

Tagung 2021

„Aufbereitung und Recycling“

11. und 12. November 2021

Tagungsband

Veranstalter:

UVR-FIA GmbH:



mit freundlicher Unterstützung von:



Schwerpunkte der Tagung 2021 sind:
Mineralische Rohstoffe – Wertstoffe aus Abfall

- A) Maschinen, Apparate und Sensoren
- B) Aufbereitung primärer Rohstoffe
- C) Aufbereitung sekundäre Rohstoffe/Recycling

am Freitag, den 12.11.2021: Lithium Ionen Batterie Recycling

sowie Verleihung des Heinrich-Schubert-Preises

Inhalt Tagungsband:

	Seite
➤ Vortragsprogramm* (*Informationen zu den Autoren finden Sie bei den Kurzfassungen)	
• Donnerstag, 11.11.2021	4
• Freitag, 12.11.2021	5
Kurzfassungen der Vorträge und Posteraussteller	6-28
Organisatorisches	29

alphabetische Reihenfolge (Name) der Vortragenden und Posteraussteller

Art	Vorname	Name	Seite
V-03-B Poster 3	Kai	Bachmann	11
V-03-B Poster 5	Martin	Brünner	14
V-02-A-Do	Robert	Claußnitzer	7
V-17-F-Fr	Philipp	Engels	28
V-03-B Poster 1	Bing	Feng	9
V-08-D-Do	Frank	Haubrich	19
V-04-C-Do	Magdalena	Heibeck	15
V-11-E-Fr	H.-G.	Jäckel	22
V-03-B Poster 2	Alexandra	Kaas	10
V-03-B Poster 5	Carlo	Kaiser	14
V-13-E-Fr	Johanna	Köthe	24
V-12-E-Fr	Tony	Lyon	23
V-15-F-Fr	Robert	Mende	26
V-09-D-Do	Gerhard M.	Merker	20
V-01-A-Do	Henning	Morgenroth	6
V-03a Ausz	Preisträger	Preisträger	
V-03a Ausz	Preisträgerin	Preisträgerin	
V-05-C-Do	Thomas	Rösener	16
V-16-F-Fr	Martin	Rudolph	27
V-10-D-Do	Alexander	Schlemminger	21
V-05-C-Do	Raphael	Sperberg	16
V-03-B Poster 5	Malena	Staudacher	14
V-14-F-Fr	Stephan	Stuhr	25
V-06-C-Do	Patric	Van der Haegen	17
V-03-B Poster 4	Oliver	Voigt	12
V-03-B Poster 2	Christian	Wilke	10
V-07-C-Do	Eckhard	Zeiger (Ersatz)	18

Programm

zur Tagung Aufbereitung und Recycling am 11. und 12.11.2021 in Freiberg

- kurzfristige Änderungen sind möglich -

Version: C 9.11.2021

20 min Vortrag + 5 min Diskussion

Die Tagung findet im Hörsaal auf der Chemnitzer Str. 40 in 09599 Freiberg entsprechend den jeweils aktuell gültigen Corona-Regeln statt.
Ihre Anmeldung ist nur online unter www.uvr-fia.de möglich – die Anzahl der Sitzplätze ist begrenzt.

Veranstalter:	UVR-FIA GmbH - Chemnitzer Str. 40 - 09599 Freiberg in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Verfahrenstechnik UVR-FIA e. V. Freiberg
---------------	--

				Donnerstag – 11.11.2021
		8:00	9:00	Registrierung
		9:00	9:15	Begrüßung und Organisatorisches
1	A	9:15	9:40	Aufbereitung von Rohkaolin Henning Morgenroth – UVR-FIA GmbH - Freiberg
2		9:40	10:05	Optimale Ultrafeinsandrückgewinnung - AKA-SILT-System - Robert Claußnitzer - AKW Apparate + Verfahren GmbH - Hirschau
		10:05	10:50	Kaffeepause
	B	10:50	11:00	Verleihung des Heinrich-Schubert-Preises durch den Dekan der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik (Fakultät 4) der TU Bergakademie Freiberg Herrn Prof. Dr.-Ing. Tobias Fieback
		11:00	11:40	Vorträge der 2 Preisträger
3		11:40	12:00	jeweils 5 Minuten Kurzvorträge der Posteraussteller
		12:00	13:00	Mittagspause
4	C	13:00	13:25	Experimentelle und numerische Untersuchung der Aufschlusszerkleinerung von Multi-Material-Strukturen zur Abschätzung der Recyclingfähigkeit Magdalena Heibeck – HZDR – HIF - Freiberg
5		13:25	13:50	Aufbereitung mineralischer Komposite Raphael Sperberg – Gebr. Jehmlich GmbH – Nossen Thomas Rösener – Schock GmbH - Regen
6		13:50	14:15	EbiMIK, der Wendepunkt im Baustoffkreislauf Patric Van der Haegen - Eberhard Unternehmungen – CH Kloten
7		14:15	14:40	Einsatzmöglichkeiten von Laserinduzierter Breakdown-Spektroskopie (LIBS) bei der Verarbeitung von Erzen und Industriemineralien sowie im Recycling von Baustoffen Eckhard Zeiger - SECOPTA analytics GmbH - Teltow
		14:40	15:40	Posterausstellung und Kaffeepause
8		15:40	16:05	Gewinnung von Gallium aus Produktionsabfällen der Halbleiterindustrie Frank Haubrich – G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH - Halsbrücke
9		16:05	16:30	Salzschlacken-Aufbereitung - technische, wirtschaftliche und gesetzliche Aspekte R.G. Merker - MMP (Mineralische Rohstoffe, Beratung, Aufbereitung, Recycling, Projekt-Unterstützung) - Elpenrod
10	16:30	16:55	Mit Laser OES von Post-Mortem Prozesskontrolle zu In-Situ Prozessmanagement Alexander Schlemminger - QuantoLux GmbH - Kleve	
		19:00		ab 19.00 Uhr findet eine Abendveranstaltung im Schankhaus 1863 – Kaufhausgasse statt (Nebengasse vom Freiburger Ratskeller, Obermarkt) <i>vorherige schriftliche Anmeldung ist erforderlich – es gelten die Hygienemaßnahmen der Gaststätte</i> Die Speisen sind frei, Getränke Selbstzahler

Programm

zur Tagung Aufbereitung und Recycling am 11. und 12.11.2021 in Freiberg

- kurzfristige Änderungen sind möglich -

Version: C 9.11.2021

20 min Vortrag + 5 min Diskussion

Die Tagung findet im Hörsaal auf der Chemnitz Str. 40 in 09599 Freiberg entsprechend den jeweils aktuell gültigen Corona-Regeln statt. Ihre Anmeldung ist nur online unter www.uvr-fia.de möglich – die Anzahl der Sitzplätze ist begrenzt.	
Veranstalter:	UVR-FIA GmbH - Chemnitz Str. 40 - 09599 Freiberg in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Verfahrenstechnik UVR-FIA e. V. Freiberg

				Freitag – 12.11.2021
				Schwerpunkt: Lithium Ionen Batterie Recycling
11	E	9:00	9:25	Konzeption zur thermischen Vorbehandlung von Li-Batteriezellen für Anwendungsfälle aus der Elektromobilität H.-G. Jäckel – TU Bergakademie Freiberg - TU BAF -IART-Agr. Recyclingmaschinen
12		9:25	9:50	Erzeugung und Aufbereitung einer Schwarzmassefraktion aus Lithium-Ionen-Batterien Tony Lyon – TU Bergakademie Freiberg – Inst. MVT/AT - Freiberg
13		9:50	10:15	Entwicklung hydrometallurgischer Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Batterien am IFAD der TU Clausthal Johanna Köthe – TU Clausthal Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
		10:15	11:00	Kaffepause
14	F	11:00	11:25	Zur Aufbereitung der Schwarzmasse von Lithium-Ionen-Batterien mittels Magnetscheidung Stephan Stuhr – UVR-FIA GmbH - Freiberg
15		11:25	11:50	Der COOL-Prozess - ein selektives Verfahren für das ganzheitliche Recycling von Lithium-Ionen-Batterien Robert Mende – TU Bergakademie Freiberg – Institut für Technische Chemie
16		11:50	12:15	Aktuelle Erkenntnisse bei der flotativen Aufbereitung von Schwarzmasse und Entwicklungen bei der Schwarzmassecharakterisierung mit den Methoden der Prozessmineralogie und Aufschlussanalytik Martin Rudolph – HZDR- HIF - Freiberg
17		12:15	12:40	Bedeutung des Graphitrecyclings aus ökobilanzieller Sicht Philipp Engels - TU Braunschweig - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering
				<i>Schlusswort</i>
		12:40	13:15	Mittagspause
				danach Führungen (bitte tragen Sie sich in den ausliegenden Listen ein)
				<ul style="list-style-type: none"> ➤ HIF ➤ UVR-FIA GmbH

Version C. 9.11.2021

V

1

Aufbereitung von Rohkaolin	
Autoren:	Dr.-Ing. Henning Morgenroth, UVR-FIA GmbH Dipl.-Ing. Irina Bremerstein
Referent:	Dr.-Ing. Henning Morgenroth
E-Mail-Adresse:	morgenroth(at)uvr-fia.de

Kaolin ist ein wertvoller Rohstoff in der Herstellung von Keramiken, aber auch bei der Herstellung von Beton oder Zement (Metakaolin). Häufig enthalten die Lagerstätten auch einen bedeutenden Anteil an Quarzsanden, der als Glassand Absatz findet.

An Hand eines Beispiels aus der Praxis wird dargestellt, welche Untersuchungen am Rohstoff durchgeführt werden müssen, um an einer gegebenen Lagerstätte das Potential und die Qualität des Rohstoffes zu bewerten.

Nach einer Untersuchung des Rohstoffes kommen verschiedene Prozesse für die Herstellung der Produkte zum Tragen: Aufschlämmen, Sieb- und Hydroklassierung, Attrition, Dichtesortierung und Hochgradienten-Magnetscheidung.

Der Schwerpunkt des Vortrages soll auf der Magnetscheidung liegen.

Optimale Ultrafeinsandrückgewinnung - AKA-SILT-System -

Autor:	Dipl.-Ing. Robert Claußnitzer AKW Apparate + Verfahren GmbH
Referent:	Dipl.-Ing. Robert Claußnitzer AKW Apparate + Verfahren GmbH
E-Mail-Adresse:	rclausnitzer(at)akwauv.com

Sand ist nach Wasser der meist konsumierte natürliche Rohstoff weltweit. Da Sand nicht nur zum Bau von Gebäuden oder Straßen verwendet, sondern auch für Glas, Kosmetika, Smartphone-Bildschirme und vieles mehr benötigt wird, kann der Bedarf bald nicht mehr aus den bekannten Quellen gedeckt werden.

Die meisten bestehenden Sandaufbereitungsanlagen sind nicht auf eine ultrafeine Sandrückgewinnung ausgelegt, daher geht eine erhebliche Menge an Produkt im Bereich 0-150 µm verloren. Um diesen Verlust an Produkt zu verringern, die Belastung von Schlammsedimentationsteichen zu reduzieren und die Rückgewinnung von feinem Sand zu maximieren, hat die AKW Apparate + Verfahren GmbH eine maßgeschneiderte technische Lösung entwickelt, welche Hydrozyklonierung im Fein- bzw. Feinst-Bereich mit der Entwässerung von kritischem Sandmaterial kombiniert, dem sog. **AKA-SILT-System**.

Bei diesem neuen System handelt es sich um eine umweltfreundliche Apparatur, mit der Feinmaterial aufbereitet werden kann, welches normalerweise

- in Absetzbecken entsorgt wird
- unverkäuflich ist
- recyceltes Wasser verschmutzt
- Flockungshilfsmittel bindet
- jedoch auch wertvollen Feinsand enthält

Das AKA-SILT-System kann als zusätzliche Einheit in bestehende Anlagen installiert werden und erfüllt als chemikalienfreier Prozess die höchsten Umweltstandards.

Heinrich-Schubert-Preis

Am 18. April 2019 beschloss die Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der TU Bergakademie Freiberg, jährlich den Heinrich-Schubert-Preis zu vergeben. Mit dem Preis wird an das Wirken des ehemaligen Lehrstuhlinhabers Prof. Dr.sc.techn. Drs.h.c. Heinrich Schubert erinnert, der sich im In- und Ausland überragende Verdienste in den Bereichen Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung erworben hat. Prof. Schubert verstarb am 09.04.2018 im Alter von 92 Jahren.

Mit dem Preis werden Personen ausgezeichnet, die im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit oder Promotion ihre Exzellenz in der Mechanischen Verfahrenstechnik, Mineralaufbereitung oder dem Recycling gezeigt haben. Auch kann damit ehrenamtliches Engagement zum Wohle des Fachbereiches gewürdigt werden.

Die Verleihung des Preises findet durch den Dekan der Fakultät mit Übergabe einer Urkunde, der Schubert-Medaille sowie einem Preisgeld im Rahmen der jährlichen Tagung „Aufbereitung und Recycling“ statt. Vorschlagsberechtigt sind Hochschullehrer der technischen Wissenschaften sowie Vertreter aus außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der Industrie des genannten Fachgebiets.

Näheres bestimmt die Satzung

<https://tu-freiberg.de/fakult4/mvtat/satzung-zum-heinrich-schubert-preis-erschienen>



Die Preisgelder 2021 wurden von der Fachgruppe Aufbereitung des Vereins der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg gespendet, zahlungskräftig unterstützt insbesondere von: Wolfgang Ebert, Sophie Graner, Detlef Höhne, Bernd Kubier, Thomas Leißner, Ines Nicolai, Dieter Reinhold, Marco Rentsch, Petra Ronneburger, Matthias Schumann, Thomas Schwalm, Denise Toussaint

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Urs Peuker

Dr.-Ing. Thomas Leißner

Ultrahigh Temperature Sensors based on Boron Carbide Composites	
Autoren:	Dr. Bing Feng, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS Dr. Hans-Peter Martin, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS Prof. Alexander Michaelis, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS
Posterreferent:	Dr. Bing Feng
E-Mail-Adresse	bing.feng(at)ikts.fraunhofer.de

Boron carbide is frequently used for wear resistant components, ballistic protection and neutron absorption because of its high hardness, low specific weight or high neutron absorption efficiency. Furthermore, boron carbide combines a unique spectra of electrical and thermal properties. There are the outstanding high Seebeck coefficient ($> 300 \mu\text{V/K}$) and a moderate electrical (1 S/cm) and thermal conductivity (20 W/mK) at room temperature. Those properties perfectly match the requirements of a thermocouple which can be used even at extremely high temperatures of more than $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. First products of boron carbide – graphite thermocouples had been commercialized about 30 years ago [1] but they were not kept on the market.

A new approach to an improved product [2] is described here. The materials of the thermocouple comprises only boron carbide composites which differ only in their exact composition. This allows to shift the melting point above $2400 \text{ }^\circ\text{C}$ and additionally produce a precise temperature signal by the sensor. The specific manufacture and design of the thermocouple reduces the thermal mass of it considerably compared to the thermocouple of [1]. Consequently, the thermal impact to the process is minimized as well. Principal solutions of the assembly are improved to maximize the operation time and the reliability of the thermocouple, too.

[1] Patent, DE 3235838, Thermoelement aus dem Thermopaar Graphit/Borcarbide (1982)

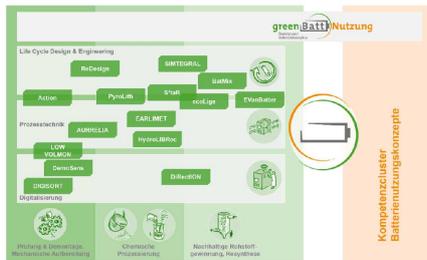
[2] Patent, EP 3511687, Keramisches Thermoelement sowie Verfahren zu seiner Herstellung (2019)

DIGISORT und LOWVOLMON – Teile des greenBatt-Clusters	
Autoren:	Alexandra Kaas, Christian Wilke, Urs A. Peuker, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, TU Bergakademie Freiberg
Posterreferenten:	Alexandra Kaas, Christian Wilke , Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, TU Bergakademie Freiberg
E-Mail-Adressen	alexandra.kaas(at)mvtat.tu-freiberg.de christian.wilke(at)mvtat.tu-freiberg.de

DIGISORT und LOWVOLMON – Teile des greenBatt-Clusters



C. Wilke¹, A. Kaas¹, U. Peuker¹
¹TU Bergakademie Freiberg/ Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik | Agricolastr. 1 09599 Freiberg
 Mail: christian.wilke@mvtat.tu-freiberg.de | Phone: +49 3731 39-3023

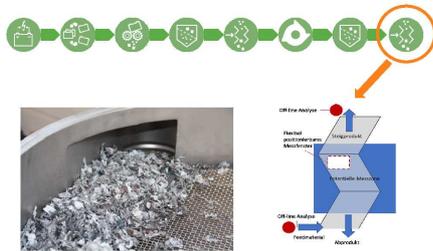
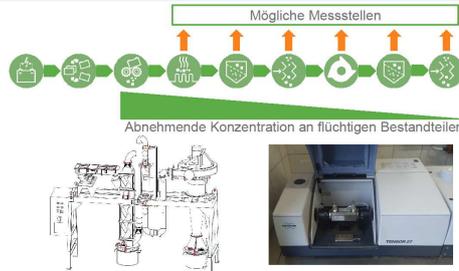


Kompetenzcluster greenBatt

- Zusammen mit dem Cluster Batterienutzungskonzepte (BattNutzung) Teil der Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus im Dachkonzept des BMBF zur Batterieforschung
- Clusterziele:
 - Entwicklung und Anwendung innovativer Recycling- und Resynthese-Prozesse
 - Erhöhung der Qualität und Verfügbarkeit von Daten zur Entwicklung multidisziplinärer Lebenszyklusmodelle und -werkzeuge
 - Empfehlungen für Design für Recycling und End-of-Use
 - 16 Forschungsprojekte an 34 Instituten von deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen

LOWVOLMON

- LOWVOLMON = Monitoring schwerflüchtiger Elektrolyte in der mechanischen Recyclingprozesskette
- Motivation: Restgehalte an Elektrolyt nach der mechanischen Aufbereitung erschweren die hydrometallurgische Aufbereitung
- Idee: Messung, Identifizierung und sichere Entfernung der flüchtigen Bestandteile während des mechanischen Aufbereitungsprozesses
- Prinzip: Online-Messung der Prozessgase mit FTIR-Spektroskopie, Integration von Trocknung und ggf. Pyrolyse in die Prozesskette
- Ziel: Frühestmögliche und vollständige Entfernung der flüchtigen Bestandteile aus dem Aufbereitungsprozess



DIGISORT

- DIGISORT = Digitalisierung des Sortierprozesses
- Motivation: trotz schwankender Eingangsströme sollen kontinuierliche Konzentrationsströme mit hoher Qualität erzeugt werden
- Idee: Kombination von optischen und spektroskopischen Messdaten mit Betriebs- und Trennparametern der Sortier- und Klassiertechnik
- Prinzip: Untersuchung des Sichterfolgs bei unterschiedlicher Vorbeanspruchung und Verhalten von Modell- und Realmaterial
- Ziel: Qualitätsüberwachung und -optimierung, durch on-line Messung und Erstellung einer mehrdimensionalen Trennfunktion zur Regelung von Klassier- bzw. Sortierprozess

References

Diekmann, J., & Kwade, A. (Eds.). (2018). Recycling of Lithium-ion Batteries: The LithoRec Way. Springer.
 Diaz, F., Wang, Y., Weyhe, R., & Friedrich, B. (2019). Gas generation measurement and evaluation during mechanical processing and thermal treatment of spent Li-ion batteries. Waste Management, 84, 102-111.

Acknowledgements

The presented contents are based on projects funded by the German Federal Ministry of Education and Research under the grant numbers 03XP0354AE and 03XP0337. The authors are responsible for the contents of this publication.

Developing methods to tackle analytical challenges in battery recycling materials using automated SEM and bulk analytical methods	
Autoren:	Kai Bachmann ^{1,2} , Robert Möckel ² , Anna Vanderbruggen ^{1,2} , Doreen Ebert ^{1,2} 1 ERZLABOR Advanced Solutions GmbH, Halsbrücker Str. 34, 09599 Freiberg 2 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Helmholtz-Institute Freiberg for Resource Technology, Chemnitz Str. 40, 09599 Freiberg, Germany
Posterreferent:	Dr. Kai Bachmann
E-Mail-Adresse	k.bachmann(at)erzlabor.com

To close the loop of the future material demands, the role of battery recycling is steadily increasing, especially in the light of changing mobility. The analytical requirements for battery materials are challenging, since they are complex and heterogeneous secondary materials. They contain Li in different compounds, carbon in the form of graphite (“black mass”), but also metals like Mn, Fe, Cu, Al, Co, Ni etc. partly in several oxidation states (pure metal foils vs. different compounds). All these components are also highly affected by the recycling stages (e.g. pyrolysis, leaching, ect.). On the other hand, with the main aim of an effective recycling the demand for as detailed as possible analytical data is likewise high. Generally, there is no single method available for tackling all the analytical issues and a combination of methods is inevitable. In different recycling projects, we developed methods for scanning electron microscope (SEM) techniques (in our case MLA Mineral Liberation Analyser and TIMA Tescan Integrated Mineral Analyzer), quantitative XRD (X-ray diffraction) and XRF (X-ray fluorescence) with support of ICP-OES and C analysis.

While SEM techniques are essential to provide information on a particle base (incl. chemical composition, grain size, liberation etc.) the other techniques provide pure bulk mineralogical and chemical analytics. An approach – with slight amendments – known from the so called automated mineralogy applied to the materials revealed very useful results for understanding processing parameters, i.e. for the beneficiation of black mass in high quality (Vanderbruggen et al. 2021). On the other hand by simply adding an internal standard (we chose ZrO₂) it is possible to develop a quick and easy method for XRF analysis where the sum of “invisible” elements (e.g. C, Li, O, F) can be determined easily with accurate quantification of the other elements, mainly focusing on the metal contents. Lithium containing compounds can be detected by XRD, but the methods have some drawbacks when it comes e.g. to the pure metal contents.

Therefore, a combination of these different approaches helps to increase the analytical precision in order to develop efficient recycling strategies. Such an analytical approach can then be applied to evaluate recycling and beneficiation processes.

References:

Vanderbruggen, A., Gugala, E., Blannin, R., Bachmann, K., Serna-Guerrero, R., & Rudolph, M. (2021). Automated mineralogy as a novel approach for the compositional and textural characterization of spent lithium-ion batteries. *Minerals Engineering*, 169, 106924.

Erhöhung der Rohstoffeffizienz durch Nutzung von Reststoffströmen aus dem Senkerodieren für Prozesse der Additiven Fertigung	
Autoren:	Dipl.-Ing Oliver Voigt ^{1,*} , Prof. Dr.-Ing. Urs. A. Peuker ¹ ¹ TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik
Posterreferent:	Dipl.-Ing Oliver Voigt¹
E-Mail-Adresse:	Oliver.Voigt(at)mvtat.tu-freiberg.de

Im produzierenden Gewerbe, insbesondere in der Additiven Fertigung (engl.: Additive Manufacturing, AM, „3D-Druck“), stellen die Materialkosten für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) eine Herausforderung dar. Analysen des statistischen Bundesamtes [1] zeigen, dass sich die Kosten für die Einsatzmaterialien auf ca. 45 % der Gesamtkosten belaufen. Daher ist auf einen effizienten und ressourcenoptimierten Umgang mit Materialien und Rohstoffen zu achten.

Die AM weist große Vorteile gegenüber konventionellen Herstellungsverfahren auf. Sei es zum einen die sehr hohe Flexibilität sowie geometrische Komplexität bei der Bauteilgestaltung oder die Bandbreite an einsetzbaren Werkstoffen. Dabei werden als Primärprodukte ausschließlich hochwertige, hochpreisige und hochspezifische Materialien eingesetzt. Einen Großteil stellen dabei Metallpulver dar, die einzig über Pulververdüsung hergestellt werden. Dieses Verfahren ist jedoch sehr aufwendig und weist einen hohen Energiebedarf auf, was wiederum dazu führt, dass der aufkommende Materialbedarf nicht gedeckt werden kann und somit hohe Anschaffungskosten entstehen. Vor allem für KMU ist daher ein Markteintritt sowie eine Marktetablierung schwer zu realisieren. Die Erschließung einer alternativen Herstellungs- bzw. Gewinnungsrouten für Metallpulver ist daher unabdingbar. Eine Nutzung und Aufbereitung von Reststoffströmen, welche zusätzlich kostenintensiv entsorgt werden müssen, rückt somit in den Fokus. In der AM werden die hergestellten Bauteile u.a. mittels Funkenerosion (engl.: electro discharge machining, EDM) nachbearbeitet. Dabei fallen sogenannte Erodierschlämme (ES) als Reststoff an.

Beim EDM erfolgt die Bearbeitung in einem flüssigen Medium – Dielektrikum genannt – wobei es sich entweder um synthetische Kohlenwasserstoffe (Öle) oder deionisiertes Wasser handelt. Das Prinzip beruht auf einem Materialabtrag bei Anlegen eines elektrischen Potentials infolge der Umwandlung von elektrischer in thermische Energie. Nach Unterbrechung der Energiezufuhr wird das abgetragene Material durch das Dielektrikum aus der Bearbeitungszone herausgeschleudert und erstarrt extrem schnell in diesem. Dieser Vorgang wird nun immer wieder mit einer definierten Impulsdauer sowie -intensität wiederholt. Bei der Betrachtung der erstarrten Abtragpartikel ist festzustellen, dass diese in ihrer Form und Größe prinzipiell den Anforderungen eines AM-Pulvers genügen können [2-4].

Ziel dieses Projekts ist die mechanische Aufbereitung dieser ES. Dafür werden u.a. eine dynamische Bildanalyse, Laserbeugung, Rasterelektronen- sowie Rasterkraftmikroskopie, (FTIR)Spektroskopie, ICP OES, Analysesiebungen als auch diverse Wasch- und Filtrationsversuche sowie unterschiedliche Klassier- und Sortierprozesse inkl. schüttgutmechanischer Charakterisierungen angewendet. Abschließend werden die fraktionierten Metallpulver in einem AM-Prozess verarbeitet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit untersucht. Parallel dazu wird mit einem kommerziellen Referenzmaterial gearbeitet, wodurch stetig ein Vergleich der Materialeigenschaften gezogen wird. Mit Kenntnis dieser Eigenschaften (mechanische Kennwerte wie Härte und Zugfestigkeit, Gefügeanalyse usw.) sowie der Zusammensetzung der aufbereiteten Pulver wird eine alternative Prozessführung zur Pulvergewinnung generiert.

In ersten experimentellen Versuchen wurden bereits ES von einem KMU-Partner charakterisiert, vorbehandelt und teilweise aufbereitet. Nach einer vorangegangenen Demontage und Öffnung der Rückspülfilter, in denen sich die ES befinden, erfolgten diverse Untersuchungen mittels

Laserbeugung, dynamischer Bildanalyse, Siebungen, Rasterelektronenmikroskopie, thermischen Analyse sowie verschiedene Filtrations-, Wasch- und Lösemittelversuche Weiterhin wurden Quervergleiche der senkerodierten Partikel mit denen der Drahterosion – einem artverwandten Verfahren – gezogen. Dabei stellte sich heraus, dass Schlämme der Drahterosion nicht für eine weitere Nutzung herangezogen werden können. Anders dazu konnte der Nachweis der Eignung für senkerodierte Partikel erbracht werden, da diese meist als einheitlich sphärische Partikel mit typischen Defekten von kommerziell hergestellten Metallpulvern in einem breiten Partikelgrößenbereich vorliegen. Parallel dazu wurden vergleichende Charakterisierungen an einem industriellen Referenzmaterial durchgeführt. In Zukunft sollen zwei Versuchsaufbauten modifiziert bzw. erstellt werden, mit denen eine lösungsmittelhaltige Filtration sowie Waschung unter Abluft möglich sein wird, als auch eine Trennung der Stahlpartikel von einer Suspension aus ES und Lösemittel mit Hilfe eines selbstkonstruierten Magnetscheiders bzw. -Filters. Weiterhin wird ein Ausblick für nachfolgende Arbeitsschritte in diesem Projekt gegeben.

1. Statistisches Bundesamt. Kleine und mittlere Unternehmen. 2020; Available from: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/_inhalt.html.
2. Khanra, A.K., L.C. Pathak, and M.M. Godkhindi, Microanalysis of debris formed during electrical discharge machining (EDM). *Journal of Materials Science*, 2007. 42(3): p. 872-877.
3. Murray, J.W., et al., Physical and electrical characteristics of EDM debris. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016. 229: p. 54-60.
4. Murti V.S.R., Philip P.K., An analysis of the debris in ultrasonic-assisted electrical discharge machining. *Wear*, 1987. 117: p. 241 - 250.

Mechanische Prozesse für das Elektrolyseur-Recycling	
Autoren:	Dipl.-Ing. Malena Staudacher, TU Bergakademie Freiberg / Inst. MVT/AT Dipl.-Ing. Martin Brünner, TU Bergakademie Freiberg / Inst. MVT/AT Dipl.-Ing. Carlo Kaiser, TU Bergakademie Freiberg / Inst. MVT/AT
Posterreferent:	Dipl.-Ing. Martin Brünner, TU Bergakademie Freiberg / Inst. MVT/AT
E-Mail-Adresse	Martin.Brueenner(at)mvtat.tu-freiberg.de

Eine Antwort zum steigenden Bedarf an Energiespeichern ist die Produktion von Wasserstoff mit überschüssigem Strom der erneuerbaren Energiequellen. In der Welt und besonders in Europa wird die Kapazität zur Wasserstoffproduktion stark gesteigert: von bisher 0,2 GW Gesamtleistung auf über 200 GW bis 2040 (1). Allein bis 2030 sind in Deutschland 5 GW Elektrolyseurleistung geplant (2).

Die Technologieplattform H2Giga bündelt das Wissen von 24 Verbänden mit insgesamt über 130 Partnern zum Thema Wasserstoff-Technologie. Über zunächst 4 Jahre soll an der gesamten Wertschöpfungskette und an verschiedenen Elektrolyse-Technologien geforscht werden. Der Verbund ReNaRe beschäftigt sich dabei mit dem Schließen des Wertstoffkreislaufes und der stofflichen Verwertung der alkalischen Elektrolyseure (AEL), Polymerelektrolytmembran (PEM)- und Hochtemperatur (HT)-Elektrolyseure. Im Fokus der 13 Projektpartner in ReNaRe liegen insbesondere die kritischen Elemente, wie Edelmetalle und Seltene Erden, die für die Funktionalität eines Elektrolyseurs erforderlich sind.

Als erster Schritt zum mechanischen Recycling wurden die Elektrolyseure zunächst mit optischen Analysemethoden und Spektroskopie multiskalig charakterisiert. Mit Lichtmikroskop- und REM-Aufnahmen werden insbesondere der Aufbau dünner Elektrodenschichten und die Querschnitte durch die Elektrolysezelle untersucht. Die chemische Zusammensetzung wird unter anderem mittels Raman-Spektroskopie ermittelt. Dabei werden hauptsächlich HT- und PEM- Elektrolyseure betrachtet.

Mit diesem Beitrag sollen neben der Projektvorstellung auch die ersten Ergebnisse der Charakterisierung vorgestellt werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen für die HT- und PEM-Elektrolysezellen individuelle Verfahrensansätze bezüglich des physikalischen Aufschlusses erstellt werden. Die aufgeschlossenen Produkte sollen mittels physikalischer und sensorgestützter Sortierprozesse beziehungsweise Flotation in definierte Produktströme aufgetrennt werden. Diese Stoffströme können in weiteren Prozessschritten über pyro- und hydrometallurgische Verfahren recycelt und stofflich aufbereitet werden.

Literaturverzeichnis

1. **Stephan, Dominik.** Mit Spannung erwartet. *Process - Chemie Pharma Verfahrenstechnik*. 7, Juli 2021, Bd. 28, S. 22 - 24.
2. **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.** *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin : BMWi, 2020.

Experimentelle und numerische Untersuchung der Aufschlusszerkleinerung von Multi-Material-Strukturen zur Abschätzung der Recyclingfähigkeit	
Autoren:	M.Eng. Magdalena Heibeck, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) Dipl.-Ing. Jonas Richter, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden Dr. Martin Rudolph, HIF Dr.-Ing. Andreas Hornig, ILK Prof. Dr.-Ing. Niels Modler, ILK Prof. Dr. Dr. h.c. Markus Reuter, Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoffe (INEMET), Technische Universität Bergakademie Freiberg, SMS Group GmbH Dr.-Ing. Angelos Filippatos, Dresden Center for Intelligent Materials (DCIM), ILK
Referentin:	Magdalena Heibeck, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
E-Mail-Adresse:	m.heibeck(at)hzdr.de

Im Rahmen einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) hat das Recycling von Produkten am Ende ihrer Lebenszyklen das Potenzial, den Ressourcenverbrauch und klimaschädliche Umweltauswirkungen von Produktsystemen zu verringern. Für eine nachhaltige Etablierung von Recycling-Lösungen sind neben der Recyclingindustrie auch Produkthersteller bereits in der Konstruktionsphase mit einzubeziehen. Hierfür fehlt es derzeit jedoch meist an Methoden, um die Auswirkungen von Designentscheidungen auf die Recyclingfähigkeit abzuschätzen und zu optimieren (engl. Design-for-Recycling). Deshalb arbeiten wir an einem digitalen Modell, das die Bewertung der Recyclingfähigkeit schon im Produktentstehungsprozess ermöglichen soll. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Prozessschritt der Aufschlusszerkleinerung, da eine zunehmende Anzahl von Produkten, von Fahrzeugen bis Haushaltsgeräten, aus Multi-Material Strukturen bestehen. Hier müssen Verbindungen zwischen unterschiedlichen Materialien im Recycling meist wieder gelöst werden, um hohe Recyclingraten für alle verbauten Materialien zu erzielen. Dies erfolgt typischerweise mechanisch durch Zerkleinerungsprozesse.

Vor diesem Hintergrund wollen wir herausfinden, welche Parameter bereits während der Bauteilentwicklung beeinflussbar sind, um den Materialaufschluss bei der mechanischen Aufbereitung zu optimieren, ohne dabei Funktion und Lebensdauer der Struktur in der Nutzungsphase zu beeinträchtigen. Dazu haben wir zum einen Zerkleinerungsexperimente von Prüfkörpern aus der Automobilbranche in einem Rotorreißer durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand dabei insbesondere der Einfluss verschiedener Verbindungscharakteristika auf das Aufschlussverhalten. Da die experimentelle Datenerhebung aufgrund hoher Parametervariabilität im Produktdesign und des Zerkleinerungsprozesses aufwändig ist, entwickeln wir zum anderen ein physikalisch basiertes, numerisches Modell der Aufschlusszerkleinerung mithilfe der Finiten Elemente Methode. Hierzu nutzen wir die Software LS-DYNA, verwenden darin Materialmodelle, welche die Plastizität und das Versagen der beteiligten Werkstoffe sowie deren Interfaces berücksichtigen. Zudem wird die Simulation für verschiedene Lastfälle parametrisiert, wie beispielsweise unterschiedliche Orientierungen des Prüfkörpers im Rotorreißer. Neben dem experimentellen zeigen wir erste numerische Ergebnisse der Berechnungen am Beispiel einer Metall-Kunststoff-Hybridstruktur. Damit leistet unsere Arbeit einen Beitrag dazu, den Einfluss von Konstruktionsentscheidungen auf das Aufschlussverhalten abzuschätzen, sowie Erfahrungen bei der Erstellung einer durchgängigen digitalen Kette vom Design über Fertigung bis hin zum Recycling zu sammeln.

V

5

Aufbereitung mineralischer Komposite

Autoren:	Raphael Sperberg, Gebrüder Jehmlich GmbH Thomas Rösener, Schock GmbH
Referenten:	Raphael Sperberg, Gebrüder Jehmlich GmbH Thomas Rösener, Schock GmbH
E-Mail-Adressen:	r.sperberg(at)jehmlich.info t.roesener(at)schock.de

Auf Wunsch der Autoren wird nur diese Kurzfassung veröffentlicht.

Als Spezialist für industrielle Zerkleinerungstechnik bietet das Unternehmen Gebrüder Jehmlich GmbH vielfältige Prozesslösungen und Anlagenkonzepte in den Bereichen Grob- und Feinvermahlung. In einem gemeinsamen Projekt mit dem Unternehmen Schock GmbH wurde ein Aufbereitungsverfahren für mineralische Komposite entwickelt. Nach der Erprobungsphase im Labor- und Technikumsmaßstab bei beiden Partnern wird dieses Verfahren nun mit einer maßgeschneiderten Anlage in den industriellen Produktionsprozess bei Schock implementiert.

EbiMIK, der Wendepunkt im Baustoffkreislauf

Autor:	Patric Van der Haegen, Eberhard Unternehmungen
Referent:	Patric Van der Haegen, Eberhard Unternehmungen
E-Mail-Adresse:	Patric.vanderhaegen(at)eberhard.ch

Unter anderem durch Grundlagenforschung am Institut UVR-FIA wurde von den Eberhard Unternehmungen ein neues Verfahren zur Aufbereitung von Mischabbruch entwickelt und diesbezüglich ein Aufbereitungszentrum in Oberglatt / Schweiz erstellt. Das Aufbereitungszentrum kann ein auf 1x1m vorzerkleinertes Haus vollständig in die Einzelbestandteile sortieren. Dabei wird fast eine 100% Verwertungsquote erreicht und damit Deponievolumen geschont. Das Aufbereitungszentrum hat eine Durchsatzleistung von 150 Tonnen pro Stunde und geht im August 2021 in Betrieb.

Nur wenn Rückbaumaterialien hochwertig aufbereitet werden, können daraus auch Qualitäts-baustoffe hergestellt werden, welche gleichwertig gegenüber Primärbaustoffen sind. Beim Rückbau von Gebäuden fallen hauptsächlich mineralische Rückbaustoffe an. Dabei unterscheidet man zwischen reinem Betonabbruch und Mischabbruch (gemischter Bauabfall).

Bei Betonabbruch kann die geforderte Aufbereitungsgüte mit einer stationären Aufbereitung erreicht werden. Nach dem Brecherdurchlauf werden die Armierungseisen entfernt und das Material in die für die Betonproduktion gängigen Korngrößen ausgesiebt. Zu guter Letzt bläst ein Windsichter pro Kornband unerwünschte Fremdstoffe wie Holz, Plastik, Papier usw. aus. Die einzelne Reinigung pro Kornband ist wichtig, denn nur mit einem engen Kornband können die Windsichter so eingestellt werden, dass sie gut reinigen, aber keinen Feinanteil ausblasen. Die so gewonnenen Sekundärrohstoffe werden anschliessend als Zuschlagstoffe für die Betonproduktion verwendet.

Wie man aus Betongranulats wieder hochwertige Betone herstellt ist bekannt. Die Eberhard Unternehmungen tun dies seit 1999 im Recyclingwerk Ebirec in Rümlang/Schweiz. Sie sind heute in der Lage jedes (Hoch)-Haus der Schweiz mit einem Sekundärrohstoffanteil von 80-90% (über die gesamte Mineralik inkl. Zement) zu bauen. Dies selbstverständlich bei einem minimalem Zementgehalt von CO₂ reduziertem Zement (CEM II) um die Umwelt nicht durch einen Zement Mehrverbrauch zu schädigen. Und mit zirkulit® wurde ein zirkulärer Beton entwickelt, welcher sogar weniger CO₂-Emissionen hat als Primärbeton.

Hochwertiger Betone entsteht nur, wenn die sogenannte Siebkurve und die Dichte stimmen. Während die Dichte des mit dem oben beschriebenen Verfahren gewonnenen Betongranulats den Anforderungen entspricht, kann diese beim Mischgranulat nicht erreicht werden. Für Mischabbruch besteht daher noch keine kreislauffähige Lösung zu Verfügung. Mischabbruch wird heute noch flächendeckend durch Downcycling einer minderwertigen Verwendung als Füllstoff zugeführt oder sogar deponiert. Ein echtes und nachhaltiges Recycling für Mischabbruch existiert aktuell noch nicht.

Um dies zu verhindern wurde während fast 10 Jahre ein neuer Aufbereitungsprozess entwickelt. Das Verfahrensprinzip ist bestechend einfach: Als Kernstück des Aufbereitungsprozesses kommen selbstlernende Roboter mit künstlicher Intelligenz zur Anwendung. Die Roboter mit Greifern sortieren fleissig selbst 30 kg schwere Brocken, welche ein Mensch gar nicht anheben dürfte. So werden homogene Sekundärrohstoffe mit definierten Eigenschaften hergestellt, welche eine bis heute unerreichte Materialqualität aufweisen. Nebst Betongranulat kann Leichtmineralik, Gips, FE, NE, Holz, Plastik, etc. separat zurückgewonnen werden.

Diese Aufbereitung ermöglicht es erstmals, den Mischabbruch werterhaltend und vollständig im Kreislauf zu halten. Die aus den Sekundärrohstoffen produzierten Baustoffe sind von gleichwertiger Qualität wie die Primärbaustoffe. Der technologische Meilenstein ist gesetzt. Alle Bauakteure verfügen damit über das notwendige Werkzeug für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

Einsatzmöglichkeiten von Laserinduzierter Breakdown-Spektroskopie (LIBS) bei der Verarbeitung von Erzen und Industriemineralien sowie im Recycling von Baustoffen	
Autor:	Eckhard Zeiger, SECOPTA analytics GmbH
Referent:	Eckhard Zeiger, SECOPTA analytics GmbH
E-Mail-Adresse:	eckhard.zeiger(at)secopta.de

Eingangskontrolle, Prozessanalytik und Qualitätskontrolle bei der Verarbeitung von Erzen und Industriemineralien unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung. Schnellere und genauere Messverfahren ermöglichen eine nahezu lückenlose inline und online Überwachung aller relevanten Prozesse und stellen die notwendigen Informationen bereit, die die Industrie 4.0 fordert.

Für die Analyse von homogenen und inhomogenen Stoffgemischen bzgl. der elementaren Zusammensetzung wird seit vielen Jahren das Verfahren der Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) eingesetzt. Hierbei wird die Oberfläche des zu analysieren Material mit einem energiereichen Laser angeregt. Geringe Mengen des oberflächennahen Bereichs werden so stark erhitzt, dass sich ein Plasma bildet. Beim Erkalten das Plasmas werden von allen enthaltenen Elementen charakteristische Strahlungen vom UV bis hin zum NIR Bereich emittiert. Dieser spektrale Fingerabdruck lässt sich mit Spektrometern und chemometrischer Software charakterisieren. Mit diesen Daten sind qualitative und quantitative Aussagen über das Analysegut möglich. Dieses Messprinzip war lange nur im Labor verfügbar und nur durch hochqualifiziertes Fachpersonal bedienbar.

Die SECOPTA analytics GmbH bietet seit einigen Jahren Systeme an, die die Schnelligkeit und hohe analytische Genauigkeit von LIBS im industriellen Umfeld verfügbar macht. Hardware, Auswertungssoftware und Bedienoberflächen sind so konstruiert, dass sie auch im Stahlwerks-, Bergbau- und Recyclingbereich über Förderbändern innerhalb und außerhalb von Hallen installiert werden können. Mit solchen Systemen können gleichzeitig u.a. Cu, C, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, S, Mg, Pb, H, Zn, Ti, N in Mineralien und Erzen oder Recyclingmaterialien auf Förderbändern (Bandgeschwindigkeit bis zu 2m/s) qualitativ und quantitativ klassifiziert werden. Je nach Aufgabenstellung können die Systeme mit einer extrem schnellen Höhenanpassung ausgestattet werden, damit beispielsweise sehr feines Material 0-100 µm oder gebrochenes Material 0-80 mm in Echtzeit analysiert werden kann.

Diese Analysedaten können über moderne Kommunikationsschnittstellen (z.B. Profinet oder EtherCAD) an die übergeordneten Leitwarten übergeben werden, um entsprechende Prozesssteuerungen zu ermöglichen. Auch für andere Aufgabenstellungen können solche Systeme eingesetzt werden, etwa für Überwachung von Qualitätsparametern, Verwechslungskontrolle, Herstellung kontrollierter Mischungen, Trenderkennung oder Recyclinganwendungen.

Der Vortrag stellt die industrielle Implementierung verschiedener LIBS Systeme vor und erläutert die Funktionen und Anwendungsbereiche.

Gewinnung von Gallium aus Produktionsabfällen der Halbleiterindustrie	
Autor:	Dr. Frank Haubrich, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Referent:	Dr. Frank Haubrich, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
E-Mail-Adresse:	f.haubrich(at)geosfreiberg.de

Gallium wird als GaAs heutzutage in jedem Smartphon und Tablet-PC verwendet. Durch den Einsatz von GaAs-basierten LEDs, GaN für Leistungs- und Optoelektronikbauelemente und MSMA-Technologien ist in Zukunft mit einem Bedarf zu rechnen, der ein Mehrfaches der heutigen Weltjahresproduktion betragen wird. Deutschland hält mit der Freiberg Compound Materials GmbH derzeit auf dem Gebiet der GaAs-Waferproduktion einen Weltmarktanteil von > 50 % und ist somit auf eine stabile Versorgung mit Gallium angewiesen. Bisher werden nahezu 100 % des Ga aus dem Ausland bezogen. Bei der Herstellung von GaAs-Wafern landen aber nur 8 % des eingesetzten Ga beim Verbraucher. Der Rest ist Abfall, welcher zwar schon zu großen Teilen recycelt werden kann, jedoch gehen 47 % durch die nachfolgenden Verarbeitungsprozesse bis zum Halbleiter-Chip verloren.

Bei der Herstellung von GaAs-Wafern fallen davon derzeit ca. 15 % des eingesetzten Ga als flüssige und feste Produktionsabfälle an. Darunter fallen große Mengen verdünnter Wässer (mg/l Ga, As), konzentrierte alkalische und saure Ätz-Lösungen (g/l Ga, As) und Ga-As-SiO₂-haltige Poliersuspensionen (g/l Ga, As). Die festen Abfälle wurden ursprünglich als Metallhydroxidschlämme (0,9 % Ga) deponiert, die flüssigen als Abwasser in die Vorflut eingeleitet.

Ziel war es, für die Ga-haltigen Abfälle Aufbereitungstechnologien zu entwickeln, die es ermöglichen das Gallium wieder in den Produktionsprozess der Halbleiterindustrie zurückzuführen. Dabei wurde eine nahezu „zero waste technology“ angestrebt. Ebenfalls sollte getestet werden, inwieweit man die Begleitstoffe Arsen und Kieselsäure zurückgewinnen kann.

Innerhalb des Verbundprojektes EcoGaIN wurden für alle Abfallstoffe separate Aufbereitungsmethoden entwickelt, die miteinander verknüpfbar sind. Die Verknüpfung erfolgt, indem bei allen Techniken Ga-(As)-angereicherte Zwischenprodukte erzeugt werden, aus welchen metallurgisch hochreines metallisches Gallium hergestellt werden kann.

Für die Entfernung und Anreicherung von Ga und As aus großen Mengen verdünnter Lösungen (Waschwässer) wurde erfolgreich die Sorption auf Fe-basierten Sorptionsmitteln durchgeführt, von denen die Elemente auch wieder desorbiert und zu Zwischenprodukten verarbeitet werden konnten. Neue Techniken zur Anreicherung und Trennung von Ga und As aus verdünnten Lösungen wurden auf der Grundlage von Protein/Magnetit-Kompositen und Phage Surface Display-Technologien erarbeitet.

Konzentrierte saure und basische Lösungen wurden verschnitten, Ga und As mittels Membran-/ Ionenaustauschtechniken getrennt und Ga-reiche Zwischenprodukte erzeugt. Die Kieselsäure aus den Poliersuspensionen wurde abgetrennt und die Ga-As-haltigen Lösungen zu Zwischenprodukten aufbereitet. Metallhydroxidschlämme mit ca. 0,9 % Ga wurden gelaugt, anschließend die Kieselsäure und Eisen abgetrennt und ein Ga-As-reiches Zwischenprodukt produziert. Die Zwischenprodukte hatten je nach Verfahren zwischen 5 und 25 % Ga-Gehalt und wurden mittels metallurgischer Verfahren zu hochreinem Gallium umgesetzt. Für Gallium wurde eine wirtschaftlich tragbare „zero waste technology“ entwickelt. Die Kieselsäure kann in der Herstellung von Natriumsilikat und in der Betontechnik eingesetzt werden. Für Arsen können die Technologien zur Herstellung von hochreinem elementarem Arsen realisiert werden, diese sind jedoch nicht wirtschaftlich, da ein Überangebot an Arsen auf dem Weltmarkt existiert. Die entwickelten Technologien sind bezüglich Ga- und As-Gewinnung und -Entfernung in verschiedenen anderen Branchen einsetzbar, die ähnliche Fragestellungen aufweisen.

Zum Teil wurden die Verfahren bereits so weit entwickelt, so dass diese in den Produktionskreislauf der beteiligten Firmen integriert wurden.

Salzschlacken-Aufbereitung – technische, wirtschaftliche u. gesetzliche Aspekte

Autoren:	R. G. Merker (MMP), Dr. K.- H. Bruch (BBB)
Referent:	R. G. Merker (MMP)
E-Mail-Adresse:	merker(at)merker-mineral-processing.de

Dieser Vortrag soll den gegenwärtigen Stand der Aluminium-Salzschlacken-Aufbereitung als wichtigen Bestandteil des Aluminiumrecycling-Kreislaufes vorstellen.

Salzschlacke ist eingestuft als gefährlicher Abfall. Die gesamte Prozesskette ist daher geregelt durch die diesbezüglich geltenden gesetzlichen Regelungen der EU für Transport, Handling und Aufbereitung.

Die Autoren legen den Schwerpunkt auf die aktuelle Situation in der EU und stellen das Konzept eines „Voll-Recyclings“ in Bezug auf technische, wirtschaftliche und rechtliche Herausforderungen in den Mittelpunkt.

In Rahmen des gegenwärtigen Hypes von Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung ist dieses funktionierende Konzept ein gutes Beispiel, welches trotz einer mehr als dreißigjährigen Geschichte noch interessante Verbesserungspotentiale aufweist.

Voll-Recycling-Aufbereitungsanlagen liefern in der Regel bis zu vier Produkte:

- Aluminium-Metall,
- Schmelzsalz,
- Aluminiumoxid, (Oxide),
- Ammoniumsulfat (AMS).

Bei der Vermarktung dieser Produkte verdienen die sog. Oxide als mengenmäßig wichtigstes Produkt eine besondere Aufmerksamkeit.

Gegenwärtig wird der Markt der Salzschlackenaufbereitung in Mitteleuropa hauptsächlich von zentralisierten Großanlagen auf einem technisch fortgeschrittenen Niveau beherrscht.

Diese Art von Recyclinggeschäft ist stabil und wirtschaftlich tragfähig, wird jedoch von lokal gegebenen Randbedingungen maßgeblich beeinflusst, die oft nicht sofort erkannt werden.

Im Hinblick auf die Entwicklung von neuen Salzschlacken-Recyclingprojekten werden daher Gründe aufgezeigt, die örtlichen Rahmenbedingungen rechtzeitig ernst zu nehmen.

V

10

Mit Laser OES von Post-Mortem Prozesskontrolle zu In-Situ Prozessmanagement

Autoren:	M. Eng. QuantoLux GmbH
Referent:	Alexander Schlemminger
E-Mail-Adresse:	alexander.schlemminger(at)quantolux.de



Energie- und Ressourceneffizienz sind Schlüsselfaktoren um bei der immer stärkeren internationalen Konkurrenz auf dem Stahl- und Zementmarkt wettbewerbsfähig bleiben zu können. Einer der neuesten Trends im Bereich Ofensteuerung sind dabei AI- und simulationsbasierte Optimierungsmaßnahmen. Diese bieten zwar ein großes Potential, jedoch benötigen sie, um optimal arbeiten zu können umfangreiche Daten. Trotz der zunehmenden Zahl an Sensoren gibt es dennoch einige blinde Flecken in diesem Zusammenhang.

So kann beispielsweise in der Stahlherstellung die Zusammensetzung der Schlacke aufgrund der langen Gesamtanalysezeit meist erst nach Abschluss der Behandlung im EAF / LF, also post-mortem mit in die Simulation einbezogen werden. Aus diesem Grund können Unregelmäßigkeiten in der Schlacke Basizität zu deutlichen Effizienzverlusten führen. Diese entstehen beispielsweise durch geringe Schäumung und Isolation im EAF, durch unzureichende Entschwefelung im LF, durch Oxidation teurer Legierungsmittel oder durch starken Verbrauch des Feuerfestmaterials.

Auch in der Zementindustrie führen lange Analysezeiten von 15 Minuten und mehr zu langen "Blindfahrten" des Ofens. Dies führt wiederum bei Abweichungen der chemischen Zusammensetzung von Eingangsmaterialien wie natürlichen Rohstoffen oder Ersatzbrennstoffen zu Qualitäts- und Effizienzproblemen.

Bisher gab es keine Möglichkeit heterogene Materialien präzise, in unter 6 Minuten zu analysieren. Hauptgrund hierfür war die notwendige Homogenisierung der Probe vor der Analyse. Die Laser OES kann hier die Technologie der Zukunft sein. Sie funktioniert äquivalent zur Funken OES, mit dem wichtigen Unterschied, dass das Plasma durch einen Laser angeregt wird. Mit über 10.000 Messwerten in einer Minute wird eine derart große Menge an Daten erzeugt, dass die Homogenisierung von Daten die Homogenisierung von physischen Proben weitestgehend ersetzt. Dies ist nicht nur schnell, sondern auch smart in Bezug auf Industrie 4.0.

So lassen sich Zement-, Stahl- aber auch viele weitere Produktions- und Verarbeitungsprozesse punktgenau und in-situ anhand von präzisen Analysewerten einstellen. Nicht benötigtes Material muss nicht eingekauft, nicht erhitzt und ggf. am Ende auch nicht als Beiprodukt verkauft oder teuer entsorgt werden.

Konzeption zur thermischen Vorbehandlung von Li-Batteriezellen für Anwendungsfälle aus der Elektromobilität

Autoren:	Jäckel, H.-G.; Alipour, F.; Lieberwirth, H.
Referent:	Dr. H.-Georg Jäckel
E-Mail-Adresse:	hjaeckel(at)iart.tu-freiberg.de

Ein Großteil der Schwierigkeiten bei der mechanischen Aufbereitung der Li-Batteriezellen ergibt sich aus den Gefährdungspotentialen, die durch die enthaltenen Elektrolytkomponenten (Lösungsmittel, Leitsalze, Additive) hervorgerufen werden. Eine besondere Rolle spielen hierbei die Lösungsmittel, die z.T. bereits bei Umgebungstemperatur verdampfen, mit der Umgebungsluft zündfähige Gemische bilden und damit für die Brandgefährdungen sowie einen Teil der Geruchsbelästigungen verantwortlich sind. Um die Gefährdungen auszuschalten, müssen technische Recyclinganlagen (z.B. Fa. *Düsenfeld/Wendenburg*) während der Zerkleinerung aufwändig mit Stickstoff gespült werden. Erst im Anschluss erfolgt eine Vakuumtrocknung zur Extraktion der enthaltenen Lösungsmittel. Problematisch ist hierbei, dass die besonders leicht entzündlichen Lösungsmittel im kontinuierlichen Betrieb der Aufbereitungsanlage abgetrennt werden müssen. Dies stellt ungewöhnlich hohe Anforderungen an den Brand- und Explosionsschutz, speziell an die Kapselung der relevanten Anlagenteile.

Der Ansatz des IART der TU Bergakademie Freiberg geht demgegenüber davon aus, dass eine Abtrennung insbesondere der leicht verdampflichen Lösungsmittel (< 130 °C) bereits vor der eigentlichen Aufbereitung deutlich sinnvoller sein könnte. Mit einer derartigen Niedrigtemperatur-Vorbehandlung könnten sich weitreichende Vorteile sowohl hinsichtlich der Sammellogistik, der Transportierbarkeit als auch bezüglich aufbereitungstechnischer Vereinfachungen ergeben.

Der Vortrag stellt ausgewählte Ergebnisse erster Untersuchungen mit einer Laboranlage zur thermischen Vorbehandlung von Li-Batteriezellen aus elektromobilen Anwendungen vor. Diese verdeutlichen, dass Li-Batteriezellen unterschiedlicher Hersteller sehr starke Unterschiede bezüglich ihres Verhaltens bei thermischer Beanspruchung aufweisen können. Daraus resultiert sowohl die Vorteilhaftigkeit einer Vorabtrennung der relevanten Lösungsmittel außerhalb einer laufenden Anlage als auch die Notwendigkeit entsprechender Voruntersuchungen im Labormaßstab.

Erzeugung und Aufbereitung einer Schwarzmassefraktion aus Lithium-Ionen-Batterien

Autoren:	Tony Lyon, Prof. Urs Peuker, TUBAF MVTAT
Referent:	Tony Lyon, TUBAF MVTAT
E-Mail-Adresse:	tony.lyon(at)mvtat.tu-freiberg.de

Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ist eine Schlüsseltechnologie um die darin verbauten Ressourcen mittel- und langfristig zu sichern. Die häufig als kritische Rohstoffe betrachteten Metalle wie Lithium, Nickel und Kobalt befinden sich in den sogenannten Aktivmaterialien der Batterie. Hierbei handelt es sich um die Beschichtungen der Anoden- und Kathodenfolie.

Es gibt grundlegend verschiedene Ansätze für das Recycling von LIB. Neben metallurgischen Prozessen gibt es auch die Möglichkeit einer mechanischen Aufbereitung. Hierbei ist es ein wesentliches Ziel den Verbund der unterschiedlichen Materialien der Batteriezelle aufzuschließen und die einzelnen Komponenten in verschiedenen Stoffkonzentrationen anzureichern. Dabei entsteht in der Regel immer eine Feinfraktion in der die Beschichtungen der Elektrodenfolien ausgetragen werden. Diese wird umgangssprachlich aufgrund ihrer Farbe meist Schwarzmasse genannt. Abhängig von der gewählten Prozessgestaltung und Vorbehandlung der Zellen kann diese Fraktion unterschiedliche Zusammensetzung haben und verschiedene Eigenschaften aufweisen, die auch nachfolgende Prozesse beeinflussen können.

Durch das Erzeugen der verschiedenen Konzentrate können in nachfolgenden Prozessen höhere stoffliche Recyclingquoten erzielt werden. Neben dieser Möglichkeit wird speziell für die Schwarzmasse ein weiteres Ziel verfolgt, der direkte Wiedereinsatz der Materialien. Dafür müssen diese mit einer Reinheit von nahezu 100 % vorliegen. Neben den wesentlichen Bestandteilen Graphit und einem Lithium-Mischoxid, liegen in der Schwarzmassefraktion auch noch verschiedene Additive, Binderbestandteile, Reste des Elektrolyten inklusive des Leitsalzes und dessen Abbauprodukte und Verunreinigungen aufgrund der Aufschlusszerkleinerung durch die anderen Batteriebestandteile vor.

Durch gezielte Sortierverfahren, die die verschiedenen Materialien aufgrund physikalischer Eigenschaften voneinander trennen, können wiederum Stoffkonzentrate erzeugt werden. Als potentielle Sortierverfahren können hier die Magnetscheidung, die Heterokoagulationstrennung und die Trennung nach der Dichte aufgeführt werden. Für alle Prozesse ist es essenziell, dass die Eigenschaftsunterschiede der Materialien hinreichend groß sind und diese vollständig Aufgeschlossen voneinander vorliegen.

Für die Trennung nach der Dichte zeigt sich, dass sich beispielsweise Verunreinigungen durch Kupfer potentiell gut abtrennen lassen, da dieses mit einer Dichte von $8,9 \text{ g/cm}^3$ ein hinreichend höheres spezifisches Gewicht wie die beiden Hauptbestandteile Graphit ($\approx 2,2 \text{ g/cm}^3$) und NMC ($\approx 4,6 \text{ g/cm}^3$ bei NMC111) aufweist. Auch zeigt NMC ein circa doppelt so hohes spezifisches Gewicht wie Graphit, was auch hier eine Sortierung ermöglicht. Eine Herausforderung zeigt sich noch in der Partikelgröße der aufgeschlossenen Partikel, da diese im unteren zweistelligen Mikrometerbereich liegt und damit nur wenige Verfahren wie beispielsweise Sortierzentrifugen überhaupt zur Sortierung in Frage kommen.

Entwicklung hydrometallurgischer Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Batterien am IFAD der TU Clausthal	
Autoren:	M. Sc. Johanna Köthe; M. Sc. Kirstin Schneider, Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann (TU Clausthal / IFAD)
Referentin:	M. Sc. Johanna Köthe TU Clausthal / IFAD
E-Mail-Adresse:	johanna.koethe(at)tu-clausthal.de

Durch die wachsende Zahl an Elektrofahrzeugen wird die Zahl an End-of-Life Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in naher Zukunft stark ansteigen. Das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD) der Technischen Universität (TU) Clausthal hat bereits in den 2000er Jahren angefangen sich mit dem Recycling von LIB zu beschäftigen. Hierbei sind stets der Wandel unterschiedlicher Zellgenerationen sowie die hiermit einhergehenden Herausforderungen an das Recycling berücksichtigt worden. Außerdem sind sowohl pyrometallurgische als auch hydrometallurgische Recycling-Routen betrachtet worden. Es wurden einige größere Projekte wie beispielsweise LiBRi (Entwicklung eines realisierbaren Recycling-Konzepts für Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge in Kooperation unter anderem mit den Firmen Umicore und Daimler) bearbeitet. Außerdem fanden weitere Untersuchungen statt, die unter anderem zu Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen zum Thema Recycling von Lithium-Eisenphosphat-Batterien führten. Mit der aus dem Projekt LithoRec hervorgegangenen Firma Duesenfeld entstanden weitere Kooperationen bei der Entwicklung eines hydrometallurgischen Aufbereitungsverfahrens zur Behandlung von Schwarzmasse. Projekte zur IT-basierten Stoffstromsteuerung (Projekt Recycling 4.0) folgten. Unter der Leitung des IFAD wurde gemeinsam mit Instituten der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der TU Braunschweig, der TU Bergakademie Freiberg und der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster das erste Recyclingprojekt im Rahmen des ProZell Clusters (Projekt InnoRec) aufgesetzt, dem eine Reihe weiterer Projekte im neuen Cluster greenBatt folgten. Das IFAD arbeitet mit einer größeren Zahl an Unternehmen im Hinblick auf die Weiterentwicklung und Umsetzung des Batterierecyclings zusammen.

Das Ziel der Batterie-Arbeitsgruppe am IFAD ist die Entwicklung von Recyclingprozessen im Rahmen einer zirkulären Batterieproduktion. Derzeit ist das Institut in sieben Forschungsprojekten im Batterierecycling aktiv. Hiervon sind vier im greenBatt Cluster des Bundesministeriums für Bildung und Forschung angesiedelt. Diese befassen sich mit der Aufbereitung von Schlacken aus der pyrometallurgischen Route (Projekt PyroLith), der Aufbereitung von Schwarzmasse aus einer mechanischen Vorbehandlung bis hin zur Laugung (Projekt LOWVOLMON), der Raffination von Laugungslösungen zur Erzeugung von Metallsalzen mit battery-grade Qualität (Projekt EVanBatter) und des Recyclings von Festkörperbatterien (S2taR).

Innerhalb der oben erwähnten Projekte LOWVOLMON und EVanBatter wird ein Gesamtverfahren zur Aufbereitung von Schwarzmasse entwickelt, welches vereinfacht dargestellt ausfolgenden drei Prozessschritten besteht: der mechanischen Vorbehandlung mittels Flotation, der Laugung der Flotationsprodukte sowie der Raffination der Laugungslösung. Ziel der Flotation ist es, das Graphit-reiche Anodenmaterial weitgehend vom Metall-dominierten Kathodenmaterial zu trennen. Nachfolgend wird die Graphit-reiche Fraktion einer milden Abreinigungs-laugung unterzogen, um anhaftende metallische Verunreinigungen zu entfernen. Die entstandene Laugungslösung kann als Teil des Vorlaufs für die Laugung der metallreichen Fraktion genutzt werden. Dieser Prozessschritt wird mehrstufig im Gegenstrom entwickelt. Ziel dieser Laugung ist die Erzeugung von hochkonzentrierten Multimetall-haltigen Lösungen. Diese werden anschließend unter anderem mittels Solventextraktion und Ionenaustausch an Harzen getrennt und separaten Raffinationsstufen zugeführt.

Zur Aufbereitung der Schwarzmasse von Lithium-Ionen-Batterien mittels Magnetscheidung

Autoren:	M. Sc., Stephan, Stuhr, UVR-FIA GmbH
Referent:	M. Sc., Stephan Stuhr
E-Mail-Adresse:	stuhr(at)uvr-fia.de

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind wiederaufladbare elektrochemische Energiespeicher, die bspw. in den Bereichen der Unterhaltungselektronik und Elektromobilität eingesetzt werden [1, 2]. Der Bedarf an LIBs in diesen Bereichen wird in den kommenden Jahren ansteigen. Mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 2-3 bzw. 8-10 Jahren werden somit in einer absehbaren Zukunft erhebliche Mengen an Lithium-Ionen-Alt-Batterien anfallen [3 bis 5]. Da diese die kritischen Rohstoffe Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit enthalten, wächst somit das Interesse und die Bedeutsamkeit die Lithium-Ionen-Alt-Batterien als Sekundärrohstoffquellen zu verwenden [6]. In der Recyclingkette von LIBs fällt während der mechanischen Aufbereitung die sogenannte Schwarzmasse als Produktstrom < 1 mm an [1, 5]. Die Schwarzmasse besteht hauptsächlich aus den Elektrodenmaterialien (Li-Metall-Oxid und Graphit) [7]. Die Schwarzmasse wird meist direkt in pyrometallurgischen und/oder hydrometallurgischen Prozessen weiterverarbeitet. Dabei gehen einige Wertstoffe wie bspw. der Graphit verloren [7]. Um diesen Wertstoffverlust entgegenzuwirken wird in dieser vorgestellten Arbeit die Magnetscheidung als ein Sortierprozess für die Schwarzmasse untersucht.

Die Untersuchungen werden anhand einer pyrolysierten Schwarzmasse mit den Aktivmaterialien NMC ($\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$), LCO (LiCoO_2) und Graphit durchgeführt. Die Pyrolyse stellt bei dem LIB-Recycling ein thermisches Deaktivierungsverfahren dar [1], bei dem ebenfalls eine Stoffwandlung erfolgt [8]. Dabei findet zwischen den vorher genannten Aktivmaterialien eine carbo-thermische Reduktion statt und es entstehen unter dem Verbrauch von Graphit die Pyrolyseprodukte NiO, MnO, CoO sowie metallisches Ni und Co. Die Quantitäten der entstehenden Pyrolyseprodukte und verbleibenden -edukte ist abhängig von der Temperatur, der Atmosphäre sowie der Dauer der Pyrolyse [8].

Anhand der Größenordnungen der magnetischen Suszeptibilität (Trennmerkmal) können NMC, NiO, MnO und CoO als schwachmagnetisch, das metallische Ni und Co als starkmagnetisch und der Graphit sowie LCO als nichtmagnetisch klassifiziert werden. Somit wird eine erfolgreiche Nassmagnetscheidung der pyrolysierten Schwarzmasse mit einer Partikelgröße < 90 μm in einem Hoch-Gradienten-Magnetscheider erwartet und mithilfe eines Labor-Kanister-Elektro-Magnetscheiders praktisch getestet. Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass die Matrixgröße und die Dispergierung einen Einfluss auf das Trennergebnis zeigen. Des Weiteren konnte bei den Laboruntersuchungen ein Graphitkonzentrat mit einem Wertstoffgehalt von 95-97 Ma.-% Kohlenstoff bei einem Wertstoffausbringen des Kohlenstoffs von 60-80 % erzeugt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Werner, D., Peuker, U. A. u. Mütze, T.: Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries. *Metals* 10 (2020) 3, S. 316
- [2] Rahimzei, E., Sann, K. u. Vogel, M.: Kompendium: Li-Ionen Batterie. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen, 2015. <https://www.dke.de/resource/blob/933404/3d80f2d93602ef58c6e28ade9be093cf/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf>, abgerufen am: 06.09.2021
- [3] Or, T., Gourley, S. W. D., Kaliyappan, K., Yu, A. u. Chen, Z.: Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. *Carbon Energy* 2 (2020) 1, S. 6–43
- [4] Zhang, W., Xu, C., He, W., Li, G. u. Huang, J.: A review on management of spent lithium ion batteries and strategy for resource recycling of all components from them. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 36 (2018) 2, S. 99–112
- [5] Vanderbruggen, A., Gugala, E., Blannin, R., Bachmann, K., Serna-Guerrero, R. u. Rudolph, M.: Automated mineralogy as a novel approach for the compositional and textural characterization of spent lithium-ion batteries. *Minerals Engineering* 169 (2021), S. 106924
- [6] Windisch-Kern, S., Holzer, A., Ponak, C., Nagovnak, P. u. Raupenstrauch, H.: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Herausforderungen und aktuelle Forschungsergebnisse. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 166 (2021) 3, S. 150–156
- [7] Buchert, M. u. Sutter, J.: Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität, Darmstadt 2020. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strategiepapier-Mercator-Recycling-Batterien.pdf>, abgerufen am: 27.06.2021
- [8] Lombardo, G.: Effects of pyrolysis and incineration on the chemical composition of Li-ion batteries and analysis of the by-products, Chalmers University of Technology Thesis for the degree of licentiate of engineering. Ghotenbur, Schweden 2019

Der COOL-Prozess - ein selektives Verfahren für das ganzheitliche Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	
Autoren:	Robert Mende, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Technische Chemie
Referent:	Robert Mende, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Technische Chemie
E-Mail-Adresse:	robert.mende(at)chemie.tu-freiberg.de

Während die Lithiumproduktion insbesondere durch den Wachstumsmarkt der Lithium-Ionen-Batterien in den vergangenen Jahren einen massiven Aufschwung erfahren hat, sind Recycling-Prozesse für Lithium-Ionen-Batterien noch nicht allgemein etabliert bzw. zielen bereits realisierte Prozesse auf die Rückgewinnung der Übergangsmetalle Cobalt und Nickel ab. Ohne Gefährdung der Gewinnung jener Metalle und im Sinne einer ganzheitlichen Verwertung von Lithium-Ionen-Batterien kann mittels des COOL-Prozesses („CO₂-Leaching“) unter bestimmten Prozessbedingungen Lithium vollständig aus gemahlene Batterie-Rückständen, sogenannter Schwarzmasse, mobilisiert werden.

Mit dem COOL-Prozess werden Schwarzmassen unterschiedlicher Zusammensetzung behandelt. Zentraler Prozessschritt ist hierbei eine Laugung der Schwarzmasse mit überkritischem CO₂ in Wasser. Die Laugung des Materials erfolgt hierbei selektiv, d.h. neben Lithium wird lediglich ein signifikanter Anteil des enthaltenen Aluminiums mobilisiert, während die ebenfalls enthaltenen Wertmetalle im festen Rückstand verbleiben und so einer weiteren Aufbereitung zur Verfügung stehen. Bei der nachfolgenden Aufkonzentrierung der lithiumhaltigen Laugungslösungen mittels monoselektiver Elektrodialyse wird anschließend das dreiwertige Aluminium, sowie in sehr geringem Umfang vorhandene, weitere Verunreinigungen abgetrennt. Aus der erhaltenen, nahezu reinen LiHCO₃-Lösung wird dann Li₂CO₃ durch Erhöhen der Temperatur gefällt.

Im konkreten Fall gelang es aus einer Schwarzmasse mit 3 Gew.-% Lithium mittels Versuchsplan, bei dem Temperatur, Verweilzeit und Fest-Flüssig-Verhältnis variiert wurden, je nach Parametersatz zwischen 53 % und 99 % des enthaltenen Lithiums zu mobilisieren. Im Falle der höchsten Mobilisierung wurde über den gesamten Prozess, also einschließlich nachfolgender Aufkonzentrierung und Fällung, 43 % des in der Schwarzmasse enthalten Lithiums als Li₂CO₃ mit einer Reinheit von 99,8 % gewonnen. Das so erhaltene battery-grade-Li₂CO₃ weist Primärproduktqualität auf und demonstriert somit, dass auch aus Sekundärrohstoffen hochqualitative Ausgangsstoffe für die Industrie gewonnen werden können.

Untersuchungen mit Schwarzmassen anderer Zusammensetzungen führten zu vergleichbaren Ergebnissen, sodass das Verfahren unabhängig von zukünftigen Entwicklungen in der LIB-Technik zum Recycling jener Batterien genutzt werden kann

Aktuelle Erkenntnisse bei der flotativen Aufbereitung von Schwarzsasse und Entwicklungen bei der Schwarzsassecharakterisierung mit den Methoden der Prozessmineralogie und Aufschlussanalytik	
Autoren:	Martin Rudolph ¹ , Anna Vanderbruggen ^{1,2,3} und Kai Bachmann ^{1,2} 1. Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e.V., Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Freiberg, Deutschland 2. Erzlabor Advanced Solutions GmbH, Freiberg, Deutschland 3. Aalto University, Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Helsinki, Finland
Referent:	Dr. Martin Rudolph HZDR-HIF
E-Mail-Adresse:	m.rudolph(at)hzdr.de

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) gehören zu den derzeit wichtigsten elektrochemischen Energiespeichersystemen für elektronische Mobilgeräte und Elektrofahrzeuge. Die wachsende weltweite Nachfrage nach LIBs geht mit einer Erhöhung des Bedarfs an Co, Mn, Ni, Li und Graphit einher. Diese Erhöhung der Nachfrage dieser Rohstoffe stellt eine besondere Herausforderung für den schon jetzt angespannten weltweiten Rohstoffmarkt dar, verbunden mit Versorgungsrisiken, Preisschwankungen und Marktmonopolen. Tatsächlich sind Co und natürlicher Graphit in Europa seit 2010 als kritische Rohstoffe (CRM) geführt, Li sowie Mn befinden sich an der Grenze der Kritikalität. Um potenziell die Kluft zwischen Angebot und Nachfrage zu verringern sowie die europäischen Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, hat das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Hierbei wird sich hauptsächlich auf die wertvollen Metalle wie Kobalt, Nickel und Lithium konzentriert. Allerdings gehen während des Recyclingprozesses erhebliche Mengen anderer Komponenten wie Elektrolyt, Separator oder Graphit verloren. So kann Graphit zum Beispiel während der pyrometallurgischen Behandlung entweder abgeschlackt oder als Reduktionsmittel verbraucht werden. Darüber hinaus gehen einige andere wertvolle Metalle wie Co in den Grobfraktionen durch einen zu geringen Aufschlussgrad an die Berge verloren. Aus diesem Grund müssen neue und umfassende LIB-Recyclingverfahren gefunden werden.

In dieser Studie werden wir auf die aktuellen Ergebnisse der Schwarzsasseaufbereitung und der Charakterisierung der Lithium-Ionen Batterie Recyclatströmen.

Bedeutung des Graphitrecyclings bei Lithium Ionen Batterien aus ökobilanzieller Sicht	
Autor:	Philipp Engels, M.Sc., Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) Nachhaltige Produktion & Life Cycle Engineering (TU Braunschweig)
Referent:	Philipp Engels, M.Sc
E-Mail-Adresse:	p.engels(at)tu-braunschweig.de

Durch den starken Zuwachs an Elektrofahrzeugen wächst der Rohstoffhunger drastisch. Graphit ist ein essenzielles Material in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Die Batterie eines Tesla Model S benötigt beispielsweise 54 kg Graphit. Die weltweite Nachfrage an Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien soll auf circa 1,9 Millionen Tonnen ansteigen für das Jahr 2028. Bis dahin wird davon ausgegangen, dass Graphit das dominierende Anodenmaterial bleibt.

Bis heute gibt es nur sehr wenige Datenquellen, die die Umweltwirkungen der Herstellung von synthetischem oder natürlichem Graphit ausreichend gut beschreiben. Insbesondere die Berücksichtigung von unterschiedlichen regionalen und technologischen Unterschieden und Effekten der Produktionsrouten fehlt. Auf der anderen Seite steigt das öffentliche Interesse unterschiedlicher Stakeholder nach Ökobilanzen (Life Cycle Assessments) von Elektrofahrzeugen und ihrer Batterien stetig an.

Die größte Schwäche dieser Life Cycle Assessments sind in erster Linie Unsicherheiten der Datensätze, die mit der Rohstoffgewinnung einhergehen. Hierbei zeigt sich insbesondere das Anodenmaterial Graphit als problematisch. Der Umwelteinfluss von Graphit wird in der bisherigen Literatur kaum betrachtet und meist unterschätzt, weil energieintensive Produktionsschritte vernachlässigt werden. Unsere Untersuchungen dagegen zeigen, dass beispielsweise die Produktion von natürlichem Graphit bis zu vierfach so hohe Treibhausgasemissionen verursacht als aktuelle Ökobilanzdatenbanken berichten.

Ein potenzieller Ansatz die drastischen Umweltwirkungen, die mit dem Einsatz von Anodengraphit einhergehen zu reduzieren, könnte das Graphitrecycling sein. Sollte es gelingen einen robusten, effizienten und skalierbaren Recyclingprozess von Graphit zu etablieren, könnte dies nicht nur einen positiven Einfluss auf die Ökobilanz haben, sondern die Rohstoffabhängigkeit von Ländern wie beispielsweise China stark zu reduzieren.

Um die Bedeutung des Graphitrecyclings herauszuarbeiten wird daher im Rahmen des Vortrags zunächst ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) von Lithium-Ionen-Batterien gegeben und die sogenannten umweltrelevanten Hot Spots identifiziert. Im Anschluss erfolgt eine Vertiefung in die Lieferkette am Beispiel der Materialien wie Lithium, Kobalt und Graphit. Im weiteren Verlauf werden die größten Treiber der Treibhausgasemissionen der Graphitproduktion gezeigt und die Motivation für ein Graphitrecycling herausgearbeitet. Abschließend wird ein kurzer Ausblick gegeben und das laufende Forschungsprojekt *„ecoLiga- Recycling und Resynthese von Kohlenstoffmaterialien aus Lithium- Batterien: Rückgewinnung, Aufbereitung, Wiedereinsatz und angepasstes Zelldesign“* vorgestellt.

Die Tagung 2022 soll am 10. und 11. November stattfinden.

Sie können Sie gern für einen Vortrag bewerben.

Das Formular und weitere Termine werden demnächst veröffentlicht.

Tagungsorganisation

UVR-FIA GmbH
Chemnitzer Str. 40
09599 Freiberg
Deutschland
Telefon: + 49 (0)3731 1621220
Fax: + 49 (0)3731 1621299
E-Mail: [tagung \(at\) uvr-fia.de](mailto:tagung@uvr-fia.de)

Wir bedanken uns auch der Gesellschaft für Verfahrenstechnik UVR-FIA e.V., dem HZDR-HIF und der TU Bergakademie für die freundliche Unterstützung bei der Ausrichtung der Tagung „Aufbereitung und Recycling 2021“.

Auf ein gesundes Wiedersehen im nächsten Jahr!