

Recycling von Abfällen aus der Magnesiumproduktion

Teil I: Späne aus der mechanischen Bearbeitung

Friedrich, B., (1); Marpert, M., (2); Niederle, A., (1); Weck, M., (2)

Die sichere und umweltverträgliche Herstellung von Gütern wird mehr und mehr zum Kennzeichen einer modernen Produktionstechnik. Darin eingeschlossen ist die direkte Mitentwicklung von Recyclingprozessen für die bei der Fertigung entstehenden Güter und Produktionsschrotte. Dies gilt insbesondere für die zunehmende Produktion und spanende Bearbeitung von Bauteilen aus Magnesium und seinen Legierungen.

Bild 1 zeigt den Lebenszyklus technischen Magnesiums, der durch zwei Kreisläufe sekundären Materials gekennzeichnet ist. Mit wachsenden Herstellungsmengen von Magnesiumprodukten werden diese Kreisläufe im Vergleich zur Primärproduktion an Bedeutung gewinnen. Die in dieser Beitragsreihe im Vordergrund stehenden Produktionsschrotte fallen vorwiegend im Bereich Gießerei und bei der mechanischen Bearbeitung an. Entstehende Späne werden bislang meist deponiert, insbesondere wenn sie mit Kühlschmierstoff kontaminiert sind. Zuweilen kommen verhältnismäßig aufwändige chemisch/thermische Entölungungsverfahren zum Einsatz, um eine Verwer-

tung zu ermöglichen. Beim Gießen und Entgraten der Bauteile entstehender Rücklauf kann weitgehend wiederverwertet werden, anfallende Krätze und Schlamm müssen jedoch deponiert werden [8; 9]. Diesen

Stoffen wird sich ein zweiter Beitrag widmen.

Gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz muss primär die Herstellung von Abfällen, die nicht recycelt werden können, vermieden werden. Hinsichtlich dieser Zielsetzung ergänzen sich die Arbeiten des Instituts für Metallurgische Prozesstechnik (IME) und des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen. Magnesiumspäne stellen nicht nur ein Entsorgungsproblem dar, sondern sind auch problematisch für den Brandschutz. Neben einer sicheren und optimierten spanenden Bearbeitung, Abführung der brand- und explosionsgefährlichen Mg-Späne aus der Werkzeugmaschine und Herstellung sicherer, transportierbarer

und lagerfähiger Mg-Briketts werden parallel die Recyclingeigenschaften der entstandenen Späne und Briketts untersucht und optimiert. Die Aufarbeitung der anfallenden Magnesiumschrotte stellt daher sowohl eine ökologische Notwendigkeit, ein ökonomisches Potential als auch eine metallurgische Herausforderung dar [12].

Produktionstechnik – sicher und umweltfreundlich

Der Gesamtenergieeintrag zur Erzeugung von 1 kg Primär-Magnesium beträgt 30–35 kWh, während für die Produktion von Sekundärmagnesium lediglich etwa ein Zehntel dieser Energie aufgewendet werden muss. Der wachsenden Menge an Rücklaufschrott und Spänen kommt daher eine umweltrelevante Bedeutung als wertvoller Sekundärrohstoff zur Ressourcenschonung zu [8; 9; 10; 11]. Zusätzlich fordert der Gesetzgeber die Vermeidung von Abfällen. Eine Verwertung für den ursprünglichen Zweck muss bevorzugt angestrebt werden (Closed Loop Recycling). Eine sortenreine Erfassung oder gegebenenfalls eine Aufarbeitung durch stoffspezifische Trennung der Abfälle ist daher wichtig [7; 8]. So ergibt sich im Idealfall ein geschlossener Materialkreislauf. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit für eine Verwertung gilt als gegeben, wenn die Kosten für eine technisch realisierbare Lösung nicht außer Verhältnis zu den Kosten für eine Beseitigung stehen [1]. Entwicklungsbedarf existiert hier besonders bei Reststoffen in Form von Spänen, Krätze und Schlamm, da Möglichkeiten zur industriellen Aufbereitung kaum bestehen. Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die verbreitete Druckgusslegierung AZ91 HP.

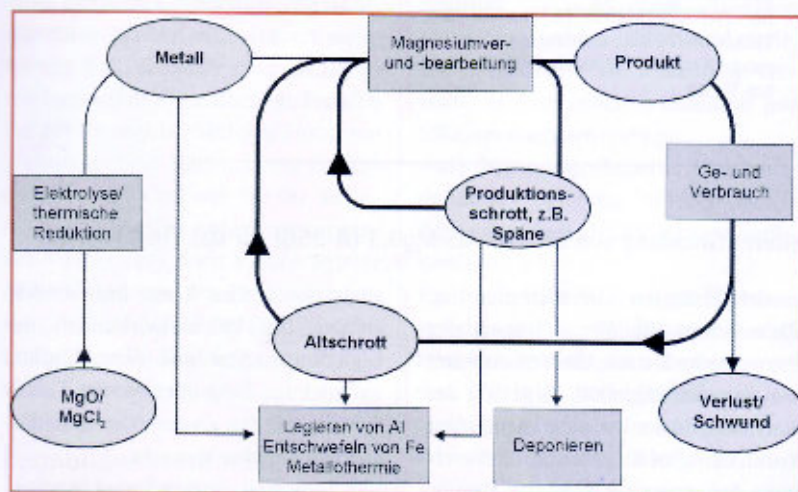


Bild 1: Lebenszyklus des Magnesiums

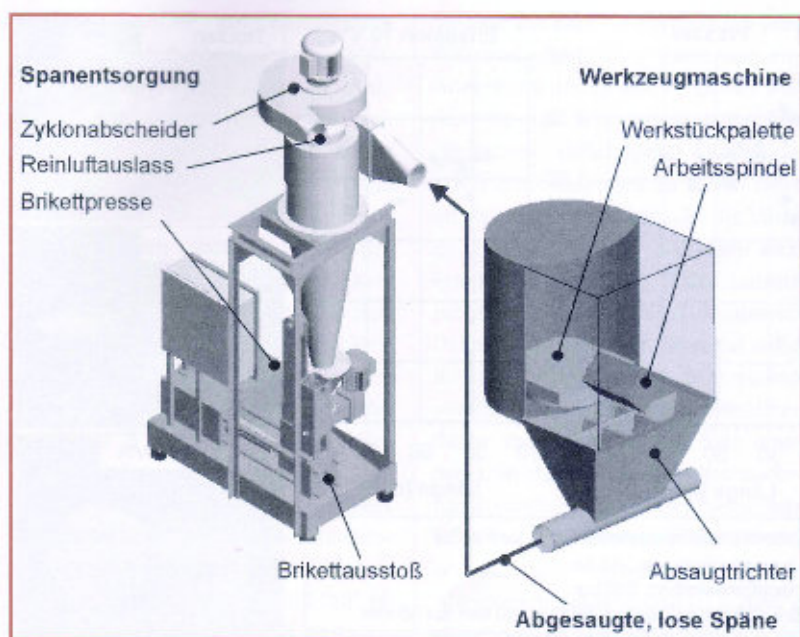


Bild 2: Absaug- und Brikettiereinrichtung

Wohin mit den Magnesiumspänen?

Leicht entzündliche, feine Magnesiumspäne fallen als Produktionschrott z. B. bei der Bearbeitung von Gussbauteilen an und bergen als Gefahrstoff ein Brand- und Explosionsrisiko. Der Arbeitgeber ist gehalten, dieses Risiko durch eine Gefährdungsbeurteilung zu ermitteln und die Beschäftigten durch Bereitstellung entsprechender Arbeitsmittel zu schützen [2; 3]. Das WZL beschäftigt sich daher mit der sicherheitstechnischen Konzeption und Untersuchung von Werkzeugmaschinen für die Magnesiumbearbeitung [4].

Eine pneumatische Förderung von Spänen aus der Werkzeugmaschine erlaubt das in Bild 2 gezeigte Absaug- und Brikettiersystem des WZL. Aus einem für den Spanfall günstigen Arbeitsraum werden gemeinsam Späne und Stäube über Absaugtrichter erfasst und entfernt. Auf diese Weise ermöglicht das Spanentsorgungskonzept auch die Integration von Werkzeugen mit Spanabsaugung, sofern Werkstückgeometrie und Bearbeitungsaufgabe deren Einsatz erlauben. Vergleicht man die Absauggeschwindigkeit von mindestens 20 m/s mit der bei Kratzförde-

ren möglichen Fördergeschwindigkeit von ca. 12 m/min, so ist die Verweildauer und damit die Wärmeabgabe der Späne an die Maschine bei pneumatischer Förderung deutlich kleiner. Bei Förderung quer zur Längsachse eines Bearbeitungszentrums und nicht längs durch dieses hindurch müssen die Späne zudem nur einen kurzen Weg in der Maschine zurücklegen, wodurch die thermische Beeinflussung der Maschinenstruktur nochmals reduziert werden kann.

Durch das kontinuierliche Brikettieren von Staub und Spänen nach deren Abscheidung im Zyklon wird die Menge entzündlichen Materials auf ein Minimum begrenzt. Messun-

gen durch eine akkreditierte Stelle zeigen, dass auch bei sehr feinen Spanquerschnitten der Reststaubgehalt der Luft nach Passieren des Abscheiders deutlich unter dem Grenzwert gemäß Technischer Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002 für Gesamtstaub von 20 mg/m^3 liegt. Die Presse wirkt als Austragsschleuse und entlässt die Späne als kompakte Briketts aus der Absauganlage, vgl. links in Bild 3. Das günstige Verhalten der Briketts bezüglich Entzündung und Brand ist mit den Eigenschaften massiver Magnesiumbauteile vergleichbar. Wie die elektronenmikroskopische Vergrößerung rechts in Bild 3 zeigt, brechen die Späne trotz der geringen Umformbarkeit des Magnesiums bei Raumtemperatur durch die Belastung des Pressvorgangs nicht.

Trockene Späne setzen der Presskraft einen vergleichsweise hohen Reibwiderstand entgegen. Bei feuchten Spänen werden somit tendenziell höhere Dichten erreicht, wie Bild 4 zeigt. Mit zunehmender Länge des Briketts steht der Kraft des Presskolbens eine wachsende Reibung zwischen den Zylindermantelflächen von Brikett und Pressform entgegen, so dass die effektive Presskraft und daher die erzielte Dichte sinkt. Erreicht wurde eine Dichte um 83% der Dichte massiven Magnesiummaterials. Während Wasser aufgrund seiner geringen Viskosität durch Brikettieren sehr gut von den Spänen zu trennen ist, verbleibt bei der Brikettierung von emulsionsfeuchten Spänen ein Gemisch aus Konzentrat und feinstem Abrieb



Bild 3: Briketts aus trockenen Magnesiumspänen

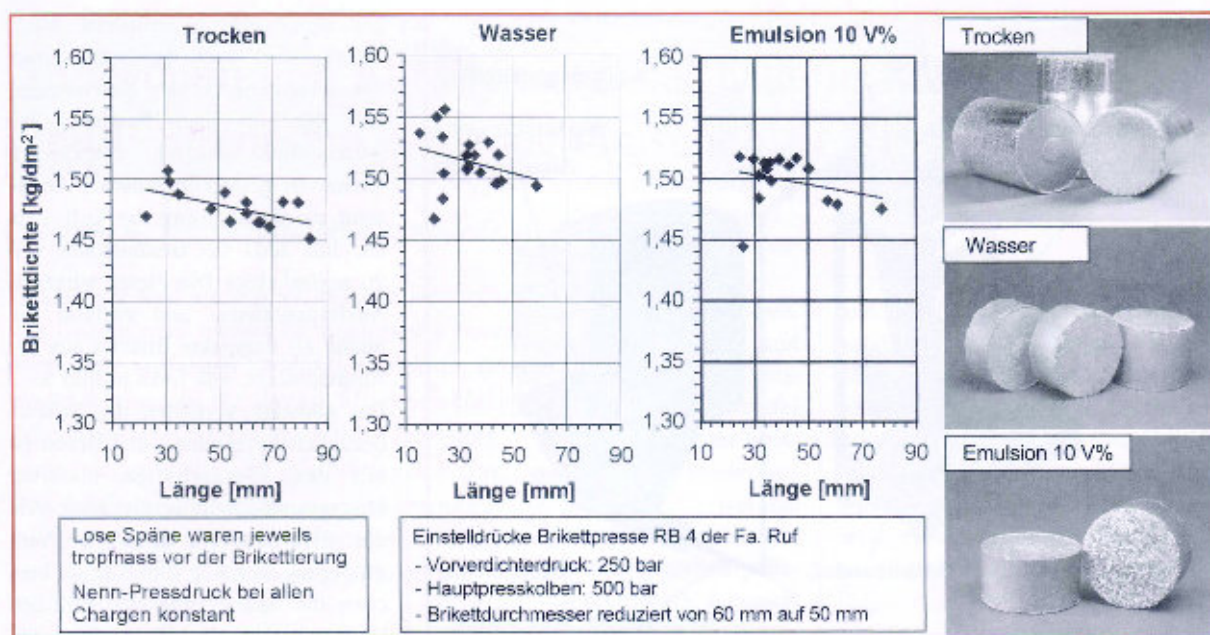


Bild 4: Dichte von Briketts bei unterschiedlichen Bearbeitungsflüssigkeiten

als schmieriger, dunkelgrauer Film auf dem Brikett.

Bei der trockenen Zerspaltung entstehen verhältnismäßig hohe Temperaturen an der Werkzeugschneide, die die Oxidation des Spanmaterials fördern. Wie Bild 5 für Bohrspäne zeigt, bewegt sich der Magnesiumoxidanteil der frisch erzeugten, trockenen Bohrspäne jedoch deutlich unter einem Massenprozent. Die mit wachsender Schnittgeschwindigkeit höhere Temperatur und die mit abnehmendem Umdrehungsvorschub (mm/U) vergrößerte spezifische Oberfläche der Späne fördern tendenziell die Oxidationsneigung.

Sobald der Presskolben die komprimierten Späne entlastet, kommt es bereits in der Pressform zu einer Rückfederung des elastischen Verformungsanteils des Briketts. Auf diese Weise erhöht sich die Porosität im Brikett. Die im Brikett eingeschlossene Luft wird in die Schmelze eingeschleppt und kann durch Reaktion mit dem Metall die Ausbeute mindern. Eine Abschätzung der Bildung von Magnesiumoxid unter der Annahme, es werde reines Magnesium eingeschmolzen, zeigt jedoch, dass nur ein geringer Anteil an Magnesium durch den eingeschleppten Sauerstoff oxidiert werden kann. So enthält 1 kg Briketts mit einer Dichte von

1,3 kg/dm³ ein Sauerstoffvolumen von 45 cm³. Unter Standardbedingungen entspricht dieses Volumen $1,8 \cdot 10^{-3}$ mol Sauerstoff. Diese Menge kann die Oxidation von $3,6 \cdot 10^{-3}$ mol oder 0,15 g Magnesium bewirken. Der mögliche Materialverlust durch Bildung von Magnesiumoxid aufgrund

der eingeschleppten Luft ist mit 0,015% also vernachlässigbar gering.

Rückführung in den Magnesiumkreislauf

Vor Aufnahme der hier beschriebenen Einschmelzversuche wurden am IME

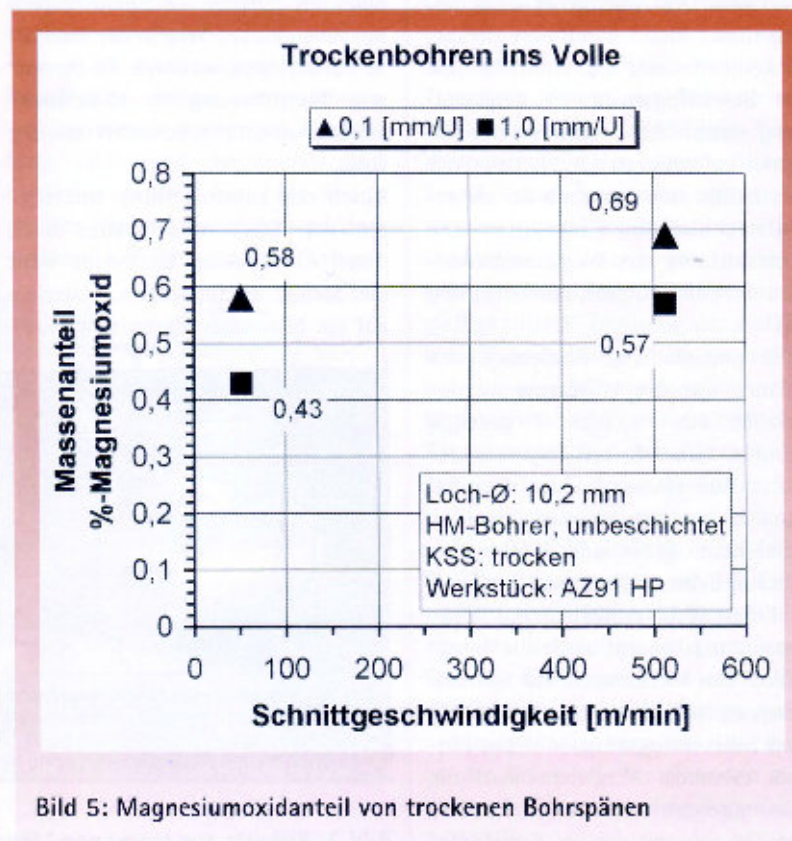


Bild 5: Magnesiumoxidanteil von trockenen Bohrspänen

Referenzversuche mit kompakten, reinen Mg-Scheiben durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, welche Ausbeuten bei Verwendung von reinen, kompakten Einsatzstoffen mit einem industriellen Schmelzsatz in einem Gaswindofen mit einem 5 l Tiegel erreicht werden können. Als Schmelzsatz wird Flux 12 der Firma Rheinkalk HDW verwendet, ein körniger bis pulverförmiger Vorstoff mit Korngrößen bis 5 mm, der in vorhergehenden Untersuchungen als bestes Schmelzsatz von 5 getesteten industriellen Schmelzsätzen bewertet wurde [5]. Auf Carnallit basierend, besteht Flux 12 größtenteils aus Magnesiumchlorid, zudem aus den Chloriden von Natrium und Kalium. Die Zahl "12" im Namen steht für den Gehalt an Calciumfluorid. Das Salz hat nach Herstellerangaben einen Schmelzpunkt von 424 °C und eine Dichte von 2,28 g/cm³.

Die eingesetzte Salzmenge variiert zwischen 20 und 50% bezogen auf die Metalleinwaage. Die Salzmenge ist hoch im Vergleich zu industriellen Recyclingprozessen mit reinen, massiven Schrotten, bei denen nur 3 bis 5% verwendet werden. Eine maximale Metallausbeute von 95% bezogen auf die Masse des ursprünglich eingesetzten Materials lässt sich so erreichen. Die Metallausbeute wird nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Ausbeute (\%)} = \frac{\text{Abgegossenes Metall [g]}}{\text{Chargiertes Metall [g]}} \cdot 100$$

Die besten Ergebnisse erzielten die Versuche, bei denen im Tiegel eine

Vorlage aus Flux 12 erschmolzen wird. Während dieser Zeit kann auf eine Abdeckung des Tiegels verzichtet werden. Da das Schmelzsatz beim Aufschmelzen aufschäumt, können zu große Einsatzmengen zu einem Überquellen im Tiegel führen. Ist die Vorlage eingeschmolzen, wird ab einer Temperatur von 660 °C das Einsatzmaterial in den Tiegel eingesetzt. Dabei wird das feste Material möglichst direkt unter die Schmelzbadoberfläche gebracht und die Oberfläche der Schmelze mit Salz abgedeckt. Ist ein vollständiges Eintauchen nicht möglich, da der Schmelzspiegel zu gering ist, wird das aus der Schmelze stehende Material mit einem Abkrätzer hinuntergedrückt, sobald es ausreichend aufgeschmolzen ist. Durch das Chargieren kann es zum Aufreißen der schützenden Oxidhaut der Schmelze und dadurch zum Glimmen oder Brennen der Badoberfläche kommen. Dies kann durch Zugabe kleiner Mengen Schmelzsatz (10 bis 30 g) unterbunden werden. Die Temperatur der Schmelze wird während der Versuche bei 660 °C gehalten, wobei es jedoch durch Zuschargieren kalten Materials zu Temperaturschwankungen kommt. Mit den Parametern der Referenzversuche wurden Schmelzversuche mit variierenden Einsatzstoffen wie losen Spänen, ölhaltigen und trockenen Briketts durchgeführt.

Bei Einschmelzversuchen mit losen, trockenen Spänen ergibt sich mit ca. 90% aus metallurgischer Sicht eine akzeptable Ausbeute, die jedoch im

industriellen Maßstab zurzeit schwer umsetzbar ist. Lose Späne lassen sich gut umschmelzen, wenn sie in eine Vorlage aus Schmelzsatz chargiert werden. Nachteilig beim Chargieren ist jedoch das große Volumen-Masse-Verhältnis des Materials, da die Schüttdichte loser Späne je nach Spanform lediglich 0,03 kg/dm³, bzw. 0,1 kg/dm³ nach Kompaktierung von Hand, betragen kann. Durch die längere Chargierdauer wird die Schutzgasatmosphäre stärker gestört und mehr Wärmeenergie geht durch die Ofenöffnung verloren. Die am WZL brikettierten, trockenen Späne erreichen eine Dichte um 1,5 kg/dm³ und zeigen somit gegenüber losen Spänen einen deutlichen Vorteil [7].

Das Einschmelzverhalten ölhaltiger Briketts ist in Bezug auf Ausbeute, Handling und Emissionen im Vergleich zu sauberen, kompakten Schrotten und Briketts aus trockenen Spänen deutlich schlechter. Die untersuchten öligen Briketts zeigen im Mittel 10 Mass.-% Öl und eine Dichte von 1,3 kg/dm³. Es handelt sich um Briketts mit 60 mm Durchmesser. Im Bild 6 ist links die Anfangsphase eines Einschmelzversuchs ölhaltiger Mg-Briketts zu sehen.

Die Flamme des abbrennenden Öls ist deutlich zu erkennen. Hierdurch entstehen Luftbewegungen, die die Argon-Schutzgasatmosphäre über der Schmelze stören und den Sauerstoffeintritt erleichtern. Rechts ist der Tiegel 15 Minuten später - nach dem Abbrand des Öls - zu sehen. Die Schmelzbadoberfläche ist mit oxidischen Verunreinigungen angereichert, die vom Abdecksatz aufgenommen werden. Der Großteil des verunreinigten Salzes sinkt als Schlamm zu Boden, der Rest schwimmt auf der Schmelze. Die Schutzwirkung des Salzes zur Verminderung der Oxidation wird durch die Aufnahme von Verunreinigungen stark vermindert. Es kommt zu kleineren lokalen Brandherden. Die verstärkte Oxidation mindert die Metallausbeute auf maximal 85%. Ebenfalls nachteilig gegenüber trockenen Spänen ist der größere Anteil an zu deponierenden Reststoffen wie Krätze und Schlamm [6]. Ein von der Schmelze ölhaltiger Briketts abgegos-



Bild 6: Einschmelzen von ölhaltigen Mg-Briketts [5]

sener Regulus ist in Bild 7 im Querschnitt zu sehen.

Versuche mit Briketts aus der Trockenbearbeitung bieten ein vergleichsweise besseres Einschmelzverhalten und aufgrund des flammenlosen Aufschmelzens ein einfaches Handling. Es lässt sich eine saubere Phasentrennung und geringe Entzündungsneigung selbst bei Überhitzung

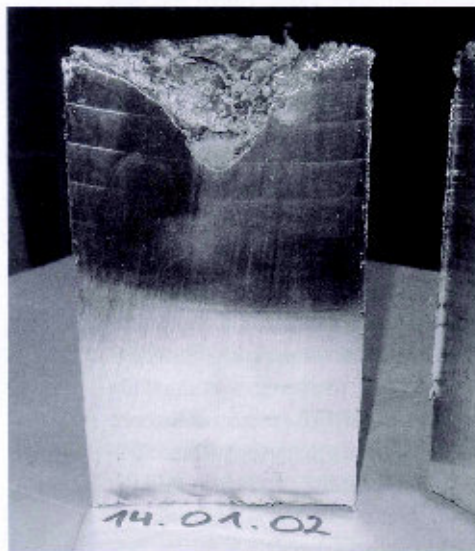


Bild 7: Magnesium-Ingots aus recycelten ölhaltigen Briketts [5]

auf ca. 760 °C feststellen. Die Metallausbeute liegt mit ca. 90 Mass.-% deutlich höher als bei Versuchen mit ölhaltigen Spänen unter sonst gleichen Bedingungen. Die Ausbeute lässt sich weiter steigern, falls man bereits einmal eingesetztes Schmelzsalz, das aus einer Kombination von Salz und Schlamm besteht, verwendet. Aufgrund der erstmaligen Verwendung ist der Schlamm bereits mit metallischem Magnesium angereichert. Die Höhe der Anreicherung im Schlamm ist abhängig von der Art der zuvor eingeschmolzenen Reststoffe. Tabelle 1 gibt die nicht oxidischen und oxidischen Anteile der Legierungsmetalle im Schlamm wieder. Demnach führt das Aufschmelzen von Spänen zu einer deutlichen Anreicherung metallischen Magnesiums im Schlamm. Verunreinigungen durch Restöl in den Briketts wirken sich ebenfalls nachteilig auf die Phasentrennung aus und binden zusätzliches Magnesium im Schlamm. Das im

Schlamm aus Einschmelzversuchen mit:	[Massen-%]				
	Mg _{non ox.}	Mg _{ox.}	Al _{non ox.}	Al _{ox.}	Zn _{non ox.}
Massiven Masselabschnitten	7,4	4,1	0,5	0,1	0,0
Briketts aus trockenen Spänen	36,1	7,0	2,7	0,3	0,2
Lösen Spänen	38,0	3,2	0,2	0,1	0,0
Briketts aus öligen Spänen	48,2	3,5	4,7	0,4	0,4

Tabelle 1: Chemische Analysen von Schlamm nach dem Umschmelzen verschiedener Metallträger

Schlamm gebundene Magnesium ist zunächst für den Recycling-Prozess verloren.

Durch den Einsatz des Schlammes als teilgesättigtes Schmelzsalz konnte die Ausbeute auf 94% erhöht werden. Bezieht man das gewonnene Metallgewicht auf die Gesamteinwaage an metallischem Magnesium (Magnesiumgehalt von Schlamm und Briketts) so liegt die Ausbeute bei 92%. Als weitere Vorteile sind der reduzierte Schmelzsalzeinsatz und die Wiederverwendung von Reststoffen zu nennen.

Einschmelzversuche mit Briketts aus der Zerspanung mit wassermischbaren Kühlschmierstoffen zeigen, dass bei entsprechend hohem Pressdruck ein geringer Anteil von 3 Mass.-% Wasser im Brikett verbleibt. Vorteilhaft macht sich die geringe Viskosität des Wassers gegenüber Ölen bemerkbar. Solche nicht weiter getrockneten Briketts konnten aufgeschmolzen bzw. der Schmelze zueingegossen werden. Frei werdender Wasserstoff brennt gleichmäßig ab. Briketts aus Spänen mit zehnprozentiger Emulsion zeigen neben einer abbrennenden Wasserstoffflamme Rußbildung durch die verbrennenden Kohlenwasserstoffe. Aufgrund des nur 5-10 prozentigen öligen Konzentratsanteils in wassergemischten Kühlschmierstoffen ist das Abbrandverhalten einfacher zu beherrschen als bei Briketts mit nicht wassergemischtem Kühlschmierstoff. Es ist stets zu beachten, dass beim unkontrollierten Kontakt von Wasser mit brennendem Magnesium sehr heftige Verbrennungsreaktionen möglich sind. Nach vierwöchiger Lagerung bei Raumtemperatur war bei Briketts aus

vormals tropfenden, wassernassen Spänen nur noch ein Wassergehalt von 0,15 Massen-% feststellbar. Durch Trocknung während der Lagerung oder thermische Trocknung durch das Nutzen von Prozessabwärme lässt sich der Recyclingprozess demnach weiter optimieren.

Um beim Einschmelzen die Versuchsparameter den Schmelzparametern der Industrie zu nähern und den Schmelzprozess sicher und reproduzierbar optimieren zu können, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma ThermoStar, Aachen, ein widerstandsbeheizter Magnesiumofen entwickelt und am IME in Betrieb genommen. Der neu entwickelte Magnesiumofen ermöglicht ein Scale-Up der Versuche auf einen 35 Liter Maßstab, eine definierte Temperaturführung, den Schutz gegen Atmosphären-Sauerstoff durch gezielte Schutzgasung der Badoberfläche und ein vereinfachtes und sicheres Handling während des Abgusses.

Zum Standard des Ofens gehört eine Widerstandsheizung aus SiC-Stäben in Kombination mit einer rechnergestützten Prozessführung. Der hydraulische Kippantrieb des Tiegels kann stufenlos betätigt werden. Das Ende des Abgusskanals liegt in der Drehachse, um die der Ofen gekippt wird. Für Sicherheitsuntersuchungen kann der Fe-Tiegel einfach demontiert werden. Ein Austausch des Fe-Tiegels gegen einen keramischen Tiegel ist möglich. Eine Darstellung des Ofens ist in Bild 8 zu sehen.

Speziell für den Magnesiumbetrieb wurde ein Sicherheitspaket entworfen, dessen Merkmale in Tabelle 2 aufgeführt sind.

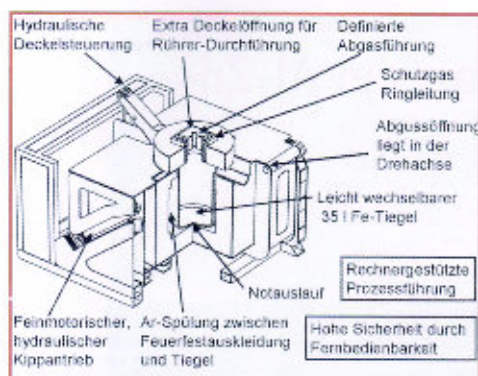


Bild 8: Widerstandsbeheizter Magnesiumofen (Fa. Thermostar/IME)

Wirtschaftlich interessantes Einsparpotential

Ein beträchtliches Aufkommen an Magnesiumspänen zeichnet sich im Bereich der Automobilindustrie ab. Steigende Ansprüche an Sicherheit und Komfort sowie die Notwendigkeit, Emissionen und Treibstoffverbrauch zu senken, erfordern eine gewichtsoptimierte Konstruktion der Fahrzeuge. Dies führt zum verstärkten Einsatz von Leichtmetallen, um deren Potential zur Gewichtsreduktion zu nutzen. Eine Erhöhung des Magnesiumeinsatzes bedeutet jedoch auch den parallelen Anstieg der Produktionsschrottmenge. Die über ein Jahr in der automobilen Serienproduktion entstehende Menge an Spänen lässt sich z.B. für Geriebehäuser abschätzen. Bei deren spanender Bearbeitung können 300 g Späne pro Gehäuse anfallen. Bei Produktionszahlen von 300.000 Stück pro Jahr und Gehäusevariante summiert sich die Spanmenge bereits zu einer Wertstoffmasse von 90 t Magnesiumlegierung. Zuweilen

befinden sich Gießerei und spanende Bearbeitung günstig in unmittelbarer Nähe auf dem Betriebsgelände. Bei einer Rückgewinnungsquote von 92% ergeben sich allein in diesem Fall sekundär nutzbare 83 t Magnesiumlegierung oder bei einem langfristig zu erwartenden Preisniveau von 1,5 EUR/kg ein Materialwert von 125.000 EUR/a allein für diesen Anwendungsfall. Dem Materialwert sind die unternehmensspezifischen Kosten für das Recycling entgegen zu setzen. Durch die Entwicklung attraktiver Recyclingkonzepte für unterschiedliche, branchenspezifische Abfallmengen können Materialkreisläufe nicht nur aus rechtlicher, sondern auch aus finanzieller Sicht etabliert werden.

Fazit und Ausblick

Mit wachsendem Aufkommen von Magnesiumspänen wird deren großtechnische Wiederverwertung zur Abfallvermeidung und Sekundärmaterialnutzung attraktiv, so dass der Bedarf an wirtschaftlichen Verwertungsalternativen wachsen wird. Die interdisziplinäre Kooperation zwischen IME und WZL der RWTH Aachen zeigt, dass ein Brikettieren von Magnesiumspänen sowohl die Brandgefahr bei Transport und Lagerung mindert, als auch einen Wertstoffkreislauf ohne Einschränkung der Materialnutzung unterstützt. Durch die von Beginn an im Verbund entwickelte Produktions- und Recyclingtechnik lassen sich Inkompatibilitäten vermeiden, sowie Abfallvermeidung und Wiederverwertung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes umsetzen. Weitgehend kann auf eine eingeführte

Technik aufgebaut werden, die es zu optimieren gilt. Die Art der Kontamination mit Kühlschmierstoff beeinflusst die Ausbeute an Metall, so dass insbesondere brikettierte Späne aus der Trocken- respektive Minimalmengenbearbeitung sehr gut wiederzuverwerten sind und zu über 90% zurückgewonnen werden können. Sicherheitstechnisch sinnvolle Vorkehrungen und optimiertes Recycling ergänzen sich bei Spänen aus der Trockenbearbeitung optimal.

Literatur

- [1] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27. September 1994; BGBl I 1994, 2705; zuletzt geändert durch Art. 69 G v. 21. 8.2002 I 3322
- [2] Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV); 27. September 2002; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 70; ausgegeben in Bonn am 2. Oktober 2002
- [3] BG-Regeln "Umgang mit Magnesium" (BGR 204); Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften - Fachausschuss "Eisen und Metall III" der BGZ; Carl Heymanns Verlag KG, Köln; April 1999
- [4] Weck, M.; Marpert, M.; Behrens, P.; Wasserstoffbildung bei der Magnesiumbearbeitung; VDI-Z. 144 Nr. 5; Mai 2002
- [5] Niederle, A.; Friedrich, B.; Recycling Of Magnesium Production-Scrap With High Contamination, Impurity And Oxidation Level; GDMB Congress M'; 29.05.2002 - 01.06.2002, Vienna
- [6] Jüchter, A.; Entwicklung einer Versuchsanlage zum Recycling von Magnesium; Diplomarbeit am IME, RWTH-Aachen, 2002
- [7] Hübner, G.; Entwicklung eines Recycling-Prozesses für niedrig metallisierte und feinteilige Mg-Reststoffe; Diplomarbeit am IME, RWTH-Aachen, 2003
- [8] Ditzel, A.; Scharf C.; Recycling von Magnesiumlegierungen. Magnesium Taschenbuch; 1. Auflage; Aluminium-Verlag Düsseldorf 2000
- [9] Ditzel, A.; Scharf C.; Recycling von Magnesiumlegierungen in Magnesium - Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale; DGM, K. U. Kainer (Hrsg.); Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2000
- [10] Schwerdtfeger, K.; Mutale, C.; Ditzel, A.; Recycling of Magnesium Alloys. Chemical Equilibria between Magnesium-Lithium-Based Melts and Salt Melts, Seiten 355-364, Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 33 B, 06/2002
- [11] Gesing, A.; Wolanski, R.; "Recycling Light Metals from End-of-Life Vehicles", Journal of Metals, 11/2001
- [12] Macher, G.; Hanko, G.; Riederer, W.; "Technologien zur Raffination von kontaminierten Magnesiumschmelzen", Aluminium, 78(2002)11

Konstruktive Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Feuerfester Deckel mit Schutzgas-Ringleitung, hydraulisch zu öffnen • Öffnung im Deckel zur Durchführung eines Rührers • Notauslauf mit Auffangwanne unter dem Ofen • Definierte Abgasführung • Schutzbegasung zwischen Feuerfestauskleidung und Tiegel
Steuerungstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Portable Fernbedienung • Fern-Überwachung und Steuerung durch PC-Netzwerk

Tabelle 2: Magnesium-Sicherheitspaket für Thermostar-Ofen

- (1) IME; Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH - Aachen
- (2) WZL; Werkzeugmaschinenlabor, RWTH - Aachen