

Reststoffe aus der Aluminium-Sekundärindustrie

Helmut Antrekowitsch, Helmut Paulitsch und Armin Pirker

1.	Einleitung	615
2.	Reststoffentstehung beim Recycling von Aluminium.....	617
3.	Gesetzliche Rahmenbedingungen	618
4.	Entstehung und Verarbeitung von Krätze	620
5.	Charakterisierung und Aufarbeitung von Krätzerückstand	622
5.1.	Charakterisierung der auftretenden Oxidschicht bei Krätzestaub.....	624
5.2.	Laugung des Krätzestaubs.....	625
6.	Salzschlacken beim Recycling von Aluminium.....	626
6.1.	Zusammensetzung der anfallenden Salzschlacke	628
6.2.	Verfahren der Salzschlackenaufarbeitung	629
7.	Stäube beim Recycling von Aluminium	631
7.1.	Filterstäube.....	632
7.2.	Aufbereitungsstäube	633
8.	Feuerfestausbruch beim Recycling von Aluminium.....	634
9.	Zusammenfassung	634
10.	Literaturverzeichnis.....	635

1. Einleitung

Die Bedeutung des Recyclings von Aluminium hat in den letzten Jahren stark zugenommen, was einerseits in der größeren verfügbaren Menge an sekundären Materialien (siehe Bild 1), und andererseits in den ökologischen und ökonomischen Vorteilen der Sekundärmetallurgie gegenüber der Primärproduktion begründet ist. Hinzu kommt noch, dass im Vergleich zu anderen Kontinenten Europa nur begrenzte Primärressourcen besitzt, sodass die Verarbeitung von sekundären Rohstoffen eine immer größere

Rolle bei der Metallerzeugung spielen wird, wodurch eine begrenzte strategische Unabhängigkeit von Importen erreicht werden kann. Darüber hinaus sei allerdings erwähnt, dass trotz des enormen Anfalls von Sekundärmaterialien und der Notwendigkeit, sekundären Ressourcen wiederum der Wertschöpfungskette zuzuführen, diese jedoch sehr häufig exportiert werden und somit dem Recycling in europäischen Ländern entzogen wird.

Obwohl nicht zu den kritischen Rohstoffen zählend [1], besitzt Aluminium jedoch eine große Bedeutung für die europäische Industrie. Diesen mengenmäßigen Führungsanspruch im Bereich der Nichteisenmetalle zeigt sich auch durch hohe Wachstumsraten in den letzten fünfzig Jahren (siehe Bild 1). 2011 konnte Aluminium die fünfzig Millionen-Marke mit 53,6 Millionen Tonnen überschreiten.

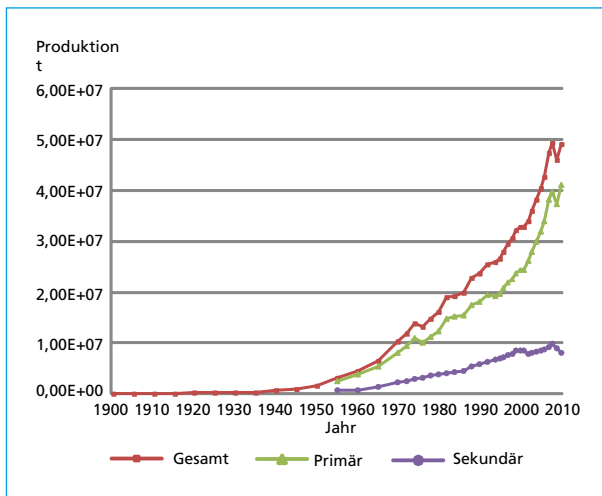


Bild 1:

Aluminiumproduktion (primär und sekundär) seit 1900

Quelle: Metallstatistik 2001-2011. 99. Jahrgang, World Bureau of Metal Statistics, Ware, England 2012

Zukünftig werden weitere, hohe Zuwächse vorausgesagt, sodass die Primär- und Sekundärmetallurgie dieses Werkstoffes eine besondere Stellung einnimmt. In diesem Zusammenhang ist aber nicht nur die Produktion von Aluminium selbst von Bedeutung, sondern auch die Reststoffmengen, welche bei der Aluminiumproduktion anfallen, was auch für den sekundären Bereich gilt, wenn auch nicht in der Größenordnung wie bei der primären Herstellung.

Wegen des unedlen Charakters ist man darüber hinaus beim Recycling von Aluminium mit großen Herausforderungen konfrontiert, welche sich vor allem auf die eingesetzten Schrottqualitäten sowie auf die entstehenden Reststoffe beziehen. Die sekundären Rohstoffe im Bereich der Aluminiumindustrie spielen vor allem in Europa eine wichtige Rolle, weil hier einerseits die Erzeugerindustrien und andererseits die Verbraucher angesiedelt sind. Diese Mengen in unterschiedlichen Qualitäten müssen durch verbesserte Verwertungssysteme genutzt werden, wobei hier im Speziellen die minderwertigen Materialien mit höheren Verunreinigungsgehalten zu nennen sind. Zusätzlich verhindern gesetzliche Vorschriften und steigendes Umweltbewusstsein in

den industrialisierten Ländern immer mehr das Deponieren von Reststoffen aus der metallurgischen Produktion. Besonders gefährliche Abfälle, welche Inhaltsstoffe mit einem hohen Schadstoffpotenzial aufweisen, sind hier im Besonderen zu erwähnen. Gleichzeitig stellen diese Materialien aber auch wertvolle Rohstoffe dar, die nutzbare Wertstoffe enthalten. Die gegenwärtig in der Sekundärmetallurgie der Nichteisenmetalle eingesetzten Technologien sind für diese Reststoffe weder verfahrenstechnisch noch ökologisch sowie ökonomisch optimiert. Krätzen, Schlacken und Stäube aus der Aluminiumsekundärindustrie sowie jene aus der Primärmetallurgie (z.B. Rotschlamm) sind heutzutage Materialien, welche einer Verwertung zugeführt werden müssten. Die diesbezügliche Optimierung bestehender Prozesse oder die Entwicklung neuer Verfahrensabläufe ist daher für eine nachhaltige Sicherung der Aluminiumindustrie in Europa von entscheidender Bedeutung. [3]

2. Reststoffentstehung beim Recycling von Aluminium

In der Aluminiumsekundärmetallurgie ist zwischen dem Schmelzen mit und ohne Salz zu unterscheiden. Bei allen Schmelzaggregaten ohne die Verwendung einer Chloridmischung fällt eine Krätze an, welche bis zu achtzig Prozent metallisches Aluminium enthalten kann. Der hohe Metallisierungsgrad zeigt, dass es sich bei diesem Reststoff um einen hochwertigen Rohstoff handelt. Wird beim Schmelzen von Al-Schrotten ein Salz verwendet, dann entsteht je nach Zugabemenge ein Salzkuchen bzw. eine Salzschlacke. Darüber hinaus fallen bei vielen Schrottvorbehandlungsaggregaten sowie bei den Schmelzprozessen Stäube an, welche zurückzugewinnende Wertkomponenten wie Salze und metallisches Aluminium enthalten. Ein weiterer Reststoff, welcher nach dem Stand der Technik zu deponieren ist, stellt die mit der Chloridmischung und dem Al getränkte feuerfeste Zustellung (Ofenausbruch) dar. [4]

Tabelle 1 gibt einen Überblick von den im Herstellungsprozess von Aluminium aus Schrotten auftretenden Reststoffen.

Tabelle 1: Darstellung der anfallenden Reststoffe bei der Herstellung von Sekundäraluminium

	Salzschlacke	Filterstaub	Ofenausbruch	Krätze
Anfall (in kg/t_{Al})	300 – 500	10 – 40	2 – 3	20 – 30
Anfallstelle	Schmelzen im Drehtrommelofen	Abgasreinigung Drehtrommel- u. Warmhalteofen	Drehtrommel- u. Warmhalteofen	Schmelzereinigung, Gießerei
Verringerung/Vermeidung	möglich	kaum möglich	nicht möglich	kaum möglich
Umweltrelevanz	Gasbildung, Eluierbarkeit	Eluierbarkeit	Eluierbarkeit	Gasbildung, Eluierbarkeit
Verwertung	Löse-Kristallisations-Verfahren	Löse-Kristallisations-Verfahren	–	Krätzeaufbereitung, Schmelzprozesse
Beseitigung	Deponieverbot	Untertagedeponie	Deponie	Deponieverbot

Quelle: Krone, K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000

In der aluminiumverarbeitenden Industrie und beim Endverbraucher fallen Aluminiumschrotte mit einem teilweise sehr hohen Anteil an Kohlenwasserstoffverbindungen an und die metallurgische Verarbeitung dieser Einsatzstoffe ist aufgrund der ausreichenden Verfügbarkeit sowie der sehr häufigen Sortenreinheit sinnvoll. Der hohe Organikgehalt limitiert jedoch die Möglichkeit des Einsatzes dieser Rohstoffe, da diese zu Emissionen in erheblichem Ausmaß führen können, negative Auswirkungen auf die Reinheit des erzeugten Aluminiums haben, die Umschmelzverluste erhöhen und eine verstärkte Staub- sowie Krätzebildung bewirken. Allerdings stellen solche Schrotte mit einem hohen organischen Bestandteil auch Energieträger dar, wodurch entsprechende Einsparungen an Brennstoff möglich sind. [5, 6, 7, 8]

Es existiert eine große Anzahl unterschiedlicher Arten von Beschichtungen bei Aluminiumprodukten, wobei jede ein anderes Verhalten bei der Pyrolyse aufweist. Die dabei freiwerdenden Emissionen stehen in Zusammenhang mit den enthaltenen Inhaltsstoffen. Im Wesentlichen setzen sich die Überzüge aus Kunststoffen, Papier, Farben, Lacken, Tinten und diversen Ölen zusammen. Bei dem Aufbau sind sowohl einfache, einschichtige Lackierungen möglich, als auch mehrschichtige, laminatartige Strukturen aus Papier und Kunststoff, wie das bei Verpackungsmaterialien vorliegt. Die komplexe Struktur hat eine Verminderung des Aluminiumanteils bei dieser Art von Schrott zur Folge. Zudem erhöht sich mit steigendem Kunststoffanteil das Risiko zur Entstehung giftiger Emissionen während der Pyrolyse und der Reststoffanteil kann sehr stark ansteigen. [8, 9, 10]

Die Bestandteile der unterschiedlichen Beschichtungen lassen sich in organische und anorganische Komponenten unterteilen. Die ersteren bestehen aus Kohlenstoffverbindungen, welche bei Erhöhung der Temperatur verflüchtigen oder cracken. [8]

Eine Erwärmung hat auf die anorganischen Komponenten keinen Einfluss. Diese Fraktion setzt sich nach der Wärmebehandlung aus Aschen und Metalloxiden (Pigmente) zusammen, die unter anderem für die Farbgebung nötig sind. Als Beispiel hierfür können Titan- oder Zinkoxid genannt werden. Durch eine thermische Vorbehandlung verflüchtigen sich diese Substanzen nicht. Teilweise kann der Austrag dieser Stoffe über das Abgas in Form von Staub erfolgen, ansonsten haften diese an der Oberfläche des zurückbleibenden Aluminiums und führt zu einer verstärkten Krätzebildung bzw. zu einem erhöhten Salzschlackenbedarf. [9]

3. Gesetzliche Rahmenbedingungen

Beim Aufarbeiten von in der Aluminiumsekundärmetallurgie anfallenden Reststoffen sollte grundsätzlich ein Zero-Waste-Prozess angestrebt werden, was jedoch nach dem Stand der Technik praktisch nicht zu realisieren ist. In Mitteleuropa liegen darüber hinaus sehr strenge Umweltauflagen und Richtlinien für die Verwertung bzw. Entsorgung solcher Materialien vor. Grundsätzlich gelten diese Rückstände in Österreich als Abfälle, auch wenn der Wertmetallgehalt teilweise viel höher ist als bei den primären Rohstoffen, und haben gemäß der Abfallverzeichnisverordnung einen entsprechenden Abfallcode. Die Schlüsselnummern (SN) sowie die Spezifikation der einzelnen Reststoffe

sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die Entsorgung obliegt dem Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002 ABGI. 102/2002), welches durch den Bund geregelt ist. Jene Rückstände, welche nicht anders verwertet werden können, sind auf Deponien abzulagern (nach Deponieverordnung 2008, BGBl. II Nr 39/2008 §9). Die Reststoffe dürfen dabei keine Eigenschaft der H-Kriterien besitzen, da die obertägige Ablagerung von gefährlichen Abfällen (g) laut §16 AWG 2002 verboten ist und in Österreich keine Möglichkeit der untertägigen Deponierung besteht [11]. Aus diesem Grund bleibt nach dem Stand der Technik häufig nur der Export dieser Reststoffe ins Ausland. [15]

Beim Einsatz von Schlacken in der Baustoffindustrie ist der Nachweis zur geeigneten stofflichen Verwertung zu erbringen. Weiters zeigen die einzelne in der Aluminiumsekundärmetallurgie anfallenden Reststoffe ein bestimmtes Gefahrenpotenzial. Beispielsweise besitzt Aluminiumkrätze folgende H-Kriterien: H3-A (leicht entzündbar), H4 (reizend), H5 (gesundheitsschädlich) und H13 (Löslichkeit beim Deponieren). Diese gefahrenrelevanten Eigenschaften sind in der Abfallrahmenrichtlinie (RL 2008/98/EG ARRL) angeführt. [11, 12, 13, 14, 15, 16]

Die in Österreich bei der aluminiumverarbeitenden Industrie anfallenden Reststoffe werden nach den jeweiligen Schlüsselnummern sowie der Abfallbezeichnung in der Abfallverzeichnisverordnung geregelt und in Tabelle 2 aufgelistet [11].

Tabelle 2: Eigenschaften und Spezifizierung von Rückständen aus der Sekundäraluminiumindustrie

SN	Spez.	gef. Abf.	Abfallbezeichnung	Spezifizierung
31211		g	Salzschlacken, aluminiumhaltig	
31211	88		Salzschlacken, aluminiumhaltig	ausgestuft
31211	91	g	Salzschlacken, aluminiumhaltig	verfestigt oder stabilisiert
31205			Leichtmetallkrätzen, aluminiumhaltig	
31205	91		Leichtmetallkrätzen, aluminiumhaltig	verfestigt oder stabilisiert
31224		g	Metallkrätzen, gasbildend	
31224	91	g	Metallkrätzen, gasbildend	verfestigt oder stabilisiert
31217		g	Filterstäube, NE-metallhaltig	
31217	88		Filterstäube, NE-metallhaltig	ausgestuft
31217	91	g	Filterstäube, NE-metallhaltig	verfestigt oder stabilisiert

SN – Schlüsselnummer; Spez. – Spezifizierungsjahr; gef. Abf. – gefährlicher Abfall

Quelle: Lebensministerium: AbfSN-Liste. Online im Internet: www.lebensministerium.at/filemanager/download/7617 (Abruf: 2-11-2011)

In Österreich ist gemäß Festsetzungsverordnung 1997, BGBl. II 227/1997 Salzschlacke als gefährlicher Abfall einzustufen und muss daher einer besonderen Behandlung zugeführt werden. Eine unmittelbare Deponierung von Salzschlacken ist aufgrund der wasserlöslichen Substanzen (Salze) gesetzlich verboten [11, 15]. Zusätzlich liegen keine Aufarbeitungsmöglichkeiten vor, wodurch die Reststoffverwertung im Ausland erfolgt.

Für die hydrometallurgische Verarbeitung bzw. Behandlung von Abfällen aus der Aluminiumsekundärmetallurgie sind die anfallenden Abwässer von übergeordneter

Bedeutung. Die Grenzwerte für das direkte Einleiten in ein Oberflächenwasser sowie das indirekte in einen öffentlichen Kanal sind in der Abwasseremissionsverordnung (AEV) für Abfallbehandlung geregelt [16].

4. Entstehung und Verarbeitung von Krätze

Aufgrund der hohen Sauerstoffaffinität von Aluminium, insbesondere in flüssiger Form, kommt es während des Schmelzprozesses zur Oxidation. Je größer die entstehende Krätzemenge ist, desto mehr flüssiges Aluminium wird aufgrund der Kapillarwirkung gebunden. Die Entstehung von Krätze sowie die damit verbundenen Aluminiumverluste sind in Bild 2 erläutert und können in folgende Schritte unterteilt werden: [17]

- Ausbildung der Oxidhaut auf der Schmelze.
- Aufbrechen der Oxidhaut durch die Badbewegung.
- Absinken und Aufschwimmen der Oxidpartikel.
- Zusammenbacken der Oxidpartikel.
- Auffüllen der Zwischenräume mit metallischem Al (Kapillarwirkung).
- Oxidation des in der Krätze fein verteilten Aluminiums, wodurch zusätzlich Krätze entsteht.
- Abziehen der Krätze vom Schmelzbad.
- Teilweises Abtropfen von flüssigem Aluminium bzw. weitere Oxidation, wenn keine entsprechende Aufbereitung (rasche Abkühlung) erfolgt.

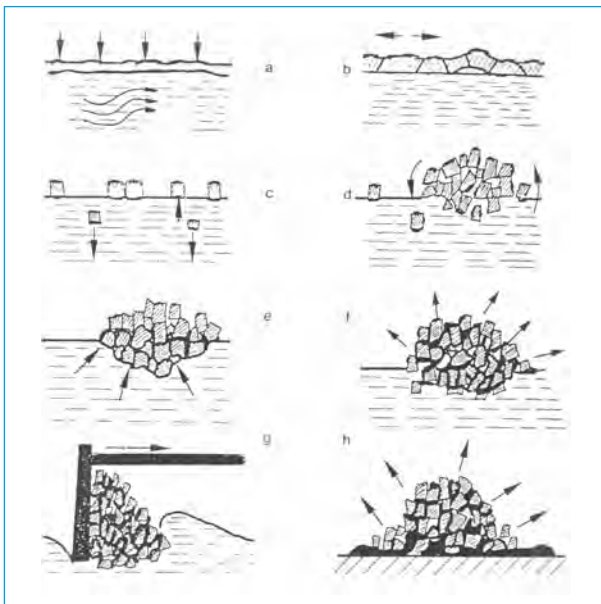


Bild 2:

Entstehung von Krätzen auf der flüssigen Al-Oberfläche

Quelle: Alfaro, I.: Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte der Entstehung und der Verarbeitung von Aluminiumkrätze. Aluminium 62 (4), 1986, S. 259-266

Unter Krätzen, gelegentlich auch Aschen, Abhübe bzw. Abzüge, versteht man aluminiumhaltige Reststoffe, die beim Schmelzen, einer Schmelzebehandlung und dem Vergießen von Aluminium und seinen Legierungen in Primärhütten, Gießereien und Schmelzwerken anfallen. Auch sie sind prinzipiell den Neuschrotten zuzuordnen. Krätzen enthalten neben sehr unterschiedlichen Gehalten an metallischem Aluminium insbesondere Aluminiumoxid, Spinelle, Silikat und ähnliche sowie auch aus einer Spülgas- und Schmelzsatzbehandlung stammende Chloride und Fluoride (siehe Tabelle 3). Ihre Verarbeitung erfolgt direkt oder nach vorheriger mechanischer Aufbereitung in den Schmelzwerken. [4]

	metallisches Aluminium %	sonstige Bestandteile
unaufbereitete Krätze	< 80	<ul style="list-style-type: none"> • $Al_2O_3, Al_2O_3 \cdot MgO,$ $Al_2O_3 \cdot SiO_2,$ $Al_2O_3 \cdot FeO$ usw. • $AlCl_3, NaCl, KCl$ usw. • CaF_2, NaF, AlF_3 usw.
Brocken und Fladen	< 90	
KrätzegröÙe	70 – 50	
Krätzerückstand	50 – 20	
Krätzestaub	< 20	

Tabelle 3:

Zusammensetzung von Aluminiumkrätzen

Quelle: Krone K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000

Je nach Art und Menge der anfallenden Krätze sind bestimmte Aufarbeitungstechnologien im Einsatz (siehe Tabelle 4). Häufig wird heutzutage in Betrieben nur ein Behandlungsschritt, zur Abtrennung der groben metallischen Al-Brocken, durchgeführt. Das Aufarbeiten der restlichen Krätze erfolgt in Umschmelzwerken mit Hilfe von Salzschlacken. Zum Verwerten bzw. Konditionieren von Krätze gibt es somit unterschiedliche Verfahren, wobei es sich zum Teil um reine Kühlprozesse, welche zur Verringerung des Al-Abbrands eingesetzt werden, handelt.

Tabelle 4: Darstellung unterschiedlicher Verfahren zur Krätzeaufbereitung

	Einteilung	Verfahren
heiÙe Krätze	Kühlverfahren	Luftkühlung Drehrohrkühler Vibrationseinrichtungen Inertgaskühler Direkte Wasserkühlung
	Kühlverfahren mit integrierter Aufbereitung	Drehrohrkühler mit Klassierung Aros-Dross-Verfahren Ajax-Verfahren
	Aufbereitung durch Krafteinwirkung	ALTEK Presse Compal-Verfahren ECOCENT/Focon Alures/Alumix-Verfahren ACEmax-Konverter
kalte Krätze	mechanische Aufbereitung	Rotary Tumbler der Fa. Didion (zerkleinern und klassieren)
kalte/heiÙe Krätze	schmelzmetallurgische Verfahren	Drehtrommelofen Kipptrommelofen

Quelle: Prillhofer, R.: Aluminiumkrätze- und Salzschlackenaufbereitung – Zero Waste Teil II: Reststoffverwertung, Montanuniversität Leoben, Bakkalaureatsarbeit, 2009

Grundsätzlich wäre eine Aufarbeitung von Krätze mit und ohne Salz möglich. In Bild 3 ist der Prozessfluss zur Krätzeaufarbeitung vereinfacht dargestellt. In diesem Zusammenhang muss es das Ziel sein, möglichst viel des enthaltenen metallischen Aluminiums zurückzugewinnen. [20]

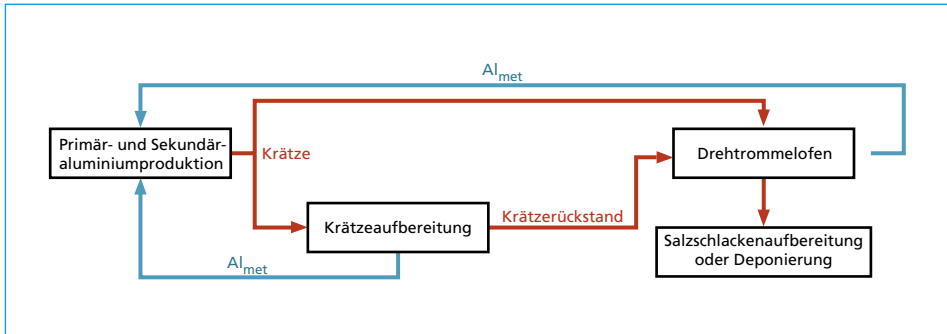


Bild 3: Schematische Darstellung des Prozessflusses der Krätzeaufbereitung

Quellen:

Paulitsch, H.: Verwertungsstrategien für Reststoffe aus der Aluminiumsekundärmetallurgie, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2012

Lorber, K.; Antrekowitsch, H.: Anfall und Entsorgung von Salzschlacke und Krätze. Depotech 2010, Proceedings of Depotech 2010, S. 711-714

Neben der pyrometallurgischen Krätzeaufbereitung in einem Dreh- oder Kipptrommelofen gibt es auch noch in geringem Ausmaß mechanische Prozesse, bei welchen das Zurückgewinnen des metallischen Aluminiums durch Zerkleinerungs- und Klassierschritte teilweise möglich ist. In diesen, vor allem früher (bis 1990) verstärkt eingesetzten Technologien, entstehen feinteiligen aluminiumhaltigen Komponenten, welche deponiert werden und wurden. Diese sind allerdings aufgrund der hohen Reaktivität problematisch, da sie unter Einwirkung von Feuchtigkeit Problemsubstanzen (Ammoniak, Wasserstoff usw.) in die Umgebung absondern. Es erfolgt hierbei jedoch nicht nur eine entsprechende Belastung der Umgebungsluft, sondern auch des Grundwassers. Somit stellt ein solcher Deponiekörper sowohl eine Gefährdung für die Umwelt, als auch für den Menschen dar. Das Ziel ist somit, geeignete Aufbereitungsverfahren zu entwickeln, bei welchen allen ökologischen Anforderungen nachgekommen oder durch eine gezielte Behandlung eine chemische Zusammensetzung erreicht wird, wodurch der Einsatz dieses Reststoffs in Alternativindustrien (z.B. Baustoffindustrie) erfolgen kann. [18, 19, 20, 21, 22]

5. Charakterisierung und Aufarbeitung von Krätzerückstand

Im Zuge der mechanischen Krätzeaufbereitung, im Besonderen bei früher angewandten mechanischen Technologien, fallen unterschiedliche Reststoffe an, welche durch spezielle

Prozesse verarbeitet bzw. aufbereitet werden können. Mit der verstärkten Einführung des Salz- und Kipptrommelofens wurde die mechanische Aufarbeitung weitgehend verdrängt, sodass heutzutage, zumindest in Europa, kaum mehr Rückstände dieser Art auftreten und deponiert werden müssen. Dennoch erfolgte bis etwa den neunziger Jahre die Deponierung bedeutender Menge an Krätzerückstand, welche in einigen Bereichen Mitteleuropas ein großes Umweltproblem darstellen, weshalb verstärkt nach entsprechenden Aufarbeitungsmöglichkeiten gesucht wird. Durch den hohen Anteil an Oxiden ist der Einsatz dieser Materialien im Salztrommelofen nur teilweise als sinnvoll zu erachten, da das Al_2O_3 lediglich für größere durchgeschleuste Materialmengen sorgt und die verstärkt anfallende Salzschlacke ihrerseits wieder einem Verarbeitungsprozess zugeführt werden muss. Das Einbringen in die Salzschlackenaufarbeitung führt ebenfalls zu Schwierigkeiten, da einerseits der gewinnbare Al-Anteil gering ist und andererseits der Oxidanteil sehr hohe Werte aufweist, sodass die eigentlichen Produkte des Salzschlackenaufarbeitungsprozesses, das metallische Aluminium sowie das

Recyclingsalz, bei diesem Vorstoff nur in einem sehr geringem Maß vorliegt.

Tabelle 5: Typische Zusammensetzung eines Oxidrückstands

Komponente	Gehalte
	Gew.-%
Fe_2O_3	1,00-1,85
CaO	1,00-1,49
MgO	13,00-17,50
TiO_2	1,20
K_2O	1,50
SiO_2	4,00-9,00
Na_2O	2,00
Al_2O_3	60,00-70,00
Kohlenstoff	5,00
AlN	1,00-10,00
Chloride	< 1,00

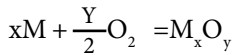
Quelle: Konetschnik, St.: Verwertungsstrategien für gefährliche nichteisenmetallhaltige Rückstände. In: Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2010

Daher kommen bei der Behandlung des Krätzerückstands immer wieder hydro-metallurgische Verfahren zum Einsatz, wo in Laugungsprozessen sowohl eine Abreicherung der Schadstoffe, als auch die Gewinnung von verwertbaren Fraktionen ermöglicht wird. Als Laugemedien können dabei Wasser, Natronlauge und Schwefelsäure dienen, wobei die Wirtschaftlichkeit in der Regel nicht gegeben ist und erst durch Gegenrechnung mit staatlichen Zuschüssen eine ökonomische Realisierbarkeit vorliegt. In Tabelle 5 ist eine typische Zusammensetzung eines Oxidrückstands angeführt, wobei der metallische Aluminiumanteil, welcher zwischen fünf und zwanzig Prozent liegen kann, in das Oxid mit eingerechnet wurde. [4, 18, 23]

Durch die hohe Affinität von metallischem Aluminium zu Sauerstoff bildet sich auf dessen Oberfläche unmittelbar eine Oxidschicht aus (siehe Bild 4). Dies ist sowohl für die Metallherstellung selbst von besonderem Interesse, da durch die Oxidation erhebliche Verluste entstehen, als auch für das Recycling bestimmter aluminiumhaltiger Reststoffe. Die Charakterisierung (z.B. chemische Analyse, Phasenbestimmungen usw.) des Krätzestaubs dient daher zur Ermittlung der vorliegenden Form von einzelnen detektierten Elementen sowie zur Abschätzung des im Reststoff vorhandenen Potenzials unterschiedlicher Substanzen zum Erzielen einer Wertfraktion. [18]

5.1. Charakterisierung der auftretenden Oxidschicht bei Krätzestaub

Bei der Oxidation eines Metalls an Luftatmosphäre bildet sich eine Oxidschicht nach folgender Reaktion aus [53]:



Aufgrund des unedlen Charakters reagiert Aluminium mit der Umgebungsluft bzw. dem Wasserdampf und bildet eine Oxidschicht aus. Diese haftet sehr fest an der Oberfläche und verhindert eine weitere Oxidation des darunterliegenden metallischen Al. Diese Tatsache spielt bei der Aufarbeitung von aluminiumhaltigen Reststoffen eine große Rolle, da die Reaktionskinetik und somit die Dauer der für die Verwertung der Rückstände angewandten Verfahren wesentlich beeinflusst wird. Der Mechanismus der Oxidschichtbildung tritt bei dessen mechanischer Verletzung spontan erneut auf. Dies kann auch durch die Reaktion mit Wasser erfolgen. Aluminiumoxid ist sehr stabil, die freie Energie für eine Dehydrierung weist geringe Werte auf, wodurch sich verschiedene Hydroxide (z.B. $AlOOH$ und $Al(OH)_3$) bilden können. [18, 23, 24]

Die natürliche Aluminiumoxidschutzschicht setzt sich im Wesentlichen aus amorphem Al_2O_3 zusammen. Direkt auf dem metallischen Aluminium liegt eine Grundschrift (oder Sperrschicht), welche nach außen hin in eine Deckschicht übergeht. Bei hoher Luftfeuchtigkeit kann sich die Oxidhülle wesentlich dicker ausbilden. Die poröse wasserhaltige Deckschicht besteht in diesem Fall zu geringen Anteilen aus $Al(OH)_3$ und besitzt in etwa eine Dicke von 5 bis 10 nm. Der Sperrfilm ist hingegen wesentlich dünner (1 bis 2 nm). Liegt eine hohe Behandlungsdauer von metallischem Aluminium unter Feuchteeinwirkung vor, so können die Dicken dieser Oxidfilme $> 0,1 \mu m$ sein. [24, 26]

Die Wachstumsgeschwindigkeit der Oxidschicht nimmt mit zunehmender Dauer ab. Diese ist von der Temperatur, der Zeit und dem Sauerstoffangebot abhängig. Legierungselemente im Ausgangsmetall beeinflussen die Eigenschaften der Oxidhülle. Beispielsweise beträgt die Dicke bei AlCu- und AlMg-Legierungen etwa das 1,3-1,7-fache im Vergleich zu jener bei Reinaluminium. [24, 25, 26, 27]

Durch eine mechanische Beanspruchung bzw. Laugungsbehandlung kann die Sperrschicht entfernt werden. Diese bildet sich allerdings unter Umgebungseinfluss bei Raumtemperatur innerhalb weniger Minuten nach, wobei die Dicke im Nanometerbereich liegt. Zum Entfernen des oxidischen Films kann auch eine starke Natronlauge (10 bis 20 % NaOH) bei 50 bis 70 °C oder Mischsäure (Schwefel- und Flusssäure) verwendet werden. [24]

Für das Aufarbeiten der Aluminiumkrätzestäube ist eine Untersuchung der Oxidschicht, welche das metallische Aluminium einhüllt, von Interesse. Durch diese Passivierung liegt das Al nicht frei vor und weist somit eine hohe Stabilität auf (siehe Bild 4).

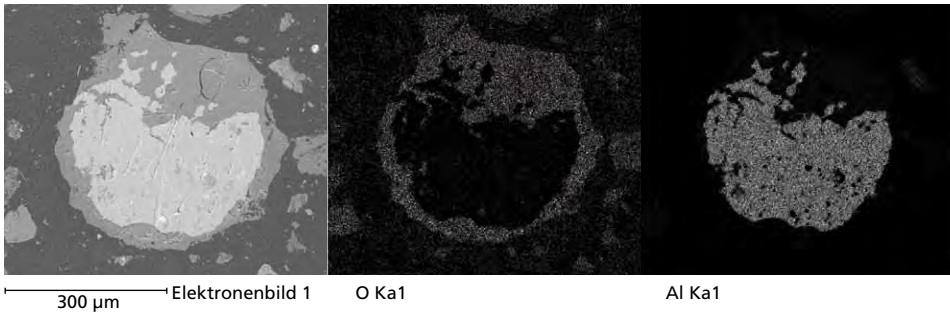


Bild 4: Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines im Krätzestaub enthaltenen Aluminiumpartikels sowie Elementanalyse von Sauerstoff und Aluminium

Quelle: Paulitsch, H.: Verwertungsstrategien für Reststoffe aus der Aluminiumsekundärmetallurgie, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2012

Die Oxidschicht beeinflusst eine Aufarbeitung bzw. Deponierung maßgeblich, da aufgrund deren Stabilität eine Gasbildung in wesentlich geringerem Ausmaß vorliegt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass durch eine Umschichtung bzw. mechanische Beanspruchung des Materials die Oxidschicht aufbrechen kann, wodurch wiederum eine Reaktion des metallischen Aluminiums sowie der Al-Verbindungen (z.B. Nitride, Chloride und Carbide) und eine damit verbundene starke Gasbildung bei entsprechender Feuchteinwirkung (z.B. Ammoniak) möglich ist. Auch für eine Verwertung im Aluminiumschmelzprozess wirkt diese Oxidschicht hinderlich, da das im Drehtrommelofen eingesetzte Salz diese Schicht nicht vollständig auflöst und dieser Rückstand großteils lediglich durchgeschleust wird. Aufgrund der Feinheit von Partikeln und der damit verbundenen großen spezifischen Oberfläche, gelangen erhebliche Oxidmengen in den Salzprozess, wodurch sich die Viskosität der Salzschlacke erhöht, was wiederum zu größeren Al-Verlusten führt.

5.2. Laugung des Krätzestaubs

Für die Laugung des Krätzestaubs sind bestimmte Parameter, wie beispielsweise das verwendete Laugungsmedium, von übergeordneter Bedeutung. Nachfolgend werden die grundlegenden Thematiken der hydrometallurgischen Behandlung erläutert.

Bei der Laugung einer bestimmten Substanz erfolgt der Stoffübergang vom Feststoff in die Lösung in Form von Ionen bzw. Molekülen, wobei die Geschwindigkeit dieses Prozesses durch folgenden Ansatz abgeschätzt werden kann [28, 29]:

$$v = \frac{D \cdot F}{\vartheta} \cdot (c_s - c_l)$$

v ist die Lösegeschwindigkeit, D der Diffusionskoeffizient des gelösten Stoffs, F die Oberfläche des zu laugenden Materials, c_s bzw. c_l die Konzentration im gesättigten bzw. gelösten Zustand und ϑ die Dicke des Films der adhärenen Schicht.

Die diffusionsbedingten Vorgänge können durch Vergrößerung der Oberfläche der Ausgangssubstanz (beispielsweise durch Mahlen), Temperaturerhöhung sowie infolge einer Rührbewegung erhöht werden. [28, 29]

Die Basis für einen geeigneten hydrometallurgischen Aufarbeitungsprozess von differenzierten Reststoffen aus der Aluminiumindustrie stellt die Löslichkeit des Oxids im Laugungsmittel dar. Dieses ist im neutralen pH-Bereich unlöslich, allerdings im sauren bzw. basischen teilweise löslich [25]. Vogelsberger und andere [30] beschreiben die Löslichkeit von Aluminiumoxid in Wasser, jedoch handelt es sich dabei um das poröse γ -Aluminiumoxid.

Bei der Behandlung von oxidischen Reststoffen aus der Aluminiumsekundärmetallurgie mit einer Säure gehen die Aluminiumionen in Lösung, während das Oxid protoniert wird. Das bedeutet, dass die Sauerstoffionen des Oxids mit den Protonen des Laugungsmediums Wasser bilden. Bei der basischen Behandlung erfolgt die Bildung von Aluminaten. [25]

Grundsätzlich existieren viele Elektrolyte, in welchen Oxide unterschiedlicher Struktur entstehen, wobei dies durch die nachfolgend angeführten Parameter stark beeinflusst wird [25]:

- Temperatur
- Konzentration des Elektrolyten
- Verunreinigungen (auch sehr kleine Gehalte besitzen einen großen Einfluss)

Beispielsweise löst sich bei einer Behandlung mit zwanzig prozentiger Schwefelsäure in einem heißen Prozess etwa 75 % des enthaltenen Aluminiumoxids. Nach Dash [31] liegt bei Verwendung derselben Menge einer vierzig prozentigen H_2SO_4 ein geringeres Ausbringen vor. Bei der Zufuhr der Säure zum Rückstand löst sich das Aluminiumoxid zu großen Teilen (etwa siebzig Prozent) innerhalb von zehn bis fünfzehn Minuten auf. Die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt im Anschluss sehr stark, was auf eine mögliche Anlagerung von Aluminiumsulfat auf die Partikeloberfläche zurückgeführt werden kann. Das Maximum ist nach einer Laugungsbehandlung von sechzig Minuten erreicht. Die im Rückstand enthaltenen Salze (NaCl und KCl) beeinflussen die ablaufenden Reaktionen und senken die Auflöserate von Aluminiumoxid. [31]

Im Rahmen der Entwicklung von neuen Verfahren ist zu berücksichtigen, dass das Laugungsmedium selektiv sein muss, was durch den Reagentyp, der Reagenzkonzentration, der Temperatur und dem Partialdruck beeinflussbar ist. [32]

6. Salzschlacken beim Recycling von Aluminium

Beim Aluminiumrecycling unter Verwendung von Salz werden zur Vermeidung der Oxidation in einem vorher eingeschmolzenen Salzbad die Reststoffe eingerührt. Der Salzbedarf ist von der Reinheit des Schrottes abhängig. Bei einer Aufnahmefähigkeit des Salzes für Verunreinigungen von dreißig bis vierzig Prozent fallen je nach Qualität der eingesetzten Rohstoffe etwa 300 bis 500 kg Salzschlacke/ t_{Al} an. [4]

Die verwendeten Trommelöfen zeichnen sich durch eine guten thermischen Wirkungsgrad und hohe Schmelzleistung aus, wodurch die Abbrandverluste gering sind. Zusätzlich findet eine gute Homogenisierung statt und ein Legierungswechsel kann ohne Schwierigkeiten erfolgen. [33]

Beim Einschmelzen von stark verunreinigten bzw. oxidhaltigen Vorstoffen wird je nach Salzzusatz zwischen dem Salzbadmelzen (Drehtrommelofen) und dem salzarmen Schmelzen (Kipptrommelofen) unterschieden. Der zugegebene Anteil an Salz ist von dem Gehalt der Verunreinigungen und der spezifischen Oberfläche der Vorstoffe abhängig und bestimmt somit die anfallende Schlackenmenge. [4, 22]

Durch den geringeren Salzverbrauch und der damit verminderten Menge des anfallenden Reststoffs gewinnt das salzarme Schmelzen im Kipptrommelofen immer mehr an Bedeutung. Vor allem oxidhaltige Materialien, wie beispielsweise Krätze und Schlackengröbe, finden in diesem Aggregat Einsatz. Durch die verminderte Salzmenge resultiert ein trockener, krümeliger Salzkuchen. [18, 34]

Die Zusammensetzung des im Schmelzprozess eingesetzten Salzsystems ist für das Al-Ausbringen und die nachfolgende Schlackenbehandlung von großer Bedeutung. Die Tabelle 6 zeigt einige der möglichen Komponenten der in der Aluminiummetallurgie verwendeten Salze.

Tabelle 6: Mögliche Komponenten der Schmelzsalze beim Recycling von Aluminium

		Kation									
		Li	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Sr	Ba	Mn
Anion	Cl	LiCl	NaCl	MgCl ₂	AlCl ₃	-	KCl	CaCl ₂		BaCl ₂	MnCl ₂
	F	LiF	NaF	MgF ₂	AlF ₃	Na ₂ SiF ₆	KF	CaF ₂	SrF ₂	BaF ₂	MnF ₂
	CO ₃		Na ₂ CO ₃	-	-	-	-	-	-	-	-
	SO ₄		Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	-	-	-	CaSO ₄	-	-	-
	I		NaI	-	-	-	-	-	-	-	-
	Br		NaBr	-	-	-	-	-	-	-	-
	AlF ₄		NaAlF ₄	-	-	-	KAlF ₄	-	-	-	-

Quellen:

Wang, S.; Reddy R. G.: Low Melting Fluxes for Recycling of Al Scrap. TMS, Second International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes, 1996, pp. 389-406

Wöhler, V.: Aufbereitete Aluminiumsalzschlacke als Reaktivierungsmaterial. Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt eines salzhaltigen Reaktivierungsmaterials im Labor und Freiland. Universität Kassel, Dissertation, 1999

Das zugegebene Salz setzt sich üblicherweise aus 65 bis 75 % NaCl und 25 bis 30 % KCl zusammen. Teilweise sind auch Zusätze an Kalzium-, Natrium-, Kalium- und Aluminiumfluorid sowie Kryolith, welche als Flussmittel dienen, im Bereich von eins bis drei Prozent enthalten. Auch Verunreinigungen wie Al(OH)₃, Fe(OH)₃, MgCl₂·xH₂O, H₂O, Nitrate, Kohlenstoff, organische Komponenten, Karbonate, SiO₂ und unlösliche Bestandteile können vorhanden sein. Kaliumsalze enthalten zwischen 110-2.600 ppm Mg, 220-300 ppm Ca, 3.150-14.000 ppm Na, 300-500 ppm SO₄ und 200-4.500 ppm unlösliche Komponenten. [4, 35, 36]

6.1. Zusammensetzung der anfallenden Salzschlacke

Neben Resten des eingesetzten Schmelzsalzes enthält die Salzschlacke nach dem Schmelzprozess metallisches Aluminium sowie verschiedene Produkte der chemischen Reaktionen zwischen Salz, Metall und Verunreinigungen. Die PCDD/F-Gehalte sind vernachlässigbar gering (siehe Tabelle 7). Industrielle Salzschlacken besitzen einen Aluminiumgehalt zwischen fünf und zwanzig Prozent. Der bei der Aufarbeitung rückgewinnbare Anteil beträgt drei bis acht Prozent. [37]

Tabelle 7: Durchschnittliche Zusammensetzungen und exakte Analysen von anfallenden flüssigen und krümeligen Salzschlacken

Bestandteil	Salzschlacke			Salzkuchen						
	Gew.-% ¹⁾	Gew.-% ²⁾	Gew.-% ²⁾	Gew.-% ³⁾	Gew.-% ⁴⁾	Gew.-% ⁵⁾				
NaCl	40 – 50	45 – 75	62,9	49,50	23,2 ⁶⁾	20 – 80				
KCl	18 – 20			10,40						
andere Chloride	< 10			–						
Al ₂ O ₃ , SiO ₂ · Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , MgO · Al ₂ O ₃ und andere komplexe Oxide und Hydroxide	20 – 25	20 – 40	28,0	61,3	67,8	20 – 60				
CaF ₂	1 – 2						1,6	–	0,7 ⁶⁾	–
Al _{met}	4 – 10						5 – 20	7,5	k.A.	8,1
PCDD/F	20 ng ITE ^{7)/kg}	–	–	–	–	–				

1): Angaben von Krone und Essafi; 2): Angaben von Gerke und Boin; 3) Angaben von Gil; 4) Angaben von Prillhofer; 5): Angaben von Peterson; 6): Angaben in Cl und F; 7): internationales Toxizitätsäquivalent

Quellen:

Krone K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000

Prillhofer, R.; Prillhofer, B.; Antrekowitsch, H.: Verwertung von Reststoffen beim Aluminium-Recycling. In: BHM, 153 (3), 2008, S. 2-7

Prillhofer, R.: Aluminiumkrätze- und Salzschlackenaufbereitung – Zero Waste Teil II: Reststoffverwertung. Montanuniversität Leoben, Bakkalaureatsarbeit, 2009

Gerke, M.: Untersuchungen zum Einsatz von Schmelzsalzen bei der Verarbeitung spezieller Aluminiumschrotte und Krätzen. RWTH Aachen, Dissertation, 2002

Boin, U. und andere: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie. Umweltbundesamt, 2000

Essafi, R.: Optimierung der Salzzusammensetzung für das Schmelzen von Aluminium-Schrotten im Drehtrommelofen. Institut für Metallurgie, Technische Universität Clausthal, Diplomarbeit, 2001

Gil, A.; Korili, S. A.: Management of the Salt Cake Generated at Secondary Aluminium Melting Plants. Sciyo, 2010, pp. 149-158

Prillhofer, R.; Prillhofer, B.; Antrekowitsch, H.: Treatment of Residues during Aluminium Recycling. EPD Congress, Minerals, Metals and Materials Society, 2009, S. 857-861

Prillhofer, R.; Antrekowitsch, H.: Einsatzmöglichkeiten prozessbedingter Reststoffe beim Al-Recycling. Depotech, Proceedings of Depotech, 2008, S. 231-236

Peterson, R. D.: Review of aluminium dross processing. TMS Annual Meeting, Light Metals, 2002, S. 1.029-1.037

Ein großer Teil des in der Salzschlacke enthaltenen Aluminiums liegt in Form von feindispersen Partikeln vor und kann nur teilweise zurückgewonnen werden. Nach Gerke [37] sind bis zu fünfzig Prozent der enthaltenen metallischen Al-Teilchen in

einem Korngrößenbereich von 0,5-1,6 mm. Die größeren Bestandteile können durch eine mechanische Aufbereitung abgetrennt werden. In Tabelle 7 sind durchschnittliche Zusammensetzungen von flüssigen und krümeligen Salzsclacken (Salzkuchen) ersichtlich.

Bei der Erstarrung einer Salzsclacke ist die Bildung von Spinellen und Silikaten von der Legierung abhängig. Teilweise kommen metallisches Silizium sowie Mg-Al-Verbindungen vor, wobei in einigen Schlacken auch Magnetit zu finden ist. [37]

Die Salzsclackenzusammensetzung kann nicht nach bestimmten Legierungssorten klassifiziert werden, da zumeist ein komplexer Schrottmix mit unbekanntem Legierungselementgehalt beim Schmelzprozess Einsatz findet. [44]

Das Verhältnis von NaCl zu KCl in der Salzsclacke verändert sich im Laufe des Schmelzprozesses. Bei 900 °C ist die Verdampfungsrate von NaCl 2,5 mal kleiner, als jene von KCl. Der Einfluss auf die Verdampfungs geschwindigkeit des Salzes durch CaF_2 , NaF und KF bis fünf Prozent ist gering. [45]

Die ökologische Problematik dieser Salzsclacken liegt einerseits in der Wasserlöslichkeit der Chloride, die zu einer Aufsalzung des Grundwassers führen kann, und andererseits in der Entstehung von teils geruchsbelästigenden, teils giftigen und gegebenenfalls explosiven Gasen wie Wasserstoff, Methan, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Phosphorwasserstoff bei Kontakt mit Wasser oder Feuchtigkeit. Die in der Schlacke enthaltenen Wertstoffe, metallisches Aluminium und Salz, erleichtern ein Recycling auch unter ökonomischen Gesichtspunkten. [4]

6.2. Verfahren der Salzsclackenaufarbeitung

Salzsclackenaufarbeitungsprozesse, welche als Ziel eine Zero-Waste-Strategie verfolgen, gewinnen aufgrund ökonomischer und nachhaltiger Vorteile immer mehr an Bedeutung.

Das Prinzip des BUS-Verfahrens stellt die verbreitetste Technologie zur Aufarbeitung von Salzsclacken dar und umfasst im Wesentlichen fünf Prozessschritte (siehe Bild 5). Das grobkörnige metallische Aluminium wird mittels entsprechender Zerkleinerungs- und Klassierprozesse entfernt und die restliche Schlacke in Mühlen gemahlen. Durch die Duktilität des Aluminiums fällt dieses in Form von feingewalzten Plättchen an. Das erhaltene Metall wird als Gröbe bezeichnet und unmittelbar in den Schmelzprozess zurückgeführt. Durch eine Laugung des verbliebenen Feinanteils mit Wasser bei erhöhter Temperatur (65 bis 80 °C), für eine Dauer von zwei Stunden (< 0,4 mm), in einem mehrstufigen Prozess, lösen sich die enthaltenen Salze. Die an den Halogeniden gebundenen Metalle gehen ebenfalls in Lösung. [4]

Nach der Entstaubung der entstehenden Abgase erfolgt eine Behandlung mit verdünnter Schwefelsäure. Dabei reagiert das vorhandene Ammoniak zu Ammoniumsulfat. Dieser Prozess wird in Waschkolonnen durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Adsorption der Restschadstoffe (z.B. Schwefel- und Phosphorwasserstoff) durch eine zweistufige

Behandlung in einer Aktivkohle-Adsorptionsanlage. In Lamelleneindickern wird eine Fest-Flüssig-Trennung durchgeführt, wobei der anfallende Unterlauf den Oxidrückstand darstellt und der Überlauf zum Zurückgewinnen des Salzes in Eindampf-Kristallisationsanlagen gelangt. In der ersten Stufe wird eine NaCl- und in der dritten eine KCl-Sättigung erreicht. Zur Salzabtrennung von der umlaufenden Mutterlauge ist in bestimmten Zeitintervallen ein Teil der produzierten Suspension (Sole und Salz) einem Eindicker und anschließend einer Zentrifuge zuzuführen. Das hierbei entstehende Mischsalz besitzt im Mittel eine Restfeuchte von zwei bis vier Prozent. Die gesättigte Mutterlauge muss anschließend den letzten beiden Verdampfungsstufen zugeführt werden, gefolgt von einer Filtration des Kondensats. Mit dem BUS-Verfahren werden folgende Produkte erzeugt: [4]

- Schlackengröße: enthält zirka achtzig Prozent metallisches Aluminium
- Recyclingsalz: kann in den Schmelzprozess rückgeführt werden
- Oxidrückstand: setzt sich großteils aus Al_2O_3 zusammen, es erfolgt der Einsatz in alternativen Industriezweigen, wie z.B. der Zementbranche
- Ammoniumsulfat aus der Abgasreinigung: findet in der Düngemittelindustrie Verwendung

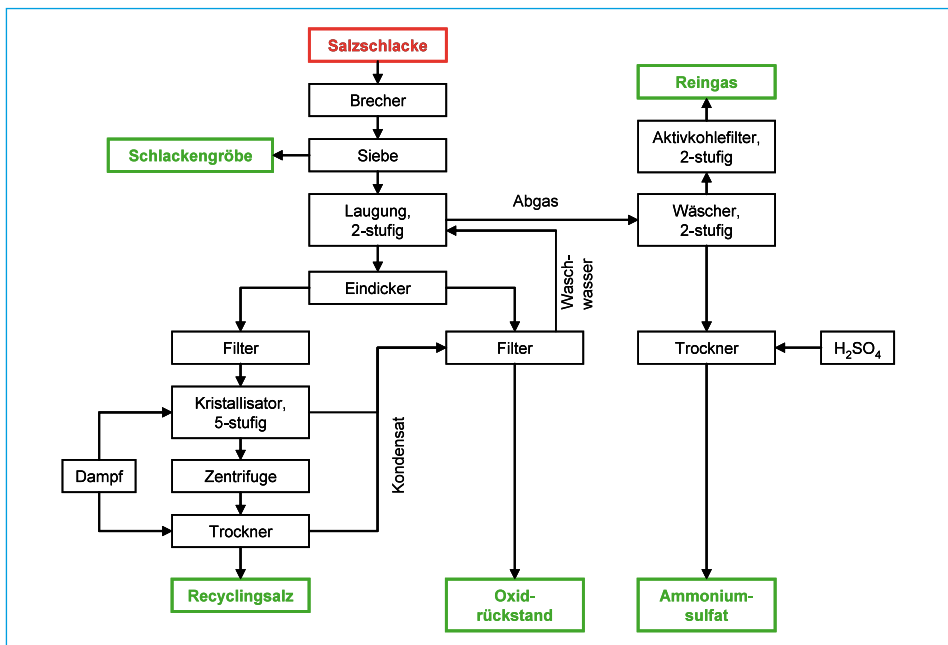


Bild 5: Flussschema des B.U.S.-Verfahrens zur Aufarbeitung von Salzschlacke

Quellen:

Krone K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000

Prillhofer, R.: Aluminiumkrätze- und Salzschlackenaufbereitung – Zero Waste Teil II: Reststoffverwertung. Montanuniversität Leoben, Bakkalaureatsarbeit, 2009

Der direkte Einsatz des Oxidrückstands in alternativen Industriebereichen ist einerseits durch den hohen Al_2O_3 -Anteil denkbar, andererseits stellen die hohen Schwermetall- sowie Chlor- und Fluorgehalte ein Problem dar. Der Einsatz kann oft nur in starker Verdünnung erfolgen, da auch beispielsweise die Zementindustrie strenge Grenzwerte einhalten muss. Ein zu hoher Chlorgehalt führt im Beton zu Korrosionserscheinungen, wodurch dieser Wert bei den Einsatzstoffen sehr streng limitiert ist (< 1 Gew.-%, teilweise auch < 0,5 Gew.-%).

In Tabelle 8 ist die chemische und mineralogische Zusammensetzung des anfallenden Oxidrückstands dargestellt.

Zusammensetzung des Oxidrückstands			
chemisch		mineralogisch	
Bestandteil	Gew.-%	Bestandteil	Gew.-%
Al _{gesamt}	34,5-37,6	Al ₂ O ₃	44
Al _{met}	0,8-4,8	Mg-Al-Spinell	32
Mg	4,9-6,1	SiO ₂	11
Si	2,7-4,6	andere Al-Verbindungen	6
Ca	2,7-3,7	CaF ₂ , Gips	5
F	1,0-2,4	Ba-Carbonat/Sulfat, Sr-Carbonat/Sulfat	0,6
Fe	1,2-3,1	div. Cu, Ni, Pb, Zn-Sulfide	0,5
C	< 1,7	NaCl, KCl	< 0,5
Cu	0,4-1,5		
Na + K	0,5-1,0		
Cl	< 0,4		
S	< 0,3		
Zn, Pb	< 0,2		
Cr, Ni	< 0,05		

Tabelle 8:

Darstellung der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung des Oxidrückstands

Quelle: Prillhofer, R.: Aluminiumkrätze- und Salzschlackenaufbereitung – Zero Waste Teil II: Reststoffverwertung. Montanuniversität Leoben, Bakkalaureatsarbeit, 2009

Daneben gibt es noch eine Reihe von weiteren Technologien zur Aufarbeitung von Salzschlacken, wie beispielsweise Kali-+Salz/Rekal-Verfahren, Alsa-Prozess usw., wo allerdings das Grundprinzip jeweils ähnlich ist. [4]

7. Stäube beim Recycling von Aluminium

Aluminiumhaltige Stäube fallen im Wesentlichen bei der Schmelztechnik an, obwohl auch im Bereich der Aufbereitung von Schrotten und Reststoffen ebenfalls entsprechende Mengen entstehen, welche allerdings oft stark unterschiedliche Analytik aufweisen.

Aufgrund der Feinheit der Stäube aus der Sekundäraluminiumindustrie und deren Zusammensetzung (Organik, Schwermetalle usw.) ist das Entwickeln eines geeigneten Aufbereitungsverfahrens von besonderem Interesse. Nachfolgend sind die wesentlichen Staubarten angeführt. [4, 52]

7.1. Filterstäube

Filterstäube bilden sich während des Schmelzens der Schrotte in den Recyclingöfen, wobei im Speziellen die Verfahren mit Salz zu nennen sind. Beim Salzbadprozess im Drehtrommelofen treten Stäube durch Verdampfung von flüchtigen Komponenten in Form von z.B. Chloriden und Fluoriden, die mit dem Abgasstrom mittransportierten feinen Teilchen, das dem Abgas zugegebene CaO oder aus organischem Material auf [8,11]. Aufgrund der ablaufenden Pyrohydrolyse entsteht aus Aluminiumchlorid bzw. -fluorid und Wasser Aluminiumoxid, Fluorwasserstoff und Salzsäure. Freies Chlor gelangt durch das Zusammenführen der Abgassysteme von Raffinier- und Schmelzöfen in den Filterstaub. Das Abgas wird mit Kalziumhydroxid behandelt. Fluorwasserstoff, Salzsäure, Chlor sowie Schwefeldioxid (aus dem Brennstoff) adsorbieren bei 300 bis 500 °C am Sorptionsmittel. Dabei fallen Kalziumchlorid, -fluorid und -sulfat als Reaktionsprodukte an. Nach einer Abkühlung auf unter 120 °C erfolgt die Abscheidung des Staubs in Schlauchfiltern. [4]

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, liegt eine große Bandbreite der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der anfallenden Filterstäube vor. Dies kann auf die unterschiedlichen Behandlungsverfahren des Abgases, die verschiedenen Einsatzmaterialien sowie die angewandte Abgasreinigungstechnik zurückgeführt werden. Bei den mit Salz betriebenen Dreh- und Kipptrommelöfen bestehen die Filterstäube zu großen Teilen aus dieser Chlorid-Fluorid-Mischung und unreaktiertem Kalkhydrat, während jene aus dem salzlosen Schmelzprozess geringere CaO- und Salzgehalte aufweisen.

Zusammensetzung von Filterstaub			
chemisch		mineralogisch	
Bestandteil	Gew.-%	Bestandteil	Gew.-%
Al _{gesamt}	2,6-17,7	Ca(OH) ₂	14-24
Al _{met}	4,0-9,0	NaCl	15-18
Cl	16,2-36,6	Al ₂ O ₃	9-13
Ca	2,4-25,4	KCl	9-10
Na	5,6-14,6	CaSO ₄	8-10
K	3,8-9,9	CaCl ₂ , CaCl ₂ ·Ca(OH) ₂ ·H ₂ O	5-10
F	0,4-8,0	SiO ₂	3-7
Fe	0,5-6,3	CaF ₂	4-5
C	1,8-6,2	PCDD/F	5.000- 40.000 ng ITE/kg
Si	1,3-3,1		
S	0,7-2,7		
Mg	1,5-1,8		
Zn, Pb	0,01-1,3		
Cu	0,01-0,7		
Ni	0,001-0,03		
Cd	< 0,001-0,02		
Cr, As, Hg	< 0,001		

Tabelle 9:

Darstellung einer typischen chemischen und mineralogischen Zusammensetzung von Aluminiumfilterstaub

Quellen:

Krone, K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000

Urbach, R. und andere: Aufarbeitungsmöglichkeiten dioxinhaltiger Filterstäube aus Aluminiumschmelzwerken. Metall 47 (1993), S. 810-816

Der Al_{met} -Anteil kann bis zu 17,7 % betragen. Durch den Kohlenstoff- sowie den schwankenden Sauerstoffgehalten mit Anwesenheit von Kupfer als Katalysator liegen ideale Bedingungen zur Bildung von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD bzw. PCDF) sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB) vor. [4, 46, 47]

Ähnlich wie bei der Salzschlacke ergeben sich durch wasserlösliche Chloride, der möglichen Entstehung von Gasen (Wasserstoff, Methan, Ammoniak) bei Wasserzufuhr, der Feinheit des Staubs sowie der PCDD/F-Belastung Probleme mit der Deponierung. [4]

Filterstäube zählen zu den überwachungspflichtigen Abfällen, weshalb dessen Ablagerung nur auf Sonderdeponien erfolgen darf. Dies führt zu erheblichen Kosten, wodurch nach möglichen Aufarbeitungsverfahren gesucht wird, welche folgende Zielsetzungen verfolgen [4]:

- Zerstörung der PCDD/F
- Abtrennung und Rückgewinnung der laugbaren Alkalichloride
- Verwertung bzw. problemlose Deponierung der entstehenden Reststoffe

Mit unterschiedlichen Technologien (B.U.S.-Verfahren, IME-Verfahren, UR-Chemie-Prozess) könnten diese Stäube aufgearbeitet werden, wobei zurzeit keine Wirtschaftlichkeit gegeben ist und daher fast ausschließlich eine Deponierung erfolgt.

Neben den bereits erwähnten Verfahren gibt es alternative Einsatzgebiete, bei denen die anfallenden Stäube verwertet werden könnten. Beispielsweise kann der bei den Drehtrommelöfen entstehende Filterstaub als Zusatzstoff im Vorfilter der Abluftreinigung eingesetzt werden. Das feinteilige Material aus diesem wird wiederum in den Drehtrommelöfen als Abdecksalz verwendet. [46]

Eine weitere Möglichkeit der Verwertung ist das Beimengen zum Entschwefelungsmittel ($\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) für die Stahlindustrie. Hierbei sind aber die enthaltenen Schwermetalle problematisch, welche zur Verschlechterung der Stahlqualität führen sowie die entstehenden Halogenidemissionen. [4, 46].

Murayama und andere [48] führten Untersuchungen zur Herstellung eines hydratalkitähnlichen Materials durch, welches zum Abbinden schwermetallhaltiger Partikel aus wässrigen Lösungen dient. Aufgrund der guten adsorbierenden Wirkung ist der Einsatz dieses synthetisch hergestellten Hydrotalkits zur Abwasserreinigung geeignet.

7.2. Aufbereitungsstäube

Bei der Vorbehandlung (z.B. Shredder) von Schrotten vor dem Einsatz im Schmelzprozess fallen Aufbereitungsstäube an ($25 \text{ kg/t}_{\text{Al}}$), welche sich aus organischen Stoffen, metallischem Aluminium, Aluminiumoxid und freiem Kohlenstoff zusammensetzen. Dieses feinkörnige Material wird zurzeit deponiert. [4]

8. Feuerfestausbuch beim Recycling von Aluminium

Feuerfeste Erzeugnisse sind nichtmetallische keramische Materialien, welche hohen Temperaturen, korrosiven und erosiven Bedingungen in verschiedensten Industriebereichen, wie z.B. Metall, Glas und Chemikalien, standhalten. Die Einteilung der einzelnen Produkte erfolgt nach der Form und der Funktion (geformte und ungeformte Materialien, Funktionalprodukte und wärmedämmende Erzeugnisse). Die Anforderungen (z.B. Schmelzbereich, mechanische Eigenschaften usw.) der einzelnen feuerfesten Produkte an die jeweiligen Einsatzgebiete werden durch Variation der Zusammensetzungen angepasst. Die Grundstoffe der Erzeugnisse sind im Wesentlichen CaO, MgO, Al₂O₃, ZrO₂, Cr₂O₃, SiO₂ und C. [49, 50]

Durch die strenger werdenden gesetzlichen Auflagen und mangelnden Deponierungsmöglichkeiten kommt dem Recycling feuerfester Materialien immer größere Bedeutung zu. Je Tonne Sekundäraluminium fallen zirka 2 kg Ofenausbruch an, was global gesehen zu einer erheblichen Reststoffmenge führt [50]. In Österreich lag im Jahr 2009 die zu deponierende Menge von diesem Material (inklusive Hütten- und Gießereischutt) bei 164.000 t [51].

Die Feuerfestindustrie versucht zur Minimierung des zu deponierenden Ausbruchs einerseits die Standzeit der Ausmauerungen zu erhöhen und andererseits das Material einem Recycling zuzuführen. Die Motivation zum Wiederverwerten von hochtemperaturbeständigen Reststoffen liegt in der Wertschöpfung durch Einsparung von Deponiekosten sowie der Verringerung von CO₂-Emissionen bei den energieintensiven Prozessen der Primärgewinnung. Ein weiterer Vorteil ist die Bekanntheit der Zusammensetzung des Zustellkonzepts. [50]

Eine sortenreine Erfassung gestaltet sich äußerst schwierig, da alleine innerhalb eines Aggregats unterschiedliche Feuerfesterzeugnisse eingesetzt werden. Weitere Verunreinigungen kommen durch Infiltrationen sowie den oberflächlichen Angriff von Schlacke und Metallbad zustande. Aufgrund der hohen Temperaturen sowie dem Ablauf chemischer Reaktionen liegen andere Materialeigenschaften vor. Etwa fünfzig Prozent der im metallurgischen Bereich eingesetzten feuerfesten Steine werden durch Stoffumwandlung, Anreicherung mit Fremdstoffen und Vermischung mit anderen Auskleidungszonen verbraucht, wodurch der Wiedereinsatz in Form von Sekundärprodukten nicht möglich ist. [49, 50]

Es ist daher zielführend anzudenken, dass die abzulagernden Materialien in alternativen Industriebereichen (z.B. Baustoffindustrie) zum Einsatz kommen. Durch entsprechende Aufbereitungsprozesse kann eine Abtrennung von beinhaltenden Wertmetallen erfolgen und der überbleibende Rohstoff z.B. als Additiv im Straßenbau dienen. Des Weiteren wäre die Anwendung bei der Zementherstellung und der Zusatz bei Schleifmitteln sowie Schlackenbildnern denkbar. [49]

9. Zusammenfassung

Ressourcensicherheit wird zurzeit sehr häufig mit den kritischen Rohstoffen, welche von der EU identifiziert wurden, in Verbindung gebracht. Aluminium zeigt hier keinen

Versorgungsengpass, ist aber für die europäische Industrie von besonderer Bedeutung. In diesem Zusammenhang nimmt das Recycling eine besondere Stellung ein und ermöglicht den europäischen Ländern eine gewisse Rohstoffunabhängigkeit, neben den ökologischen und ökonomischen Vorteilen gegenüber der primären Produktion. Jedoch sind auch im Bereich der Sekundärmetallurgie von Aluminium für eine nachhaltige Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette und die Erlangung eines Zero-Waste-Konzeptes die anfallenden Reststoffe zu berücksichtigen. Im Speziellen handelt es sich hierbei um Krätzen, Salzschlacken, Krätzerückständen und Stäuben sowie Feuerfestausbruch, welche einer Verwertung zugeführt werden müssen, wobei weltweit betrachtet der größte Teil dieser Materialien zurzeit noch deponiert wird. In der Literatur sind daher nur teilweise Daten bezüglich der Zusammensetzung, Phasenanalytik sowie Einflüsse von einzelnen Verfahrensparametern angegeben, sodass nicht immer eine ausreichende Kenntnis für die Entwicklung von Aufarbeitungstechnologien vorliegt.

Die betrachteten Rückstände, wie beispielsweise Krätzestaub oder die Salzschlacke, zählen entsprechend den gesetzlichen Rahmenbedingungen in Österreich zu den gefährlichen Abfällen, was unter anderem an der Eluierbarkeit einiger Substanzen sowie der Gasbildung bei der Deponierung liegt. Das Ablagern bzw. Endlagern ist dementsprechend mit hohen Kosten verbunden, wodurch neue Prozesse zur Aufarbeitung dieser Materialien einen immer höheren Stellenwert einnehmen. Für die in der Aluminiumsekundärmetallurgie anfallenden Reststoffe gibt es nach dem Stand der Technik teilweise Verwertungsverfahren, welche jedoch häufig im Vergleich zu einer Deponierung hohe Kosten aufweisen, was sich auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses auswirkt. Beispielsweise sind hier die Filterstäube zu nennen, wo aufgrund des hohen Anteils an PCDD/F sowie PAK und PCB eine spezielle Aufarbeitung unter Zerstörung dieser Schadstoffe erfolgen muss. Aber auch Rückstände aus der Krätzeaufbereitung, welche jahrelang auf Deponien abgelagert wurden, müssen einer Verwertung zugeführt werden. Ähnliches gilt für die Feuerfestrückstände, wo in Mitteleuropa bereits begonnen wird, diese wiederum in den Feuerfestmaterial-Kreislauf zu integrieren. Um auch zukünftig das Recycling von Aluminium nachhaltig zu betreiben, ist es daher notwendig, die Reststoffströme ganzheitlich im Wertstoffkreislauf zu berücksichtigen und nicht nur eine Deponierung durchzuführen. Zu diesem Zweck müssen sowohl die technischen Voraussetzungen, wie umfassende Charakterisierung, Optimierung sowie Entwicklung von Prozessen und Ermöglichung von alternativen Anwendungsgebieten, erlangt, als auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, welche einerseits ein ökologisches Recycling von Aluminium garantieren und andererseits keine wettbewerbsverzehrende Nachteile mit sich bringen.

10. Literaturverzeichnis

- [1] Critical raw materials for the EU: Report of the Adhoc Working Group on defining critical raw materials. Internet: <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index.de.htm>, Zugriff: 14.8.2011
- [2] Metallstatistik 2001-2011. 99. Jahrgang, World Bureau of Metal Statistics, Ware, England 2012
- [3] Antrekowitsch, H. et. al.: Recycling und Werkstoffentwicklung von Aluminium, BHM 156 (7), 2011, pp. 287-294

- [4] Krone, K.: Aluminium-Recycling: Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2000 2enbuch – 1. Teil. Düsseldorf, 16. Auflage, Aluminium-Verlag, 2002
- [5] Pirker, A.: Ermittlung von Einflussparametern für die thermische und mechanische Vorbehandlung ausgewählter Einsatzstoffe in der Aluminiumsekundärmetallurgie. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, 2011
- [6] Schwalbe, M.: Grundlagen und Möglichkeiten der Verarbeitung von höher kontaminierten Aluminiumschrotten. In: World of Metallurgy – Erzmetall, 64 (3), 2011, pp. 157-162
- [7] EN 12258-3: Aluminium und Aluminiumlegierungen Begriffe und Definitionen Teil 3: Schrott, 2000
- [8] Bateman, W.: Decoating Aluminum Products and the Environment. Light Metals TMS, 1999, pp. 1.099-1.106
- [9] Kvithyld, A.: Gases evolved during decoating of aluminium scrap in inert and oxidizing atmospheres. Light Metals TMS, 2003, pp. 1.091-1.095
- [10] Kvithyld, A.: Recycling of Light Metals. Optimal Thermal De-coating, Journal of Minerals, Metals and Materials Society 60, 2008, pp. 47-51
- [11] Sarc, R.: Behandlung von gefährlichen Abfällen. Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Vorlesungsskriptum, Montanuniversität Leoben, 2011
- [12] Lorber, K.: Treatment and disposal of residues from aluminium dross recovery. Vorlesungsunterlagen, Abfallwirtschaft II, Montanuniversität Leoben, 2010
- [13] Himmel, W.: Behandlung von gefährlichen Abfällen. Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik. Vorlesungsskriptum, Montanuniversität Leoben, 2010
- [14] Lebensministerium: AbFSN-Liste. Online im Internet: www.lebensministerium.at/filemanager/download/7617, Abruf: 2-11-2011
- [15] Verordnung des Bundesministers für Umwelt, Jugend und Familie über die Festsetzung von gefährlichen Abfällen und Problemstoffen (Festsetzungsverordnung gefährliche Abfälle). Online im Internet: <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011043>. Abruf: 17-3-2011
- [16] Rechtsinformationssystem (RIS): Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für AEV Abfallbehandlung. Online im Internet: <http://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011166&ShowPrintPreview=True>, Abruf: 20-12-2011
- [17] Alfaro, I.: Technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte der Entstehung und der Verarbeitung von Aluminiumkrätze. Aluminium 62 (4), 1986, S. 259-266
- [18] Paulitsch, H.: Verwertungsstrategien für Reststoffe aus der Aluminiumsekundärmetallurgie, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2012
- [19] Lorbeer, K.; Antrekowitsch, H.: Anfall und Entsorgung von Salzschlacke und Krätze. Depotech 2010, Proceedings of Depotech 2010, S. 711-714
- [20] Prillhofer, R.; Prillhofer, B.; Antrekowitsch, H.: Verwertung von Reststoffen beim Aluminium-Recycling, BHM, 153 (3), 2008, S. 2-7
- [21] Konetschnik, St.: Verwertungsstrategien für gefährliche nichteisenmetallhaltige Rückstände. In: Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2010
- [22] Prillhofer, R.: Aluminiumkrätze- und Salzschlackenaufbereitung - Zero Waste Teil II: Reststoffverwertung. Montanuniversität Leoben, Bakkalaureatsarbeit, 2009
- [23] Shinzato, M. C.; Hypolito, R.: Solid waste from aluminium recycling process. In: Characterization and reuse of its economically valuable constituents. Waste Management 25, 2005, S. 37-46
- [24] Kammer, C.: Aluminiumtaschenbuch - 1. Teil. Düsseldorf, 16. Auflage, Aluminium-Verlag, 2002

- [25] Schnyder, B.: Anodisches Oxidieren von Reinstaluminium mit sauren Elektrolyten. Institut für Physik der Universität Freiburg. Dissertation, 1994
- [26] MIG WELD GmbH: Oxidschicht. Online im Internet: <http://www.migweld.de/no_cache/deutsch/service/schweissen-von-aluminium/oxidschicht.html?word_list%5B0%5D=oxidschicht>, Abruf: 27-9-2011
- [27] Feliu Jr., S.; andere: Passivating oxide film and growing characteristics of anodic coatings on aluminium alloys. *Applied Surface Science* 254, 2008, S. 2.755–2.762
- [28] Gottstein, G. und andere: Metalle. In: Winnacker/Küchler. *Chemische Technik: Prozesse und Produkte*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag, 2006
- [29] Pawlek, F.: *Metallhüttenkunde*. Berlin – New York, Walter de Gruyter & Co, 1983
- [30] Vogelsberger, W. und andere: Dissolution kinetics of oxidic nanoparticles: The observation of an unusual behaviour. *Colloids and Surfaces A: Physiochemical and Engineering Aspects* 324 (2008), pp. 51-57
- [31] Dash, B. und andere: Acid dissolution of alumina from waste aluminium dross. *Hydrometallurgy* 92, 2008, pp. 48-53
- [32] Gock, E. und andere: Rohstoffaufbereitung. In: Winnacker/Küchler. *Chemische Technik: Prozesse und Produkte*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag, 2006
- [33] Schneider, K.: *Die Verhüttung von Aluminiumschrott*. 3. Auflage – Metall-Verlag GmbH, Berlin, 1970, S. 119-130
- [34] Zholnin, A. G. und andere: Peculiarities of aluminium dross melting in a laboratory tilting furnace. TMS Annual Meeting, *Light Metals*, 2004, pp. 943–947
- [35] Wang, S.; Reddy R. G.: Low Melting Fluxes for Recycling of Al Scrap. TMS, Second International Symposium on Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes, 1996, pp. 389-406
- [36] Wöhler, V.: *Aufbereitete Aluminiumsalzschlacke als Reaktivierungsmaterial*. Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt eines salzhaltigen Reaktivierungsmaterials im Labor und Freiland. Universität Kassel, Dissertation, 1999
- [37] Gerke, M.: *Untersuchungen zum Einsatz von Schmelzsäuren bei der Verarbeitung spezieller Aluminiumschrotte und Krätzen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2002
- [38] Boin, U. und andere: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie. Umweltbundesamt, 2000
- [39] Essafi, R.: *Optimierung der Salzzusammensetzung für das Schmelzen von Aluminium-Schrotten im Drehtrommelofen*. Institut für Metallurgie, Technische Universität Clausthal, Diplomarbeit, 2001
- [40] Gil, A.; Korili, S. A.: Management of the Salt Cake Generated at Secondary Aluminium Melting Plants. *Sciyo*, 2010, pp. 149-158
- [41] Prillhofer, R.; Prillhofer, B. ; Antrekowitsch, H. : Treatment of Residues during Aluminium Recycling. EPD Congress, Minerals, Metals and Materials Society, 2009, S. 857-861
- [42] Prillhofer, R.; Antrekowitsch, H.: Einsatzmöglichkeiten prozessbedingter Reststoffe beim Al-Recycling. Depotech, Proceedings of Depotech, 2008, S. 231-236
- [43] Peterson, R. D.: Review of aluminium dross processing. TMS Annual Meeting, *Light Metals*, 2002, S. 1.029-1.037
- [44] Zhou, B. und andere: Process modeling of aluminium scraps melting in molten salt and metal bath in a rotary furnace. The Minerals, Metals and Materials Society, *Light Metals*, 2004, 919-924
- [45] Sydykov, A.: *Eigenschaften und Ausbeuteeinfluss von NaCl/KCl-basierten Schmelzsäuren des Al-Recyclings*. Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der RWTH Aachen, Dissertation, 2004

- [46] Winter, B. and others: Abfallvermeidung und -verwertung: Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Umweltbundesamt, 2005
- [47] Urbach, R. und andere: Aufarbeitungsmöglichkeiten dioxinhaltiger Filterstäube aus Aluminiumschmelzwerken. Metall 47 (1993), S. 810-816
- [48] Murayama, N. und andere: Synthesis of Hydrotalcite-Like Materials from Various Wastes in Aluminium Regeneration Process. Resources Processing 53, 2006, S. 6–11
- [49] Horn, V.; Priesch, S.: Recycling von Nichteisenmetallen aus Feuerfestausbruch. Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Bakkalaureatsarbeit, 2006
- [50] Neuböck, R.; Schmitz, C.: Recycling von feuerfesten Erzeugnissen. Montanuniversität Leoben, Universitätslehrgang Recycling, 2010
- [51] Umweltministerium: Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 – Entwurf. 2011
- [52] Becker, E.: Reststoffe des Aluminiumrecyclings – Chancen der Aufarbeitung und Weiterverarbeitung. RWTH Aachen, Dissertation, 1993
- [53] Leistikow, S.: Thermodynamik und Kinetik der Oxidbildung. Symposium, Aufbau von Oxidschichten auf Hochtemperaturwerkstoffen und ihre technische Bedeutung, 1983, S. 33-56

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Aschen • Schlacken • Stäube

– aus Abfallverbrennung und Metallurgie –

Karl J. Thomé-Kozmiensky.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-99-3

ISBN 978-3-935317-99-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Ina Böhme, Petra Dittmann, Cordula Müller,
Fabian Thiel, Martin Schubert

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Daniel Böni, KEZO Kehrrechtverwertung Zürcher
Oberland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.