

Aluminium-Recycling im Kontext von Prozess- und Produkteffizienz

Wie der Weg in eine klimaneutrale Aluminiumproduktion aussehen kann und welche Rolle Materialrecycling dabei spielt, war Gegenstand der Eröffnungsrede „Green processing and Metal recycling“ von Georg Rombach vom Aluminium-Hersteller Hydro.

„Durch erneuerbare Energie und moderne Technologie sind wir in der Lage, saubereres Aluminium als je zuvor zu produzieren“, betont Rombach. Mit Hydro Reduxa sei bereits zertifiziertes, kohlenstoffarmes Aluminium mit einem maximalen Kohlenstoff-Fußabdruck von 4 kg CO₂ pro kg Aluminium im Angebot des Herstellers.

Ein wirksamer Weg, den sogenannten CO₂-Fußabdruck der Produktion weiter zu reduzieren, sei die Verwendung von Aluminium-Schrott zur Herstellung von Recycling-Legierungen und Produkten. Unter der Produktbezeichnung „Circal“ hat Hydro ein Sortiment von Aluminiumlegierungen höchster Qualität auf den Markt gebracht, das zu mindestens 75 % aus End-of-life Schrott besteht.

Allein in der Automobilindustrie machen die Rohstoffe Stahl und Aluminium rund 80 % der CO₂-Emissionen der Fahrzeugproduktion aus. Recycling sei der effektivste Weg zur Dekarbonisierung des Materialfußabdrucks, wie Rombach betont. Schrott aus aluminiumhaltigen Produkten wie Dosen oder Autos ist nach Erfahrung des Hydro-Fachmanns ein klares Substitut für Primärmetall.

Hydro betreibt 29 Recyclinganlagen mit einer kombinierten Kapazität von rund 2,6 Millionen Tonnen pro Jahr. Die guten Materialeigenschaften und die hohen Recyclingraten des Sekundäraluminiums machen diesen Werkstoff zu einem unverzichtbaren und zukunftsorientierten Ausgangsstoff für zahlreiche Einsatzgebiete wie die Automobil-, Verpackungs- und Bauindustrie. Um umweltschonende Recyclingprozesse bei einem möglichst hohen Gesamtwirkungsgrad zu realisieren, arbeitet Hydro an neuen Konzepten und Anlagen.

Je nach Anwendung des Aluminiums werden häufig dekorative oder schützende Schichten aufgebracht, die sich dann an den Sekundärmaterialien wiederfinden. Diese meist organischen Beschichtungen beeinflussen die Umschmelzverluste bzw. das Krätzverhalten beim Recycling, wodurch es zu verringertem Ausbringen kommt. Des Weiteren können durch die gebildeten Schwelgase unerwünschte Emissionen auftreten. Recycling-Experte Rombach stellte ein neues Verfahren zur thermischen Entlackierung von Aluminiumschrotten bei minimalem Energieverbrauch vor.

Die Thermische Entlackierung erfolgt in einem Gegenstromofen durch kontinuierliche thermische Pyrolyse nach dem IDEX-Prinzip. Die Verbrennungsgase treten durch ein zentrales Rohr parallel zum Schrott in den Ofen ein und treffen auf ein gebogenes Schild, der das Gas im Gegenstrom zurück durch den Ofen leitet. Die Hitze der Gase verdampft die organischen Bestandteile im Schrott in einer sauerstoffarmen Atmosphäre. Kohlenstoffhaltige Rückstände werden am Ende des Ofens mit dem Restsauerstoff verbrannt. Vorteile dieser Technologie mit minimalen Emissionen seien eine hohe Metallqualität, eine hervorragende Organikentfernung und ein minimaler Energieverbrauch dank Wiederverwendung der bei der Verbrennung von Pyrolysegasen freigesetzten Energie.

Verunreinigungen haben einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtprozess und damit auf die Qualität der Sekundäraluminiumprodukte. Um die Wiedergewinnung und Verwertbarkeit von Aluminiumschrott zu steigern ist vor dem Schmelzprozesses eine Sortierung erforderlich, d.h. entweder die Reinigung eines Hauptmaterialstroms oder die Auftrennung in verschiedene

verwertbare Fraktionen. Abhängig von der Quelle und dem damit verbundenen Grad von Verunreinigungen, metallischer wie Fe, Cu, Zn, nichtmetallischer wie Steine und Stäube, organischer Lacke, Beschichtungen und Öle sowie Verunreinigungen anorganischer Natur (Oxide) sind unterschiedliche Sortierschritte erforderlich.

Sortierreste sind nicht von großem Interesse für die Aluminiumproduktion, erhöhen aber die Rentabilität bei reiner Sortierung in Fe-Schrott, Kunststoffe und Schwermetalle. Das Ziel ist eine hohe Rückgewinnungsrate kombiniert mit hoher Reinheit

Wie Experte Rombach weiter ausführte, arbeitet Hydro an der Implementierung von neuen Technologien zur Verwertung verschiedener Schrottquellen und hat mit der LIBS-Sortierung eine neue Sortiertechnologie entwickelt. Seit Sommer 2017 betreibt Hydro einen Prototyp einer Sortiermaschine im F&E-Zentrum in Bonn und seit 2020 ist eine Pilotanlage in Dormagen in Betrieb.

Zusammenfassend hält Rombach fest, dass die Verfügbarkeit von Aluminiumschrott deutlich zunehmen wird, aber ungleichmäßig nach Qualität verteilt. Ein verstärkter Wettbewerb um „grünere“ Produkte braucht allerdings eine klare Definition der Materialzusammensetzung. Um einem hohen Anteil an organisch kontaminierten Materialien zu begegnen, erfordert es eine effiziente thermische Vorbehandlung. Mit der LIBS-basierten Sortierung erfülle Hydro die hohen Reinheitsanforderungen der sortierten Fraktionen für Rückschmelzen im geschlossenen Kreislauf. Die noch entwickelten Mischwerkzeuge sind komplementär, um die Verwendbarkeit von Schrott im dem Gießereisystem sicherzustellen.

Ökobilanz für Elektrofahrzeuge

Ob Mercedes-Benz, BMW group oder Volkswagen und Co.: Die großen Autohersteller haben ehrgeizige Ziele zur CO₂-Reduktion über den gesamten Lebenszyklus von der Lieferkette über die Produktion bis zum Ende der Nutzungsphase. Reduzierung der CO₂-Emissionen steht nicht nur auf der eigenen Agenda, sondern wird auch zunehmend zum Vergabekriterium in der Lieferkette. „Der Gesetzgeber beginnt, den Trend zur Ökobilanzierung zu reflektieren“, wie Dinesh Thirunavukkarasu vom IKA RWTH Aachen University in seinen Vortrag „Life Cycle Assessment for E Cars“ formulierte.

Für eine aussagekräftige Ökobilanz müssen die CO₂-Emissionen des gesamten Fahrzeuglebenszyklus berücksichtigt werden, einschließlich Produktion und Recycling. Das führt zum Einsatz von Technologien, die ggf. keinen messbaren Beitrag bei der Verbrauchsmessung in den unterschiedlichen Fahrzyklen leisten, jedoch einen nachweisbaren Nutzen im realen Fahrbetrieb haben. Eine Lebenszyklusanalyse, LCA, oder Elemente davon müssen perspektivisch in die Gesetzgebung, um eine umfassende CO₂-Reduktion sicherzustellen.

Mittelfristig, ist Wissenschaftler Thirunavukkarasu überzeugt, könnte die Ökobilanzierung ein Game-Changer für technologische Entscheidungen werden. Allerdings bedarf es hierfür der Entwicklung eines standardisierten Bewertungssystems für die Ökobilanz.

Ein aktuelles Beispiel für eine teilweise verzerrt wahrgenommene Ökobilanz ist die an sich klimaschonende Elektromobilität. Deren CO₂-Bilanz ist insbesondere in der Nutzungsphase unmittelbar vom Strom-Mix abhängig. Betrachtet man die CO₂-Emission während der gesamten Produktion, dann kann Thirunavukkarasu am Beispiel des VW ID.3 aufzeigen, dass innerhalb der Produktion das Batteriesystem mit mehr als 40% der CO₂-Gesamtemissionen den höchsten Ausstoß an Treibhausgasen verursacht. Die primär eingesetzten Werkstoffe, wie beispielsweise

Stahl liegen mit 20 % um die Hälfte darunter. 5 % der Emissionen sind auf den im VW ID.3 eingesetzten Aluminium-Anteils zurückzuführen.

Als einen wichtigen Beitrag zu geringeren CO₂-Emissionen haben die Autohersteller schon lange den Leichtbau entdeckt. Doch auch hier zeigt sich ein Dilemma, nämlich das der richtigen Materialauswahl. Der ökologische Fußabdruck von Werkstoffen ist stark abhängig vom Produktionsszenario. Leichtgewichtige Materialien sind nicht in jedem Fall ökologisch sinnvoll, denkt man beispielsweise an die energieintensive Produktion von zudem schwer recyclebarem CFK.

Ein sicherer Weg der CO₂-Reduzierung von den eingesetzten Werkstoffen ist das Recycling und der Einsatz nachhaltiger Energieträger. Hier hat Aluminium gute Karten. Der metallische Recyclinganteil ist hoch und vor allem die modernen Anlagen in Europa produzieren schon heute umweltschonend. Zum Vergleich: Bei der Erzeugung von Primäraluminium fallen in Europa durchschnittlich 6,7 kg CO₂ pro kg Aluminium an, in China 20 kg.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann Thirunavukkarasu festhalten: Die Bedeutung der Nachhaltigkeit nimmt zu und wird die gesamte automobilen Wertschöpfungskette betreffen. Zukünftige Vorschriften könnten sich von der Bewertung der Emissionen in der Nutzungsphase auf die Emissionen im gesamten Lebenszyklus verlagern. Um die Auswirkungen auf den Lebenszyklus zu bewerten, ist daher eine ganzheitliche Bewertung von Technologien notwendig. Um eine fundierte Bewertungsgrundlage zu erreichen ist eine Standardisierung zwingend erforderlich. Nur aussagekräftige Systemgrenzen sind entscheidend.

Eine Vision für ein kohlenstoffreies Aluminium

Betrachtet man die globale Aluminiumproduktion, dann ist unter dem Aspekt der Dekarbonisierung noch viel Luft nach oben. „74 % des weltweiten Primäraluminiums wird mit nichterneuerbaren Energien produziert“, wie Jerome Lucaes vom russischen Aluminiumproduzenten RUSAL in seinem Vortrag „A vision for a zero carbon aluminum“ vortrug. Danach werden 62 % des weltweiten Primäraluminiums mit Kohlestrom, 26 % mit Gas und 12 % mit Wasserkraft erzeugt. In Europa überwiegt mit leicht mehr als der Hälfte Gas, wobei in den Ländern der GUS weit überwiegend Gas genutzt werde. Zum Vergleich China, der weltgrößte Aluminium-Produzent greift zu 87 % auf Kohle zurück, Indien stützt seine Aluminiumproduktion zu 100 % auf Kohle.

Sich selbst sieht der russische Aluminiumhersteller auf einem guten Weg zu einer kohlenstofffreien Produktion. RUSAL ist heute schon unter den wichtigsten kohlenstoffarmen Aluminiumproduzenten mit fast 3 Mio. t pro Jahr. Als Ziel nennt Lucaes eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um mindestens 35 % bis 2030 und eine karbonfreie Produktion bis 2050 entsprechend dem Pariser Klimaabkommen.

Der technologische Ansatz sieht eine Vermeidung direkter Emissionen aus der Schmelze vor, die heute 30 % an den Gesamtemissionen ausmachen. Mit Energieeffizienzmaßnahmen sollen weitere Emissionen reduziert werden, der Energieverbrauch macht heute rund 60% der Gesamtemissionen aus. Die Dekarbonisierung des Produktionsprozesses mit zirka 30% zur CO₂-Reduktion beitragen. Hier spielt Inert-Anoden-Technologie eine wichtige Rolle. Die Energieversorgung soll in Zukunft aus erneuerbaren Quellen stammen, Lucaes nennt ein breites

Spektrum an Sonne, Wind, Wasserkraft, Wasserstoff und Biofuels. Was an Treibhausgas-Emissionen übrig bleibt und wo keine andere Lösung möglich ist, soll CO₂ abgetrennt und gespeichert werden, auch Neutralisierung/Kompensationsmaßnahmen („last mile“) kommen in Frage.

Aluminium-Recycling und Technologie bei TRIMET

„Recycling ist das große Thema für uns Aluminiumproduzenten“, sagt Jan Steglich vom Aluminiumproduzenten Trimet. In seinem Vortrag „Aluminum Recycling and Technology at Trimet - a Technical Overview“ verwies der Fachmann auf die immer dringlicher werdende Notwendigkeit, Primär- und Sekundär-Aluminium zu kombinieren. Trimet stellt 540.000 t Primäraluminium im Jahr her, dazu 245.000 Recyclingaluminium. An reinem Handel kommen noch einmal 250.000 t/a hinzu. Seine Produkte vertreibt Trimet in allen Formen vom Flüssigaluminium bis hin zu Walzbarren, Pressbarren, Masseln aus Sekundäraluminium sowie Draht und T-Barren. Allein am Standort Essen werden mehr als 400 verschiedenen Al-Legierungen hergestellt.

Die hohe Nachfrage übertrifft die verfügbare Schrottmenge um ein Vielfaches. Jeder Schrott, auch stark verunreinigter, muss daher zur Produktion herangezogen werden, wie Steglich deutlich machte.

Verglichen mit der Erzeugung von primärem Aluminium, ist das Recyceln von Aluminium (beispielsweise von Getränkedosen) energetisch günstiger und führt gleichzeitig zu deutlich geringeren CO₂-Emissionen. Bereits im AMAP Projekt P5 hat sich Trimet mit nachhaltigem Aluminium-Recycling beschäftigt, speziell mit effizientem Einschmelzen. Das Projekt hatte die Modellierung des Erwärmungs- und Einschmelzvorgangs von Aluminium-Schrotten zum Gegenstand.

In einem Nachfolgeprojekt steht das Recycling von organisch verunreinigtem Aluminium auf der Agenda. Das Verbundvorhaben „ReOrgAl - Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz des Recyclings organisch kontaminierter Aluminiumschrotte“ werden die Prozessschritte Thermische Vorbehandlung, Schmelzen/Rühren und Brennersteuerung näheruntersucht und unterschiedliche industrielle Schmelzöfen für verunreinigten Schrott bewertet. Ziel ist eine Senkung des Primärenergiebedarfs für das Schmelzen.

Im Rahmen des Projekts wurde u.a. eine innovative thermische Vorbehandlung von organisch verunreinigtem Schrott mit Mikrowellen entwickelt. Die thermische Mikrowellen-Vorbehandlung arbeitet grob vergleichbar einem aus dem Privathaushalt bekannten Mikrowellengerät. Nicht der ganze Ofen muss also erwärmt werden, sondern in diesem industriellen Beispiel nur der verunreinigte Schrott, was ein sehr energieeffizientes Verfahren zur Vorbehandlung darstellt.

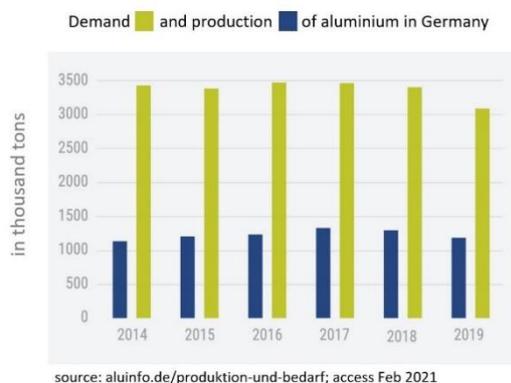
Die Bewertung von industriellen Schmelzöfen für verunreinigten Schrott führte zu einer Datenbank mit der Leistung von Induktions- und Flammöfen. Dabei ging es auch um die Erstellung eines Regelkonzepts für Schwachgasbrenner sowie Tests des Brennersystems.

Mit dem Ziel einer Verringerung des Primärenergiebedarfs für das Schmelzen wurden im Technikum unterschiedliche Schmelzaggregate getestet und unterschiedliche Schmelz- und Rührtechnologien ausprobiert. Die Versuche führten zur Eigenentwicklung einer Brennersteuerung, die geeignet ist den Ofen auf den Einsatz von nachhaltigen Ersatzbrenngasen, wie Wasserstoff oder Schwelgase vorzubereiten. Mit der Brennersteuerung

des schaltbaren Regenerativbrenners mit verbesserter Energieeffizienz ist es gelungen, die Metallausbeute beim Schmelzvorgang zu erhöhen.

Der neue energieeffiziente Aluminium-Regenerativ-Brenner weist gegenüber Standardbrennern somit erhebliche Stärken und Vorteile auf:

- geringerer Metallverlust
- reduzierte NO_x-Werte
- Kompakter Regenerativ-Brenner in einer Bauweise ohne bewegliche Teile
- -geeignet zur Nachrüstung älterer Brennersystemen



Der Aluminiumbedarf übersteigt die Produktion von Aluminium in Deutschland erheblich. Das gilt ebenfalls für Recyclinglegierungen hergestellt aus Schrotten. TRIMET steigert den Schrotteinsatz durch die oben beschriebenen innovativen Prozesse weiter, so enthalten die Produkte bereits bis zu 95 % Recyclat. Der steigende Einsatz von Schrotten bei der Legierungsherstellung wirkt sich positiv auf den CO₂-Fußabdruck der Werkstoffe aus. Trotz der zwingenden Notwendigkeit den Schrottanteil in Legierungen zu erhöhen, muss berücksichtigt werden, dass die lokale

Verfügbarkeit und die technische Einsatzmöglichkeit von Aluminiumschrotten bei bestimmten Werkstoffen begrenzt ist. Selbst durch weltweiten Handel kann der Schrottanteil durch das Marktwachstum nicht beliebig gesteigert werden.

Die Produktion von Primäraluminium am Wirtschaftsstandort Deutschland wird weiter notwendig bleiben, um den hohen Bedarf an qualitativen Werkstoffen zu decken. Durch die Kombination mit Aluminium aus Primärherstellung werden Synergieeffekte genutzt, die den CO₂-Fußabdruck des Werkstoffs weiter senken.

Vom Aluminiumschrott-Schmelzofen zur Recyclinganlage. 100 Jahre Entwicklung

Wenngleich Aluminium als Industriewerkstoff seit über 100 Jahren eingesetzt wird, seinen Siegeszug trat der Leichtbauwerkstoff so richtig erst ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts an. Noch in den 40er Jahren war das Recycling von Aluminium kein Thema, wie Dominik Schröder von LOI Tenova in seinem Vortrag „From aluminum scrap melting furnace to recycling plant, 100 years of development“ entlang der Entwicklung der Schmelzaggregate verdeutlichte. Einige Beispiele:

40er Jahre: 5-8 t Volumen, Schmelzleistung <1 t/h

60er-70er: Drehtrommelöfen der 2. Generation, Volumen 10-15 t, Schmelzleistung 2-4 t/h

80er-90er: Aluminium-Herdschmelzöfen, Schmelzleistung 5 t/h

In den 80er Jahren setzte das Aluminiumrecycling im industriellen Maßstab ein. Das geeignete Aggregat war der in den späten 80er Jahren auf den Markt gekommene Zweikammer-Schmelzofen (TCF Twin Chamber Furnace) mit 2 t/h Schmelzleistung. Wachsende Mengen

Schrott in allen möglichen Formen führte zum TCF der zweiten Generation mit einer Schmelzkapazität von 30 000 t/a und einer Schmelzleistung von 5 t/h.

Heutige Öfen nach aktuellem Stand der Technik haben bei höchstmöglicher Produktivität Metallverluste von weniger als 1 %. Innerhalb der nächsten 20 Jahre werden sich die Recyclingkapazitäten verdoppeln, wie Ofenexperte Schröder ausführte. Ursache dafür sei ein steigender Aluminiumanteil in den Fahrzeugen. Immer mehr recycelte Autos werden einen nennenswerten Aluminiumanteil haben. Derzeit haben TCF der 3. Generation eine Schrottschmelzkapazität von 10 t/h bzw. 50 000 – 60 000 t/a.

Um eine weitere Optimierung der Produktionsrate und eine weitere Verringerung von Metallverlusten zu erreichen, stellt Fachmann Schröder einige Forderungen an den Bau von Recycling-Öfen:

1. Anpassung der Temperatur in der beheizten Kammer, Variation zwischen 900 und 1100 °C
2. Verweilzeit des Schrotts auf der Schrottkammerbrücke zwischen 20 und 40 min
3. Ladezyklen adaptiert.
4. Betrieb über eine selbstlernende Datenbank

Die Lösung für die nächste Dekade im Industrieofenbau sieht Schröder in der Anwendung von Künstlicher Intelligenz und lernenden Algorithmen.