

STUDIE

# SYSTEMATISCHES ZUSAMMENWIRKEN VON DEKARBONISIERUNG UND KREISLAUFWIRTSCHAFT AM BEISPIEL DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE



Thomas Kienberger, Maedeh Rahnama Mobarakeh, Elisabeth Lachner,  
Peter Nagovnak (EVT)

Roland Pomberger, Peter Haslauer, Thomas Nigl (AVAW)

Im Auftrag des österreichischen Rates für Forschung und Technologieentwicklung



Leoben, November 2022

## Kurzfassung

Die österreichische Industrie ist für ca. 37 % des Bruttoinlandsverbrauchs von Energie sowie ca. ein Drittel der in Österreich produzierten Treibhausgase verantwortlich. Einer von mehreren Hebeln zur Verringerung des Energieverbrauchs und Senkung der Emissionen stellt eine verstärkte Kreislaufwirtschaft dar. Im Rahmen dieser Studie wurden Technologien und Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch sowie die Emissionen untersucht. Da ein wesentlicher Punkt der Kreislaufwirtschaft ein effizienter Umgang mit Ressourcen ist, wurde auch dieser Schwerpunkt, insbesondere im Hinblick auf kritische Materialien, mitbetrachtet.

Diese Studie zeigt auf, dass die größten kreislaufwirtschaftlichen Potenziale in den energieintensiven Subsektoren der Industrie (Grundstoffindustrie) liegen. Durch die Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe verringert sich der Anteil der energieintensiven Primärproduktion signifikant. Die Kreislaufwirtschaft ist damit ein wesentlicher Faktor für Energie- und Ressourceneffizienz. Die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen korrelieren in weiten Teilen mit Energieeinsparungen. Zur Klimaneutralität reicht eine Kreislaufwirtschaft alleine jedoch nicht aus. Die Kombination mit weiteren Maßnahmen u.a. in der Energiebereitstellung ist dafür entscheidend.

Im Hinblick auf die Technologiereifegrade wurde festgestellt, dass viele kreislaufwirtschaftsrelevante Technologien bereits einen hohen Technologie-Reifegrad aufweisen. Forschungs- und Pilotanlagen müssen vielfach in eine kommerzielle Phase überführt werden. Einige Technologien stehen jedoch noch am Anfang des Forschungsstadiums. Zur Ausschöpfung dieser Potenziale sind weitere Forschungsaktivitäten notwendig.

Technologische sowie systemische Entwicklungen sind auch in der Abfallwirtschaft klar erkennbar. Durch datenbasierte Sortiertechnologien auf Einzelteilbasis und flexibel ausgestaltete Aufbereitungsanlagen wird die Menge an ausgebrachten Wertstoffen sowie deren Qualität stetig verbessert. Die Abfallwirtschaft trägt maßgeblich zur Sicherung der Rohstoffversorgung der Industrie über sekundäre Rohstoffe bei. Die Entwicklung weg von einem linearen Wirtschaftssystem hin zu einer Kreislaufwirtschaft wird durch die Schaffung industrienaher Recyclingloops außerhalb des Systems Abfallwirtschaft gefördert.

## Abstract

Austrian industry is responsible for about 37 % of gross domestic energy consumption and for about one third of the greenhouse gases produced in Austria. One of several levers to reduce energy consumption and lower emissions is an increased circular economy. In this study, technologies and measures of the circular economy and their effects on energy consumption as well as emissions were investigated. Since a key aspect of the circular economy is efficient use of resources, this focus was also included, particularly with regard to critical materials.

This study shows that the greatest circular economy potentials lie in the energy-intensive subsectors of industry (basic materials industry). Substituting primary raw materials with recycled materials significantly reduces the share of energy-intensive primary production. The circular economy is thus an essential factor for energy and resource efficiency. The impact on greenhouse gas emissions correlates largely with energy savings. However, a circular economy alone is not sufficient for climate neutrality. Combining it with other measures in energy generation, among others, is critical to achieving this.

With regard to technology maturity, it was found that many circular economy-relevant technologies already have a high technology readiness level. Research and pilot plants in many cases need to be transferred to a commercial scale. However, some technologies are still in the early stages of research. Further research activities are needed to exploit this potential.

Technological as well as systemic developments are also clearly visible in waste management. Data-based sorting technologies based on individual parts and flexibly designed processing plants are steadily improving the quantity and quality of recyclable materials being discharged. Waste management makes a significant contribution to securing the supply of raw materials to industry via secondary raw materials. The development away from a linear economic system to a circular economy is promoted by the creation of industry-related recycling loops outside the waste management system.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 GRUNDLEGENDE PRÄMISSEN UND PRINZIPIEN.....</b>	<b>6</b>
1.1 Motivation .....	6
1.2 Definitionen .....	6
1.3 Grundlegendes aus der Betrachtung der Industriesparten .....	9
1.4 Grundlegendes aus dem Blickwinkel der Abfallwirtschaft .....	10
<b>2 STATUS QUO UND ENTWICKLUNGEN IN DER INDUSTRIE.....</b>	<b>13</b>
2.1 Allgemeines .....	13
2.2 Betrachtung einzelner Industriesparten .....	14
<b>3 STATUS QUO UND ENTWICKLUNGEN IN DER ABFALL- UND KREISLAUFWIRTSCHAFT .....</b>	<b>22</b>
3.1 Allgemein angewandte Verfahren und Technologien der Abfallwirtschaft ....	22
3.2 Systemische Entwicklungen in der Abfallwirtschaft.....	25
3.3 Betrachtung einzelner Stoffströme der Abfallwirtschaft.....	27
3.4 Bewertung der Potenziale einzelner Abfallströme .....	28
<b>4 ZUKÜNFTIGE STOFFSTROMPOTENZIALE.....</b>	<b>33</b>
4.1 Altmetalle und metallhaltige Abfälle .....	33
4.2 Sekundäre Einsatzstoffe in der Zementindustrie .....	38
4.3 Kunststoffe in der chemischen und petrochemischen Industrie .....	44
4.4 Alttextilien .....	45
4.5 Future Waste .....	47
4.6 Einsatzbereiche für Bau- und Abbruchabfälle .....	52
4.7 Verwertung von Aushubmaterial .....	54
4.8 Potenziale weiterer ausgewählter Stoffströme .....	55
<b>5 POTENZIALE ZUR EINSPARUNG VON ENERGIE UND REDUKTION VON TREIBHAUSGASEN DURCH KREISLAUFWIRTSCHAFTSMAßNAHMEN .....</b>	<b>62</b>
5.1 Stahlindustrie .....	62
5.2 Zementindustrie .....	64
5.3 Chemische und Petrochemische Industrie.....	65
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG UND ABGELEITETE MAßNAHMEN .....</b>	<b>68</b>
6.1 Überblick der relevanten Technologien.....	68

---

6.2	FTI-Empfehlungen .....	77
6.3	Weitere Empfehlungen rechtlicher oder organisatorischer Natur.....	78
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>82</b>
7.1	Literatur.....	82
7.2	Abkürzungsverzeichnis .....	88
7.3	Tabellen .....	90
7.4	Abbildungen .....	90

# 1 Grundlegende Prämissen und Prinzipien

## 1.1 Motivation

Die Industrie mit ihren energieintensiven und nicht-energieintensiven Subsektoren ist in Österreich für ca. 37 % des Bruttoinlandsverbrauchs von rund 400 TWh und rund ein Drittel des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich. Mit einem Anteil von rund 22 % an der Bruttowertschöpfung sichert sie maßgeblich den österreichischen Wirtschaftsstandort. Wie im aktuellen Regierungsprogramm „Aus Verantwortung für Österreich“ (BKA 2020) vorgesehen, will Österreich Klimaneutralität im Jahr 2040 erreichen. Dazu wurden als Ergebnis einer Studie des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik der MUL und des AITs im Auftrag des BMK von Diendorfer et al. (2021) technologische Änderungen identifiziert, die maßgeblich auf den nachfolgenden Technologiefamilien beruhen:

- Elektrifizierung industrieller Prozesse
- Einsatz klimaneutraler Gase
- Carbon Capture, Separation and Storage or Usage
- Kreislaufwirtschaft

Gerade im Hinblick auf die rasch in die Umsetzung zu bringenden FTI-Schwerpunkte zur Kreislaufwirtschaft sind in Bezug auf den Bestand und die noch zu entwickelnden kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien noch keine Studien vorhanden, die das systemische Zusammenwirken unterschiedlicher Bereiche entlang der Wertschöpfungskette zeigen. Diesem Umstand soll die gegenständliche interdisziplinäre Studie Rechnung tragen. Darin sollen die folgenden zentralen Fragen beantwortet werden:

1. Welche Technologien des Systems Kreislaufwirtschaft haben industrielle Relevanz und Potential in Österreich?
2. Welche Effekte der Energie- und Ressourceneinsparung können durch Nutzung von Stoffstrompotentialen erreicht werden?
3. Welche subsektoralen Zukunftstechnologien und Stoffströme sind zu forcieren, um signifikante Energie und Ressourcen Effekte zu erzielen?

## 1.2 Definitionen

### Kreislaufwirtschaft

Unter Kreislaufwirtschaft versteht man einen geschlossenen Wirtschaftskreislauf. Dieser Kreislauf beginnt mit einem umweltverträglichen und effizienten Abbau von Primärrohstoffen sowie dem ressourcenschonenden Einsatz bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen. Gleichzeitig ist bei der Gütererzeugung auf eine lange Lebensdauer und eine intensive Nutzung der Erzeugnisse sowie mögliche Formen der Nachnutzung und der Reparaturmöglichkeit Rücksicht zu nehmen. Am Ende der Produktlebensdauer ist das Produkt möglichst einer stofflichen Verwertung (Recycling) und nur wenn dies nicht zweckdienlich ist einer energetischen Verwertung oder in letzter Folge einer geregelten Beseitigung zuzuführen.

Die Kreislaufwirtschaft stellt damit eine gesamtheitliche Betrachtung von Produktlebenszyklen beginnend bei der Erzeugung über die (Wieder-) Verwendung bis hin zum Lebensende eines Produktes und der Verwertung dar. Eine gänzliche Kreislaufführung von Einsatzstoffen ist technisch nicht durchführbar, da der Aufwand mit steigender Wertstoffausbeute in Aufbereitung und Sortierung überproportional steigt. Eine gänzliche Rückführung aller Einsatzstoffe würde sich einem unendlich hohen Aufwand annähern, was mit einem unendlich hohen Energiebedarf einhergehen würde. Daher wird (bei zumindest gleichbleibenden Rohstoffbedarf) dauerhaft eine Zufuhr von Primärrohstoffen und -energieträgern ebenso notwendig sein, wie das Ausschleusen von Rest- und Schadstoffen aus dem Kreislauf.

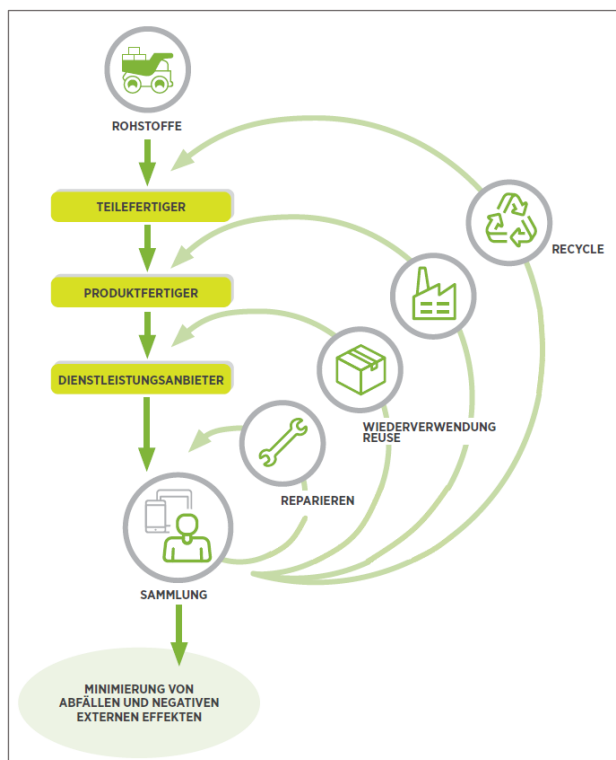


Abbildung 1: Ebenen der Kreislaufwirtschaft, Bildquelle: Kettele et al. (2022) in geänderter Form

Es gilt dabei die verschiedenen Schleifen der Kreislaufwirtschaft zu beachten und Produkte derart auszugestalten, dass diese in einer möglichst engen Schleife im Kreis geführt werden können.

**Im Rahmen dieser Studie wird Kreislaufwirtschaft nur im Hinblick auf den Recycling-Kreislauf von Materialien (End-of-Life Circle) betrachtet. Engere Kreisläufe, wie jene von Reparatur, Wiederverwendung oder Remanufacturing werden nicht näher berücksichtigt.**

## Bilanzraum

Als Bilanzraum wird die österreichische Industrie, unterteilt nach den 13 IEA-Sektoren, festgelegt. Dabei werden Stoffströme die die Grenzen des Bilanzraums überschreiten sowie Stoffströme zwischen den Sektoren, die als eigenständige Bilanzräume betrachtet werden, untersucht. Um das Aufkommen an sekundären Rohstoffen für die Industrie beschreiben zu

können, wird darüber hinaus die Abfallwirtschaft in ihren Massenströmen bilanziert. Dabei wird zwischen Produktionsabfällen aus der Industrie und Konsumabfällen aus der Produktnutzung unterschieden. Die Bereiche „Handel und Produktnutzung“, „energetische Verwertung“ sowie „Deponierung“ werden aus der Betrachtung ausgenommen. Abbildung 2 zeigt eine grafische Darstellung des Bilanzraums.

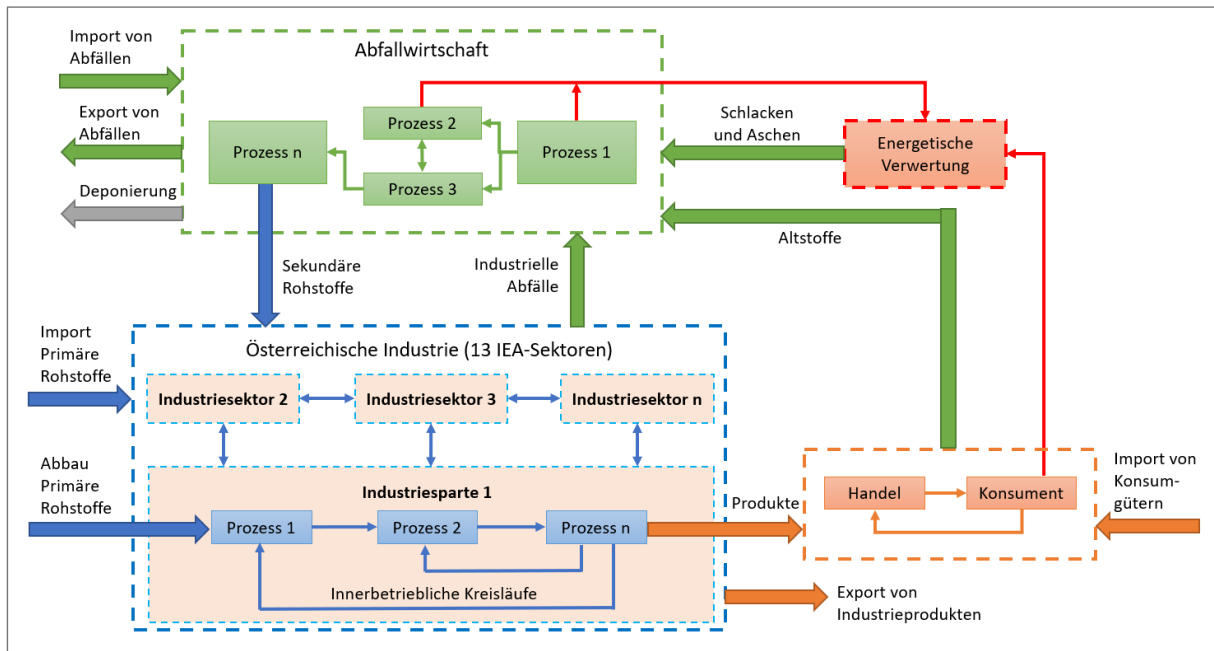


Abbildung 2: Darstellung des Bilanzraums: Die strichlierten Linien stellen einzelne Bilanzräume dar. Betrachtet werden insbesondere der Bilanzraum der Industrie sowie die einzelnen Industriesektoren als Sub-Bilanzräume. Die Abfallwirtschaft wird als eigenständiger Bilanzraum betrachtet um sekundäre Rohstoffströme für die Industrie darzustellen. Andere Bilanzräume sind nur indirekt für die Betrachtung von Stoffströmen in oder aus einem betrachteten Bilanzraum relevant.

Für die Konsumabfälle werden die tatsächlich in Österreich angefallenen Abfälle herangezogen. Der Nettoimport von Konsumgütern wird damit indirekt über das Abfallaufkommen in die Bilanzierung aufgenommen. Als sekundäre Rohstoffe aus den Konsumabfällen werden nur getrennt gesammelte Altstoffe betrachtet. Die Sammellogistik von Abfällen sowie die Trennung und Aufbereitung von gemischten Siedlungsabfällen sind nicht Gegenstand dieser Studie. Nicht industrierelevante Stoffströme der Abfallwirtschaft werden nicht näher betrachtet. Als Datenbasis dienen die österreichischen Abfalldaten von 2019, die im Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) des Klimaschutzministeriums (BMK 2022) angeführt sind.

Von der Bilanzierung ausgenommen wurden die nachfolgenden im BAWP gesondert angeführten Abfallklassen:

- Gemischte Siedlungs- und Gewerbeabfälle (v.a. Restmüll, Sperrmüll),
- Getrennt gesammelte biogene Abfälle sowie Lebensmittelabfälle,
- Gefährliche Abfälle,
- Straßenkehrschutt,
- Klärschlamm sowie



- Medizinische Abfälle.

Das Ziel der Studie liegt in der Beurteilung des Kreislaufwirtschaftspotenzials der Industrie. Daher wurden die kommunalen Abfälle (jedoch nicht die Altstoffe) weitgehend ausgenommen. Sofern sie für die Betrachtung einzelner Wertstoffe relevant sind, werden die jeweiligen Anteile der Wertstoffe in den gemischten Abfällen jedoch mitbetrachtet. Die Gesamtheit der gefährlichen Abfälle ist eine sehr breit gestreute Materie. Es fallen etwa 300 verschiedene Abfallklassen darunter, jedoch beträgt die Gesamtmasse nur etwa 1,8 % des österreichischen Abfallaufkommens. Die Mitbetrachtung dieser Abfallklasse übersteigt den Rahmen dieser Studie.

### 1.3 Grundlegendes aus der Betrachtung der Industriesparten

Nach der Klassifizierung gemäß internationaler Energieagentur ist die verarbeitende Industrie in 13 industrielle Teilsektoren unterteilt, die gemäß ihrer Energieintensität in zwei Gruppen geteilt werden: die energieintensive und die nicht-energieintensive Gruppe. Siehe Tabelle 1 Die energieintensive Industrie verwendet Primäre- und Sekundäre Rohstoffe (z. B. Eisenerz, Kalkstein, Raffinerieprodukte, aber auch Schrotte, Recycling Beton, PET-Recyclate, usw.) zur Herstellung von Grundstoffen (z. B. Rohstahl, Zement, Kunststoffe usw.).

Die industriellen Subsektoren in der Gruppe der nicht-energieintensiven Industrie sind die weiterverarbeitenden Produzenten. Sie verwenden die Grundstoffe und verarbeiten sie zu einem Endprodukt, welches an die Verbraucher weitergeben wird

Eine quantitative Einordnung hinsichtlich Energieeinsatz und Emissionen, sowohl der energieintensiven als auch der nicht-energieintensiven Sektoren ist in Kapitel 2 angeführt

Im Kreislaufwirtschaftspfad für Österreich sind die energieintensiven Teilsektoren von zentraler Bedeutung, da sie sowohl das größte Potenzial für Kreislaufinnovationen als auch die größten Umweltauswirkungen und den größten Ressourcenbedarf aufweisen.

Tabelle 1: Klassifikation der industriellen Teilsektoren

	industrielle Teilsektoren
<b>Energieintensive</b>	Eisen- und Stahlerzeugung [ <b>Rohstahl</b> ]
	Steine und Erden, Glas [ <b>Zement</b> ]
	Chemie und Petrochemie [ <b>Kunststoff</b> ]
	Nicht-Eisen Metalle
	Papier und Druck
<b>Nicht- Energieintensive</b>	Textil und Leder
	Holzverarbeitung
	Fahrzeugbau
	Maschinenbau
	Bergbau
	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak
	Bau
Sonst. produzierender Bereich	

## 1.4 Grundlegendes aus dem Blickwinkel der Abfallwirtschaft

Die Abfallwirtschaft ist ein sehr spezifischer Wirtschaftsbereich in dem einzelne, mitunter einfach erscheinenden, Fragestellungen nicht immer auf den ersten Blick klar sind. Daher werden nachfolgend einige für die Studie relevante Themenbereiche kurz erörtert.

### Wem gehört der Abfall?

Eine nicht ganz triviale Frage ist jene nach dem Besitzer der Abfälle. Für die meisten Abfälle gilt, dass der Erzeuger auch der Besitzer ist bis er den Abfall an einen berechtigten Abfall Sammler und Behandler übergeben hat. Das kann eine Kommune sein oder ein berechtigtes privates Unternehmen. Handelt es sich um Abfälle, die in den Wirkungsbereich eines lizenzierten Sammelsystems fallen (z.B. Verpackungen), so ist das Sammelsystem der Abfallbesitzer, auch wenn die Abfälle durch Drittunternehmen gesammelt und aufbereitet werden. Denkbar ist auch, dass Unternehmen ihre Produkte am Ende der Nutzungsphase zurücknehmen bzw. bereits beim Verkauf eine Rückgabe vertraglich festlegen. Dadurch verbleiben wichtige (sekundäre) Ressourcen im Unternehmen. Dass sich derartige Systeme weiter ausbreiten, um die Rohstoffversorgung des Unternehmens zu diversifizieren und langfristig zu sichern, kann als wahrscheinlich angesehen werden. Ob die Rücknahme von End-of-Life (EoL) Produkten als Abfallsammlung bzw. Behandlung einzustufen ist und diese Unternehmen daher eine Bewilligung als Sammel- und Behandlungsbetrieb benötigen ist rechtlich noch zu klären.

### Abfallende

Das Eintreten des Abfallendes ist in § 5 Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002) geregelt. Diese Regelung zielt insbesondere darauf ab, Schadstoffe möglichst aus dem Stoffkreislauf auszuschneiden, was den Grundsätzen des AWG entspricht. Altstoffe gelten daher so lange als Abfälle, bis sie unmittelbar als Substitution von Rohstoffen eingesetzt werden. Das Abfallende kann nur erreicht werden, wenn die einschlägigen Anforderungen erfüllt werden. Dies kann für einzelne Abfälle problematisch sein, da dadurch Produzenten, die aufbereitete Recycling-Rohstoffe einsetzen, möglicherweise eine Abfallsammel- und Behandlungsbefugnis benötigen und damit in den Wirkungsbereich des AWG fallen. Dies bedeutet einen entsprechenden Mehraufwand durch Genehmigungsverfahren und in der Verwaltung.

Ein ähnliches Problem stellt die Abgrenzung zwischen Abfall und Nebenprodukt dar. In § 2 Abs. (3a) des AWG sind die Eigenschaften eines Nebenproduktes zwar definiert, jedoch müssen oftmals Einzelfallentscheidungen getroffen werden, ob diese Eigenschaften auf einen Stoffstrom aus dem Produktionsprozess gänzlich zutreffen oder nicht. Teilweise müssen Unternehmen dies bis vor den Verwaltungsgerichtshof ausjudizieren.

### Ökonomie der Abfallwirtschaft

Für Abfälle gelten die gleichen ökonomischen Prinzipien wie im gesamten Wirtschaftssystem. Im Idealfall soll die Entsorgung möglichst wenig Kosten. Abfälle gehen damit den Weg der geringsten Kosten (im Rahmen der gesetzlichen Möglichkeiten).

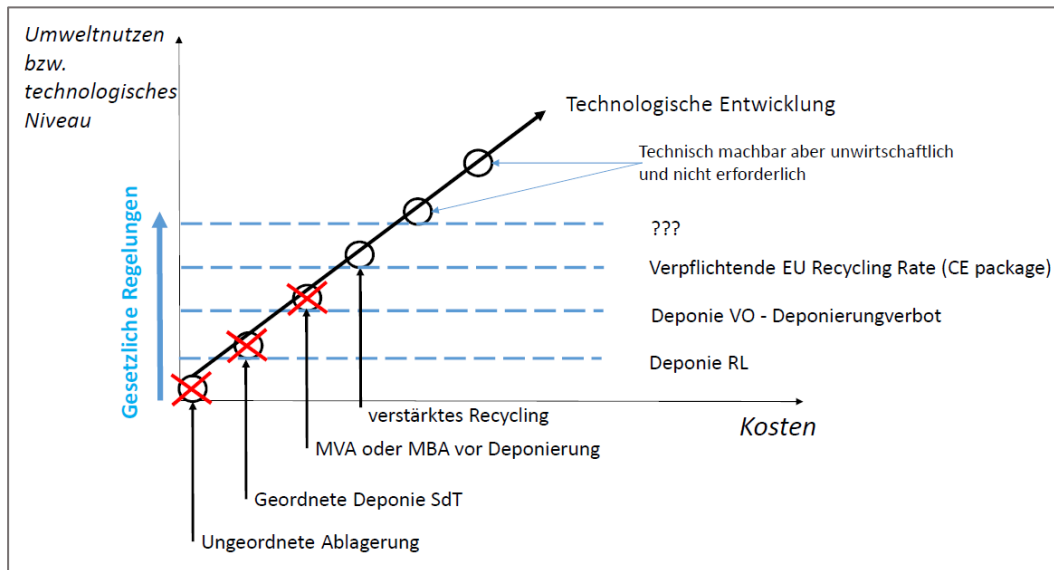


Abbildung 3: Entwicklung von Umweltstandards in der Abfallwirtschaft, Bildquelle: (Pomberger 2020)

Bei einigen Abfällen (z.B. Altmetalle, Papier, etc.) gibt es einen ausgeprägten Markt und es ist wirtschaftlich rentabel diese zu recyceln. Für viele Abfälle gilt jedoch, dass der Rohstoffwert des hergestellten Recycling-Materials die Kosten für den Aufwand der Herstellung nicht decken kann. Eine Deponierung wäre oftmals die kostengünstigste Möglichkeit der Entsorgung.

Dies führt zu einem Paradoxon in der Abfallwirtschaft. In Gewerbe und Industrie werden Sachleistungen (Produkte) oder Dienstleistungen von einem Lieferanten bzw. Erzeuger an einen Kunden gegen ein entsprechendes Entgelt erbracht. Die Rolle eines Abfallwirtschaftsbetriebes ist in diesem System nicht immer klar definiert. Teilweise treten Sammel- und Verwertungsbetriebe als Dienstleister auf, da Sie Abfälle gegen ein Entgelt übernehmen (Kunde ist der Abfallerzeuger, jedoch fließen Ware und Geld weg vom Kunden). Andererseits können Abfallwirtschaftsbetriebe auch Kunden sein, wenn z.B. Abfälle mit positivem Wert (z.B. Schrott) von einem Erzeuger geliefert werden. In diesem Fall tritt der Betrieb als Kunde auf und nach einem Aufbereitungsprozess als Lieferant für die Metallindustrie. (Gelbmann 2012)

Damit Abfälle auf einem möglichst hohen Level der Abfallhierarchie behandelt werden, braucht es entsprechende gesetzliche Regelungen wie beispielsweise die Deponieverordnung (DVO 2008), die eine Ablagerung von unbehandelten Abfällen (mit einigen Ausnahmen) verbietet sowie Mechanismen zur Förderung des Einsatzes von sekundären Rohstoffen.

### Begrenzte Menge an verfügbaren Sekundärrohstoffen

Recycling wird in Österreich seit Jahrzehnten betrieben. Gerade im Bereich von Metallen aber auch anderen Wertstoffen wie z.B. Papier ist der Einsatz von Altpapier als Sekundärrohstoff nicht wegzudenken. In den vergangenen Jahren hat sich dieser Trend auch in anderen Branchen z.B. bei Kunststoffen im Verpackungsbereich stärker durchgesetzt. Dadurch steigt die Nachfrage nach sekundären Rohstoffen. Teilweise wird der Einsatz von recyceltem

Material auch zu Marketingzwecken verwendet. Die erhöhte Nachfrage stößt jedoch auf das Problem der begrenzten Menge in der benötigten Qualität. Die Herstellung von Recycling-Rohstoffen kann nicht unbegrenzt gesteigert werden, da diese mit den anfallenden Abfallmengen begrenzt sind. Bereits heute werden wertstoffreiche bzw. sortenreine Abfälle grenzüberschreitend gehandelt. Dieser Trend wird sich zukünftig weiter verstärken.

Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang stellt die Konkurrenz von unterschiedlichen Verwertungspfaden wie beispielsweise stofflicher und thermischer Verwertung dar. Aus gemischten heizwertreichen Abfällen werden Ersatzbrennstoffe (EBS) hergestellt die z.B. in der Zementindustrie Einsatz finden. Durch bessere Aufbereitung und Sortierung derartiger Abfälle sinken jedoch Menge und Heizwert der EBS und es muss in diesen Industriebereichen verstärkt auf andere Energiequellen (z.B. fossile Energieträger) zurückgegriffen werden. Die Konkurrenz zwischen unterschiedlichen Verwertungspfaden wird weiter zunehmen, da sich auch verschiedene stoffliche Verwertungspfade für ähnliche Stoffströme entwickeln. Abfall ist und bleibt damit ein knappes Gut.

## 2 Status Quo und Entwicklungen in der Industrie

### 2.1 Allgemeines

In Österreich ist die Industrie (die 13 IEA Sektoren) für rund 37% des Gesamtenergieverbrauchs und mehr als 34% der gesamten nationalen Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt GmbH 2021). Die energieintensiven Teilsektoren stellen wie erwähnt Grundstoffe wie beispielsweise Rohstahl, Zement, Papier und Kunststoffe her. Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, entfallen auf die fünf energieintensiven Teilsektoren mehr als 70 % des industriellen Energiebedarfs und der Emissionen. Den übrigen, nicht-energieintensiven Teilsektoren, die die Grundstoffe über den Wertschöpfungskreislauf hin zu Produkten verarbeiten, sind hingegen weniger als 30 % der Emissionen zuzuordnen.

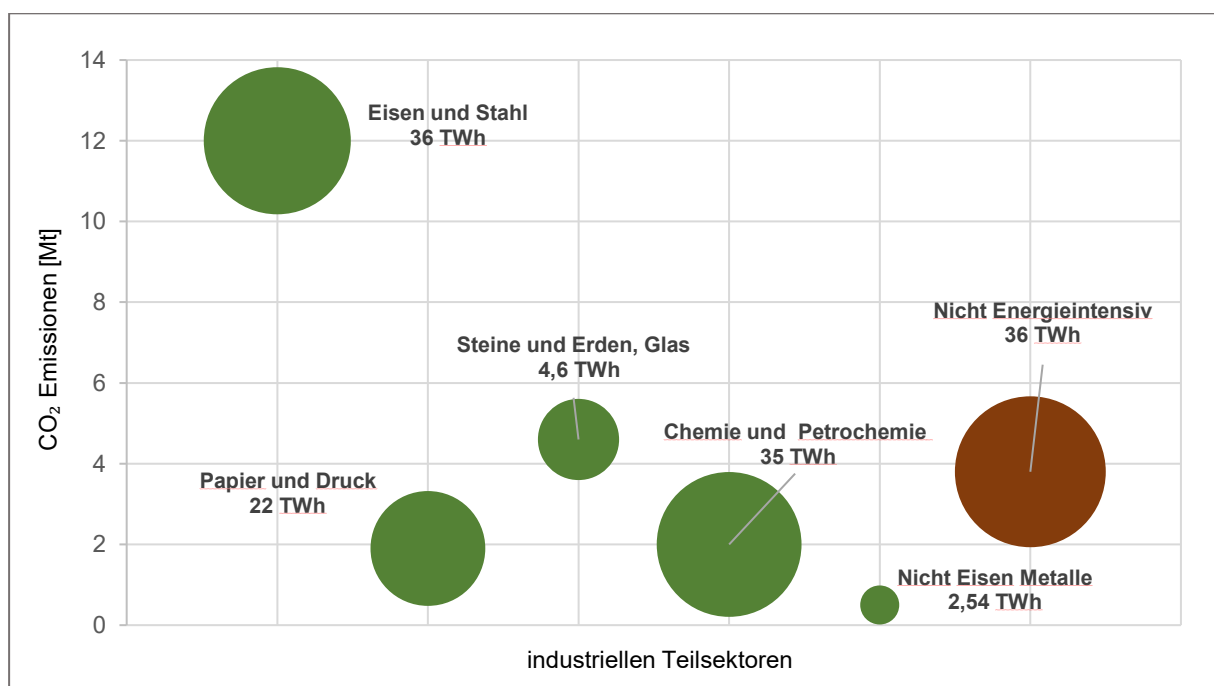


Abbildung 4: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission industrieller Teilsektoren (Die Y-Achse zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die den Teilsektoren zuzuordnen sind, und der Energiebedarf wird durch die Größe der Blase dargestellt) (Statistik Austria 2019; Umweltbundesamt GmbH 2021)

Der größte Teil der Emissionen energieintensiver Industrien ist auf die Herstellung von Grundstoffen aus Primärrohstoffen zu (z.B. Rohstahl aus Eisenerz oder Rohzement aus Kalkstein) zurückzuführen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen können dabei erheblich gesenkt werden, wenn die Primärproduktion durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen verringert werden kann. In diesem Fall wird in den oben genannten Beispielen Stahlschrott bzw. Recyclingbeton eingesetzt, der heute emissionsbestimmende Schritt der Eisenerzreduktion (Rohstahlproduktion), bzw. der Kalzinierung (Zementherstellung) kann teilweise entfallen. Bei entsprechender Prozessgestaltung können denn Grundstoffe mit nahezu ähnlichen Eigenschaften wie jener der Primärroute hergestellt werden. Dazu sind jedoch nicht nur Produktionsrouten technologisch umzustellen. Zudem ist die Verfügbarkeit der jeweiligen Sekundär- (oder R-) Rohstoffe sicherzustellen.

Die vorliegende Studie ermittelt das technische Potential zur CO<sub>2</sub>-Reduktion und zur Reduktion des Primärenergieeinsatzes, welches sich aus dem maximierten Einsatz von Sekundär- (oder R-) Rohstoffe ergibt. Einsatzgrenzen entstehen dabei ausschließlich aus den zu erzielenden Grundstoff-Qualitäten, die einen gewissen Primärproduktionsanteil erfordern.

Das zu bestimmende Potential ergibt sich aus genannten Gründen fast ausschließlich in den energieintensiven Sektoren, weshalb diese in weiterer Folge detailliert betrachtet werden. In der Studie analysieren wir die Technologien, die nötig sind um die jeweiligen, sektorspezifischen Potentiale zu heben und weisen jene gesondert aus, welche im Hinblick auf eine zukünftige FTI Politik als wesentlich erscheinen.

## 2.2 Betrachtung einzelner Industriesparten

### Eisen- und Stahlindustrie

Die österreichische Eisen- und Stahlindustrie ist der sechstgrößte europäische Stahlproduzent und war im Jahr 2019 für rund 5 % der gesamten europäischen Stahlproduktion verantwortlich (World Steel Association 2020). In Österreich werden derzeit zwei grundsätzliche Stahlerzeugungsrouten eingesetzt: die primäre Stahlerzeugung über den Hochofen-LD-Konverterweg und die sekundäre Stahlerzeugung mittels Elektrolichtbogenofen (EAF). Im Jahr 2019 wurden rund 90 % der österreichischen Stahlproduktion über die Hochofen- und etwa 10 % über die EAF-Route produziert (World Steel Association 2020).

Die Eisen- und Stahlerzeugung setzt etwa 36 TWh Primärenergie ein, was etwa 10 % des gesamten nationalen Energieverbrauchs ausmacht (Statistik Austria 2019). Etwa 88 % dieser Energie stammt aus fossilen Brennstoffen, z. B. Kohle, Koks, Erdgas und Steinkohlenkoks, wobei Kohle und Koks dominieren. Dies dienen folgenden Zwecken: als Reduktionsmittel, als Energiequelle bzw. zur Gewährleistung der statischen Stabilität der Möllersäule im Hochofen (Statistik Austria 2019; Rahnama Mobarakeh und Kienberger 2022).

Um das in Sauerstoffverbindungen gebundene Eisen aus dem Eisenerz  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  im Hochofen gewinnen zu können, wird der im Koks enthaltene Kohlenstoff als Reduktionsmittel eingesetzt. Dabei entsteht das Treibhausgas CO<sub>2</sub>. Im Jahr 2019 trug die österreichische Stahlproduktion mit rund 12 Mio. t CO<sub>2</sub>e zur österreichischen THG-Bilanz bei, was einem Anteil von 12,9 % entspricht (Umweltbundesamt GmbH 2021).

Im Gegensatz zur Primärstahlerzeugung ist die Sekundärstahlerzeugung etwa 5- bis 6-mal energieeffizienter (Agora Industry 2022). In Österreich wird dabei wie erwähnt 10 % des Rohstahls unter Verwendung von Erdgas und Elektrizität durch Einschmelzen von recyceltem Schrott als R-Rohstoff erzeugt.

Die österreichische Eisen- und Stahlindustrie beabsichtigt in ihrem Emissionsreduktionspfad, von der derzeitigen Methode der Stahlerzeugung im Hochofen, auf wasserstoffbasiertes direkt reduziertes Eisen (DRI, bzw. HBI) umzustellen. Dabei wird im Anschluss an die Erzeugung des DRIs in einem Schachtofen, dieses in einem nachgeschalteten EAF (unter der Zugabe von Schrott), zu Rohstahl weiterverarbeitet.

Theoretisch kann dabei eine beliebige Menge Stahlschrott zugesetzt werden. Praktisch ist dies nicht möglich, da dafür so gute Schrottqualitäten benötigt werden würden, wie sie auf absehbare Zeit nicht aufgebracht werden können. Daher wird es in Zukunft, neben einer gewissen, in Abbildung 10 dargestellten Primärproduktion, einen größeren Bedarf an hochwertigem Schrott geben. Siehe Kapitel 4.1

Im Referenzjahr 2019 wurden in Österreich 2,3 Millionen Tonnen Stahlschrott gesammelt. Aufgrund der Verunreinigung des Stahlschrotts konnte aktuell jedoch nur die Hälfte dieses Schrotts im Inland im EAF-Prozess verwendet werden; der Rest musste zur Weiterverarbeitung in andere Länder exportiert werden. (BMK 2022)

Stahlschrott am Ende seiner Nutzungsphase enthält häufig Verunreinigungen mit Kupfer und anderen Elementen, die nicht leicht abgetrennt werden können und die Qualität des Schrotts stark beeinträchtigen. Vor allem die Entfernung des Kupfergehalts aus dem Stahlschrott stellt eine große Herausforderung für das Stahlrecycling dar (Material Economics 2018). Es gibt eine Reihe technologischer Lösungen, die zu einer höheren Schrottqualität führen und die Verunreinigungen mit Kupfer reduzieren können. Diese werden im Folgenden erläutert und in Tabelle 2 unter Angabe des Technology Readiness Level (TRL) zusammengefasst.

- Unterstützung von Innovation und Entwicklung fortschrittlicher Technologien zur Abtrennung von Kupfer aus Stahl, um mehr sauberen R-Stahl zu erhalten
- Strukturierung und Design von Produkten (einschließlich Kraftfahrzeugen) so, dass Kupferkomponenten einfach abgetrennt werden können.

Die größten Hebel finden sich darin, das Abfallentsorgungssystem z.B. in der Sortierung zu verbessern und hochwertigen Schrott zu gewinnen. Dieser Schrott kann dann zur Erzeugung von hochwertigem Sekundärstahl im konventionellen Elektrostahlwerk verwendet werden. In einem zukünftigen Produktionspfad kann eine hohe Schrottqualität den DRI-Bedarf im DRI-EAF-Prozess verringern (um die gleiche Marktqualität wie Rohstahl zu erreichen). Damit würden der Wasserstoffbedarf und der Bedarf an Eisenerz in der DRI-Erzeugung verringert.

Tabelle 2: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Eisen- und Stahlindustrie

Technologie	Anwendung	TRL
Steigerung der Produktion von (hochwertigem) Sekundärstahl durch <b>Elektrolichtbogenöfen (EAF)</b>	Branchenebene	9
<b>Verringerung der Produktionsverluste</b> (z.B. Stahlblech in der Autoindustrie)	Branchenebene	9
<b>Entfernung von kupferreichen Schrottteilen durch sensorgestützte Sortierung</b>	Branchenebene Abfallwirtschaftssystem	7
Sortierung von Stahlschrott nach Legierungen zur Steigerung der Qualität	Abfallwirtschaftssystem	6-7

## Zementindustrie

Beton ist heute der Grundbestandteil vieler Gebäude und der meisten Infrastrukturelemente. Er besteht aus einer Mischung aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen. Die Herstellung von Zement als zentralem Bestandteil von Beton ist einer der wichtigsten Teilsektoren im Sektor der nichtmetallischen Mineralien (NMM). In Österreich ist der Sektor der nichtmetallischen Mineralien (Zement, Kalk, Glas usw.) für etwa 20 % der industriellen Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt GmbH 2021). Innerhalb dieses Sektors ist der Teilsektor Zement der größte CO<sub>2</sub>-Emittent, auf den 70 % der Emissionen aus nichtmetallischen Mineralien entfallen (Mauschitz 2021; Umweltbundesamt GmbH 2021).

Zement wird durch das Mahlen von Klinker mit einer kleinen Menge Gips und anderen Materialien (Zusatzstoffen) hergestellt. Klinker wird durch Umwandlung von Kalkstein in Calciumoxid ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) in einem Hochtemperaturprozess hergestellt und ist der emissionsintensivste Teil der Zementherstellung (Pardo et al. 2011). Die brennstoffunabhängigen, geogenen Emissionen gemäß oben angeführter Kalzinierungsreaktion verursachen 60-70 % des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (IEA 2018). Der Rest der Emissionen stammt aus dem Brennstoffeinsatz für die Bereitstellung der Wärme der endothermen Reaktion.

In den letzten Jahren hat die österreichische Zementindustrie damit begonnen, Klinker durch Substitute wie Flugasche, Hochofenschlacke usw. zu ersetzen, was sich direkt auf die (brennstoffunabhängigen) Prozessemissionen auswirkt (VÖZ 2019b).

Im Hinblick auf die brennstoffabhängigen Emissionen ist festzuhalten, dass die österreichische Zementindustrie bereits einen großen Teil der fossilen Brennstoffe durch alternative Abfallbrennstoffe wie Altkunststoff, Altholz, Altpapier usw. ersetzt hat. Deren biogene Kohlenstoffkomponenten verringern die brennstoffbedingten Emissionen (Mauschitz 2021). Eine weitere Verringerung der mit fossilen Brennstoffen verbundenen Emissionen kann durch den Einsatz von erneuerbaren Energieträgern erreicht werden. Die größte Herausforderung sind jedoch die geogenen Emissionen der Klinkerproduktion, die bei der Zementherstellung inhärent sind.

Im Rahmen der Kreislaufwirtschaft können die Emissionen aus der Klinkerproduktion auf zwei Arten verringert werden: durch die Substitution von Kalkstein als primärem Rohstoff und durch die Senkung des Klinkeranteils bei der Zementherstellung (Hoenig et al. 2015).

Der primäre Rohstoff (Kalkstein) kann durch recycelte Materialien wie Betonzuschläge und Ziegelzuschläge aus dem Recycling von Bau- und Abbruchabfällen ersetzt werden. Der Klinkeranteil durch alternative Füllstoffe verringert werden (IEA 2018). Zukünftig können Füllstoffe wie Hochofenschlacke, Flugasche und andere puzzolanische Materialien 15-30 % des typischen Portlandzements ersetzen ohne dessen Struktur zu beeinträchtigen (Siehe Kapitel 4.2). Diese Ersatzstoffe werden jedoch durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung und der kohlebasierten Stahlproduktion reduziert oder verändert.



Zudem wird es als vielversprechende Möglichkeit angesehen, den noch nicht reagierten Zementanteil in recycelten Beton, direkt als Bindemittel wiederzuverwenden (Material Economics 2018; Agora Industry 2022). Derzeit wird Beton nicht in hoher Qualität recycelt und kann daher nicht als Bindemittlersatz wiederverwendet werden. Stattdessen wird Recyclingbeton für minderwertige Zwecke verwendet, beispielsweise als schwarzer Füllstoff. Der Einsatz fortschrittlicher Recycling-Innovationen insbesondere zu Separation des ungebundenen Zementanteils an recycelten Betonmassen, bietet potenziell neue Lösungen für die Herstellung von hochwertigem Recyclingzement (Agora Industry 2022). Die intelligente Trennung von Altbetonbestandteilen in getrennte Abfallströme von Kies, Sekundärsand und Zementstein trägt dazu bei, mehr hochwertigen Recyclingzement bereitzustellen, der als Bindemittel für die Herstellung von neuem Zement verwendet werden kann.

In der folgenden Tabelle 3 sind die wichtigsten technologischen Pfade für die Zementherstellung im Kontext der Kreislaufwirtschaft mit ihrem jeweiligen Technologiereifegrad aufgeführt.

Tabelle 3: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Zementindustrie

Technologie	Anwendung	TRL
<b>Ersatz von Primärrohstoffen im Rohmehl der Klinkerherstellung (14%→19%)</b> (z.B. Rezyklierte Baustoffe wie Betonbrechsand und Ziegelsplitt aber auch Nebenprodukte wie Gießereisande und Reststoffe wie Schlacken und Aschen)	Branchenebene	6-9
<b>Ersatz alternativer Materialien als Bindematerialien statt Klinker</b> (Hüttensand, Flugasche, Füllstoffe wie Kalksteinmehl mit höherer TRL, Recyclingzement und Beton mit niedrigerer TRL)	Branchenebene	6-9
<b>Materialeffizienz und Abfallreduzierung im Bau</b>	Branchenebene	---
<b>Recycling-Innovationen</b> (z.B. intelligente Abfalltrennung)	Branchenebene Abfallwirtschaftssystem	---

## Kunststoff

Die Wertschöpfungskette des Kunststoffsektors ist im Allgemeinen linear und segmentiert, und sie ist von fossilen Rohstoffen abhängig. Der Prozess der Kunststoffherstellung, bei dem beginnt mit der Raffination von Rohöl. Die leichtsiedende Erdölfraktion Naphtha wird dabei in durch Destillation gewonnen, in petrochemischen Anlagen in Monomere aufgespalten, zu Polymeren synthetisiert und dann zu Kunststoffwaren verarbeitet. Die Kunststoffprodukte werden dann an Endverbraucher oder zur Weiterverarbeitung an Hersteller wie die Bau- oder Automobilindustrie geliefert, und werden nach der Nutzungsphase entsorgt (Agora Industry 2022).

Das Recycling von Kunststoffen ist derzeit eines der Hauptthemen der Kreislaufwirtschaft. Es wird darauf abgezielt, Kunststoffe zu recyceln, anstatt sie zu deponieren oder zu verbrennen.

Doch trotz der Bemühungen des Gesetzgebers, eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe zu fördern, ist die Leistung beim Recycling von Kunststoffen immer noch gering.

In Österreich wurden 2019 rund 980 kt Kunststoffe recycelt, davon wurden aber nur rund 27 % werkstofflich durch mechanisches Recycling verwertet, der Rest jedoch überwiegend in Verbrennungsanlagen (z.B. der Zementindustrie) eingesetzt (rund 73 %) oder auf Deponien abgelagert (BMK 2022).

Die größte Herausforderung für das Kunststoffrecycling ist heute die Schwäche der Kunststoffabfallsammlung. Die derzeitige Abfallbewirtschaftung kann keinen zuverlässig sortenreinen Abfallstrom liefern, der im herkömmlichen mechanischen Recycling verwertet werden kann. Die deutliche Verbesserung der getrennten Sammlung verschiedener Kunststoffarten und die Verbesserung der Sortierung von Kunststoffen am Ende ihres Lebenszyklus sind die wichtigsten Schritte für das Kunststoffrecycling, um die erforderliche Menge eines angemessenen Abfallstroms sicherzustellen.

Das werkstoffliche Recycling ist die energie- und kosteneffizienteste Recyclingtechnologie, erfordert aber relativ reine Abfallströme. Die Erhöhung der Kapazität des werkstofflichen Recyclings ist die oberste Priorität des Kunststoffrecyclings. Aufgrund der logistischen Herausforderungen bei der getrennten Sammlung und Sortierung und Einschränkungen bei einzelnen Kunststoffarten ist das werkstoffliche Recycling heute jedoch nicht für alle gemischten Abfallströme machbar (Agora Industry 2022).

Für gemischte Kunststoffabfallströme, die nicht mechanisch verarbeitet werden können, befindet sich das sog. chemische Recycling in Entwicklung. Beim chemischen Recycling werden polymere Abfälle durch Veränderung ihrer chemischen Struktur wieder zu kurzen Polymerketten oder Monomeren umgewandelt, die als Rohstoffe zur Herstellung von Kunststoffen oder anderen Produkten verwendet werden können (Material Economics 2018). Chemisches Recycling ist ein nützlicher Schritt zur Verringerung der zu entsorgenden Abfallmenge. Auch für das chemische Recycling ist aber eine gewisse Reinheit des Kunststoffstroms hilfreich.

Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Technologien für die Anwendung der Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffherstellung.

Tabelle 4: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie

Technologie	Anwendung	TRL
<b>Mechanische Recycling</b> Erhöhung des Anteils von 24% im Jahr 2019 auf 40 % im 2040	Branchenebene	9
<b>Chemisches Recycling</b> (verwendet chemische Prozesse, um die Polymere in Monomere zu zerlegen) Erhöhung des Anteils von 24% im Jahr 2019 auf 40 % im 2040	Branchenebene	6-8
Verbesserung der Kunststoffabfall-Sortieranlagen und Erhöhung der Kunststoffsammlquote	Abfallwirtschaftssystem	6-9

---

Vermeidung der Verwendung/Erzeugung von unnötigem und kurzlebigen Plastik und Förderung der Wiederverwendung von Plastikmaterialien	Allgemeiner Aspekt	---
---	--------------------	-----

---

## Papierindustrie

Die Papierherstellung besteht aus drei Hauptbereichen: Rohstoffaufbereitung, Zellstoffherstellung und Papierherstellung. Zellstoff ist das wesentliche Material für die Papierherstellung und kann aus Frischfasern (Holz) oder durch Wiederaufschluss von Recyclingpapier hergestellt werden (Bajpai 2016). Die Papierherstellung aus Recyclingfasern ist weniger energie- und CO<sub>2</sub>-intensiv als die Herstellung aus Rohholz durch mechanischen oder chemischen Aufschluss. Recyclingfasern spielen in der Papierindustrie eine wichtige Rolle als Ersatz für Frischzellstoff und sind Teil der gesamten Wertschöpfungskette für Holzfasern (Keränen und Retulainen 2016).

Die Faserproduktion, die Papierherstellung und das anschließende Recycling führen jedoch zu einer Beschädigung des Fasermaterials im Sinne von verkürzten Fasern. Diese können nicht für gewisse Papierqualitäten (Tissue, reißfeste Verpackungspapiere, grafische Papiere) verwendet werden (Keränen und Retulainen 2016). Daher können recycelte Fasern nicht als einziger Ausgangsstoff eingesetzt werden, und Rohholzfaser werden weiterhin für die Herstellung von hochwertigem Papier benötigt.

Derzeit werden rund 50 % der Rohstoffe der Papierindustrie in Österreich aus Altpapier gewonnen (Austropapier 2021). Obwohl die durchschnittliche Papierrecyclingquote hoch ist (ca. 70 %), schwankt die Verwertungsquote je nach gesammelter Papiersorte erheblich. Das liegt daran, dass ein beträchtlicher Anteil an nichtfaserigen Bestandteilen und Feuchtigkeit vorhanden ist und die Qualität der recycelten Papiersorten unterschiedlich ist.

Die österreichische Zellstoff- und Papierindustrie ist in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft in einer bereits sehr guten Position. Um die Papierproduktion durch Recycling zu steigern, müssen Technologien, die sich heute erst auf niedrigem TRL befinden, weiterentwickelt, sowie das Recyclingsystem gezielt verbessert werden.

Einer der offensichtlichen Nachteile von Altpapierzellstoff ist das unvollständige Deinking. Die im Zellstoff verbleibenden Druckfarbenpartikel haben einen erheblichen Einfluss auf den Weißgrad des Zellstoffs. Angestrebt wird eine Verbesserung des Altpapiersammelsystems durch strenge Klassifizierung von Altpapier mit unterschiedlichen Druckfarben sowie die Entwicklung und der Einsatz hocheffizienter neuer Deinking-Verfahren (z. B. Dampfexplosion, Ultraschall, Enzyme, magnetische Verfahren usw.). Diese Verfahren dienen zur Verringerung der Druckfarbenrückstände und der chemischen Vorbehandlung des Altpapierstoffs. (CNBM 2022; Lee et al. 2013)

Wie erwähnt schränken die, durch den Recyclingprozess entstehenden kurzen Faserlängen, die Verwendung von Altpapierzellstoff, insbesondere bei hochwertigen Papieren (Tissue, Druck usw.) ein. Viele Spezialpapiere stellen zudem höhere Anforderungen an die

Gleichmäßigkeit der Faserlänge. Derzeit werden einige neue Repulping-Technologien für Recyclingpapier erforscht, um die Eigenschaften von Recyclingfasern so zu verbessern, dass sie denen von Frischfasern entsprechen (Pulp & Paper Canada 2020).

Tabelle 5 zeigt die entsprechenden Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Zellstoff- und Papierindustrie.

Tabelle 5: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Papierindustrie

Technologie	Anwendung	TRL
<b>Neue Repulping-Technologie</b> (die die Fasern weniger beschädigt)	Branchenebene	3-5
<b>Neue Deinking Technologie</b>	Branchenebene	6-7
Verbesserung des Recyclingsystems	Abfallwirtschaftssystem	6-9

## Aluminiumindustrie

Die Herstellung von Aluminium (Al) ist der größte CO<sub>2</sub>-Emittent und Energieverbraucher im Sektor der Nichteisenmetalle (European Commission 2018). Aluminium ist ein wesentlicher Grundstoff für viele wichtige Anwendungen, wie z. B. Leichtbauanwendungen im Verkehrssektor, im Bauwesen, bei Verpackungen usw. Aufgrund seiner Leichtigkeit, Formbarkeit, Recyclingfähigkeit und Leitfähigkeit spielt Aluminium auch eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung kohlenstoffarmer und energieeffizienter Anwendungen in der modernen Gesellschaft (European Aluminium 2019).

Aluminium wird auf zwei Arten hergestellt: Primäraluminium aus Bauxiterz und Sekundäraluminium durch die Verwendung von Schrott (European Aluminium 2019). Wie in der Stahlindustrie unterscheiden sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Primär- und Sekundärproduktion erheblich. Während bei der herkömmlichen Primäraluminiumproduktion weltweit etwa 13-16 t CO<sub>2</sub> pro Tonne Aluminium spezifische Emissionen anfallen, sind es bei der Sekundäraluminiumproduktion nur 0,3-0,5 t CO<sub>2</sub> pro Tonne Aluminium, wobei zwischen der Verwendung von neuem/sauberem und altem/verunreinigtem Schrott unterschieden wird (Agora Industry 2022). Der neue/saubere Aluminiumschrott, der aus Pre-Consumer-Materialien gesammelt wird, benötigt weniger Energie und emittiert weniger CO<sub>2</sub> als der Altschrott aus Post-Consumer-Materialien, die mehr Verunreinigungen enthalten.

Die österreichische Aluminiumproduktion erfolgt bereits ausschließlich über die sekundäre Route (die primäre Route wurde bis 1992 schrittweise abgeschafft) (Umweltbundesamt GmbH 2021). In der Aluminiumproduktion werden ca. 75-80% an Altschrott und ca. 20% an importierten Neuschrott zur Herstellung des Werkstoffs verwendet (AMAG Austria Metall AG 2020). Was den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck betrifft, so ist der österreichische Nichteisenmetallsektor für fast 1,5 % der industriellen Emissionen verantwortlich, und Aluminium ist für etwa die Hälfte dieser sektoralen Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt GmbH 2021; Rahnama Mobarakeh und Kienberger 2022).

Eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft und die Materialeffizienz spielen die Sicherstellung einer hohen Sammelquote von Aluminium durch die Weiterentwicklung des Abfallsammel- und -sortiersystems sowie ein verbessertes Recycling, das sauberen Altschrott liefert und das Downcycling begrenzt.

### 3 Status Quo und Entwicklungen in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Das Aufkommen und die Zusammensetzung von Abfällen sowie die rechtlichen Vorgaben zu deren Behandlung und Verwertung unterliegen einem stetigen Wandel. Daher ist die Abfall- und Kreislaufwirtschaft eine sich laufend weiterentwickelnde Branche, wenngleich die Aufbereitungstechnologien für unterschiedliche Abfallarten oftmals ähnlich sind.

#### 3.1 Allgemein angewandte Verfahren und Technologien der Abfallwirtschaft

Die Abfallwirtschaft bedient sich in der Aufbereitung von Abfällen einer ähnlichen Herangehensweise, wie in der Primärrohstoffherzeugung. Die meisten Abfälle werden nach der Sammlung mechanisch aufbereitet. Diese Aufbereitung kann je nach Ausgangsmaterial sehr unterschiedlich ausgestaltet sein, basiert jedoch meist auf den gleichen Grundverfahren. Sehr vereinfacht dargestellt sind dies die Zerkleinerung, die Trennung nach Korngrößen, das Abscheiden von Metallen, die Trennung nach unterscheidenden Eigenschaften (z.B. Dichte, Kornform - 2D/3D, etc.) sowie eine weitere Sortierung wie z.B. eine Sensorsortierung (vgl. Abbildung 5).

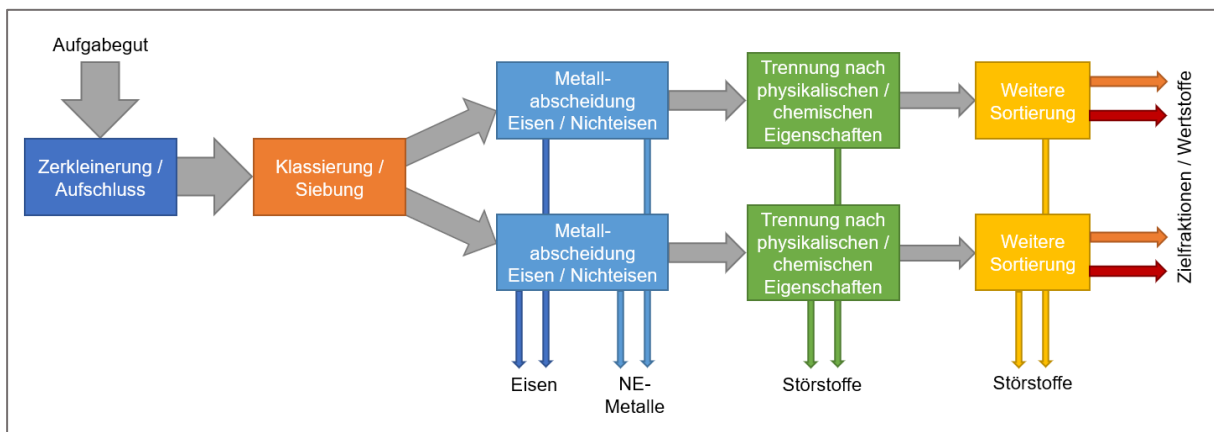


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines allgemeinen Verfahrensflusses der Abfallaufbereitung am Beispiel einer Negativsortierung (Abtrennung von Störstoffen)

Die konkrete Ausgestaltung der Aggregate ist immer abhängig von der Beschaffenheit des Aufgabegutes und des gewünschten Outputs. Nachfolgend sind für die wichtigsten Verfahren sowie exemplarisch einige Aggregate, die breite Anwendung finden, dargestellt.

#### Zerkleinerung / Aufschluss

Für die Zerkleinerung von Abfallströmen bzw. den Aufschluss von Werkstoffverbunden kommen scherende, schneidende schlagende, reibende oder prallende Belastungen zum Einsatz. Vielfach verwendete Aggregate sind u.a.:

- Backenbrecher,
- Prallbrecher,

- Hammermühle,
- Ein- oder Zweiwellenzerkleinerer (Shredder),
- Scheren und Stantzen sowie
- Sackaufreißer.

Je selektiver eine Zerkleinerung bzw. Aufschluss durchgeführt wird, umso sortenreiner können Wertstoffe gewonnen werden. Im Gegensatz dazu steht jedoch, dass größere Körnungen i.a. besser sortiert werden können.

### **Klassierung / Siebung**

Verschiedene Wert- bzw. Störstoffe reichern sich oft in unterschiedlichen Korngrößen an, daher werden Abfälle nach der Zerkleinerung oftmals gesiebt. Nachgeschaltete Trennaggregate erzielen außerdem die besten Trennergebnisse bei möglichst gleicher Korngröße, weshalb ebenfalls eine Siebung durchgeführt wird und die weitere Aufbereitung getrennt nach Kornklassen durchgeführt wird. Abhängig von den Materialeigenschaften haben verschiedene Siebe unterschiedliche Vorzüge bzw. Nachteile. Zumeist erfolgt eine trockene Siebung, für feine Partikel kommen auch nasse Siebverfahren zum Einsatz. Typische Aggregate sind Trommelsieb, Linear- oder Kreisschwingsieb sowie Sternsieb.

### **Metallabscheidung**

Die meisten Abfälle bestehen nicht aus reinen Wertstoffen, sondern sind Materialverbunde oder weisen Verunreinigungen auf. In vielen von ihnen finden sich Metalle in unterschiedlich hohem Ausmaß. Die Abtrennung dieser Metalle steht oftmals am Beginn der Aufbereitung, da es sich um sehr selektive Abscheidungsprozesse handelt. Magnetscheider trennen ferromagnetischen Metalle (i.W. Eisen und Stahl) durch die magnetische Anziehungskraft vom verbleibenden Stoffstrom.

Durch eine nachgeschaltete Wirbelstromscheidung werden Nichteisenmetalle (insbesondere Kupfer und Aluminium) abgetrennt. Durch ein wechselndes Magnetfeld wird eine Spannung in den Metallteilchen induziert, welche ein entgegengerichtetes Magnetfeld erzeugt, welches zu einer Abstoßung der Teile führt. Die Trennwirkung basiert daher auf der Magnetisierbarkeit der Teilchen, welche abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der Kornform ist. Große, körperreiche Teile werden daher besser abgetrennt als flache oder längliche Teile.

### **Trennung nach physikalischen / chemischen Eigenschaften**

Neben magnetischen bzw. elektrischen Eigenschaften wie sie in der Metallabscheidung herangezogen werden, gibt es weitere physikalische und chemische Eigenschaften, die als Trennkriterium herangezogen werden. Dazu zählen die Dichte, die Kornform bzw. die Korngröße, die Oberflächenbenetzbarkeit, Siedepunkt, Löslichkeit und andere Eigenschaften.

Zur Trennung nach Dichte wird u.a. die Schwimm-Sink Trennung in flüssigen Medien eingesetzt (z.B. zur Trennung verschiedener Kunststoffe oder verschiedener Buntmetallfraktionen). Die Sedimentation und das Zentrifugieren von Suspensionen und Emulsionen

basiert ebenso auf Dichteunterschieden. Windsichter trennen nach Dichte sowie nach Kornform (Austragung von flächigen Teilen) und auch die Korngröße hat einen Einfluss auf die Trennqualität. Die Kornform (i.W. Trennung 2D/3D-Material) wird im Ballistischen Separator ausgenutzt. Bei der Flotation wird die Oberflächenbenetzbarkeit als Trennmerkmal genutzt. Siedepunkt, Löslichkeit und andere chemische Eigenschaften werden vor allem in der chemisch-physikalischen Aufbereitung von Abfällen, insbesondere für gefährliche Abfälle, eingesetzt.

Zur Trennung nach spezifischen Eigenschaften gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Aggregaten und eine große Möglichkeit an Kombinationen zum Einsatz dieser Trennaggregate. Damit können Anlagen auf die spezifischen Herausforderungen von unterschiedlichen Abfällen gut angepasst werden. Daher wird auf die konkrete Ausgestaltung der mechanischen Aufbereitung einzelner Abfälle, die bereits Stand der Technik sind, nicht im Detail eingegangen. Im Buch „Recyclingtechnik“ von Martens und Goldmann (2016) wird auf den Stand der Technik und die Ausgestaltung von diversen Anlagen für verschiedene Abfälle konkret eingegangen.

### **Weitere Sortierung**

Je nach Ausgestaltung der vorhergehenden Prozesse und des Inputmaterials kann die Trennung nach physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften ausreichend sein, oder es müssen weitere Sortierstufen eingesetzt werden. Eine bisher nicht genannte Sortiermöglichkeit stellt die händische Sortierung dar. Diese kommt nach wie vor für verschiedene Anwendungen zum Einsatz, wird jedoch zunehmend von anderen Sortieraggregaten wie der sensorgestützten Sortierung in unterschiedlicher Ausführung abgelöst. Weitere Sortierung basiert i.d.R. auf Einzelteilbasis und wird für die Herstellung qualitativ hochwertiger, sortenreiner Wertstoffe eingesetzt.

### **Sensorgestützte Sortierung**

Die sensorgestützte Sortierung (SGS) ist ein berührungsloses Verfahren zur Sortierung und Analyse von Abfallströmen und Schüttgütern. Neben der Sortierung können Sensoren auch für eine online Stoffstromüberwachung und Charakterisierung eingesetzt werden. Die Sortierung basiert auf der Analyse von Einzelteilen und benötigt damit eine Mindestkorngröße der Einzelteile (i.d.R. > 1 - 2 mm) bzw. einen gewissen Korngrößenbereich. Diese kann je nach Analyseverfahren und Austragungsmechanismus variieren. Als Austragemechanismus werden vorwiegend einzeln angesteuerte Druckluftdüsen verwendet. Es finden aber auch andere Systeme, wie beispielsweise Roboterarme Anwendung. Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau einer SGS-Anlage.



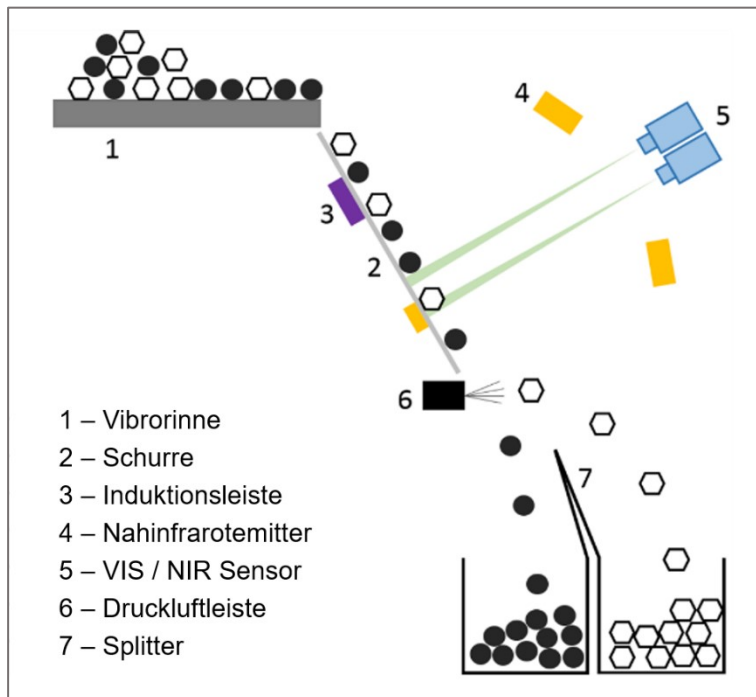


Abbildung 6: Funktionsschema einer sensorgestützten Sortierung, Bildquelle: (AVAW 2022)

Als Sensoren werden in diesem Beispiel eine Induktionsspule zur Erkennung von metallischen Teilen, ein VIS-Sensor zur Farberkennung und ein Nahinfrarot-Sensor (NIR) zur Materialcharakterisierung durch reflektierte und transmittierte Strahlung, die je nach Molekülgruppe (z.B. verschiedene Monomere in Kunststoffen) unterschiedlich ist.

Neben den beschriebenen Sensoren, finden weitere Analysemethoden z.B. im Bereich der Metallsortierung Anwendung. Dazu zählen u.a. die Röntgenfluoreszenzanalyse (energiedispersive – EDXRF und wellenlängendispersive – WDXRF), die Röntgentransmissionsanalyse (XRT) welche auch in Kombination mit Computertomographie (CT) eingesetzt wird, die hyperspektrale Bildgebung (HSI) sowie die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS). Die Analysemethoden haben unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf die Detektierbarkeit einzelner Elemente, die Eindringtiefe, der Genauigkeit, den möglichen Durchsatz sowie den Kostenaufwand. Der Einsatz von Sensoren in Abhängigkeit von deren Vor- und Nachteile ist auf den Zweck der Analyse sowie das Inputmaterial abzustimmen. Auf die Anwendung ausgewählter Sensoren zur Metallsortierung wird in Kapitel 4.1 näher eingegangen.

### 3.2 Systemische Entwicklungen in der Abfallwirtschaft

Neben den technischen Entwicklungen bei Aufbereitungsaggregaten und Sensorik gibt es laufende systemische Entwicklungen in der Abfallwirtschaft. Diese sind einerseits von Rechtsnormen und andererseits von ökologischen sowie ökonomischen Ansätzen getrieben. Auf einzelne Entwicklungen wird nachfolgend näher eingegangen.

## **Industriennahe Recyclingloops**

Abfälle gewinnen im Sinne einer zirkulären Wirtschaft immer mehr an rohstofflicher Bedeutung. Bei Altstoffen wie Papier oder Glas wird seit Jahrzehnten ein stoffliches Recycling durchgeführt. Die Sammlung und Sortierung dieser Abfälle wird durch die Abfallwirtschaft betrieben. Die Hersteller von Produkten werden immer stärker in die Pflicht genommen, für die Behandlung der Abfälle aus ihren Produkten Sorge zu tragen und zumindest finanziell mittels Lizenzierung eines Sammel- und Verwertungssystemen für die Behandlung aufzukommen.

Für sehr spezifische Abfälle existieren keine derartigen Sammel- und Verwertungssysteme. Oftmals gibt es nur wenige Hersteller spezifischer Produkte und diese Hersteller sind an der Rückführung ihrer EoL-Produkte interessiert, um daraus neue Produkte herzustellen. Die Rücknahme von industriellen Abfällen (z.B. Feuerfestausmauerungen) vom Hersteller und die herstellereigene Verwertung dieses Materials wird als industriennahe Recyclingloop bezeichnet. Ebenso können Abfälle oder Nebenprodukte eines anderen Ursprungs industriell verwertet werden, ohne dass die Abfallwirtschaft unmittelbar betroffen ist. Ein Beispiel dafür wäre der Einsatz von Schlacken aus der Metallindustrie als Rohstoff der Baustoffindustrie.

Aufgrund einer sehr restriktiven Abfallgesetzgebung in Österreich ist der unmittelbare Einsatz von Abfällen als Rohstoffe nicht immer möglich. Industriebetriebe sind mitunter nicht berechtigt Abfälle zu übernehmen und zu verwerten. Dies steht einer Ausweitung von industriennahen Recyclingloops entgegen. Ziel sollte es daher sein, entsprechende Rahmenbedingungen zu schaffen, die es ermöglichen Sekundärrohstoffe in möglichst engen Kreisen zu führen und dennoch einen bestmöglichen Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten.

## **Pfandsysteme**

Das Einheben eines Pfandes wird in der Gesellschaft oftmals lediglich mit Mehrwegverpackungen assoziiert. Es gibt jedoch auch andere Bereiche in denen bereits Pfandsysteme etabliert sind, die mitunter nicht unbedingt auf die Wiederverwendung der Produkte, sondern auf eine sortenreine getrennte Sammlung abzielen. Ein Beispiel dafür ist das Pfand auf ÖlfILTER aus Kraftfahrzeugen, welches darauf abzielt, dass diese nicht über die Rest- bzw. Gewerbemüllsammlung entsorgt, sondern einer getrennten Sammlung durch die Händler zugeführt werden.

Pfandsysteme werden sich daher nicht nur bei Lebensmittelverpackungen (insbesondere bei Mehrwegverpackungen) weiter ausbreiten, sondern bieten gerade für problematische Abfälle eine Möglichkeit der sortenreinen getrennten Sammlung. Denkbar ist auch, dass Hersteller auf ihre Produkte bzw. Produktteile ein Pfand einheben, um diese wieder als Rohstoffe zurück zu bekommen. Ein mögliches Beispiel dafür wäre das Einheben eines Pfandes auf LIB-Batterien in Elektrofahrzeugen. Ähnliche Systeme werden teilweise im Handel von Elektrogeräten betrieben, bei denen ein Rabatt für Neuware erteilt wird, wenn alte Geräte zurückgegeben werden. Dies erscheint jedoch eher als eine Marketingstrategie, anstatt das Ziel einer möglichst hochwertigen Verwertung bzw. einer Wiederverwendung zu verfolgen.

## **Flexibilisierung von Anlagen**

Wie im vorhergehenden Kapitel 3.1 bereits angeschnitten wurde, ist die Anordnung und Auswahl von Aggregaten sehr spezifisch auf das Inputmaterial abzustimmen. Um sich auf einem vergleichsweise kleinen bzw. dezentralen Markt wie in Österreich einen wirtschaftlichen Vorteil zu verschaffen, werden Anlagen teilweise zur Aufbereitung und Sortierung verschiedener Abfallströme eingesetzt. Einzelne Aufbereitungsstufen sind daher mitunter flexibel ansteuerbar und können teilweise zu- bzw. weggeschaltet werden. Ebenso ist es möglich, einzelne Sortierstufen im Batchbetrieb für verschiedene Materialien zu verwenden. Große zentrale Anlagen werden jedoch auf einzelne Fraktionen spezifisch angepasst, da dies i.d.R. die besten Trennergebnisse erzielt.

Mobile Anlagen bieten ebenfalls eine große Flexibilität. Diese werden z.B. in der Bauwirtschaft bei größeren Abbruchprojekten eingesetzt, um direkt an der Baustelle Recyclingbaustoffe herstellen zu können. Problematisch ist dabei, dass mobile Anlagen auf einem Standort maximal für sechs Monate als mobile Anlage betrieben werden dürfen, da sie ansonsten als stationäre Anlage gelten (§2 Abs. (7) Z. 2 AWG) und entsprechend genehmigt werden müssen. Für den Betrieb einer ortsfesten Behandlungsanlage sind jedoch weitreichendere Genehmigungen erforderlich. Zweckdienlich wäre die Einführung einer temporären Behandlungsanlage, welche eine mobile Anlage darstellt, die länger als 6 Monate ortsgewandt verwendet wird mit einer Genehmigung auf den beantragten Zeitraum. Die Überschreitung von 6 Monaten ist beispielsweise bei größeren Bauprojekten bzw. Tunnelbauprojekten quasi immer gegeben.

## **Datenbasierte Behandlung und Sortierung**

Die bereits beschriebene SGS ist ein Beispiel für eine datenbasierte Sortierung. Die online Messung von Stoffdaten auf Einzelteilbasis und die Anwendung in der Aufbereitung gewinnt stetig an Bedeutung. Neben der SGS werden sensorbasierte Roboter vermehrt zur Nachsortierung von Stoffströmen (ausschleusen von Fehlausträgen) u.a. mit Bilderkennung und KI-Systemen eingesetzt. Diese ersetzen zunehmend die händische Sortierung durch Arbeiter und Arbeiterinnen. Dies ist auch deshalb ein wesentlicher Faktor, da es zunehmend schwieriger wird, Personal für derartige Sortiertätigkeiten zu finden.

Durch eine online Stoffstromüberwachung mit entsprechender Sensorik, kann auf wechselnde Zusammensetzungen des Inputmaterials sofort reagiert und Parameter von Aggregaten entsprechend angepasst werden. Durch die softwarebasierte Datenverarbeitung und den Einsatz von KI-Systemen können die Trennergebnisse in Reinheit und Ausbringung optimiert werden. Dies führt zu einer besseren Wertstoffausbeute bei einer hohen Produktqualität.

## **3.3 Betrachtung einzelner Stoffströme der Abfallwirtschaft**

Um eine Bewertung der Stoffstrompotenziale durchführen zu können, wurden die wesentlichen in Österreich anfallenden Abfallströme hinsichtlich ihres Aufkommens, derzeitiger Aufbereitungswege, Output an Sekundärmaterial, derzeitigen Recycling- und Verwertungswegen sowie zukünftig verfügbaren Technologien bzw. potenzieller neuer

Anwendungen untersucht. Als Datenbasis dienen für die Stoffmengen primär der BAWP sowie für die bestehenden und zukünftigen Verwertungstechnologien einschlägige Fachliteratur. Die folgenden Abfallströme wurden dabei näher betrachtet:

- Holzabfälle,
- Papier, Pappe, Karton (PPK),
- Metallabfälle und metallhaltige Abfälle,
- Mineralische Bau- und Abbruchabfälle,
- Metallurgische Schlacken, Krätzen und Stäube,
- Glasabfälle,
- Kunststoffabfälle,
- Textilabfälle,
- Tierische Nebenprodukte und Lebensmittelabfälle,
- Altfahrzeuge,
- Elektroaltgeräte (EAG),
- Aushubmaterialien,
- Tunnelausbruch,
- Verbrennungsrückstände,
- Feinfraktionen aus der Abfallbehandlung,
- Feuerfestmaterialien sowie
- Künstliche Mineralfasern (KMF).

Als derzeit noch kaum relevante Abfälle, deren Mengen zukünftig stark steigend prognostiziert werden, wurden weiters Elektrofahrzeuge und deren Batteriesysteme sowie Photovoltaik-Module (PV) einer näheren Betrachtung unterzogen.

Das Gesamtabfallaufkommen in Österreich wird für 2019 mit etwa 71,26 Mt angegeben wobei davon 68,44 Mt Primärabfälle sind und 2,82 Mt auf Sekundärabfälle (z.B. Rückstände aus der Verbrennung) entfallen. Ca. 59 % der angefallenen Abfälle sind Aushubmaterialien, weitere 16 % entfallen auf Bau- und Abbruchabfälle. In dieser Studie wurden Abfälle mit einer Gesamtmasse von 64,83 Mt betrachtet, darin sind 1,76 Mt Wertstoffe aus gemischten Abfällen sowie 1,54 Mt Sekundärabfälle inkludiert. Dies entspricht über 90 % der gesamten in Österreich aufgekommenen Abfälle. Ausgenommen aus der Betrachtung waren, wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, kommunale Abfälle (nicht jedoch Altstoffe), gefährliche Abfälle sowie medizinische Abfälle. Im Zuge der ersten Betrachtung wurde festgestellt, dass tierische Nebenprodukte sowie Lebensmittelabfälle für die industrielle Kreislaufwirtschaft keine Relevanz aufweisen, daher werden diese nicht weiter betrachtet.

### **3.4 Bewertung der Potenziale einzelner Abfallströme**

Da nicht alle Abfallströme das gleiche Potenzial für Treibhausgas (THG)-Einsparungen durch eine Kreislaufführung aufweisen, wurden diese danach bewertet. Dabei wurde das theoretische THG-Einsparungspotenzial bei 100 % Sekundärrohstoffeinsatz (gänzlich Substituieren von Primärrohstoffen) herangezogen. Dies ist mitunter ein rein theoretischer

Wert, da nicht für alle Stoffe eine gänzliche Substitution möglich ist, vereinfacht jedoch die Vergleichbarkeit der Abfälle untereinander. Als primäre Quelle wurde dafür eine Studie des Umweltbundesamtes Österreich (UBA AT) von Frischenberger et al. (2010) herangezogen. Bei Abfällen aus verschiedenen Materialien wurde das theoretische Potenzial der einzelnen Komponenten anteilig angesetzt. Sofern in der Literatur keine Daten dazu angegeben waren, wurde eine Abschätzung für den entsprechenden Stoff getroffen. Vorgeschaltete, notwendige Aufbereitungsverfahren sind in dieser Bewertung nicht berücksichtigt. Ziel dieser Bewertung ist das werkstoffliche Potenzial von Sekundärrohstoffen für weitere Betrachtungen abzuschätzen.

Als zweites Kriterium der Bewertung wurde die Kritizität der Rohstoffe herangezogen. Ausschlaggebende Faktoren sind dabei die regionale Verfügbarkeit bzw. die Importabhängigkeit der Rohstoffe oder der daraus hergestellten Güter. Dafür wurde eine Einteilung auf einer Skala von 1 - 4 nach folgendem Schema vorgenommen:

- 1) für überwiegend regional verfügbare Rohstoffe,
- 2) für Rohstoffe, die primär aus dem EWR importiert werden,
- 3) bei einer Importabhängigkeit überwiegend außerhalb der EU und Rohstoffe mit Preisen von > € 5.000 pro Tonne Rohstoff sowie
- 4) für Materialien mit signifikanten Anteilen an kritischen Rohstoffen nach der CRM Liste der EU (EU Science Hub 2020).

Als drittes Kriterium wird die verfügbare Menge (inkl. Nettoimporte / -exporte) aus dem BAWP (BMK 2022) herangezogen, da die Mengenrelevanz ein wesentlicher Faktor in der abfallwirtschaftlichen Betrachtung ist. Tabelle 6 stellt diese drei Bewertungskriterien für die betrachteten Abfallströme dar.

Tabelle 6: Menge, Rohstoffkritizität und theoretisches THG-Einsparungspotenzial für diverse Abfallströme

Stoffstrom	Menge [kt]	Rohstoff-kritizität	THG Potenzial
Stahl	2.300	2	86,5 %
Aluminium	438	2	97,0 %
Kupfer	101	3	85,0 %
andere NE-Metalle	125	3	80,0 %
Glas	388	1	56,0 %
PET	50	2	80,0 %
Kunststoffe allgemein (ohne PET)	865	2	65,0 %
Altpapier (PPK)	2.753	2	16,0 %
Altholz	1.462	2	0,0 %

Ersatzrohstoffe Zement*	776	1	60,0 %
Zumahlstoffe Zement*	1.560	1	80,0 %
Bau und Abbruchabfälle	8.620	1	0,0 %
Textil	223	3	62,5 %
Altfahrzeuge	55	2	78,3 %
EAG	133	3	69,2 %
Aushubmaterial / Tunnelausbruch	42.000	1	0,0 %
Feuerfest	51	1	65,0 %
KMF	6	1	30,0 %
LIB (Abschätzung für 2040)	140	4	65,0 %
PV-Module (Abschätzung für 2040)	15	3	61,0 %

\*derzeit eingesetzte Sekundärrohstoffmengen

In den Stoffströmen „Ersatzrohstoffe“ und „Zumahlstoffe“ für die Zementindustrie wurden verschiedene potenzielle Einsatzstoffe wie Verbrennungsrückstände sowie verschiedene mineralische Reststoffe zusammengefasst. Im Detail werden die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Stoffe im Kapitel 4.2 ausgeführt. Um aus den Tabellenwerten eine Aussagekräftige Bewertung vornehmen zu können, wurden diese in einer Vier-Quadranten-Matrix dargestellt (siehe Abbildung 7). Die Blasengröße spiegelt die Menge wider.

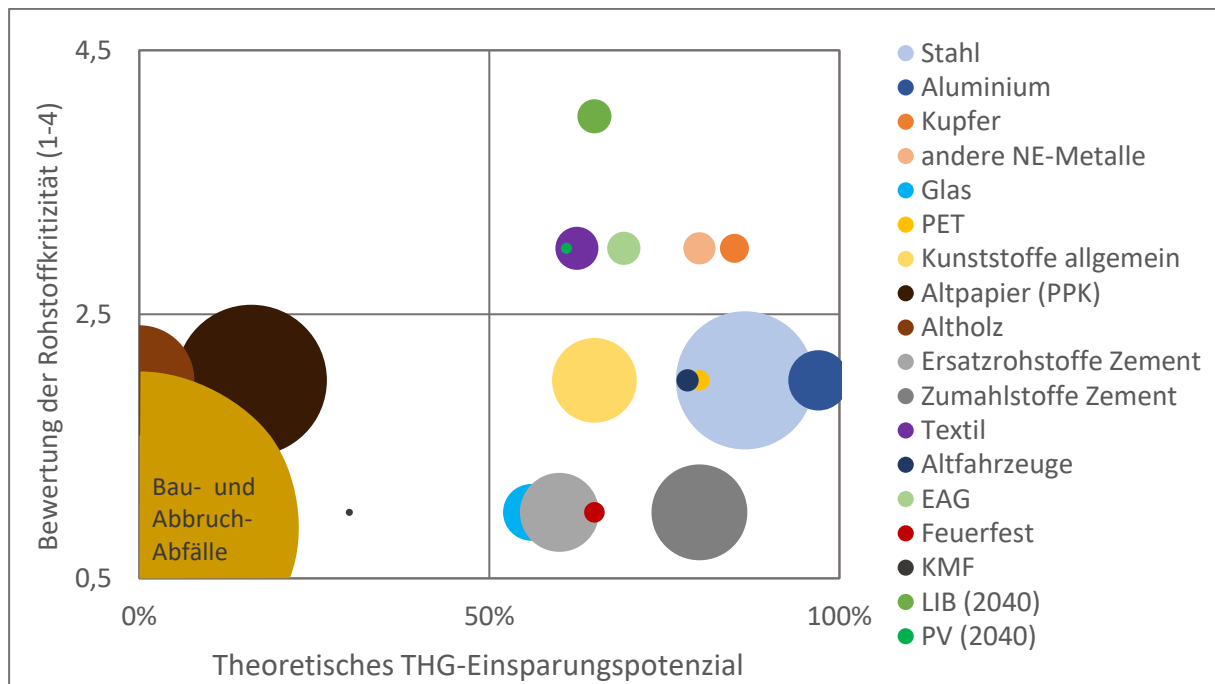


Abbildung 7: Bewertung diverser Abfallströme nach Rohstoffkritisizität und THG Einsparungspotenzial

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde darauf verzichtet die Aushubmaterialien in das Diagramm mitaufzunehmen, da diese aufgrund der großen Menge das Gesamtbild verzerren würden. Diese würden sich an der gleichen Position wie die Bau- und Abbruchabfälle befinden, jedoch wäre die Blase aufgrund der höheren Masse um einiges größer darzustellen.

Die Stoffe im Quadranten rechts unten weisen zumeist große Mengen und großes THG-Einsparungspotenzial auf und sind daher besonders relevant. Im rechten oberen Quadranten finden sich die Stoffe, die neben großen THG-Einsparungspotenzial zusätzlich aus rohstofflicher Sicht wesentliche Bedeutung haben, wenn auch die verfügbare Masse vieler Stoffe geringer ist. In diesem Quadranten finden sich auch die zukünftig relevanter werdenden Abfälle, die im Zusammenhang mit der Energiewende stehen (LIB und PV-Module). Diese Stoffströme sollten möglichst vollständig im Kreislauf geführt werden. Die Stoffe im linken unteren Quadranten haben aus der Perspektive von THG-Einsparungen nur geringe Relevanz. Aufgrund der großen Menge gilt es jedoch sinnvolle (lokal verfügbare) Verwertungswege zu finden.

In der bisherigen Bewertung sind derzeitige Verwertungswege und Recyclinganteile noch unberücksichtigt. Um das Potenzial zur Steigerung der Kreislaufführung einzelner Abfallströme fundiert beurteilen zu können, wurde für die wesentlichsten Stoffströme eine Gegenüberstellung des Aufkommens, der Mengenveränderung durch den Außenhandel sowie des Recyclings angefertigt. Diese sind in Abbildung 8 dargestellt.

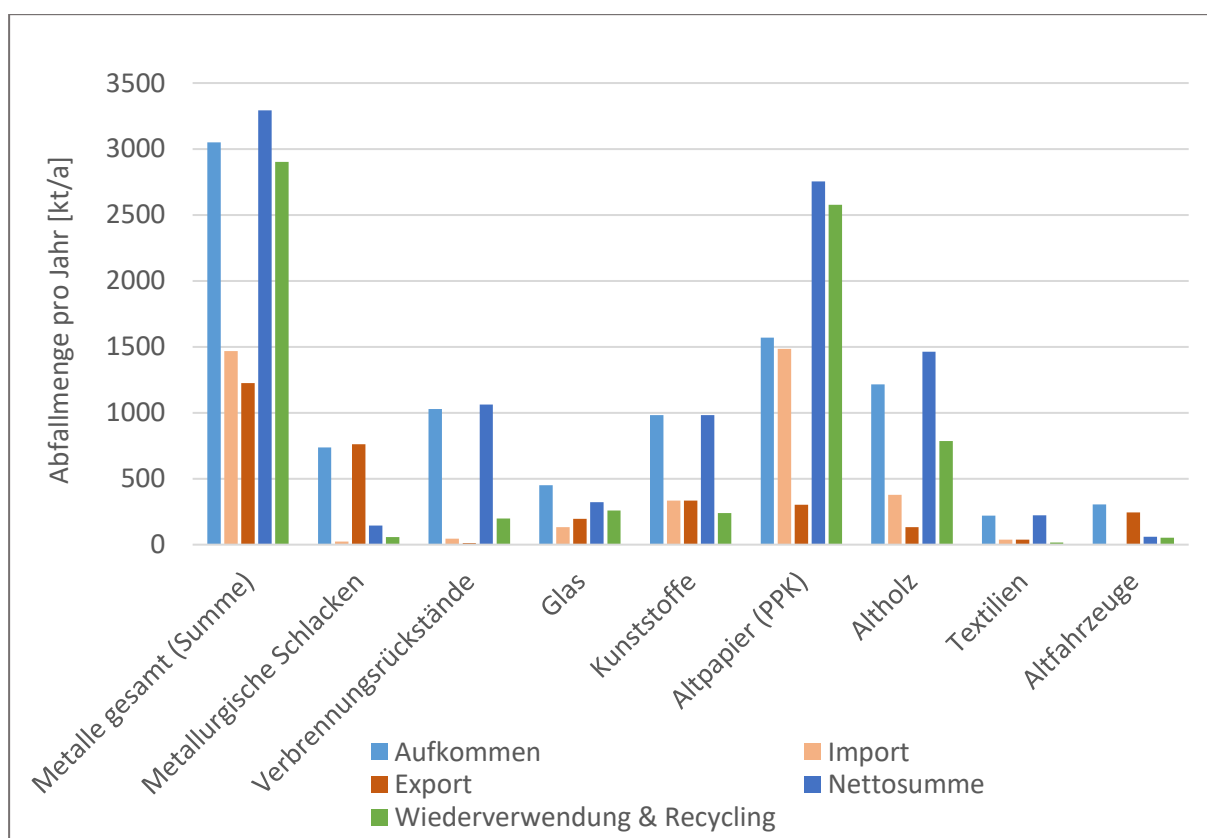


Abbildung 8: Aufkommen, Außenhandel und Recycling ausgewählter Abfälle 2019, Datenquelle: BAWP (BMK 2022)

Aus der Grafik ist deutlich ersichtlich, dass einzelne Abfallströme bereits sehr gute Recyclingquoten aufweisen. Dazu zählen vor allem Metalle, PPK sowie Glas. Bei Metallen, wie auch bei Altfahrzeugen, gibt es jedoch hohe Exportmengen. Altholz und Kunststoffe stehen in einem starken Wettbewerb zwischen stofflicher und thermischer Verwertung. Besonders bei Kunststoffen ist das Recycling auch aufgrund von vorgeschriebenen Recyclingquoten zu forcieren. Mineralische Reststoffe wie Schlacken und Verbrennungsrückstände werden derzeit nur in geringen Maß verwertet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden Bau- und Abbruchabfälle nicht in der Grafik angeführt. Diese weisen eine Recyclingquote von ca. 75 % aus.



## 4 Zukünftige Stoffstrompotenziale

Die Potenziale der einzelnen Abfallströme sind, wie aus der Bewertung hervorgeht, sehr unterschiedlich. Es wurden daher nur ausgewählte Stoffströme in die detaillierte Betrachtung mit aufgenommen. Metalle weisen zwar bereits jetzt eine hohe Recyclingquote auf, jedoch werden diese teilweise in Werkstoffen niedriger Qualität recycelt. Außerdem weisen die Altmetalle hohe Exportmengen auf, die reduziert werden sollten, da es sich bei Schrott um wertvolle Rohstoffquellen handelt. Verschiedene mineralische Reststoffe werden u.a. auf ihre Eignung zum Einsatz in der Zementindustrie näher untersucht. Im Bereich der Kunststoffe gibt es Aufholbedarf in der stofflichen Verwertung. Das Recycling von Alttextilien wird derzeit nur unzureichend durchgeführt, hat jedoch großes Potenzial, weshalb diese ebenso näher betrachtet werden. Von zukünftiger Relevanz sind Elektroaltfahrzeuge und deren Batteriesysteme sowie PV-Module, da für diese Abfälle exponentielle Mengensteigerungen erwartet werden. Bau- und Abbruchabfälle haben aus einer Emissionsperspektive keine große Relevanz, stellen jedoch große Abfallmengen dar, weshalb Verwertungsmöglichkeiten dafür näher betrachtet werden. Die Stoffstrompotenziale anderer Abfallströme werden aufgrund der geringen Menge, des geringen Impacts oder der bereits hohen Recyclingquote als niedrig bewertet und daher nicht im Detail betrachtet.

### 4.1 Altmetalle und metallhaltige Abfälle

Altmetalle werden bereits jetzt zu einem großen Teil recycelt. Probleme beim Metallrecycling stellen verschiedene Legierungselemente und Störstoffe dar, die dazu führen, dass Schrott vorwiegend für Erzeugnisse niedriger Qualität eingesetzt wird. Bei Eisen- und Stahlschrott ist vor allem Kupfer ein Störstoff, der im Schmelzprozess nicht abgetrennt werden kann. Gemischter Stahlschrott (Altschrott) wird daher vorwiegend im Elektrolichtbogenofen zu Baustahl recycelt, da dieser eine vergleichsweise hohe Toleranz für Kupfer als Legierungselement aufweist. Bei Aluminiumschrott zeigt sich ein ähnliches Bild. Hochwertige Knetlegierungen weisen je nach Anwendungsfall sehr spezifische Legierungselemente auf, niederwertigere Gusslegierungen hingegen sind ein Sammelbecken für verschiedene Legierungselemente, weshalb für diese vorwiegend gemischter Aluminiumschrott verwendet wird.

Lösungsansätze dafür, bietet die SGS. Dabei werden die Einzelteile aus gemischten Fraktionen, z.B. gemischte NE-Abfälle aus einem Wirbelstromabscheider, mittels Sensorik charakterisiert und sortiert. In den Untersuchungen von Raatz et al. (2022) wurden mehrere Analysemethoden zur Charakterisierung von Metalllegierungen miteinander verglichen, wobei sich die energiedispersive Röntgenfluoreszenz (EDXRF), die mittels eines tragbaren Handgerätes (pXRF) durchgeführt wurde, als vielversprechendste Analysemethode herausstellte. Für Aluminiumlegierungen zeigte sich mit der LIBS-Analyse für einzelne Legierungselemente (z.B. Silizium) eine genauere Charakterisierung, als durch die pXRF Methode. Die hyperspektrale Bildverarbeitung (HSI) verarbeitet die spektralen Messungen und sorgt dabei für noch bessere Sortierergebnisse. So können durch Multisensormessungen in Kombination mit HSI Störstoffe besser erkannt und ausgeschleust werden.

Für die Ausgestaltung von Sortieranlagen gibt es keine „one-fits-all“ Lösung. Die Auswahl und Anordnung verschiedener Trenn- und Sortieraggregate muss immer individuell auf das jeweilige Inputmaterial abgestimmt werden. Abbildung 9 stellt eine beispielhafte Prozesskette zur Sortierung von gemischten Aluminiumschrott dar.

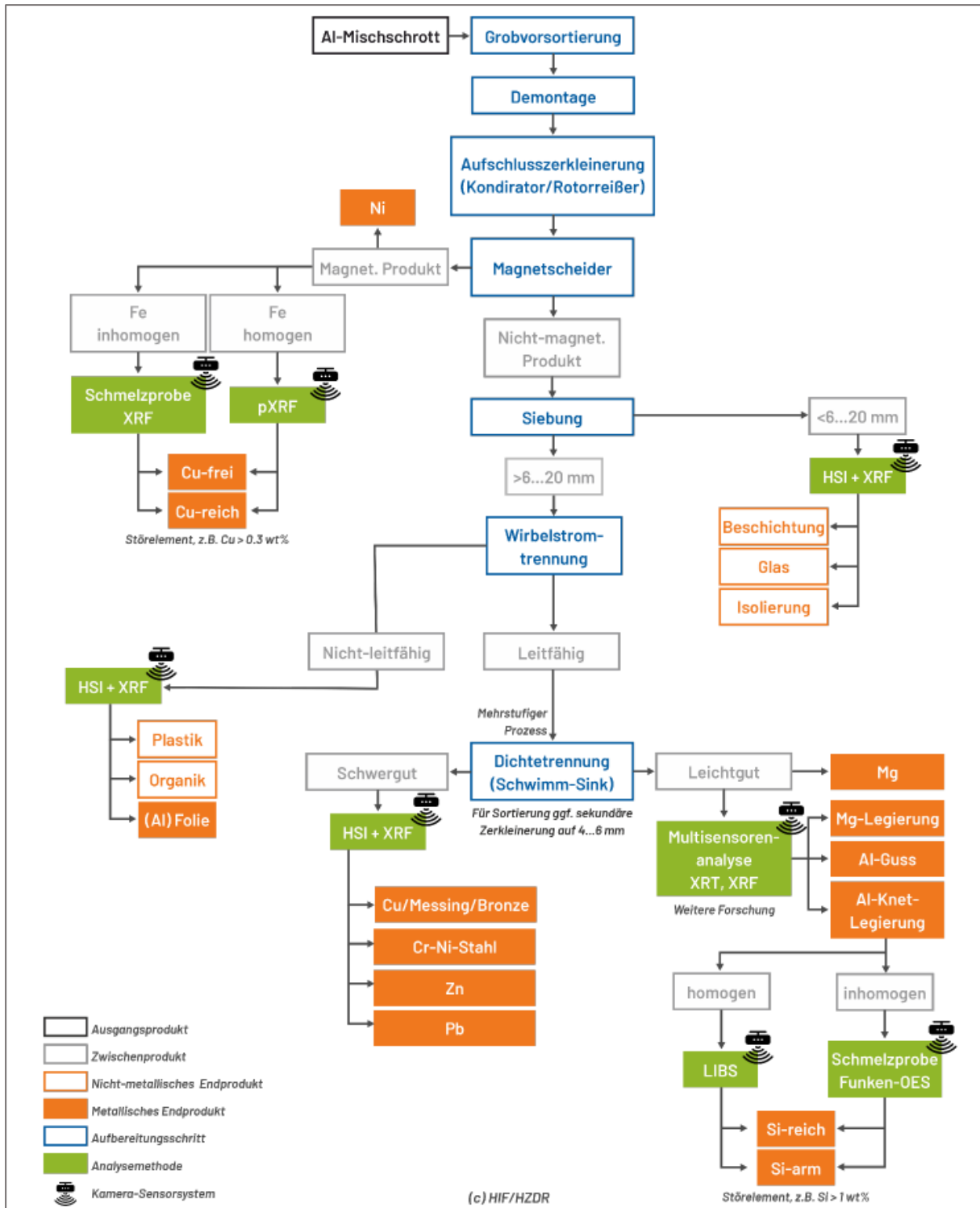


Abbildung 9: Beispiel einer idealtypischen Prozesskette für einen Aluminium-Mischschrott, Bildquelle: Ratz et al. (2022)

## Eisen und Stahl

Eisen- und Stahlschrott stellt den größten Anteil an Metallabfällen dar. Derzeit fallen in Österreich etwa 2.400 kt an Stahlschrott an. Es werden etwa 1.000 kt Schrott exportiert sowie 1.100 kt importiert. Die Importe sind vielfach Produktionsabfälle, die direkt vom Erzeuger bzw. über Zwischenhändler an die Verwerter gelangen (Neuschrott). Exportiert wird zumeist gemischter Schrott mit niedriger Qualität bzw. Verunreinigungen. Die Menge an Produzierten Stahl wird im Rahmen dieser Studie als konstant angenommen, wodurch sich die verfügbare Schrottmenge ähnlich verhalten wird. Der größte Hebel für eine höhere Verfügbarkeit von Schrott liegt daher im Außenhandel, konkret in der Verringerung der Exporte durch bessere Sortierung und damit einhergehenden Herstellung höherer Qualität an einsetzbaren Schrott. Da die Datenlage zur Zusammensetzung und der Herkunft von Metallabfällen lückenhaft ist, wurde dafür eine Abschätzung basierend auf den Daten des BAWP (BMK 2022) sowie einer Studie des deutschen UBA (Raatz et al. 2022) zu den Legierungsanteilen getroffen (siehe Abbildung 10).

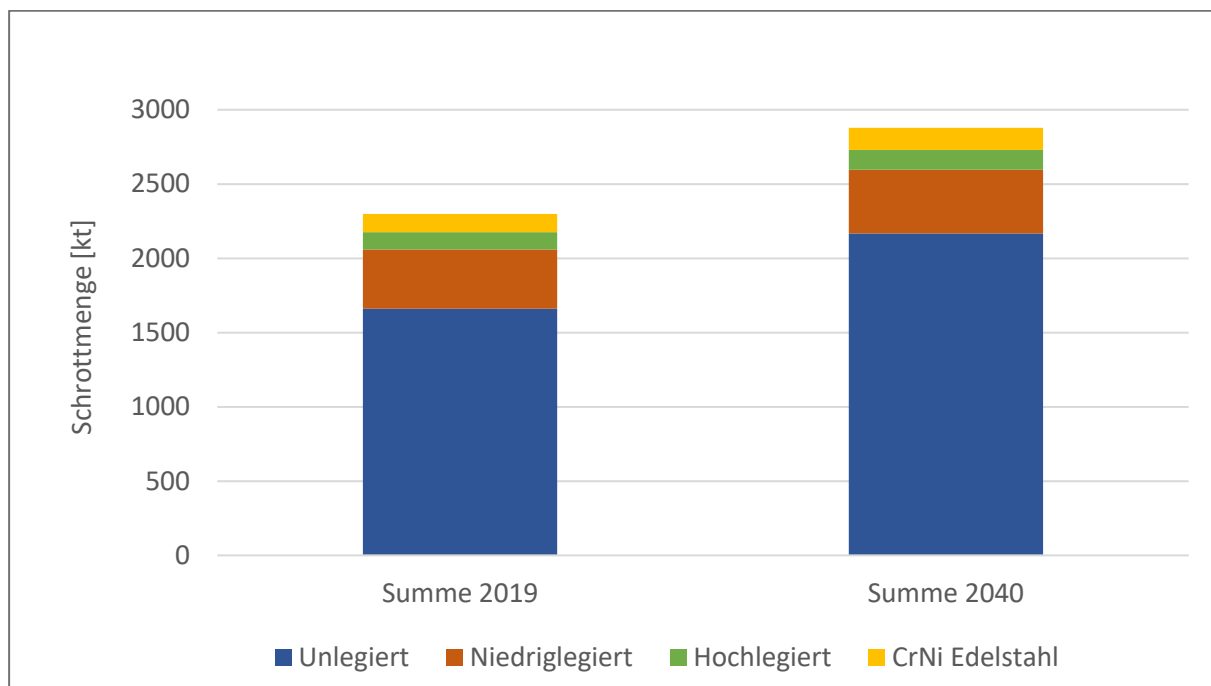


Abbildung 10: Abschätzung der verfügbaren Schrottmenge in Österreich nach Legierungen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf Daten von BMK (2022) und Raatz et al. (2022)

Welche Mengen an niedrig- und hochlegierten Stählen bereits jetzt getrennt gesammelt und hochwertig recycelt werden ist nicht bekannt. Abbildung 10 stellt daher lediglich das Potenzial an legierten Stählen dar. Durch eine verbesserte Sortierung steigt vorwiegend die Menge an unlegierten Stählen, da diese der Hauptbestandteil von gemischten Schrotten sind. Durch die Sortierung werden Störstoffe abgetrennt, wodurch die gemischten Abfälle besser recycelt werden können und die Exporte sinken. Abbildung 11 stellt die Auswirkung der Reduktion des Exportes auf das Angebot sowie die derzeitige und zukünftige Nachfrage an Stahlschrott dar.

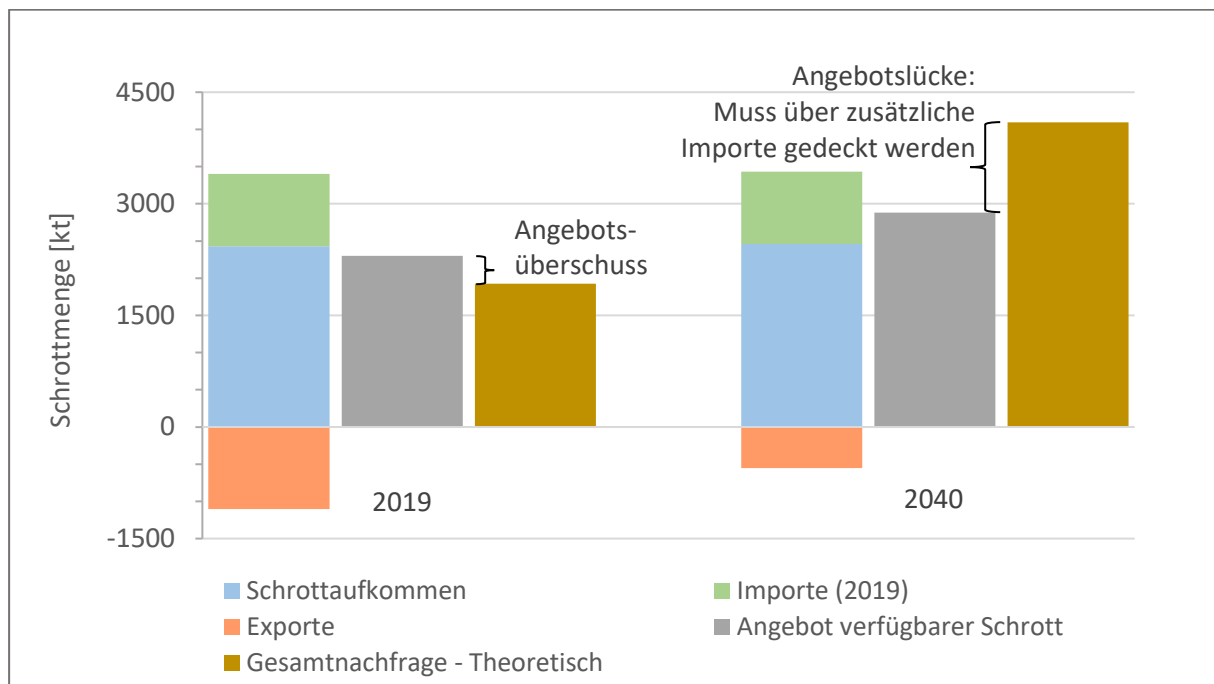


Abbildung 11: Verfügbare und Nachgefrage Schrottmengen inkl. Außenhandel

Derzeit kann das Angebot von Stahlschrott die Nachfrage in Österreich decken. Durch Veränderungen in der Stahlerzeugenden Industrie wird die Nachfrage nach Stahlschrott zukünftig in einem derartigen Ausmaß steigen, dass diese aus heutiger Sicht nicht gedeckt werden kann. Zusätzliche Importe sowie eine größtmögliche Verringerung der Exporte von Stahlschrott sowie EoL-Produkten aus Eisen und Stahl werden zur Erhöhung des Angebotes notwendig sein.

## Aluminium

Bei Aluminiumlegierungen unterscheidet man allgemein zwischen Knet- und Gusslegierungen. Knetlegierungen werden dabei basierend auf den Hauptlegierungselement in verschiedene Hauptgruppen unterteilt (Bezeichnung durch 4-stellige Nummer wovon die erste Zahl die Hauptgruppe angibt). Die Hauptgruppe 6 (Bezeichnung 6XXX) mit Magnesium-Silizium Legierungen ist die Wichtigste. Gusslegierungen weisen höhere Anteile mehrerer Legierungselemente auf, weshalb gemischte Aluminiumabfälle vorwiegend als Gusslegierung recycelt werden (Downcycling). Ein Recycling von Legierungsmischungen zu Knetlegierung ist nur durch eine starke Verdünnung mit Primäraluminium möglich. (Raatz et al. 2022)

Da die Datenlage zu Anteilen an Legierungen in Abfällen ähnlich lückenhaft, wie jene von Eisen und Stahl ist, wurde auch hierfür eine Abschätzung getroffen. Abbildung 12 zeigt das Aufkommen von Aluminiumschrott gegliedert nach Legierungen für sortenreine Abfälle (Neuschrott) sowie für gemischte Abfälle (Altschrott). Ebenso wird die daraus erzeugte Menge an sekundären Knet- sowie Gusslegierungen dargestellt. Die gemischten Aluminiumabfälle werden dabei zur Gänze den Gusslegierungen zugerechnet. Für die Berechnung der Daten von 2040 wurde angenommen, dass eine weitgehende Sortierung von gemischten Aluminiumschrotten auf Legierungsebene durchgeführt wird. Für das Gesamtaufkommen

wurde basierend auf den Abschätzungen von Raatz et al. (2022) ein Zuwachs um ca. 35 % angenommen.

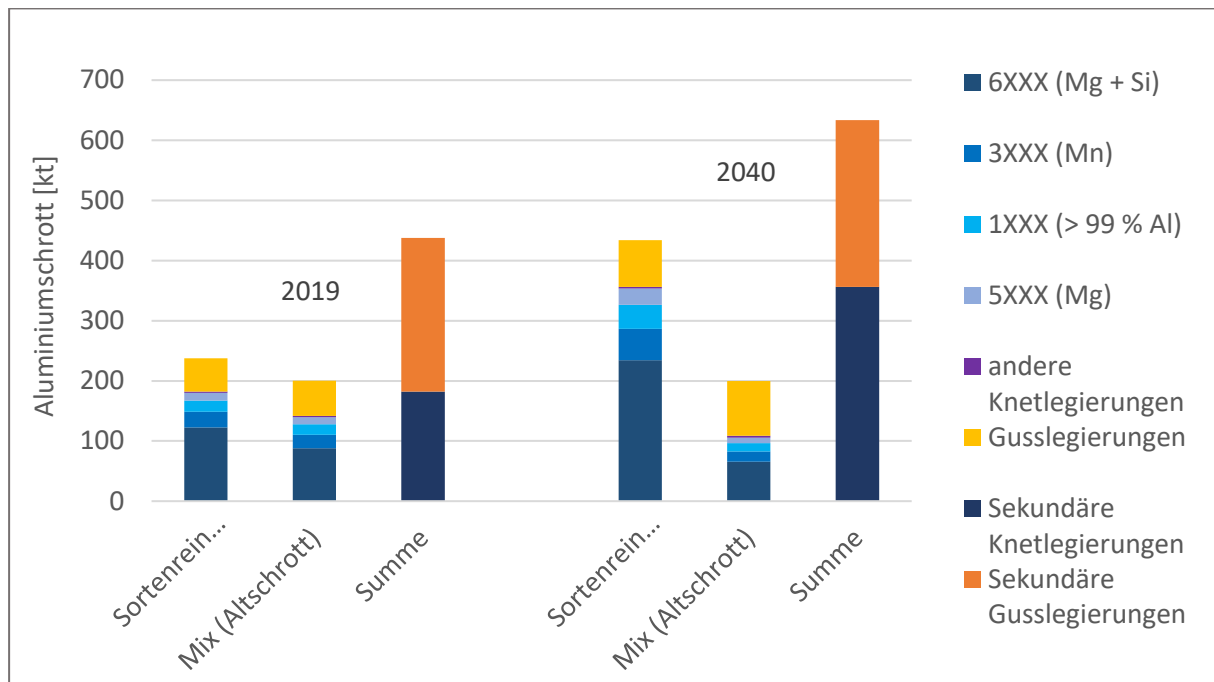


Abbildung 12: Abschätzung der verfügbaren Aluminium-Schrottmenge in Österreich nach Legierungen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf Daten von BMK (2022) und Raatz et al. (2022)

Durch die verbesserte Sortierung von Aluminiumschrotten erhöht sich die verfügbare Menge an sekundären Knetlegierungen für 2040 (im Vergleich zu 2019) um etwa 95 % während die sekundären Gusslegierungen lediglich um etwa 8 % steigen. Der Anteil an Knetlegierungen am gesamten Sekundäraufkommen steigt damit von ca. 42 % (2019) auf ca. 56 % (2040).

Gusslegierungen werden derzeit u.a. für die Produktion von Verbrennungsmotoren verwendet. Die Nachfrage nach diesen wird daher potenziell abnehmend bzw. weniger stark steigend sein, als jene nach Knetlegierungen. Die dargestellten Maßnahmen stellen daher neben dem höherwertigen Recycling auch eine Anpassung an die zukünftige Nachfrage dar.

### Kupfer und andere NE-Metalle

Die Kupferherstellung sowie die Herstellung anderer NE-Industriemetalle wird in Österreich nur über den Sekundärweg durchgeführt. Zum Einsatz kommen dabei Reststoffe mit verschiedenen hohen Metallgehalten. Diese werden in unterschiedlichen Prozessen zugegeben, was nachfolgend am Beispiel Kupfer verdeutlicht wird:

- kupferhaltige Stäube, Aschen, Krätzen, Schreddermaterialien, Schlämme und Rücklaufschlacken mit Kupfergehalten zwischen 15 und 60 % werden pyrometallurgisch unter Zugabe von Schlackenbildnern bei ca. 1.200°C eingeschmolzen. Dabei entsteht Schwarzkupfer mit einem Kupfergehalt von etwa 75 %.

- Legierungsschrotte wie Messing, Bronze und Rotguss mit Kupfergehalten zwischen 60 und 80 % werden gemeinsam mit Schwarzkupfer im Konverter weiterverarbeitet. Die Begleit- bzw. Legierungsmetalle wie Blei, Zinn und Zink werden dabei mit Sauerstoff oxidiert und als Mischoxid abgeschieden.
- Das Kupfer aus dem Konverter wird mit anderen Kupferschrott wie Drähte, Bleche, Profile (Stangen, Flachkupfer, Schienen, etc.) sowie gehäckselte und sortierte elektrische Leitungen im Anodenofen weiterverarbeitet und zu Anodenplatten gegossen und in der Kupferelektrolyse zu hochreinen Kupfer verarbeitet.
- Hochreine Rücklaufschrotte aus der Halbzeugfertigung können ohne Raffination direkt in der Gießerei gemeinsam mit Kupferanoden eingesetzt werden. (Montanwerke Brixlegg AG 2022b)

Die angeführten Rohstoffe enthalten neben Kupfer zahlreiche andere Metalle wie z.B. Nickel, Zink, Zinn und Edelmetalle. Diese werden in unterschiedlichen Prozessschritten abgetrennt und recycelt. Die unedlen Metalle werden in oxidischer Form abgeschieden wogegen sich Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin-Gruppenelemente im Anodenschlamm wiederfinden. (Montanwerke Brixlegg AG 2022a)

Durch eine Steigerung der Sortiertiefe lässt sich der Anteil an Kupfer, das pyrometallurgisch verarbeitet werden muss, im Vergleich zum Direkteinschmelzen im Konverter bzw. im Anodenofen reduzieren. Nach den Berechnungen von Raatz et al. (2022) könnte dadurch der Anteil der Direkteinschmelzung in Deutschland von derzeit ca. 56 % auf etwa 68 % und in Europa von etwa. 46 % auf 61 % ansteigen. Dies würde zu einer Verringerung des Carbon Footprint von Kupfer um ca. 28 % führen. Für Österreich gibt es dazu keine fundierte Datenlage, jedoch ist ein Vergleich mit Deutschland aufgrund des ähnlichen Technologiestandes naheliegend.

## 4.2 Sekundäre Einsatzstoffe in der Zementindustrie

In der Zementindustrie werden bereits jetzt viele verschiedene sekundäre Einsatzstoffe verwendet. Diese unterteilen sich in Sekundärrohstoffe, Ersatzbrennstoff und sekundäre Zuschlagstoffe. Sekundärrohstoffe substituieren primäre Rohstoffe (Kalkstein, Mergel, Ton, etc.) im Rohmehl für die Klinkerherstellung. Ersatzbrennstoffe (z.B. aus Kunststoffabfällen) werden als Energieträger eingesetzt und substituieren fossile Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas. Sekundäre Zuschlagstoffe dienen als Klinkerersatz im Zement, da sie ebenfalls hydraulische Eigenschaften aufweisen (z.B. Hüttensand).

Die Menge an sekundären Einsatzstoffen ist in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten stetig gestiegen, wie Abbildung 13 verdeutlicht.

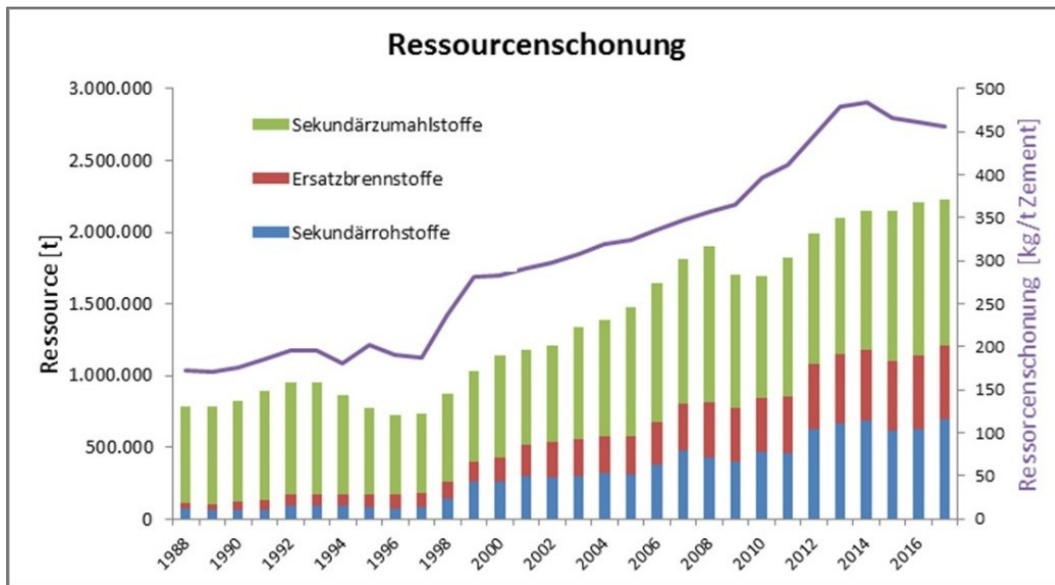


Abbildung 13: Entwicklung des Einsatzes alternativer Rohstoffe in der Zementindustrie, Bildquelle: VÖZ (2022b)

### Ersatzbrennstoffe

Der Einsatz von EBS in der Zementindustrie geht in Österreich auf die 1980er Jahre zurück. Bereits in den 1990er Jahren wurden auch Kunststoffabfälle als Ersatzbrennstoffe eingesetzt, welche seit der Jahrtausendwende stetig an Bedeutung gewonnen haben.

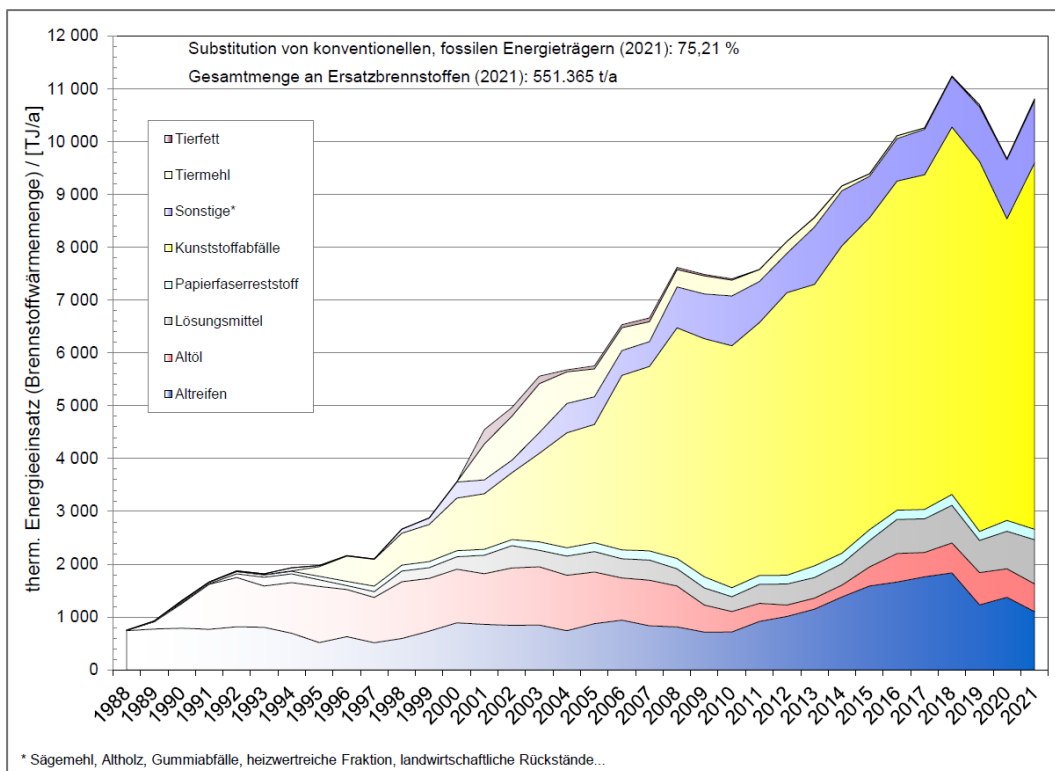


Abbildung 14: Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie seit 1988 (Mauschitz 2022)

Die bisher höchste Einsatzrate von EBS wurde in Österreich 2018 mit 81,2 % erreicht. Derzeit (2021) liegt diese etwa bei 75,2 %, wobei EBS aus Kunststoffabfällen etwa zwei Drittel des gesamten Energieinhalts ausmachen. Der EU-28 Durchschnitt lag 2018 bei etwa 46 %. (VÖZ 2022a)

Der Anteil an EBS gemessen am gesamten thermischen Energiebedarf ist i.W. stetig gestiegen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend fortsetzt, da die Branche großes Interesse am Einsatz alternativer Energieträger hat. Problematisch kann aus Sicht der Zementindustrie die steigende Konkurrenz zwischen stofflicher und thermischer Verwertung von Kunststoffen werden, auf die in Kapitel 4.3 näher eingegangen wird. Auf die mögliche zukünftige Zusammensetzung von Brennstoffen in der Zementindustrie und deren Auswirkung auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in Kapitel 5.2 eingegangen.

### Sekundärrohstoffe

Die Hauptbestandteile von Zement sind Calciumoxid (CaO), Siliziumoxid (SiO<sub>2</sub>), sowie in geringeren Mengen Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Eisenoxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Als Primärrohstoffe kommen daher Kalkstein oder Kreide sowie Ton bzw. Mergel zum Einsatz. Je nach gegebener örtlicher Rohstoffsituation müssen am jeweiligen Standort Korrekturstoffe zugegeben werden um eine geeignete Rohmaterialmischung zu erhalten. Ein Teil des Rohmaterials kann dabei aus alternativen Rohstoffen bereitgestellt werden. Beim Einsatz von bereits entsäuerten calciumhaltigen Rohstoffen reduzieren sich die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. (Hoenig et al. 2015)

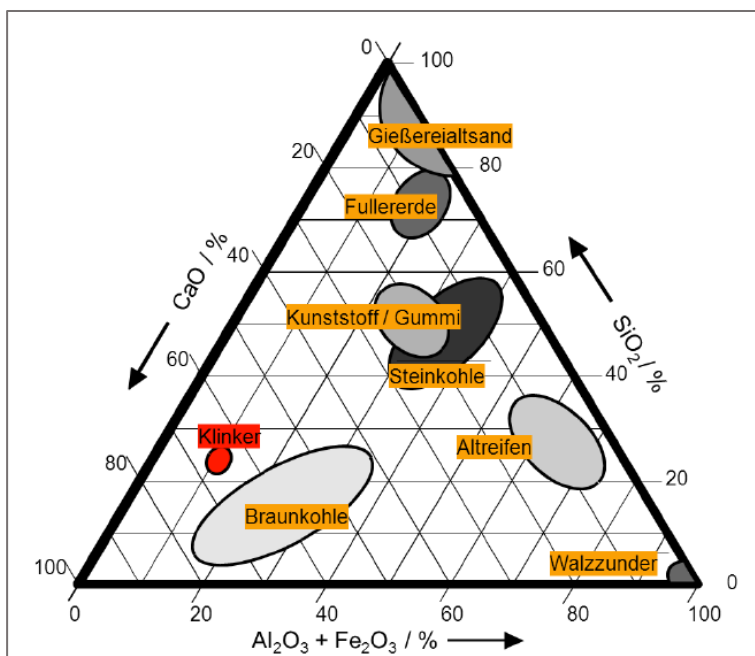


Abbildung 15: Dreistoffdiagramm zur chemischen Zusammensetzung von Klinker, Verbrennungsaschen und alternativer Rohstoffe, Bildquelle: Hoenig et al. (2015)

In Österreich werden derzeit etwa 14 % der Rohmehlmischung durch den Einsatz von sekundären Rohstoffen gedeckt. Dazu zählen u.a. Materialien aus dem Baustoffrecycling (z.B.



Betonbrechsande und Ziegelsplitt) aber auch industrielle Nebenprodukte (z.B. Gießereisande, Schlacken und Walzzunder). Gesamt summiert sich dies auf eine Sekundärrohstoffmenge von ca. 752 kt. (Mauschitz 2022)

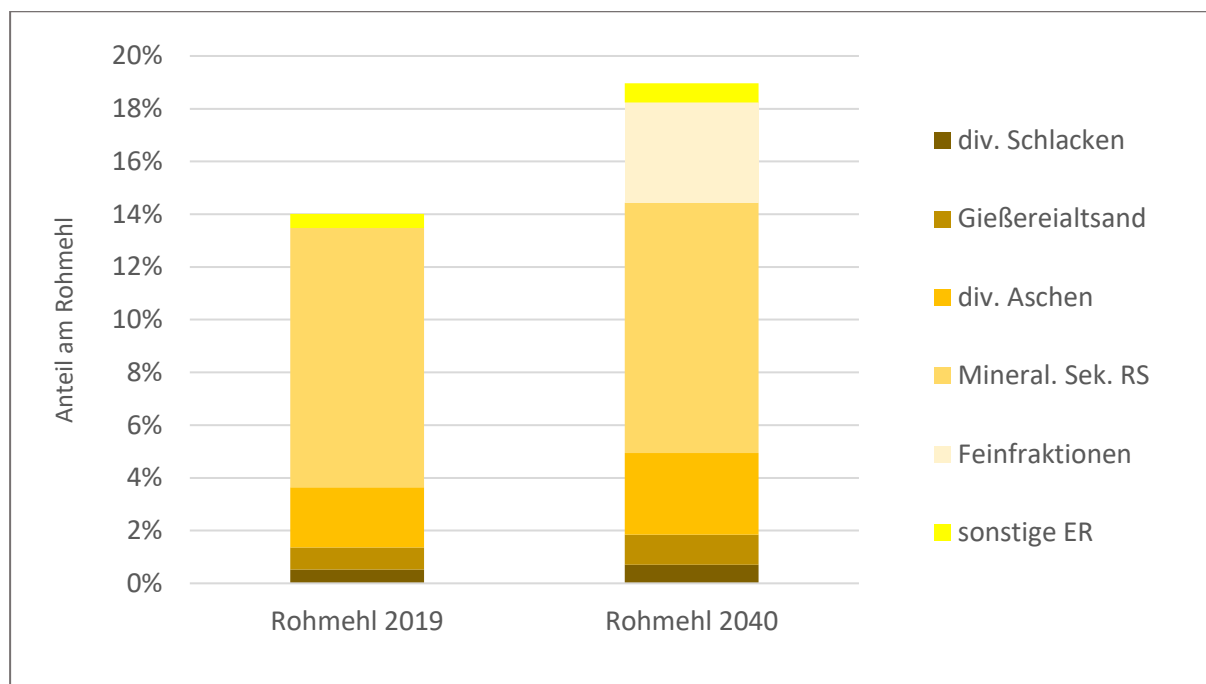


Abbildung 16: Anteile an Sekundärrohstoffen im Rohmehl für die Zementherstellung

Es werden derzeit bereits verschiedene Materialien (siehe Abbildung 16) als sekundäre Rohstoffe in der Zementindustrie eingesetzt. Viele davon haben sich über Jahre bewährt und werden sehr wahrscheinlich auch zukünftig Einsatz finden. Für eine gleichbleibende Klinkerqualität können Primärressourcen nicht gänzlich ersetzt werden. Durch den technologischen Fortschritt wird basierend auf der Steigerung der vergangenen Jahre eine Erhöhung des Sekundärrohstoffanteiles von 14 auf 19 % angenommen.

Eine potenzielle betrachtete Stoffgruppe könnte bis 2040 hinzukommen, nämlich Feinfraktionen aus der Abfallaufbereitung. Diese Feinfraktionen werden derzeit deponiert oder verbrannt. Der Einsatz in der Zementindustrie ist derzeit Gegenstand eines Forschungsprojektes am für AVAW der MU Leoben. Es kann dadurch eine Schonung von Primärressourcen sowie eine sinnvolle Verwertung der derzeit kaum genutzten Abfälle erreicht werden.

Weitere potenzielle Einsatzstoffe, die derzeit keine Anwendung in der Zementindustrie finden sind Schlacken und Aschen aus der Abfallverbrennung sowie KMF, die in ihrem Chemismus den Klinkerbestandteilen ähneln. Auch der Einsatz dieser Materialien befindet sich derzeit noch im Forschungsstadium. Für KMF ist diese Verwertungsmöglichkeit von besonderem Interesse, da diese ab 2027 nicht mehr deponiert werden dürfen. In Abbildung 16 wurden MVA-Aschen unter div. Aschen und KMF aufgrund der geringen Menge unter sonstige Ersatzrohstoffe (ER) subsumiert.

### Sekundäre Zumahlstoffe

Zumahlstoffe (ZMS) sind Materialien, die einen Teil des Klinkers im Zement ersetzen. Diese unterteilen sich in primäre ZMS (z.B. Gips, Kalkstein, ...) sowie sekundäre ZMS (z.B. Hüttensand, Flugasche, ...). Der überwiegende Energiebedarf sowie die meisten THG-Emissionen entstehen durch das brennen des Rohmehls zu Klinker. Durch die Substitution von Klinker lassen sich daher weitreichende Einsparungen von Energie und THG-Emissionen erreichen. Der durchschnittliche Klinkeranteil in Europa liegt bei ca. 76 % (Daten aus 2017). Österreich ist auch in diesem Bereich führend mit einem durchschnittlichen Klinkeranteil aller Zemente von derzeit etwa 66 %. Den angestrebten Schwellenwert für 2050 in der Roadmap der europäischen Zementindustrie von < 70 % Klinkeranteil hat Österreich damit schon jetzt erreicht. (VÖZ 2019a)

Eine weitere Verringerung des Klinkeranteils erscheint dennoch realistisch. In einer Forschungsarbeit von Juhart et al. (2021) an der TU Graz wurden Versuche mit Mikrofüllstoffen auf Kalksteinbasis durchgeführt, in denen der Klinkeranteil auf 55 % reduziert wurde. Die Ergebnisse zeigten ähnliche Resultate in Hinblick auf Festigkeit und Verarbeitbarkeit des Zements im Vergleich mit Normzementen.

Die Verfügbarkeit des derzeit hauptsächlich eingesetzten ZMS „Hüttensand“ (granulierte Hochofenschlacke) wird durch Veränderungen in der Stahlproduktion in Zukunft abnehmen. Gleiches gilt für Flugaschen aus der Verstromung von Kohlefeuerungen. Um einem Ansteigen des Klinkeranteils in Zukunft entgegenzuwirken müssen alternative (sekundäre) ZMS betrachtet werden. Abbildung 17 zeigt derzeitige und (potenzielle) zukünftige sekundäre Rohstoffe und Zumahlstoffe.

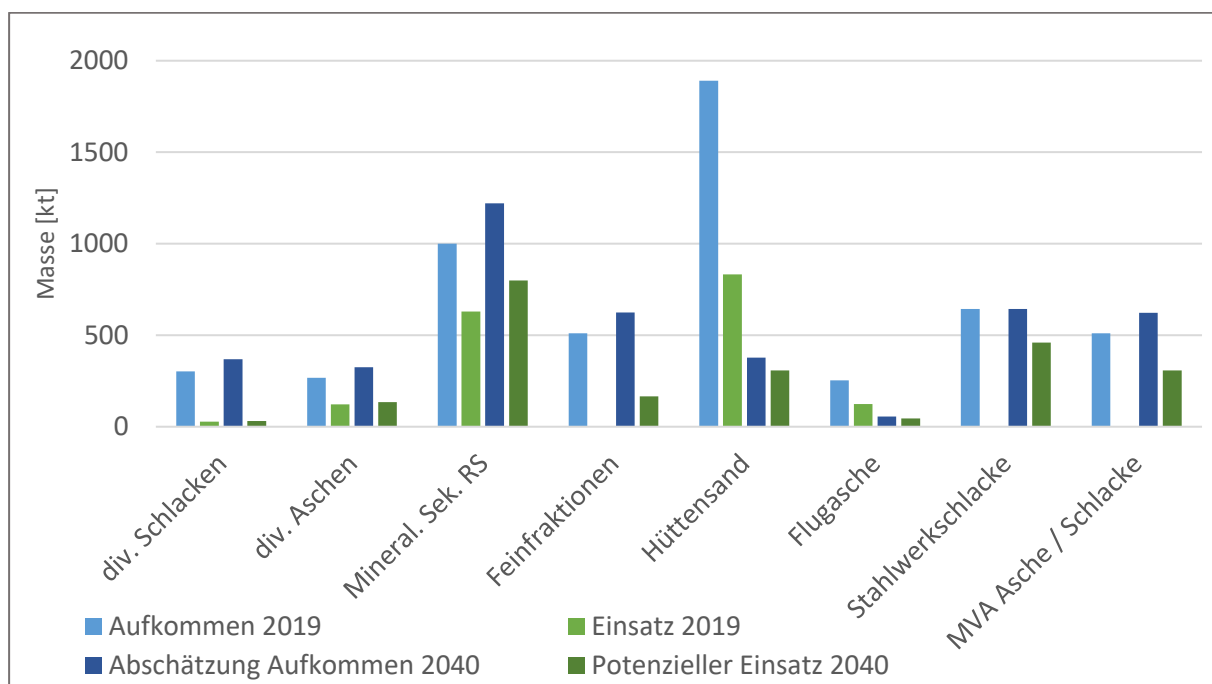


Abbildung 17: Aufkommen und Einsatz von ausgewählten sekundären Rohstoffen und Zumahlstoffen in der Zementindustrie, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf VÖZ (2022b)

Als alternative ZMS zu den derzeit gebräuchlichen sind insbesondere Stahlwerkschlacken und MVA Schlacken bzw. Aschen von großem Interesse. Beide weisen jedoch Eigenschaften auf, die modifiziert werden müssen um diese Stoffe in der Zementindustrie einsetzen zu können. Bei Stahlwerkschlacken ist dies der hohe Eisenanteil, bei MVA Schlacken die gebundenen Schwermetalle. Abbildung 18 zeigt die derzeitige Zusammensetzung der ZMS als Massenanteil am Zement (die Differenz auf 100 % entspricht dem Klinkeranteil) sowie eine Abschätzung für die Zusammensetzung 2040. Das derzeitige Verhältnis von primären zu sekundären Zumahlstoffen (ca. 1/3 primär und 2/3 sekundär) wird für die Abschätzung der zukünftigen Zusammensetzung beibehalten.

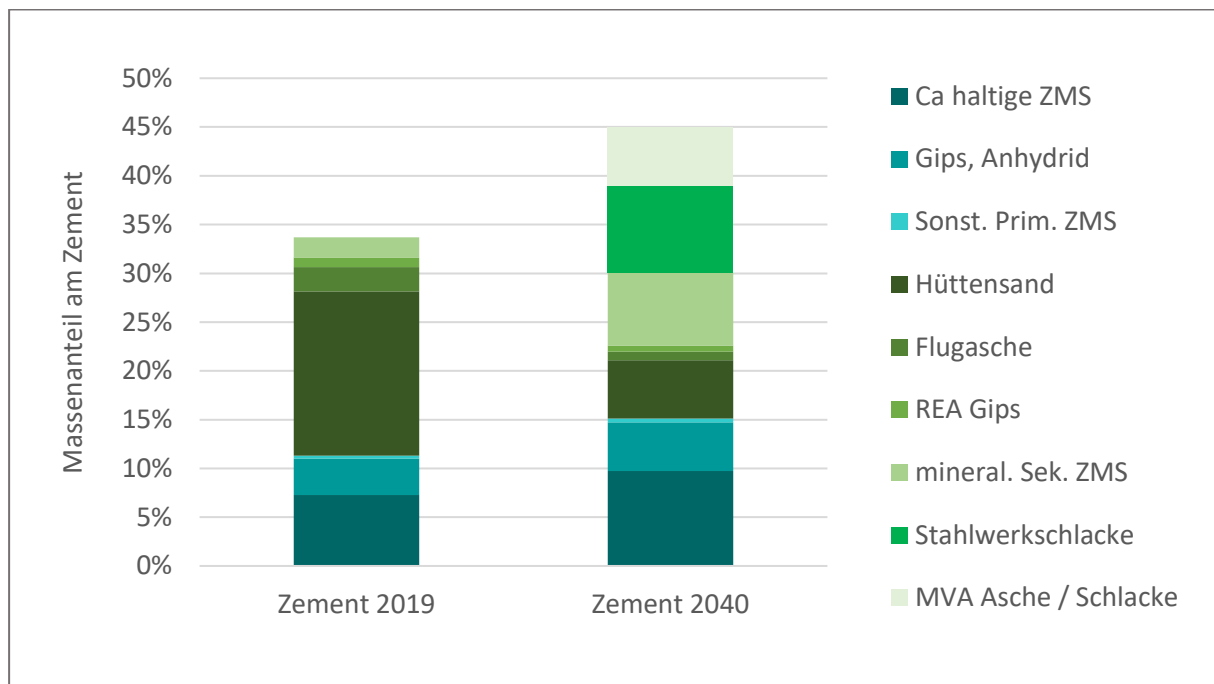


Abbildung 18: Entwicklung der Zumahlstoffe in der Zementindustrie

Die Auswirkung der rückläufigen Verfügbarkeit von Hüttensand ist in der Abbildung klar ersichtlich. Die Probleme, die alternative Zumahlstoffe mit sich bringen müssen daher gelöst werden, um eine weitere Klinkerreduktion zu ermöglichen.

Eine Möglichkeit dafür stellt die thermochemische Konditionierung von Stahlwerkschlacke dar. Dafür wird als erster Prozessschritt das oxidisch gebundene Eisen unter reduzierenden Bedingungen zu elementarem Eisen reduziert. Dadurch wird die Schlacke in ihrer chemischen Zusammensetzung auf die angestrebte, klinkerähnliche Zusammensetzung modifiziert. Durch die rasche Erstarrung der Schlacke bildet sich u.a. das Mineral Alit, das gute hydraulische Eigenschaften aufweist. Nach dem Mahlen der erstarrten Schlacke können nochmals Eisenanteile abgetrennt werden. Versuche im Labor- und Kleinanlagenmaßstab lieferten bereits vielversprechende Ergebnisse. (Vollprecht und Pomberger 2021)

Die technische Umsetzung dieses Verfahrens im industriellen Maßstab ist derzeit aufgrund der hohen benötigten Temperaturen (ca. 1.800°C) unwirtschaftlich und in Bezug auf das Feuerfestmaterial problematisch. Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens für eine

Anwendung direkt beim Stahlabstich und bei niedrigeren Temperaturen (von etwa 1.600°C) ist Gegenstand der Forschung. Durch diese Anpassungen wäre eine ökonomische Anwendung möglich und sinnvoll. Die Ursprünge dieses Forschungsthemas liegen in der Behandlung von LD-Schlacken, werden aber immer mehr auf Elektrolichtbogenschlacken ausgeweitet. (Adam et al. 2022)

### **4.3 Kunststoffe in der chemischen und petrochemischen Industrie**

Das Gesamtaufkommen an Kunststoffabfällen beträgt in Österreich derzeit etwa 980 kt pro Jahr, wobei 17 - 18 % getrennt gesammelt werden. Die Leichtverpackungssammlung (LVP) mit etwa 180 kt jährlich wird dabei den gemischten Kunststoffabfällen zugerechnet. Stofflich verwertet werden vorwiegend jene Kunststoffabfälle die getrennt gesammelt werden, nämlich zu ca. 88 %. Kunststoffe in gemischten Abfällen werden nur zu etwa 8 % stofflich, jedoch zu 90 % thermisch verwertet. (BMK 2022)

Im kommunalen Bereich werden derzeit hauptsächlich Verpackungen aus Kunststoffen über die LVP-Sammlung getrennt erfasst. Im industriellen und landwirtschaftlichen Bereich werden u.a. Folien, ausgehärtete Kunststoffabfälle wie auch einzelne Polymertypen sortenrein gesammelt. Viele Kunststoffe landen jedoch in gemischten (Siedlungs-) Abfällen, da es keine entsprechende Sammlung gibt. Um höhere Recyclingquoten für Kunststoffe erreichen zu können, muss die getrennte Sammlung, vor allem für Nicht-Verpackungskunststoffe, ausgebaut werden. Eine weitere Möglichkeit stellt das gezielte Aussortieren von Kunststoffen aus gemischten Abfällen dar. Kunststoffmischungen verschiedener Polymertypen müssen anschließend durch geeignete Sortiersysteme (händisch oder mittels SGS) in sortenreine Fraktionen getrennt werden, um diese dem Recycling zuführen zu können.

Die Verwertung von Kunststoffen fußt derzeit auf zwei Säulen: dem mechanischen Recycling (Regranulierung) von sortenreinen Polymeren und die thermische Verwertung (u.a. als EBS oder in Abfallverbrennungsanlagen). Technologien, die ein Recycling von gemischten Kunststoffabfällen sowie Multilayer-Produkten ermöglichen in dem die Polymere in ihre Grundstoffe zerlegt werden, werden unter dem Begriff chemisches Recycling subsumiert. Diese Verfahren befinden sich weitgehend im Pilot- oder Demonstrationsmaßstab (TRL 6-8). An einem Ausbau auf Industriemaßstab wird derzeit gearbeitet.

Eine Gruppe der chemischen Recyclingverfahren stellen die Solvolyse-Prozesse dar. Durch diese Prozesse wird die Kondensationsreaktion von Polymeren wie PA, PET, PC oder PUR umgekehrt. Dafür kommen Säuren, Laugen, Alkohole oder Amin-Verbindungen zum Einsatz. Diese Verfahren sind jedoch auf eine hohe Reinheit der Abfälle angewiesen, da Nebenreaktionen durch Fremd-Polykondensate die Reinheit der Monomere gefährden. (Schlummer et al. 2020)

Eine weitere Möglichkeit des chemischen Recyclings sind thermolytische Verfahren. In diesen Verfahren werden Polyolefine bei Temperaturen von > 300°C zu Kohlenwasserstoffgemischen verarbeitet (Schlummer et al. 2020). Ein Beispiel für ein derartiges Pyrolyse-Verfahren ist das ReOil® Verfahren der OMV. In diesem Verfahren werden Polyolefine zu einem synthetischen

Rohöl verarbeitet, welches in der Raffinerie eingesetzt werden kann um daraus neue Grundstoffe zu erzeugen.

Basierend auf der historischen Entwicklung der Kunststoffproduktion sowie des Aufkommens an Kunststoffabfällen, wurde mit einer jährlichen Steigerung des Aufkommens von ca. 1 % eine Abschätzung über die in 2040 verfügbare Menge an Kunststoffabfällen getroffen. Durch die oben genannten notwendigen Maßnahmen und technologischen Entwicklungen wurde eine Abschätzung zur zukünftigen Verwertung von Kunststoffabfällen, basierend auf den drei Säulen der Verwertung getroffen (siehe Abbildung 19).

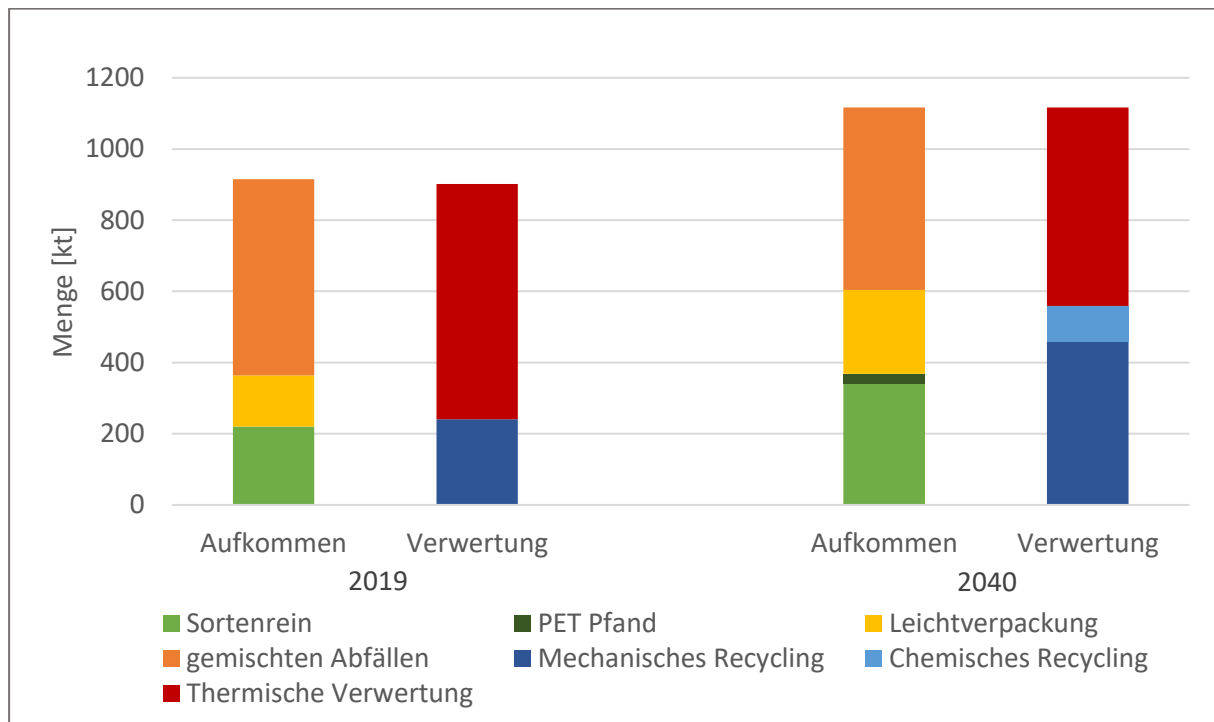


Abbildung 19: Aufkommen und Verwertung von Kunststoffabfällen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf BMK (2022)

Die Menge an verwerteten Kunststoffabfällen steigert sich bis 2040 auf etwas mehr als 1.100 kt. Der Anteil des recycelten Materials steigt von derzeit ca. 27 % auf etwa 50 % an (mechanisches + chemisches Recycling). In die Betrachtung wurde auch ein mögliches Pfand auf PET Getränkegebinde aufgenommen. Die Auswirkungen auf die Steigerung der getrennten Sammlung sind im Vergleich zum gesamten Abfallaufkommen relativ gering.

#### 4.4 Alttextilien

Eine stoffliche Verwertung von Textilabfällen findet nur bei getrennt gesammelten Alttextilien statt und auch bei diesen kann nur ein Teil entsprechend verwertet werden. Besonders die Wiederverwendung von Altkleidern hat im Vergleich zur Herstellung neuer Kleidung ein hohes Einsparungspotenzial für THG-Emissionen. Vergleicht man die Emissionen bei der Herstellung eines Baumwolle-Kleidungsstück mit der Wiederverwendung eines solchen so verursacht die Wiederverwendung 95 % weniger THG. Der größte ökologische Nutzen wird dabei durch eine hohe Qualität der Sammelware erzielt. Da dies jedoch bedeutet, dass ein

entsprechendes Kleidungsstück eine kurze erste Nutzungsdauer hat, ist dies kontrovers zu betrachten. Ein Verzicht auf einen Neukauf durch die längere Nutzung eines vorhandenen Kleidungsstücks stellt die aus ökologischer Sicht optimale Variante und damit auch das größte Potenzial zur Einsparung von Emissionen dar. (TEXAID 2022)

Ab 2025 sind Textilabfälle in der EU verpflichtend getrennt zu sammeln. Bis zum Ende des Jahres 2024 wird die EU-Kommission darüber entscheiden, ob Zielvorgaben für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Alttextilien bzw. Textilabfällen festgelegt werden. (BMK 2022)

Recyclingsysteme für Textilfasern, die ökologisch und ökonomisch sinnvoll sind, existieren derzeit noch nicht, müssen jedoch entwickelt werden, um mögliche Zielvorgaben der EU Kommission erfüllen zu können. Das Potenzial dafür ist groß, wie eine Studie von McKinsey & Company (2022) zum Recycling von Textilfasern im Jahr 2030 verdeutlicht. Abbildung 20 zeigt die in der Studie dargelegten Potenziale.

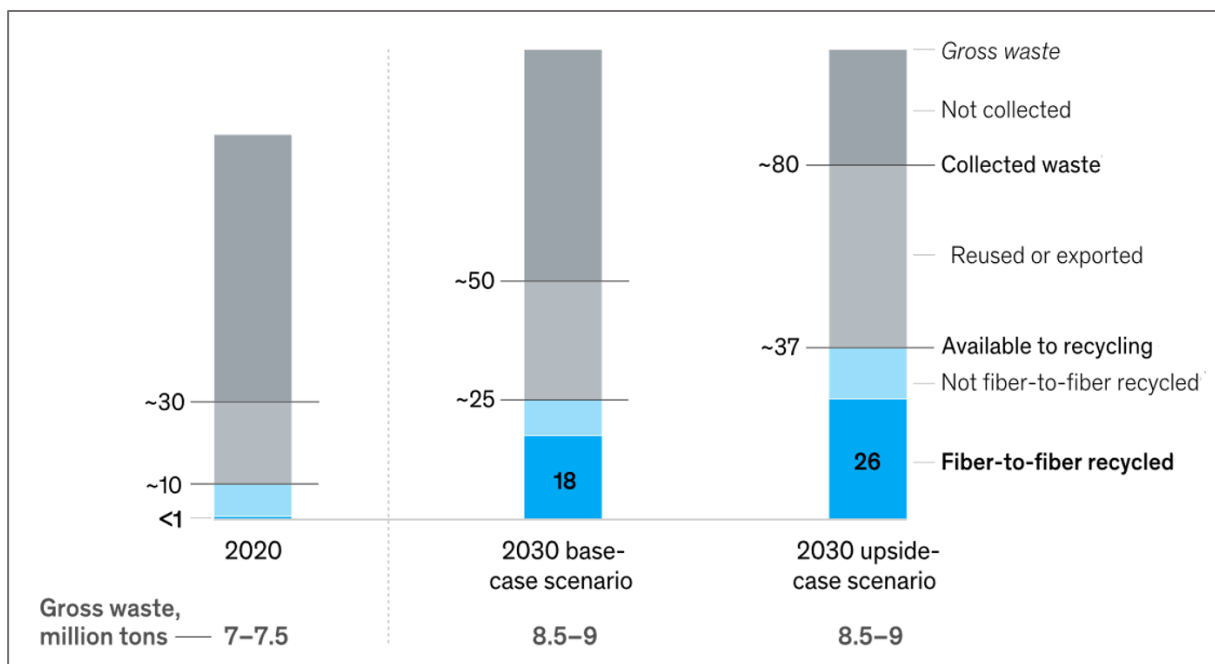


Abbildung 20: Potenzial des Textilrecyclings in Europa bis 2030, Quelle: McKinsey & Company (2022)

Das von der EU geförderte Forschungsprojekt SCIRT (System Circularity and Innovative Recycling of Textiles) unter der Leitung der Belgischen Universität VLAAMSE INSTELLING VOOR TECHNOLOGISCH ONDERZOEK N.V. unter Beteiligung der Technischen Universität (TU) Wien und der Universität für Bodenkultur sucht nach Lösungen zum Umgang mit der gesteigerten Menge an getrennt gesammelten Alttextilien. Ziel ist dabei aus Altkleidern wieder neue Kleidungsstücke zu erzeugen. (CORDIS 2021)

Im Zuge dieses Projektes wird an der TU Wien an einem Verfahren zum Aufbereiten von Mischtextilien aus Baumwolle und Polyester (einer sehr gängigen Materialkombination für Kleidungsstücke) geforscht. Um Polyesterfasern von Baumwollfasern zu trennen werden Cellulasen (Enzyme) eingesetzt. Durch diese Enzyme wird die Cellulose, welche der

Hauptbestandteil von Baumwolle ist, in kleine Moleküle gespalten. Die aus der Baumwolle entstehende Glukose kann in der chemischen Industrie als Grundstoff eingesetzt werden. Aus den verbleibenden Polyesterfasern soll ein Granulat hergestellt werden, welches wiederum zur Herstellung neuer Fasern verwendet werden kann. (Bartl et al. 2021)

Das hochwertige Recycling von Textilien und die dafür notwendigen Technologien stehen derzeit noch am Anfang des Forschungsstadiums. Möglichkeiten zum Einsatz von Alttextilien beispielsweise in der Herstellung von Putzlappen werden bereits jetzt industriell durchgeführt. Diese Verwertungswege zur Herstellung von niederwertigeren Produkten stellen jedoch ein Downcycling der Rohstoffe da und sollten daher durch höherwertige Recyclingverfahren substituiert bzw. ergänzt werden. Das Recycling von Textilien befindet sich gerade in einem Umbruch, weshalb im Rahmen dieser Studie nicht näher auf konkrete Verwertungswege eingegangen wird, sondern auf die laufenden Studien in diesem Bereich verwiesen wird.

## 4.5 Future Waste

Der Begriff „Future Waste“ bezeichnet keine klassischen (festen) Abfälle, sondern Produkte die zukünftig zu Abfällen werden. Diese hochtechnologischen Produkte entstehen durch den Fortschritt in Wissenschaft und Technik und gehen derzeit in den anthropogenen Bestand über bzw. werden dies in naher Zukunft tun. Viele dieser Produkte weisen eine lange Lebensdauer aus, weshalb sie in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft erst zukünftig an Relevanz gewinnen. Zu diesem Zeitpunkt muss es jedoch geeignete Entsorgungs- und Verwertungslösungen geben, um wertvolle Ressourcen wiederzugewinnen und Umweltauswirkungen so gering als möglich zu halten. (Pomberger und Ragossnig 2014)

Im Zuge des meist sukzessive steigenden Abfallaufkommens von Future Wastes besteht die besondere Herausforderung darin, einen Wandel von anfangs oft unspezifischen Recyclingverfahren hin zu spezialisierten Anlagen zu gewährleisten. Dabei sind insbesondere die Prozessentwicklung sowie die zeitgerechte Skalierung der Anlagenkapazitäten (abgestimmt auf die anfallenden Abfallmengen) relevant.

Das Recycling, insbesondere von kritischen Rohstoffen und Metallen, die in der Energiewende eine wesentliche Rolle spielen, wird oft als Allheilmittel zur Deckung des Rohstoffbedarfs angepriesen. Die Menge an Sekundärrohstoffen aus dem Recycling werden jedoch noch lange keine wesentliche Rolle zur Deckung des Rohstoffbedarfs spielen. Produkte wie PV-Module oder LIB verweilen lange im anthropogenen Bestand und können daher erst mit einer entsprechenden Zeitverzögerung genutzt werden.

Im Rahmen dieser Studie wird auf die wesentlichen Future Wastes im Zusammenhang mit Elektromobilität und erneuerbaren Energien eingegangen. Konkret werden Elektroaltfahrzeuge und dabei insbesondere deren Batteriesysteme sowie PV-Module näher betrachtet.

## Elektro-Altfahrzeuge

Abgesehen von den auf der Hand liegenden Unterschieden in der Motorentechnologie unterscheiden sich Elektro-Altfahrzeuge von konventionellen Altfahrzeugen mit Kraftstoffantrieb vor allem in den Komponenten der Batterie und der Leistungselektronik. Diese müssen vor einer weiteren Behandlung demontiert werden. Derzeit ist oft noch unklar wer diese Aufgabe der Demontage übernehmen soll. Die österreichischen Shedderbetriebe nehmen nur Elektroaltfahrzeuge ohne Antriebsbatterien an, in vielen KFZ-Werkstätten – vor allem den freien nicht Vertragswerkstätten – gibt es weder das Know-How, noch die technischen Möglichkeiten zum sicheren Ausbau der Batterien, die bis zu 500 kg wiegen können. Die Verwertung der Batteriesysteme wird nachfolgend gesondert erläutert. (Bulach et al. 2017)

Die gerade exponentiell steigenden Zahlen bei Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen machen deutlich, dass der motorisierte Individualverkehr in den nächsten Jahren vor einem großen Umbruch steht. Aktuell entsteht eine durch das BMK beauftragte und durch FFG und Klimafonds geförderte Studie zur Verbesserung des Gesamtprozesses für den sicheren Umgang mit verunfallten batterieelektrischen Fahrzeugen vom Unfallort bis zur Verwertungsstelle. Darin werden die Aufgaben und Handlungsfelder der einzelnen prozessrelevanten Akteure und Stakeholder beschrieben, wichtige Schnittstellen definiert und Schnittstellenprobleme erörtert. Darüber hinaus wurden in der Studie Handlungsempfehlungen an Behörden und Gesetzgeber formuliert, um mögliche gesetzliche Lücken aufzuzeigen. (FFG 2022)

Neben der Batterie ist die Leistungselektronik eine Hauptkomponente des elektrischen Antriebes. Diese sorgt als Schnittstelle zwischen Batterie und Elektromotoren für die Energieversorgung der Motoren sowie die Rückeinspeisung durch Rekuperation. Im Gegensatz zu den vielen kleinen Elektronikkomponenten, die über das Fahrzeug verteilt für Assistenzsysteme und Komfort verbaut sind, ist die Leistungselektronik zumeist als eine gut zugängliche Einheit verbaut. Durch die Demontage der Elektronik-Einheit kann diese separat in speziellen Anlagen des Elektronikschrott-Recyclings behandelt, und damit eine Steigerung der Wertstoffausbeute erzielt werden. Dabei stehen neben dem zielgerichteten Abtrennen der Massenmetalle Aluminium und Kupfer vor allem Verfahren zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen im Vordergrund. (Bulach et al. 2017)

Um die Leistungselektronik einer hochwertigen Verwertung zuführen zu können muss diese händisch demontiert werden. Dafür ist eine mittlere Demontagezeit von 15 Minuten notwendig. Eine weitere händische Zerlegung der Module würde die beste Wertstoffausbeute erzielen, ist jedoch wirtschaftlich nicht darstellbar. Ein mechanischer Aufschluss der Teile kann über eine Prallmühle erfolgen. Durch diese werden Leiterplatte vom Gehäuse getrennt, jedoch bleiben die Leiterplatten weitgehend als große Teile vorhanden, was eine anschließende Trennung vereinfacht. Aluminiumteile werden als Aluminiumschrott recycelt, die Leiterplatten werden zerkleinert und in Kupferhütten eingesetzt. Eine tiefergehende Aufbereitung der Platinen ist technisch z.B. durch eine chemische Platinenentstückung möglich, jedoch technisch



Aufwendung und daher wirtschaftlich kaum durchführbar. Die abgelösten Bauteile müssen nach der Entstückung sortiert werden. Durch eine Klassierung bei ca. 2 mm lässt sich eine palladiumreiche Fraktion herstellen. Tantal Kondensatoren lassen sich z.B. über eine Sensorgestützte Sortierung abtrennen. (Bulach et al. 2017)

### **Lithium-Ionen-Batterien (LIB)**

Für das Recycling von LIB gibt es vielversprechende Ansätze zur Rückgewinnung der enthaltenen Metalle. Viele dieser Ansätze befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium. Ein großes Problem des LIB Recyclings stellen die verschiedenen Batterietypen dar. Derzeit ist noch schwer absehbar welche Typen sich mittel- und langfristig durchsetzen werden bzw. ob dauerhaft Batterien verschiedener Zusammensetzung nebeneinander koexistieren. Durch die Forschung in der Batterietechnik werden stetig neue Materialkombinationen entwickelt. Ebenso gibt es vielversprechende Systeme im Entwicklungsstadium, wie beispielsweise Akkus mit festem Elektrolyten (Feststoffbatterien). Diese sollen höhere Leistungen und Speicherdichten aufweisen, befinden sich jedoch erst in der Forschungsphase. Diese Entwicklungen sollten bei der Weiterentwicklung von Recyclingverfahren und dem Bau von Anlagen berücksichtigt werden.

Das Recycling von LIB basiert auf einer Kombination von verschiedenen Verfahrensschritten die je nach Recyclingansatz unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Diese sind i.W.:

- die thermische Konditionierung,
- die mechanische Aufbereitung,
- die pyrometallurgische Aufarbeitung,
- die hydrometallurgische Aufarbeitung,
- das direkte Recycling. (Nigl et al. 2021)

Eine Studie von (Beigl et al. 2021) zum Thema „*Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich*“ stellt einzelne Verwertungsmöglichkeiten detailliert dar und kann als Grundlage für weiterführende Maßnahmen auf diesem Gebiet herangezogen werden. Auf die detaillierte Darstellung der technischen Umsetzung des Recyclings wird daher im Rahmen dieser Studie nicht weiter eingegangen.

Zur Verwertung von LIB gibt es derzeit nur einige wenige Anlagen in ganz Europa. Dies liegt auch daran, dass die Mengen an LIB Abfällen noch sehr gering sind. Relevante Mengen werden in Österreich voraussichtlich ab Beginn der 2030er Jahre auftreten (vgl. Abbildung 21). Bis dahin wird ein europaweiter Ausbau der Recyclingkapazitäten erwartet, der nach einer Analyse des ADAC (2022) federführend von Deutschland und Schweden ausgehen wird.

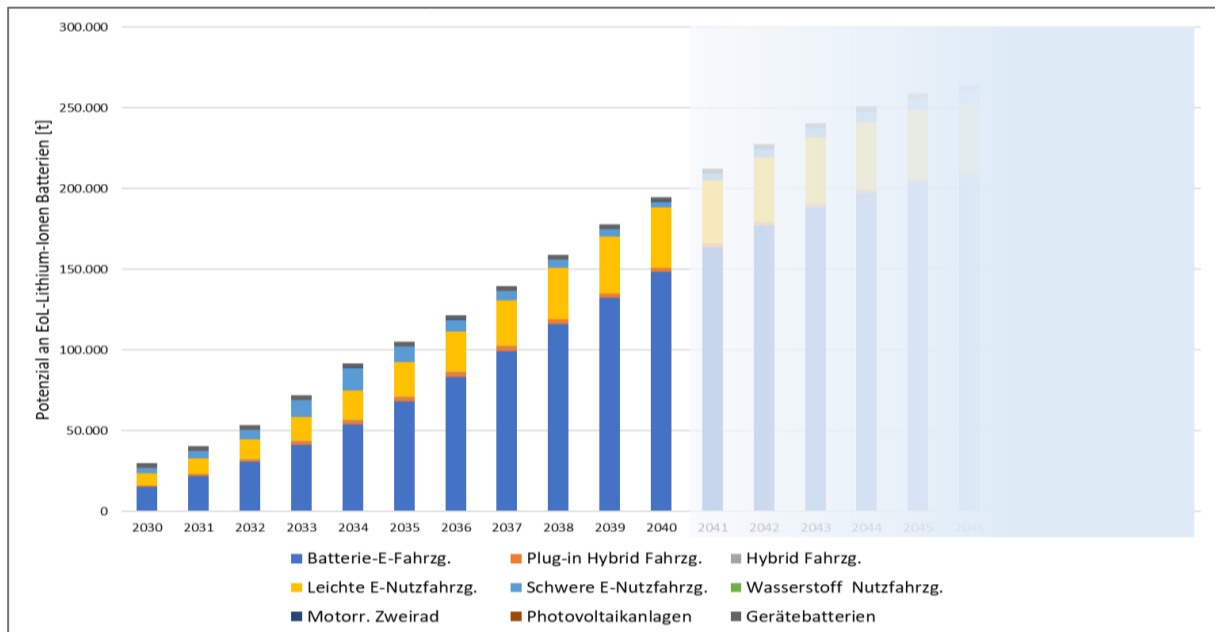


Abbildung 21: Geschätztes jährliches Potenzial von EoL-LIB in Österreich, Bildquelle: Beigl et al. (2021)

Ein wesentlicher Aspekt in der Verwertung von LIB ist die Nachnutzung großer Batteriesysteme. Bevor diese dem Recycling zugeführt werden, ist es ökonomisch und ökologisch sinnvoll sie in anderen Anwendungen einzusetzen. Die Akkuzellen werden dabei im stationären Betrieb (z.B. Aufbau in Containern) eingesetzt um überschüssige Energie zu speichern und zur Bewältigung von Spitzenleistung wieder abzugeben. Die Einsatzzeit der Akkus in der Second Life Nutzung kann weitere zehn Jahre oder mehr betragen und damit die Nutzungsphase auf möglicherweise über 20 Jahre verlängern.

Unklar ist derzeit noch, wie sich die Situation bezüglich des Eigentums an den alten Batteriesystemen darstellt. Große Automobilkonzerne schließen vermehrt Partnerschaften mit Rohstoffkonzernen über die Lieferung von Batterierohstoffen ab. Ein nächster Schritt zur Sicherung der Rohstoffversorgung für Batteriesysteme wäre, dass ausgediente LIB im Besitz der Fahrzeugbauer verbleiben und diese sich selbst um das Recycling und den neuerlichen Einsatz bemühen z.B. durch enge Kooperation mit spezifischen Recyclingunternehmen oder der unternehmensinternen Entwicklung von Recyclingsystemen und dem Bau eigener Anlagen.

Für spezifische Recycling von LIB gibt bereits Recyclinganlagen in Betrieb die vor allem Metalle wie Eisen, Aluminium und Kupfer in der mechanischen Aufbereitung rückgewinnen. Die Rückgewinnung von Metallen aus der Schwarzmasse stellt derzeit noch große Probleme dar. Bei der pyrometallurgischen Aufbereitung werden vorwiegend die wertvollen Metalle Nickel, Cobalt und Kupfer gewonnen, deren Legierung nachfolgend hydrometallurgisch aufbereitet wird. Unedle Metalle wie Lithium, Mangan und Aluminium gehen in die Schlacke über. Deren Rückgewinnung ist aufwendig und kostenintensiv und daher meist unwirtschaftlich. Die hydrometallurgische Aufbereitung benötigt einen stabilen und möglichst homogenen Input, weshalb eine Vorbehandlung notwendig ist. Lange Verweildauer und eine kostspielige Abwasserbehandlung sind ebenso nachteilig. (Nigl et al. 2021)

Die Zusammenhänge zwischen mechanischer bzw. thermischer Vorbehandlung sowie der pyro- und / oder hydrometallurgischen Nachbehandlung werden von Windisch-Kern et al. (2022) über die einzelnen Recyclingstufen hinweg gesamtheitlich betrachtet. Das Verständnis für die Auswirkungen der einzelnen Prozesse aufeinander ist von entscheidender Bedeutung zur Schaffung eines geschlossenen Recycling-Kreislaufes und zum Erhöhen der Rückgewinnungsraten von kathodischen Materialien wie Lithium, Cobalt und Nickel.

Vielversprechende Forschungsergebnisse lieferten die Untersuchungen von Holzer et al. (2022) in denen einerseits mit dem angewandten Reaktorkonzept eine Rückgewinnung von Nickel und Cobalt und andererseits ein abscheiden von Lithium und Phosphor aus der Gasphase gezeigt wurde. In einem spezifischen Versuch mit Nickel-Mangan-Cobalt-LIB konnten Rückgewinnungsraten für diese Metalle von > 80 % erzielt werden, bei einem Übergang von Lithium in die Schlacke von < 10 % (Windisch-Kern et al. 2021).

### **PV-Module**

PV-Module bestehen aus ca. 74 % Glas, ca. 10 % Aluminium, 3 - 4 % Silizium, ca. 1 % NE-Metalle (Kupfer, Silber, Zinn, Zink, Blei) sowie Kunststoffen und anderen Materialien. In Frankreich und Deutschland gibt es bereits Anlagen die ein Recycling von PV Modulen durchführen. In einem ersten Schritt werden Kabel, Anschlussdose und Rahmen manuell demontiert. Das Abtrennen des Glases kann durch mechanische Krafteinwirkung oder Zerstörung der Sandwichwirkung zwischen Glas und Zellen durchgeführt werden. Beim zweitgenannten Verfahren werden die Glasplatten nicht zerstört. (Leitner 2019)

Die Rückgewinnung von Metallen und Silicium kann durch mechanische Aufbereitung und anschließende Sortierverfahren (Zerkleinerung, Siebung, Wirbelstromscheidung) oder durch hydrometallurgische Verfahren durchgeführt werden. PV-Module können mit den vorhandenen Technologien zu ca. 90 % recycelt werden. Von besonderem Wert sind dabei vor allem das Aluminium aus dem Rahmen sowie Silber, Kupfer und Zinn aus den Zellen. Das mengenmäßig überwiegende Glas wird aufgrund der potenziellen Verunreinigungen i.d.R. nicht im Flachglasrecycling, sondern zur Herstellung qualitativ minderwertigerer Glasprodukte wie Glaswolle verwendet. (Leitner 2019)

Die derzeit angewendeten Recyclingtechnologien sind oftmals nicht PV-spezifisch. Vielmehr werden PV-Module aufgrund der derzeit geringen Mengen mit anderen Abfällen mitbehandelt. Dieser Ansatz entspricht den vorgegebenen Recyclingquoten, weshalb kein Anreiz für eine Änderung in dieser Hinsicht besteht.

Angesichts des vorherrschenden Trends zur Installation von privaten und gewerblichen PV-Anlagen, der durch die vorherrschende Energiekrise weiter gesteigert wird, ist in den kommenden Jahren mit einem fortgesetzten massiven Zuwachs an verbauten PV-Modulen zu rechnen. In den Abfallmengen wird sich dieser Trend erst in den Jahren 2040er und danach verstärkt zeigen. Im BAWP wird für 2050 eine Masse von ca. 64 kt prognostiziert, die in den Jahren danach auf über 100 kt ansteigen soll (BMK 2022).

Aufgrund des zu erwartenden Anstieges der Abfallmengen bereits in den kommenden Jahren und des enormen mittelfristigen Zuwachses ist die Entwicklung von PV-spezifischen Recyclingverfahren und der Bau entsprechender Anlagen zukünftig zu forcieren (Dobra et al. 2020). Von besonderer Bedeutung in Hinblick auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ist dabei das Recycling von Silizium. Die Menge an Silizium in den Modulen beträgt zwar nur 3 – 4 % der Gesamtmasse, die Herstellung des hochreinen Siliziums verursacht jedoch den größten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Module mit 30 – 35 kg CO<sub>2</sub> je kg Silizium. (Fraunhofer CSP 2019)

Das Fraunhofer Center für Siliziumphotovoltaik (CSP) entwickelte ein Verfahren zum Recycling von Silizium aus Nebenprodukten der Aufbereitung von PV-Modulen. Die eingesetzten Solarzellenbruchstücke werden durch Sortierverfahren von Kunststoffen und Glas befreit. In einem nachgeschalteten stufenweisen Ätzverfahren werden sortierten Bruchstücke aufgeschlossen. Das dadurch aufgereinigte Silizium wird mittels Standardprozessen zu monokristallinen Ingots verarbeitet, die als Rohmaterial für die Herstellung von neuen Wafern dienen. Die zu 100 % mit recyceltem Silizium produzierten PERC-Solarzellen erreichten in einem ersten Versuch einen Zellwirkungsgrad von 19,7 %. Der Wirkungsgrad von derzeitigen auf dem Markt befindlichen Vergleichsprodukten liegt mit etwa 22,2 % nur geringfügig darüber. (Fraunhofer CSP 2022)

## 4.6 Einsatzbereiche für Bau- und Abbruchabfälle

Die Aufbereitung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle basiert auf einfachen mechanischen Verfahren. Die Abfälle werden durch einen Brecher zerkleinert, Stör- und Wertstoffe wie beispielsweise Bewehrungsstahl aus dem Beton werden abgetrennt und eine anschließende Klassierung durchgeführt. Zulässige Einsatzmaterialien sowie Qualitätsanforderungen für Recycling-Baustoffe finden sich in der Recycling-Baustoffverordnung (RBV 2015).

Die Verwertung von Recycling-Baustoffen erfolgt zumeist in Form von Tragschichten untergeordneter Festigkeit, beispielsweise im Straßenunterbau. Die Recycling-Baustoffe dienen dabei einerseits als Substitut für Primärgestein und durch deren Einsatz wird Deponievolumen eingespart. Da Gesteinskörnungen keinen großen materiellen Wert aufweisen und ein sehr regionales Produkt sind, ist der Einsatzradius der Recycling-Baustoffe begrenzt. Den größten Einfluss auf die THG-Emissionen hat der Transport, der i.d.R. mittels LKW durchgeführt wird.

### Betonabbruch

Eine Möglichkeit der tiefergehenden Aufbereitung von Betonabfällen stellt die elektrodynamische Fragmentierung von Betonabfällen dar. Das sogenannte ELDYNTON-Verfahren zielt darauf ab, Zementstein und Gesteinskörnung voneinander zu trennen, um den Zementstein als Substitut für primär erzeugte Bindemittel (Klinker) einzusetzen. Dafür werden ultrakurze, elektrische Unterwasserentladungen eingesetzt. Diese verlaufen an der Phasengrenze zwischen Gesteinskörnung und Bindemittel, da dort der geringste elektrische Widerstand vorliegt. In der nachfolgenden Aufbereitung werden drei Fraktionen hergestellt. Das Grobkorn (> 2 mm) enthält Kies sowie metallische Anteile und kann nach einer

Metallabtrennung als Gesteinskörnung eingesetzt werden (Anteil ca. 55 %). Das Mittelkorn (0,5 – 2 mm, Anteil ca. 40 %) und das Feinkorn als Filterrückstand (< 0,5 mm, Anteil ca. 5 %) können als Ersatz für Kalksteinmehl bzw. für sehr feinen Sand eingesetzt werden. Diese Fraktionen müssen jedoch zuerst getrocknet werden, was mitunter den größten Einfluss auf die Energie- und THG-Bilanz dieses Verfahrens hat. (Gehring et al. 2015)

In der Betrachtung der Ökobilanz schneidet die herkömmliche Zementherstellung in fast allen Wirkungskategorien besser ab, als das ELDYNTON-Verfahren. Wird jedoch eine Trocknung mittels lastfreier Abwärme angenommen, kehrt sich das Ergebnis um. In diesem Fall schneidet das betrachtete Verfahren besser ab, als die Herstellung aus Primärerzeugnissen. (Gehring et al. 2015)

Das konkrete zukünftige Potenzial dieses Verfahrens ist aus heutiger Sicht schwer abzuschätzen. Da es jedoch bereits jetzt sinnvolle Verwertungswege für Betonabbruch (z.B. als Gesteinskörnung) gibt, andere Abfälle und Nebenprodukte ebenfalls vielversprechend für einen Einsatz in der Zement- und Betonindustrie erscheinen und das Verfahren mit einem beträchtlichen Energieaufwand verbunden ist, wird dieses in der weiteren Betrachtung der Zementindustrie nicht als prioritär angesehen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass dieses Verfahren nicht zukunftssträftig sein kann.

Ein vielversprechender technologischer Ansatz zum Recycling von Betonabbruch ist der Einsatz von Betonbrechsand in pyrometallurgischen Schmelzprozessen. Durch die Zerkleinerung von Altbeton entstehen je nach Aufbereitungsverfahren ca. 20 – 40 % Betonbrechsand mit einer Korngröße von < 4 mm. Betonbrechsand hat eine vergleichbare chemische Zusammensetzung wie Zement, jedoch liegen die mineralischen Phasen bereits in ausgehärteter Form vor. Durch das Aufschmelzen werden die Mineralphasen umgewandelt, wodurch sich beim Abkühlen wieder die ursprünglichen hydraulisch aktiven Phasen bilden. Das Aufschmelzen von Betonbrechsand benötigt Temperaturen um 1.500°C, wie sie bei der Herstellung von Stahl erreicht werden. Da die Hauptkomponenten der Schlacke vergleichbar mit jenen im Betonbrechsand sind, wäre eine zumindest teilweise Substitution von Kalk und Quarzsand durch Betonbrechsand denkbar. Wird diese Schlacke beim Erstarren so konditioniert, dass sich hydraulisch aktive Phasen ausbilden, kann diese wiederum als Zuschlagstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden und der Stoffkreislauf wäre geschlossen (vgl. Kapitel 4.2). (Adam et al. 2022)

## **Asphalt**

Asphalt aus Abbruchtätigkeiten wird, wie andere Baurestmassen, überwiegend in entsprechenden Recyclinganlagen eingebracht und als Granulat für niederwertige Anwendungen wie Schüttungen im Straßenunterbau eingesetzt. Eine Verwertung des Recyclingmaterials zur Herstellung von neuem Asphalt ist in den vorhandenen Heißmischanlagen nur im geringen Ausmaß (ca. 10 - 15 %) möglich, und wird teilweise auch durchgeführt. In modernen Anlagen sind Zumischungen von Recyclingmaterial mit einem Anteil von 40 - 60 % möglich. Durch die günstigen Alternativen der Deponierung bzw. der niedrigwertigen Verwertung fehlen Anreize für Investitionen in moderne Anlagen mit hoher

Recyclingkapazität. Um ein höherwertiges Recycling zu forcieren tritt mit 1.1.2024 ein Deponierungsverbot für recyclingfähige Asphaltabfälle in Kraft (BMK 2022).

## **Fazit**

Innovative Lösungen zum (hochwertigen) Einsatz von Bau- und Abbruchabfällen werden zukünftig an Bedeutung gewinnen, wobei es zu beachten gilt, dass diese möglichst regional angewendet werden müssen, um einen positiven Effekt in Bezug auf die THG-Emissionen zu erzielen. Mobile Aufbereitungsanlagen, die bei größeren Bauvorhaben mit vorhergehenden Abrissarbeiten eingesetzt werden, stellen eine mögliche regionale Lösung dar. Die durch den Abbruch gewonnenen Recycling-Baustoffe können direkt im Bauprojekt eingesetzt werden. Derartige regionale Kreislaufführung von Baustoffen stellen eine vielversprechende Zukunftsstrategie dar. Steigende Baustoffpreise schaffen darüber hinaus stärkere ökonomische Anreize für den Einsatz von Recyclingbaustoffen.

## **4.7 Verwertung von Aushubmaterial**

Aushubmaterialien haben keinen wesentlichen rohstofflichen Wert. Verunreinigte Böden müssen derart aufbereitet werden, dass ein Schadstoffaustrag und negative Umweltauswirkungen minimiert werden. Der wesentlichste Kostenfaktor und Verursacher von THG-Emissionen ist der Transport. Es sind in der Verwertung daher möglichst kurze Transportwege anzustreben. Die wichtigsten Verwertungswege sind die direkte Untergrundverfüllung, Geländeanpassung sowie die Bodenrekultivierung am Ort bzw. in der örtlichen Nähe des Anfallens. Nahegelegene Bodenaushubdeponien sind oftmals, neben einem direkten Wiedereinsatz vor Ort, die ökologisch und wirtschaftlich sinnvollsten Beseitigungswege.

Möglichst hochwertige Verwertung (z.B. der Einsatz von Gesteinskörnungen aus Bodenaushub zur Betonerzeugung) am Ort des Anfallens gewinnt zunehmend an Bedeutung. Bei einigen Großprojekten finden daher bereits mobile Aufbereitungsanlagen zur Verwertung des Bodenaushubes (ähnlich der Verwertung von Abbruchmaterial) Anwendung. Im Straßen- und Wegebau wird ein Massenausgleich (z.B. Anlegen von Böschungen) angestrebt, um Deponievolumen zu schonen.

Die Verwertung von technischen Schüttmaterial (z.B. Gleisaushubmaterial) fällt in den Anwendungsbereich der Recycling-Baustoffverordnung (RBV 2015). Durch eine 2021 durchgeführte Novelle der Deponieverordnung (DVO 2008) tritt mit 1.1.2024 ein Verbot der Deponierung für technisches Schüttmaterial in Kraft.

## **Tunnelausbruch**

Tunnelausbruch wird der Abfallklasse des Aushubmaterials zugerechnet. Aufgrund der großen anfallenden Menge auf einzelnen Baustellen sowie der ungewissen mineralischen Zusammensetzung bis zum effektiven Ausbringen gestaltet sich die Verwertung des Materials schwierig. Angelehnt an die Abfallhierarchie ergeben sich für die Verwertung von Tunnelausbruch verschiedene Möglichkeiten (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruch in Klassen eingeteilt (Erben und Galler 2014)

Klasse	Anwendung
1	Wiederverwendung als Baurohstoff auf der Baustelle (Zuschlagstoffe für Innenausbau und Tübbingbeton, Spritzbeton, Ringspaltmörtel, Tragschichten, Asphaltmischgut usw.)
1a	Wiederverwendung als Baurohstoff außerhalb der Baustelle (z.B. Gleisschotter)
2	Wiederverwendung als Industrierohstoff - entsprechend einem Anforderungskatalog der mineralischen Rohstoffindustrie (Gips, Ziegel, Zement, Glas, usw.)
3	Keine höherwertige Wiederverwendung
3a	Material für den Landschaftsbau: Aufschüttung von Böschungen, Verfüllung, Unterbau von Straßen usw.
3b	Deponierung

Die Verwertung von Tunnelausbruch als Baurohstoff direkt auf der Baustelle bietet das größte wirtschaftliche und ökologische Verwertungspotenzial. Dies wird durch ein Best-Practice Beispiel des Gotthard-Basistunnels in der Schweiz verdeutlicht. Die Einsparungen durch die Herstellung von Gesteinskörnung als Betonzuschlagstoff und die daraus resultierende Verringerung der Kosten für die Deponierung betragen ca. 100 Mio. CHF. Demgegenüber standen Mehrkosten für die Aufbereitung des Tunnelausbruchs von ca. 8 Mio. CHF. (Erben und Galler 2014)

Tunnelbauvorhaben sind immer als Einzelprojekte zu betrachten und daher gibt es keine allgemein gültigen Verwertungslösungen für den Abraum. Je nach Projektumfang, geologischen und geografischen Gegebenheiten sowie potenziellen Anwendungen und Abnehmern für den Tunnelausbruch haben die verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten ihre Anwendungsfelder. Eine Materialaufbereitung vor Ort ist unumgänglich um den Abraum direkt auf der Baustelle verwenden zu können. I.d.R. wird eine temporäre Aufbereitung außerhalb des Tunnels in der Umgebung des Portaleingangs errichtet. Eine nahezu vollständige Verwertung wird auch zukünftig nicht möglich sein, jedoch besteht die Möglichkeit durch ortsnahe Einsatz des Tunnelausbruchs primäre Ressourcen und Deponievolumen einzusparen und Emissionen gering zu halten. (Erben und Galler 2014)

## 4.8 Potenziale weiterer ausgewählter Stoffströme

Die nachfolgend beschriebenen Abfallströme wurden in der Bewertung nicht als prioritär angesehen, weisen jedoch aus verschiedenen Gründen (z.B. wesentliche Menge, wertvolle Ressource, Änderung von Rechtsnormen) eine Relevanz auf.

### Papier, Pappe, Karton (PPK)

Die PPK-Fraktion wird als Abfall bereits seit den 90er Jahren getrennt gesammelt. Das Aufkommen teilt sich in etwa gleichermaßen auf die kommunale und die gewerbliche

Sammlung, wobei das Verpackungsmaterial eher der gewerblichen Sammlung zuzurechnen ist. Nahezu die gesamten getrennt gesammelten PPK-Abfälle werden in der Papier- und Kartonindustrie eingesetzt. 2019 wurden in Österreich laut BAWP 2.577 kt PPK-Abfälle stofflich verwertet, gut die Hälfte davon stammt aus dem Import. Diese Branche ist ein Musterbeispiel, wie Kreislaufwirtschaft aus abfallwirtschaftlicher Sicht funktionieren kann.

## Holz

Holz dient einerseits als wichtiger Werkstoff in der Bau- und Möbelindustrie sowie als Rohstoff für die Papier- und Zellstoffproduktion und andererseits als biogener Energieträger. Im Sinne einer kaskadischen Nutzung sollte Holz erst nach einer primären werkstofflichen Anwendung als Energieträger eingesetzt werden. Die Recyclingholzverordnung (RHV 2012) schreibt vor, dass recyclingfähiges Holz getrennt gesammelt und dem Recycling zugeführt werden muss, sofern dabei keine unverhältnismäßigen Kosten im Vergleich zu anderen Verwertungsverfahren entstehen.

Unbehandelte Holzabfälle ohne Verunreinigungen finden in der Spanplattenindustrie Anwendung. Ca. 25 – 30 % des Einsatzmaterials für Spanplatten besteht aus Altholz. Ca. 50 % sind Sägenebenprodukte (Späne und Schleifstaub). Der Rest wird durch Frischholz abgedeckt. Technisch wären höhere Einsatzquoten möglich. In Italien werden Spanplatten aus fast 100 % Altholz hergestellt (Pomberger et. al. 2016). Da aufgrund der in Österreich vorhandenen Holzindustrie große Mengen an Sägenebenprodukten anfallen und diese in der Spanplattenherstellung sinnvoll verwertet werden, ist eine gänzliche Substitution durch Holzabfälle wenig zielführend. Der Ersatz von Neuholz durch Holzabfälle ist jedoch erstrebenswert. Verunreinigtes und behandeltes bzw. beschichtetes Altholz wird primär thermisch verwertet.

Zur Bewirtschaftung von Holz ist ein ganzheitliches Konzept nötig. Das Wachstum von Pflanzen und Bäumen ist eines der bewährtesten Mittel für natürliches Carbon Capture and Storage. Holz ist dadurch zwar ein CO<sub>2</sub>-neutraler Rohstoff, jedoch sollte berücksichtigt werden, dass dieser bei der Verbrennung dennoch Emissionen freisetzt, auch wenn diese zuvor von ihm gebunden wurden. Übergeordnetes Ziel im Sinne von Maßnahmen zur Emissionsminderung sollte daher sein, dass jährlich mehr Holz nachwächst, als verwendet bzw. thermisch verwertet wird (in Österreich sowie auf globaler Ebene).

## Glas

Glasrecycling wird in Österreich seit der 1970er Jahre betrieben. Dies trägt zur Schonung von Ressourcen und zur Einsparung von THG-Emissionen bei. Je 10 % eingesetzten Altglas in der Glasproduktion reduziert sich der Energieverbrauch um 3 % und die CO<sub>2</sub> Emissionen um 7 %. (AGR 2017)

Glasabfälle werden vor einem Einsatz als Sekundärrohstoff (farblich) sortiert, Störstoffe werden abgetrennt und die Glasabfälle werden auf eine definierte Korngröße zerkleinert. Für die Sortierung und Störstoffabscheidung finden sensorgestützte Systeme mit Farberkennung



Anwendung. Zu kleine Körnungen (< 5 mm) stellen prozesstechnisch ein Problem dar und können daher nicht eingesetzt werden.

Insgesamt wurden in Österreich 2019 ca. 321 kt Glasabfälle behandelt. Davon konnten etwa 260 kt recycelt werden. Es wurden ca. 221 kt in Glashütten vorwiegend zur Herstellung von Verpackungsglas eingesetzt. (BMK 2022)

Die Einsatzquote von Recyclingglas beträgt bei Weißglas bis zu 60 %, bei Braunglas bis zu 70 % und bei Grünglas bis zu 90 % (AGR 2017). Eine Ausweitung der Quellensortierung auf drei Glasfraktionen (weis, grün und braun) kann dazu beitragen, das Recycling von Verpackungsglas weiter zu optimieren.

Durch eine sortenreine Trennung von speziellen Gläsern (z.B. PV-Gläser) können diese zur Herstellung von Recyclinggläsern besser eingesetzt werden. Beispielsweise haben PV-Gläser oft einen hohen Antimon-Anteil, der sie für ein gemeinsames Recycling mit anderen Flachgläsern ausschließt. Das Vermischen von verschiedenen Glastypen erschwert damit ein hochwertiges Recycling.

Die stetige Weiterentwicklung der Technologien in der Aufbereitungstechnik (SGS in Verbindung mit Robotik und künstlicher Intelligenz) schafft neue Möglichkeiten zur Störstoffabscheidung und Sortierung. Diese ermöglichen es Flachgläser derart aufzubereiten, dass diese hochwertig recycelt werden können. Durch das Agglomerieren, also einem Versintern von feinen Glaspartikeln, können Feinfraktionen mit Körnungen von < 5 mm nutzbar gemacht werden. Dies trägt zur Rohstoff- und Energieeinsparung bei.

## **Feuerfestmaterial**

Feuerfestmaterialien sind nichtmetallische, keramische Werkstoffe die einen Erweichungspunkt von > 1.500 °C haben. Abhängig von der Zusammensetzung halten feuerfeste Materialien je nach Einsatzort und Anwendungszweck Temperaturen bis zu 2.500 °C aus. Eingesetzt werden Feuerfestmaterialien in praktisch allen Industriebereichen, die mit Hochtemperaturprozessen arbeiten. Dies betrifft v.a. die Eisen- und Stahlindustrie, die Zementindustrie, die NE-Metallindustrie, die Glasindustrie sowie die chemische und petrochemische Industrie. Neben der Temperaturbeständigkeit ist vor allem die chemische Beständigkeit ein wesentliches Merkmal von feuerfesten Materialien. Die Hauptbestandteile von Feuerfestmaterialien sind Aluminiumoxid, Magnesiumoxid, Siliziumdioxid, Calciumoxid, Chrom(III)-oxid, Zirkondioxid. (Bauer und Zettl 2018)

Das Aufkommen wird für Österreich mit ca. 50 kt/a geschätzt. Der Einsatz von Feuerfestabfällen ist in der Produktion von neuen Feuerfestmaterialien aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen nur begrenzt möglich. Meist liegen die Abfälle nicht sortenrein vor, da beim Zustellen aus technischen Gründen verschiedene Feuerfestmaterialien verwendet werden. Außerdem können sich in der Betriebsphase Schadstoffe am Material anlagern. Um den Eintrag von Schadstoffen in die Produktion von neuen Feuerfestmaterialien zu verhindern,

müssen die ofenseitigen Flächen der Ausmauerung vor dem Recycling abgetragen werden. (Bauer und Zettl 2018)

Produktionsabfälle und Produktionsausschuss werden bereits weitgehend wiederverwertet. Das Steigerungspotenzial wird für diese Abfälle als gering angenommen. Der Einsatz von Feuerfest-Abfällen wird als potenziell vielversprechend angesehen. Das Potenzial dafür wird derzeit auf eine Einsatzquote von Sekundärmaterial auf ca. 20 % geschätzt. (Bauer und Zettl 2018)

Die RHI Magnesita als größter, österreichischer Hersteller im Bereich Feuerfestmaterial setzt in einzelnen Produktlinien bereits jetzt bis zu 20 % Recyclingmaterial ein. Dies verursacht einen um 13 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, verglichen mit dem gänzlichen Einsatz von Primärmaterial. (RHI Magnesita 2022)

Da es sich bei Feuerfestmaterial um einen sehr spezifischen Abfallstrom mit wenigen Herstellern handelt, werden sich vermehrt brancheninterne Recyclingloops entwickeln. Hersteller werden Abfälle von den Kunden zurückholen, selbst aufbereiten und in der eigenen Produktion wiederverwenden. Hemmnisse in diesem Prozess sind u.a. gesetzliche Regelungen, wonach der Feuerfestabbruch als Abfall eingestuft ist und die produzierenden Betriebe damit abfallrechtliche Genehmigungen benötigen. Gesetzliche Anpassungen, die beispielsweise die Sammlung, die Behandlung und den Wiedereinsatz von Abfällen aus den eigenen Produkten vereinfachen, können zielführende Lenkungsmaßnahmen sein.

### **Gips und Gipskartonplatten**

Gipsabfälle bzw. Abfälle von Gipsprodukten fallen vorwiegend im Bauwesen an. Einerseits fallen Verschnitte von Gipskartonplatten bei der Herstellung von Trockenbauwänden und ähnlichen an, der weit größere Abfallstrom entsteht jedoch beim Rückbau und der Sanierung von Gebäuden. Gipsbestandteile in Bau- und Abbruchabfällen, die einem Baustoffrecycling zugeführt werden, stellen sich als problematisch dar. Diese vermindern die Qualität der Recyclingbaustoffe und sind im Aufbereitungsprozess kaum abtrennbar. Dem entsprechend müssen Baustoffe auf Gipsbasis getrennt erfasst und separat entsorgt werden.

Gipskartonplatten eignen sich durch einen hohen Gipsanteil von 80 - 95 % sehr gut zur Herstellung von Recycling-Gips (RC-Gips). Das Recycling basiert auf einer einfachen mechanischen Aufbereitung bestehend aus einer mehrstufigen, langsam laufenden Zerkleinerung damit Störstoffe möglichst stückig erhalten bleiben und dadurch leichter abgetrennt werden können. Weitere Aufbereitungsschritte sind i.d.R. eine Metallabscheidung und eine Klassierung. Durch die relativ simple Aufbereitung sollte der Störstoffanteil im Input gering sein, um die hohen Qualitätsanforderungen der Gipsindustrie erfüllen zu können. Dies wird durch eine sorgsame Abfalltrennung gefördert. (UBA DE 2019)

RC-Gips wird vorwiegend in der Herstellung von Bindemitteln oder in der Zementindustrie als Sulfatträger eingesetzt. Der Einsatz in der Herstellung von Gipskartonplatten spielt eine

untergeordnete Rolle, wäre jedoch erstrebenswert. Technisch wäre der Einsatz von ca. 30 % RC-Gips in der Produktion von Gipskartonplatten umsetzbar. (UBA DE 2019)

Derzeit nimmt die gipsverarbeitende Industrie selbst keine Abfälle an, weshalb von Recyclinganlagen das Abfallende erreicht werden muss. Das Potenzial, dies auch durch Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen zu verändern, ist vorhanden. Dadurch könnten Hersteller von Gipsprodukten ihre Geschäftstätigkeit auf den Recyclingbereich ausdehnen und unmittelbar sortenreine Abfälle annehmen, aufbereiten und wieder im Produktionsprozess einsetzen. Dadurch wäre eine industrienaher Recyclinglösung geschaffen.

Die Deponierung von Gipsplatten, Gips-Wandbauplatten sowie faserverstärkter Gipsplatten wird mit Ablauf des Jahres 2025 verboten. Ausgenommen sind Abfälle, die nachweislich keine ausreichende Qualität zum Einsatz in Recyclinganlagen aufweisen sowie der gewonnene RC-Gips, sofern er die Qualitätsanforderungen, insbesondere den Grenzwert für den Asbestgehalt, nicht einhalten kann. (BMK 2022)

### **Künstliche Mineralfasern (KMF)**

KMF werden vorwiegend in der Baubranche in Form von Glas- oder Steinwolle zur Gebäudedämmung eingesetzt. Jene KMF die vor 1998 hergestellt wurden können gefahrenrelevante Eigenschaften aufweisen, da sie potenziell karzinogen wirken. KMF Abfälle aus Abbruchtätigkeiten sind aufgrund der langen Verweildauer in den Gebäuden daher hauptsächlich als gefährliche Abfälle anzusehen. Bei Neubauten angefallene KMF Abfälle (z.B. Verschnitt) besitzen keine gefahrenrelevanten Eigenschaften und können daher anders behandelt werden.

Das Aufkommen von KMF Abfällen sowie verunreinigten KMF ist mit ca. 6 kt pro Jahr gering. Dazu kommen KMF die als gefährliche Abfälle gemeinsam mit Asbestabfällen gesammelt werden (ca. 11 kt/a). Beide Abfallarten wurden fast zur Gänze auf österreichischen Deponien abgelagert. (BMK 2022)

Die Ablagerung von KMF (mit und ohne gefahrenrelevante Eigenschaften) wird mit Ende 2026 begrenzt. Es bedarf daher der Entwicklung von geeigneten Recycling- und Verwertungsverfahren. Einzelne Hersteller ermöglichen eine Rücknahme von sortenreinen KMF Abfällen wie Verschnitt. Dieser brancheninterne Recyclingloop ist eine vielversprechende Möglichkeit für das stoffliche Recycling. Ein alternatives potenzielles Verwertungsverfahren stellt die Verwendung als Einsatzstoff in der Zementindustrie sowie der Einsatz im Bergversatz dar. Mögliche Verwertungswege für KMF abseits der Deponierung sind derzeit Gegenstand der Forschung.

### **Elektroaltgeräte**

Elektro- und Elektronikaltgeräte setzen sich aus immer komplexer werdenden Mischungen von verschiedenen Bestandteilen zusammen. Die grundlegende Eigenschaft um sie in diese Abfallkategorie einzuordnen ist der Betrieb mit elektrischem Strom. 2019 wurden in Österreich etwa 241 kt an Elektro- und Elektronikgeräten in Verkehr gebracht. Über 85 % entfallen dabei

auf Geräte für den Haushaltsgebrauch. Mit etwa 48 % haben Elektrogroßgeräte (> 50 cm) den größten Anteil. Wesentliche Bestandteile sind u.a. Eisen- und NE-Metalle, Kunststoffe und Bauteilgruppen wie Leiterplatten, Batterien und Akkumulatoren, Bildschirmanzeigen, etc. (BMK 2022)

Das Ziel der Aufbereitung von EAG liegt in der Rückgewinnung von wertvollen Materialien wie Metallen und Kunststoffen sowie der Abtrennung schadstoffhaltiger Bestandteile. Eine manuelle Demontage beschränkt sich auf den Ausbau wiederverwendbarer Baugruppen bzw. das Abtrennen von Batterien und Akkumulatoren vor der weiteren Behandlung. Die weitere Materialtrennung erfolgt überwiegend durch Zerkleinerungs- und Sortieraggregate, wie sie auch in anderen Bereichen der Abfallwirtschaft Anwendung finden. Großgeräte (z.B. Waschmaschinen, Geschirrspüler, etc.) werden in Schredderanlagen (mit-) behandelt. (BMK 2022)

Metallische Fraktionen (Eisen, Aluminium, Kupfer und andere NE-Metalle) können je nach Sortiertiefe direkt in der metallherstellenden Industrie als Sekundärrohstoff eingesetzt, oder einer weiteren Aufbereitung bzw. dem Export zugeführt werden.

Leiterplatten stellen mitunter die wertstoffreichsten Bauteile von EAG dar. Mit zunehmendem Aufschlussgrad der Leiterplatten nimmt die Wahrscheinlichkeit der Austragung von Edelmetallen in andere Fraktionen zu. Durch eine manuelle Behandlung (Demontage) wird der geringste Zerstörungsgrad und damit der beste Wertstoffgehalt geschaffen. Eine mechanische Zerkleinerung kann eine Verschleppung der Wertstoffe verursachen und damit zu einem Ressourcenverlust führen. (Sander et al. 2018)

Zur weiteren Aufbereitung der Leiterplatten werden diese auf ca. 20 mm zerkleinert. Von diesem Granulat werden Eisenmetalle und Aluminium abgetrennt. Das verbleibende Granulat ist mit Edelmetallen (Gold, Silber, Kupfer und Palladium) angereichert und kann in Sekundärkupferhütten eingesetzt werden. (URT 2022)

Unedlere Metalle wie Tantal, Gallium oder Germanium finden sich i.d.R. in den Schlacken und Stäuben der Kupferhütten und sind aufgrund der starken Verdünnung nicht wirtschaftlich rückgewinnbar. Um diese Metalle aus Platinen rückzugewinnen zu können, muss eine gezielte Abtrennung und ein spezielles Recycling durchgeführt werden. Ansätze dafür sind z.B. das gezielte Abtrennen von Tantal-kondensatoren mittels Robotersortierung und Ablösen der Kondensatoren. (Bulach et al. 2017)

### **Rückstände aus Shredderanlagen**

Rückstände aus Shredderanlagen beschränken sich vorwiegend auf die Shredderleichtfraktion. Zur Aufbereitung dieser Rückstände gibt es spezielle Anlagen die u.a. Kunststoffe und Metalle rückgewinnen. Als Reststoffe entsteht dabei eine Feinfraktion, die überwiegend aus Sand besteht und deponiert wird, sowie eine Flusenfraktion, die thermisch verwertet werden kann. Die TBS GmbH als Tochter der Bernegger-Gruppe hat ein Verfahren zur Metallrückgewinnung aus diesen Reststoffen entwickelt, die thermische Metallgewinnung.

In diesem Verfahren werden die genannten Reststoffe gemeinsam mit Rückständen aus der Elektronikschrott-Aufbereitung verwertet. Dabei entstehen Metallprodukte wie Zinkstaub und Schwarzkupfer sowie eine Schlacke, die in der Baustoffindustrie eingesetzt werden kann. Abbildung 22 zeigt die Integration dieses Verfahrens in die Aufbereitung von Shredderrückständen.

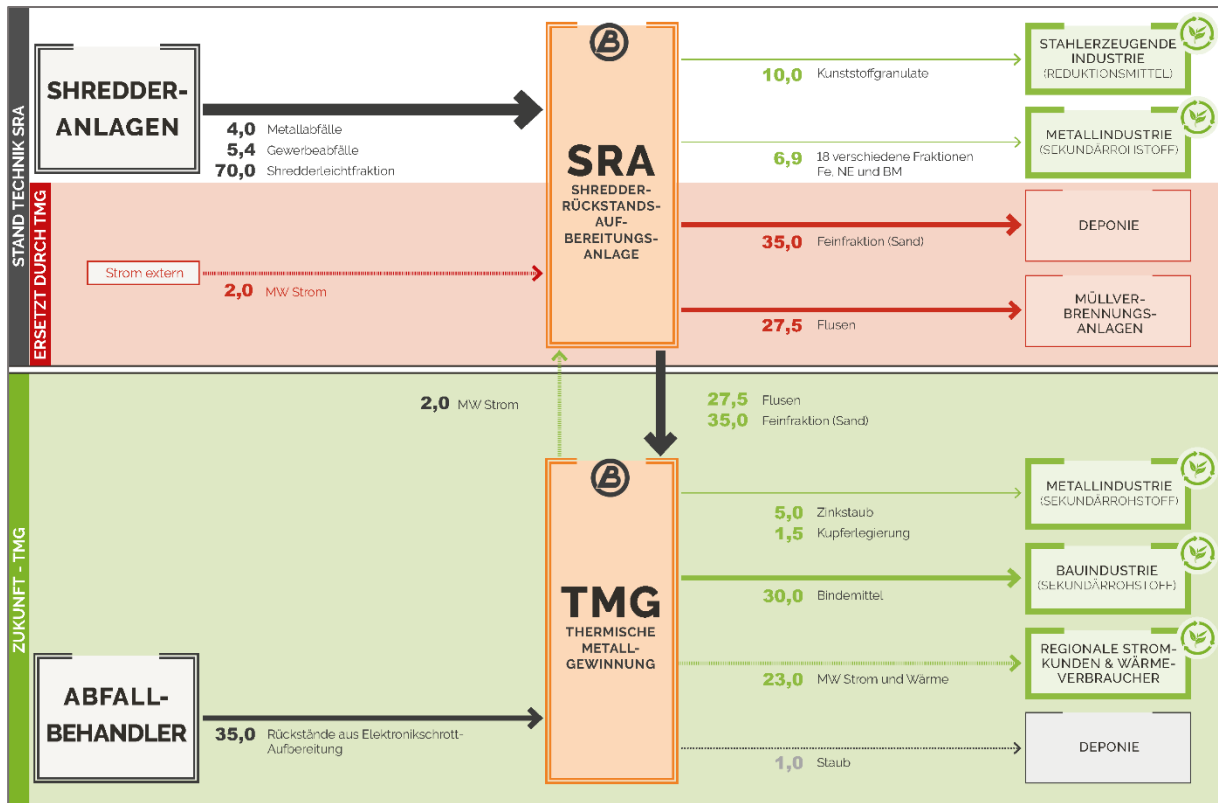


Abbildung 22: Integration der thermischen Metallgewinnung in die Shredderrückstandsaufbereitung, Bildquelle: Bernegger (2022)

## **5 Potenziale zur Einsparung von Energie und Reduktion von Treibhausgasen durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen**

Die Emissionsreduzierung und Energieeinsparung durch die Kreislaufwirtschaft wurde in dieser Studie für die energieintensiven industriellen Teilsektoren auf der Grundlage der in Abschnitt 2 genannten Informationen bewertet. Unter den energieintensiven Industrien sind zwei Industrien für die Betrachtung weniger relevant: die Papierindustrie und die Aluminiumindustrie, die beide bereits hohe Anteile an Sekundärrohstoffen einsetzen.

Die Papierproduktion basiert derzeit auf der Verwendung von 50 % Recyclingpapier als Rohstoff in Österreich, und eine höhere Produktion durch Recyclingpapier ist eine Herausforderung für diesen Sektor (siehe Abschnitt 2.2 Papierindustrie). Die Aluminiumindustrie in Österreich basiert ebenfalls auf dem sekundären Produktionsweg, so dass die Kreislaufwirtschaft nicht als einer der Hauptfaktoren für die Emissionsreduktion in diesem Sektor angesehen wird. Daher werden in diesem Abschnitt die technischen Potentiale zur CO<sub>2</sub>-Minderung bzw. Primärenergieeinsparung für drei verbleibenden Teilsektoren vorgestellt: Eisen und Stahl, Zement und Kunststoffherstellung.

### **5.1 Eisen- und Stahlindustrie**

Der größte Hebel im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie liegt in der grundlegenden Änderung des Produktionsweges, nämlich der Ablösung des Hochofenverfahrens durch die wasserstoffbasierte Direktreduktion (DRI) und dessen Einsatz im Elektrolichtbogenofen (EAF). Da der Elektrolichtbogenofen als Technologie zur Verwertung von Eisenschrott geeignet ist, ergibt sich darüber hinaus durch einen verstärkten Schrotteinsatz, die Möglichkeit zur Reduktion des Primärenergiebedarfs.

Im Referenzjahr 2019 betrug der österreichische Schrottbedarf 1930 kt. Bei Annahme einer konstanten Stahlproduktion bis 2040 kann, basierend auf der direkten Befragung der Experten der voestalpine, bei gleichbleibender Marktqualität des Rohstahls, die Schrott-zu-Rohstoff-Substitution auf bis zu 50% gesteigert werden. Dies bedeutet eine Erhöhung des technischen Schrottbedarf für 2040 in Österreich auf 4230 kt (siehe Abbildung 11). Wenn die Rohstahlerzeugung vom konventionellen Hochofen auf das Direktreduktionsverfahren umgestellt wird, sinkt der Energiebedarf auf 30,67 TWh<sup>1</sup>. Kombiniert man die Prozessumstellung mit maximal verstärktem Schrotteinsatz, würde der Energieverbrauch auf 15,4 TWh sinken, bzw. im Vergleich zu 2019 auf 57 % reduziert werden (siehe Abbildung 23).

---

<sup>1</sup> Vorgelagerte Energiebedarfe zur dabei benötigten Wasserstofferzeugung werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

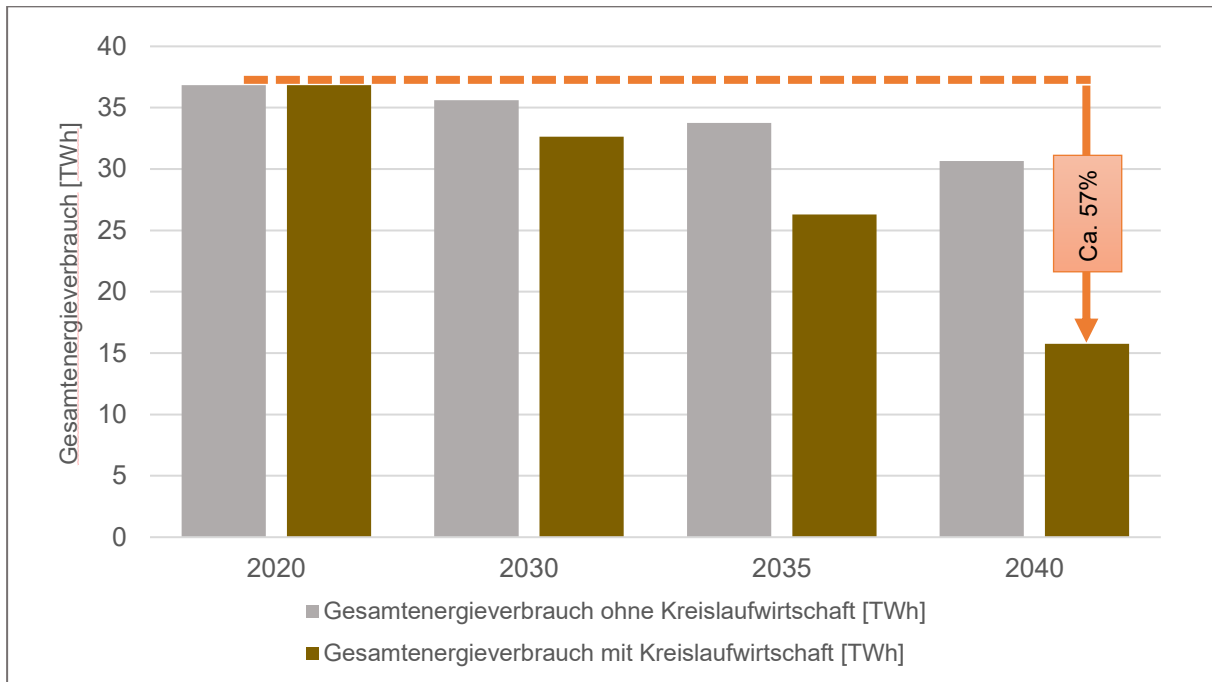


Abbildung 23: Gesamtenergieverbrauch Stahlindustrie

Ohne Umstellung des Primärprozesses von der Hochofen- auf die DRI Route, verringert eine verstärkte Kreislaufwirtschaft den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Sektor nur anteilig, sprich im Verhältnis Primär- zu zukünftiger Sekundärproduktion. Erst die DRI Route unter der Verwendung von CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff und CO<sub>2</sub>-neutralem Strom für den Betrieb der Elektrolichtbogenöfen, erlaubt eine annähernd vollständige Elimination der CO<sub>2</sub>-Emissionen. (siehe Abbildung 24).

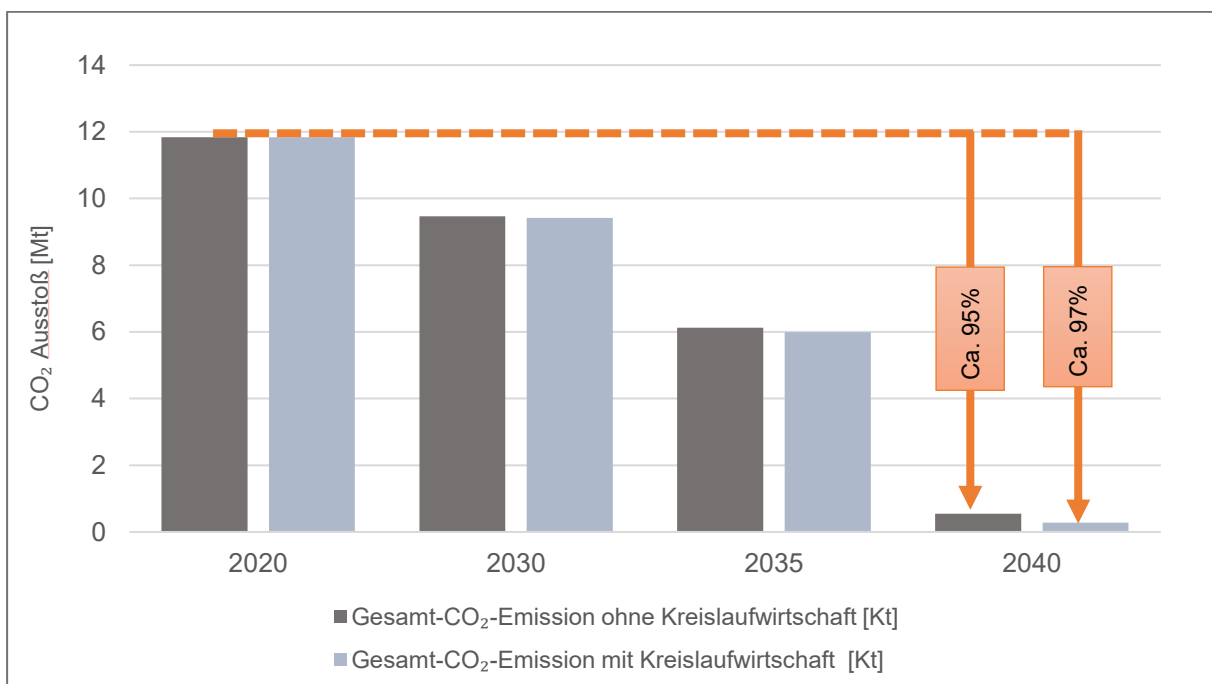


Abbildung 24: Gesamter CO<sub>2</sub>-Ausstoß Stahlindustrie

Die erklärten Energie- und Emissionseinsparungen hängen direkt von der Verfügbarkeit von hochwertigem Schrott ab. Wie in Abschnitt 4.1 erwähnt, deckt der Schrottstrom 2019 den Schrottbefordern vollständig, 2040 wird der Anstieg des Schrottbeforderns, zusätzlich zu einem verbesserten Recyclingsystem, den Import von hochwertigem Schrott erfordern.

## 5.2 Zementindustrie

Wie erwähnt können in der Zementindustrie recycelte Materialien als Klinkerersatz und als Brennstoff zur Deckung des den Wärmeenergiebedarf der Kalzinierungsreaktion verwendet werden.

Der Ersatz von Kalkstein als primärem Rohstoff für die Klinkerproduktion kann durch alternative Materialien wie recycelten Zement und Beton erfolgen (Kapitel 2 Teil Zement und Kapitel 4.2). Da für deren Verarbeitung weniger Energie erforderlich ist als für die Klinkerherstellung, wird der Energiebedarf für die Zementherstellung verringert. Geht man von einer konstanten Zementproduktion aus, wird der spezifische Energieverbrauch von 0,74 MWh im Jahr 2019 auf 0,6 MWh im Jahr 2040 pro Tonne Zement sinken, was einer Verringerung um 19 % entspricht (siehe Abbildung 25).

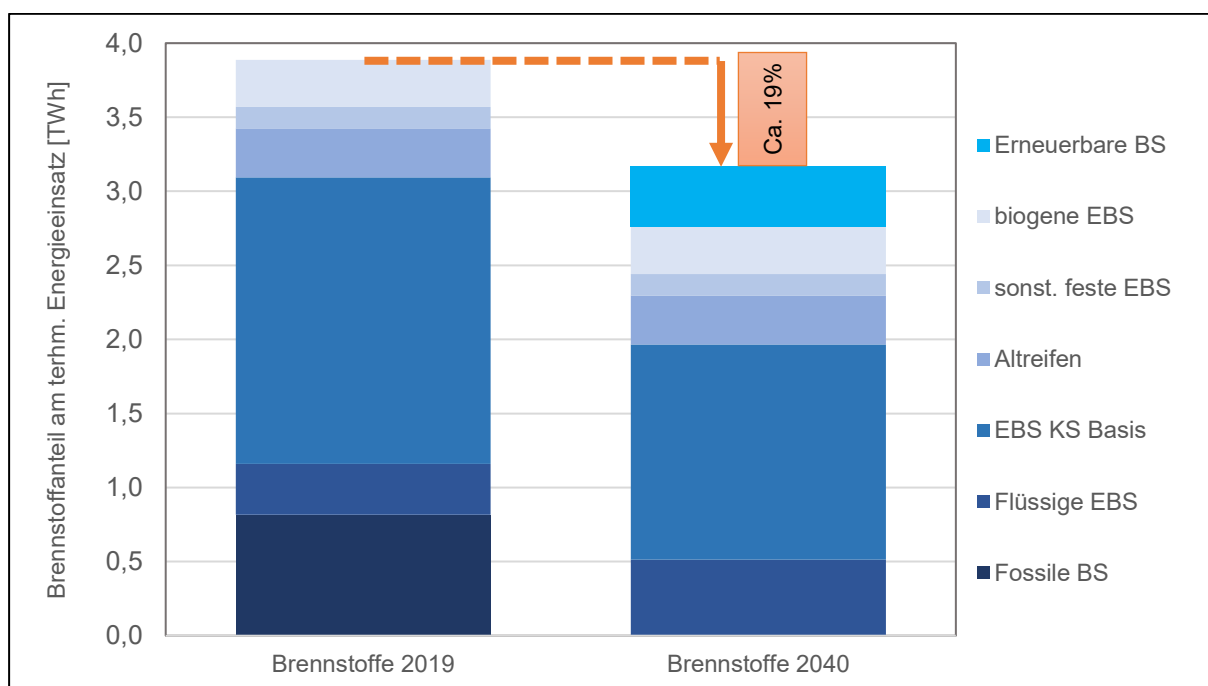


Abbildung 25: Thermischer Energieverbrauch in der Zementindustrie

Derzeit werden komplexe Abfallströme (z. B. gemischte Kunststoffabfälle) bei der Zementherstellung bevorzugt verbrannt. Durch die Verwendung dieser Abfälle anstelle von fossilen Brennstoffen konnten die Emissionen in den letzten Jahren reduziert werden. Allerdings enthalten diese Abfälle nicht-biogenen Kohlenstoff, der in der Verbrennung CO<sub>2</sub> freisetzt. Durch den Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energieträger und die Verwendung von Abfallstoffen mit einem höheren biogenen und einem geringeren fossilen



Anteil (Abbildung 25) werden die brennstoffbedingten Emissionen pro Tonne Zement von 0,22 Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2019 auf 0,15 Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2040 sinken.

Der Großteil der Emissionsminderung im Rahmen der Kreislaufwirtschaft kann jedoch durch den Ersatz von Klinker durch alternative Materialien erreicht werden. Die Senkung des Klinkeranteils im Zement von 65 % im Jahr 2019 auf 54 % im Jahr 2040, reduziert die prozessbedingten Emissionen um ca. 23 %. Durch die Kombination der beiden Emissionsminderungsschritte wäre eine Emissionseinsparung um etwa 26 % im Jahr 2040 im Vergleich zu 2019 machbar (vgl. Abbildung 26).

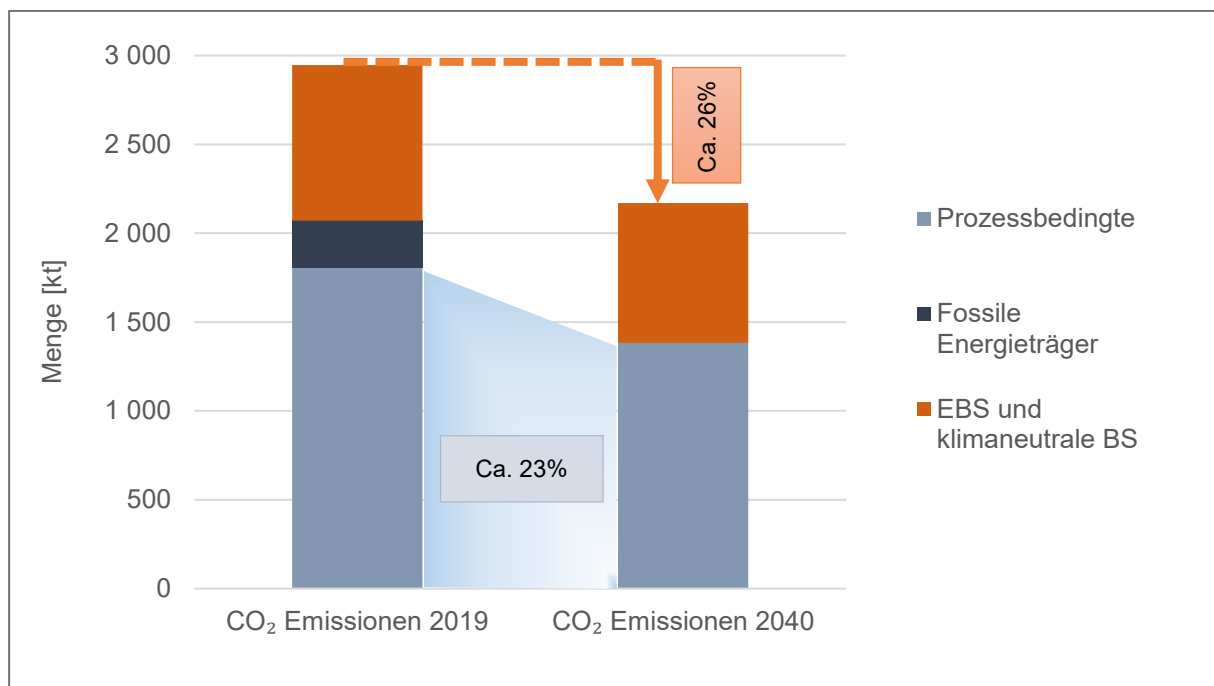


Abbildung 26: Gesamter CO<sub>2</sub>-Ausstoß Zementindustrie

### 5.3 Chemische und Petrochemische Industrie

In Österreich wurden von den gesamten Kunststoffen, die 2019 das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, nur 27 % über werkstoffliche Recyclingverfahren verwertet. Der Rest der ungetrennten Kunststoffabfälle wurde deponiert oder verbrannt. PP, PE und PET machten den Großteil der getrennt gesammelten Abfälle aus, die dem werkstofflichen Recycling zugeführt wurden. Aufgrund des hohen Potenzials dieser drei Kunststoffkategorien wurden in dieser Studie die Auswirkungen von Kunststoffrecyclingstrategien auf sie untersucht.

Bei der Herstellung von Primärkunststoffen wird der größte Teil der fossilen Energieträger als Rohmaterial verwendet (mehr als 60 %). Die restlichen 40% decken den Energiebedarf der Herstellung ab. Durch die Anwendung des werkstofflichen Recyclings wird einerseits der Bedarf an fossilen Energieträger als Energiequelle im Vergleich zur Herstellung von Neuprodukten verringert, und andererseits werden die fossilen Energieträger nicht mehr als Rohstoffe benötigt, so dass der Energieverbrauch erheblich sinkt. Die Energieeinsparung

würde durch die Anwendung des chemischen Recyclings noch verstärkt, bei dem die hochwertigen recycelten Kunststoffmonomere als Rohstoffe für die Herstellung neuer Materialien wiederverwendet werden können.

In dieser Studie gehen wir davon aus, dass der Anteil der saubereren Recyclingströme aufgrund der Verbesserung des Recyclingsystems (bessere Sammlung sowie chemisches Recycling (siehe Kapitel 4.3)) zunehmen wird und daher die Verwertungsquote von recyceltem Kunststoff von 27 % im Jahr 2019 auf ca. 50 % im Jahr 2040 steigen kann. Unter Berücksichtigung einer jährlichen Wachstumsrate von 1 % bei der Kunststoffproduktion im gleichen Zeitraum von 2019 bis 2040 wird der Energieverbrauch im Jahr 2040 im Vergleich zu 2019 um 21 % sinken (Abbildung 27).

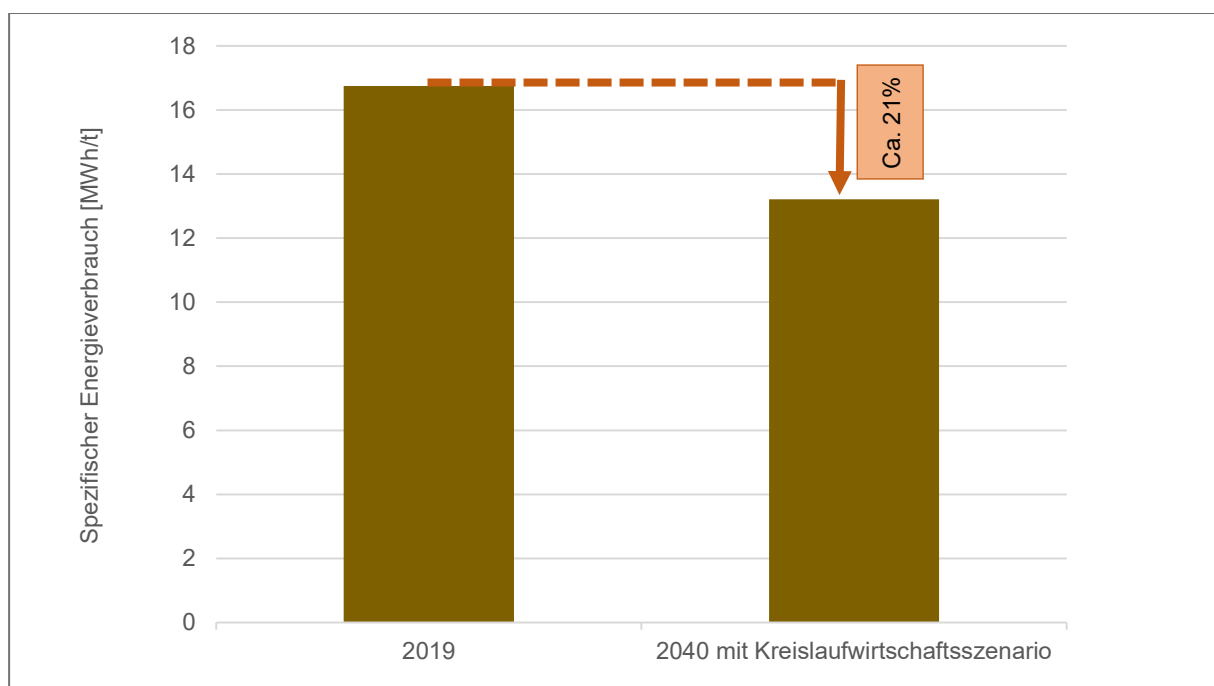


Abbildung 27: Spezifischer Energieverbrauch der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE).

Obwohl bei der Herstellung von Primärkunststoffen ein großer Anteil an fossilen Brennstoffen als Rohstoffe eingesetzt wird, entsprechen die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur dem Anteil, der sich aus dem Energiebedarf der Herstellung selbst ergeben.. Die Emissionen aus den als Rohstoffe eingesetzten fossilen Brennstoffen, die über Jahre oder Jahrzehnte im Material verbleiben, werden nicht berücksichtigt.

Mit dem oben erwähnten Ansatz der Kreislaufwirtschaft kann eine Emissionsreduzierung von 20 % erreicht werden, da das mechanische und chemische Recycling weniger Energie verbraucht als die Primärproduktion (Abbildung 28)

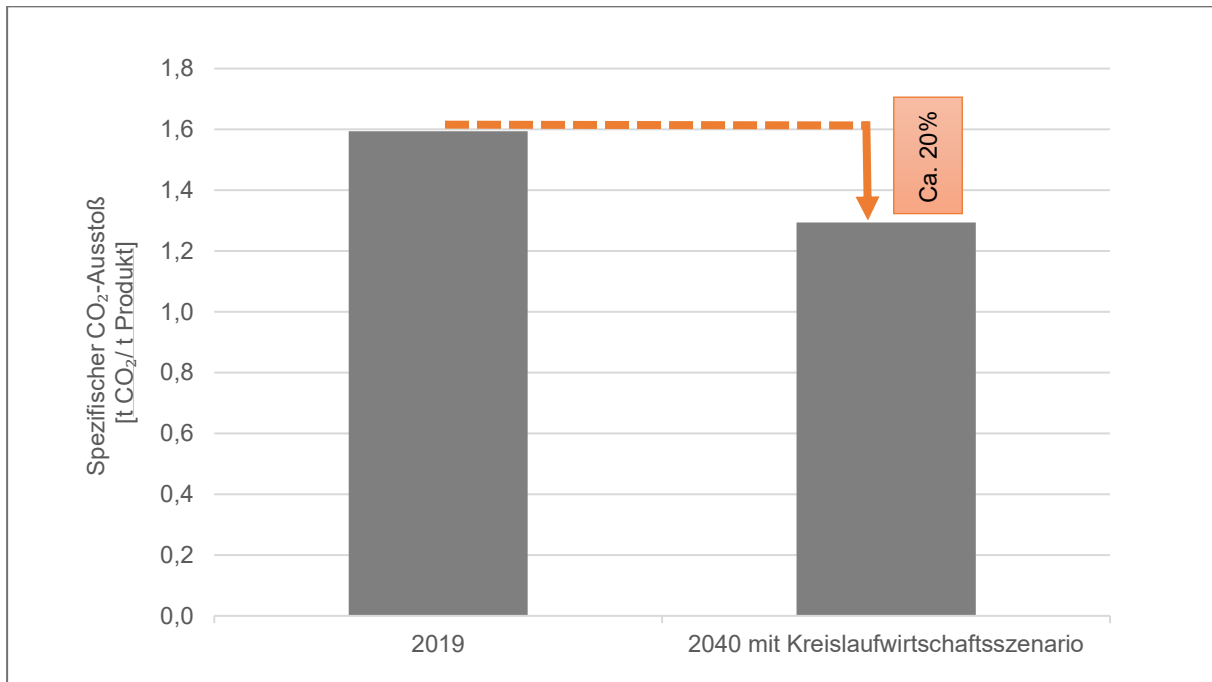


Abbildung 28: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE) mit der Kreislaufwirtschaft

Die Emissionsminderung kann noch weiter gesteigert werden, wenn der Ansatz der Kreislaufwirtschaft mit der Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energiequellen, zur Versorgung des Energiebedarfs der Herstellung kombiniert wird. Bei Anwendung dieser beiden Wege wäre eine Emissionsminderung von 54 % möglich (Abbildung 29)

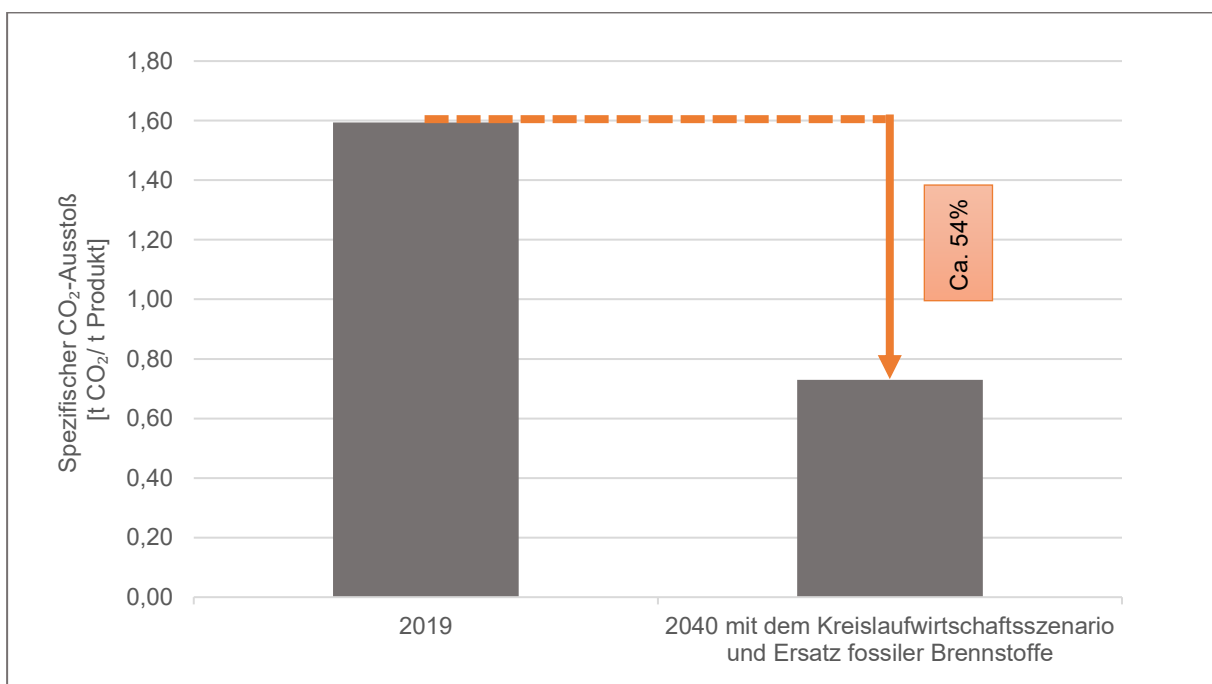


Abbildung 29: Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE) bei Kreislaufwirtschaft und Brennstoffwechsel

## 6 Zusammenfassung und abgeleitete Maßnahmen

Basierend auf den in Kapitel 4 erläuterten Stoffstrompotenzialen und den in Kapitel 5 beschriebenen Auswirkungen auf Energieeinsparung und Treibhausgasemissionen werden nachfolgend die relevanten Technologien angeführt und abgeleitete Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes beschrieben.

Der aktuelle Anteil an Wiederverwendung von Rohstoffen liegt, wie oben detailliert dargestellt, in der Eisen- und Stahlverarbeitung bei 10 %, in der Papierindustrie bei ca. 50 %, für Zement bei 15 - 30 % und bei der Kunststoffindustrie bei einem Viertel des Materialeinsatzes.

In den einzelnen Industrien sind durch Kreislaufwirtschaft und Technologiewechsel Einsparungen an CO<sub>2</sub> und Energie möglich. Für Eisen- und Stahl kann die Energieeinsparung bei 57 % und die CO<sub>2</sub>-Einsparung bei ca. 95 % liegen. Letzteres jedoch nur mit einem grundlegenden Wechsel der Produktionstechnologie. In der Zementindustrie liegt die mögliche Einsparung bei ca. 19 % im Energieeinsatz und bei ca. 26 % für CO<sub>2</sub>. Die Chemische und Petrochemische Industrie bietet ein Einsparpotential von ca. 21 % im spezifischen Energieverbrauch und von ca. 54 % CO<sub>2</sub> in der Kombination mit Brennstoffwechsel.

### 6.1 Überblick der relevanten Technologien

Die relevanten Technologien sind in Abbildung 30 überblicksweise zusammengefasst. Sie wurden farblich nach zugehörigen Branchen gegliedert und auf ihren Einsatz in der Industrie bzw. der Abfallwirtschaft unterteilt. Einige Technologien sind auch als Schnittstelle zwischen Industrie und Abfallwirtschaft zu sehen.

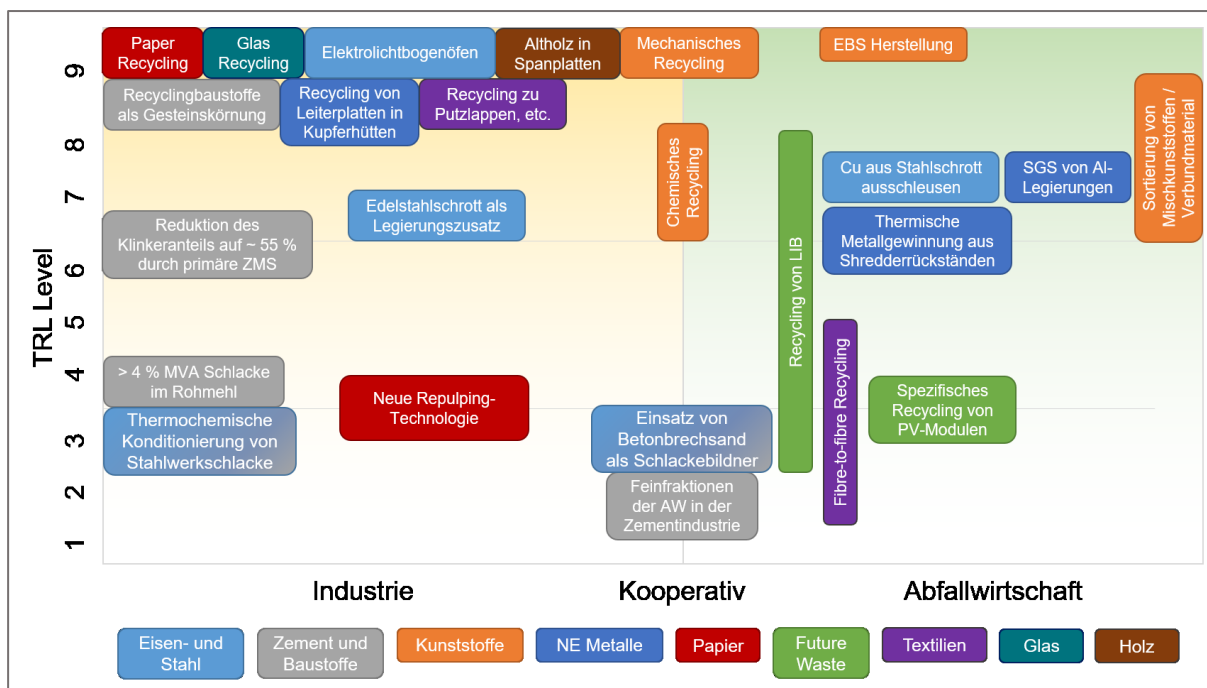


Abbildung 30: Zusammenfassung der relevanten Technologien gegliedert nach Industriesektoren

Die dargestellten Technologien werden in Tabelle 8 näher beschrieben. Dabei wird neben der Technologie und dem zugehörigen Technologiereifegrad, auf den Impact sowie den Bereich der Anwendung konkret eingegangen.

Tabelle 8: Zusammenfassung und Beschreibung der relevanten Technologien

Technologie	Beschreibung	Impact und Anwendung	TRL
<b>Stahlindustrie</b>			
<b>Elektrolichtbogenofen</b>	Verwertung des recycelten Stahlschrotts im konventionellen Elektrolichtbogenofen.	Ressourceneffizienz, THG und Energieeinsparung	9
<b>Ausschleusen von Kupfer aus Stahlschrott</b>	Sortierung von gemischten Schrotten auf Einzelteilbasis mittels SGS. Gezieltes Ausschleusen von Teilen, die relevante Verunreinigungen (insbesondere mit Kupfer) ausweisen.	Qualitätssteigerung, Abfallwirtschaft	7
<b>Edelstahlschrott als Legierungszusatz</b>	Sortierung von gemischten (Legierungs-) Stählen nach Legierungselementen mittels SGS. Herstellen von sortenreinen Legierungen und Einsatz der sortierten Schrotte als Legierungszusatz in der Herstellung von Legierungsstählen	Ressourceneffizienz und Qualitätssteigerung Vorsortierung in Abfallwirtschaft, Anwendung in Edelstahlwerk	7
<b>Zement- und Baustoffindustrie</b>			
<b>Herstellung und Einsatz von Recyclingbaustoffen</b>	Einsatzmaterialien und Qualitätseinstufungen sind in der Recycling-Baustoffverordnung (RBV 2015) geregelt. Stoffliche Verwertung für mineralische Baurestmassen im Sinne des (AWG 2002) zur Einsparung von Deponievolumen.	Ressourceneffizienz, Herstellung durch Abfallwirtschaft, Einsatz in Bauwirtschaft	9
<b>Reduktion des Klinkeranteils bei der Zementherstellung</b>	Substitution von Klinker durch primäre und/oder sekundäre Zuzahlstoffe auf ca. 55 % Klinkeranteil (derzeit ca. 65 %). Man unterscheidet zwischen hydraulischen Bindemitteln (z.B. Hüttensand) und Füllstoffen (z.B. gemahlener Kalkstein)	THG und Energieeinsparung, Zementindustrie	6-7
<b>Erhöhung des Sekundärrohstoffanteils im Klinker Rohmehl durch neue Materialien</b>	Rezyklierte Baustoffe wie Betonbrechsand und Ziegelsplitt aber auch Nebenprodukte wie Gießereisande und Reststoffe wie Schlacken und Aschen. Der Einsatz von ca. 4 % MVA-Asche führte im Labormaßstab zu keinen signifikanten Veränderungen des Klinkers. (Hoenig et al. 2020)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Zementindustrie	5

<b>Einsatz von Feinfraktionen der Abfallwirtschaft in der Zementindustrie</b>	Technologie steht am Anfang des Forschungsstadiums. Ziel ist es Feinfraktionen der Abfallwirtschaft aus der Aufbereitung von gemischten Siedlungsabfällen, Verbrennungsprozessen sowie dem Baustoffrecycling für die Zementindustrie nutzbar zu machen. Forschungsprojekt „MeteoR“ (Leitung MUL, Beteiligung u.a. TU Graz, RWTH Aachen, Industriepartner)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz sowie Schonung von Deponievolumen, Abfallwirtschaft und Zementindustrie	1-2
<b>ELDYNTON – Verfahren: Elektrodynamische Fragmentierung von Altbeton</b>	Trennung von Zementstein und Gesteinskörnung im Altbeton mittels ultrakurzen Unterwasserentladungen. Durch den geringeren elektrischen Widerstand an der Phasengrenze zwischen Zement und Gesteinskörnung erfolgt eine selektive Trennung. In der Betrachtung der Ökobilanzierung schneidet die herkömmliche Zementherstellung besser ab. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Trocknung des gewonnenen Materials. Wird eine Trocknung durch lastfreie Abwärme angenommen, schwenkt die Ökobilanz ins Positive. (Gehring et al. 2015)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Abfallwirtschaft	4-5
<b>Branchenübergreifende Technologien für Stahl- und Zementindustrie</b>			
<b>Thermochemische Konditionierung von Stahlwerkschlacke</b>	Reduktion von Eisenoxid zu metallischen Eisen und Abtrennung durch gravimetrische Separation. Durch anschließendes rasches Abkühlen der Schlacke bilden sich gleiche Mineralphasen mit vergleichbaren Eigenschaften wie Zement. (Adam et al. 2022)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Stahlindustrie in Kooperation mit Zementindustrie	4
<b>Einsatz von Betonbrechsand als Schlackebildner</b>	Rückstand aus der Altbetonaufbereitung der eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie Zement aufweist, jedoch andere Mineralphasen ausgebildet hat. Betonsand ist den Hauptkomponenten der Schlacke sehr ähnlich weshalb eine zumindest teilweise Substitution von Kalk und Quarzsand denkbar erscheint. (Adam et al. 2022)	Ressourceneffizienz, Stahlindustrie	2-3
<b>Nichteisen-Metallindustrie</b>			

<b>SGS von Aluminiumlegierungen</b>	Sortierung von gemischten Aluminiumschrott mit XRF-Sensorik bzw. bei Si-Legierungen auch LIBS-Sensorik erzielt die vielversprechendsten Ergebnisse. Durch Sortierung und sortenreines Einschmelzen kann der Bedarf an zuzugebenden Primäraluminium verringert werden. (Raatz et al. 2022)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Abfallwirtschaft und NE-Industrie	7
<b>Recycling von Leiterplatten aus EAG</b>	Leiterplatten stellen mitunter die wertstoffreichsten Bauteile von EAG dar. Der Zerstörungsgrad in der Zerkleinerung sollte möglichst gering sein, um einen Wertstoffaustrag in andere Fraktionen zu verhindern. (Sander et al. 2020) Sortierte Leiterplatten werden auf ca. 20 mm zerkleinert sowie Eisen und Aluminium abgetrennt. Das verbleibende Granulat ist reich an Edelmetallen und wird in Sekundärkupferhütten recycelt. (URT 2022)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Abfallwirtschaft und NE-Industrie	9
<b>Thermische Metallgewinnung</b>	Rückstände aus Shredderanlagen (Flusen, Feinfraktion) werden gemeinsam mit Rückständen aus der EAG-Aufbereitung in die Kupferschmelze eines Top Blown Rotary Converter (TBRC)-Konverters eingebracht. Aus diesen Reststoffen werden NE-Metalle in Form von Zinkstaub sowie Schwarzkupfer zurückgewonnen, welche in der NE-Sekundärmetallurgie Recycelt werden. Die entstehende Schlacke kann als Bindemittel in der Baustoffindustrie eingesetzt werden. Die überschüssige Energie kann zur Stromgewinnung und als Fernwärme genutzt werden. (Bernegger 2022)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Abfallwirtschaft und NE-Industrie, Baustoffindustrie	7
<b><i>Kunststoffindustrie (Chemische und Petrochemische Industrie)</i></b>			
<b>Mechanisches Recycling</b>	Sortenreine Kunststoffe werden zerkleinert, Störstoffe abgetrennt (z.B. durch Waschen) und anschließend zu Regranulaten weiterverarbeitet.	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Schnittstelle Abfallwirtschaft - Kunststoffindustrie	9



<b>Chemisches Recycling – Solvolyse-Prozess</b>	Umkehrung der Kondensationsreaktion der Polymertypen PA, PET, PC oder PUR. Dafür kommen Säuren, Laugen, Alkohole oder Amin-Verbindungen zum Einsatz. Hohe Reinheit der Abfälle ist erforderlich um Nebenreaktionen zu verhindern. (Schlummer et al. 2020)	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Schnittstelle Abfallwirtschaft – Chemische Industrie	7
<b>Chemisches Recycling – Thermolytische Verfahren</b>	Polyolefine werden bei Temperaturen von >300°C zu Kohlenwasserstoffgemischen verarbeitet. (Schlummer et al. 2020) Das ReOil® Verfahren der OMV ist ein derartiger Prozess in dem Polyolefine zu synthetischem Rohöl verarbeitet werden.	THG Einsparung und Ressourceneffizienz, Schnittstelle Abfallwirtschaft – Petrochemische Industrie	7-8
<b>Herstellung von Ersatzbrennstoffen</b>	EBS aus kunststoffhaltigen Abfällen werden den flugfähigen EBS zugeordnet. Je nach Einsatzort ist eine definierte Korngröße sowie Heizwert erforderlich. Je heizwertreicher und je feiner der EBS, desto aufwendiger ist die Aufbereitung und umso höher der Preis.	THG Einsparung (im Vergleich zu Primärbrennstoffen) und Nutzung des Energieinhaltes, Abfallwirtschaft	9
<b>Sortierung von Kunststoffmischungen und Kunststoffverbunden</b>	Die händische Sortierung von Kunststoffen wird zunehmend von sensorgestützten Systemen abgelöst. Diese basieren auf NIR-Technologie, die teilweise mit anderen Systemen z.B. Bilderkennung gekoppelt sind. Die Erkennung und Sortierung von sortenreinen Kunststoffen wird bereits industriell eingesetzt, während die richtige Sortierung von Kunststoffverbunden teilweise Probleme darstellt. Diese Probleme werden durch die Anwendung zusätzlicher Sensoren und Analysemethoden (z.B. Bilderkennung gekoppelt mit KI-System) verringert bzw. gelöst. Diese sind jedoch noch nicht industriell implementiert.	Ressourceneffizienz, Abfallwirtschaft	7-9
<b>Papierindustrie</b>			
<b>Papierrecycling</b>	Der Prozess des Papierrecyclings wird bereits langjährig industriell durchgeführt. Dieser besteht i.W. aus einer Sortierung, Abtrennung	THG und Energieeinsparung sowie Ressourcenschonung, Papierindustrie	9

	von Störstoffen (Plastikteile, Heftklammern, etc.), Zerkleinerung, Deinking (entfernen von Druckerfarbe) und bleichen.		
<b>Neue Repulping Technologien</b>	Einsatz einer neuen Zellstofftechnologie zur Verbesserung der Qualität des aus Altpapier hergestellten Zellstoffs. Der Frischzellstoff kann durch diesen Zellstoff für die Herstellung von hochwertigem Papier ersetzt werden.(Pulp & Paper Canada 2020)	Ressourceneffizienz, THG und Energieeinsparung	3-4
<b>Textilindustrie</b>			
<b>Textilrecycling zu niedrigwertigen Produkten</b>	Baumwolle und Baumwollmischgewebe lassen sich zu Putzlappen verarbeiten. Andere Textilien können durch zerkleinern zu Isolier- und Dämmstoffen verarbeitet werden. (TEXAID 2022)	Ressourcenschonung, Textilindustrie	9
<b>Fibre-to-Fibre Recycling</b>	Fibre-to-Fibre Recycling von Textilien ist derzeit ein breitgefächertes und ergebnisoffenes Forschungsthema. Ansätze dazu sind z.B. die Trennung von Baumwoll- und Polyesterfasern durch Enzyme (Bartl et al. 2021). Konkrete Ergebnisse laufender Projekte z.B. EU-Projekt „SCIRT“ (System Circularity and Innovative Recycling of Textiles) für 2023/24 erwartet.	THG und Energieeinsparung sowie Ressourcenschonung, Textilindustrie	2-5
<b>Future Waste</b>			
<b>Recycling von LIB</b>	Für das Recycling von LIB werden verschiedene Ansätze bzw. Kombinationen von Verfahren angewendet. Das Recycling von Industriemetallen wie Eisen, Aluminium und Kupfer wird meist mechanisch durchgeführt und bereits industriell betrieben. Nickel, Cobalt sowie Kupfer können pyrometallurgisch rückgewonnen werden. Unedle Metalle wie Lithium und Mangan finden sich in der Schlacke. Eine Schlackenaufbereitung ist derzeit wirtschaftlich nicht durchführbar, jedoch ist die Rückgewinnung dieser Metalle Gegenstand der Forschung. (Nigl et al. 2021)	Ressourcenschonung und Energieeinsparung, Spezialisierte Recyclingbetriebe	-

	Eine detaillierte Darstellung der verschiedenen Technologien übersteigt den Rahmen dieser Studie, weshalb dafür auf die Studie von Beigl et al. (2021) sowie auf die Publikation von Windisch-Kern et. al. (2022) verwiesen wird.		
<b>Recycling von Leistungselektronik aus Elektrofahrzeugen</b>	Die Leistungselektronik ist in Elektrofahrzeugen zumeist als gut zugängliche kompakte Einheit verbaut. Diese wird händisch demontiert und anschließend möglichst großteilig (z.B. mittels Prallmühle) aufgeschlossen. Leiterplatten werden analog zu jenen aus EAG in Kupferhütten recycelt. Andere Wertstoffe z.B. Aluminium werden zuvor abgetrennt. (Bulach et al. 2017)	Ressourcenschonung und Energieeinsparung, Abfallwirtschaft, NE-Metallindustrie	8-9
<b>Recycling von PV-Modulen</b>	Derzeit Mitbehandlung mit anderen Abfällen (z.B. EAG) aufgrund der geringen Menge. Rückgewonnen werden vorwiegend Metalle. Das Mengenmäßig überwiegende hochwertige Glas wird zumeist für minderwertige Glasprodukte eingesetzt. Materialspezifische Recyclingverfahren befinden sich im Entwicklungsstadium (Dobra et al. 2020)	Ressourcenschonung und Energieeinsparung, Abfallwirtschaft und Glasindustrie	-
<b>Rückgewinnung von Silizium aus PV-Modulen</b>	Rückgewinnung von Silizium aus aufbereiteten Solarzellenbruchstücken mittels nasschemischen Ätzens und anschließender Kristallisation des aufgereinigten Siliziums. (Fraunhofer CSP 2022)	THG und Energieeinsparung sowie Ressourcenschonung, spezialisierte Recyclingindustrie	4-5
<b>Glasindustrie</b>			
<b>Recycling von Verpackungsglas</b>	Je 10 % eingesetzten Altglas in der Glasproduktion reduziert sich der Energieverbrauch um 3 % und die CO <sub>2</sub> -Emissionen um 7 %. Die Einsatzquote von Recyclingglas beträgt bei Weißglas bis zu 60 %, bei Braunglas bis zu 70 % und bei Grünglas bis zu 90 %. (AGR 2017)	THG und Energieeinsparung sowie Ressourcenschonung, Glasindustrie	9

<b>Verbesserungen im Flachglasrecycling</b>	Durch eine Weiterentwicklung von Aufbereitungstechnologien (z.B. SGS) entstehen neue Möglichkeiten zur Störstoffabscheidung und Sortierung. Das Agglomerieren von feinen Glaspartikeln (< 5 mm) ermöglicht ein Einschmelzen dieser Partikel.	Qualitätssteigerung, THG und Energieeinsparung sowie Ressourcenschonung, Glasindustrie	6-7
<b>Holzindustrie</b>			
<b>Verwertung von Altholz in Spanplatten</b>	Unbehandelte Holzabfälle ohne Verunreinigungen werden zu etwa 25 - 30 % als Rohstoff in der Spannplattenindustrie eingesetzt. Weitere 50 % der Rohstoffe stammen aus Sägenebenprodukten. Eine weitere Steigerung der Einsatzquote ist möglich, jedoch nur zum Ersatz von Primärholz sinnvoll, da Sägenebenprodukte ebenfalls ein hochwertiges Sekundärmaterial darstellen.	Ressourcenschonung, Holzindustrie	9

## 6.2 FTI-Empfehlungen

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Studie sowie den Diskussionsrunden des am 4. November 2022 vom RFTE veranstalteten Workshops werden folgende Schwerpunkte und Maßnahmen zur österreichischen FTI-Strategie empfohlen:

- Weiterentwicklung von (sensorgestützten) Sortiersystemen auf Einzelteilbasis für spezifische Wertstoffströme zur Industriereife
  - Zum Ausschleusen von mit Kupfer verunreinigten Teilen aus Stahlschrott
  - Sortierung von Aluminium und Legierungsstählen auf Basis der Legierungselemente
  - Zielgerichtete Sortierung von Kunststoffmischungen bzw. -verbunden für alternative Recyclingverfahren (z.B. chemisches Recycling)
  - Abtrennung von Störstoffen und Verunreinigungen von Glasabfällen insbesondere für das Recycling von Flachglas / Spezialgläsern
- Forschung zum Einsatz alternativer Rohstoffe in der Zementindustrie
  - Größtmögliche Substitution von Klinker durch primäre und sekundäre Zuzugstoffe ohne relevante Änderung der Zementeigenschaften
  - Suche nach alternativen latent-hydraulischen Bindemitteln als Substitut für Hüttensand
  - Ersatz von primären Rohstoffen im Zementrohmehl durch bereits entsäuerte sekundäre Rohstoffe z.B. Reststoffe aus der Baustoffaufbereitung
- Forschung in Bezug auf neue Technologien in der Papierindustrie
  - Neue Repulping Technologie zur Verbesserung der Qualität von Recyclingfasern
- Erforschung von Einsatzmöglichkeiten für derzeit weitgehend ungenützte Stoffe wie Schlacken / Aschen aus der Abfallverbrennung sowie Feinfraktionen aus der Abfallaufbereitung
  - z.B. Einsatz in der Zementindustrie und / oder als Schlackebildner in der Metallindustrie
- Beeinflussung der Reststoffqualität in Produktionsprozessen zur Herstellung von hochwertigen Nebenprodukten bzw. Reststoffen
  - Thermochemische Konditionierung von (Stahlwerk-) Schlacken mit anschließender rascher Abkühlung zur Ausbildung latent-hydraulischer Eigenschaften
- Weiterentwicklung abfall- und stoffspezifischer Recyclingtechnologien
  - Überführen von chemischen Recyclingverfahren für Kunststoffe zur Industriereife
  - Förderung konkreter Projekte zum Textilrecycling (Fibre-to-Fibre) basierend auf den Forschungsergebnissen von derzeit noch laufenden Studien
- Förderung der Entwicklung von industrienahen Recyclingloops insbesondere für Abfälle, deren Ablagerung in den nächsten Jahren verboten wird. Dazu zählen u.a.:
  - Künstliche Mineralfasern (Recycling beim Hersteller, Einsatz in Zementindustrie bzw. im Bergversatz)

- Gipszeugnisse im Baustoffbereich (Gipskartonplatten, etc.)
- Beteiligung an der (Weiter-) Entwicklung von Technologien und Recyclingsystemen von Future Wastes bis zur Industriereife in europäischer Zusammenarbeit. Von besonderer Bedeutung sind dabei:
  - Elektroaltfahrzeuge
  - Lithium-Ionen-Batterien
  - PV-Module
- Adaptierung der FTI-Richtlinie für eine verbesserte Förderung von Pilot- und Demonstrationsanlagen bzw. umsetzungsorientierter Projekte

### **6.3 Weitere Empfehlungen rechtlicher oder organisatorischer Natur**

Neben den Empfehlungen bezüglich FTI-Strategie wurden weitere Handlungsfelder insbesondere in Bezug auf die rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich identifiziert.

#### **Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) und artverwandte Rechtsmaterien**

Das Abfallwirtschaftsgesetz ist historisch in den vergangenen Jahrzehnten gewachsen und wurde laufend an die Gegebenheiten bzw. Notwendigkeiten der jeweiligen Zeit angepasst. In Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft finden sich jedoch Divergenzen, die abgebaut werden müssen. Der Abfallbegriff ist sehr weit gefasst, was in der Verwertung zu Problemen führen kann. Produzierende Betriebe, die Materialien aus Abfällen verwenden könnten, haben oftmals keine Abfallrechtliche Genehmigung dafür und wollen diese aufgrund des dahinterstehenden bürokratischen Aufwandes auch nicht erwirken. Es ist wichtig, dass Abfälle als solche gesammelt und behandelt werden, jedoch ist es für eine Kreislaufwirtschaft ebenso notwendig nach einer entsprechenden Aufbereitung ein rasches Abfallende zu erwirken.

Ein ähnliches Problem stellt sich in der Abgrenzung zwischen Abfällen und Nebenprodukten dar. Die Eigenschaften eines Nebenproduktes sind im AWG definiert als Stoff oder Gegenstand der als integraler Bestandteil eines Produktionsprozesses entsteht, ohne weitere über gewöhnliche Verfahren hinausgehende Verarbeitung direkt verwendet werden kann und tatsächlich auch verwendet wird. Weiters gilt, dass das Nebenprodukt unbedenklich für den beabsichtigten und sinnvollen Zweck ist und keine Schutzgüter durch die Verwendung beeinträchtigt werden. Diese Definition ist gleichermaßen eingrenzend wie schwammig formuliert, weshalb Unternehmen die Anerkennung von derartigen Stoffen oft bis zu einem Höchstgericht ausjudizieren müssen.

Diese restriktiven Regelungen waren in der Vergangenheit durchaus notwendig, um das Abfallwirtschaftssystem derart zu entwickeln, wie es heutzutage in Österreich dasteht. Es ist jedoch an der Zeit, dieses System kritisch zu hinterfragen und an die Gegebenheiten und Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft anzupassen um Innovationen und kreative Lösungen zum Umgang mit Reststoffen zu fördern und nicht zu verhindern. Es werden daher folgende Maßnahmen zur Anpassung des AWG sowie der damit verbundenen Rechtsnormen vorgeschlagen:

- Kritische Betrachtung der Begriffe und Definitionen von „Abfall“, „Reststoff“, „Nebenprodukt“, „Sekundärrohstoff“ sowie „Recycling-Rohstoff“ und eine Neuregelung zum einfachen Einsatz von wertvollen Rohstoffen, die potenziell in das Abfallregime hineinfallen.
- Abbauen von Hindernissen zum Einsatz bzw. einer Schlechterstellung von sekundären Rohstoffen wie beispielsweise streichen von Grenzwerten, die keine Praxisrelevanz aufweisen (z.B. Gesamtgehalte von Schwermetallen in mineralischen Produkten, die fest in eine Mineralphase eingebunden sind). Sekundäre Rohstoffe müssen nach den gleichen (sinnvollen) Qualitätskriterien bewertet werden können, wie primäre Rohstoffe.
- Das AWG bestrebt einerseits das Ausschleusen von Schadstoffen und andererseits die bestmögliche Nutzung von Ressourcen. Diese beiden Ziele stehen mitunter im Widerspruch zueinander, da bei einer bestmöglichen Schadstoffentfrachtung auch Ressourcen verschwendet werden. Es muss eine gute Ausgewogenheit zwischen diesen Zielen gefunden werden.
- Besonders hochwertige Rohstoffe aus Abfällen sollten eine entsprechende Zuordnung als solche erhalten (Sekundärrohstoff bzw. R-Rohstoff) und im Abfallrecht privilegiert werden (z.B. als Produkt anstatt als Abfall). Dies fördert die Entstehung von industrienahen Recyclingloops unmittelbar zwischen einzelnen Branchen außerhalb der Abfallwirtschaft.
- Einfache Regelung zur Second-Life-Nutzung von End-of-Life Produkten.
- Vorgaben, einen Mindestanteil an sekundären Rohstoffen in Produkten zu verwenden, bzw. die (reale) Recyclingfähigkeit von Produkten am Lebensende sicherzustellen, schaffen eine Verbindlichkeit zu kreislaufwirtschaftlichem Denken. Die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen muss bei der Vorschreibung derartiger Quoten jedoch berücksichtigt werden.
- Die aktuelle Kreislaufwirtschaftsstrategie beinhaltet viele wertvolle Ideen und Maßnahmen, die vergleichbare Ziele verfolgen. Diese soll verbindlich beschlossen und umgesetzt werden.

## Normen

Das Normungswesen ist von den unmittelbaren Erkenntnissen aus Forschung und Entwicklung weitgehend entkoppelt. Für die Überarbeitung von Normen braucht es Initiatoren, die derartige Vorhaben vorantreiben. Damit Normen dem Einsatz von Sekundärmaterialien nicht entgegenstehen, müssen einige davon im Sinne der Kreislaufwirtschaft überarbeitet werden. Es muss dafür Sorge getragen werden, dass das Know-How aus Forschung und Entwicklung in der Normung zeitnah berücksichtigt wird. Da im Zuge der universitären Arbeit dafür jedoch kaum Ressourcen zur Verfügung stehen, müssen entsprechende Maßnahmen getroffen werden:

- Die österreichische Normenlandschaft sollte auf ihre Konformität bzw. die Gegensätze von Normen zur Kreislaufwirtschaft durchforstet und Notwendigkeiten für Änderungen aufgezeigt werden.

- Analog zum Beispiel von Stiftsprofessuren sollten Stellen in Universitäten geschaffen bzw. Kapazitäten von Mitarbeitern dafür vorgesehen werden, die Erkenntnisse der Forschung in den Gremien der Normungsinstitute einzubringen und zu vertreten.
- Ein Beispiel für die Notwendigkeit der Adaption entsprechender Fachnormen liegt im Baustoffbereich. Dort werden u.a. für verschiedene Zementarten maximale Anteile an klinkersubstituierenden Hauptbestandteilen festgeschrieben. Zielgerichtete Normungsansätze wären eine Beschränkung auf die notwendigen Materialeigenschaften wie Festigkeit, Fließfähigkeit, Aushärtedauer, etc. um eine größtmögliche Klinkersubstitution zu fördern.

## Weitere Maßnahmen und Empfehlungen

Eine Maßnahme, die primär einer organisatorischen Umsetzung bedarf, jedoch auch in Rechtsnormen zu regeln ist, ist die Ausweitung der getrennten Wertstoffsammlung im kommunalen wie auch im gewerblichen und industriellen Bereich. Beispielsweise werden Kunststoffe vorwiegend als Verpackungen über die Leichtverpackungssammlung erfasst. Nicht-Verpackungskunststoffe werden vielfach über die gemischte Rest-, Sperr- oder Gewerbemüllsammlung entsorgt und werden dadurch primär thermisch verwertet. Durch eine fokussierte Sammlung von allen Kunststoffabfällen, z.B. durch die Ausweitung der LVP Sammlung, steht eine größere Menge an Material für ein potenzielles Recycling zur Verfügung. Eine Ausweitung der Quellensortierung von Glas von bisher zwei auf drei Fraktionen (weis, grün und braun) kann dazu beitragen, die Recyclingquoten von Altglas weiter zu erhöhen.

Ein Steuerungsinstrument weg von der Deponierung hin zu einer stofflichen Verwertung stellt der ALSAG-Beitrag dar. Durch eine Erhöhung des ALSAG-Beitrags für potenziell recyclingfähige Abfälle die derzeit deponiert werden (z.B. bestimmte Bau- und Abbruchabfälle) wird das Recycling indirekt subventioniert bzw. Anreize für eine bessere Quellensortierung geschaffen.

Die flächendeckende Sammlung von Alttextilien ist bereits durch die EU-Abfallrahmenrichtlinie ab dem 1.1.2025 verpflichtend für alle Mitgliedsstaaten vorgesehen. In der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie finden sich konkrete Maßnahmen zu Textilien und Textilabfällen auf die an dieser Stelle verweisen wird.

Die Aus- und Weiterbildung im Themenfeld Kreislaufwirtschaft wird ein wesentlicher Faktor der Zukunft sein. Dies sollte bereits im elementaren Bildungsbereich verankert werden, um ein systematisches und interdisziplinäres Denken zu fördern. Das Thema Klimaschutz und damit verbundenen Fachbereiche wie die Kreislaufwirtschaft sind gerade bei jungen Menschen sehr verwurzelt und es besteht großes Interesse daran. Durch gezielte Initiativen können nicht nur die Probleme fachlich fundiert aufgezeigt, sondern insbesondere die Motivation zum Mitwirken an der Findung und Umsetzung von Lösungen geweckt und gefördert werden.

Ebenso notwendig ist es jedoch, entsprechende Stellen an Universitäten und Forschungseinrichtungen für wissenschaftliches Personal zu schaffen und aktiv Talente in



diesem Bereich anzuziehen. Dies sollte insbesondere in einem europäischen Kontext gesehen werden. Durch forcieren von IPCEI-Programmen und Allianzen mit anderen EU Staaten (z.B. Deutschland, Schweden, BeNeLux-Staaten) und deren Forschungseinrichtungen können Kompetenzen gebündelt werden, um die unionsweiten Herausforderungen zielgerichtet anzugehen.

Zur Finanzierung von Demonstrationsanlagen sowie der Überführung von Technologien in den industriellen Maßstab müssen ausreichend Finanzmittel zur Verfügung stehen. Ein wesentlicher Punkt, dass derartige Projekte gelingen ist das Zusammenwirken von Industrie und wissenschaftlichen Partnern wie Forschungsinstitutionen und Universitäten. Die Förderquoten in der Kategorie „experimentelle Entwicklung“ in den FFG Förderschienen sinken für universitäre Partner im Vergleich zur grundlegenden Forschung deutlich. Dadurch kann die wissenschaftliche Expertise in derartigen Projekten teilweise nicht im notwendigen Ausmaß eingebracht werden bzw. können sich Forschungseinrichtungen nicht an derartigen Projekten beteiligen, da es finanziell oft nicht möglich ist.

Neben der Forschungsförderung sollte vermehrt auch privates Risikokapital über die Finanzmärkte lukriert werden um Projekte im Industriemaßstab umsetzen zu können. Dafür braucht es Anlageformen, in die private wie institutionelle Investoren gezielt für Projekte im Zusammenhang mit Kreislaufwirtschaft, Energiewende und nachhaltige Technologien investieren können.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literatur

ADAC (2022): Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/>, zuletzt aktualisiert am 16.08.2022, zuletzt geprüft am 10.10.2022.

Adam, Christian; Schraut, Katharina; Adamczyk, Burkart; Weimann, Karin; Gluth, Gregor (2022): Erzeugung klimaschonender Bindemittel als Alternativen zu Zement durch thermochemische Behandlung von mineralischen Nebenprodukten und Abfällen. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Dieter Senk, Hermann Wotruba, Helmut Antrekowitsch und Roland Pomberger (Hg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.

Agora Industry (2022): Mobilising the circular economy for energy-intensive materials. How Europe can accelerate its transition to fossil-free, energy-efficient and independent industrial production. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/mobilising-the-circular-economy-for-energy-intensive-materials-study>.

AGR (2017): Austria Glas Agenda 2030. Austria Glas Recycling GmbH. Online verfügbar unter [https://www.agr.at/\\_Resources/Persistent/d/7/9/3/d793770df6bb70630522dff823b70e67114fe231/AustriaGlasAgenda2030\\_webversion.pdf](https://www.agr.at/_Resources/Persistent/d/7/9/3/d793770df6bb70630522dff823b70e67114fe231/AustriaGlasAgenda2030_webversion.pdf), zuletzt geprüft am 14.07.2022.

AMAG Austria Metall AG (2020): Annual report 2020. AMAG Austria Metall AG. Ranshofen, Austria. Online verfügbar unter [https://www.amag-al4u.com/fileadmin/user\\_upload/amag/Investor\\_Relations/Finanzen\\_und\\_Berichte/Geschaefst\\_sberichte/AMAG\\_Magazin\\_2020\\_en\\_final.pdf](https://www.amag-al4u.com/fileadmin/user_upload/amag/Investor_Relations/Finanzen_und_Berichte/Geschaefst_sberichte/AMAG_Magazin_2020_en_final.pdf).

Austropapier (2021): Papier aus Österreich 2020/21. Online verfügbar unter <https://austropapier.at/website2020/wp-content/uploads/2021/08/bb20-ganzer-bericht-hires.pdf>.

AVAW (2022): Versuchsstand für sensorgestützte Sortierung. Online verfügbar unter [https://www.avaw-unileoben.at/de/forschung-geraete\\_und\\_technikum-versuchstand\\_fuer\\_sensorgestuetzte\\_sortierung/](https://www.avaw-unileoben.at/de/forschung-geraete_und_technikum-versuchstand_fuer_sensorgestuetzte_sortierung/).

AWG (2002): Abfallwirtschaftsgesetz. BGBl. I Nr. 102/2002, vom BGBl. I Nr. 200/2021. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>, zuletzt geprüft am 13.07.2022.

Bajpai, Pratima (2016): Chapter 3 - Pulp and Paper Production Processes and Energy Overview. In: Pratima Bajpai (Hg.): Pulp and Paper Industry. Amsterdam: Elsevier, S. 15–49. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128034118000032>.

Bartl, Andreas; Boschmeier, Emanuel; Ipsmiller, Wolfgang (2021): Aus Alt mach Neu. Beim Aussortieren alter Kleidung ist die Frage: Wegwerfen oder recyceln? Wie sich Fasern wiederverwenden lassen, erforschen Wissenschaftler\_innen der TU Wien im Projekt SCIRT. TU Wien. Online verfügbar unter <https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/aus-alt-mach-neu>, zuletzt aktualisiert am 14.07.2021, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Bauer, Sonja; Zettl, Elisabeth (2018): Innovative Techniken: Festlegung von besten verfügbaren Techniken (BVT) in Europa für die Bereiche der Keramik-, Zement-, Nahrungsmittel- und in der chemischen Industrie. München. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-16\\_texte\\_78-2018\\_materialeffizienz-keramikindustrie\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-16_texte_78-2018_materialeffizienz-keramikindustrie_0.pdf), zuletzt geprüft am 01.08.2022.

Beigl, Peter; Scherhauser, Silvia; Part, Florian; Jandric, Aleksander; Salhofer, Stefan; Nigl, Thomas et al. (2021): ENTWICKLUNG EINER WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR DAS RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN (LIB) IN ÖSTERREICH. Wien.

Bernegger (2022): TMG (thermische Metallgewinnung). Online verfügbar unter <https://tbs.bernegger.at/#toggle-id-3>, zuletzt geprüft am 15.11.2022.

BKA (2020): Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024. Wien. Online verfügbar unter <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/bundeskanzleramt/die-bundesregierung/regierungsdokumente.html>.

BMK (2022): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022. Teil 1; Entwurfsfassung zur Konsultation. Wien.

Bulach, Winfried; Schüler, Doris; Sellin, Guido; Elwert, Tobias; Schmid, Dieter; Goldmann, Daniel et al. (2017): Elektrofahzeugrecycling 2020. Schlüsselkomponente Leistungselektronik. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Elektrofahzeugrecycling-2020-Schlüsselkomponente-Leistungselektronik.pdf>.

CNBM (2022): The Existing Problems and the Quality-improving Methods about Waste Paper Pulp. china. Online verfügbar unter <http://www.aymachinery.com/news/how-to-improve-waste-paper-pulp-quality.html>, zuletzt geprüft am 23.11.2022.

CORDIS (2021): System Circularity and Innovative Recycling of Textiles. Online verfügbar unter <https://cordis.europa.eu/project/id/101003906/de>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Diendorfer, Christian; Gahleitner, Bernhard; Dachs, Bernhard; Kienberger, Thomas; Nagovnak, Peter; Böhm, Hans et al. (2021): Klimaneutralität Österreichs bis 2040. Beitrag der österreichischen Industrie. Austria Institute of Technologie; Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl EVT; Johannes Kepler Universität, Energie Institut; Austrian Energy Agency.

Dobra, Tudor; Wellacher, Martin; Pomberger, Roland (2020): END-OF-LIFE MANAGEMENT OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN AUSTRIA: CURRENT SITUATION AND OUTLOOK. In: *Detritus* (10), S. 75–81. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13915.

DVO (2008): Deponieverordnung. BGBl. II Nr. 39/2008, vom zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 144/2021.

Erben, Hartmut; Galler, Robert (2014): Tunnel spoil - New technologies on the way from waste to raw material / Tunnelausbruch - Neue Technologien für den Weg vom Abfall zum Rohstoff. In: *Geomechanik Tunnelbau* 7 (5), S. 402–410. DOI: 10.1002/geot.201400043.

EU Science Hub (2020): CRM list 2020. Europäische Kommission. Online verfügbar unter <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>.

European Aluminium (2019): Vision 2050, European Aluminium's Contribution To the EU's Mid- Century Low- Carbon Roadmap. A vision for strategic, low carbon and competitive aluminium. European Aluminium. Brussels, Belgium. Online verfügbar unter [https://www.european-aluminium.eu/media/2545/sample\\_vision-2050-low-carbon-strategy\\_20190401.pdf](https://www.european-aluminium.eu/media/2545/sample_vision-2050-low-carbon-strategy_20190401.pdf).

European Commission (2018): In-depth analysis in support of the commission communication com. A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. European Commission. Brussels.

FFG (2022): RECOVER-E. Sicherheitsrelevante Fragen bei Unfallsituationen mit batterieelektrischen Fahrzeugen. Online verfügbar unter <https://projekte.ffg.at/projekt/4169077>.

Fraunhofer CSP (2019): EoL – Development of an Industrial Recycling Process for PV Modules. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eol.html>.

Fraunhofer CSP (2022): PERC-Solarzellen aus 100 Prozent recyceltem Silizium. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/perc-solarzellen-aus-recyceltem-silizium-hergestellt.html>.

Frischenberger, Helmut; Karigl, Brigitte; Lampert, Christoph; Pölz, Werner; Schindler, Ilse; Tesar, Maria et al. (2010): Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Umweltbundesamt AT (REP-0303).

Gehring, Florian; Albrecht, Stefan; Homolka, Sarah; Leistner, Philip; Thome, Volker; Seifert, Severin (2015): Aus Altbeton wird Beton - ein innovativer Recyclingansatz. In: *Bauphysik* 37 (5), S. 296–300. DOI: 10.1002/bapi.201510032.

Gelbmann, U. (2012): Das Verwertungsparadoxon: Die neue Komplexität in der Abfallwirtschaft. In: Karl E. Lorber (Hg.): DepoTech 2012. Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten; Tagungsband zur 11. DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben/Österreich, 6. - 9. November 2012. Leoben: Inst. für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik.

Hoenig, Volker; Knöpfelmacher, Aneta; Vinnemann, Bettina; Ebert, Dominik; Deike, Rüdiger (2020): Eignung der Aufbereiteten Feinfraktion von MVA Schlacken als Rohstoffkomponente im Zementherstellungsprozess. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky und Dieter Senk (Hg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 136–151.

Hoenig, Volker; Seiler, Cornelia; Bodendiek, Nils; Hoppe, Helmut (2015): Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess - Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen. Hg. v. Verein Deutscher Zementwerke gGmbH. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Düsseldorf.

Holzer, Alexandra; Wiszniewski, Lukas; Windisch-Kern, Stefan; Raupenstrauch, Harald (2022): Optimization of a Pyrometallurgical Process to Efficiently Recover Valuable Metals from Commercially Used Lithium-Ion Battery Cathode Materials LCO, NCA, NMC622, and LFP. In: *Metals* 12 (10), S. 1642. DOI: 10.3390/met12101642.

IEA (2018): Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Unter Mitarbeit von Cement Sustainability Initiative – CSI, World Business Council for Sustainable Development – WBCSD. International Energy Agency. Paris, France.

Keränen, Janne T.; Retulainen, Elias (2016): Changing quality of recycled fiber material. Part 1. Factors affecting the quality and an approach for characterisation of the strength potential. In: *BioRes* 11 (4), S. 10404–10418. DOI: 10.15376/biores.11.4.10404-10418.

Kettele, Moritz; Velimirovic, Nicole; Schöggel, Josef Peter; Baumgartner, Rupert (2022): Circular Companies. Wie Unternehmen die Chancen der Kreislaufwirtschaft nutzen können. In: *Green Tech Radar* (April 2022).

Lee, Chee Keong; Ibrahim, Darah; Che Omar, Ibrahim (2013): Enzymatic deinking of various types of waste paper: Efficiency and characteristics. In: *Process Biochemistry* 48 (2), S. 299–305. DOI: 10.1016/j.procbio.2012.12.015.

Leitner, Melanie Liselotte (2019): Recyclingprozesse für Photovoltaik-Module. Montanuniversität, Leoben. Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Material Economics (2018): The Circular Economy a Powerful Force for Climate Mitigation. Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry. Sweden.

Mauschitz, Gerd (2021): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Berichtsjahr 2020. Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien. Wien, Austria. Online verfügbar unter [https://www.zement.at/downloads/downloads\\_2021/Emissionen\\_2020.pdf](https://www.zement.at/downloads/downloads_2021/Emissionen_2020.pdf).

Mauschitz, Gerd (2022): Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie Berichtsjahr 2021. Hg. v. TU Wien. Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften. Wien.

McKinsey & Company (2022): Fiber-to-fiber recycling at scale could be achieved by 2030, creating a new and sustainable circular industry in Europe. Unter Mitarbeit von Saskia Hedrich, Jonatan Janmark, Moa Strand, Nikolai Langguth und Karl-Hendrik Magnus. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>, zuletzt aktualisiert am 07/2022, zuletzt geprüft am 31.10.2022.

- Montanwerke Brixlegg AG (2022a): Nachhaltigkeitsbericht 2021. Brixlegg. Online verfügbar unter [https://www.montanwerke-brixlegg.com/wp-content/uploads/2022/02/MB\\_Nachhaltigkeitsbericht\\_2021\\_DE\\_2.pdf](https://www.montanwerke-brixlegg.com/wp-content/uploads/2022/02/MB_Nachhaltigkeitsbericht_2021_DE_2.pdf).
- Montanwerke Brixlegg AG (2022b): Upcycling. Brixlegg. Online verfügbar unter <https://www.montanwerke-brixlegg.com/upcycling/>, zuletzt geprüft am 29.09.2022.
- Nigl, Thomas; Rutrecht, Bettina; Altendorfer, Michael; Scherhauser, Silvia; Meyer, Ina; Sommer, Mark; Beigl, Peter (2021): Lithium-Ionen-Batterien – Kreislaufwirtschaftliche Herausforderungen am Ende des Lebenszyklus und im Recycling. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 166 (3), S. 144–149. DOI: 10.1007/s00501-021-01087-1.
- Pardo, Nicolás; Moya, José Antonio; Mercier, Arnaud (2011): Prospective on the energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the EU cement industry. In: *Energy* 36 (5), S. 3244–3254. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.016.
- Pomberger, Roland (2020): Lehrveranstaltung Spezielle Abfallwirtschaft. MUL, Lehrstuhl AVAW. Leoben, 06.10.2020.
- Pomberger, Roland; Ragossnig, Arne (2014): Future waste - waste future. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 32 (2), S. 89–90. DOI: 10.1177/0734242X14521344.
- Pomberger et. al. (2016): Überlegungen und Vorschläge aus Sicht der Abfallwirtschaft zur Verbesserung der Ressourcenschonung und -effizienz. Erstellt von der Arbeitsgruppe „Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz“ des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Abfallstrategie – BAWP 2017“. ÖWAV-ExpertInnenpapier. Wien: ÖWAV.
- Pulp & Paper Canada (2020): A greener tech: BC researchers license new repulping method for recycled paper. Pulp & Paper Canada. Online verfügbar unter [https://www.pulpandpapercanada.com/a-greener-tech-bc-researchers-license-new-repulping-method-for-recycled-paper/?oly\\_enc\\_id=7021H6688690B8R](https://www.pulpandpapercanada.com/a-greener-tech-bc-researchers-license-new-repulping-method-for-recycled-paper/?oly_enc_id=7021H6688690B8R), zuletzt geprüft am 23.11.2022.
- Raatz; Seidel; Tuma; Thorenz; Helbig; Reller et al. (2022): OptiMet. Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie - Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling. Hg. v. Umweltbundesamt DE. Dessau-Roßlau (TEXTE 81/2022).
- Rahnama Mobarakeh, Maedeh; Kienberger, Thomas (2022): Climate neutrality strategies for energy-intensive industries: An Austrian case study. In: *Cleaner Engineering and Technology* 10, S. 100545. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100545.
- RBV (2015): Recycling-Baustoffverordnung, vom BGBl. II Nr. 181/2015. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>, zuletzt geprüft am 13.07.2022.
- RHI Magnesita (2022): Klima und Umwelt. Recycling. Online verfügbar unter <https://www.rhimagnesita.com/de/climate-and-environment/>, zuletzt geprüft am 01.08.2022.

RHV (2012): Recyclingholzverordnung. BGBl. II Nr. 160/2012, vom BGBl. II Nr. 495/2020.

Sander, Knut; Otto, Sarah Julie; Rödiger, Lisa; Wagner, Lukas (2018): Behandlung von Elektroaltgeräten (EAG) unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. Umweltbundesamt DE (31/2018).

Sander, Knut; Rödiger, Lisa; Wagner, Lukas; Jepson, Dirk; Holzhauer, Ralf; Baberg, Lutz et al. (2020): Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeugverwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. Umweltbundesamt DE. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/altfahrzeuge-monitoring>, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

Schlummer, Martin; Fell, Tanja; Mäurer, Andreas; Altnau, Gerald (2020): Die Rolle der Chemie beim Recycling. Physikalisches und chemisches Kunststoffrecycling im Vergleich. In: *Kunststoffe* (2020-06). Online verfügbar unter [https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/Leistungsangebot/recycling-und-umwelt/I-PDF%20Fraunhofer%20IVV%20Kunststoffe\\_2020\\_06\\_.pdf](https://www.ivv.fraunhofer.de/content/dam/ivv/de/documents/Leistungsangebot/recycling-und-umwelt/I-PDF%20Fraunhofer%20IVV%20Kunststoffe_2020_06_.pdf), zuletzt geprüft am 14.07.2022.

Statistik Austria (2019): Energiebilanzen für Österreich. Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2019. Online verfügbar unter [https://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html](https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html), zuletzt geprüft am 20.01.2021.

TEXAID (2022): Forschung. TEXAID. Online verfügbar unter <https://www.texaid.ch/de/nachhaltigkeit/forschung.html>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

UBA DE (2019): Gips. Factsheet. Unter Mitarbeit von Felix Müller. Umweltbundesamt DE. Dessau-Roßlau (FKZ 3716 35 3230).

Umweltbundesamt GmbH (2021): Austria's National Inventory Report 2021. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0761. Unter Mitarbeit von Michael Anderl, Christine Brendle, Marion Gangl, Simon Haider, Traute Köther, Christoph Lampert et al. Umweltbundesamt GmbH. Vienna, Austria. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0761.pdf>.

URT (2022): Leiterplatten - Recycling. URT Umwelt- und Recyclingtechnik GmbH. Online verfügbar unter <https://www.urt-recycling.de/seite/de/entsorgung/42/-/Leiterplatten-Recycling.html>, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Vollprecht, Daniel; Pomberger, Roland (2021): Ökodesign von Stahlwerksschlacken durch thermochemische Behandlung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 166 (3), S. 137–143. DOI: 10.1007/s00501-021-01090-6.

VÖZ (2019a): Auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Gesellschaft. Jahresbericht 2018/19 der österreichischen Zementindustrie. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Wien. Online verfügbar unter [https://zement.at/downloads/downloads\\_2019/nachhaltigkeitsbericht-2018\\_19\\_einseitig.pdf](https://zement.at/downloads/downloads_2019/nachhaltigkeitsbericht-2018_19_einseitig.pdf), zuletzt geprüft am 10.08.2022.

VÖZ (2019b): Auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Gesellschaft. JAHRESBERICHT 2018/19 der österreichischen Zementindustrie. Hg. v. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Wien.

VÖZ (2022a): Kennzahlen der Zementindustrie 2018-2021. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Wien. Online verfügbar unter <https://jahresbericht.zement.at/kennzahlen/>, zuletzt geprüft am 10.08.2022.

VÖZ (2022b): Ressourcen und Umweltschutz. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Wien. Online verfügbar unter <https://zement.at/derbaustoff/zement/ressourcen-und-umweltschutz>, zuletzt geprüft am 10.08.2022.

Windisch-Kern, Stefan; Gerold, Eva; Nigl, Thomas; Jandric, Aleksander; Altendorfer, Michael; Rutrecht, Bettina et al. (2022): Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 138, S. 125–139. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.038.

Windisch-Kern, Stefan; Holzer, Alexandra; Wiszniewski, Lukas; Raupenstrauch, Harald (2021): Investigation of Potential Recovery Rates of Nickel, Manganese, Cobalt, and Particularly Lithium from NMC-Type Cathode Materials (LiNixMnyCozO<sub>2</sub>) by Carbo-Thermal Reduction in an Inductively Heated Carbon Bed Reactor. In: *Metals* 11 (11), S. 1844. DOI: 10.3390/met11111844.

World Steel Association (2020): World Steel in Figures 2020. Brussels, Belgium. Online verfügbar unter <https://aceroplatea.es/docs/WorldSteelinFigures2020.pdf>.

## 7.2 Abkürzungsverzeichnis

ALSAG	Altlastensanierungsgesetz
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
BAWP	Bundes Abfallwirtschaftsplan
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
CRM	Critical Raw-Materials (kritische Rohstoffe)
CT	Computertomographie
Deponie RL	Deponierichtlinie
DRI	Direkt reduced iron (Direktreduktion von Eisen)
DVO	Deponieverordnung
EAF	Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace)
EAG	Elektroaltgeräte
EBS	Ersatzbrennstoff
EDXRF	Energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse
ELDYNTON	Elektrodynamische Fragmentierung
EoL	End-of-Life
ER	Ersatzrohstoff



HDPE	High Density Polyethylen
HSI	Hyperspektrale Bildverarbeitung
IEA	Internationale Energieagentur
KMF	Künstliche Mineralfasern
LD	Linz-Donawitz
LDPE	Low Density Polyethylen
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
LIBS	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie
LVP	Leichtverpackung
MBA	Mechanisch-biologische Aufbereitung
MVA	Müllverbrennungsanlage
NE	Nichteisen
NIR	Nah-Infrarot (Spektroskopie)
OES	Optische Emissionsspektrometrie
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Karton
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
pXRF	Tragbares Handgerät (portable) zur energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse
RBV	Recyclingbaustoffverordnung
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
SdT	Stand der Technik
SGS	Sensorgestützte Sortierung
TBRC	Top Blown Rotary Converter
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
UBA	Umweltbundesamt
VIS	Visible (sichtbares) Licht (=Spektraler Bereich)
WDXRF	Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzanalyse
XRT	Röntgentransmissionsanalyse
ZMS	Zumahlstoff

### Einheiten

kg, t, kt, Mt	Masse: Kilogramm, Tonne, Kilotonne, Megatonne
mm, m	Länge: Millimeter, Meter
€, CHF	Währung: Euro, Schweizer Franken
TWh, MWh, kWh	Energie: Terrawattstunde, Megawattstunde, Kilowattstunde
a, h	Zeit: Jahr, Stunde

### 7.3 Tabellen

Tabelle 1: Klassifikation der industriellen Teilsektoren.....	9
Tabelle 2: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Eisen- und Stahlindustrie.....	15
Tabelle 3: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Zementindustrie.....	17
Tabelle 4: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie.....	18
Tabelle 5: Technologien für die Kreislaufwirtschaft in der Papierindustrie.....	20
Tabelle 6: Menge, Rohstoffkritisizität und theoretisches THG-Einsparungspotenzial für diverse Abfallströme.....	29
Tabelle 7: Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruch in Klassen eingeteilt (Erben und Galler 2014).....	55
Tabelle 8: Zusammenfassung und Beschreibung der relevanten Technologien.....	70

### 7.4 Abbildungen

Abbildung 1: Ebenen der Kreislaufwirtschaft, Bildquelle: Kettele et al. (2022) in geänderter Form.....	7
Abbildung 2: Darstellung des Bilanzraums: Die strichlierten Linien stellen einzelne Bilanzräume dar. Betrachtet werden insbesondere der Bilanzraum der Industrie sowie die einzelnen Industriesektoren als Sub-Bilanzräume. Die Abfallwirtschaft wird als eigenständiger Bilanzraum betrachtet um sekundäre Rohstoffströme für die Industrie darzustellen. Andere Bilanzräume sind nur indirekt für die Betrachtung von Stoffströmen in oder aus einem betrachteten Bilanzraum relevant.....	8
Abbildung 3: Entwicklung von Umweltstandards in der Abfallwirtschaft, Bildquelle: (Pomberger 2020).....	11
Abbildung 4: Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emission industrieller Teilsektoren (Die Y-Achse zeigt die CO <sub>2</sub> -Emissionen, die den Teilsektoren zuzuordnen sind, und der Energiebedarf wird durch die Größe der Blase dargestellt) (Statistik Austria 2019; Umweltbundesamt GmbH 2021).....	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines allgemeinen Verfahrensflusses der Abfallaufbereitung am Beispiel einer Negativsortierung (Abtrennung von Störstoffen) ..	22
Abbildung 6: Funktionsschema einer sensorgestützten Sortierung, Bildquelle: (AVAW 2022).....	25
Abbildung 7: Bewertung diverser Abfallströme nach Rohstoffkritisizität und THG Einsparungspotenzial.....	30
Abbildung 8: Aufkommen, Außenhandel und Recycling ausgewählter Abfälle 2019, Datenquelle: BAWP (BMK 2022).....	31

Abbildung 9: Beispiel einer idealtypischen Prozesskette für einen Aluminium-Mischschrott, Bildquelle: Raatz et al. (2022) .....	34
Abbildung 10: Abschätzung der verfügbaren Schrottmenge in Österreich nach Legierungen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf Daten von BMK (2022) und Raatz et al. (2022).....	35
Abbildung 11: Verfügbare und Nachfrage Schrottmengen inkl. Außenhandel.....	36
Abbildung 12: Abschätzung der verfügbaren Aluminium-Schrottmenge in Österreich nach Legierungen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf Daten von BMK (2022) und Raatz et al. (2022).....	37
Abbildung 13: Entwicklung des Einsatzes alternativer Rohstoffe in der Zementindustrie, Bildquelle: VÖZ (2022b) .....	39
Abbildung 14: Einsatz von EBS in der österreichischen Zementindustrie seit 1988 (Mauschitz 2022).....	39
Abbildung 15: Dreistoffdiagramm zur chemischen Zusammensetzung von Klinker, Verbrennungaschen und alternativer Rohstoffe, Bildquelle: Hoenig et al. (2015).....	40
Abbildung 16: Anteile an Sekundärrohstoffen im Rohmehl für die Zementherstellung .....	41
Abbildung 17: Aufkommen und Einsatz von ausgewählten sekundären Rohstoffen und Zumahlstoffen in der Zementindustrie, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf VÖZ (2022b) .....	42
Abbildung 18: Entwicklung der Zumahlstoffe in der Zementindustrie .....	43
Abbildung 19: Aufkommen und Verwertung von Kunststoffabfällen, Datenquelle: Eigene Berechnung basierend auf BMK (2022).....	45
Abbildung 20: Potenzial des Textilrecyclings in Europa bis 2030, Quelle: McKinsey & Company (2022) .....	46
Abbildung 21: Geschätztes jährliches Potenzial von EoL-LIB in Österreich, Bildquelle: Beigl et al. (2021).....	50
Abbildung 22: Integration der thermischen Metallgewinnung in die Shredderrückstandsaufbereitung, Bildquelle: Bernegger (2022).....	61
Abbildung 23: Gesamtenergieverbrauch Stahlindustrie .....	63
Abbildung 24: Gesamter CO <sub>2</sub> -Ausstoß Stahlindustrie .....	63
Abbildung 25: Thermischer Energieverbrauch in der Zementindustrie.....	64
Abbildung 26: Gesamter CO <sub>2</sub> -Ausstoß Zementindustrie .....	65
Abbildung 27: Spezifischer Energieverbrauch der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE).....	66
Abbildung 28: Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE) mit der Kreislaufwirtschaft.....	67

---

Abbildung 29: Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Kunststoffherstellung (PET, PP, PE) bei Kreislaufwirtschaft und Brennstoffwechsel .....	67
Abbildung 30: Zusammenfassung der relevanten Technologien gegliedert nach Industriesektoren.....	68