



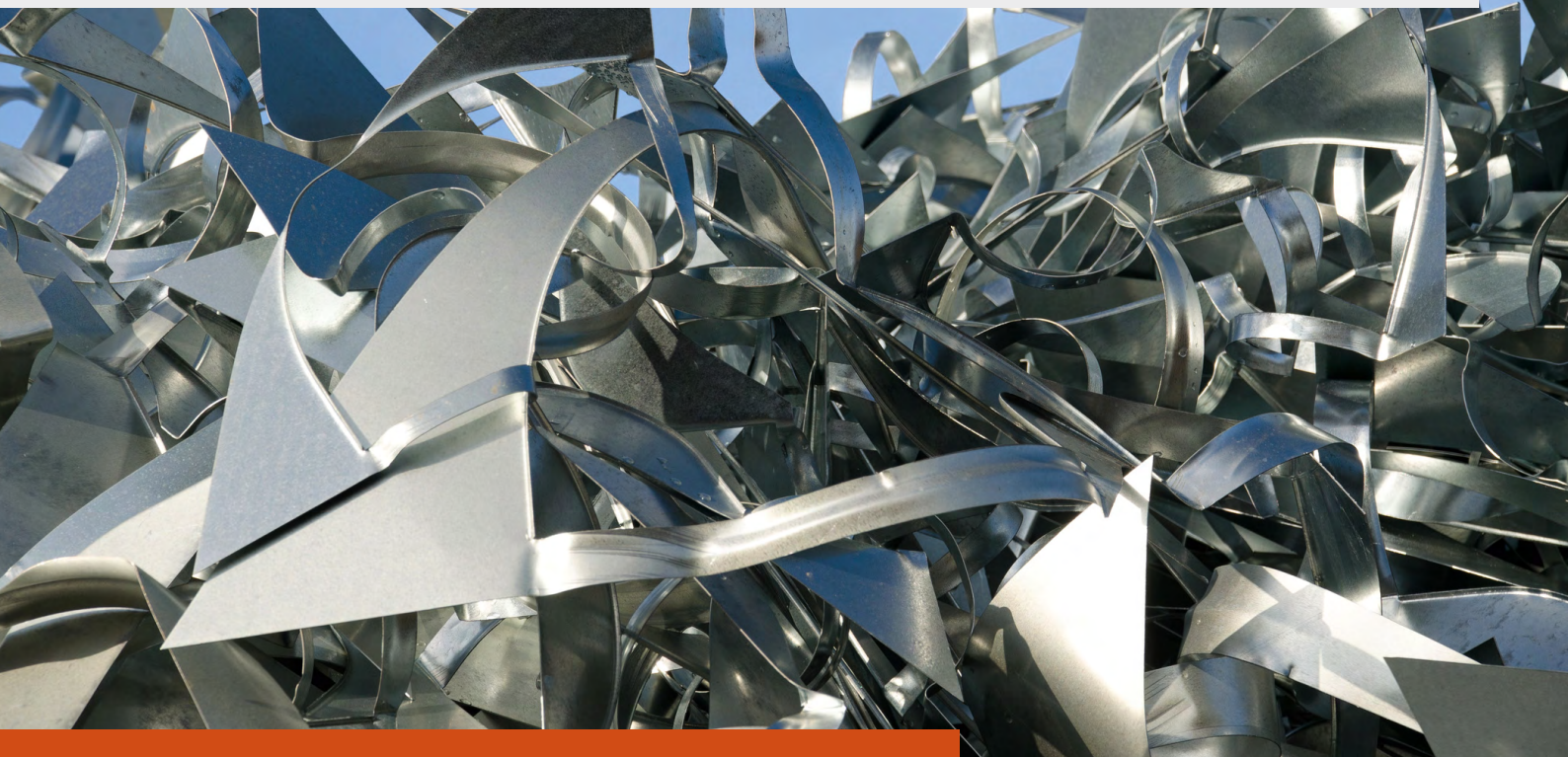
Deutsche
Rohstoffagentur

58 DERA Rohstoffinformationen

**Abschlussbericht
Dialogplattform Recyclingrohstoffe**



Steckbrief - Aluminium



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

www.deutsche-rohstoffagentur.de
www.bgr.bund.de

Impressum

Herausgeberin:

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin

Leitung des Unterarbeitskreis Aluminium der Dialogplattform Recyclingrohstoffe:

Jörg H. Schäfer
Referent Recycling und Nachhaltigkeit, Aluminium Deutschland e. V.

PD Dr. Simone Raatz

Administrative Leiterin, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie,
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Projektkoordination:

Bookhagen B. (DERA), Mähliitz P. (DERA), von Wittken R. (acatech), Akinic S. (acatech)

Kontakt:

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
www.deutsche-rohstoffagentur.de
recycling@bgr.de

Bildnachweise: © Petair/stock.Adobe.com

Layout: deckermedia GbR, Rostock

Zitierhinweis: DERA – Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2023): Abschlussbericht der Dialogplattform Recyclingrohstoffe. – DERA Rohstoffinformationen 58: 243 S., Berlin.

Datenstand: August 2023

doi: 10.25928/k2br-8k34

Hinweis: Dieser Abschlussbericht des Unterarbeitskreises Aluminium wurde im Rahmen der Dialogplattform Recyclingrohstoffe erstellt, die von Juni 2021 bis Juni 2023 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durch die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften koordiniert wurde.

Inhaltsverzeichnis

Überblick Dialogplattform Recyclingrohstoffe	2
1. Steckbrief – Aluminium	3
1.1 Beschreibung relevanter Stoffströme, Wertschöpfungsketten, und Anwendungskontexte	4
1.2 Barrieren im Recycling	10
1.3 Handlungsoptionen	12
1.4 Machbarkeit und Zielkonflikte	16
1.5 Nächste Schritte	25
2. Literaturverzeichnis	27

Überblick Dialogplattform Recyclingrohstoffe

Die Bundesregierung hat in ihrer Rohstoffstrategie 2020 (Bundesregierung 2020) mit Maßnahme 13 festgelegt, den Beitrag von Sekundärrohstoffen¹ (Recyclingrohstoffen) für die Versorgungssicherheit Deutschlands mit mineralischen Rohstoffen zu stärken. Das Recycling stellt neben der Rohstoffgewinnung aus heimischem Bergbau und dem Rohstoffimport eine wichtige Säule in der nationalen Rohstoffversorgung dar.

Um mit den Akteuren aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Zivilgesellschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette in den Bereichen Metalle und Industriemineralien zu den Möglichkeiten einer gezielten Stärkung des Recyclings in den Dialog zu treten, wurde mit der Dialogplattform Recyclingrohstoffe ein entsprechendes Austauschformat geschaffen. Übergeordnetes Ziel des Dialogprozesses war es, gemeinsam mit den Teilnehmenden Handlungsoptionen zu erarbeiten, die Hürden zur Schließung von Rohstoffkreisläufen abbauen und den Beitrag der Sekundärrohstoffe zur Rohstoffversorgung und zum Klimaschutz zukünftig weiter erhöhen.

Vor dem Hintergrund dieser Zielstellung beauftragte das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit der Durchführung dieses Dialogs. Gemeinsam mit acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften wurde im Zeitraum Juni 2021 bis Juni 2023 der Dialogprozess koordiniert. Insgesamt wurden im Zeitraum der Durchführung des Dialogprozesses 32 Arbeitssitzungen durchgeführt, wobei in Summe über 380 Personen am Dialog teilnahmen.

Die Ergebnisse aus den Unterarbeitskreisen der beiden Arbeitskreise Metalle und Industriemineralien bilden den inhaltlichen Kern des vollzogenen Dialogprozesses und werden in Steckbriefen beschrieben. So liegen für den Arbeitskreis Metalle detaillierte Steckbriefe für die Stoffströme Aluminium, Eisen und Stahl, Kupfer sowie Technologiemetalle vor. Der Arbeitskreis Industriemineralien umfasst detaillierte Steckbriefe für die Stoffströme Baurohstoffe, Gips, Keramische Rohstoffe (Feuerfestkeramik) sowie Industrielle Reststoffe und Nebenprodukte.

Alle erarbeiteten Steckbriefe folgen dabei dem gleichen Aufbau und umfassen aufeinander aufbauende Kapitel, in denen der jeweilige Stoffstrom beschrieben, Barrieren für das Recycling identifiziert, Handlungsoptionen beschrieben, deren Machbarkeit und mögliche Zielkonflikte diskutiert und nächste Schritte in der Umsetzung skizziert werden.

Dieser Steckbrief Aluminium ist ein Auszug auf dem gesamten Abschlussbericht der Dialogplattform Recyclingrohstoffe und beinhaltet nur die erarbeiteten Ergebnisse aus dem Unterarbeitskreis Aluminium. Für detaillierte Ausführungen zu Metallen und Industriemineralien lesen Sie bitte die Gesamtversion des Abschlussberichts, zu finden unter www.recyclingrohstoffe-dialog.de.

¹ Die beiden Begrifflichkeiten Sekundärrohstoffe und Recyclingrohstoffe werden im folgenden Text synonym verwendet. Insbesondere auf EU-Ebene und in Anlehnung an die englische Verwendung wird erster Begriff verwendet. Aufgrund seiner positiven Konnotation wird hier jedoch der Begriff Recyclingrohstoffe bevorzugt, da „Sekundär“ oft mit einer minderwertigen, weil zweitrangigen Bedeutung verbunden wird.

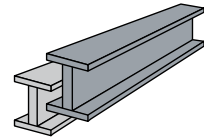
1. Steckbrief – Aluminium

Aluminium

Unterarbeitskreis-Leitung (Autoren):

Jörg H. Schäfer (Aluminium Deutschland e. V.)

Dr. Simone Raatz (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf)



UAK-Übersicht



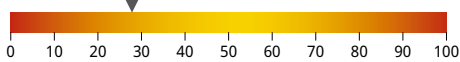
38 Beteiligte



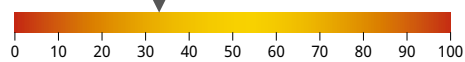
38 % Einzelunternehmen
30 % Wissenschaft
11 % Behörde
21 % Verbände
5 % Zivilgesellschaft



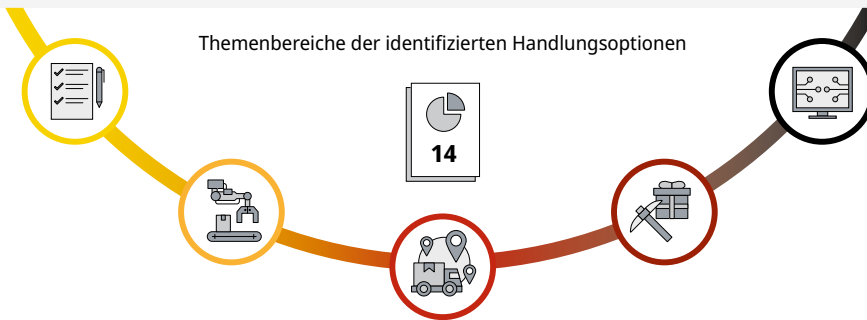
Anzahl **Barrieren**



Anzahl **Lösungsvorschläge**



Themenbereiche der identifizierten Handlungsoptionen



#1	Stoffstrominventar	#8	Recyclingorientierte Gesetzgebung
#2	Begriffsverständnis	#9	Produktdesign
#3	Sortier- und Aufbereitungsprozesse	#10	Wertstoffhöfe und Sammelstellen
#4	Ofen- und Brennertechnologien	#11	Automatisierung und Digitalisierung
#5	CO ₂ -Fußabdruck	#12	Investitionen in unabhängige Rohstoffversorgung
#6	Schrottverfügbarkeit	#13	Kooperationen in Lieferkette
#7	Recyclingziel	#14	Gesetzgebung, Standards und Verfahren

Tab. 1: Überblick Stoffstrom Aluminium (Referenzrahmen Deutschland 2021)

Stoffströme	Menge [t]	Quelle
UAK Aluminium (Referenzjahr 2021)		
Primärrohstoffe		
Bergbauproduktion ¹	0	(BGR 2022)
Import (HS 2606; Erze und Konzentrate) ²	2.020.000	(DESTATIS 2023)
Export (HS 2606; Erze und Konzentrate) ²	34.700	(DESTATIS 2023)
Raffinadeproduktion	509.000	(AD 2023)
Recyclingrohstoffe		
Import (HS 7602; Abfälle und Schrott) ²	1.040.000	(DESTATIS 2023)
Export (HS 7602; Abfälle und Schrott) ²	1.250.000	(DESTATIS 2023)
Raffinadeproduktion ¹ (nur Refiner)	565.000	(AD 2023)

¹ Angaben in Tonnen Inhalt Metall

² Material mit nicht eindeutig definiertem Metallgehalt

1.1 Beschreibung relevanter Stoffströme, Wertschöpfungsketten und Anwendungskontexte

Stoffströme und Anwendungskontexte

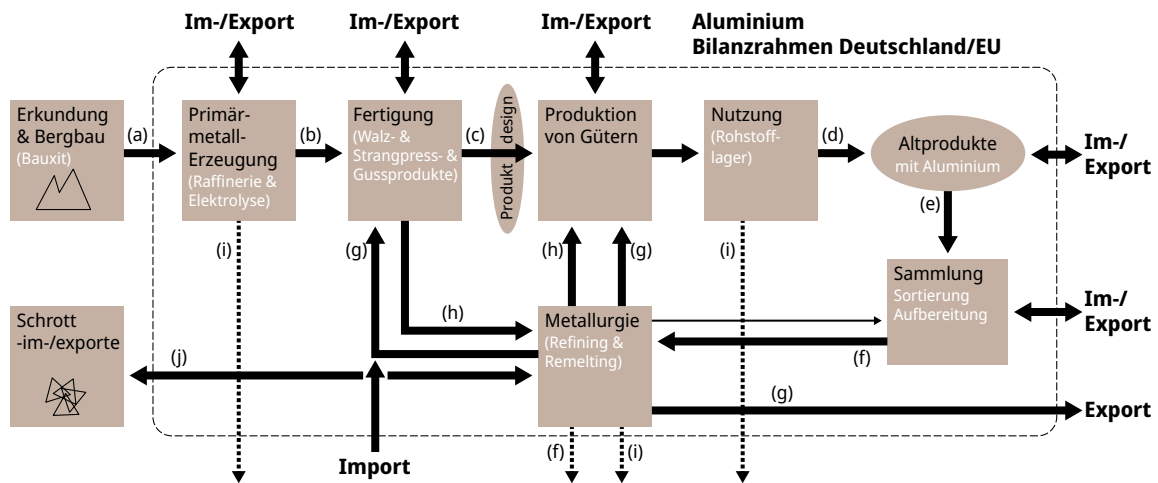
Seit Beginn der industriellen Nutzung wird versucht, Aluminium am Ende seiner Nutzung einem Recyclingprozess und damit einer Wiedernutzung zuzuführen. Aluminium birgt aufgrund seiner Beschaffenheit zumindest das theoretische Potenzial einer nahezu vollständigen Schließung von Stoffkreisläufen. In der Realität werden die Grenzen des Recyclings jedoch durch ökonomische und ökologische Faktoren sowie reale Verluste in der Wertschöpfungskette definiert. Die wirtschaftliche und ökologische Effizienz des Recyclings wird dabei unter anderem von der Produktgestaltung, der Material- beziehungsweise Legierungsvielfalt, der geforderten Funktionalität und der Spezifikation des Rohmetalls, den tatsächlich verfügbaren Erfassungsstrukturen sowie der Effizienz des Sortier- und Trennprozesses beziehungsweise der Aufbereitungs- und Verwertungsinfrastruktur bestimmt. Abbildung 7 gibt

einen schematischen Überblick über den Stoffstrom Aluminium und dessen Kreislaufführung.

Grundsätzlich gilt, dass das Recycling von Aluminium und seinen Guss- oder Knetlegierungen im Vergleich zur Primärherstellung (Rohmetall aus beispielsweise Bauxit) ökologische Auswirkungen reduziert und eine nachhaltige Produktion sichert. Daher wird inzwischen sogar vermehrt der Einsatz von Recyclingaluminium in spezifischen Produkten nachgefragt.

Rohmetall wird als raffiniertes Aluminium definiert, welches zum Beispiel in Form von Pressbolzen, Rundbarren, Masseln, aber auch flüssig gehandelt wird. Es umfasst damit sowohl Primär- als auch Sekundäraluminium (Abbildung 8).

In Deutschland gibt es derzeit keine Bergbauproduktion von Aluminium (Bauxit) und damit keinen Primärabbau. Deutschland importiert Erze und Konzentrate in Höhe von rund 2 Millionen Tonnen mit nicht bestimmten Al-Gehalten. Die Menge an Recyclingaluminium umfasste im Jahr 2021 rund 3,2 Millionen Tonnen. Diese Zahl setzt sich zusammen aus rund 565.000 Tonnen aus der Raffinadeproduktion (Refiner) und etwa 2,65 Millionen Tonnen zusätzlich durch Umschmelzen (Remelter), wie die Übersicht in Tabelle 2 zeigt.



(a)	Primärmetalleinsatz	(f)	EoL-Aluminium separiert oder gemischt (Alt-Schrott)
(b)	Aluminium und Aluminiumlegierungen	(g)	recycltes Aluminium
(c)	Halbzeuge und Gussprodukte	(h)	Schrott aus der Fertigung und Produktion (Neuschrott)
(d)	End-of-Life (EoL)-Produkte mit Aluminium	(i)	Dissipation
(e)	EoL-Produkte mit Aluminium für Recycling	(j)	Importe

Abb. 1: Referenzgrafik Stoffstrom Aluminium in Anlehnung an UNEP (2011)

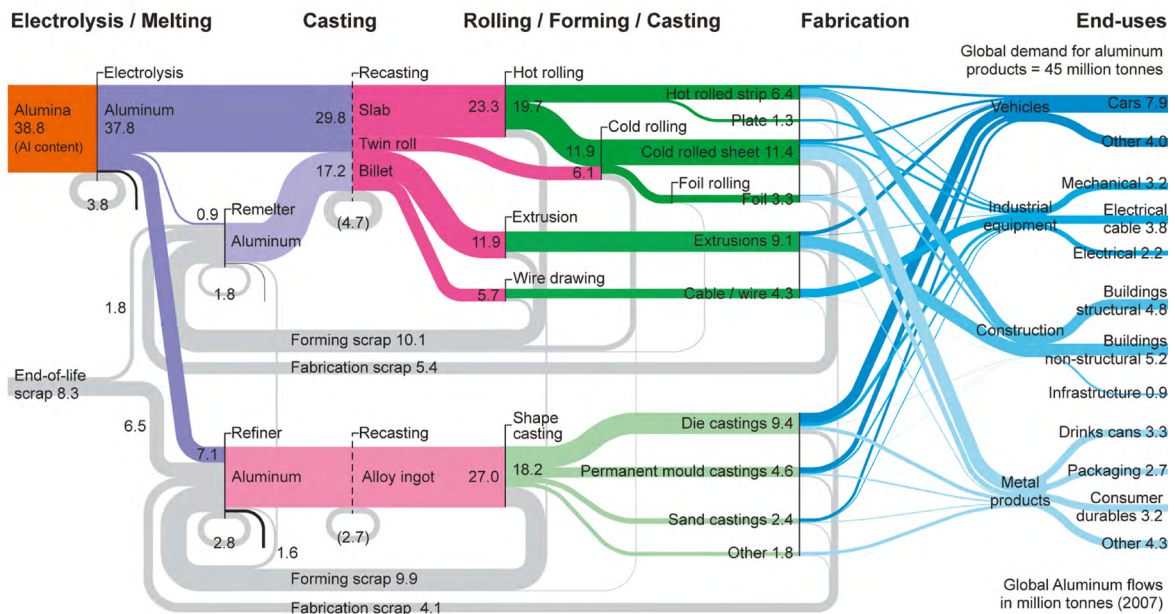


Abb. 2: Ein globales Stoffstrommodell für Aluminium für das Jahr 2007
(CULLEN & ALLWOOD 2013)

Tabelle 2 verdeutlicht die Importabhängigkeit. Zudem hat Deutschland einen ausgeprägten Außenhandel beim Halbzeug mit einem leichten Exportüberschuss. Auch auf europäischer Ebene ist eine Importabhängigkeit zu erkennen. Etwa die Hälfte des unverarbeiteten Aluminiums wird nach Europa importiert. Der europäische Außenhandel von Halbzeug zeigt einen leichten Importüberschuss und ist im Vergleich zum deutschen Außenhandel geringer. Das ist darauf zurückzuführen, dass der deutsche Außenhandel sich zu einem Großteil auf den europäischen Markt bezieht. Der europäische Außenhandel wiederum berücksichtigt lediglich den außereuropäischen Handel (RAATZ et al. 2022).

Aluminium kann im schmelzflüssigen Zustand mit verschiedenen Elementen legiert werden. Durch das Legieren können bestimmte Eigenschaften gefördert oder andere ungewünschte Eigenschaften unterdrückt werden. Aluminiumwerkstoffe eröffnen damit vielfältige Möglichkeiten in der Formgebung: Sie können gegossen, gewalzt, geschmiedet und gepresst werden. Entsprechend werden Aluminiumwerkstoffe nach ihrer Eignung zu bestimmten Fertigungsverfahren in Knet- und Gusslegierungen eingeteilt. Bei der Unterteilung wird in beiden Gruppen die Eignung zum Aushärten berücksichtigt, was wie-

derum den Anwendungsbereich definiert (GDA 2003; GDA 2004; GDA 2007).

Typische Knetlegierungen sind entsprechend der Normung der Aluminium Association (AA): 1100 für Lebensmittelverpackungen („Alu-Folie“), 1350 für elektrische Leiter, 3003 für Wärmetauscher, 3004 für Getränkedosen (wobei der Öffnungsclip meist aus der Legierung 5182 besteht), 5052 für Gasbehälter, 6063 für Fahrzeugrahmen, 7050 und 7075 für Luftfahrtanwendungen (HATAYAMA et al. 2006). Die mittlere Zusammensetzung ausgewählter Knetlegierungen ist in Tabelle 3 angegeben.

Die häufigsten Legierungselemente für Aluminium sind Magnesium, Silizium, Titan, Chrom, Mangan, Eisen, Kupfer und Zink. Weitere Legierungsmetalle können Nickel, Silber, Bor, Bismut, Gallium, Lithium, Blei, Zinn, Vanadium oder Zirkonium sein (ALUMINUM ASSOCIATION 2015). Zusätzlich gilt, dass üblicherweise jedes nicht explizit aufgeführte Element maximal zu 0,05 % enthalten sein darf und in der Summe solche Elemente nicht mehr als 0,15 % Gewichtsanteil ausmachen dürfen (ALUMINUM ASSOCIATION 2015). Eine wichtige Anwendung für Aluminiumgusslegierungen, die insgesamt höheren Gehalte an Legierungselementen enthalten, sind Motorblöcke im Fahrzeugbau (NAKAJIMA et al. 2010).

Tab. 2: Mittlere Gewichtsanteile der Legierungselemente für ausgewählte Aluminiumlegierungen in Prozentwerten (ALUMINUM ASSOCIATION 2015); Aluminium macht den auf 100 % fehlenden Massenanteil aus

Nr.	Kommentar	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1235	Haushaltsfolie	0,65 (Si+Fe)		0,05	0,05	0,05	-	0,1	0,06
3003	Häufigste 3xxx-Legierung	0,6	0,7	0,13	1,25	-	-	0,1	-
5182	Verschluss von Aludosen	0,2	0,35	0,15	0,38	4,5	0,1	0,25	0,1
6063	Häufigste 6xxx-Legierung	0,6	0,35	0,1	0,1	0,68	0,1	0,25	0,1
1350	Leiteraluminium	0,1	0,4	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-
3004	Behälter Aludosen	0,3	0,7	0,25	1,25	1,05	-	0,25	-
5083	Schiffbau (Platten)	0,4	0,4	0,1	0,7	4,45	0,15	0,25	0,15
6061	Zweithäufigste 6xxx-Legierung	0,6	0,7	0,28	0,15	1,0	0,21	0,25	0,15
8011	Alternative Alufolie	0,7	0,8	0,1	0,2	0,05	0,05	0,1	0,08

Schrotte bestehen demnach sowohl aus Knetaluminium als auch Gusslegierungen und es kann auf den Sammelplätzen zu einer Vermischung der unterschiedlichen Legierungsarten kommen, falls nicht strikt auf deren Getrennthaltung geachtet wird. Es wird dabei von einem Verhältnis von 70 zu 30 % zwischen Schrotten aus Knetlegierungen und Gusslegierungen ausgegangen (RAATZ et al. 2022).

Auf Basis des weltweiten Aluminiumbedarfs (Abbildung 9) lässt sich folgender Sachverhalt darlegen: Weltweit werden derzeit rund 21 % des Aluminiumbedarfs aus Alt-Schrotten (post-consumer) gedeckt, circa 36 % aus Alt- und Neuschrotten.¹ Durch Importe und Reduzierung der Schrottexporte nach außerhalb Europas würde sich die regionale Verfügbarkeit von Schrotten erhöhen. In Analogie führen Exporte zu einer Verknappung an Schrotten in Europa. Dabei sind Im- und Export von Schrotten zwei Seiten einer Medaille und in einer Beurteilung der Rolle des Außenhandels integriert zu betrachten. Die Erhöhung der Verfügbarkeit macht nur dann Sinn, wenn die benötigten Verarbeitungskapazitäten auch im Inland vorgehalten werden können. Ohne entsprechenden Absatz wäre auch die notwendige Wirtschaftlichkeit der heimischen Recyclingprozesse in Frage gestellt.

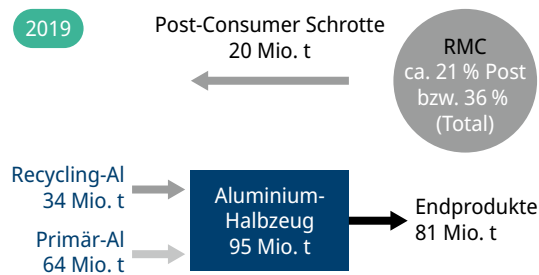


Abb. 3: Grafik zu Massenbilanzdifferenzen gemeldeter Daten und Lagerbestände (IAI 2021). RMC: Primärrohstoffnutzung für inländischen Konsum und Investitionen

Laut Prognosen (Abbildung 10) kann sich die globale Verfügbarkeit von Alt-Schrotten bis 2050 quasi verdreifachen. Dagegen nimmt wegen des Marktwachstums die relative Schrottverfügbarkeit für Produkte in den nächsten Jahren nur moderat zu. Marktwachstum und lange Lebensdauer von Produkten sind ebenso Faktoren,

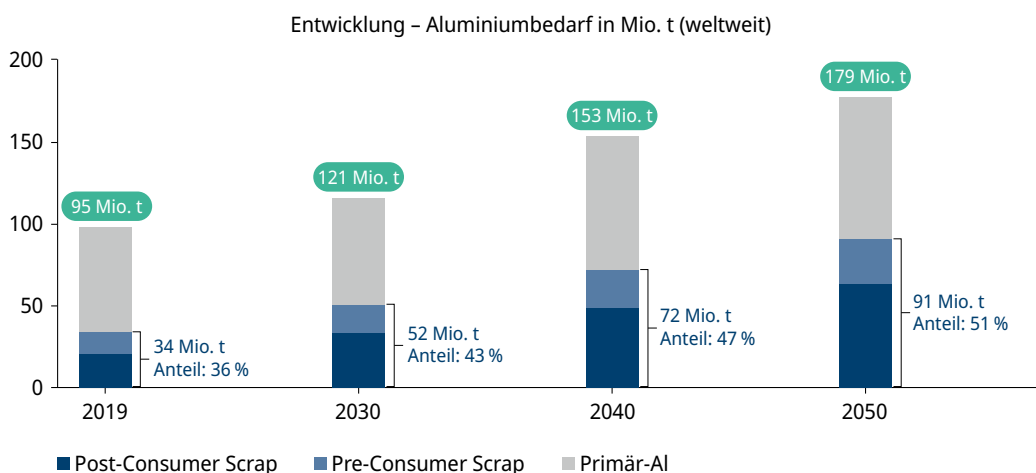


Abb. 4: Prognose des Aluminiumbedarfs bis 2050 und dessen Deckung durch Primär- und Sekundär-Aluminium (IAI 2021)

¹ Hinweis der Geschäftsstelle: Die Diskrepanz zwischen den Zahlen in Abbildung 2 und 3, die möglicherweise ins Auge fallen, ergeben sich aus den unterschiedlichen zeitlichen Datenrahmen, die den Abbildungen jeweils zugrunde liegen.

die die Schrottverfügbarkeit beeinflussen.² Auf Basis der genannten Aspekte ist auch zukünftig Primäraluminium in erheblichem Umfang erforderlich, um den sich abzeichnenden Bedarf zu decken. Daher ist es wichtig, nicht nur mit dem aktuellen Stand, sondern auch mit Prognosen zu arbeiten. Wie wird sich mengenmäßig beispielsweise der Automobil- beziehungsweise Verkehrssektor entwickeln, der derzeit mit 47 % der Absatzmärkte (siehe Abbildung 11) den Großteil ausmacht? Zukünftig werden aller Voraussicht nach weniger Verbrennungsmotoren im Zuge der E-Mobilität benötigt. Stattdessen gewinnt der Leichtbau aufgrund des Gewichts der Batterien große Bedeutung in der Mobilität. Zudem dürfen Bio-Treibstoffe zukünftig bei Verbrennern eingesetzt werden. Auch die Entwicklung der Märkte für Großgeräte (Weiße Ware) und Verpackungen (unter anderem Dosen) ist mengenmäßig interessant. Eventuell vorhandene Zahlen sind anhand entsprechender Prognosen anzupassen.

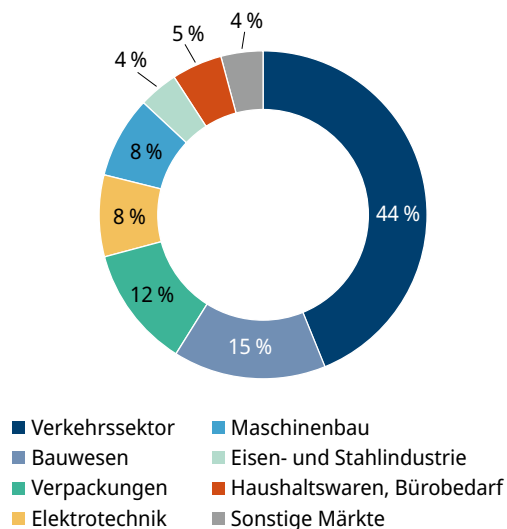


Abb. 5: Absatzmärkte für Aluminiumprodukte in Deutschland für das Jahr 2017 (BMWSB 2017)

In Deutschland ist derzeit für Aluminium der Verkehrssektor der weitaus größte Absatzmarkt. Unter den Verkehrssektor fallen Luftfahrt, Schienenverkehr, Schiffe, aber auch der Automobilssektor (mit circa 1/3 Anteil am Gesamtverkehrssektor, Aluminium Deutschland 2021). Gründe hierfür sind die Leichtigkeit gepaart mit Sicherheit, Korrosionsbeständigkeit, Steifheit und Festigkeit. In diesem Kontext gewinnen scandium-haltige Aluminiumlegierungen an Bedeutung (XINGLU CHEMICAL K.A.).

Im Hinblick auf die Schrottverfügbarkeit lassen sich unter anderem folgende Aussagen treffen: Die Lebensdauer eines Automobils liegt bei circa 15 Jahren. Das heißt, der Rücklauf an Schrotten aus diesem Bereich erfolgt jeweils nach circa 15 Jahren. Im Hinblick auf die regionale Verfügbarkeit an Schrotten aus der Automobilindustrie ist darüber hinaus von entscheidender Bedeutung, dass eine Vielzahl der Automobile nach der Herstellung als Neufahrzeug und gegebenenfalls Nutzung in Deutschland oder Europa als Gebrauchtwagen exportiert wird und somit das Aluminium nicht für das Recycling in Deutschland zur Verfügung steht (UBA 2021), wenn keine Gegenmaßnahmen, wie eine Stärkung der Verwertungsnachweise, Pfandsysteme³ oder Rücknahmeverpflichtungen ergriffen werden. Folglich ist es dringend erforderlich, auf den millionenfachen Abfluss von Altfahrzeugen auf Ebene der EU-Kommission aufmerksam zu machen.

Das alles hat entscheidende Konsequenzen auf die Menge der regional zur Verfügung stehenden Schrotte. Ein mittelfristiger Einfluss auf die Lebensdauer wird auch mit dem von der EU-Kommission angestrebten Leasing von Fahrzeugen (hauptsächlich wegen der Batterien) erwartet, was eine größere Nutzung innereuropäischer Fahrzeugrückläufer für das nationale Recycling wahrscheinlich werden lässt. Maßnahmen sollten daher solche Entwicklungen mitberücksichtigen (EU-RECYCLING 2018).

² Beim Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen werden Bauanwendungen mit zwischen 25 und >= 50 Jahren Lebensdauer angegeben. Siehe unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>.

³ Hinweis der Geschäftsstelle: Diese Aussage stellt eine „Debattenposition“ dar, das heißt zum Thema „Pfandsysteme“ gibt es in der Dialogplattform unterschiedliche Standpunkte und Sichtweisen.

Rolle des Recyclings im Bereich Aluminium

Die Bedeutung des Recyclings von Aluminium ist in Abbildung 12 zu sehen. Neben der starken Reduzierung der CO₂-Emissionen sind weitere umweltrelevante Effekte aufgezeigt.

Das Recycling von Aluminium aus den verschiedensten Quellen hat eine sehr hohe wirtschaftliche und ökologische Relevanz, da jedes zurückgewonnene Kilo Sekundäraluminium die vierfache bis fünffache Menge an Bauxit (Primärrohstoff), vor allem aber Energie und CO₂, einspart. Das Recycling von Aluminium benötigt nur 5 % der Energie, die zur erstmaligen Herstellung von Aluminium über die energieintensive Schmelzelektrolyse erforderlich ist. Zudem werden derzeit beim Recycling von Schrotten im europäischen Durchschnitt rund 0,5 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Aluminium freigesetzt, bei der Herstellung von Primäralumi-

nium rund 6,7 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Aluminium (European Aluminium 2018). In Deutschland sind die Verwertungsquoten von einmal in den Wertstoffkreislauf zurückgeführten Schrotten (über 50 % werden exportiert) relativ hoch, wie beispielsweise für Aluminium bei den Hauptanwendungen Automobil, Bau und Verpackungen mit teilweise über 90 % (BURGER et al. 2020; GESELLSCHAFT FÜR VERPACKUNGSMARKTFORSCHUNG 2021). Die EoL-Recyclingrate der Getränkedose liegt beispielsweise über 99 % (GESELLSCHAFT FÜR VERPACKUNGSMARKTFORSCHUNG 2021), da die getrennte Erfassung gut funktioniert. Diese Zahlen sind aber im Sinne der Hebung von Optimierungspotenzialen näher zu analysieren und immer zu hinterfragen, da sie keine direkten Aussagen über die Qualität des Recyclings, die chemische Zusammensetzung der Rezyklate und damit auch über deren Wiederverwendungsmöglichkeiten zulassen. Hier wäre es sehr viel interes-

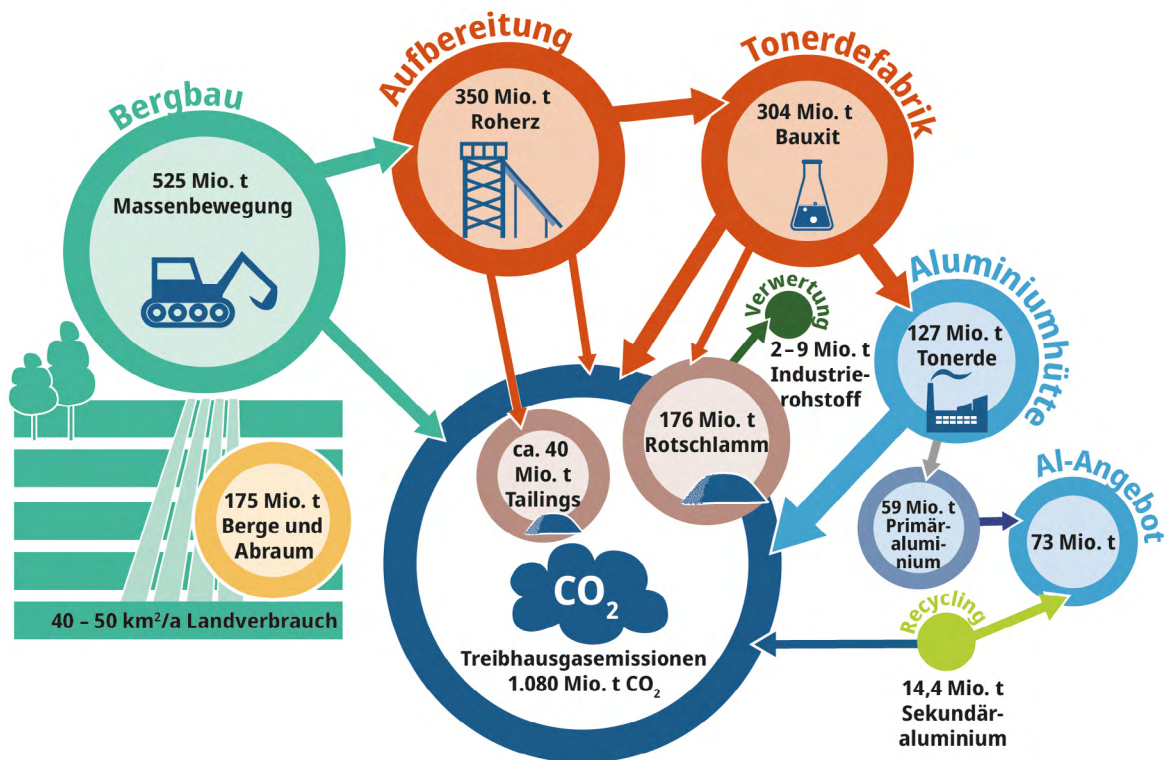


Abb. 6: Berechnete Massenströme in der Aluminiumproduktion und Hauptauswirkungen auf die Umwelt (VASTERS & FRANKEN 2020)

santer, etwas über die Rezyklateinsatzquote (EoL-RIR) zu erfahren. Darüber hinaus gibt es einen sehr großen Unterschied zwischen Verwertung und tatsächlichem Recycling. Hier wird bisher in den Veröffentlichungen von Zahlen für das Recycling nicht klar unterschieden.

Optimierungspotenziale finden sich hier über die gesamte Wertschöpfungskette, die derzeit für kaum ein Produkt tatsächlich nachvollziehbar sind. Aktuell werden die oben genannten Legierungselemente im Aluminiumrecycling-Prozess nicht gezielt extrahiert, sondern, wenn möglich, in geeigneten Ziellegierungen weiter genutzt. Je besser die Sortierung der Ausgangslegierungen hinsichtlich der gewünschten Ziellegierung ist, das heißt, je sauberer das Ausgangsmaterial ist, desto weniger sauberes Primäraluminium muss im pyrometallurgischen Prozess als „Verdünnungsmittel“ für Störellemente eingesetzt werden. Speziell für den Fahrzeugsektor wird, zum Beispiel im Autonetzwerk Catena-X, derzeit untersucht, inwieweit hier über eine bessere beziehungsweise selektivere Trennung der Altschrotte zum Beispiel hinsichtlich ihrer Legierungsart höhere Recyclingraten erreicht werden können. Aber nicht nur im Automobilbereich wird versucht, Kreisläufe stetig zu optimieren, um die Rohstoffversorgung der Produktion sicherzustellen. Insbesondere durch den steigenden Bedarf an wirtschaftsstrategischen Rohstoffen zum Beispiel für die Elektromobilität und den damit verbundenen Bedarf an Batterierohstoffen und den hierzu notwendigen Batteriekästen strebt die Automobilbranche zunehmend geschlossene Kreisläufe an, um die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen sicherzustellen. Um den Wiedereinsatz von Sekundärrohstoffen zukünftig innerhalb der Automobilbranche zu vereinfachen, wird versucht, verstärkt weniger unterschiedliche Legierungsarten zu verbauen. Das erleichtert die nachfolgende sortenreine Trennung und erhöht den Freiheitsgrad der Einsatzmöglichkeiten für die Rezirkulation.

Die globale und europäische Aluminiumindustrie ist gefordert, die Umweltauswirkungen der Aluminiumproduktion und -nutzung weiterhin

zu reduzieren und in innovative Technologien zu investieren. Hinzu kommen Maßnahmen, um die Schrottverfügbarkeit zu erhöhen, wie verbesserte Sammel- und Sortiersysteme und geänderte Rahmenbedingungen.

Unternehmensseitige Ansätze zur Stärkung der Nachhaltigkeit basieren auf drei Säulen:

- CO₂-Fußabdruck von Primäraluminium durch nachhaltige Gewinnungsverfahren verringern,
- ressourceneffiziente Produktion und qualitativ hochwertige, reparatur- und demontagefreundliche Produkte und Anwendungen sicherstellen,
- Recyclingpotenziale unter Berücksichtigung der Rückgewinnung nicht nur des Hauptmetalls, sondern auch der Legierungselemente unter anderem durch innovative Technologieentwicklungen weiter ausbauen.

1.2 Barrieren im Recycling

Im Rahmen des ersten Treffens des UAK Aluminium wurden Barrieren für das Recycling aus Sicht der Teilnehmenden mündlich und schriftlich dargestellt und im Anschluss bei offensichtlichen Dopplungen weiter zusammengefasst. Eine erste Aggregation UAK-übergreifender Themenfelder fand auf Ebene gewählter „Schlagwörter“ statt. Die nachfolgende Auflistung an Themen gibt somit einen Überblick über das Meinungsbild hinsichtlich relevanter Barrieren im UAK.

Regulatorik

Schlagwort	Barriere
Grenzwerte	Niedrige Grenzwerte erschweren Verfügbarkeit von Aluminiumschrotten im Markt (zum Beispiel Pb, im Rahmen der Überarbeitung der CLP-Verordnung wird ein Grenzwert von 0,025 % Bleigehalt diskutiert; derartige Grenzwerte erschweren und behindern die Kreislaufwirtschaft)
Recyclingfähigkeit	Verbesserungsbedürftige Recyclingfähigkeit von Schrotten (zum Beispiel WEEE) sowie Materialverbunden; Legierungsvielfalt und Materialverbunde erschweren sortenreine Trennung und ein qualitativ hochwertiges Recycling
Produktdesign	Zunahme an Produkten mit nicht separierbarem Fremdstoffanteil (Geschirrschredder), nicht lösbaren Klebeverbindungen und zunehmender Materialvielfalt
Rohstoffverfügbarkeit	Aufgrund hoher Exportquoten (bis zu 60 %) (siehe Tabelle „Überblick Stoffstrom Aluminium“ am Anfang des Berichts) und fehlender Technologien für das Recycling komplex zusammengesetzter Stoffströme kommt es zur mangelnden Verfügbarkeit von Aluminiumschrotten und mangelnder Realisierung höherer Einsatzquoten
Export	Hoher Abfluss von Aluminiumschrotten durch Exporte (DE/EU)
Vollzug	Der Vollzug (Zoll) mit Blick auf WEEE und AltfahrzeugV ist nicht ausreichend
Normung/Harmonisierung	Fehlen EU-weit harmonisierter Recyclingregeln und -verfahren für Aluminiumschrotte (beispielsweise: EU-einheitliche Sammel- und Sortierquoten)

Anreize und Förderung

Schlagwort	Barriere
Wirtschaftlichkeit von Technologien	Skalierung neuer Technologien/Verfahren bisher unwirtschaftlich (Trennung von Legierungselementen, Magnesium)
Energiepreise	Hohe Energiepreise (Einsatz alternativer Energieträger) erschweren sekundäre Metallerzeugung (Ofen-/Brennerentwicklung)
Annahmekriterien	Hohe Produkthanforderungen durch Abnehmer (Profilshredder)
Kooperation	Kooperationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette fördern (zum Beispiel Design for Recycling)

Infrastruktur und Logistik

Schlagwort	Barriere
Analyse- und Sortiertechniken	Unzureichender Einsatz hochwertiger Analyse- und Sortiertechniken bei Aluminiumschrotten (Neuschrotte (pre-consumer)/Altschrotte (post-consumer)) in legierungsspezifischen Stoffströmen

Daten und Digitalisierung

Schlagwort	Barriere
Datenverfügbarkeit	Produktdesign und fehlende Datenverfügbarkeit erschweren Disassembly von Batteriezellen
Informationsmangel/-weitergabe	Unzureichende Kenntnis über Mengen und Legierungszusammensetzungen der im Umlauf befindlichen Schrotte
	Unzureichende Kenntnis über Mengen und Legierungszusammensetzungen der im anthropogenen Lager befindlichen Aluminiummaterialien und deren Lebensdauer
	Fehlende Quantifizierung unvermeidbarer Verluste in Nutzungsphase/ Dissipation (zum Beispiel in Second Life von Batteriezellen)

Technologien und Prozesse

Schlagwort	Barriere
Produktdesign	Beschichtungen, zum Beispiel von Verkehrsschildern, können trockenmechanisch nicht gelöst werden (Geschirrschredder)
Getrennterfassung/-haltung	Verbundstoffgemisch verschiedener Materialien (zum Beispiel ausgeschäumte Rolltorsegmente, ISO-Profile) erschweren Getrennterfassung
Kompositwerkstoffe/Verbunde	Erschwerte Rückgewinnung aus Verbund verschiedener Aluminiumlegierungen (zum Beispiel Batterieboden von Elektrofahrzeugen)

1.3 Handlungsoptionen

Der UAK Aluminium hat nach der Diskussion der Barrieren Vorschläge entwickelt, wie diese Barrieren abgebaut werden könnten. Als wesentliche „Enabler“ werden folgende 14 Punkte adressiert.

Überblick der Enabler

#1	Inventar der Stoffströme – Transparenz	#6	Schrottverfügbarkeit – limitierender Faktor und unterschiedliche Wahrnehmung
#2	Einheitliches Verständnis von Begriffen – Definitionen	#7	Definition des Ziels von Recycling – Nennung von Zielkonflikten
#3	Innovative Prozesse – Sortieren und Aufbereiten	#8	Recyclingorientierte Gesetzgebung
#4	Innovative Prozesse – Ofen- und Brenntechnologien	#9	Produktdesign
#5	Reflexion der Effizienz von Maßnahmen – CO ₂ -Fußabdruck – Schaffung neuer Märkte für Rezyklate	#10	Investitionen in Wertstoffhöfe und Sammelstellen zur Sicherung der Rohstoffversorgung in Deutschland
		#11	Unterstützung von Automatisierung und Digitalisierung von Prozessen
		#12	Investitionen in unabhängige Rohstoffversorgung für die Kreislaufwirtschaft
		#13	Kooperationen über die Lieferkette
		#14	Gesetzgebung für eine Kreislaufwirtschaft und EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln, -standards und -verfahren

Enabler #1**Inventar der Stoffströme – Transparenz**

Als Grundlage für Richtungssicherheit sind ein gutes Inventar beziehungsweise verlässliche Daten bezüglich der Darstellung der Stoffströme wichtig, da jeder Markt (bezogen auf Produkt, Werkstoff) spezifische Herausforderungen darstellt. Eine zuverlässige und umfassende Datengrundlage auf Basis fortlaufender Erhebungen zu legierungsspezifischen Stoffströmen und Rohstoffverlusten (unter anderem auch durch Export, falsche Entsorgung, mangelhafte Sortierung etc.) oder gegebenenfalls auch durch einen Produktpass über die Lieferkette hinweg trägt dazu bei, Transparenz zu schaffen und Richtungssicherheit zu gewähren. Grundlage der weiteren Arbeit sollte daher ein Screening vorliegender Daten aus bereits existierenden Initiativen und Projekten sein (BUCHERT et al. 2021; UBA 2021). Es gilt zu eruieren, ob entsprechende Daten aus der Industrie beziehungsweise deren Verbänden verfügbar sind und im Rahmen einer Materialflussanalyse transparent dargestellt werden können. Dazu ist eine Vereinheitlichung der Begriffsdefinitionen erforderlich.

Enabler #2**Einheitliches Verständnis von Begriffen – Definitionen**

Es gilt, ein einheitliches Verständnis für Begriffe wie Recycling (im Unterschied zur Verwertung), Rezyklateinsatzquote, Recyclingquote (Bezugsgröße definieren), Recyclingrate, Alt-Schrotte, Produktionsschrotte, Fertigungsschrotte zu gewährleisten. Bisher gibt es hier keine klar definierten Bezugsgrößen.

Enabler #3**Innovative Prozesse – Sortieren und Aufbereiten**

Um ein optimiertes Recycling zu gewährleisten, sind legierungsspezifische Stoffströme mit möglichst hoher Sortiertiefe hinsichtlich der Begleitelemente voneinander zu trennen. Dies ist mit den derzeit am Markt befindlichen Sortier- und Trennverfahren nur sehr eingeschränkt

möglich. Bei gemischten Aluminiumschrotten ist die Trennbarkeit nach Legierungen oder Legierungsgruppen also eine wichtige Stellgröße. Wichtig ist das Getrennthalten beziehungsweise Trennen (zum Beispiel von Guss- und Knetlegierungen) sowohl bei Fertigungsschrotten als auch bei gebrauchten Aluminiumprodukten (Pre- und Post-Consumer-Schrotte) im Unternehmen und auf dem Schrottplatz. Die Entwicklung von wirtschaftlichen Sortier- und Trennverfahren sowie die großtechnische Umsetzung sollten intensiv gefördert werden. In diesem Zusammenhang könnten beispielsweise binäre Einzelsortierverfahren durch mehrkanalige Mehrstufensortierung ersetzt werden. Das Aluminiumrecycling könnte unter anderem mit innovativen multimodalen In-line-Analysebeziehungsweise Sortiertechniken verbessert werden, um damit die Erkennung von Störstoffen in Echtzeit zu ermöglichen. Entsprechende Technologieentwicklungen sollten finanziell unterstützt werden.

Enabler #4**Innovative Prozesse – Ofen- und Brennertechnologien**

Um sortenreine Stoffströme zu erhalten, werden neben effizienten Sortiertechnologien ebenfalls geeignete Ofen- und Brennertechnologien benötigt. Insbesondere vor dem Hintergrund der Transformation, verbunden mit der Elektrifizierung und des Einsatzes synthetischer Gase, muss gewährleistet bleiben, dass Umschmelztechnologien zur Verfügung stehen – auch für Schlacken oder Krätzen. Die Metallurgie muss auch unter neuen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Energieversorgung Lösungen anbieten können.

Enabler #5**Reflexion der Effizienz von Maßnahmen – CO₂-Fußabdruck – Schaffung neuer Märkte für Rezyklate**

Hier gilt vor allem zu klären, ob neue Technologien entwickelt werden müssen oder bestehende weiterentwickelt. Zu betrachten wäre auch, in welchen Grenzen die weitere Optimierung

von (Recycling-)Technologien technisch möglich und hinsichtlich der Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks auch sinnvoll und wirtschaftlich machbar ist. Es geht dabei unter anderem um die Frage, welche Technologie-Entwicklungen zu welchem reproduzierbaren Ergebnis in der Metallaufbereitung führen, natürlich mit dem Blick auf Effizienz, Umweltverträglichkeit (unter anderem CO₂-Fußabdruck), Qualität und Wirtschaftlichkeit.

Enabler #6

Schrottverfügbarkeit – limitierender Faktor und unterschiedliche Wahrnehmung⁴

Es sollte weiter erörtert werden, warum teils sehr unterschiedliche Wahrnehmungen hinsichtlich eines möglichen Überangebots versus mangelnder Verfügbarkeit an Aluminiumschrotten bestehen. Zum einen beschreibt sich der Handel als „Ventil“ für ein regionales Überangebot an Aluschrotten. Zum anderen wird mit Blick auf die Festlegung fester Rezyklatanteile auf eine teils zu geringe Verfügbarkeit sowie die Frage der ökonomisch/ökologischen Sinnhaftigkeit einer vorgegebenen Aufkonzentration in bestimmten Produkten verwiesen.

Nach Zahlen des Umweltbundesamts und Destatis konnten im Jahre 2020 „nur circa 8 % der 2005 produzierten Pkws in Deutschland nach 15 Jahren Nutzung zur Verfügung“ gestellt werden, da von 5,3 Millionen produzierten Fahrzeugen aus dem Jahre 2005 lediglich 406.000 Fahrzeuge im Jahre 2020 verwertet wurden. Für die Produktion von 3,5 Millionen Fahrzeugen im Jahre 2020 wurden 573.000 Tonnen Aluminium benötigt. Aus der Verwertung von Altautos konnten 44.200 Tonnen Aluminium dieser Produktion zugeführt werden, das heißt eine Rezyklateinsatzquote von 8 % (Annahmen: Gewicht Pkw: 2005 = 1,1 Tonnen – 2020 = 1,4 Tonnen, Anteil NE-Metalle: 2005 = 11 % – 2020 = 13 % (davon 90 % Al), Verwertungsquote 2020: 95 % – Nutzungsdauer 15 Jahre).

An dieser Stelle sollte auch festgehalten werden, dass die Produktexporte den gleichen Rohstoffexporteffekt haben wie die Abfallexporte. Schrottexporte wären nur dann mit Rohstoffverlusten gleichzusetzen, wenn für alle Schrotte hierzulande überhaupt Einsatzmöglichkeiten bestehen würden (nicht vorhandene Kapazitäten, die nicht geplant sind). Insbesondere die voranschreitende Deindustrialisierung führt zu einer rückläufigen Nachfrage im Binnenmarkt. Um diesen Abfall- und Produktexporten und damit Materialabflüssen entgegenzuwirken, arbeiten die Hersteller zunehmend an neuen kreislauforientierten Geschäftsmodellen, zum Beispiel Pfandsysteme.

Enabler #7

Definition des Ziels von Recycling – Nennung von Zielkonflikten

Das Ziel des Recyclings muss zukünftig klar definiert werden. Es macht keinen Sinn, jedes Partikel auszusortieren, wenn das die Ziellegierung im Hinblick auf die Sicherstellung der Funktionalität nicht erfordert. Dafür wäre es aber wichtig, die für die deutsche Industrie im wesentlichen benötigten Ziellegierungen zu beschreiben und diese Information für die Recyclingwirtschaft zur Verfügung zu stellen. Dabei sollten die ökologischen Aspekte zum Beispiel durch den Einsatz von Legierungselementen ebenso beachtet werden.

Enabler #8

Stärkere Berücksichtigung des Recyclings in der Gesetzgebung

Zum Teil bestehen Widersprüchlichkeiten in den Regelungen und Definitionen aus dem Abfall- versus Chemikalienrecht, die eine wirksame Umsetzung und Vergleiche innerhalb der Kreislaufwirtschaft erschweren (zum Beispiel Bleigrenzwerte oder Angaben von angeblich erreichten Recyclingquoten). Diese Zielkonflikte sollten daher klar benannt werden, um auf einen Ausgleich zwischen den Rechtsvorschriften hinzuwirken.

⁴ Hinweis der Geschäftsstelle: Aussagen zum Thema „Schrottexporte“ stellen eine „Debattenposition“ dar, das heißt, zum Thema gab es in der Dialogplattform unterschiedliche Standpunkte und Sichtweisen.

Die Vereinheitlichung von Recyclingregeln bei gleichzeitiger EU-weiter Kooperation ist wichtig. Gleiche Anforderungen an das Recycling sowie EU-weite Kooperation für das Recycling von Aluminium würden Materialverluste durch Schrottexporte (Schrott oder Altprodukte) reduzieren.

Eine EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln und -verfahren unterstützt die Sicherstellung funktionierender Recycling-Binnenmärkte und eines funktionserhaltenden Recyclings. Hierzu sollten auch technische Verwertungsstandards erarbeitet werden, die die Hochwertigkeit des Recyclings adressieren.

Enabler #9

Produktdesign

Eine der Hauptforderungen ist, bereits beim Produktdesign auf Recyclingfähigkeit zu achten. Das schließt beispielsweise die einfache Demontage ein, sodass Produkte nach ihrer Nutzungsdauer (EoL) gut in ihre Einzelteile zerlegbar sind. Dazu gehört auch, dass mittelfristig die Legierungsarten reduziert und Verbundmaterialien vermieden oder recyclingfreundlich gestaltet werden. Das vereinfacht die sortenreine Trennung und vermindert die Verluste an Begleitelementen im pyrometallurgischen Prozess. Ein Produktpass mit den nötigen Informationen für den Recycler vereinfacht das funktionserhaltende Recycling darüber hinaus. Auch die künftige ProduktdesignVO sollte das funktionserhaltende Recycling unterstützen.

Enabler #10

Investitionen in Wertstoffhöfe und Sammelstellen zur Sicherung der Rohstoffversorgung in Deutschland

Beispiel 1: Die Sammelquote von WEEE wird nach wie vor nicht erreicht. Im Gegenteil, die Quote nimmt ab und liegt aktuell bei 39 % statt den geforderten 65 %. Neben dem Handel sind Wertstoffhöfe (inklusive spezielle Boxen regionaler Entsorger) für die deutliche Verbesserung der Erfassung von Sekundärrohstoffen eine ganz wichtige Stellschraube zur Erhöhung des inländischen Rohstoffaufkommens.

Beispiel 2: Für Aluminium-Verbundmaterialien (3A Composites-Aluminiumverbundplatten) wird derzeit erst ein Rücknahmesystem aufgebaut, das künftig auf weitere europäische Länder ausgeweitet werden soll.

Auch hier könnten Wertstoffhöfe zukünftig eine größere Bedeutung hinsichtlich der verbesserten Erfassung erhalten sowie als Vorsortier- (Reparatur, Reuse) und Demontagezentren unter anderem von WEEE ausgebaut werden.

Enabler #11

Unterstützung von Automatisierung und Digitalisierung von Prozessen

Die Demontage erfolgt heute zum überwiegenden Teil händisch. Zukünftige Entwicklungen sollten daher eine automatisierte Demontage im Blick haben. Aufbereitungstechnologien sollten flexibel agieren und nach Industriestandard 4.0 (KI) ausgebaut werden.

Enabler #12

Investitionen in unabhängige Rohstoffversorgung für die Kreislaufwirtschaft

Eine von Rohstoffimporten unabhängige europäische Recyclingwirtschaft ist anzustreben. Dazu gehört eine importunabhängige, europäische Rohstoffversorgung für Aluminium, Legierungsmetalle, Energieträger, Betriebs- und Hilfsstoffe. Gegebenenfalls muss hierzu die Erstellung von Infrastrukturen und Standorten gefördert werden. Hierfür sind ausgewiesene Sammelstellen (insbesondere für WEEE, die sonst im gelben Sack oder Hausmüll landen), der Handel, die Recyclingindustrie sowie im Hinblick auf den Produktbereich auch Akteure für die Bereiche Reparatur (Werkstätte) und Reuse (Handel) gefragt. Die entsprechenden Entwicklungen bei innovativen (pyro- und hydrometallurgische) Technologien (auch Ofen und Brenner) sind ebenso einzubinden.

Enabler #13

Kooperationen über die Lieferkette

Recycling fängt bei der Auswahl der Legierungen und dem Produktdesign an und endet beim

Sammeln, Aufbereiten, Trennen und Ein- oder Umschmelzen. Beim Umschmelzen wird die Legierung, entsprechend ihrer gewünschten neuen Nutzung, meist unter Verwendung von Primärmaterial, eingestellt. Die Prozesse müssen zukünftig besser aufeinander abgestellt werden. Eine Optimierung erfordert das Zusammenspiel aller Akteure. Derartige Kooperationen sind zu fördern.

Enabler #14

Gesetzgebung für eine Kreislaufwirtschaft und EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln, -standards und -verfahren

Die Vereinheitlichung von Recyclingregeln bei gleichzeitiger EU-weiter Kooperation ist wichtig, um die derzeitigen Rohstoffverluste zu minimieren. Eine EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln und -verfahren unterstützt die Sicherstellung funktionierender Recycling-Binnenmärkte und eines funktionserhaltenden Recyclings. Aktuell bestehen innerhalb der EU jedoch erhebliche Unterschiede in der Prozessqualität des Recyclings hinsichtlich der Rückgewinnung und Qualität des Rezyklates, der Wiederverwendung, Schadstoffentfrachtung, Prozessemissionen, Sicherheits- und Umweltstandards sowie dem Vollzug der Abfallgesetzgebung. Dadurch kommt es zu Abflüssen von Abfällen in Länder mit nur freiwilliger Anwendung und weniger guten Recyclingprozessen. Wichtige Wertstoffe gehen dadurch nicht nur dem heimischen Markt, sondern prinzipiell verloren.

Mögliche Lösungsansätze zur Vereinheitlichung von Recyclingregeln, -standards und -verfahren umfassen klare Definitionen und die Kontrolle von Vorgaben, aber auch den Abbau von Bürokratie und keine unrealistischen Forderungen hinsichtlich der Einhaltung von Grenzwerten für Begleitelemente oder Verunreinigungen in Legierungen. Als Negativbeispiel wurden die derzeit diskutierten Bleigrenzwerte im Rahmen der Überarbeitung der CLP-Verordnung genannt. Es ist darauf zu achten, dass der gesamte Wertstoffkreislauf in der EU vorhanden bleibt. Exporte dürfen nur in ausländische Recycling-

anlagen erfolgen, die mit Europa vergleichbare Umwelt- und Verwertungsstandards haben. Die Rohstoffkette sollte nicht unterbrochen werden. Entsprechende Regularien und Bestimmungen könnten in der (neuen) ÖkodesignVO festgehalten werden.

1.4 Machbarkeit und Zielkonflikte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Diskussionen zur Machbarkeit dargestellt, in welchen die erarbeiteten Lösungsansätze/Enabler unter den Aspekten rechtlicher, informatorischer/organisatorischer, technischer, ökologischer und sozio-ökologischer Machbarkeit betrachtet wurden. Die aufgeführten Themen stellen damit die (subjektiven) Sichtweisen der Teilnehmenden dar. Zielkonflikte, bei denen zwei oder mehrere der oben genannten Aspekte im Widerspruch zueinander stehen, wurden (sofern vorhanden) herausgearbeitet und separat aufgeführt.

Enabler #1

Inventar der Stoffströme – Transparenz

✔ Machbarkeit

Die überwiegende Mehrheit der Teilnehmenden ist davon überzeugt, dass Transparenz bei den Prozessen der Stoffströme geschaffen werden kann.

Größere Hürden für mehr Transparenz werden vor allem im informatorisch-organisatorischen und rechtlichen Bereich erwartet, zum Teil aber auch im technischen Bereich gesehen. Es sind vor allem folgende Aspekte, die nach Meinung der Teilnehmenden eine Umsetzung behindern oder erschweren:

- Die ressortübergreifende Zusammenarbeit in den Ministerien ist aufwendig und wird nur selten forciert. Neben Gesetzen zur Verbesserung der Transparenz von Stoffströmen bedarf es dringend auch einer Stärkung des Vollzugs. Der fehlende Vollzug zeigt sich bei-

spielsweise im Bereich illegaler Exporte bei Altfahrzeugen und Elektroaltgeräten.

- Es ist noch nicht geklärt, wer Zugang zu den gesammelten Daten erhalten soll und in welchem Umfang die Daten den zugelassenen Akteursgruppen dann bereitgestellt werden sollen. Das ist zum Beispiel wichtig, wenn man über den Produktpass spricht und hier zukünftig Daten abrufen möchte. Es empfiehlt sich, dass unabhängige Behörden beziehungsweise Organisationen und Institutionen die Aufgabe übernehmen, Daten möglichst unbürokratisch und in digitalisierter Form zu erheben, aufzubereiten und in aggregierter (anonymisierter) Form zu veröffentlichen. Voraussetzung für diese Aufgabe ist, dass Unternehmen ebenso Verantwortung übernehmen, indem sie die entsprechenden Daten zur Verfügung stellen. Momentan gibt es nur wenig Bereitschaft, unternehmenseigene Daten zur Verfügung zu stellen, da sie oftmals die Essenz des Unternehmenserfolgs ausmachen. Darüber hinaus verhindern auch mögliche Verstöße gegen Compliance-Regularien und Fragen der Geheimhaltung ein Daten-Sharing.
- Für eine erfolgreiche Datenerfassung ist jedoch eine Zusammenarbeit aller relevanten Akteure entscheidend. Es ist erforderlich, eine zuverlässige und umfassende Datengrundlage auf Basis fortlaufender Erhebungen zu legierungsspezifischen Stoffströmen und Rohstoffverlusten zu schaffen. So sind Schwachstellen zu identifizieren sowie wichtige Angaben wie Menge, Zusammensetzung, Nachfrage, Grenzwerte, Quoten und Zielwerte zu ermitteln. Für fundierte Entscheidungen relevanter Akteure der Wissenschaft, Politik und Recyclingwirtschaft sind Stoffströme aus Demontage, Sortierung und Recycling standardisiert und fortlaufend zu ermitteln, zu dokumentieren und zu berichten.
- Aktuell gibt es zum Beispiel kaum Daten zu den Legierungszusammensetzungen der Stoffströme. Es besteht dringender Bedarf,

dass Daten aus der Wissenschaft durch Industriedaten ergänzt werden. Ein Screening vorliegender Daten aus wissenschaftlichen Projekten oder frei zugänglichen Statistiken reicht allein nicht aus. Die Daten, zum Beispiel zur Legierungszusammensetzung der Schrotte, sollten bei den Herstellern, Händlern, Schrottaufbereitern und Recyclern systematisch erhoben werden.

- Mit dem wichtigen Thema Datensammlung und -sharing werden auch immer häufiger die sogenannten digitalen Produkt- und Materialpässe in die Diskussion eingebracht. Teilnehmende sehen im Hinblick auf diese digitalen Pässe, ob auf Produkt- oder Materialebene, sowohl Vorteile als auch Nachteile: Als Vorteil wird festgehalten, dass digitale Produkt- und Materialpässe das Potenzial besitzen, den B2B-Austausch von Rohstoffen zu unterstützen. Ebenso als positiv gesehen wird an digitalen Produkt- und Materialpässen, mit denen häufig Datenplattformen einhergehen, dass sie die wesentlichen Produkt- und Materialinformationen zur Verfügung stellen, die für eine deutlich verbesserte Kreislaufführung von Stoffströmen benötigt wird. Dem entgegen steht die Skepsis, dass eine umfassende Einsatzmöglichkeit von digitalen Produktpässen wirklich realisierbar ist. In wenigen Teilbereichen wie etwa einem digitalen Batteriepass wird dieses Potenzial von den Teilnehmenden zwar gesehen, nicht jedoch für Metalle in der gesamten Breite. Zudem wird nicht davon ausgegangen, dass man durch einen digitalen Pass alle Daten zu einem Produkt oder einem Material zusammentragen kann. Bisher gibt es noch kein überzeugendes Konzept, wie ein Produktpass zum Beispiel im Bereich von Aluminiumprodukten erstellt werden kann. Darüber hinaus ist es notwendig, die Anforderungen an einen Produktpass näher zu spezifizieren. Dabei sollte der Fokus der Anforderungen auf Stoffinformationen liegen, nicht auf Recyclingvorgaben. Außerdem sollen Demontagepläne Teil eines Material- oder Produktpasses sein, damit ein qualitativ hochwertiges Recycling sichergestellt werden kann. Auch ein Mate-

rial- oder Produktpass ist auf die Bereitschaft von Unternehmen angewiesen, Daten und Material-/Produktinformationen bereitzustellen. Diese Forderungen sollten Teil eines delegierten Rechtsakts der EU-Kommission basierend auf der neuen Ökodesign-VO sein.

- Die Teilnehmenden halten fest, dass kleine und mittlere Unternehmen (KMU) als Motor von Innovation und essenzielle Stütze der deutschen Wirtschaft durch die Anforderungen eines Produkt- oder Materialpasses nicht überfordert und Innovationen nicht gehemmt werden dürfen. Das Nachrüsten von Technik, Informationssystemen, IT, Handscannern, Druckern etc. kann besonders KMU vor große organisatorische und finanzielle Hürden stellen. KMU sollten mit entsprechenden Fördermaßnahmen unterstützt werden.
- Schwierigkeiten, ein Monitoring für falsche beziehungsweise mangelhafte Entsorgung beim Export zu etablieren. Hierfür ist ein stoffstromspezifisches Vorgehen notwendig. Grundlage muss auch hier eine gute Datenlage sein. Die Exporte zu dokumentieren funktioniert (Eurostat, Zollstatistik, Destatis), aber ein Monitoring von falscher Entsorgung oder mangelhafter Sortierung wird von den UAK-Teilnehmenden als nur schwer umsetzbar eingestuft.
- Illegale Exporte müssen quantifiziert und reguläre Exportzahlen umfassender als bisher erhoben werden, um der unzureichenden Kenntnis über Mengen und Legierungszusammensetzung der im Umlauf befindlichen Schrotte zu begegnen.

⊗ Zielkonflikte

- Ein möglicher Zielkonflikt ergibt sich mit Blick auf den Schutz von Wettbewerbsvorteilen gegenüber der Bereitschaft, Unternehmensdaten freizugeben.
- Es wird befürchtet, dass die Kosten, die mit der Sicherstellung einer höheren Transparenz einhergehen, für die betroffenen

Akteure und Unternehmen sehr hoch sein werden und sie dabei gleichzeitig dem Druck ausgesetzt sind, ihre Gewinnvorgaben auch weiterhin zu erzielen. Auf EU-Ebene sind Audits im Rahmen der EU-Abfallverbringungsverordnung geplant.

Enabler #2

Einheitliches Verständnis von Begriffen – Definitionen

☑ Machbarkeit

- Die überwiegende Mehrheit der Teilnehmenden stimmt darin überein, dass es notwendig ist, ein gemeinsames und allen voran einheitliches Begriffsverständnis im Themenfeld Recycling zu schaffen.
- Die heterogenen und unklaren Definitionen von Recycling und Qualität stehen der Motivation, funktionserhaltend zu recyceln, entgegen.
- Wichtig ist ebenfalls, die Begriffe des „Zwecks“ und des „ursprünglichen Zwecks“, zum Beispiel in der AbfallRRL, dem KrWG, der AltfahrzeugRL, klar zu definieren. Es ist deutlich zu machen, welches Einsatzspektrum Rezyklate zukünftig haben werden und in welchen Produkten sie sich zu welchem Anteil wiederfinden sollen.

⊗ Zielkonflikte

- Hohe Kosten für betroffene Akteure und Unternehmen und Druck, Gewinnvorgaben auch weiterhin zu erzielen.

Enabler #3

Innovative Prozesse – Sortieren und Aufbereiten

☑ Machbarkeit

Die Mehrheit der Teilnehmenden geht von der Machbarkeit des Enablers aus. Bedenken, dass eine Machbarkeit schwierig sein wird, finden sich vor allem in den informatorisch-organisatorischen, technischen und sozial-ökonomischen

Dimensionen wieder. Das zeigt sich besonders an den folgenden Aspekten:

- Darüber hinaus bleibt die höhere Attraktivität (günstigerer) Primärrohstoffe oftmals bestehen, was wiederum dazu führt, dass Abnehmer nicht bereit sind, sortierte Legierungen auch wirklich einzusetzen.
- Die hohe Komplexität der Produkte erschwert das Recycling zusätzlich, da die hohe Anzahl an Legierungen zu stark heterogenen Schrotten führen (Entropie-Problem) und der Sortier- und Aufbereitungsaufwand enorm steigt. Um die Effizienz des Recyclings weiter zu optimieren, sind aber legierungsspezifische Stoffströme mit möglichst hoher Sortiertiefe hinsichtlich der Begleitelemente erforderlich. Die sich heute am Markt befindlichen Sortier- und Trennverfahren sind diesbezüglich weiterzuentwickeln. Technologie-Innovationen bedürfen enger Kooperation zwischen Wissenschaft und Sensorentwicklung.
- Binäre Einzelsortierverfahren sollten durch mehrkanalige Mehrstufensortierung ersetzt werden. An die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Sensorentwicklerinnen und -entwickler wird appelliert, das Metallrecycling unter anderem mit innovativen multimodalen In-line-Analyse- beziehungsweise Sortiertechniken zu verbessern, um damit die Erkennung von Störstoffen in Echtzeit zu ermöglichen. Entsprechende Technologieentwicklungen sollten finanziell unterstützt werden.
- Die Sicherstellung der Planbarkeit von Investitionen und Betriebskosten muss durch entsprechende politische Rahmenbedingungen erfolgen. Denn die Weiterentwicklung der technischen Verfahren braucht die entsprechende Nachfrage. Bei gemischten Aluminiumschrotten ist die Trennbarkeit nach Legierungen oder Legierungsgruppen eine wichtige Stellgröße, doch bisher wurden die Alu-Knet- und Gusslegierungen nur teilweise voneinander getrennt, weil keine entsprechende Nachfrage gegeben war.

- Fehlende Wirtschaftlichkeit von Technologien: Eine Trennung von Legierungselementen mittels LIBS-Technologie ist möglich, aber nicht immer wirtschaftlich, daher sind Fördermaßnahmen für F&E erforderlich.
- Es gibt keine definierten Abnehmermärkte für Legierungselemente aus der Trennung beziehungsweise deren Mischprodukten.
- Hohe Investitionskosten in unterschiedliche Anlagentypen.

⊗ Zielkonflikte

- Die Teilnehmenden des UAK sehen keine Zielkonflikte in Bezug auf diesen Enabler.

Enabler #4

Innovative Prozesse – Ofen- und Brenner-technologien

☑ Machbarkeit

Die Machbarkeit dieses Enablers wird von zwei Einschätzungen geprägt: Ein Teil der Teilnehmenden ist von einer guten Machbarkeit des Enablers überzeugt, ein anderer Teil der Teilnehmenden kann noch keine abschließende Einschätzung abgeben. Bedenken wurden mit Blick auf die folgenden Aspekte geäußert:

- Energieintensive Prozesse (pyrometallurgische Prozesse) sind perspektivisch nur durch Nutzung von Strom und Wasserstoff sowie synthetischen Gasen aus erneuerbaren Energien oder Bio-Brennstoffen sinnvoll, damit sie auch zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks beitragen. Dabei sollten die erforderlichen Temperaturen für die Schmelzvorgänge mit einer intelligenten Nutzung von erneuerbaren Energien erzielt werden. Derzeit sind diese Technologien jedoch noch nicht voll ausgeprägt. Es werden darüber hinaus auch Speichertechnologien benötigt sowie eine Weiterentwicklung „Grüner“ Wasserstofftechnologien. Bisher fehlt es an der notwendigen Infrastruktur und den benötigten Mengen an grünem Wasserstoff.

- Es besteht weiterer Forschungsbedarf, geeignete Verfahren beziehungsweise Ofen- und Brennertechnologien zu entwickeln. Alternativ kann die Übertragbarkeit vorhandener Technologien geprüft werden.
- Zu hohe Kosten für die betroffenen Akteure.
- ⊗ **Zielkonflikte**
 - Die Teilnehmenden des UAK sehen keine Zielkonflikte in Bezug auf diesen Enabler.

Enabler #5

Reflexion der Effizienz von Maßnahmen – CO₂-Fußabdruck – Schaffung neuer Märkte für Rezyklate

✓ *Machbarkeit*

Die Beurteilung der Machbarkeit dieses Enablers fällt unterschiedlich aus. Die große Mehrheit aller Teilnehmenden schätzt die Machbarkeit entweder als gut ein oder kann keine abschließende Einschätzung abgeben. Ein Drittel der Teilnehmenden betrachtet die Machbarkeit als umsetzbar, allerdings mit einigen Hürden und Hindernisse verbunden, die durch folgende Aspekte widergespiegelt werden:

- In der Definition von Legierungen besteht eine Grauzone in der Zusammensetzung (ASI-Definition von 10 %), die eine Umsetzung behindern könnte.
- Es kann nicht mit „Grünem Storm“ geplant werden, denn unter anderem ist die Verfügbarkeit nicht gegeben. Wenig Planbarkeit besteht im Hinblick auf indirekte Treibhausgasemissionen aus eingekaufter Energie (Scope 2) sowie alle anderen indirekten Emissionen, die durch die Aktivitäten eines Unternehmens in seiner Wertschöpfungskette entstehen (Scope 3).
- Es wird erwartet, dass es keine technologischen Sprünge im Recyclingbereich geben wird, sondern vielmehr eine Weiterentwicklung (technologische Evolution).

- Die technische Machbarkeit und die Schaffung neuer Märkte bedingen sich gegenseitig: Bietet man schlechte Produkte an, finden sich wenige Abnehmer. Bietet man gute Produkte/Rezyklate an, gibt es jedoch keine Abnehmer für bestimmte Konzentrate/Primärrohstoffe.
- Es fehlt immer noch an einer einheitlichen Berechnungsgrundlage beziehungsweise Anwendung/Interpretation der vorhandenen Grundlagen, die eine Vergleichbarkeit ermöglicht.

⊗ *Zielkonflikte*

- Die Teilnehmenden des UAK sehen keine Zielkonflikte in Bezug auf diesen Enabler.

Enabler #6

Schrottverfügbarkeit – limitierender Faktor und unterschiedliche Wahrnehmung

✓ *Machbarkeit*

Die Verfügbarkeit von Schrotten fürs Recycling bestimmt das Produktionsvolumen von Recyclingaluminium. Der Schrottanfall hängt von Faktoren ab wie „Anfall Menge an Schrotten aus Anwendungen“, Schrottimporte und -exporte. Da Maßnahmen in diesem Spannungsfeld auch im Hinblick auf eine Erhöhung des Schrottvolumens nur bedingt einschätzbar sind, wird die Machbarkeit dieses Enablers durch die Teilnehmenden mit einem „nicht beurteilbar“ versehen. Dieses Meinungsbild spiegelt wider, dass es sich hierbei um ein Spannungsfeld möglicher Maßnahmen handelt und eine teils unterschiedliche Wahrnehmung hinsichtlich der Verfügbarkeit an Aluminiumschrotten besteht. Zusätzlich wird festgehalten, dass dieses Thema im Kontext aller hier im Bericht aufgeführten Inhalte zum Thema Export steht.

⊗ *Zielkonflikte*

- Festschreibung hoher Rezyklateinsatzquoten sind zu hinterfragen und können zum Teil auch kontraproduktiv sein. Zum Beispiel stehen nicht ausreichend Schrotte zur Verfügung und diverse Effekte durch längere

Transportentfernungen zur Lenkung von Stoffströmen können zu gegenteiligen ökologischen Effekten führen.

Enabler #7

Definition des Ziels von Recycling – Nennung von Zielkonflikten

✔ *Machbarkeit*

Während ein Teil der Teilnehmenden von einer guten Machbarkeit des Enablers überzeugt ist, kann ein anderer Teil dazu noch keine abschließende Einschätzung abgeben.

- Die Zielstellungen an das Recycling sind grundsätzlich nicht verallgemeinerbar und an die spezifischen Kundenanforderungen auszurichten: Der Begriff Recycling muss daher differenziert betrachtet werden. Die Aufbereitungstiefe ist kundenanforderungsspezifisch zu definieren.
- Um zukünftig mehr Recycling zu ermöglichen, ist eine entsprechende Aufbereitungstiefe notwendig. Es muss überlegt werden, wie dazu zukünftig investiert werden soll und wie Investitionen gefördert werden (können).

⊗ *Zielkonflikte*

- Anforderungen an Schadstoffgehalte versus Recycling: Die rechtlichen Anforderungen an die „Schadstoff“-Gehalte von Materialien (zum Beispiel Anforderungen an Bleigehalte in der ELV, RoHS ...) sind heute schon hoch und werden perspektivisch weiter verschärft. Neue Einstufungen von Materialien in der CLP-Verordnung sind abzusehen, die den Einsatz dieser Materialien in Produkten erheblich einschränken werden.
- Legierungselemente sind essenziell für Produkteigenschaften (Verarbeitung, Korrosion, Sicherheit, etc.), können sich aber gegebenenfalls auch negativ auf den CO₂-Footprint auswirken. Deshalb sollten solche Zielstellungen die eigentlichen Nutzungszwecke der Legierungen mitberücksichtigen.

Enabler #8

Stärkere Berücksichtigung des Recyclings in der Gesetzgebung

✔ *Machbarkeit*

Die Machbarkeit einer recyclingorientierten Gesetzgebung wird mit großer Mehrheit als gut bis sehr gut beurteilt. Dennoch werden zahlreiche Aspekte genannt, die den Umsetzungsprozess aufwendig und womöglich komplex gestalten werden:

- Die Schaffung eines Level-Playing-Fields ist nur durch Vorgaben auf Ebene der Europäischen Union möglich. Erst dann kann eine nachgestaltete, nationale Ausgestaltung eines Level-Playing-Fields angegangen werden.
- Unterschiedliche Standards und Verständnisse von Mitgliedsstaaten hinsichtlich europäischer Vorgaben: Trotz gemeinsamer europäischer Vorgaben sind die Standards und das Verständnis der einzelnen Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die einen setzen EU-Vorgaben strikt um und andere Länder orientieren sich lediglich daran (BVT-Merkblätter und Quoten).
- Die Erarbeitung technischer Verwertungsstandards ist unbedingt notwendig, um ein harmonisiertes, hochwertiges Recycling innerhalb Deutschlands und der Europäischen Union zu gewährleisten.
- Bisher ist die (technische) Kontrolle von EU-Import unzureichend. Oftmals werden Abfälle in Zusammensetzungen angeliefert, die unbekannt sind, weil zum Beispiel über das Internet Waren importiert werden, die jeglicher technischen Kontrolle durch die Europäische Union entzogen sind. Hier gilt es anzusetzen, um das Recycling zu verbessern und die Inverkehrbringer in den Prozess mit einzubinden. Zum Beispiel stellt der wenig kontrollierte Import von Elektro- und Elektronikaltgeräten über den Internethandel hinsichtlich Recyclingfähigkeit (Chemikalienrecht) ein noch weitgehend ungelöstes Problem.

lem dar. Auch ein Produktpass könnte hierbei hilfreich sein.

- Kommt es zum Import von Produkten ohne dieselben Standards, kann dies einen Wettbewerbsnachteil darstellen.

⊗ Zielkonflikte

- Schadstoffentfrachtung versus Recycling: Die Einstufung von Stoffen im Chemikalienrecht erfolgt nach toxikologischen Kriterien. Die Recyclingfähigkeit ist davon zunächst unabhängig, sodass diese keinen Einfluss auf die Grenzwerte hat. Sind für bestimmte Produkte keine Alternativen vorhanden, so werden Ausnahmen erteilt (beispielsweise Bleigehalt in Messinglegierungen in der RoHS). Die Aufrechterhaltung eines Dialogs zwischen Abfall- versus Chemikalienrecht ist sinnvoll.
- Konkurrierende Gesetzgebung zwischen Abfall- und Chemikalienrecht: Durch die konkurrierende Gesetzgebung zwischen Abfallrecht und Chemikalienrecht kommt es zu zahlreichen Zielkonflikten. Teilweise verhindern immer niedrigere Grenzwerte die Nutzung von Sekundärrohstoffen im Produktionsprozess, andererseits wird auch das Recycling verhindert, wenn bestimmte Rohstoffe ausgeschleust statt aufbereitet werden sollen, weil bestimmte Stoffkonzentrationen zu hoch sind.

Enabler #9

Produktdesign

✓ Machbarkeit

Ein Design for Recycling wird von den meisten UAK-Teilnehmenden als gut machbar befunden, wobei jedoch einige Hürden genannt werden. So werden Hindernisse bei der informatorischen und organisatorischen Machbarkeit sowie auch in den rechtlichen, technischen und sozial-ökonomischen Bereichen identifiziert:

- Für das Gelingen eines Design for Recycling ist unabdingbar, dass das Zusammenspiel in der Lieferkette stattfindet.

- Darüber hinaus ist es erforderlich, den Begriff „funktionserhaltendes Recycling“ zu definieren, um Orientierung für alle Nutzenden zu bieten und so falsche Interpretationen zu verhindern. Das Potenzial, funktionserhaltendes Recycling zu nutzen, kann durch einen (digitalen) Produktpass mit den nötigen Informationen für die Recycler einfacher nutzbar gemacht werden.

- Verbundwerkstoffe sind nur schwer recycelbar: Es gibt beispielsweise Verbundwerkstoffe mit speziellen Eigenschaften. Diese recyclingfähig zu gestalten, ist technisch nicht einfach umzusetzen, sollte aber dennoch als erklärtes Ziel festgehalten werden.

⊗ Zielkonflikte

- Seitens der Teilnehmenden wurden keine Zielkonflikte angeführt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass Anforderungen an ein Design for Recycling widersprüchlich zu Anforderungen etwa an ein Design for Repair, Reuse oder Remanufacturing sein können.

Enabler #10

Investitionen in Wertstoffhöfe und Sammelstellen zur Sicherung der Rohstoffversorgung in Deutschland

✓ Machbarkeit

Von der Machbarkeit dieses Enablers ist die große Mehrheit der Teilnehmenden überzeugt und es zeigt sich, dass im Falle von Wertstoffhöfen und Sammelstellen vor allem zwei Aspekte Relevanz haben.

- Zum einen ist es erforderlich, die Ursachen und Gründe für teils sehr unterschiedliche Sammelerfolge auf Wertstoffhöfen und Sammelstellen herauszuarbeiten und darauf aufbauend effizientere Sammellösungen abzuleiten. Die Sammlung ist ein zentrales Instrument zur zukünftigen Rohstoffversorgung in Deutschland. Folglich ist es wichtig, die Gründe und Ursachen für gute oder schlechte Sammlung zu kennen, um gezielt mit Investitionen unterstützen zu können.

- Zum anderen sollte (mehr) in neue Innovationen im Recycling investiert werden und generell das Verbesserungspotenzial im Recycling evaluiert werden, um Investitionstätigkeiten entsprechend ausrichten zu können.
- Es bedarf dringend der Bereitschaft beziehungsweise der Mitarbeit der Verbrauchenden, Altgeräte zu entsorgen.

⊗ *Zielkonflikte*

- Seitens der Teilnehmenden wurden keine Zielkonflikte angeführt.

Enabler #11

Unterstützung von Automatisierung und Digitalisierung von Prozessen

✓ *Machbarkeit*

Eine bessere Unterstützung bei der Automatisierung und der Digitalisierung von Prozessen wird von den UAK-Teilnehmenden zum Teil als gut machbar eingestuft, zum Teil wird angegeben, dass keine abschließende Einschätzung zur Machbarkeit abgegeben werden kann. Besonders folgende Aspekte werden genannt, die nach Meinung der Teilnehmenden eine Umsetzung behindern oder erschweren:

- Das Fehlen eines Design for Recycling und entsprechender Standardisierungen erschwert die Umsetzung von besserer Automatisierung und einer Prozess-Digitalisierung. Auch hier könnte ein Produktpass Hilfestellung leisten.
- Es wird empfohlen, dass bei der technologischen Umsetzung die Wirtschaftlichkeit mitberücksichtigt wird. Diese ist besonders im Bereich des Elektroaltgeräterecyclings essenziell.
- Auch für eine automatisierte Demontage werden zum Teil weiterhin ausgebildete Fachkräfte benötigt, die häufig jedoch nicht in ausreichender Anzahl vorhanden sind.

⊗ *Zielkonflikte*

- Seitens der Teilnehmenden wurden keine Zielkonflikte angeführt.

Enabler #12

Investitionen in unabhängige Rohstoffversorgung für die Kreislaufwirtschaft

✓ *Machbarkeit*

Im Hinblick auf die Machbarkeit von Investitionen in eine unabhängige Rohstoffversorgung für die Kreislaufwirtschaft reichen die Bewertungen der Teilnehmenden von einer positiven bis kritischen Einschätzung.

- Zu den Aspekten, welche die Umsetzung behindern oder erschweren könnten, gehört zum einen, dass internationale Wechselwirkungen wie etwa die WTO-Konformität unbedingt zu beachten sind.
- Zum anderen besteht eine (große) Abhängigkeit von Primärrohstoffen, die in der Europäischen Union nicht verfügbar, aber notwendig sind und auch in Zukunft sein werden, um die erforderlichen Qualitäten generieren zu können.
- Die Grundstoffversorgung sollte einen guten Mix von Eigenversorgung und Importvereinbarungen darstellen. Die Primärproduktion von Aluminium und Legierungselementen ist aufgrund von Faktoren wie Arbeitskosten, Stromkosten, Gesetzgebung, Globalisierung etc. aber auch Know-how aus Europa zurückgegangen. Handelsübereinkommen mit Drittländern sollten spezifische Versorgungselemente haben. Strategische Lager könnten auch ein Element der Versorgungssicherheit sein.
- Für Deutschland und Europa besteht zum Beispiel bei Magnesium eine 100-prozentige Abhängigkeit von China, was die Bedeutung von Handelsabkommen unterstreicht. Hier sind nicht nur die Unternehmen, sondern auch die Politik in der Verantwortung.

- Eine Abhängigkeit der Rohstoffversorgung von der Primärseite bleibt auch weiterhin bestehen. Kreislaufwirtschafts- und Recyclingdiskussionen bei Aluminium können nicht gänzlich ohne die Berücksichtigung von Primärrohstoffen geführt werden.
- Es ist zu hinterfragen, ob der europäische Markt genug Recyclingmaterialien/Energie zu auskömmlichen Preisen zur Verfügung stellt, um eine importunabhängige Versorgung angesichts des stark wachsenden Bedarfs in der Europäischen Union sicherzustellen.

⊗ Zielkonflikte

- Die Forderung nach Rohstoffunabhängigkeit kann den Prinzipien des freien Handels entgegenstehen. Hier bedarf es eines an den globalen Gegebenheiten ausgerichteten realistischen Vorgehens.

Enabler #13

Kooperationen über die Lieferkette

✔ Machbarkeit

Die Einschätzung der Machbarkeit zeigt ein zweigeteiltes Bild. Ein Teil der UAK-Teilnehmenden geht von einer guten Machbarkeit des Enablers aus, der andere Teil ist ebenso von der Machbarkeit überzeugt, allerdings werden dabei einige Aspekte, welche die Umsetzung behindern oder erschweren könnten, gesehen:

- Die bisherige Dialogarbeit zwischen Hersteller und Recycler reicht nicht aus und sollte intensiviert werden.
- Außerdem gilt es, kartellrechtliche Fragestellungen zu klären.

⊗ Zielkonflikte

- Vielzahl an Akteuren mit ihren teils gegenläufigen wirtschaftlichen Interessen erschwert Zusammenarbeit.

Enabler #14

Gesetzgebung für eine Kreislaufwirtschaft und EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln, -standards und -verfahren

✔ Machbarkeit

Die Einschätzung zur Machbarkeit des Enablers wird von der Mehrheit trotz einiger Bedenken bezüglich möglicher Hindernisse, die im Umsetzungsprozess erwartet werden, mit einem positiven Votum belegt. Besonders kritische Einschätzungen finden sich aufgrund möglicher Zielkonflikte im rechtlichen und sozial-ökonomischen Bereich wieder. Folgende Aspekte wurden mit Blick auf die Machbarkeit des Enablers genannt:

- Auf Basis eines einheitlichen Verständnisses des Recyclingprozesses sowie der Recyclingziele wird Transparenz erreicht. Außerdem werden Verluste aller Art minimiert, indem eine übergreifende und vernetzte Optimierung des Recyclings angeregt wird. Eine Standardisierung darf dabei jedoch nicht einem effizienten, auf spezifische Anforderungen abgestimmten Recycling im Wege stehen. Ziele müssen verpflichtende Standards und technische Spezifikationen sein, die den Stand der Recyclingtechnik der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigen und weiterentwickeln und dabei auch Umwelt, Gesundheit, Kosten und Verfahrenseffizienz betrachten.
- Zur Vermeidung von Qualitätsverlusten müsste eine Spezialisierung einzelner Betriebe auf bestimmte Hauptmetalle realisiert werden, indem die einzelnen Metalle, Legierungen oder Elemente zu dafür spezialisierten Recyclinghöfen befördert und dort aufbereitet werden. Der Herausforderung kann entsprochen werden, indem strategisch günstig liegende Recyclingbetriebe hinsichtlich einer Spezialisierung gefördert werden und sich mit weniger spezialisierten Betrieben vernetzen.
- Legierungsbezeichnungen und -nummern wären zu standardisieren, vor allem aber EU-

weit zu harmonisieren, um die Nachvollziehbarkeit legierungsspezifischer Stoffströme zu steigern. Bestehende Bezeichnungsstandards gelten entweder national, auf europäischer Ebene oder weltweit. Ziele der Normierung sollten die Gewährleistung von Qualitätssicherung, Sicherheit und Umweltschutz sowie eine bessere Verständigung dazu zwischen Wirtschaft, Technik, Wissenschaft und Verwaltung sein.

- Die Politik signalisiert unzureichend, dass der politische Wille zu Veränderungen gegeben ist.
- Chemikalienrecht versus Recycling: Die Einstufung von Stoffen im Chemikalienrecht erfolgt unabhängig von der Recyclingfähigkeit nach toxikologischen Kriterien. Ein regelmäßiger Austausch zwischen Chemikalienrecht und Kreislaufwirtschaft ist aber aufgrund möglicher Folgen für die Recyclingwirtschaft notwendig.
- Bestehende Verarbeitungskapazitäten zur Aluminium-Aufbereitung sollten berücksichtigt werden. Bezogen auf Aluminium gibt es derzeit keine ausreichenden Verarbeitungskapazitäten, um alle in Deutschland aufbereiteten Aluminiumschrotte einzusetzen.
- Es ist damit zu rechnen, dass die Transformation des Energiesystems und der Rohstoffwirtschaft hohe Kosten verursachen wird. Maßnahmen zur finanziellen Unterstützung sollten begleitend zum Transformationsprozess frühzeitig mitangestoßen werden.

⊗ Zielkonflikte

- Der gesamte Wertstoffkreislauf sollte in der Europäischen Union vorhanden bleiben. Dabei sollten sozio-ökonomische Schäden durch Marktabschottung vermieden werden. Exporte dürfen nach Abfallrahmenrichtlinie nur in ausländische Recyclinganlagen erfolgen, die mit Europa vergleichbare Umwelt- und Verwertungsstandards haben. Der Vollzug dieser Gesetzgebung muss aber gestärkt werden.

1.5 Nächste Schritte

Die Bewertungen der Machbarkeiten zu den vorgestellten 14 Enablern zeigen zusammenfassend, dass die Teilnehmenden des UAK Aluminium in der Gesamtheit davon überzeugt sind, dass die möglichen Hürden, die sie bei manchen Lösungsansätzen im Falle einer Umsetzung sehen, überwunden werden können. Zukünftig kommt deshalb einem verbesserten Recycling neben der Aufrechterhaltung der Primärherstellung eine zentrale Bedeutung zu. Die zukünftige Versorgung mit Aluminium in der Bundesrepublik ist dabei unabdingbar mit den politischen Prozessen und Beschlüssen auf europäischer Ebene verbunden. Zudem gilt es weltweit, die eigene Rolle als Industriakteur samt ihrer tiefen und komplexen Verwobenheit in globale Prozesse und Handelsbeziehungen während der notwendigen Transformation hin zu nachhaltigem, zirkulärem und ressourcenschonendem Wirtschaften zu behalten und den Weg gemeinsam zu beschreiten. Auf nationaler Ebene kann die Bundesrepublik viele wichtige Maßnahmen ergreifen, um das Recycling von Aluminium weiter zu stärken.

Kurzfristig sind die folgenden drei Lösungsansätze zu realisieren:

Die erste wichtige Handlungsoption, die **kurzfristig** gemeinsam von Politik, Industrie und Wissenschaft umgesetzt werden kann, ist die Weiterentwicklung und Förderung des Einsatzes von innovativen Trenn- und Sortiertechniken. Die derzeitigen am Markt befindlichen Sortier- und Trennverfahren sollten weiterentwickelt werden, um die legierungsspezifische Trennung von Aluminiumschrotten zu verbessern.

Die zweite **kurzfristig umsetzbare** Handlungsoption ist die Unterstützung der Transformation der pyrometallurgischen energieintensiven Prozesse. Denn so kann eine Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks erreicht werden. Im Moment fehlt es an Technologie zur Transformation der Metallurgie – verbunden mit der Elektrifizierung und dem Einsatz synthetischer Gase.

Die dritte Handlungsoption, die **kurzfristig umgesetzt** werden kann, ist die Sicherstellung der Planbarkeit von Investitionen und Betriebskosten durch entsprechende politische Rahmenbedingungen. Eine sichere Planbarkeit ist aktuell hinsichtlich Investitionen und Betriebskosten nicht möglich.

Zudem wurden Lösungsansätze mit dem **größten positiven Einfluss** identifiziert. So sollte es von der Politik gesetzlich fest verankert werden, dass schon beim Produktdesign auf Demontage-, Reparatur- und Recyclingfreundlichkeit zu achten ist. Das schließt die einfache Demontage genauso ein wie mittelfristig Verbundmaterialien zu vermeiden oder recyclingfreundlich zu gestalten. So wäre es möglich, sortenrein zu trennen und Verluste an Begleitelementen im pyrometallurgischen Prozess zu vermindern. Im Moment kommt es auf Basis von eingeschränkter Trenn- und Zerlegbarkeit von Produkten nach ihrer Nutzungsdauer in ihre Einzelteile (EoL) noch zur Vermischung von verschiedenen Metalllegierungen, Verbundmaterialien und Kunststoffen. Das generiert Materialverluste und eine sortenreine Trennung der Stoffströme ist so nur mit hohem Aufwand möglich.

Weitere Schritte, die zur Stärkung des Recyclings von Aluminium angegangen werden sollten, können zudem weiter mit Blick auf die verschiedenen Akteursgruppen hin unterschieden werden:

Verwaltung und Politik sollten Schritte zur Förderung von Technologien und der dafür erforderlichen (digitalen) Infrastruktur ergreifen. Das beinhaltet zum einen die Etablierung von Technologie-Förderprogrammen (Sortier-, Trenn-, Brenner- und Ofentechnologien sowie Infrastruktur) sowie industrieübergreifende Förderprogramme mit lokalem und/oder regionalem Bezug. Zum anderen gilt es, relevante Rahmenbedingungen sicherzustellen. Dazu gehören die Rohstoffverfügbarkeit und der Rohstoff- und Energiebezug unter Berücksichtigung der notwendigen Volumina und der Wirtschaftlichkeit. Außerdem sollten Unterstützungsmaßnahmen auch in den Bereich Investitionen und Koopera-

tionen bei der Sammel- und Aufbereitungsinfrastruktur forciert werden.

Industrie und Wirtschaft sollten Schritte zur Etablierung von Kooperationen über die Lieferkette angehen. Sie sollten Dialogplattformen zu spezifischen Themen wie etwa Produktdesign – Verpackung, Automobil, Bau, Elektronik und erneuerbare Energien einrichten. Außerdem sollten sie Technologieforen etablieren, zum Beispiel zu Legierungstoleranzen oder pyrometallurgischen Trenntechnologien. Es sollten darüber hinaus Schritte unternommen werden, um (mehr) Förderprogramme bereitzustellen. Langfristige Kooperationen und Entwicklungen sollten begleitet werden.

Akteure aus **Wissenschaft und Forschung** sollten Schritte zur Förderung und Vereinfachung der Zusammenarbeit mit der Industrie festhalten. Einer dieser Schritte sollte sein, interdisziplinäre Forschungsprogramme zu spezifischen Themen wie dem Produktdesign, zum Beispiel im Bereich Verpackung, Automobil, Bau, Elektronik, oder Erneuerbare Energien zu etablieren und die Schaffung von Technologieforen zum Beispiel zu Legierungstoleranzen, pyrometallurgischen Trenntechnologien zu unterstützen und mitzugestalten.

Die Summe all dieser vorgestellten Handlungsoptionen könnte essenziell dazu beitragen, die Rohstoffversorgung des Industriestandorts Deutschland durch eine Stärkung des Aluminiumrecyclings für die Zukunft zu sichern. Der UAK Aluminium spricht sich daher für die Umsetzung dieser Handlungsoptionen aus.

2. Literaturverzeichnis

AD – ALUMINIUM DEUTSCHLAND (02.08.2023). Persönliche Mitteilung. Empfänger: Geschäftsstelle Dialogplattform Recyclingrohstoffe. 02.08.2023.

ALUMINUM ASSOCIATION (2015): Aluminum design manual. 2015. ISBN: 0986363103. Aluminum Association inc. [Washington, D.C.].

ALUMINIUM DEUTSCHLAND (01.08.2023): Recycling Statistics. Production Germany (Refiner & Remelter). 2. quarter 2023. Präsentation.

AURUBIS AG (2022): Umweltschutz im Aurubis-Konzern und aktualisierte Umwelterklärung 2022 der Aurubis AG, Standorte Hamburg und Lünen. – URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj8_fCRpM2BAxU3QVEDHbfCDq4QFnoEC-BIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.aurubis.com%2Fdam%2Fjcr%3Aba791056-324c-4066-bf17-21ad1fc5d9db%2F2022_Umweltbericht_DE.pdf&usq=AOvVaw3AX9ACzjHLrBDUUIO-VIJJM&opi=89978449 (Stand: 22.09.2023)

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2022): Deutschland – Rohstoffsituation 2021. Stand: Dezember 2022. Empfänger: Bookhagen, B.; Eicke, C.; Elsner, H.; Henning, S.; Kern, M.; Kresse, C.; Kuhn, K.; Liesegang, M.; Lutz, R.; Mähltitz, P.; Moldenhauer, K.; Pein, M.; Martin; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Sievers, H.; Szurlies, M. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2021.pdf;jsessionid=18CA0A8C058B67D137450B07C6E6AD25.internet002?__blob=publicationFile&v=4 (Stand: 14.08.2023).

BUCHERT, M., BLEHER, D., BULACH, W., KNAPPE, F., MUCHOW, N., REINHARDT, J. & MEINSHAUSEN, I. (2021): Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III). TEXTE 47/2022. – URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_47-2022_kartierung_des_anthropogenen_lagers_iii.pdf (Stand: 14.03.2023).

BUNDESREGIERUNG DEUTSCHLAND (2020): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. – URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/rohstoffstrategie-bundesregierung.html> (Stand: 17.10.2022).

CULLEN, J. M. & ALLWOOD, J. M. (2013): Mapping the Global Flow of Aluminum: From Liquid Aluminum to End-Use Goods. Environmental Science & Technology. Heftnr. 7. American Chemical Society. doi: 10.1021/es304256s (Stand: 03.08.2023).

DESTATIS – STATISTISCHES BUNDESAMT (2023): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart, Abfallarten. – URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32111-0002&bypass=true&levelindex=0&levelid=1683535748911#abreadcrumb> (Stand: 10.05.2023).

EUROPEAN ALUMINIUM (2018): ENVIRONMENTAL PROFILE REPORT. – URL: <https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/> (Stand: 13.05.2023).

GDA – GESAMTVERBAND DER ALUMINIUMINDUSTRIE E. V. (2003): Merkblatt. ISBN: 3-937171-00-2. GDA. Düsseldorf.

GDA – GESAMTVERBAND DER ALUMINIUMINDUSTRIE E. V. (2004): Der Werkstoff Aluminium. ISBN: 3-937171-02-09. GDA. Düsseldorf.

GDA – GESAMTVERBAND DER ALUMINIUMINDUSTRIE E. V. (2007): Wärmebehandlung von Aluminium-Legierungen. ISBN: 978-3-937171-19-7. GDA. Düsseldorf.

GESELLSCHAFT FÜR VERPACKUNGSMARKTFORSCHUNG (2021): Recycling von Getränkedosen. – URL: https://gymonline.de/files/recycling/2021_04_27_Recyclingquoten_Getraenkedosen_Endbericht.pdf (Stand: 12.06.2023).

HATAYAMA, H., YAMADA, H., DAIGO, I., MATSUNO, Y. & ADACHI, Y. (2006): Dynamic Substance Flow Analysis of Aluminum and Its Alloying Elements. Journal of the Japan Institute of Metals. Heftnr. 12. doi: 10.2320/jinstmet.70.975 (Stand: 04.08.2023).

IAI – INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE (2021): Global Aluminium Cycle 2021. – URL: https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/public-global-cycle/?_gl=1*1tz8zx8*_up*MQ.*_ga*MTcxMTQ1MjkyNS4xNjg4NzE4MzUw*_ga_PLPZ0ZWlJW*MTY4ODcxODM0OS4xLjAuMTY4ODcxODM0OS4wLjAuMA (Stand: 25.11.2022).

RAATZ, S., SEIDEL, TUMA, THORENZ, HELBIG, C., RELLER, FAULSTICH, M., JOACHIMSTHALER, C., STEGER, HAGEDORN, BICKEL & LIEDTKE, M. (2022): OptiMet – Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie – Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling– TEXTE. 81. – URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_81-2022_optimet.pdf (Stand: 22.12.2022).

UBA – UMWELTBUNDESAMT (2021): Stadtgold – Metalllager mit Zukunft. Ein Leitfaden. – URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_leitfaden_kartal_iii_metalle_211217_bf.pdf (Stand: 17.08.2023).

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (2011): Recycling Rates of Metals - A Status Report. Empfänger: Graedel, T. E.; Allwood, J. M.; Birat, J.-P.; Reck, B.; Sibley, S.; Sonnemann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C. – URL: <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals> (Stand: 28.03.2023).

VASTERS, J. & FRANKEN, G. (2020): Aluminium. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/aluminium.pdf;jsessionid=02EACEDB012BDD659B0F2028FF68D6B2.internet982?__blob=publicationFile&v=2 (Stand: 14.05.2023).

XINGLU CHEMICAL (k.A.): Eine Hochleistungsaluminiumlegierung: AL-SC-Legierung. – URL: <https://www.xingluchemical.com/de/news/a-high-performance-aluminum-alloy-al-sc-alloy/> (Stand: 15.08.2023).

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin

dera@bgr.de

