, etwa Plastikabfälle. Unerwartete Ein- und Ausfuhrbeschränkungen führen kurzfristig zu Problemen für Unternehmen der Abfallwirtschaft, besonders in den Bereichen Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung und Recycling.

Länder exportieren Abfälle häufig dorthin, wo die Kosten für Müllsortierung und Recycling geringer sind (Reichert 2019). Importbeschränkungen oder -verbote, beispielsweise aus Umweltgründen oder zur Stärkung eigener Binnenmärkte, können die Funktionsfähigkeit bzw. Stabilität der Systembereiche Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung beeinträchtigen. Besonders problematisch wird dies, wenn zuvor große Mengen an Abfall exportiert wurden und die inländischen Entsorgungsstrukturen begrenzt sind, da es dann zu Überlastungen kommen kann (Clarke/Howard 2018; Reichert 2019; Wissenschaftliche Dienste 2018). Ein prägnantes Beispiel ist das chinesische Importverbot für unsortierte Plastikabfälle, das ab 2018 in Kraft trat und große Exportmengen aus Deutschland betraf (Wissenschaftliche Dienste 2018). In der Folge wurden Abfälle zunächst in andere Länder wie Malaysia, Thailand und Polen umgeleitet, woraufhin auch diese Länder Importbeschränkungen einführten (Clarke/Howard 2018; Lang 2025).

Geopolitische Konflikte wirken zudem indirekt über Energiekrisen auf die Abfallwirtschaft. Stark steigende Energie- und Logistikkosten belasten die Entsorgungs- und Recyclingprozesse, während die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen zurückgeht, wenn energieintensive Abnehmerindustrien ihre Produktion drosseln (bvse 2022a, 2023b, 2023a, 2023c; Kozłowski et al. 2024). Infolge der Energiekrise nach dem russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine fand zudem eine

Verschiebung von stofflicher zu energetischer Abfallnutzung statt, da hohe Stromerlöse die thermische Nutzung attraktiver machten als die stoffliche Verwertung. Dies führte in manchen Sortier- und Aufbereitungsanlagen zu einem Mangel an verwertbaren Abfällen (bvse 2022b, 2023b).

Nach aktuellen fachlichen Einschätzungen wird sich die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko geopolitischer Konflikte in den kommenden Jahren leicht erhöhen. Zwar ist durch den Trend eines rückläufigen globalen Handelsvolumens von Kunststoffabfällen im Kontext der zunehmenden Regionalisierung des internationalen Abfallhandels (Kapitel 2.3) davon auszugehen, dass handelsbedingte Störungen wie Engpässe oder Importbeschränkungen und -verbote künftig weniger gravierende Auswirkungen haben werden. Gleichwohl prognostizieren internationale Analysen eine zunehmende Häufigkeit von Handelskonflikten. Diese werden insbesondere durch die geopolitische, ökonomische und ideologische Rivalität zwischen den wirtschaftlich nach wie vor stark verflochtenen USA und China, die sich zuspitzende Taiwan-Krise, die anhaltende Instabilität im Nahostkonflikt sowie den fortdauernden russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine weiter verschärft (Kolodko 2025; Rudolf 2019; WEF 2023). Dadurch können indirekte Auswirkungen geopolitischer Krisen, wie Energie- oder Wirtschaftsschocks, die Abfallwirtschaft künftig stärker belasten. Zudem könnten kriegerische Auseinandersetzungen in geografischer Nähe das Infrastruktursystem Abfall beeinträchtigen: einerseits durch stark steigende Abfallmengen in direkt betroffenen Gebieten und andererseits durch einen erhöhten Zuzug Geflüchteter, was zu (temporären) Kapazitätsproblemen bzw. Anpassungsbedarfen in der Abfallwirtschaft führen kann (Kozłowski et al. 2024).

Versorgungsengpässe

Das Infrastruktursystem Abfall wird zudem durch Versorgungsengpässe beeinträchtigt. Die Gefährdungslage ist insgesamt als mittel einzuschätzen. Bestimmte Arten von Versorgungsengpässen können die Funktionsfähigkeit des Infrastruktursystems Abfallwirtschaft teilweise deutlich einschränken. Branchenvertreter/innen berichten bereits von einem Fachkräftemangel, der sich in den vergangenen Jahren verschärft hat (Kapitel 2.3). Dieser ist vor allem im Bereich Sammlung und Transport akut, betrifft aber auch die anderen Systembereiche. In mehreren Kommunen in Deutschland kam es in den letzten Monaten und Jahren zu Verzögerungen und Ausfällen der Abfallabfuhr (Bayerische Staatszeitung 2025; Gierescher 2025). Im Landkreis Göttingen betrugen die Verzögerungen beispielsweise mehr als sechs Wochen (NDR 2025). Solche Verzögerungen in der Abfallabholung können Hygieneprobleme nach sich ziehen, etwa durch Schädlingsbefall. Der Fachkräftemangel verschärft zudem kurzfristige Personalengpässe, die durch andere systemische Risiken wie Pandemien oder Wetterextreme ausgelöst werden.

Darüber hinaus kann es im Bereich Verwertung und Recycling zu Versorgungsengpässen kommen, wenn die Mengen verwertbarer Abfallarten, die bei den Recyclinganlagen eingehen, zurückgehen (bvse 2023b). Wie beim systemischen Risiko geopolitischer Konflikte beschrieben, können Energiekrisen und Lieferkettenunterbrechungen zu einem Rückgang spezifischer verwertbarer Abfallarten führen. Auch Inflation und Konsumrückgang wirken sich kurzfristig auf die Menge bestimmter Abfälle aus und setzen die Branche unter Druck (bvse 2023b, 2023a). Beispielsweise wurde 2022 ein deutlicher Rückgang im Altholzaukommen verzeichnet, was mit einer rückläufigen Baukonjunktur sowie geringen Sperrmüllmengen und weniger Warenumsatz begründet wird (bvse 2023b).

In den kommenden Jahren wird sich die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko Versorgungsengpässe gemäß fachlichen Einschätzungen erhöhen. Diese Entwicklung zeigt sich, wie beschrieben, bereits in einem zunehmenden Fachkräftemangel. Zentrale Treiber dieser Entwicklungen sind strukturelle Herausforderungen, wie der demografische Wandel und ein steigender Bedarf an qualifizierten Fachkräften insbesondere mit digitalen Kompetenzen. Ein substantieller Teil der derzeit in der Abfallwirtschaft Beschäftigten steht kurz vor dem Renteneintrittsalter. Zudem steigen voraussichtlich die Anforderungen durch Digitalisierung, aber auch durch weitere Faktoren wie Umweltauflagen (Kapitel 2.3). Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit von Störungen durch Personalmangel, vor allem im Bereich Sammlung und Transport. Ein weiterer Treiber für die zunehmende Gefährdungslage durch Versorgungsengpässe ist die anhaltende Abhängigkeit von Rohstoffen und Energie. In der Abfallwirtschaft können Versorgungsengpässe bei Betriebsmitteln wie Heizöl, Kalk und Aktivkohle zu Prozessstörungen führen (UBA 2022a). Bisher kam es nicht zu erheblichen Problemen, dies könnte sich jedoch bei zunehmenden geopolitischen Konflikten ändern. Auch Engpässe bei Abfallstoffen, die für das Recycling genutzt werden und von denen Recyclingbetriebe abhängig sind, könnten durch geopolitische Konflikte und Wirtschaftskrisen zunehmen.

Epidemien und Pandemien

Die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall infolge von Epidemien und Pandemien ist derzeit in Deutschland als mittel einzuschätzen. In der Vergangenheit war Deutschland nur selten von Pandemien betroffen. Die COVID-19-Pandemie hat jedoch verdeutlicht, dass die Auswirkungen auch für die Abfallwirtschaft erheblich sind, insbesondere durch Veränderungen im Systembereich Abfallerzeugung und -vermeidung, die sich auch auf die Bereiche Sammlung und Transport, Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung und Recycling auswirken. Einerseits verschiebt sich das Abfallaufkommen in Pandemiezeiten und nimmt teilweise zu. Dennoch muss die Entsorgungssicherheit insbesondere von Rest- und Bioabfällen für die Hygiene und Seuchenbekämpfung sichergestellt werden. Gleichzeitig ist das Abfallsystem mit einem Anstieg von potenziell kontaminierten Abfällen konfrontiert, die sowohl aus Gesundheitseinrichtungen als auch aus Privathaushalten stammen können (UBA 2022a). Ein durch Pandemien ausgelöster Nachfragerückgang für Rezyklate kann sich zusätzlich auf den Bereich Verwertung und Recycling auswirken.

Infolge der COVID-19-Pandemie verschob sich im Systembereich Abfallerzeugung und -vermeidung die Zusammensetzung des Mülls von Gewerbeabfällen zu Haushaltsabfällen, die im Jahr 2020 um 4 % gegenüber 2019 zunahmen. Pro Kopf entspricht dies einem Anstieg von 19 kg (Destatis 2021). In einzelnen Regionen wurde ein starker Anstieg bei Glas- und Leichtverpackungsabfällen registriert (UBA 2022a), einen besonders starken Zuwachs gab es bei Bekleidung (79%) (Destatis 2021). Solche Verschiebungen sind auf veränderte Lebens- und Konsummuster, Social Distancing, Quarantäneregeln und den vermehrten Aufenthalt zu Hause zurückzuführen (Kozłowski et al. 2024). Verschiebungen des Abfallaufkommens können Anpassungen bei Sammlung und Transport sowie Sortierung und Aufbereitung nötig machen.

Besonders herausfordernd ist der erwähnte Anstieg potenziell infektiöser medizinischer Abfälle, für die besondere Regeln in den Bereichen Sammlung und Transport, Sortierung und Aufbereitung, Verwertung und Recycling sowie Beseitigung erforderlich sind, um die Arbeitssicherheit der Beschäftigten zu gewährleisten und die Krankheitserreger zu zerstören. Weltweit zeigte sich in

der COVID-19-Pandemie ein deutlicher Anstieg solcher Abfälle. Eine Schätzung der Weltgesundheitsorganisation von Anfang 2022 bezifferte die allein durch die COVID-19-Pandemie angefallene Menge auf über 200.000 t weltweit (Masken für den privaten Gebrauch nicht eingerechnet) (Deutsche Apotheker Zeitung 2022; EEW o. J.). Die Kapazitäten für Sammlung und Transport sowie Entsorgung von gefährlichen Abfällen sind in der Regel auf den Normalbetrieb ausgelegt und können in einer pandemiebedingten Krisensituation schnell an ihre Grenzen gelangen, besonders wenn das Müllaufkommen stark ansteigt, was je nach Art der Epidemie/Pandemie der Fall sein kann. So können beispielsweise für die Versorgung eines Ebola-Patienten bis zu 75 Schutzanzüge pro Tag anfallen (UBA 2022a). In solchen Fällen drohen Engpässe bei Entsorgungsbehältern, bei Dekontaminierungsanlagen sowie bei Verbrennungsanlagen mit Genehmigung für infektiöse Abfälle. Um die Funktionalität und Stabilität des Abfallsystems zu gewährleisten, kann es notwendig werden, andere Abfallströme zwischenzulagern oder ihre Aufbereitung und Behandlung vorübergehend zu reduzieren (UBA 2022a).

Darüber hinaus kann die Gefährdungslage für das Abfallsystem infolge einer pandemiebedingt verringerten Personalverfügbarkeit vor allem im Bereich Sammlung und Transport zum Problem werden. Krankheitsausfälle, Betreuungspflichten, Quarantäne oder eine Rückkehr von Fachkräften aus dem Ausland in ihre Heimatländer gefährden die Stabilität der üblichen Abläufe (bvse o. J.; UBA 2022a). Während der COVID-19-Pandemie kam es zu Personalengpässen, teilweise konnten die Leerungsrhythmen nicht eingehalten werden. Durch die Koordination zwischen den Entsorgern konnten die Abfallsammeltouren jedoch über den gesamten Zeitraum hinweg weitgehend aufrechterhalten werden (bvse o. J.; UBA 2022a). Was den Bereich Verwertung und Recycling betrifft, so wirkte sich die COVID-19-Pandemie wirtschaftlich negativ auf das Kunststoffrecycling aus, da sinkende Ölpreise und ein Nachfragerückgang die Vermarktung von Rezyklaten erschwerten (Rechberger 2021).

Die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko Epidemien und Pandemien steigt, nach aktuellen fachlichen Einschätzungen, in den kommenden Jahren leicht an. Epidemien, als regional begrenzte, aber zunehmend disruptive Krankheitsausbrüche, sowie das Potenzial neuer Pandemien werden durch vernetzte Lieferketten, Urbanisierung und klimabedingte Veränderungen begünstigt (TAB 2024a). Für die Abfallwirtschaft erhöht sich dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass es zu großen Abfallaufkommen kommt, die durch Pandemien oder Epidemien verursacht werden. Dies stellt fast alle Systembereiche des Infrastruktursystems vor die beschriebenen Herausforderungen. Durch den zunehmenden Fachkräftemangel in der Abfallwirtschaft können sich Personalengpässe in Pandemiesituationen zusätzlich verschärfen. In der Folge erhöht sich das Risiko von Unterbrechungen im Sammlungs- und Entsorgungsprozess.

Blackouts

Die Gefährdungslage durch das systemische Risiko Blackouts kann für das Infrastruktursystem Abfall derzeit als eher gering bewertet werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines flächendeckenden und langandauernden Blackouts in Deutschland ist nach aktueller Einschätzung derzeit gering, was sich in der stabilen bzw. leicht abnehmenden durchschnittlichen Unterbrechungsdauer der Stromversorgung widerspiegelt (Bundesregierung 2025; Bundesnetzagentur 2025). Sollte es dennoch zu einem Blackout kommen, kann dieser aufgrund seiner kaskadierenden

Wirkungen auf nahezu alle kritischen Infrastruktursysteme ein hohes Schadensausmaß verursachen (Schäfer 2024). Betroffen wären vor allem die Systembereiche Abfallerzeugung und -vermeidung, Sammlung und Transport, Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung und Recycling.

Ein Blackout wirkt sich zunächst auf den Bereich Sammlung und Transport aus. Kraftstoffmangel sowie gegebenenfalls Verkehrsbeeinträchtigungen führen dazu, dass der Müll nicht im gewohnten Rhythmus abgeholt werden kann und sich Müllsäcke auf der Straße ansammeln, was Gefahren für die Hygiene und die öffentliche Gesundheit nach sich ziehen kann (Schäfer 2024). Nach einem akuten Blackout ist in der Phase des Wiederhochfahrens mit Personalengpässen zu rechnen, da Mitarbeiter/innen gegebenenfalls selbst vom Blackout beeinträchtigt und nicht verfügbar sind. Auch Ersatzteile für eine möglicherweise notwendige Wartung fehlen unter Umständen (Saurugg 2024). Darüber hinaus wird das Infrastruktursystem Abfall auch in der Phase des Wiederhochfahrens vor Herausforderungen gestellt. So kann es zu einem Anstieg der Abfallmenge kommen, da durch den Blackout verdorbene Produkte entsorgt werden müssen. Noch nicht gesammelte Abfälle können sowohl im Verkaufsbereich als auch draußen zu Geruchsbelästigungen und Hygieneproblemen führen, was insbesondere für Fleisch und Fisch gilt. Sollten Toilettenspülungen ausgefallen sein, kommt gegebenenfalls Fäkalienentsorgung über den Hausmüll hinzu. Auch Tierkadaver aus der Landwirtschaft sowie tote Haustiere, vor allem Aquarienfische, müssten gegebenenfalls in großen Mengen entsorgt werden (Saurugg 2024). Dies betrifft die Systembereiche Sammlung und Transport sowie Sortierung und Aufbereitung.

Aktuellen fachlichen Einschätzungen zufolge bleibt die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko Blackout zukünftig auf geringem Niveau. Mit der steigenden Digitalisierung der Abfallwirtschaft steigt die Vulnerabilität im Falle eines Blackouts allerdings leicht an. Die Energiewende und die zunehmende Digitalisierung des Energiesystems leisten zwar einen Beitrag zur Stärkung der Versorgungssicherheit, indem sie fossile Importabhängigkeiten reduzieren, Großanlagenrisiken verringern und Steuerungssysteme für eine stabilere Netzführung nutzbar machen. Mit der wachsenden Abhängigkeit von IKT-Systemen gehen jedoch auch neue Risikofaktoren für die Versorgungssicherheit einher, insbesondere durch Cyberangriffe (BSI 2025b). Bundesnetzagentur und BSI fördern deshalb Maßnahmen zu deren Früherkennung und fordern eine Stärkung von Schutzmaßnahmen für Anlagen und Stromnetze. Trotz dieser neuen Risikotreiber bleibt das Gesamtrisiko eines Blackouts sehr gering, da das deutsche Stromsystem redundant aufgebaut ist, hohe Sicherheitsstandards gelten und Notfallpläne vorliegen, um Stromversorgung im Ernstfall schnell wiederherzustellen.

Biodiversitätsverlust

Die durch Biodiversitätsverlust verursachte Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall ist in Deutschland aktuell als gering einzuschätzen. Allerdings wird sich, fachlichen Einschätzungen zufolge, die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko des Biodiversitätsverlustes in den kommenden Jahren leicht erhöhen. Die biologische Vielfalt nimmt weiter ab. Wesentliche Treiber sind der steigende Flächenverbrauch, die Intensivierung der Landwirtschaft und der Ausbau von Monokulturen sowie Klimaveränderungen bei gleichzeitig zu langsam verabschiedeten bzw. wirksam werdenden Gegenmaßnahmen (BMU 2019; BMUV 2024a; IPBES 2019). Durch die weiter abnehmende Biodiversität könnten, wie im Kontext des

systemischen Risikos globale Erwärmung beschrieben, Deponien von veränderten Vegetationsbedingungen und damit einhergehender Bodentrockenheit betroffen sein, was die Funktion isolierender Abdeck- und Abdichtungsschichten gefährden könnte. Durch veränderte Populationen können sich Schädlinge, beispielsweise Ratten, stärker ausbreiten und Hygieneprobleme verursachen sowie zusätzliche Maßnahmen zur Schädlingskontrolle im Entsorgungsprozess erforderlich machen (UBA o. J.h).

Machtkonzentrationen

Die Gefährdungslage durch Machtkonzentrationen ist für das Infrastruktursystem Abfall derzeit insgesamt gering. Vertreter/innen des Mittelstands beobachten zwar eine wachsende Marktkonzentration in der Abfallwirtschaft (bvse 2020) und es bestehen teils Bestrebungen zu Unternehmensfusionen und -übernahmen. Beispielsweise wurde die Übernahme eines großen in der Abfallwirtschaft tätigen Unternehmens durch das größte in Deutschland tätige Entsorgungsunternehmen 2019 vom Bundeskartellamt untersagt (Bundeskartellamt 2019). Dennoch lässt sich aktuell kein wesentliches Schadenspotenzial ausmachen, das die Stabilität und Funktionsfähigkeit des Infrastruktursystems gefährdet. Aufgrund der Abhängigkeit von digitalen Technologien in allen Bereichen der Abfallentsorgung sind Unternehmen der Abfallwirtschaft jedoch auch mittelbar durch Machtkonzentrationen in digitalen Geschäftsfeldern betroffen.

Aktuellen fachlichen Einschätzungen zufolge wird sich die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko zunehmender Machtkonzentration in den kommenden Jahren leicht erhöhen, vor allem durch Machtkonzentrationen in der Techbranche. Die Abhängigkeit der Abfallwirtschaft von digitalen Technologien nimmt weiter zu (Kapitel 2.2). Viele Software- und Cloudlösungen sind proprietäre Systeme, die wenigen globalen Techunternehmen gehören. Dadurch wächst das Risiko, dass die digitale Souveränität weiter erodiert. Steigende Kosten und Lock-in-Effekte proprietärer Systeme schmälern die Entscheidungsspielräume abfallwirtschaftlicher Unternehmen. Ein eingeschränkter Datenzugang und die Abhängigkeit von ausländischen Plattformen reduzieren die Kontrolle über kritische und sensible Informationen. Sollten Tendenzen zur Machtkonzentration innerhalb der Abfallwirtschaft weiter zunehmen, könnten Gebührensteigerungen oder ähnliche Maßnahmen dazu führen, dass illegale Abfallablagerungen zunehmen, was negative Umweltkonsequenzen nach sich ziehen würde.

Desinformation

Die Gefährdungslage durch Desinformation für das Infrastruktursystem Abfall kann derzeit als *gering* eingeschätzt werden. Zwar kursieren Falschinformationen, wie zum Beispiel die Behauptung, dass in Deutschland alle Abfälle verbrannt würden, was zu falschem Entsorgungsverhalten führen kann (Bolte 2024; Remondis o. J.). Systemische Effekte sind davon allerdings nicht zu erwarten.

Nach aktuellen fachlichen Einschätzungen wird die Gefährdungslage für das Infrastruktursystem Abfall durch das systemische Risiko Desinformation in den nächsten Jahren auf einem niedrigen Niveau bleiben, wenn gleich das systemische Risiko selbst als zunehmend gilt. Zentrale Treiber sind die gezielte Einflussnahme ausländischer Akteure sowie Fortschritte in der generativen

KI, die die automatisierte Herstellung von Inhalten und Medien ermöglichen und die schnelle, massenhafte Verbreitung fördern.

3.2 Gefährdungslagen im Zuge der Transformation

Das Infrastruktursystem Abfall spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMUV 2024b) und steht aktuell vor der Herausforderung, drei wesentliche Transformationsziele umzusetzen. Erstens müssen zirkuläre Stoffströme gestärkt werden. Zweitens muss auch darüber hinaus das Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit, insbesondere Klimaschutz, sowie Klimawandelanpassung im Infrastruktursystem Abfall weiter vorangetrieben werden. Mit den ersten beiden Transformationszielen im Zusammenhang stehend muss drittens die digitale Integration und Datensteuerung in der Abfallwirtschaft ausgebaut werden. Die Umsetzung dieser Transformationen ist herausfordernd und kann durch verfestigte Entwicklungspfade (Pfadabhängigkeiten) verzögert oder erschwert werden. Im Folgenden werden zentrale Pfadabhängigkeiten im Kontext der drei Transformationsziele entlang zeitlicher und akteursbezogener Dimensionen analysiert. Eine abschließende Risikoperspektive verdeutlicht jeweils die potenziellen Gefahren bei Nichterreichen der Transformationsziele.

Stärkung zirkulärer Stoffströme und Abfallvermeidung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, treiben politische und regulatorische Vorgaben den Übergang zu Kreislaufstrukturen voran. Trotz Fortschritten, wie einer leicht steigenden Recyclingquote und sinkenden Gesamtabfallmengen, bedarf es, um die in der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMUV 2024b) formulierten Ziele zu erreichen, noch einer deutlichen Stärkung zirkulärer Stoffströme, die unter anderem durch Pfadabhängigkeiten gehemmt wird.

Zeitliche Pfadabhängigkeiten prägen die Umsetzung des Transformationsziels zirkulärer Stoffströme im Infrastruktursystem Abfall erheblich. Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft wird unter anderem dadurch erschwert, dass die Abfallwirtschaft (sowie die Industrie) lange Zeit auf einen linearen, reaktiven oder End-of-Pipe-Ansatz ausgerichtet war, bei dem nicht die Vermeidung, sondern der Umgang mit und die Beseitigung von Abfällen im Mittelpunkt stand. Zunächst geschah dies durch Deponierung, später durch Verbrennung und in Teilen durch Recycling. Die Abfallwirtschaft ist bis heute durch langfristige Investitionen in entsprechende Technologien und Anlagen mit hohen Fixkosten und jahrzehntelanger Nutzungsdauer geprägt. Das gilt unter anderem für Anlagen der Bereiche Sortierung und Aufbereitung sowie Verwertung. Beispiele hierfür sind Müllverbrennungsanlagen oder Anlagen zur Sammlung, Aufbereitung und Verarbeitung von Verpackungsabfällen (Jacob et al. 2023; Wilts 2012).

Strukturelle Veränderungen im System der Abfallwirtschaft, die zur Erreichung des Transformationsziels zirkulärer Stoffströme und Abfallvermeidung beitragen, wie eine verstärkte stoffliche Verwertung oder recyclingorientiertes Produktdesign, werden durch diese langfristigen Investitionen teilweise gehemmt. Dadurch bestehen ökonomische und institutionelle Anreize, die vorhandenen Kapazitäten möglichst langfristig und voll auszulasten, beispielsweise im Fall von Müllverbrennungsanlagen (Dehoust/Alwast 2019; Wilts 2012). So gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen der regionalen Kapazität von Müllverbrennungsanlagen und geringeren Recycling-

quoten (Yamamoto/Kinnaman 2022) sowie einer weniger ausgeprägten getrennten Sammlung von Bioabfällen (NABU 2023). Auch die Sammel- und Logistikstrukturen sind durch die vorherrschenden Verwertungsarten geprägt und die Umstellung wird dadurch erschwert, dass nicht nur die Verwertungsanlagen umgestellt werden müssen, sondern auch die Strukturen der Erfassung und Sammlung gegebenenfalls angepasst werden müssen. Dies gilt zum Beispiel für Metallabfälle, die im Bereich Technologie wiederverwendet werden können (Behrendt 2018).

Ein weiterer Faktor, der die Stärkung zirkulärer Stoffströme hemmt, sind zeitliche Pfadabhängigkeiten im Material- und Produktdesign. Vor allem technologische Produkte folgen einem Innovationspfad, der durch die steigende Komplexität, die Kombination von immer mehr unterschiedlichen Materialien und kurze Innovationszyklen geprägt ist. Diese Designentscheidungen erschweren das spätere Recycling, da die Materialkombinationen häufig nicht zu den etablierten Verfahren passen und in geeigneten Vorbehandlungsverfahren separiert werden müssen. Teilweise steht die Rückgewinnung eines Materials mit der eines anderen in Konkurrenz (Behrendt 2018; Chakraborty et al. 2026). Mit zunehmender Produktkomplexität wird das Recycling aufwendiger, teurer und energieintensiver (Chakraborty et al. 2026). In der Folge entstehen Barrieren für eine hochwertige stoffliche Verwertung, da Recycling aufwändiger wird und sich Entsorgungs- und Recyclingsysteme zudem nur verzögert an die sich schnell verändernden Produktzusammensetzungen anpassen können.

Auch akteursbezogene Pfadabhängigkeiten prägen die Umsetzung zirkulärer Stoffströme im Infrastruktursystem Abfall. Insbesondere spielt das Konsum- und Entsorgungsverhalten in privaten Haushalten und im Gewerbe eine zentrale Rolle. Recycling setzt eine weitgehend getrennte Sammlung von Abfall voraus. Diese wird nicht allein durch eine geeignete Sammlungs- und Erfassungsinfrastruktur gewährleistet, sondern hängt wesentlich davon ab, ob die Verbraucher/innen die Abfalltrennung konsequent praktizieren. Dies ist jedoch häufig nur unzureichend der Fall (Chakraborty et al. 2026; Prognos AG/INFA GmbH 2024; UBA 2020). In Städten sind die für das Recycling geeigneten Wertstoffanteile im Hausmüll meist deutlich höher als in ländlichen Gebieten, auch wenn sich die Struktur der Abfallentsorgung nicht wesentlich unterscheidet. Daran werden die Auswirkungen des Konsum- und Entsorgungsverhaltens auf die Abfallzusammensetzung deutlich (UBA 2020). Um das Recycling voranzutreiben, muss zudem sichergestellt werden, dass Rezyklate anstelle von Primärrohstoffen in der Produktion genutzt werden. Hier sind das Verhalten und die Anreize wirtschaftlicher Akteure zentral. Niedrige oder stark schwankende Preise für Primärrohstoffe sowie etablierte Verwertungsarten (beispielsweise thermische Verwertung) hemmen den Einsatz von Rezyklaten sowie Investitionen in Anlagen anderer Verwertungsarten (Behrendt 2018; Weigel et al. 2024; Wilts 2012).

Auch das Ziel Abfallvermeidung hängt, neben anderen Faktoren, wesentlich vom Konsum- und Entsorgungsverhalten ab. Auch wenn die Gesamtabfallmenge in Deutschland sinkt (Kapitel 2.1), steigt das Aufkommen von Verpackungs-, Textil- sowie Elektronikabfällen. Die Lebens- und Nutzungsdauer von Elektronikgeräten ist weiter zurückgegangen, was neben den hohen Reparaturkosten und der Defektanfälligkeit der Geräte auch auf den Wunsch von Konsumentinnen und Konsumenten nach den neuesten Geräten zurückzuführen ist (Jacob et al. 2023). Abfallvermeidung wird durch etablierte Produktions- und Konsummuster sowie durch die Tatsache gehemmt, dass Abfall ein Wirtschaftsgut ist, an das bestimmte Interessen gekoppelt sind (Weigel et al. 2024). Darüber hinaus wirken auch bei kommunalen und privaten Entsorgungsunternehmen pfadabhängige Routinen und Geschäftsmodelle. Die betrieblichen Abläufe und Erfolgskennzahlen dieser

Akteure sind vielfach auf Durchsatzmengen und Auslastung ausgerichtet, was Anreize zur Stärkung zirkulärer Stoffströme abschwächt. Auf kommunaler Ebene besteht ein Zusammenhang zwischen dem Grad der privatwirtschaftlichen Organisation der Kreislaufwirtschaft und der Umsetzung von Abfallvermeidungsstrategien. Eine stärkere privatwirtschaftliche Organisation geht tendenziell mit weniger ambitionierten Abfallvermeidungsstrategien einher (Weigel et al. 2024).

Zusammengenommen verzögern diese zeitlichen und akteursbezogenen Pfadabhängigkeiten die Etablierung von zirkulären Stoffströmen und Abfallvermeidung in Deutschland. Aus einer Risikoperspektive bleibt ohne eine gelingende Transformation hin zu zirkulären Stoffströmen die Rohstoffabhängigkeit in Deutschland hoch bzw. vergrößert sich weiter. Auch die Gefährdung des Infrastruktursystems Abfall durch systemische Risiken nimmt zu. Dies betrifft insbesondere Versorgungsengpässe mit Abfallarten, die sich für das Recycling eignen, sowie geopolitisch bedingte Störungen internationaler Lieferketten.

Klimaschutz und Klimaanpassung

Während das Transformationsziel zirkulärer Stoffströme primär auf die Schließung von Materialkreisläufen abzielt, ist das übergeordnete Transformationsziel ökologische Nachhaltigkeit auf die Reduktion von Treibhausgasen sowie die Vermeidung von Schadstoffeinträgen in die Umwelt ausgerichtet. Hinzu kommt die Anpassung an Folgen des Klimawandels. Auch hier werden Handlungsspielräume durch zeitliche Pfadabhängigkeiten eingeschränkt, die aus langlebigen Entsorgungsinfrastrukturen, langfristigen Investitionsentscheidungen und regulatorischen Rahmenbedingungen resultieren.

Eine wesentliche Quelle von Treibhausgasemissionen im Infrastruktursystem Abfall ist die Müllverbrennung. Vor allem beim Verbrennen fossiler Abfälle wie Kunststoffverpackungen können die entstehenden Emissionen nur teilweise durch die thermische oder energetische Nutzung kompensiert werden (Jacob et al. 2023). Um den Anteil verbrannter fossiler Abfälle zu reduzieren, ist erstens eine noch stärkere getrennte Sammlung erforderlich, damit die Anteile an (fossilen) Wertstoffen reduziert werden, die im Restmüll landen (Schmidt/Laner 2023; Sund et al. 2025). Die im Kontext von zirkulären Stoffströmen genannten zeitlichen Pfadabhängigkeiten, die eine getrennte Sammlung sowie generell Alternativen zur thermischen Verwertung hemmen, sind auch bei Treibhausgasemissionen von zentraler Bedeutung. Zweitens entstehen bei der Herstellung von Kunststoffen erhebliche Mengen an Treibhausgasen. Daher ist eine stärkere Nutzung von Kunststoffrezyklaten als Substitute für Primärkunststoffe erforderlich. Der Rezyklateinsatz wird jedoch durch zeitliche Pfadabhängigkeiten gehemmt: Langlebige Kunststoffprodukte enthalten Additive, die inzwischen reguliert sind. Diese Altlasten früherer Produktgenerationen schränken die gegenwärtige und mittelfristige Nutzung von Kunststoffrezyklaten in einigen Anwendungsbereichen ein. Langfristig wird dieses Problem jedoch nicht mehr bestehen, sobald heutige Primärkunststoffe zu Rezyklat werden (Lahl et al. 2024). Darüber hinaus können Kunststoffe während der Nutzung in manchen Bereichen, beispielsweise in Fahrzeugen, durch Schad- und Störstoffe verunreinigt werden, was die Sortierung erschwert und die Qualität der Rezyklate reduziert (Potrykus et al. 2024). Auch die bereits genannten Materialkombinationen und -verbindungen erschweren die Herstellung hochwertiger Rezyklate.

Auch akteursbezogene Abhängigkeiten beeinflussen die Umsetzung ökologischer Nachhaltigkeit im Abfallinfrastruktursystem. Dies ist vor allem auf die etablierte Rolle der Müllverbrennung, die vorhandene Infrastruktur dafür sowie die wirtschaftlichen Anreize für Betreiber, bestehende Anlagen weiterhin zu nutzen, zurückzuführen. Auch die größere Wirtschaftlichkeit der Müllverbrennung im Vergleich zur Herstellung von Rezyklat ist zentral. Hier könnte die seit 2024 bestehende CO₂-Bepreisung der fossilen Anteile verbrannter Abfälle zu einer Verschiebung hin zu rentablerem Recycling führen (Kapitel 2.1). Im Hinblick auf den Einsatz von Rezyklaten besteht bei Industrieakteuren Unsicherheit hinsichtlich der Rechtsgrundlage zu Schadstoffgrenzwerten, wodurch Innovationen gehemmt werden (Potrykus et al. 2024). Zudem wird die Nachfrage nach Kunststoffrezyklat durch qualitative Bedenken vonseiten der Produkthersteller und Kund/innen gehemmt (Potrykus et al. 2024). Die zunehmend wichtige Umsetzung von Maßnahmen zur Klimawandelanpassung – etwa die Umgestaltung von Abfallbehältern und Standplätzen, Informationsangebote zur sachgerechten Lagerung von Abfällen (Schanze et al. 2021) sowie Vorsorge- und Planungsmaßnahmen, wie die Vorhaltung von Zwischenlagerflächen für die Entsorgung hochwasserbedingter Abfälle – wird durch einen hohen Abstimmungsbedarf zwischen unterschiedlichen Akteuren sowie bestehende Organisationsstrukturen erschwert.

Aus einer Risikoperspektive hemmt das Nichterreichen des Transformationsziels ökologische Nachhaltigkeit die langfristige Senkung der Treibhausgasemissionen im Infrastruktursystem Abfall und führt zu einer erhöhten Verwundbarkeit gegenüber klimawandelbedingten Risiken. Werden Klimaanpassungsmaßnahmen nicht ausreichend umgesetzt, vergrößert sich die Gefährdung durch die systemischen Risiken zunehmender Wetterextreme und globaler Erwärmung. Bei allen zu treffenden Entscheidungen in der Abfallwirtschaft, beispielsweise hinsichtlich der Verwertungsarten und des Anlagenbaus bzw. der -modernisierung, ist es zentral, mögliche zukünftige Pfadabhängigkeiten systematisch zu berücksichtigen. Denn heutige Festlegungen können notwendige Anpassungen und Diversifizierung über Jahrzehnte erschweren und die Krisenresilienz beeinträchtigen (Ntostoglou et al. 2025; Weigel et al. 2024).

Digitale Integration und Datensteuerung

Für die Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft und ökologische Nachhaltigkeit sind die verstärkte Nutzung digitaler Technologien und eine umfassendere Datensteuerung essenziell. Um zirkuläre Stoffströme zu stärken und Rezyklate von hoher Qualität herzustellen, sind Informationen zu Produkten wichtig. Dazu zählen etwa Angaben zu Inhaltsstoffen, Reparatur- und Wartungshinweise sowie zu Umweltauswirkungen (Jacob et al. 2023). Diese Daten werden aber bisher weder flächendeckend erhoben noch sind sie standardisiert.

Zeitliche Pfadabhängigkeiten bremsen die Digitalisierung einerseits durch bestehende, historisch gewachsene analoge Systeme. Die Abläufe im Abfallwirtschaftssystem, beispielsweise im Bereich Sammlung und Transport, haben sich teilweise über Jahrzehnte kaum verändert – was zu Beharrungstendenzen geführt hat und die Offenheit gegenüber potenziell disruptiven Digitalisierungsansätzen einschränkt (Borchard et al. 2021). Auch prägen im Laufe der Zeit entstandene technische Systeme und Datenstrukturen sowie entsprechend heterogene IT-Landschaften die Abfallwirtschaft. Fehlende Schnittstellen und Standards erschweren die Vernetzung sowie die Einführung durchgängiger digitaler Lösungen und verzögern die Integration neuer datenbasierter Steuerungs- und Optimierungsansätze (Borchard et al. 2021). Auch die Datenerfassung ist

unvollständig und heterogen. So sind die verfügbaren Daten für Metallkreisläufe beispielsweise teilweise nicht ausreichend differenziert, während die Daten für andere Stoffströme zwar vorhanden sind, aber bisher nicht für zirkuläre Stoffströme ausgewertet und genutzt werden (Müller, F. et al. 2025). Teilweise ist sogar eine rückläufige Datenverfügbarkeit zu verzeichnen (Prognos AG/INFA GmbH 2024). Auch der Einsatz neuer digitaler Technologien wie KI und Automatisierung, die großes Potenzial für mehr Recycling und Nachhaltigkeit bieten, hängt von der Verfügbarkeit geeigneter Datensätze ab, die bisher nicht in ausreichendem Maße verfügbar sind (Weber et al. 2026).

Aus der Akteursperspektive ist festzustellen, dass sich Abfallwirtschaftsunternehmen zwar Digitalisierungsziele setzen, diese aber oft nicht erreichen. Zudem werden digitale Werkzeuge vor allem für Effizienzgewinne in bestehenden internen Geschäftsprozessen genutzt und nur selten für neue Prozesse, welche zirkuläre Stoffströme stärken und Nachhaltigkeitsziele fördern könnten (Borchard et al. 2021). Von den Unternehmen werden unter anderem hohe Investitions- und Betriebskosten, Belastungen durch den laufenden Geschäftsbetrieb sowie hohe Datenschutzanforderungen als hemmende Faktoren genannt (Borchard et al. 2021). Der sich in Zukunft voraussichtlich weiter verschärfende Fachkräftemangel kann, zusammen mit dem wachsenden Bedarf an digitalen Fachkräftekompetenzen, die digitale Integration weiter bremsen (Kapitel. 2.3). Auch die Erwartungen von Kunden, die analoge Prozesse gewöhnt sind und diese zum Teil einfordern, hemmen die vollständige Digitalisierung von Prozessen (Borchard et al. 2021). Diese pfadabhängigen Praktiken behindern die Etablierung digitaler Standards, gemeinsamer Datenräume sowie transparenter Stoffstrominformationen.

Aus einer Risikoperspektive gefährden eine unzureichende oder zeitlich verzögerte digitale Integration und Datensteuerung das Erreichen der anderen Transformationsziele. Dadurch erhöht sich die Gefährdungslage durch die systemischen Risiken Versorgungsengpässe, geopolitische Risiken, Wetterextreme und globale Erwärmung. Darüber hinaus kann eine heterogene, mangelhaft umgesetzte Digitalisierung, bei der Standards, Kompetenzen und Ähnliches fehlen, auch dazu führen, dass sich die Gefährdungslage durch die systemischen Risiken Cyberkriminalität sowie Technikversagen und eingeschränkte Technikbeherrschbarkeit erhöhen.

4 Fokusthemen

Für eine vertiefende Untersuchung im Resilienz-Check schlagen wir zwei alternative Fokusthemen für das Infrastruktursystem Abfall vor. Die Auswahl erfolgte auf Grundlage zentraler Bewertungskriterien, wobei die Eignung für szenariobasierte Analysen eine besondere Rolle spielte. Diese wurde danach beurteilt, inwieweit ein Thema plausible, divergierende Zukunftsentwicklungen eröffnet und dabei zentrale Einflussfaktoren sowie ihre Wechselwirkungen und Unsicherheiten analytisch zugänglich macht. Ergänzend wurden die Technikfolgenrelevanz, der Bezug zu relevanten Trendclustern und Emerging Issues sowie der Beitrag zur Stärkung zentraler Systemeigenschaften (Anpassungsfähigkeit, Robustheit, Agilität) berücksichtigt. Die vorgeschlagenen Fokusthemen sind so gewählt, dass sie grundsätzlich auch für eine vertiefende Bearbeitung im Rahmen weiterer Formate des TAB geeignet sind.

4.1 Fokusthema 1: Digitale Technologien zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft

Die Digitalisierung abfallwirtschaftlicher Prozesse hat das Potenzial, die Kreislaufwirtschaft nachhaltig zu stärken, und wird daher zunehmend vorangetrieben. Bislang kommen digitale Technologien jedoch vor allem in einzelnen Prozessschritten der Abfallwirtschaft oder bei spezifischen Abfallströmen zum Einsatz. Viele Lösungen befinden sich noch in der Erprobung. Hohes Potenzial bieten beispielsweise die Schaffung von Datenökosystemen für den Informationsaustausch entlang der Wertschöpfungskette sowie digitale Technologien in Aufbereitung, Sortierung und Trennung, etwa KI-gestützte Störstofferkennung sowie der Einsatz von Sensoren und Robotik. Gleichzeitig steht die technologische Führungsposition Deutschlands unter Druck. Während in anderen Ländern die Zahl der Patente zunimmt, ist sie in Deutschland eher rückläufig (Kapitel 2.2).

Im Rahmen des Resilienz-Checks soll szenariobasiert untersucht werden, welches Potenzial innovative digitale Ansätze im Infrastruktursystem Abfall für die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft bieten. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie digitale Technologien und Anwendungen die Sammlung, Verwertung und Steuerung von Stoffströmen unter sich verändernden Rahmenbedingungen und in unterschiedlichen Szenarien prägen. Für die Szenarioentwicklung sind Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Bereichen relevant, beispielsweise regulatorische Vorgaben zur Getrenntsammlung und zum Rezyklateinsatz, die technologische Reife und die Verfügbarkeit standardisierter Datenformate, ökonomische Anreize – beispielsweise Preisentwicklungen bei Rezyklaten – sowie die Akzeptanz und die Digitalkompetenzen in Betrieben. Aufbauend auf diesen Faktoren werden die Wechselwirkungen zwischen technologischen Instrumenten für Sammlung, Sortierung und Verwertung, Governancestrukturen und Kompetenzen in der Abfallwirtschaft sowie übergreifenden Datenökosystemen für die Kreislaufwirtschaft untersucht. Das Ziel des Resilienz-Checks ist es, auf dieser Grundlage Risiken, Zielkonflikte und Gestaltungsspielräume systematisch zu analysieren. Darauf aufbauend sollen Handlungsoptionen entwickelt werden, um den Einsatz digitaler Technologien so zu gestalten, dass das Kreislaufwirtschaftssystem gestärkt und die Resilienz des Infrastruktursystems Abfall erhöht werden.

4.2 Fokusthema 2: Vorausschauende Klimaanpassung und Krisenvorsorge im Infrastruktursystem Abfall

Im Zuge des Klimawandels nehmen Extremwetterereignisse zu und gefährden das Infrastruktursystem Abfall auf zwei Arten. Einerseits können Prozesse und Anlagen des Infrastruktursystems direkt von Schäden und Ausfällen betroffen sein. Andererseits generieren manche Katastropheneignisse, wie beispielsweise Fluten, hohe Abfallmengen, mit denen das System umgehen muss (Kapitel 3.1). Dies macht die Vorbereitung und Anpassung kritischer Stellen im Infrastruktursystem sowie die Kapazitätsplanung für den Katastrophenfall essenziell. Die Maßnahmen reichen von der zusätzlichen Befestigung von beispielsweise Sammelstandorten bis hin zur Prüfung des Einsatzes technologischer und digitaler Werkzeuge wie digitale Zwillinge oder Mikrorecyclingfabriken – wie im Trendcluster „Wandel in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft durch neue Verfahren und digitale Technologien“ dargestellt (Kapitel 2.2).

Im Rahmen des Resilienz-Checks soll szenariobasiert untersucht werden, welche Entwicklungen die Klimaanpassung und die Krisenvorsorge im Infrastruktursystem Abfall prägen und welche Auswirkungen unterschiedliche Zukunftskonstellationen mit sich bringen. Für die Szenarioentwicklung sind verschiedene Einflussfaktoren aus unterschiedlichen Bereichen relevant, unter anderem Extremwetterhäufigkeit und -exposition, regulatorische Vorgaben für Krisensituationen und Vorsorgepflichten, Technologien wie digitale Prognose- und Monitoringsysteme sowie kommunale Zusammenarbeit. Aufbauend auf diesen Faktoren sollen die Wechselwirkungen zwischen Klimaanpassungsmaßnahmen in der Abfallinfrastruktur und im Entsorgungsprozess, der Kapazitätsplanung und Governancestrukturen in der Abfallwirtschaft sowie der übergreifenden Koordination zwischen Kommunen und Regionen in den Blick genommen werden. Das Ziel des Resilienz-Checks ist es, auf dieser Grundlage ein systematisches Verständnis für zukünftige Entwicklungspfade von Klimaanpassung und Krisenschutz im Abfallsystem zu gewinnen. Dabei werden sowohl Potenziale zur Sicherung der Funktionsfähigkeit als auch damit verbundene Risiken und Zielkonflikte berücksichtigt. Aufbauend darauf sollen Handlungsoptionen entwickelt werden, um Klimaanpassung und Krisenvorsorge strategisch zu gestalten und ihre Verankerung im Abfallinfrastruktursystem und damit dessen Resilienz langfristig zu stärken.

5 Methodik und Vorgehen

Das Resilienz-Radar ist ein Baustein unserer erweiterten Foresightaktivitäten. Es soll als kontinuierliche Beratungsleistung den Deutschen Bundestag dabei unterstützen, kritische Infrastruktursysteme zukunftsfähig und resilient zu machen.

Weitere Informationen zum Resilienz-Radar und Resilienz-Check sowie die Ergebnisse zu den bereits behandelten Infrastruktursystemen finden Sie auf unserer Microsite „Foresight für das Parlament“.

Dem Resilienz-Radar liegt eine explizit soziotechnische Definition von kritischen Infrastruktursystemen zugrunde. Wir verstehen darunter Einrichtungen, Anlagen, Strukturen und Systeme, die für das reibungslose Funktionieren der Gesellschaft von zentraler Bedeutung sind. Sie umfassen nicht nur physische und technologische Komponenten, sondern auch ökonomische, soziale, politische, organisatorische und kulturelle Elemente, die mit der Entwicklung, Nutzung und Wartung von Infrastruktur in Verbindung stehen. Dieses Verständnis ist auch von entscheidender Bedeutung für die Resilienzgestaltung. Um Resilienz zu erreichen, ist es erforderlich, die soziotechnischen Rahmenbedingungen, aber auch Pfadabhängigkeiten ganzheitlich zu betrachten.

Der Fokus des Resilienz-Radars liegt auf aktuellen Trends, die das jeweilige Infrastruktursystem prägen, sowie spezifischer Gefährdungslagen durch systemische Risiken. Systemische Risiken können Gesellschaften oder Wirtschaftssysteme als Ganzes gefährden und beinhalten damit grundsätzlich auch die Gefahr, dass Funktionsfähigkeit und Stabilität von Infrastruktursystemen erheblich beeinträchtigt werden, wenn sich diese Risiken verwirklichen. Die Umsetzung des Resilienz-Radars erfolgt in aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen. In allen Phasen wird die Expertise von Fachleuten einbezogen.

In der ersten Phase werden vor allem Foresight- und TA-Studien im Umfeld der ausgewählten Infrastruktursysteme erfasst und analysiert. Hierbei werden insbesondere mittel- bis langfristige Trends identifiziert, die nachweisbare Auswirkungen auf die Infrastruktursysteme haben. Ergänzend werden relevante wissenschaftliche Quellen zur Analyse von systemischen Risiken ausgewertet. Die Identifikation aufkommender soziotechnischer Trends erfolgt zusätzlich durch den Einsatz von Software- und KI-Technologien. Zum einen wird der eigens für das Resilienz-Radar aufgebaute Quellenpool genutzt, der einschlägige Datenbanken (zum Beispiel EPTA, ORBIS, Knowledge4Policy, OpenTA), Publikationen (Foresightstudien, Trendberichte, Konferenzsammelbände und Preprints), wissenschaftliche Plattformen (zum Beispiel ScienceDaily) sowie journalistischen Hintergrundanalysen (Tagesspiegel Background, Heise online) umfasst. Zum anderen werden Internetquellen (Blogs, Beiträge auf sozialen Medien, Nachrichten) mithilfe einer Medienmonitoringsoftware und von Topic Modeling analysiert.

In der zweiten Phase werden Einzel- und Gruppeninterviews mit ausgewählten Expert/innen durchgeführt, um deren Fachwissen, Einschätzungen und Meinungen zu wesentlichen Trends und Herausforderungen sowie zu Wirkungszusammenhängen im Kontext systemischer Risiken für die Infrastruktursysteme zu erfassen. Die Antworten der Befragten sowie weitere Kommentare, Hinweise und detaillierte Ausführungen werden protokolliert und die Ergebnisse anschließend qualitativ ausgewertet. Nach Bedarf wird unter ausgewählten Expert/innen eine explorative Onlineerhebung durchgeführt, in der auf Grundlage der vorangegangenen Schritte Trends ausgewählt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verletzlichkeit und Resilienz des genannten Infrastruktursystems bewertet werden. Die Resultate aller Arbeitsphasen werden abschließend integrativ analysiert und in den Foresight-Reports zusammengefasst.

Beteiligte Expert/innen:

- Prof. Dr. rer. Nat. habil. Julia Gebert, Technische Universität Braunschweig, Abteilungsleitung Abfall- und Ressourcenwirtschaft
- Dr. Martin J. Gehring, Verband kommunaler Unternehmen e.V., Senior-Fachgebietsleiter Abfallbehandlung, Klima- und Ressourcenschutz
- Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer, Universität für Bodenkultur Wien, Leitung Abfall- und Kreislaufwirtschaft
- Sascha Hurtenbach, Abfallwirtschaftsbetrieb Landkreis Ahrweiler, Vorstand

6 Literatur

- Alarcon-Gerbier, E. et al. (2023): Waste recycling through a decentralized network of mobile facilities. In: Journal of Cleaner Production 415, Art. 137773, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137773>
- Axians eWaste (2024): Fachkräftemangel in der Entsorgungswirtschaft. https://www.axians-ewaste.com/blog_entry/fachkraeftemangel-in-der-entsorgungswirtschaft/ (30.10.2025)
- Bastian, D. et al. (2024): Deutschland – Rohstoffsituation 2023. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, <https://doi.org/10.25928/DERO-SI23>
- Bayerische Staatszeitung (2025): Der Branche stinkt es gewaltig. <https://www.bayerische-staatszeitung.de/staatszeitung/kommunales/detailansicht-kommunales/artikel/der-branche-stinkt-es-gewaltig.html> (30.10.2025)
- BBSR (2021): Zahl der Singlehaushalte steigt bis zum Jahr 2040 weiter. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/startseite/topmeldungen/haushaltsprognose.html> (12.11.2025)
- Bechlarz, D. (2026): Textilrecycling: Mechanik dominiert, Chemie stockt. KZeitung, <https://www.k-zeitung.de/textilrecycling-studie-2025-mechanik-vs-chemie> (8.1.2026)
- Behrendt, S. (2018): Recycling von Technologiemetallen. Fallstudie. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin
- Bitkom (2020): 3 von 10 Verbrauchern bestellen in der Corona-Krise online Lebensmittel. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/3-von-10-Verbrauchern-bestellen-in-der-Corona-Krise-online-Lebensmittel> (12.1.2026)
- Bitkom (2024): Grüne Woche – so digital sind Ernährung und Landwirtschaft heute. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Gruene-Woche-Ernaehrung-und-Landwirtschaft> (12.1.2026)
- BMU (2019): Indikatorenbericht 2019 der Bundesregierung zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin
- BMU (2021): GreenTech made in Germany 2021. Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Berlin
- BMUV (2024a): 2023 Indicator Report of the Federal Government for the National Strategy on Biological Diversity. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
- BMUV (2024b): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Berlin
- Bolte, H. (2024): Unwissenheit – der Stolperstein bei der Mülltrennung. ZfK, <https://www.zfk.de/entsorgung/abfallwirtschaft/unwissenheit-und-falschinformationen-die-stolpersteine-der-muelltrennung> (2.4.2026)
- Borchard, R. et al. (2021): Digitalization of waste management: Insights from German private and public waste management firms. In: Waste Management & Research 40(6), S. 775–792, <https://doi.org/10.1177/0734242X211029173>
- Brown, A. et al. (2025): Monitoring trade in plastic waste and scrap 2025. OECD Environment Working Papers, o. O., <https://doi.org/10.1787/3ac3688c-en>
- BSI (2025a): KRITIS in Zahlen. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn

- BSI (2025b): Positionspapier. Cybersicherheit im Energiesektor Deutschlands. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Bonn
- Bundesagentur für Arbeit (2024): Engpassanalyse – Statistik der Bundesagentur für Arbeit. https://statistik.arbeitsagentur.de/DE/Navigation/Statistiken/Interaktive-Statistiken/Fachkraeftebedarf/Engpassanalyse-Nav.html?Thema%3Dsuche%26DR_Region%3Dd%26DR_Anf%3D2%26DR_Berufe%3D3433%26mapHadSelection%3Dfalse (31.10.2025)
- Bundeskartellamt (2019): Bundeskartellamt untersagt Fusion Remondis/DSD. https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Meldung/DE/Pressemitteilungen/2019/11_07_2019_Untersagung_Remondis.html?utm_source=chatgpt.com (26.8.2025)
- Bürker, M. (2025): Psychologie und nachhaltiges Verhalten. In: Bürker, M. (Hg.): Management der Nachhaltigkeitskommunikation: Grundlagen und Perspektiven für die Praxis. Wiesbaden, S. 213–238, https://doi.org/10.1007/978-3-658-48471-2_6
- bvse (2020): Remondis scheitert mit DSD-Kauf. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/recycling/pressemitteilungen/5768-remondis-scheitert-mit-dsd-kauf.html> (26.8.2025)
- bvse (2022a): Energiekrise hat auch Wellpappenindustrie erheblich zugesetzt. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/altpapier/nachrichten-papier-recycling/9235-energiekrise-hat-auch-wellpappenindustrie-erheblich-zugesetzt.html> (20.8.2025)
- bvse (2022b): Kohle und Abfälle sollen künftig CO₂-Bepreisung unterliegen. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/8948-kohle-und-abfaelle-sollen-kuenftig-co2-bepreisung-unterliegen.html> (20.8.2025)
- bvse (2023a): E-Schrott-Recycling kämpft mit Problemen - Sammelmenge rückläufig. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/schrott-elektronikgeraete-recycling/pressemitteilungen-schrott/9337-e-schrott-recycling-kaempft-mit-problemen-sammelmenge-ruecklaeufig.html> (20.8.2025)
- bvse (2023b): Immer mehr Altholz wird als Brennstoff genutzt. bvse, <https://www.bvse.de/verwertung/presse-altholz-ersatzbrennstoffe-bioabfall/9333-immer-mehr-altholz-wird-als-brennstoff-genutzt.html> (20.8.2025)
- bvse (2023c): Schwache Konjunktur und hohe Energiekosten belasten die Stahlindustrie. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/schrott-elektronikgeraete-recycling/nachrichten-schrott-eschrott-kfz/9982-schwache-konjunktur-und-hohe-energiekosten-belasten-die-stahlindustrie.html> (20.8.2025)
- bvse (2024a): Exporte und Importe von Abfällen waren in 2023 rückläufig. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/recycling/recycling-nachrichten/10614-exporte-und-importe-von-abfaellen-waren-in-2023-ruecklaeufig.html> (18.9.2025)
- bvse (2024b): Gemeinsames Schreiben: Kreislaufwirtschaftsbranche und Feuerwehrverbände fordern Maßnahmen gegen existenzbedrohende Batteriebrände (Siegesmund, A.; Rehbock, E.; Schwaiger, K.; Lipinski, G.; Wilske, M.; Banse, K-H.). Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/11200-kreislaufwirtschaftsbranche-und-feuerwehrverbaende-fordern-massnahmen-gegen-existenz-bedrohende-batteriebraende.html> (20.8.2025)
- bvse (2025a): BDE und bvse fordern entschlossenes Handeln von Bund und Ländern, um Batteriebränden in der Entsorgungswirtschaft zu begegnen. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/recycling/pressemitteilungen/11969-bde-und-bvse->

- fordern-entschlossenes-handeln-von-bund-und-laendern-um-batteriebraenden-in-der-entsorgungswirtschaft-zu-begegnen.html (6.8.2025)
- bvse (2025b): Der Brandgefahr wirksam begegnen: Technik, Aufklärung, Fachkräfte! Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/11930-der-brandgefahr-wirksam-begegnen-technik-aufklaerung-fachkraefte.html> (21.8.2025)
- bvse (2025c): Rezyklatpflicht ab 2030: Zertifikatehandel als Rettungsanker für die Verpackungsindustrie. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/sachverstand-bvse-recycling/themen-ereignisse/12088-rezyklatpflicht-ab-2030-zertifikatehandel-als-rettungsanker-fuer-die-verpackungsindustrie.html> (25.2.2026)
- bvse (o. J.): Auswirkungen der Corona-Krise auf Entsorgungswirtschaft sind enorm. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, <https://www.bvse.de/corona/5576-auswirkungen-der-corona-krise-auf-entsorgungswirtschaft-sind-enorm.html> (11.8.2025)
- Chakraborty, S. et al. (2026): Revolutionizing Recycling: Exploring Material Recovery, Sorting, and Processing Techniques for Enhanced Resource Recovery. In: Choudhury, M. et al. (Hg.): The Circular Path. Waste as a Resource, Cham, S. 325–346, https://doi.org/10.1007/978-3-032-05302-2_13
- Chakrawal, K.; Bekal, S. (2025): Fashion as a Service: A data-driven subscription model to eliminate fast fashion waste. In: Asian Journal of Management and Commerce 6(1), S. 475–483, <https://doi.org/10.22271/27084515.2025.v6.i1f.489>
- Circularity (2024): From Consumer Insight to Circular Impact. Market Report of Circular Business Models in the Electronics Market in Germany. https://www.circularity.me/wp-content/uploads/2024/10/Circularity_Market_Report_From_Customer_Insights_to_Circular_Impact.pdf (3.6.2026)
- Clarke, J. S.; Howard, E. (2018): Plastikkrise verschärft sich, da immer mehr Länder den Import von Plastikmüll einschränken wollen. <https://www.breakfreefromplastic.org/de/2018/06/15/plastics-crisis-set-to-intensify-as-more-countries-look-to-restrict-foreign-waste/> (5.8.2025)
- Cornelius, B. et al. (2024): Kritisch für die Wertschöpfung – Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft. Köln
- CRC (2025): Dossier on Certified Recycled Content. Bridging The Recyclate Gap. Certified Recycled Content GmbH, Ense
- Damayanti, D. et al. (2025): Biocatalytic Recycling of Polyethylene Terephthalate: From Conventional to Innovative Routes for Transforming Plastic and Textile Waste into Renewable Resources. In: Resources 14(11), Art. 176, <https://doi.org/10.3390/resources14110176>
- Dehoust, G.; Alwast, H. (2019): Kapazitäten der energetischen Verwertung von Abfällen in Deutschland und ihre zukünftige Entwicklung in einer Kreislaufwirtschaft. Strukturanalyse thermischer Anlagen innerhalb der deutschen Kreislaufwirtschaft. Öko-Institut e.V., Berlin
- Destatis (2021): 19 Kilogramm mehr Haushaltsabfälle pro Kopf im Corona-Jahr 2020. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/12/PD21_584_321.html (11.8.2025)
- Destatis (2023a): Anteil der Einpersonenhaushalte 2022 mit 41 % mehr als doppelt so hoch wie 1950. Statistisches Bundesamt, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N037_12_63.html (29.9.2025)
- Destatis (2023b): Exporte von Plastikmüll in den letzten zehn Jahren um 51 % zurückgegangen. Statistisches Bundesamt, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/ZahlderWoche/2023/PD23_23_p002.html (18.9.2025)

- Destatis (2025a): 55% mehr Bekleidungs- und Textilabfälle im Jahr 2023 als zehn Jahre zuvor. Statistisches Bundesamt, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/01/PD25_N004_51_32.html (4.9.2025)
- Destatis (2025b): Beschäftigtenzahl in der Entsorgungswirtschaft in Deutschland 2022. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257676/umfrage/beschaeftigtenzahl-in-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (12.9.2025)
- Destatis (2025c): Einpersonenhaushalte in Deutschland bis 2024. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156951/umfrage/anzahl-der-einpersonenhaushalte-in-deutschland-seit-1991/> (12.11.2025)
- Destatis (2025d): Investitionen in der Entsorgungswirtschaft in Deutschland 2023. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/181702/umfrage/investitionen-in-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (12.9.2025)
- Destatis (2025e): Municipal waste and electrical and electronic equipment waste. Statistisches Bundesamt, <https://www.destatis.de/Europa/EN/Topic/Environment-energy/Waste.html> (25.9.2025)
- Destatis (2025f): Nach Deutschland importierte Abfallmenge. Statistisches Bundesamt, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/gv-grenzueberschreitung-import-laender-jahre.html> (16.9.2025)
- Destatis (2025g): Umsatz der Entsorgungswirtschaft in Deutschland bis 2022. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257669/umfrage/umsatz-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (12.9.2025)
- Destatis (2025h): Unternehmenszahl in der Entsorgungswirtschaft in Deutschland 2022. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/257673/umfrage/unternehmenszahl-in-der-entsorgungswirtschaft-in-deutschland/> (12.9.2025)
- Destatis (2025i): Verteilung der Haushalte nach Haushaltsgröße 2024. Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1459579/umfrage/verteilung-der-haushalte-nach-personenzahl/> (12.11.2025)
- Destatis (2025j): Aus Deutschland exportierte Abfallmenge. Statistisches Bundesamt, 27.8.2025, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/gv-grenzueberschreitung-export-laender-jahre.html> (16.9.2025)
- Deutsche Apotheker Zeitung (2022): Folge der Corona-Pandemie: 200.000 Tonnen medizinischer Abfall. <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/news/artikel/2022/02/02/folge-der-corona-pandemie-200-000-tonnen-medizinischer-abfall> (13.8.2025)
- DFKI (2025): Effizienteres Recycling dank KI: Verbundprojekt entwickelt Lösung zur automatisierten Sortierung sperriger Abfälle. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, <https://nachrichten.idw-online.de/2025/06/18/effizienteres-recycling-dank-ki-verbundprojekt-entwickelt-loesung-zur-automatisierten-sortierung-sperriger-abfaelle> (15.9.2025)
- Dixit, R. et al. (2023): Biological approaches for E-waste management: A green-go to boost circular economy. In: Chemosphere 336, Art. 139177, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139177>
- Doppstadt Umwelttechnik (2024): Gewerbeabfall Aufbereitung. o. O.
- DUH (2025): 120 Städte mit Interesse an Verpackungssteuer: DUH startet Mitmachaktion. Deutsche Umwelthilfe e. V., https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/120-staedte-signalisieren-interesse-an-verpackungssteuer-deutsche-umwelthilfe-startet-mitmachaktion/?utm_source=chatgpt.com (30.9.2025)

- EEA (2025a): Circular material use rate. European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/countries/germany/circular-material-use-rate> (20.5.2026)
- EEA (2025b): Circularity of the EU textiles value chain in numbers. European Environmental Agency, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/circularity-of-the-eu-textiles-value-chain-in-numbers> (26.9.2025)
- EEA (2025c): Supply risk evolution for critical raw materials. European Environmental Agency, <https://www.eea.europa.eu/en/circularity/thematic-metrics/materialsandwaste/evolution-of-eu-raw-materials-supply-risk> (11.1.2026)
- EEW (o.J.): Abfälle durch Corona. EEW Energy from Waste, <https://www.eew-energyfromwaste.com/de/newsroom/wusstest-du-dass/abfaelle-durch-corona-1/> (11.8.2025)
- Eigenstetter, M. (2025): Herausforderungen der Twin Transition. In: López, I. (Hg.): CSR und Wirtschaftspsychologie: Psychologische Strategien zur Förderung nachhaltiger Managemententscheidungen und Lebensstile. Berlin, Heidelberg, S. 93–108, https://doi.org/10.1007/978-3-662-71038-8_5
- EK (2019): Der europäische Grüne Deal. Europäische Kommission, Brüssel
- EK (o.J.): Circular Economy. The EU aims to transition to a circular economy for a cleaner and more competitive Europe. Europäische Kommission, https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en
- eWaste (2024): Fachkräftemangel in der Entsorgungswirtschaft. https://www.axians-ewaste.com/blog_entry/fachkraeftemangel-in-der-entsorgungswirtschaft/ (9.1.2026)
- Fachpack (2025): Die Tübinger Verpackungssteuer macht Schule. <https://www.fachpack.de/de-de/fachpack-360/2025-1/artikel/tuebinger-verpackungssteuer-macht-schule> (6.1.2026)
- Formentini, G.; Ramanujan, D. (2023): Design for circular disassembly: Evaluating the impacts of product end-of-life status on circularity through the parent-action-child model. In: Journal of Cleaner Production 405, Art. 137009, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137009>
- Fraunhofer-Gesellschaft (2025): Weniger Batteriebrände in Recyclinganlagen dank sensorbasierter Abfallsortierung. <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2025/mai-2025/weniger-batteriebraende-in-recyclinganlagen-dank-sensorbasierter-abfallsortierung.html> (11.12.2025)
- Gierescher, S. (2025): Personalmangel: Abfalltonnen bleiben stehen - Ludwigshafen. Die Rheinpfalz, https://www.rheinpfalz.de/lokal/ludwigshafen_artikel,-personalmangel-abfalltonnen-bleiben-stehen-_arid,5808456.html (30.10.2025)
- Glaser, Rüdiger (2025): Prolog: Aus der Kleinen Eiszeit in die neue Heißezeit. In: Klimadämmerung. Berlin; Heidelberg, S. 1–23, https://doi.org/10.1007/978-3-662-71402-7_1
- Gries, C. et al. (2022): Die Rolle von Refurbishment-Anbietern im Smartphone-Markt. WIK Diskussionsbeitrag 491, Bad Honnef
- Grömling, M. (2024): Klima und Konjunktur. Institut der deutschen Wirtschaft (IW), IW-Report, Köln
- Handelsblatt (2025): Handel: Zahl der Retouren steigt auf Rekordwert. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/handel-zahl-der-retouren-steigt-auf-rekordwert/100178626.html> (12.1.2026)
- Hartmann, S. (2022): Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien. EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/> (9.1.2026)

- HDE; IFH Köln (2024): Konsummonitor Nachhaltigkeit 2024. Zwischen Sparsamkeit und Wertschätzung. Handelsverband Deutschland, Berlin
- HEB (2025): Pilotprojekt: Optimierung der Papierkorbleerungen. HEB GmbH Hagener Entsorgungsbetrieb, <https://www.heb-hagen.de/unternehmen-heb/presse-aktuell/pressemitteilungen/1003-pilotprojekt-optimierung-der-papierkorbleerungen.html> (15.9.2025)
- Herold, P. I.; Prokop, D. (2023): Is fast fashion finally out of season? Rental clothing schemes as a sustainable and affordable alternative to fast fashion. In: *Geoforum* 146, Art. 103873, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103873>
- Hildebrandt, A.; Lemaître, C. (2025): Klimawandel in Städten und Kommunen: Prognosen – Herausforderungen – Chancen und Maßnahmen. In: Hildebrandt, A. et al.: *Zukunft Stadt: Die globale und lokale Bedeutung von SDG 11. SDG - Forschung, Konzepte, Lösungsansätze zur Nachhaltigkeit*, Berlin, Heidelberg, S. 57–92, https://doi.org/10.1007/978-3-662-70008-2_3
- Hilgert, O. (2025): Baden-Württemberg: Großbrand bei Recyclingbetrieb in Sontheim an der Brenz: Wurden Akkus falsch entsorgt? Tagesschau, <https://www.tagesschau.de/inland/regional/badenwuerttemberg/swr-grossbrand-bei-recyclingbetrieb-in-sontheim-an-der-brenz-wurden-akkus-falsch-entsorgt-100.html> (10.11.2025)
- Holtmannspötter, D. et al. (2025): Potenzial-Landkarte der Nutzung von Künstlicher Intelligenz in einem zirkulären Metallmanagement. VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf
- Hübener (2025): Brandgefahr in Recyclingbetrieben – große und mittelgroße Ereignisse nehmen zu. <https://huebener-ag.eu/2025/04/brandgefahr-in-recyclingbetrieben-grosse-und-mittel-grosse-ereignisse-nehmen-zu/> (26.8.2025)
- Hurtenbach, S. (2023): Erkenntnisse für die Abfallentsorgung aus der Flutkatastrophe im Ahrtal. In: *WASSERWIRTSCHAFT* 113(9), S. 12–20, <https://doi.org/10.1007/s35147-023-1895-2>
- IPBES (2019): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des globalen Assessments der biologischen Vielfalt und Ökosystemleistungen. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn
- IT Daily (2025): Cyberangriff führt Recycling-Firma Eu-Rec in die Insolvenz. <https://www.it-daily.net/shortnews/cybernagriff-eu-rec-insolvenz> (26.11.2025)
- Jacob, K. et al. (2023): Modell Deutschland: Circular Economy. Öko-Institut e.V.; FU-Berlin, Berlin
- Jano, T. et al. (2026): Closing the loop: A systematic review of artificial intelligence in circular e-waste management. In: *Waste Management* 214, Art. 115392, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115392>
- Jowett, P. (2024): IEA-PVPS: Deutschland muss dringend seine Kapazitäten für das Recycling von Solarmodulen ausbauen. *pv magazine Deutschland*, <https://www.pv-magazine.de/2024/04/02/iea-pvps-deutschland-muss-dringend-seine-kapazitaeten-fuer-das-recycling-von-solarmodulen-ausbauen/> (9.1.2026)
- Kiel.de (o. J.): Kiel wird Zero.Waste.City. https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/zerowaste/strategie/index.php (6.1.2026)
- Köhler-Geib, F. et al. (2024): Set in stone? The German economy's dependency on copper, lithium and rare earths. KfW Research, Frankfurt a. M.
- Koinig, G. et al. (2024): Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes. In: *Waste Management* 190, S. 520–530, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.022>
- Kolodko, G. W. (2025): Geopolitische Neuordnung. In: *Trumps zweite Amtszeit*. Cham, S. 47–53, https://doi.org/10.1007/978-3-032-02943-0_6

- Kommunen.NRW (2024): CO₂-Bepreisung von Müllverbrennungsanlagen und Abfallgebühr. <https://kommunen.nrw/aktuelles/archiv/mitteilungen/2024/oktober/co2-bepreisung-von-muellverbrennungsanlagen-und-abfallgebuehr/> (8.1.2026)
- Kozłowski, E. et al. (2024): Influence of Selected Geopolitical Factors on Municipal Waste Management. In: Sustainability 17(1), Art. 190, <https://doi.org/10.3390/su17010190>
- Kunz, M. (2025): Serielles Clustering von Extremwetterereignissen in Mitteleuropa. IMKTRO Institut für Meteorologie und Klimaforschung Troposphärenforschung, https://www.imk-tro.kit.edu/14_11203.php (11.12.2025)
- Lahl, U. et al. (2024): Kunststoffe in der Abfallwirtschaft – closing the loop? In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 76(9–10), S. 371–381, <https://doi.org/10.1007/s00506-024-01059-y>
- Landeshauptstadt Dresden (2005): Auswirkungen des Hochwassers 2002 auf das Grundwasser. Dresden
- Lang, S. (2025): Thailand: Importverbot für Kunststoffabfall greift. EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/news/international/thailand-importverbot-fuer-kunststoffabfall-greift/> (4.8.2025)
- Lang, U. (2023): Ressourceneffizienz durch innovative Recyclingtechnologien und -verfahren. VDI ZRE Kurzanalysen 33, Düsseldorf
- Li, K. et al. (2025): Shift to intra-EU-OECD trade enhanced environmental benefits after Basel Convention Plastic Waste Amendments. In: Resources, Conservation and Recycling 223, Art. 108527, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108527>
- Max Wild GmbH (2023): Abbruch. Unsere mobilen Brechanlagen. https://www.maxwild.com/site/assets/files/6429/2023_08_30_mw_abbruch_mobile-brechanlagen_lowres.pdf (26.2.2026)
- McQuibban, J. (2025): State of Zero Waste Municipalities Report 5th edition. https://zerowaste-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/zwe_2025_State-of-Zero-Waste-Municipalities-Report-5th-edition-1.pdf (5.6.2026)
- Müller, F. et al. (2025): Datenanforderungen für die erfolgreiche Kreislaufwirtschaft. Metallkreisläufe und Datenlücken zum Recycling Eine Analyse zur aktuellen Datenlage. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau/Berlin, <https://doi.org/DOI:%20https://doi.org/10.60810/openumwelt-8187>
- Mutzbauer, J. (2022): Ransomware-Attacke bei Otto Dörner: Hackerangriff auf Hamburger Müllentsorger. CSO Online, <https://www.csoonline.com/article/3495592/ransomware-attaque-bei-otto-dorner-hackerangriff-auf-hamburger-mullentsorger.html> (25.8.2025)
- NABU (2023): Bioabfallsammlung in Deutschland. Ergebnisse einer NABU-Erhebung. Naturschutzbund Deutschland e. V., Berlin
- NDR (2025): Seit Wochen keine Müllabfuhr: Anwohner sauer – „unhaltbare Zustände“. https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/braunschweig_harz_goettingen/muellberge-im-landkreis-goettingen-anwohner-kritisieren-entsorger,muellabfuhr-118.html (30.10.2025)
- Netzwerk Reparatur-Initiativen (2025): Reparieren verbindet Reparieren verbindet – Einblicke in Deutschlands Reparatur-Initiativen 2025. <https://www.reparatur-initiativen.de/post/reparieren-verbindet-einblicke-in-deutschlands-reparatur-initiativen-2025> (28.9.2025)
- Ntostoglou, E. et al. (2025): Path-dependencies in the transition to sustainable biowaste valorization: Lessons from a socio-technical analysis of Sweden and Greece. In: Waste Management 192, S. 47–57, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.11.030>

- Peake, K.; Kenner, J. (2020): 'Slaves to Fashion' in Bangladesh and the EU: Promoting decent work? In: *European Labour Law Journal* 11(2), S. 175–198, <https://doi.org/10.1177/2031952520911064>
- Plastoil (o. J.): Plastoil WASTX Plant. <https://plastoil.com/plastic-recycling-wastx-plant> (26.2.2026)
- Poldner, K. et al. (2022): Fashion-as-a-Service: Circular Business Model Innovation in Retail. In: *Sustainability* 14(20), Art. 13273, <https://doi.org/10.3390/su142013273>
- Potrykus, A. et al. (2024): Stärkung des Recyclings technischer Kunststoffe vor dem Hintergrund steigender stoffrechtlicher Anforderungen am Beispiel Elektroaltgeräte und Altfahrzeuge – KUREA. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Prognos AG; INFA GmbH (2024): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Düsseldorf
- Rechberger, H. (2021): Corona-Erkenntnisse für die Kreislaufwirtschaft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 73(1), S. 14–15, <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00744-6>
- Reichert, I. (2019): So wirkt sich Chinas Einfuhrverbot auf unseren Plastikmüll aus. [quarks.de, https://www.quarks.de/umwelt/muell/so-wirkt-sich-chinas-einfuhrverbot-auf-unseren-plastikmuell-aus/](https://www.quarks.de/umwelt/muell/so-wirkt-sich-chinas-einfuhrverbot-auf-unseren-plastikmuell-aus/) (4.8.2025)
- Remondis (2025): Remondis eröffnet digitalen Wertstoffhof in Pirna. <https://www.remondis-kommunen.de/newsdetail/remondis-eroeffnet-digitalen-wertstoffhof-in-pirna/> (15.9.2025)
- Remondis (o. J.): Als Abfallexperte entsorgen wir alles – auch Verschwörungstheorien. <https://www.remondis-buergerservice.de/abfall-mythen/> (26.8.2025)
- Renn, O. et al. (2022): Systemic Risks from Different Perspectives. In: *Risk Analysis* 42(9), S. 1902–1920, <https://doi.org/10.1111/risa.13657>
- Retail-News (2025): Onlinehandel gewinnt an Dynamik – HDE hebt Prognose für 2025 deutlich an. <https://retail-news.de/onlinehandel-2025-prognose-hde/> (12.1.2026)
- Rinnert, C. et al. (2021): Herausforderung Klimawandel: neue Ideen für das Hochwasserrisikomanagement. In: *WASSERWIRTSCHAFT* 111(11), S. 39–43, <https://doi.org/10.1007/s35147-021-0910-8>
- Rudolf, P. (2019): Der amerikanisch-chinesische Weltkonflikt. Stiftung Wissenschaft und Politik, <https://www.swp-berlin.org/publikation/der-amerikanisch-chinesische-weltkonflikt> (21.4.2026)
- Rusch, M. et al. (2023): Application of digital technologies for sustainable product management in a circular economy: A review. In: *Business Strategy and the Environment* 32(3), S. 1159–1174, <https://doi.org/10.1002/bse.3099>
- Saatkamp, M.; Schmaltz, T. (2023): Europe expands recycling of lithium-ion batteries: Focus on capacity development, demand analysis and market players. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-kapazitaeten-bedarf-akteure-markt-analyse.html> (30.9.2025)
- Saurugg, H. (2024): Die zentrale Rolle der Entsorgung infolge eines möglichen Blackouts. RiskNet The Risk Management Network, <https://www.risknet.de/themen/risknews/die-zentrale-rolle-der-entsorgung-infolge-eines-moeglichen-blackouts/> (6.8.2025)
- Schäfer, K. F. (2024): Folgen und Ablauf eines Blackouts. In: *Blackout. Ursachen und Folgen von Stromausfällen*. Wiesbaden, S. 173–234, https://doi.org/10.1007/978-3-658-43332-1_5
- Schanze, D. J. et al. (2021): Handlungsansätze kleinerer und/oder finanzschwacher Kommunen zur Anpassung an den Klimawandel und den gesellschaftlichen Wandel. Umweltbundesamt, Texte 01, Dessau-Roßlau

- Schmidt, C. M.; Weber, T. (2024): Digitale Enabler der Kreislaufwirtschaft. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, https://doi.org/https://doi.org/10.48669/aca_2024-15
- Schmidt, S.; Laner, D. (2023): The environmental performance of plastic packaging waste management in Germany: Current and future key factors. In: *Journal of Industrial Ecology* 27(6), S. 1447–1460, <https://doi.org/10.1111/jiec.13411>
- Schnicke, F. (2025): Digitaler Produktpass – Schlüssel zur nachhaltigen und transparenten Industrie. Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering, <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digitaler-produktpass-beispiel-dpp/> (11.1.2026)
- Schwitalla, H. (2020): Wegen Orkantief „Sabine“: Verschiebung der Abfallabfuhr. *Wochenblatt Reporter*, https://www.wochenblatt-reporter.de/waldsee/c-lokales/verschiebung-der-abfallabfuhr_a168334 (8.10.2025)
- Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt (o. J.): Abfallwirtschaftskonzept für Siedlungs- und Bauabfälle sowie Klärschlämme für den Planungszeitraum 2020 bis 2030. <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/kreislaufwirtschaft/strategien/abfallwirtschaftskonzepte/abfallwirtschaftskonzept-2020-bis-2030/>
- Silva, E. N. D. (2025): Urban circular microfactories: local micro-plants for regenerative urban economies. In: *Brazilian Journal of Development* 11(9), Art. e82335, <https://doi.org/10.34117/bjdv11n9-059>
- Singh, Y. et al. (2025): Rising trends and real-world potential: Bibliometric analysis and quantitative benchmarking of decentralized micro-recycling systems for e-waste plastics. In: *Sustainable Chemistry One World* 8, Art. 100122, <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2025.100122>
- Stephan, M. (2025): Recycling capacities for lithium-ion batteries will exceed demand in Europe for the time being. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/batterie-recycling_europa_kapazitaeten_bedarf_update_2025.html (30.9.2025)
- Stöver, B. et al. (2025): Die Kosten des Klimawandels für Deutschland 2025–2050. GWS Research Report 2025/1, Osnabrück
- Sund, J. H. et al. (2025): Comprehensive assessment of environmental and economic impacts of the entire EU waste management system. In: *Waste Management* 204, Art. 114910, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114910>
- TAB (2023): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft. (Autor/innen: Riouset, P. et al.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Arbeitsbericht 205, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000163177>
- TAB (2024a): Krisenradar – Resilienz von Gesellschaft, Politik und Wirtschaft durch Krisenvorhersage stärken. (Autor/innen: Behrendt, S. et al.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Arbeitsbericht 209, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000171996>
- TAB (2024b): Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. (Autor/in: Kehl, C.; Riouset, P.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Arbeitsbericht 207, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000168838>

- TAB (2025a): Nachhaltiges Textilrecycling: vom Abfall zum Rohstoff. (Autorin: Kind, S.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, TAB-Themenkurzprofil 81, Berlin, <https://doi.org/10.5445/IR/1000183039>
- TAB (2025b): Resilienz-Dossier: Wassermanagement in der Landwirtschaft. (Autor/innen: Behrendt, S. et al.) Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin
- T&E (2024): From waste to value: the potential for battery recycling in Europe. <https://www.transportenvironment.org/articles/from-waste-to-value-the-potential-for-battery-recycling-in-europe> (30.9.2025)
- Thieken, A. et al. (2018): Urbane Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen Typologien und Transfer von Anpassungsstrategien in kleinen Großstädten und Mittelstädten (ExTrass). Universität Potsdam, Potsdam
- THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien (2024): Zertifikatehandel für Kunststoffrezyklate. Stuttgart
- Travasi, A.; Musso, F. (2023): The slow establishment of Fashion-as-a-Service: Evidence from the changing behaviour of fashion consumers. 26th Excellence In Services International Conference (EISIC). Paisley
- UBA (2018): Demografischer Wandel und Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft. Umweltbundesamt, Texte 32, Dessau-Roßlau
- UBA (2020): Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2022a): Analyse und Bewertung vergangener Krisensituationen mit Krankheitserregern bzw. von Infektionsereignissen im Kontext der Abfallwirtschaft. (Autor/innen: Pieper, U.; Klätte, M.) Umweltbundesamt, Texte 35, Dessau-Roßlau
- UBA (2022b): Umweltbewusstseinsstudie 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2023a): Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (2023b): Umweltbewusstsein in Deutschland 2022 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- UBA (o. J.a): Elektro- und Elektronikaltgeräte. Stand 24.9.2024. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n13747de> (4.9.2025)
- UBA (o. J.b): Indikator: Recycling von Siedlungsabfällen. Stand 4.10.2024. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n34075de> (4.9.2025)
- UBA (o. J.c): Abfallaufkommen. Stand 8.10.2025. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n12535de> (22.3.2026)
- UBA (o. J.d): Ablagerungsquoten der Hauptabfallströme. Stand 6.10.2025. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n13767de> (22.3.2026)
- UBA (o. J.e): Umweltbewusstsein und Umweltverhalten. Stand 12.5.2025, Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n11271de> (25.9.2025)
- UBA (o. J.f): Verpackungsabfälle. Stand 17.6.2025. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n13728de> (4.9.2025)
- UBA (o. J.g): Verwertungsquoten der wichtigsten Abfallarten. Stand 8.10.2025 Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n13772de> (6.5.2026)
- UBA (o. J.h): Weniger Müll gegen wachsende Rattenpopulationen in den Städten. Stand 24.2.2025. Umweltbundesamt, <https://www.uba.de/n115394de> (15.12.2025)

- WDR (2025): Nicht nur Hilden: Auch Köln und Dortmund starten Müllabfuhr früher wegen der Hitze. <https://www1.wdr.de/nachrichten/Hitze-Muellabfuhr-100.html> (5.11.2025)
- Weber, H. et al. (2026): Künstliche Intelligenz in der Abfallwirtschaft – Ein Überblick aktueller Anwendungen und zukünftiger Trends. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 78, S. 200–209, <https://doi.org/10.1007/s00506-026-01200-z>
- WEF (2023): The Global Risks Report 2023. World Economic Forum, Genf
- Weigel, A. et al. (2024): Institutionen und Parteipolitik machen den Unterschied: Kommunale Abfallvermeidungspolitik in kreisfreien Städten in Nordrhein-Westfalen im Vergleich. In: Politische Vierteljahresschrift 65(4), S. 711–739, <https://doi.org/10.1007/s11615-024-00543-0>
- Wilfer, T. (2024): Österreichs Entsorgungswirtschaft kämpft nach Hochwasser mit „historischem Abfallrückstau“. EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/news/international/oesterreichs-entsorgungswirtschaft-kaempft-nach-hochwasser-mit-historischem-abfallrueckstau-261124/> (13.11.2025)
- Wilfer, T. (2025): Solar Materials eröffnet erste industrielle Recyclinganlage für Solarmodule in Magdeburg. EUWID Recycling und Entsorgung, <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/solar-materials-eroeffnet-erste-industrielle-recyclinganlage-fuer-solarmodule-in-magdeburg-280425/> (9.1.2026)
- Wilts, H. (2012): National waste prevention programs: indicators on progress and barriers. In: Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy 30(9_suppl), S. 29–35, <https://doi.org/10.1177/0734242X12453612>
- Wilts, H. et al. (2021): Artificial Intelligence in the Sorting of Municipal Waste as an Enabler of the Circular Economy. In: Resources 10(4), Art. 28, <https://doi.org/10.3390/resources10040028>
- Wissenschaftliche Dienste (2018): Zu Plastikmüllexporten nach China. Deutscher Bundestag, WD 8-3000-030/18, Berlin
- Wochenblatt Reporter (2022): Änderungen wegen Orkantief „Sabine“: Verschiebung der Abfallabfuhr. https://www.wochenblatt-reporter.de/limburgerhof/c-lokales/verschiebung-der-abfallabfuhr_a168427 (8.10.2025)
- Yamamoto, M.; Kinnaman, T. C. (2022): Is incineration repressing recycling? In: Journal of Environmental Economics and Management 111, Art. 102593, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102593>
- Zimmermann, W. (2025): Polyester-degrading enzymes in a circular economy of plastics. In: Nature Reviews Bioengineering 3(8), S. 681–696, <https://doi.org/10.1038/s44222-025-00308-3>

7 Anhang

7.1 Abbildungen

Abbildung 1.1	Systembild	4
Abbildung 2.1	Deutsche Exporte von Kunststoffabfällen	13
Abbildung 2.2	Circular Material Use Rate Deutschlands im Zeitverlauf	14
Abbildung 2.3	Entwicklung der weltweiten Exportanteile im Marktsegment Technik für Abfallwirtschaft nach Ländern	19
Abbildung 2.4	Umsatz der Entsorgungswirtschaft in Deutschland von 2010 bis 2022	20
Abbildung 2.5	Grenzüberschreitende Verbringung notifizierungspflichtiger Abfälle	21

7.2 Kästen

Kasten 2.1	Emerging Issue: Zertifikatehandel mit Kunststoffrezyklaten	10
Kasten 2.2	Emerging Issue: biologisches Recycling	16
Kasten 2.3	Emerging Issue: dezentrale, modulare Mikrorecyclingfabriken	17
Kasten 2.4	Emerging Issue: KI als Schlüssel für ein zirkuläres Metallmanagement	22
Kasten 2.5	Emerging Issue: Fashion as a Service	25

Herausgeber

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0

E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de

www.tab-beim-bundestag.de

2026

Bildnachweis

Varos/AdobeStock (S. 1)

DOI: 10.5445/IR/1000196372



Die Foresight-Reports fassen die Ergebnisse des Resilienz-Radars zusammen und erscheinen seit 2024 jährlich auf der Microsite (<https://foresight.tab-beim-bundestag.de>).

Das Resilienz-Radar (<https://foresight.tab-beim-bundestag.de/resilienz-radar/>) dient der Identifikation und Bewertung von Entwicklungen, die mit systemischen Risiken für kritische Infrastrukturen verbunden sind. Neben der Analyse zentraler Trends liegt der Fokus auf der Einschätzung von systemischen Risiken mit potenziell weitreichenden Auswirkungen, um die Gefährdungslage einzelner Infrastruktursysteme fundiert zu bewerten. Zudem werden jeweils infrastrukturspezifische Fokusthemen vorgeschlagen, die von besonderer Relevanz für eine vertiefende Untersuchung sind. Die Ergebnisse werden jährlich in den Foresight-Reports zusammengefasst.