

Aluminium

Factsheet

Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“

(FKZ 3716 35 3230)

Das Projekt wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt und über den Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, und Reaktorsicherheit mit Bundesmitteln finanziert

1 Übersicht

Aluminium ist ein Leichtmetall und das dritthäufigste Element sowie das häufigste Metall in der Erdkruste. Es ist auf Grund seiner Eigenschaften nach Eisen der zweitwichtigste metallische Werkstoff. In Legierungsform kann es vergleichbare Festigkeiten erreichen wie Stahl, bei nur einem Drittel der Dichte. Es ist nach Silber, Kupfer und Gold das Metall mit der vierthöchsten Leitfähigkeit und wird auf Grund seiner geringeren Dichte für Freileitungen eingesetzt.

Der Rohstoff für die Produktion von Aluminium ist das Mineral Bauxit. Dieses wird im Bayer-Verfahren zu Aluminiumoxid umgesetzt. Das Aluminiumoxid wird im Hall-Héroult-Prozess in einer Schmelzflusselektrolyse zu Aluminium reduziert.

2 Mengenströme und Anwendungen

Die Hauptlieferländer Europas für nicht legiertes Rohaluminium waren 2015 Russland (39 %), die Vereinigten Arabischen Emirate (17 %) und Mosambik (14 %)¹. Als Hauptlieferländer Deutschlands für nicht legiertes Rohaluminium wies die BGR 2015 Russland (32,7 %), die Niederlande (22,5 %) und Island (11,4 %) aus². Die Niederlande sind hier mit einem großen Anteil genannt, da viele Importe über den Handelsplatz Rotterdam getätigt werden, welche dann den Niederlanden zugeschrieben werden. Grundsätzlich sollten die Hauptlieferländer für Deutschland und Europa sehr ähnlich sein.

2.1 Produktion

Deutschland produzierte 2015 541.000 t Aluminium aus Erz und 620.000 t aus Sekundärmaterialien³. Die Statistik enthält nicht alle Produktionsmengen von Sekundäraluminium in Deutschland und fokussiert vor allem auf Sekundäraluminium aus Post-Consumer-Schrotten. Weltweit wurden 2015 57,736 Millionen Tonnen Primäraluminium hergestellt⁴. In Deutschland gibt es vier Standorte, an denen Primäraluminium erzeugt wird. Insgesamt verarbeiten hierzulande rund 600 Betriebe Aluminium⁵. Mit der Herstellung von Sekundäraluminium sind etwa 15 Remelter - diese schmelzen definierte Schrotte ohne Verunreinigungen ein - und etwa sieben Refiner, welche Aluminiumschrotte aus dem End-of-Life-Bereich mit den entsprechenden Verunreinigungen wieder zu Aluminium aufbereiten, befasst.

Der Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA)⁶ vertritt die Interessen der Industrie entlang der Wertschöpfungskette des Aluminiums. Die Wirtschaftsvereinigung Metalle⁷ ist der Dachverband des GDA.

1 European Aluminium (2018): Environmental Profile Report - Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. URL: <https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/environmental-profile-report-2018/> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

2 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016): Deutschland - Rohstoffsituation 2015. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

3 Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. (2016): Metallstatistik 2015. URL: https://www.wvmetalle.de/fileadmin/uploads/public/Metallstatistik/Metallstatistik_2015.pdf (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

4 International Aluminium Institute (2018): Primary Aluminium Production 2015. URL: <http://www.world-aluminium.org/statistics/> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

5 Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2018): Beschäftigung und Umsatz. URL: <http://www.aluinfo.de/beschaeftigung-und-umsatz.html> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

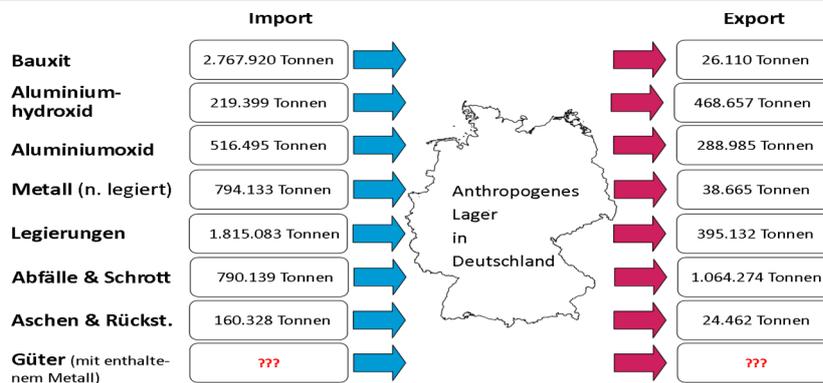
6 Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. URL: <http://www.aluinfo.de/> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

7 Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. URL: <https://www.wvmetalle.de/> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

2.2 Im-/Export

In Abbildung 1 sind die Im- und Exportströme 2015 für Aluminium, seine Vorprodukte und die Schrotte/Aschen dargestellt.

Abbildung 1: Im- und Export von aluminiumhaltigen Stoffen in 2015



Quelle: Öko-Institut e.V. nach BGR 2017⁸

Die Grafik lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Rohstoffe → Nettoimport 2,8 Mio. t
- ▶ Metalle → Nettoimport 2,16 Mio. t
- ▶ Schrotte und Aschen → Nettoexport 0,15 Mio. t

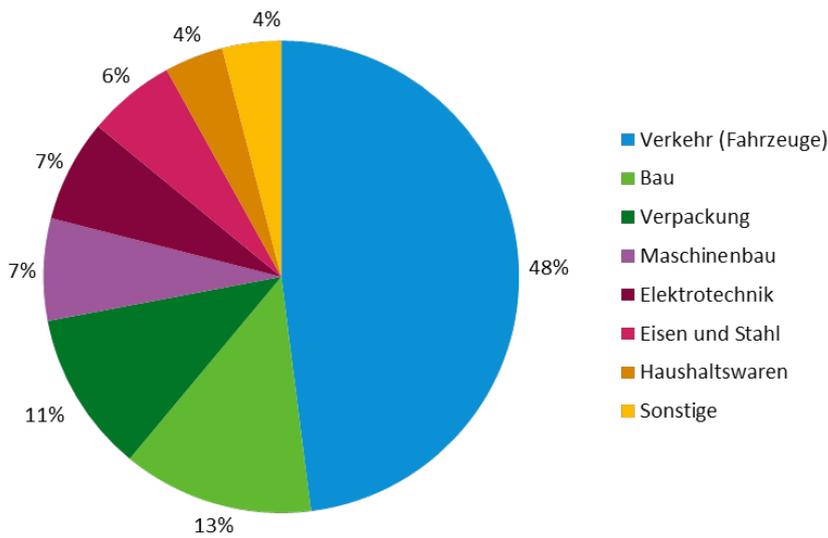
2.3 Anwendung

Die deutsche Aluminiumnachfrage kommt zu fast 50 % aus dem Verkehrssektor, also dem Fahrzeugbau. Ob Karosserie, Motor oder Felgen, viele Teile von Fahrzeugen werden aus Aluminium gefertigt. Im Bausektor sind es hingegen Fenster, Fassadensysteme, Konstruktionsteile oder Deckenbekleidungen die aus dem Leichtmetall hergestellt werden. Im Verpackungssektor wird Aluminium z. B. in Form von Dosen oder Folien eingesetzt. In der Elektrotechnik sind Gehäuse, Kabel und Kühlkörper wichtige Anwendungen. In den übrigen Feldern, also Maschinenbau, Eisen und Stahl, sowie Haushaltswaren, wird Aluminium in Maschinenteilen und Pfannen, aber auch als Desoxidationsmittel in der Stahlerzeugung eingebracht. In Abbildung 2 sind alle Sektoren und ihre jeweiligen Anteile am Aluminiumgesamtbedarf 2015 dargestellt.

In Abbildung 3 sind der Kreislauf des Aluminiums und die im Projekt Kartierung des Anthropogenen Lagers III betrachteten Produktgruppen illustriert. Bei der Quantifizierung werden nur Anwendungen betrachtet, welche zu einem anwachsenden Lager führen, d. h. Produktionsabfälle oder kurzlebige Produkte (Lebensdauer von unter einem Jahr; beispielsweise Verpackungen) werden nicht betrachtet.

⁸ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2017): Deutschland - Rohstoffsituation 2016. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

Abbildung 2: Hauptverwendungsgebiete des Aluminiums



Quelle: Öko-Institut e.V. nach WVM 2016⁹

Abbildung 3: Kreislauf des Aluminiums



Quelle: Freymüller/123comics im Auftrag von Öko-Institut e.V.

⁹ Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. (2016): Metallstatistik 2015. URL: https://www.wvm-metalle.de/fileadmin/uploads/public/Metallstatistik/Metallstatistik_2015.pdf (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

Trends: In der Zukunft wird die Elektromobilität zu einer vermehrten Nachfrage an Aluminium führen, da beispielsweise Gehäuse von Batterien, Leistungselektronik sowie mehr Teile der Karosserie aus Aluminium gebaut werden. Zusätzlich wird der Netzausbau für die Energiewende zu einem höheren Aluminiumbedarf führen.

3 Relevante rechtliche Regelungen

Luft: Nach der vierten Bundesimmissionsschutzverordnung (4. BImSchV) ist für Anlagen zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen aus Erzen, Konzentraten oder sekundären Rohstoffen durch metallurgische, chemische oder elektrolytische Verfahren (Anhang 1 Nr. 3.3), für Anlagen zum Schmelzen, zum Legieren und zur Raffination von Nichteisenmetallen mit einer Schmelzkapazität von mehr als 20 t sonstigen Nichteisenmetallen pro Tag (Anhang 1 Nr. 3.4.1), für Nichteisenmetallgießereien mit einer Verarbeitungskapazität an Flüssigmetall (sonstige Nichteisenmetalle) von mehr als 20 t pro Tag (Anhang Nr. 3.8.1) sowie Anlagen zur Behandlung von Schrotten in Shredderanlagen mit einer Durchsatzkapazität von 50 t und mehr am Tag (Anhang 1 Nr. 3.22.1 und 8.9.1.1) ein Genehmigungsverfahren gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung) vorgeschrieben. Für Anlagen mit 2 t bis weniger als 20 t Durchsatz am Tag (Anhang 1 Nr. 3.4.2, 3.8.2), bzw. 10 t bis weniger als 50 t (Anhang 1 Nr. 3.22.2 und 8.9.1.2) sowie Anlagen zur Herstellung von Metallpulvern und Pasten ist ein vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG (ohne Öffentlichkeitsbeteiligung) vorgeschrieben. Die 4. BImSchV weist einige Ausnahmen hiervon aus¹⁰.

Nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) ist für Errichtung und Betrieb einer Anlage zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen aus Erzen, Konzentraten oder sekundären Rohstoffen durch metallische, chemische oder elektrolytische Verfahren (Anlage 1 Nr. 3.4) und für die Errichtung und Betrieb einer Anlage zum Schmelzen, zum Legieren oder zur Raffination von Nichteisenmetallen mit einer Schmelzkapazität von 100.000 t oder mehr pro Jahr (Anlage 1 Nr. 3.5.1) eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen. Für eine Kapazität von 20 t und mehr pro Tag, aber weniger als 100.000 t pro Jahr (Anlage 1 Nr. 3.5.2) muss eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls durchgeführt werden. Bei 2 t bis weniger als 20 t pro Tag (Anlage 1 Nr. 3.5.3) genügt eine standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls. Hierbei gelten einige Ausnahmen.

Die Kapitel 5.4.3.3 und 5.4.3.4 der TA Luft befassen sich mit den spezifischen Anforderungen an Anlagen zur Herstellung von Nichteisenrohmetallen und zum Schmelzen, zum Legieren und zur Raffination von Nichteisenmetallen. Diese Anforderungen umfassen sowohl die baulichen und betrieblichen Anforderungen als auch die zulässigen Emissionswerte, zum Beispiel für Staub, Schwermetalle und organische Verbindungen sowie an die eingesetzten Brennstoffe.

Abwasser: Die Nutzung von Gewässern, wie zum Beispiel die Entnahme von Wasser aus Gewässern oder das Einleiten von Stoffen in Gewässer, sind im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt. Die Abwasserverordnung (AbwV) beinhaltet Vorschriften für die Vermeidung, die Messung und die Einleitung von Abwasser in Gewässer. In Anhang 39 der AbwV sind spezielle Anforderungen für Abwasser aus der Herstellung von Nichteisenmetallen festgelegt.

Abfall: Die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen wird im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt. Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) regelt die Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten. Zahlreiche Verordnungen regeln die Sammlung und Verwertung bestimmter Abfallströme (z. B. Altfahrzeuge). Die Gefahrgutverordnung

¹⁰ UBA (2013): Nichteisenmetalle. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieverarbeitung/herstellung-verarbeitung-von-metallen/nichteisenmetallindustrie#textpart-1> (zuletzt abgerufen am 25.07.2018).

Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB) regelt, ob gewisse Abfälle (z. B. Magnesiumspäne) als Gefahrgut transportiert werden müssen¹⁰.

4 Recyclingsituation

Das Maß für funktionierendes Recycling sind Recyclingraten. Diese lassen sich anhand unterschiedlicher Indikatoren messen. Eine Möglichkeit besteht darin, bei der Metallherstellung die Anteile sekundärer, also recycelter Bestandteile mit dem Gesamtgewicht der Produkte ins Verhältnis zu setzen (Recycled Content = RC). Dieser Indikator lässt allerdings keine Rückschlüsse über die Effizienz bei der Sammlung und Verwertung von Metallschrott zu. Hierzu muss die Phase mitbetrachtet werden, in der ein Produkt aus der Nutzung ausscheidet (End-of-Life; EoL). Die EoL-Recyclingrate bezeichnet die Menge eines rückgewonnenen Materials im Verhältnis zu der Menge des aus der Nutzung ausgeschiedenen Materials.

Es existieren Angaben zu nationalen und europäischen Recyclingraten (der GDA nennt hier 90 %), aber da Aluminiumschrott genau wie das Primärmetall ein global gehandeltes Gut ist, bilden globale Recyclingraten das Gesamtbild des Metalls besser ab.

Tabelle 1: Globale Recyclingraten des Aluminiums

RC _{Aluminium}	EoL _{Aluminium}
34 - 36 %	42 - 70 %

Quelle: Öko-Institut e.V. nach UNEP 2011¹¹

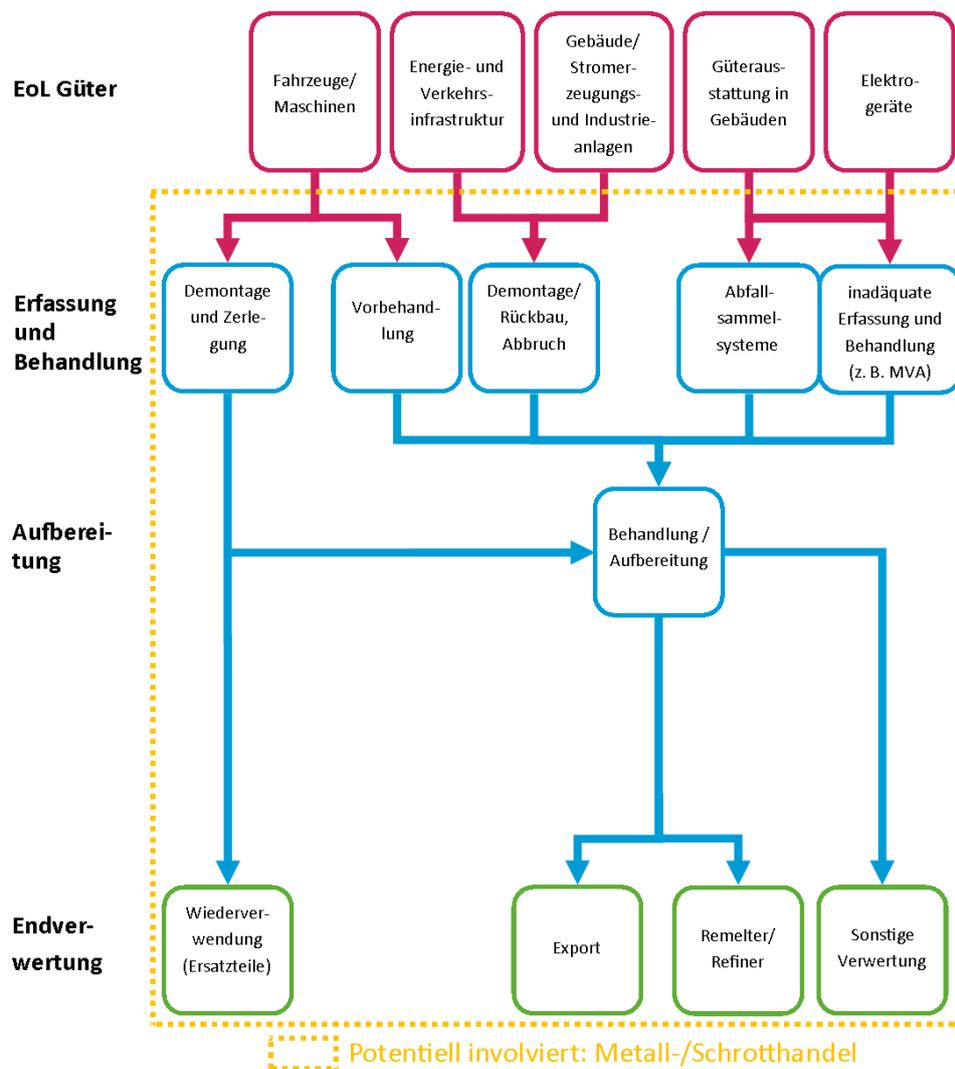
Die Hauptquellen von EoL-Aluminiumschrotten, welche dem Recycling zugeführt werden, sind: Leichtverpackungen, Altfahrzeuge, ausgemusterte Maschinen, Elektroschrott, Kabel, die Güterausstattung in Gebäuden und Schrotte aus dem Rückbau von Gebäuden, Energie- und Verkehrsinfrastruktur sowie Stromerzeugungs- und Industrieanlagen.

Für die dargestellten Gütergruppen sind in Abbildung 4 die identifizierten Verwertungswege zusammengefasst.

Fahrzeuge und Maschinen werden demontiert bzw. vorbehandelt (z. B. mittels eines Shredders). Die daraus resultierenden Ströme werden aufbereitet bzw. der Wiederverwendung zugeführt. Beim Elektroschrott ist dies ähnlich, nur ist die Behandlungstechnik eine andere. Gebäude, Industrie-/Energieerzeugungsanlagen und Infrastruktur werden abgebrochen bzw. demontiert oder rückgebaut und die erhaltenen Metalle werden ebenfalls aufbereitet. Haushaltsbedarf (z. B. Pfannen und Töpfe) können entweder direkt auf Recyclinghöfen und Schrottplätzen aussortiert werden oder gehen über die Restabfallsammlung in für Metalle inadäquate Behandlungsanlagen wie MVA. In beiden Fällen ist ein Aufbereitungsschritt notwendig. Die Rückgewinnung aus den MVA-Schlacken ist schwierig und trennt nur einen Teil der Metalle ab. Bei der Aufbereitung wird das Aluminium, abhängig vom jeweiligen Inputstrom, von den übrigen Metallen und anderen Stoffen (z. B. Kunststoff, mineralische Bestandteile) getrennt. Auch einzelne Aluminiumlegierungen werden voneinander getrennt. Dies ist für bestimmte Legierungen in der Praxis noch nicht optimal und hat ein hohes Verbesserungspotential. Dadurch werden Aluminium-Altschrotte nicht zu qualitativ hochwertigen Knetlegierungen, sondern überwiegend zu Gusslegierungen verschmolzen. Zur Erzeugung hochwertiger Knetlegierungen werden den Schrotten derzeit bis zu 50 % Primäraluminium in der Schmelze hinzu legiert, um die Qualitätsanforderungen erfüllen zu können.

¹¹ UNEP (2011): Recycling of Metals - A Status Report. United Nations Environmental Programme. ISBN: 978-92-807-3161-3.

Abbildung 4: Verwertungswege des Aluminiums



Quelle: Öko-Institut e.V.

Die Metallschrotte werden von den Aufbereitern an die Remelter und Refiner geliefert. Die Schrotte werden eingeschmolzen, wobei eine oberflächliche Oxidation des Aluminiums verhindert werden muss. Üblicherweise geschieht dies durch Abdecken der Oberfläche der Schmelze mit Salzen ($\frac{2}{3}$ NaCl / $\frac{1}{3}$ KCl / geringe Menge CaF₂). Verunreinigungen in der Schmelze, z. B. Lacke oder andere Verunreinigungen aus dem Schrott, können durch verschiedene Verfahren entfernt werden. Es gibt die Möglichkeit die Verunreinigungen mit einer höheren Dichte als Aluminium mittels Sedimentation zu entfernen. Eine Filtration durch Sinter-Tonerde oder Schaumkeramik-Filter kann genutzt werden um Verunreinigungen ab 20 Tausendstel Millimeter zu entfernen. Die Spülung mit Chlor führt zur Reaktion mit Verunreinigungen wie Magnesium zu Magnesiumchlorid. Die gebildeten Salze müssen anschließend entfernt werden. Die Spülung mit Inertgasen wie Argon führt zur Bildung von kleinen Bläschen, welche nichtmetallische Verunreinigungen (auch Salze aus der Spülung mit Chlor) an die Oberfläche tragen. Dort bilden sie zusammen mit dem oxidierten Aluminium die sogenannte „Krätze“, welche abgeschöpft und der Wiederaufbereitung zugeführt wird. Zur Steuerung der Legierungszusammensetzung können dem Sekundäraluminium Legierungselemente und Primäraluminium zugegeben werden. Das Recycling von Aluminium ist deutlich weniger

energieintensiv als die Primärherstellung. Eine Einsparung von etwa 95 % Energie ist hierbei Stand der Technik¹².

Im gesamten System sind Händler entweder als separate Akteure oder als Teil des jeweiligen Recyclingunternehmens beteiligt (gelber Rahmen).

Im Rahmen eines Dialogforums mit Praxisakteuren, insb. aus der Wirtschaft, wurden zahlreiche konkrete Hemmnisse für ein Recycling in Deutschland vorgebracht¹³:

- In der Recycling-Debatte werden oft nur die negativen Aspekte des Recycling, u.a. Downcycling betont, obwohl auch hier Primärmaterial substituiert wird.
- Genehmigungsverfahren dauern zu lange und sind stark von der lokalen Administration abhängig. Dies führt auch zu Verzögerungen beim Schrotttransport über nationale Grenzen.
- Die Kapazitäten für den Transport von gefährlichen Abfällen sind zu gering, die Deklarationspflichten steigen und die Menge der als gefährlich deklarierten Abfälle steigt.
- Es fehlen Kontrollen beim Export und die Definitionen, die Kontrollen zugrunde gelegt werden, sind teilweise intransparent.
- Die Sammlung von Schrotten ist noch nicht optimal. Das Recycling, z. B. von Metallstäuben, ist teilweise nicht wirtschaftlich darstellbar.
- Schrotte sind sehr inhomogen und müssen besser sortiert werden, um Legierungsbestandteile nicht zu verlieren.
- Es bestehen in Zukunft Kapazitätsengpässe um Aluminium zu recyceln, da die Rahmenbedingungen (z. B. Energiepreise, Emissionshandel) für Investitionen ungünstig sind.
- Die Einstufung des Wassergefährdungspotentials von Metallpartikeln kleiner 1 mm erschwert ein Recycling.
- Die Anforderung an die Qualität des Sekundärmaterials steigt (z. B. durch behördliche Auflagen).
- Produkte werden ohne Rücksicht auf das Recycling designed und sind deshalb später nur schwer recycelbar.

5 Recyclingperspektiven

Im Nichteisenmetall-BREF¹⁴ sind folgende Maßnahmen bzw. Technologien genannt, welche dem heutigen Stand der Technik entsprechen und für ein optimales Recycling eingesetzt werden können:

- Der Einsatz der Magnetabscheidung, der Wirbelstromabscheidung und einer Trennung über die relative Dichte (z. B. Schwimm-/Sinktrennung) ermöglicht es, zerkleinerte Schrotte besser aufzutrennen und erhöht so die Vielfalt der für das Recycling einsetzbaren Schrotte. Das Einsatzmaterial für das Einschmelzen wird besser selektiert und optimiert den Prozess (Reduktion der Emissionen, des Salzeinsatzes und der

12 Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (2018): Recycling. URL: <http://www.aluinfo.de/recycling.html> (zuletzt abgerufen 25.07.2018).

13 Aussagen von Praxisakteuren, die im Rahmen des 1. Dialogforums zum UBA Vorhaben „Kartierung des anthropogenen Lagers III“ vorgebracht wurden.

14 Joint Research Centre (2017): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the main Non-Ferrous Metals Industries. URL: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM/JRC107041_NFM_Bref_2017.pdf (zuletzt abgerufen 25.07.2018).

produzierten Krätzen). Zusätzlich können hierbei weitere Metalle abgetrennt und recycelt werden.

- Mit Kühlschmierstoffen oder Ölen verunreinigte Späne können, je nach Beschaffenheit, vor dem Einschmelzen zentrifugiert oder über einen Rotationstrockner von diesen Verunreinigungen befreit werden um die Entstehung von organischen Emissionen zu verhindern, den Schmelzprozess zu optimieren (s.o.) und die Ausbeute an Metall zu erhöhen.
- Der eingesetzte Schrott (z. B. Art und Anteil an Verunreinigungen, zu schmelzende Menge, Verhältnis Oberfläche zu Volumen) muss zum genutzten Ofen (Flammofen / Drehtrommelofen / Induktionsofen / Schachtofen) auf den zu verwertenden Schrott passen um die Ausbeute, den Einsatz von Salz und den Energieeinsatz zu optimieren.
- Die Kühlung und Behandlung von Krätzen unter inerten Bedingungen ermöglicht eine höhere Ausbeute, da hier eine Oxidation verhindert wird.
- Der Einsatz von Metallpumpen bzw. eines Rührsystems im Flammofen oder der Einsatz eines kippbaren Drehtrommelofens kann die Ausbeute erhöhen und den Salzeinsatz sowie die entstehende Menge an Salzschlacken senken.
- Aufarbeitung der Salzschlacken (Wiedereinsatz des Salzes und der entsprechenden Metalle).

Weitere, noch nicht oben genannte Verfahren, welche die Ausbeute verbessern sind in VDI 2286 Blatt 2 genannt¹⁵:

- Direkteinsatz der heißen Krätzen im Trommelofen um die Oxidationsverluste und den Energiebedarf beim Einschmelzen zu minimieren.
- Spanaufbereitung zur Trennung von Aluminium von Eisenspänen sowie zur nasstechnischen Entölung der Späne.
- Kompaktierung der Schrotte zur Minimierung der Abbrandverluste, Erhöhung der Chargiergeschwindigkeit und Verminderung der Schmelzzeiten.

Als neuartige Technologien, welche das Recycling noch weiter verbessern können, gelten ¹⁴:

- Legierungssortierung mittels Laser- und Wirbelstromtrennverfahren um den Schrott bis auf Legierungsebene zu sortieren und so die Herstellung von Legierungen aus Schrott zu vereinfachen.

Speziell existieren noch folgende Sortiertechnologien:

- Röntgenfluoreszenz (XRF), Röntgentransmission (XRT), Laserinduzierte Plasma-Spektroskopie (LIBS) und Neutronen-Aktivierungsanalyse (NAA), welche in der Praxis bisher vor allem in der manuellen Sortierung und äußerst selten in der automatisierten Sortierung eingesetzt werden, können zu einer besseren Aufbereitung des Schrotts (homogenere Fraktionen) vor der Einschmelzung führen. Dies führt zur Einsparung von Legierungsmaterial und Schlackenbildner, was auch zur Senkung der Menge an entstehenden Schlacken führt.

¹⁵ Verein Deutscher Ingenieure (2008): VDI Richtlinie 2286 Blatt 2 - Emissionsminderung Aluminiumschmelzanlagen. Düsseldorf/Berlin 2008.