

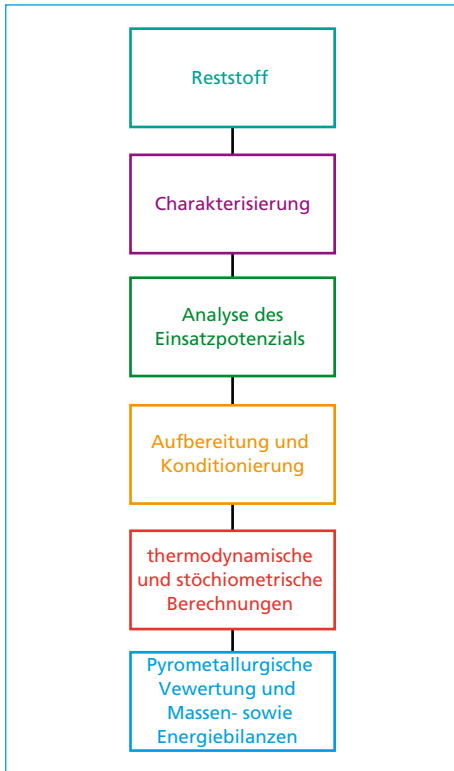
Recycling von Produktionsrückständen aus der metallverarbeitenden Industrie

Marlis Zöhner, Thomas Angerer, Helmut Antrekowitsch und Alexander Kügele

1.	Reststoffe aus der metallverarbeitenden Industrie	372
2.	Grundlagen der Agglomerationstechnik	374
3.	Recycling von Produktionsabfällen	377
3.1.	Charakterisierung	377
3.2.	Agglomeration	380
3.3.	Schmelzmetallurgische Verwertung	381
4.	Zusammenfassung und Ausblick	382
5.	Quellen	383

Wo gehobelt wird fallen Späne gemäß diesem alten Sprichwort aus der Holzverarbeitung fallen auch in der metallverarbeitenden Industrie unterschiedlichste Produktionsrückstände bei der Bearbeitung an. Die innerbetriebliche Kreislaufführung von sortenreinen und sauberen Schrotten bzw. deren Verkauf ist Stand der Technik. Verunreinigte Reststoffe, Schlämme und Stäube werden jedoch unabhängig ihres Metallgehaltes in vielen Fällen einer technisch einfachen Deponierung zugeführt, wobei die enthaltenen Wertmetalle verloren gehen. Recycling- und Aufbereitungsprozesse müssen ständig gegen den stark schwankenden Metallpreis ankämpfen, um kostendeckend zu bleiben. Verschärfte Umweltvorschriften für die Ablagerung von Rest- und Abfallstoffen und eine damit einhergehende Verknappung von Deponiekapazitäten sowie gleichzeitige Verteuerung der Deponiekosten kommen als Argumente für die stoffliche Verwertung hingegen verstärkend hinzu. Um die strategische Abhängigkeit von der Verfügbarkeit der Ressourcen zu verringern und eine nachhaltige Verwertung von Produktionsrückständen aus der metallverarbeitenden Industrie zu garantieren, steigt auch der Bedarf an anwendungsorientierter Grundlagenforschung. Aus diesen Gründen untersucht der Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie an der Montanuniversität Leoben (Österreich) gemeinsam mit einem Industriepartner die schmelzmetallurgische Verwertung ausgewählter Industrierückstände.

Die Basis einer pyrometallurgischen Verwertung bilden die Identifizierung potenziell einsetzbarer metallhaltiger Reststoffe, deren Stoffstromanalyse, sowie eine grundlegenden Charakterisierung (Bild 1). Der spezielle Fokus liegt dabei auf den physikalisch, chemischen und morphologischen Eigenschaften. Danach folgt die Analyse des Einsatzpotenzials. Ziel des Projektes ist es, Rückstände so zu konditionieren, dass diese



in bestehende Schmelzprozesse rückgeführt werden können. Da die Korngröße des Einsatzstoffes einen entscheidenden Einfluss auf das Metallausbringen und den Reststoffanfall (z.B. Schlacke und ausgetragener Staub) hat, erweist sich eine Agglomeration in vielen Fällen als fördernd. Des Weiteren ermöglichen thermodynamische Berechnungen die Generierung von Massen- und Energiebilanzen. Ausgehend von einer computergestützten Modellierung erfolgen Schmelzversuche im Labormaßstab und die Validierung der Ergebnisse.

Bild 1:

Systematischer Ablauf des Forschungsprojektes zur schmelzmetallurgischen Verwertung von Industriereststoffen

1. Reststoffe aus der metallverarbeitenden Industrie

Die metallhaltigen Reststoffe aus Prozessen der mechanischen Formgebung sowie der physikalischen und mechanischen Oberflächenbehandlung sind so vielfältig wie die Industrien selbst. Einteilen lassen sie sich über den Abfallcode des Europäischen Abfallkatalogs [5] sowie in Österreich nach den Abfallschlüsselnummern gemäß ÖNORM S 2100 [6]. Tabelle 1 zeigt einen Auszug aus dem Europäischen Abfallkatalog für aluminiumhaltige Reststoffe der metallverarbeitenden Industrie. Tabelle 2 listet die Zuordnung nach den österreichischen Abfallschlüsselnummern. Gefährliche Abfälle sind in der Tabelle 1 und 2 mit einem Stern gekennzeichnet. Durch die prozess-orientierte Zuordnung im Europäischen Abfallkatalog ist die Herkunft der Rückstände eindeutig, hingegen können für chemisch und/oder physikalisch ähnliche Abfälle zwei unterschiedliche Kodierungen vorhanden sein. Der österreichische Abfallkatalog gemäß ÖNORM S 2100 teilt die Reststoffe nach ihren Hauptbestandteilen ein. Da aber großteils für Nichteisenmetalle, egal ob z.B. Aluminium oder Blei, dieselben Schlüsselnummern gelten, ist auch diese Zuordnung ungenügend. Beide Einteilungen geben jedoch kaum Auskunft über die chemische Zusammensetzung des Abfalls, die physikalischen Eigenschaften und die zu erwartenden Verunreinigungen.

Recycling von Produktionsrückständen aus der metallverarbeitenden Industrie

Tabelle 1: Auszug aus dem Europäischen Abfallkatalog für aluminiumhaltige Reststoffe aus der metallverarbeitenden Industrie

Abfallgruppe	Abfallart	Code
Abfälle aus Prozessen der mechanischen Formgebung sowie der physikalischen und mechanischen Oberflächenbehandlung	NE-Metallfeil und -drehspäne	12 01 03
	NE-Metallstaub und -teilchen	12 01 04
	Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	12 01 14*
	Bearbeitungsschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 14 fallen	12 01 15
	Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	12 01 16*
	Strahlmittelrückstände mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen	12 01 17
	Ölhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	12 01 17*
Abfälle aus der thermischen Aluminium-Metallurgie	Aluminiumoxidabfälle	10 03 05
	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	10 03 19*
	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen der unter 10 03 19 fällt	10 03 20
	Andere Teilchen und Staub (einschließlich Kugelmühlstaub), die gefährliche Stoffe enthalten	10 03 21*
	Teilchen und Staub (einschließlich Kugelmühlstaub) mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 03 21 fallen	10 03 22
Abfälle aus der thermischen Nichteisenmetallurgie	Teilchen und Staub	10 08 04
	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	10 08 15
	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 08 15 fällt	10 08 16
Abfälle vom Gießen von Nichteisenmetallen	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	10 10 09
	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 10 09 fällt	10 10 10

* gefährlicher Abfall

Tabelle 2: Auszug aus der ÖNORM S 2100 für aluminiumhaltige Reststoffe der metallverarbeitenden Industrie

Abfallgruppe	Abfallart	Code
Abgasreinigung	Filterstaub, NE-metallhaltig	31217 *
	Filterstaub, NE-metallhaltig ausgestuft	31217 88
NE-Metallabfälle	Stanz- und Zerspanungsabfälle	35301
	Stanz- und Zerspanungsabfälle; gefährlich kontaminiert	35301 77
	Aluminium, Aluminiumfolien	35304
	Aluminium, Aluminiumfolien; gefährlich kontaminiert	35304 77 *
	Sonstige NE-metallhaltige Stäube	35 321 *
	Sonstige NE-metallhaltige Stäube; ausgestuft	35 321 88
Metallschlämme	Metallschleifschlamm	35 502*
	Sonstige Metallschlämme	35 506*
	Metallschleifschlämme ohne gefahrenrelevante Eigenschaften	35 507

* gefährlicher Abfall

Das Bild 2 zeigt eine Übersichtskarte der unterschiedlichen metallherzeugenden und -verarbeitenden Industrien in Österreich. Die Einteilung erfolgte nach den verschiedenen Metallen sowie über die Sparten *Automobilindustrie*, *spezialisierte Industrie* und die *Industrie der chemischen Oberflächenbehandlung*. Nach einer Identifizierung der angewendeten Verfahrensschritte und Technologien in den Firmen, folgte eine Auflistung potenziell anfallender Rückstände. Eine generelle Auskunft über die Reststoffe kann auch innerhalb dieser Gruppierungen nur eingeschränkt getroffen werden, da die Prozessparameter und die verarbeiteten Materialien bei den unterschiedlichen Unternehmen oder Standorten stark variieren und der Einsatz verschiedener Aggregate das Vorhandensein differenzierter Outputströme impliziert. Daher ist eine grundlegende und umfassende Charakterisierung des Ausgangsstoffes für ein Recycling unumgänglich.



Bild 2: Übersicht der metallverarbeitenden Industrie in Österreich

2. Grundlagen der Agglomerationstechnik

Als Agglomeration versteht man im Allgemeinen den Umkehrprozess der Zerkleinerung, das heißt durch Bindekräfte werden aus feinkörnigen Partikeln gröbere Formkörper erzeugt [4, 10]. Die Agglomerationsprozesse für Schüttgut lassen sich in die Aufbauagglomeration (Pelletierung), die Pressagglomeration (Brikettierung) und in das Sintern unterteilen [10].

Die technologische Zielsetzung ist dabei je nach Branche und Anwendung sehr unterschiedlich. Die Agglomeration von Schüttgütern führt z.B. zu einer Verbesserung des Fließ-, Dosier- und Förderverhaltens sowie zur Vermeidung von Entmischungen. Weitere Gründe sind unter anderem die Verbesserung der Durchströmbarkeit im Schachtofenprozess z.B. beim Möller der Roheisenerzeugung und die Erzeugung

vorgegebener Partikelgrößen und -formen [10]. Bei Recyclingprozessen kommt es durch eine Brikettierung meist zu einer Erhöhung der Chargierfähigkeit in den Ofenraum, zu einer Verringerung der Staubbelastung und zu einer Reduktion des Oberflächen- zu Volumenverhältnisses des Einsatzstoffes und einer damit verbundenen Erhöhung des Schmelzausbringens.

Um den Zusammenhalt der einzelnen Körner sicherzustellen, können, wie bereits in der Fachliteratur [3] näher beschrieben, unterschiedliche Bindemechanismen auftreten (Bild 3). Schwerpunkt in diesem Forschungsprojekt ist, im Vergleich zu der Aufbauagglomeration bei eisenreichen Filterstäuben der Stahlindustrie, die formschlüssige Bindung durch Pressagglomeration mittels Stempelpressen.

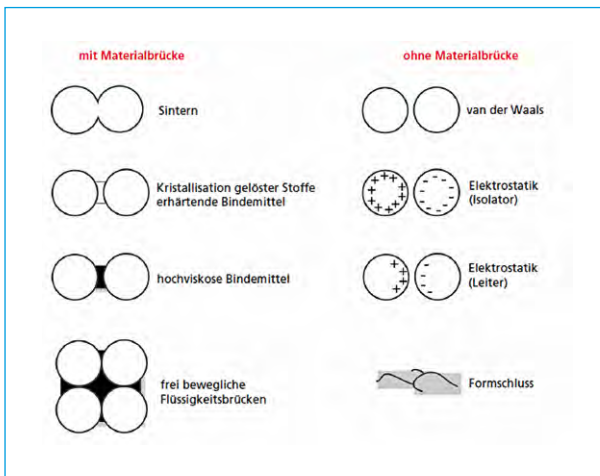


Bild 3:

Bindemechanismen bei der Agglomeration

Quelle: Gock, E.; Vogt, V.; Sittard, M.; et al.: Verwertung von eisenreichen Filterstäuben der Stahlindustrie durch Pelletierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.

Bei der Pressagglomeration (z.B. Brikettierung) werden Partikel eines Feststoffes durch von außen wirkende Kräfte aneinandergedrückt bis eine Haftung der Einzelteile entsteht. Das Bild 4 zeigt die Pressmechanismen in Abhängigkeit des aufgebracht Druckes. Es lässt sich zwischen zwei Verdichtungsphasen unterscheiden. Im ersten Schritt erfolgt durch mechanische Einwirkung eine Umordnung der Partikel, wobei die Reibungskräfte zwischen ihnen zu überwinden sind. Die Korngröße- und -form bleibt dabei unverändert. In der zweiten Phase kommt es zu einem starken Anstieg des Pressdruckes. Dies führt zur Verformung von duktilen und zum Bruch von spröden Einzelkörnern. Das Pressverhalten ist stark von den Eigenschaften des Schüttgutes, wie z.B. Verformungs- und Bruchverhalten, Partikelgröße und -verteilung, das Vorhandensein und der Festigkeit von Voragglomeraten bzw. der Partikel, abhängig. Plastische Verformungen, die eine Verpressbarkeit des Gutes begünstigt, werden durch abnehmende Verdichtungsgeschwindigkeiten, steigende Temperatur sowie abnehmende Partikelgröße positiv beeinflusst. Nach Beendigung des Pressvorganges ist zu erwarten, dass der Pressdruck sofort gegen Null geht (vertikale Linie). Tatsächlich kommt es aber zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Rückfederung, verursacht durch die Expansion des in Poren eingeschlossenen Gases (z.B. Luft) und der Entspannung der elastischen

Verformung. Dies führt zu Rissbrüchen oder zu einem teilweisen bzw. vollkommenen Zerfall des Presskörpers. Eine Verringerung der Pressgeschwindigkeit und ein Verweilen des Pressstempels bei maximalem Druck wirken diesem Phänomen entgegen. In der Praxis muss ein Kompromiss zwischen der Verdichtungsgeschwindigkeit und der gewünschten Produktqualität gefunden werden [7, 10].

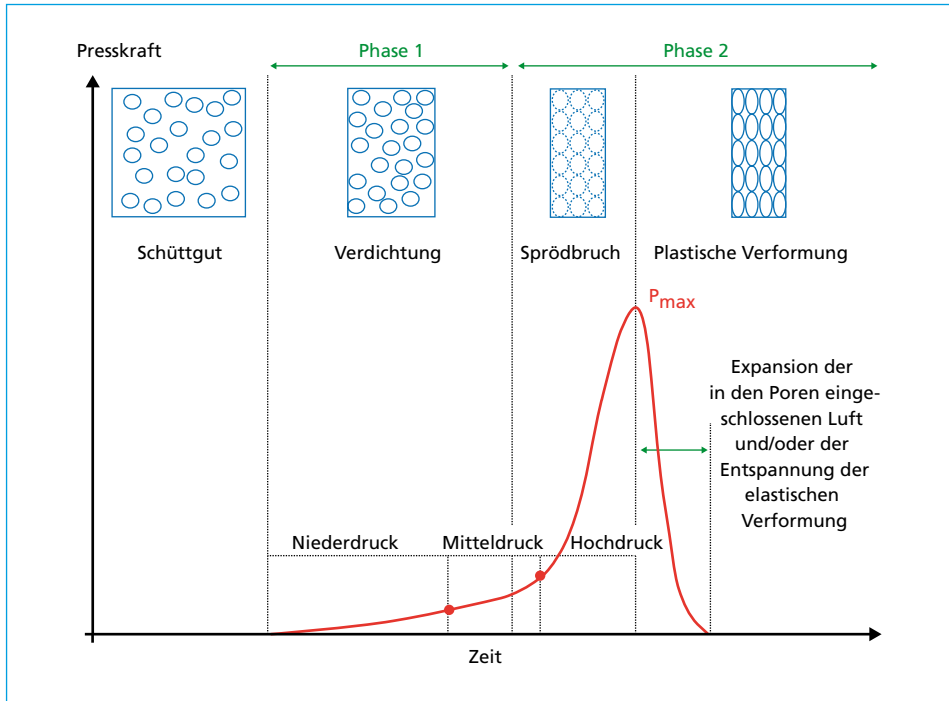


Bild 4: Mechanismen der Pressagglomeration in Abhängigkeit des Druckes

Quelle: Pietsch, W.: Agglomeration Processes, Phenomena, Technologies, Equipment. Wiley-VCH Weinheim, 2002.

Die formschlüssige Bindung von metallhaltigen Industrieabfällen ist bei der Hochdruckbrikettierung ohne Bindemittel der treibende Bindemechanismus. Im Allgemeinen wird darunter das Verhaken, Umschlingen, Falzen, Falten, Verfilzen usw. von blech-, plättchen-, stangen- und drahtförmigen sowie fasrigen Partikeln bzw. Stücken durch ihre elastischen Stoffeigenschaften verstanden [10]. Erfolgt jedoch eine gemeinsame Verdichtung von verformbaren und spröden Partikeln unter hohem Druck, tritt eine weitere formschlüssige Agglomerationsbindung auf. Die mechanische Krafteinwirkung führt zu einer selektiven Zerkleinerung der spröden Teilchen. In die entstehenden Risse und Kerben dringen verformbare Partikel ein und umschließen die feinen Bestandteile. Diese starke strukturelle Bindung weist die gleichen Eigenschaften wie ausgehärtete Matrixbindemittel, wie z.B. Asphalt, Ton, Zement oder Paraffin, auf. Prinzipiell ist die Verwendung von Bindemitteln bei einer formschlüssigen Bindung nicht notwendig. Ferner können diese Hilfsstoffe die natürlichen Bindemechanismen negativ beeinflussen [7, 10].

3. Recycling von Produktionsabfällen

Ziel des Forschungsprojektes ist die Metallrückgewinnung aus Produktionsrückständen über eine schmelzmetallurgische Behandlung. Da die Korngrößen der eingesetzten Sekundärstoffe einen direkten Einfluss auf das Metallausbringen und die Chargierfähigkeit haben, ist eine Agglomeration bei vielen Rückständen Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Wiedergewinnung.

Das Recycling von Stanzabfällen und nicht verunreinigte Zerspanungsabfällen ist Stand der Technik. Da diese Neuschrotte meist sortenrein anfallen, können sie entweder innerbetrieblich rückgeführt oder zum aktuellen Marktpreis verkauft werden. Eine Paketierung oder Brikettierung von Reststoffen bewirkt eine Verringerung des Lager- und Transportvolumens und erhöht den Verkaufserlös. Staubförmige Abfälle führen in produzierenden Betrieben oft zu erhöhten Aufwendungen und werden meist deponiert. Ein Recycling der im Staub gebundenen Wertmetalle ist aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Reststoffe und den geforderten Prozessparametern nur in Ausnahmefällen möglich. Des Weiteren geht von Leichtmetallstäuben aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und ihrer Reaktionsfreudigkeit eine Staubexplosionsgefahr aus.

3.1. Charakterisierung

Zur Analyse einer möglichen Verwertung eines aluminiumhaltigen Reststoffes eines metallverarbeitenden Betriebes (Staub aus einer Gewebefilteranlage) wurden die physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht. In einem ersten Schritt erfolgte die Bestimmung der Korngrößenverteilung des Ausgangsmaterials mit Hilfe einer Laserbeugung nach ISO 13320, die Ermittlung des Feuchtegehaltes und der Schüttdichte. Die Korngrößenverteilung des Staubes ist in Bild 5 dargestellt und die physikalischen Kenngrößen der Probe in Tabelle 3 zusammengefasst.

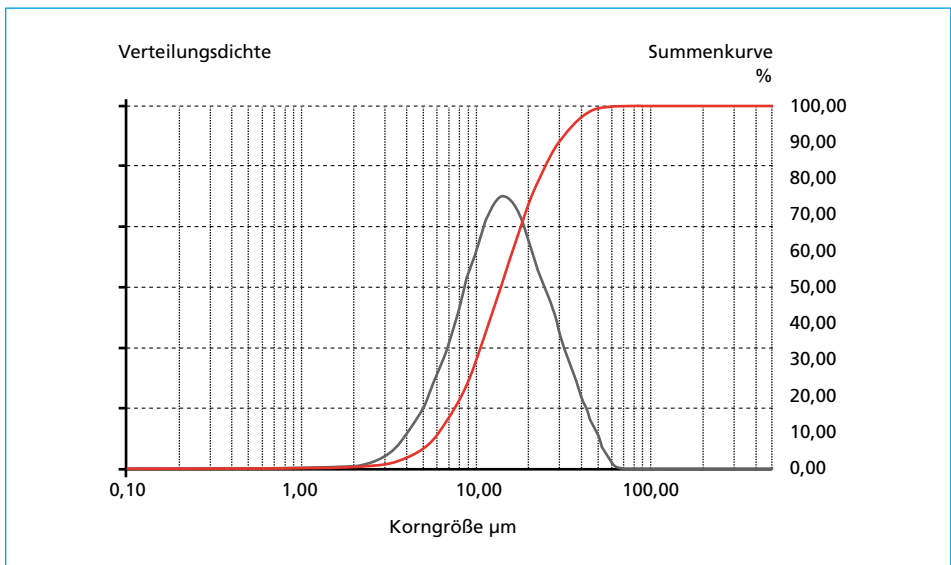


Bild 5: Korngrößenverteilung des aluminiumhaltigen Staubes nach ISO 13320

Schüttdichte	0,11 g/cm ³	
Feuchtegehalt	3,28 % 0,5 %	
Korngrößen- verteilung	d ₁₀	6,09 µm
	d ₅₀	13,82 µm
	d ₉₀	29,93 µm
	Spanne	1,73 (Anm.: Spanne = $\frac{(d_{90} - d_{10})}{d_{50}}$)

Tabelle 3:

Physikalische Eigenschaften des aluminiumhaltigen Staubes

Die nähere Betrachtung des Reststoffs unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) gibt Auskunft über seine Morphologie. In der Aufnahme heben sich die einzelnen feinen, teils länglichen Staubpartikel vor dem schwarzen Hintergrund der Einbettmasse sehr gut hervor. Des Weiteren fand die Bestimmung der Elementzusammensetzung mittels energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) statt. Um einen Überblick von der Verteilung der Elemente zu erhalten, ist im Überlagerungsbild jedem Element eine eigene Farbe zugewiesen. Die zusätzlich durchgeführte Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) verifiziert die chemische Zusammensetzung des Staubes. Die beiden Analysen sind in Tabelle 4 gegenübergestellt.

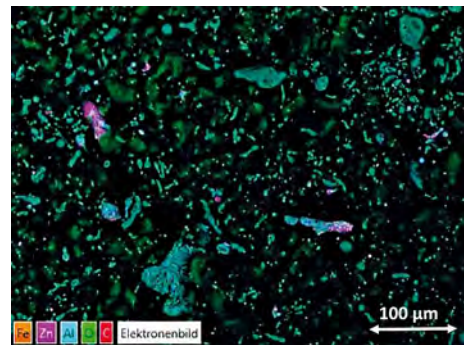
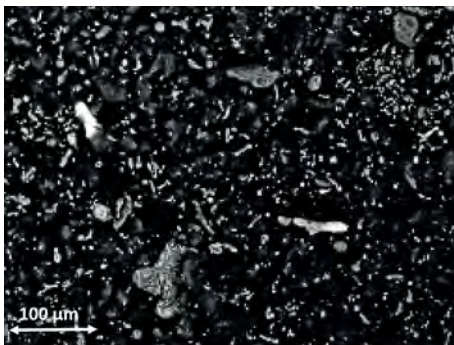


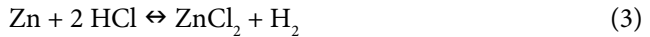
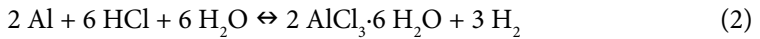
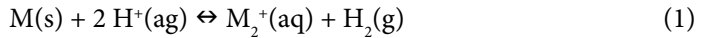
Bild 6: Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Elemente		RFA-Analyse	EDX-Analyse
		Gew.-%	
Aluminium	Al	59,98	61,35
Zink	Zn	1,84	1,55
Eisen	Fe	0,23	0,1
Silizium	Si	0,17	-
Magnesium	Mg	0,08	-
Restliche Elemente	-	0,11	-
Sauerstoff	O ₂	-	36,97

Tabelle 4:

Chemische Zusammensetzung des aluminiumhaltigen Staubes

Weder aus der EDX- noch aus der RFA-Analyse kann eine quantitative Aussage über die vorhandenen chemischen Verbindungen getroffen werden. Die Bestimmung des Gesamtmetallgehaltes der Probe erforderte einen eigenen Versuchsaufbau gemäß Bild 7. Das Messprinzip beruht auf der Freisetzung von Wasserstoff durch die chemische Reaktion des im Reststoff enthaltenen Metalls mit den Wasserstoffionen der Salzsäure nach der folgenden Formel 1. Für Aluminium und Zink sind die Reaktionen in den Formeln 2 und 3 angeführt.



Pro Mol umgesetztes Metall wird dabei eine bestimmte Menge an Wasserstoff freigesetzt (Formel 2 und 3). Der druckdicht ausgeführte Versuchsaufbau besteht aus einem Reaktionsgefäß (a) und einem Tropftrichter (b). Das durch die Reaktion entstandene H_2 -Gas verdrängt das Wasser aus dem Verdrängungsgefäß (c) [8]. Um sicherzustellen, dass die Flüssigkeit nicht aufgrund des sich einstellenden Druckunterschiedes zwischen Auffangbehälter und Verdrängungsgefäß fließt, muss die Höhe der Wassersäule im Verdrängungsgefäß gleich der zu überwindende Höhe in der Überleitung sein (Prinzip der kommunizierenden Gefäße). Über ein Barometer (mit Flüssigkeit gefülltes U-Rohr) ist dieser Druckausgleich zu überprüfen. Im Auffangbehälter wird das verdrängte Wasser gesammelt und nach Beendigung der Messung die Masse bestimmt. Unter Berücksichtigung der Temperatur, des Luftdrucks, sowie der Sättigungsdampfdrücke von H_2O und HCl lässt sich somit das Volumen des entstandenen Wasserstoffgases berechnen. Die H_2 -Menge ist schließlich auf die chemisch umgesetzte Masse des im Reststoff enthaltenen Metalls zu beziehen.

Mit Hilfe dieser Methode konnte ein durchschnittlicher Metallgehalt des Staubs von 42,82 % +/- 1,1 % ermittelt werden.

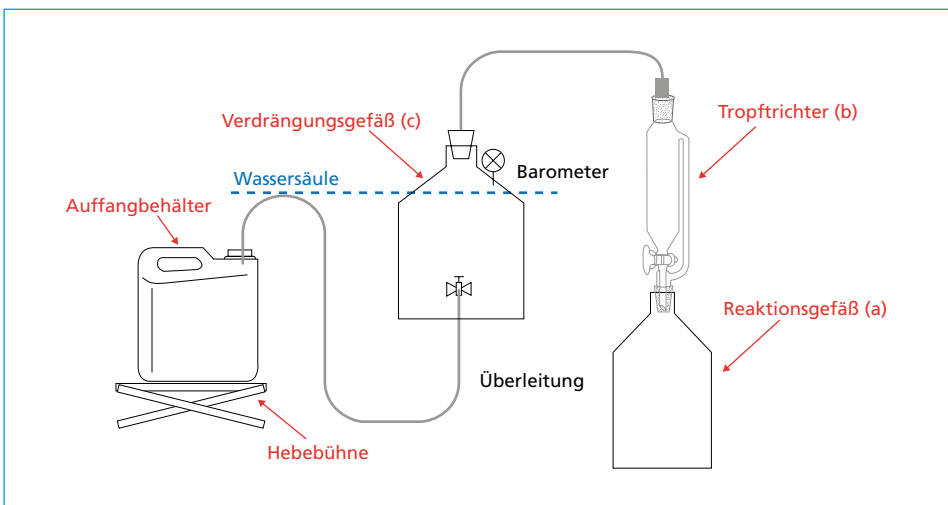


Bild 7: Messaufbau für die Metallgehaltsbestimmung

Nach Abschluss der Charakterisierung hat die Analyse des Einsatzpotenzials eine mögliche Rückführung des Materials in einen Recyclingprozess nach einer vorhergehenden Konditionierung des Reststoffes ergeben.

3.2. Agglomeration

Aufgrund der geringen Korngröße und Schüttdichte ist eine Konditionierung des Materials vor dem Recycling unumgänglich. Durch die Agglomeration mit der Versuchspresse der Firma ATM Recyclingsystems GmbH (Bild 8) ist es möglich, stabile Briketts ohne Zusatz von Bindemitteln herzustellen. Der Reststoff wird von oben über einen Trichter in die zylindrische Presshülse eingebracht. Ein Vor- und Zurückfahren des Pressstempels führt zu einer Vorverdichtung des Einsatzes. Bei industriellen Pressen erfolgt der Materialeintrag und die Förderung und Vorkomprimierung entweder über eine schräg oder seitlich angeordnete ein- oder zweistufigen Vorschubeinrichtung. Die Kraft des Hauptzylinders beträgt 1.400 kN und der Pressdruck liegt bei etwa 300 bar. Beim Austrag wird aufgrund des bewegten Werkzeugschlittens die Presshülse über das entspannte Brikett und den Pressstempel abgezogen und formt dabei auch den zylindrischen Außenbereich des Briketts nach [1] [9]. Die erzeugten Produkte weisen bei einem Gewicht von 0,5 kg einen Durchmesser von sieben Zentimeter und eine Höhe von etwa sechs Zentimeter auf. Die Dichte der Agglomerate beträgt $2,04 \text{ g/cm}^3 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$. Es konnte somit eine Verdichtung um das etwa Zwanzigfache erzielt werden.



Bild 8: Versuchspresse ArnoBrik der Firma ATM Recyclingsystems GmbH



Bild 9: Staubförmiger Produktionsrückstand vor und nach dem Brikettieren

Um die Bindemechanismen und Strukturen im erzeugten Agglomerat einer näheren Betrachtung zu unterziehen, wurden Schiffe eines repräsentativen Briketts angefertigt und im REM begutachtet. Bild 10 zeigt die Bruchkante eines Entspannungsrisses. In der Aufnahme heben sich die hellen Körner der Aluminium-Zink-Legierung sehr gut von den dunkleren Aluminium- und Aluminiumoxidteilchen ab. In der schwarzen Fläche des Risses ist die Einbettmasse erkennbar. Je dunkler die Bereiche desto höher ist der Oxidanteil. In der REM-Aufnahme ist klar ersichtlich, dass durch den Pressvorgang die Einzelpartikel erhalten bleiben und in einer Matrix aus Aluminium und Aluminiumoxid formschlüssig verpresst sind.

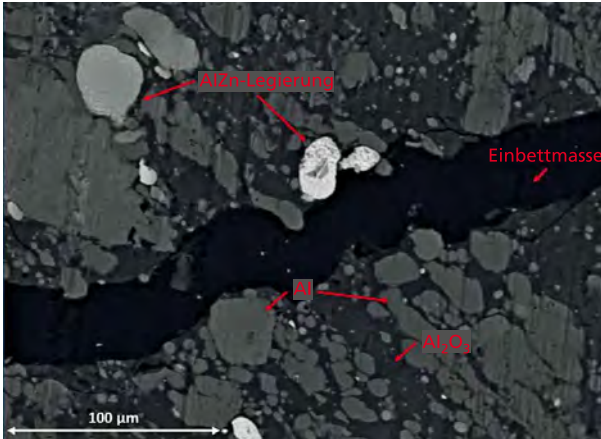


Bild 10:

REM Aufnahme eines Brikettschliffes und Charakterisierung der Phase

3.3. Schmelzmetallurgische Verwertung

Nach einer erfolgreichen Agglomeration liegt der sekundäre Rohstoff aus metallhaltigem Staub in einer chargierfähigen Form für den Einsatz in einem Recyclingprozess vor. Das Einschmelzen der Briketts erfolgt unter Inertgasatmosphäre mit Hilfe von Schmelzsatz im Induktionstiegelofen (ITG) bei einer Temperatur von etwa 850 °C. Das Schmelzsatz setzt sich aus etwa siebzig Prozent Natriumchlorid (NaCl) und etwa dreißig Prozent Kaliumchlorid (KCl) sowie zur Verbesserung des Zusammenfließens des Metalls aus einer geringen Menge an Flussspat (CaF₂) zusammen. Die ersten Experimente zeigten, dass es durch das Chargieren der vorab getrockneten Briketts in das flüssige Schmelzsatz zu einem Zerlegen der Agglomerate aufgrund der raschen Ausdehnung der eingeschlossenen Luft kommt. Die Konstruktion eines speziellen Deckels mit Chargier- und Begasungsöffnung für den Induktionstiegelofen ermöglicht einen gefahrlosen Ofenbetrieb für die weiteren Untersuchungen. Beim Schmelzen der Briketts sorgen die Wirbelströme im Ofen und ein zusätzliches manuelles Rühren für eine gute Durchmischung der Schmelze. Als Herausforderung stellten sich der hohe Oxidanteil und die damit verbundene Erhöhung der Viskosität der Salzschlacke dar. Ein Zusammenfließen der sich bildenden Aluminiumkoagulate im Schmelzsatz zu einem einheitlichen Regulus ist daher schwer zu realisieren. Aus diesem Grund wurde die Salzschlacke aufbereitet, das Metall rückgewonnen und die Schmelzausbeute sowie das Metallausbringen ermittelt. Diese Technologie der Salzschlackenaufbereitung ist Stand der Technik und steht der Aluminiumindustrie im großtechnischen Maßstab zur Verfügung.

Die Massenbilanz der schmelzmetallurgischen Behandlung ist in Bild 11 dargestellt. Die Analyse der Zusammensetzung des erschmolzenen Metalls erfolgte mittels Funkenspektroskopie (Tabelle 5). Der Restmetallgehalts der Salzschlacke mit einer Korngröße (KG) kleiner als ein Millimeter wurde am Messstand zur Metallgehaltsbestimmung ermittelt. Bezogen auf die eingesetzten Briketts fällt die Schmelzausbeute mit neunzehn Prozent eher gering aus. Geht man aber von den Analyseergebnissen und damit von einem Oxi-

danteil des Briketts von 57 Prozent aus, konnte ein Ausbringen des metallischen Anteils von 45 Prozent erzielt werden. Der Restmetallgehalt in der Salzschlacke (KG kleiner als ein Millimeter) ist durch die hohe Viskosität der Salzschlacke aufgrund des großen Oxidanteiles im Brikett zu begründen. Weitere Versuche zur Optimierung der Metallrückführung sind Teil des Forschungsprojektes.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der erschmolzenen Metallegierung

Elemente		Gew.-%
Aluminium	Al	91,00
Zink	Zn	7,14
Eisen	Fe	1,52
Silizium	Si	0,12
Restliche Metalle		0,027

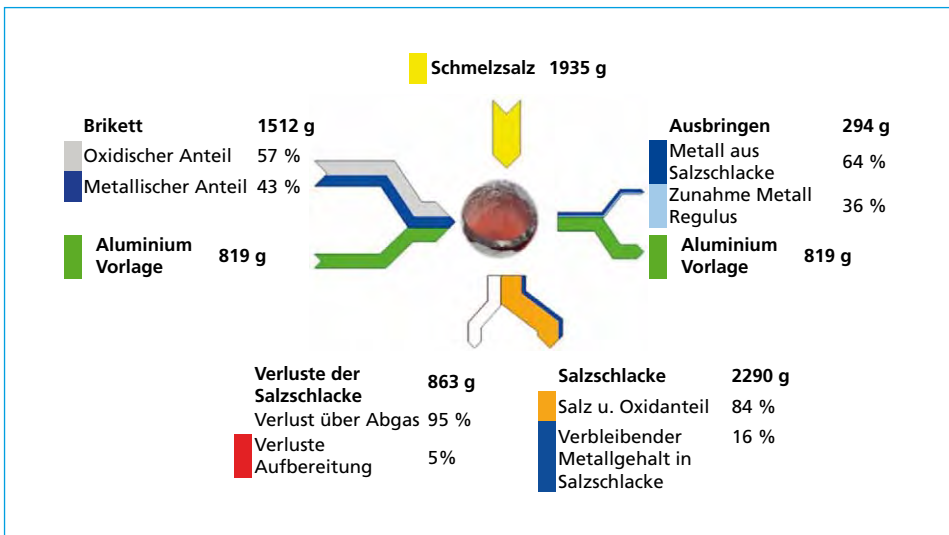


Bild 11: Massenbilanz eines repräsentativen Schmelzversuchs

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Recycling von Produktionsrückständen für sortenreine und saubere Schrotte ist Stand der Technik. Verunreinigte Reststoffe, Schlämme und Stäube werden jedoch meist einer einfachen Deponierung zugeführt, wobei die enthaltenen Wertmetalle verloren gehen. Die Einteilung der metallhaltigen Reststoffe erfolgt nach dem Europäischen Abfallkatalog bzw. in Österreich nach der Abfallschlüsselnummer gemäß ÖNORM S 2.100. Da beide Einteilungen kaum Auskunft über die vorhandenen Metalle, den physikalischen Eigenschaften oder den zu erwartenden Verunreinigungen geben, stellt eine umfangreiche Charakterisierung die Basis jedes erfolgreichen Recyclingprozesses dar. Da die Korngröße und die Schüttdichte der Reststoffe einen direkten Einfluss auf die Chargierfähigkeit in den Ofenraum und auf das Metallausbringen ausüben, ist eine Agglomeration in vielen Fällen unumgänglich. Schwerpunkt in diesem Forschungsprojekt

ist das Verpressen von metallhaltige Produktionsabfälle mittels Stempelpressen. Durch das Zusammenwirken von spröden und verformbaren Teilchen entsteht eine stark strukturelle und formschlüssige Bindung im Agglomerat.

Staubförmige Reststoffe führen in produzierenden Betrieben meist zu erhöhten Aufwendungen und müssen entsorgt werden. Durch die Agglomeration mit der Versuchspresse der Firma ATM Recycling Systems GmbH ist es möglich, aus 0,5 kg aluminiumhaltigen Feinststaub ($d_{90} = 29,93 \mu\text{m}$) stabile Briketts mit einem Durchmesser von 7 cm und einer Höhe von etwa 6 cm herzustellen. Dies erlaubt eine Verdichtung des Staubes um das etwa 20-fache. Die chemische Analyse zeigt, dass der Reststoff aus Aluminium mit Verunreinigungen aus Zink und Eisen besteht. Kritisch ist zu betrachten, dass der metallische Anteil im Reststoff mit 43 Prozent eher gering ist. Aus dem Ergebnis der Schmelzversuche ist abzuleiten, dass obwohl dieser Einsatzstoff an der unteren Grenze der prozesstechnisch eingesetzten Sekundärstoffe bezogen auf den Metallgehalt liegt (vergleichbar mit Krätze), eine Metallrückgewinnung im Labormaßstab möglich ist. Als Herausforderung stellte sich der hohe Oxidanteil und die damit verbundene Erhöhung der Viskosität der Salzschlacke dar. Das Aluminium (Schlackengröße) im Schmelzsatz wurde rückgewonnen und der verbleibende Restmetallgehalt in der Korngröße kleiner als ein Millimeter gasvolumetrisch bestimmt. Die Schmelzausbeute, bezogen auf die Gesamtmasse des Briketts fällt, mit neunzehn Prozent eher gering aus. Unter Berücksichtigung des hohen Oxidgehalts im Reststoff, kann jedoch ein Ausbringen des metallischen Anteils von 45 Prozent ermittelt werden.

Die Identifizierung und Charakterisierung weiterer Reststoffe sowie die Agglomeration, als Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Recycling, steht im Fokus des weiteren Projektverlaufes. Computergestützte Modellierungen und thermodynamische Berechnungen unterstützen die pyrometallurgischen Untersuchungen. Die Ergebnisse der Schmelzversuche im Labormaßstab werden im Großversuch validiert bzw. reproduziert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) für die finanzielle Unterstützung.

5. Quellen

- [1] ATM Recyclingsystems. Online im WWW unter URL: <http://www.atm-recyclingsystems.com/home.html>. Stand 12.1.2014.
- [2] Basemap: Online um WWW unter www.basemap.at. Stand 16.01.2015.
- [3] Gock, E.; Vogt, V.; Sittard, M.; et al.: Verwertung von eisenreichen Filterstäuben der Stahlindustrie durch Pelletierung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.
- [4] Heinze, G.: Handbuch der Agglomerationstechnik. Wiley-VCH Weinheim, 2000.

- [5] Kommission der europäischen Gemeinschaft: Entscheidung der Kommission vom 3. Mai 2000 zur Ersetzung der Entscheidung 94/3/EG über ein Abfallverzeichnis. In: Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L226/1 vom 06.09.2000.
- [6] ÖNORM S 2100: 2005 10 01: Abfallverzeichnis
- [7] Pietsch, W.: Agglomeration Processes, Phenomena, Technologies, Equipment. Wiley-VCH Weinheim, 2002.
- [8] Prillhofer, R., B. Prillhofer und H. Antrekowitsch: Verwertung von Reststoffen beim Aluminium-Recycling, BHM, 153, (2008), S. 103-108
- [9] Schmid, A.; Flachberger, H.; Duspiva, F.: Stand der Technik bei der Brikettierung von metallischen Spänen aus der Metallverarbeitung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011.
- [10] Schubert, H.: Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1, Wiley-VCH Weinheim, 2003.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 8

ISBN 978-3-944310-20-6 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 2015
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, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,
Max Müller, Cordula Müller
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, 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.