Olaf Holm • Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Daniel Goldmann • Bernd Friedrich

Recycling und Sekundär-Rohstoffe

Band 13

TK

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Olaf Holm • Elisabeth Thomé-Kozmiensky • Daniel Goldmann • Bernd Friedrich (Hrsg.):

Recycling und Sekundärrohstoffe – Band 13

ISBN 978-3-944310-51-0 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Olaf Holm
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2020

Redaktion und Lektorat:	Dr.-Ing. Olaf Holm
Erfassung und Layout:	Janin Burbott-Seidel, Martin Graß, Cordula Müller, Claudia Naumann-Deppe, Sarah Pietsch, Roland Richter, Gabi Spiegel, Ginette Teske, Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Druck:	Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

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

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

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

Vorwort

Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgehen, dass wir mit diesem nunmehr 13. Band unserer Schriftenreihe eine Anpassung des Namens vorgenommen haben. Wir haben im Titel den Begriff Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt. Dieser Begriff, der eng mit dem Recycling verbunden ist, hat sich nicht nur in der Breite durchgesetzt, Sekundärrohstoffe gewinnen auch zunehmend an Bedeutung im Hinblick auf die Ressourcensicherung. Die Wertstoffwende als zentrale Säule der Rohstoffwende ist eben auf Erzeugung und Einsatz von Sekundärrohstoffen angewiesen.

Klimawandel und massive Umweltprobleme, ausgelöst durch Vermüllung sowie Technologieentwicklungen, deren Umsetzung auf einer ausreichenden Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe beruht, sind nach wie vor die wesentlichen Treiber für Recycling, Gewinnung und Nutzung von Sekundärrohstoffen.

In diesem Kontext greift die Steuerung unserer Wirtschafssysteme hin zu einer echten Circular Economy weit über die bisherige klassische Kreislaufwirtschaft hinaus. Und wenn sich die EU-Kommission mit ihrem Ansatz, Europa bis 2050 zum ersten CO_2-neutralen Kontinent zu machen, durchsetzt, wird auch das Recycling eine zunehmend größere Rolle spielen müssen, denn fast immer lassen sich Rohstoffe / Grundstoffe / Werkstoffe CO_2-effizienter aus Abfällen als aus primären Rohstoffen gewinnen. Natürlich lässt sich durch Recycling allein der steigende Rohstoffbedarf nicht decken, aber einen wesentlichen Beitrag dazu werden Sekundärrohstoffe liefern.

Unsere Berliner Recycling- und Sekundärrohstoff-Konferenzreihe und mit ihr unsere Schriftenreihe Recycling und Sekundärrohstoffe will auch im Jahr 2020 breitbandig über aktuelle Entwicklungen informieren und so zum Diskurs zwischen Wirtschaft, Wissenschaft, Gesellschaft und Politik beizutragen.

Insofern haben wir entlang derzeit besonders wichtiger Aspekte eine strukturierte Auswahl an Themen getroffen, zu denen Sie die Textbeiträge im vorliegenden Buch finden.

Während die Themenfelder Kunststoffe, Metalle und Elektronikschrott Dauerläufer sind, hat das auch früher schon wichtige Thema Batterierecycling besonders an Aktualität gewonnen. Entsprechend viele Beiträge widmen sich daher dem Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien als Kernkomponente der Elektromobilität. Einen ähnlich starken Anstieg in der Bedeutung, wenn derzeit auch noch in relativ früher Phase, verzeichnen Digitalisierung und Robotik in der Kreislaufwirtschaft. Neue zukunftsweisende Ansätze werden präsentiert. Der Rahmen für alle Aktivitäten wird nach wie vor durch die Entwicklungen in Politik und Gesellschaft, die Rohstoffsituation und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abgesteckt, die Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft bedingen.

1. Die Rahmenbedingungen

Internationale Entwicklungen sowohl auf dem Primärrohstoffmarkt wie auf dem Recyclingsektor werden in Beiträgen der BGR bzw. der DERA von Dr. Gudrun Franken und Dr. Volker Steinbach zur *Bewertung von Risiken in Rohstofflieferketten – von der Konzeption bis zur Umsetzung* und von Frau Dr. Yun Schüler-Zhou zur *Einschränkung der Abfalleinfuhren in China und Auswirkungen auf den Recyclingmarkt* thematisiert.

Wie sich das auch vor dem Hintergrund politischer Zielvorgaben auf die Entwicklung der Circular Economy auswirkt und welche Rolle dabei Konsumenten, Handel und Produzenten spielen, wird in den Beiträgen von Prof. Christian Berg zum Thema *Warum wir nicht nachhaltiger sind und wie wir es werden können*, von Prof. Rainer Bunge mit der Aussage *Unser Kernproblem: Zu viel Geld!* und von Dr. Luis Tercero mit dem Beitrag *Zusammenhänge zwischen Circular Economy und Rohstoffkritikalität* adressiert.

Konkrete neue Herausforderungen aber auch Lösungsansätze stellen die Beiträge von Dr. Christian Hagelüken unter dem Titel *Business as unusual –Anforderungen für eine Kreislaufwirtschaft bei Lithium-Ionen Batterien*, von Dr. Martin Giersbeck zu *Urban Mining – nachhaltige Kunststofflösungen bei Bosch* und von Sibylle Meyer zu *Faircup: ein Best Practice Beispiel für angewandte Kreislaufwirtschaft* vor.

Möglichkeiten der Unterstützung der Politik und der Ministerien werden von Dr. Helmut Löwe vom BMBF anhand der Fördermaßnahme ReziProk *Innovative Geschäftsmodelle als Basis einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft* vorgestellt.

Was sich aus all dem für die gesamtwirtschaftlichen Betrachtungen ergibt, wird in einer Reihe von Beiträgen dargestellt. Auf *Betriebswirtschaftliche Konzepte zur integrierten Planung von Recycling und Produktion* gehen Christian Scheller und Prof. Thomas Spengler in ihren Ausführungen ein. In diesem Kontext fokussiert sich Frau Johanna Emmerich auf den *Einsatz von Post Consumer Kunststoffrezyklaten in der Elektronikbranche als erfolgsversprechendes Geschäftsmodell der Kreislaufwirtschaft*. Von besonderer Relevanz sind Metalle und deren Anwendungsfelder. Dr. Winfried Bulach berichtet über *NE-Metalle im anthropogenen Lager Deutschlands*. *Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz* thematisiert Prof. Mario Schmidt. In einer weiteren Fokussierung geht Prof. Peter Letmathe in seinem Beitrag auf *Elektroautos als Teil der Circular Economy: Tradeoffs und Werttreiber* ein.

2. Kunststoffe

Gerade im Kunststoffrecycling lassen die Herausforderungen nicht nach. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Sortiertechnik und des chemischen Recyclings aber auch der Kreislaufführung werden in vielfältigen Beiträgen aufgegriffen.

Thomas Obermeier setzt mit der *Systematisierung des Kunststoffrecyclings* den strukturellen Rahmen für die aktuellen Diskussionen und Entwicklungen. *Sind neue Materialien auch recyclingfähig?* fragt Frau Prof. Gilian Gerke. Frau Prof. Kerstin Kuchta geht auf die *Bewertung des Recyclingprozesses von Kunststoffverpackungen* ein.

Eine ganze Reihe an Beiträgen befasst sich mit Themen der Sortiertechnik aber auch dem nachgeschalteten chemischen Recycling. Frau Franziska Maisel berichtet über *Recycling von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikgeräten – wie optimale Partikelgrößen die Trennleistung hochwertiger Kunststoffe verbessern können*. Frau Charlotte Glassneck geht auf *Entwicklungen im Bereich der Sortiertechnologie – Closed-Loop-Recycling für Kunststoffe* ein. Erweitert wird dieser Ansatz durch *Tracer-Based Sorting als Querschnittstechnologie für die Kreislaufwirtschaft* von Prof. Dr. Jörg Woidasky und Jochen Moesslein.

Im Bereich des chemischen Recyclings bzw. der Umsetzung von Kunststoffen in andere Wertstoffe gibt Prof. Bernd Meyer einen Überblick über *Chemisches Recycling – aktueller Stand und Entwicklungen*, Wolfgang Hofer referiert über *ReOil – die Komplementierung im Recycling von Altkunststoffen* und Christian Haupts über die *Wertschöpfung durch CTC-Technologie*.

3. Metalle und Elektronikschrott

Eine ganze Reihe von Abfallströmen versorgt die Metallproduktion mit wertvollen Sekundärrohstoffen. Innovationen aus den Bereichen des Recyclings von Getränkedosen, Elektronikschrotten aber auch Stäuben, Pulvern und Schlämmen werden in diesem Jahr in den Fokus genommen.

Aus dem Gebiet des Recyclings von Aluminiumdosen berichten Tom Rosenhagen über *Nachhaltiges Recycling von Aluminium-Getränkedosen in einem vollintegrierten Aluminiumrecyclingwerk* und Jan Steglich über das *Verhalten von Mg-Si-reichen Phasen in Aluminiumdosenblechen und deren Einfluss auf die industrielle thermische Vorbehandlung*.

Beiträge aus dem Gebiet des Elektronikschrottrecyclings liefern Andreas Nolte mit *CENELEC 50625 zertifiziertes Recycling von Elektro- und Elektronikschrott bei Aurubis*, Dr. Rolf Degel mit *UrbanGold-Prozesse – effizientes Recycling von Elektronikschrotten*, Frau Laura Robert mit *Verbesserung des Recyclings von Haushaltskleingeräten im Hinblick auf strategische Metalle durch ein bestmögliches Behandlungs- und Zerlegesystem* sowie Frau Dr. Katrin Bokelmann mit *DISPLAY – Aufskalierung eines Prozesses zur Materialrückgewinnung aus Bildschirmgeräten und bestückten Leiterplatten*.

Eine künftig wesentliche Herausforderung wird auch das Recycling von PV-Modulen sein, nur wann und wo kommen diese zurück? Frau Kristine Sperlich widmet sich mit ihrem Beitrag *Where have all the Panels gone? – Verbesserung der Datenverfügbarkeit für die Kreislaufwirtschaft am Beispiel von PV-Modulen* dieser Frage.

Das Themengebiet *Aus Abfall wird Rohstoff: Verwertung metallhaltiger Schlämme, Pulver und Stäube* wird von Dr. Filipe Costa adressiert.

Letztlich ist für eine optimale Aufbereitung und Verwertung auch eine effiziente Charakterisierung der Materialien erforderlich, die eine Vorsortierung zulässt. Max Kölking liefert in seinem Beitrag *Charakterisierung von Metallschrott durch Multisensor-Systeme* ebenso Ansätze wie Dr. Christian Bohling mit *Metallrecycling 4.0 – Sortenreine Metallaufbereitung durch präzise quantitative Inline-Analyse*.

4. Batterien

Das Recycling von Batterien gewinnt vor dem Hintergrund der deutlich wachsenden Masse an Lithium-Ionen-Traktionsbatterien für die Elektromobilität immer mehr an Bedeutung. Bereits heute ist die Komplexität der Herausforderung hoch und sie wird weiter steigen. Daher sind eine Reihe an Fragestellungen zu den Rahmenbedingungen zu beleuchten, betriebliche und organisatorische Erfahrungen aus der Praxis sowie neueste verfahrenstechnische Entwicklungen zu berücksichtigen.

Stefan Kopp-Assenmacher erläutert in seinem Beitrag *Das Batteriegesetz – Aktuelle Rechtslage, Kritikpunkte und Änderungsvorhaben des BMU-Arbeitsentwurfes. Umgang und Lagerung von Lithiumbatterien* ist Gegenstand des Beitrags von Hans-Peter Fröhlich von der Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik während Thomas Nigl und Prof. Roland Pomberger das Thema *Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien* aufgreifen und die Frage aufwerfen, ob entsprechende Anlagen noch versicherbar sind. Aus Sicht eines Brandschutzunternehmens erläutert Wolfgang van Pels die *Herausforderung hinsichtlich der Brandschutztechnologien in Recyclinganlagen insbesondere bei der Verarbeitung von Li-Ionen-Traktionsbatterien*.

Führende, am Markt tätige Unternehmen aus dem Bereich Batterierecycling berichten von ihren Verfahren und Erfahrungen, so Dr. Reiner Sojka von der Firma ACCUREC über die *Sichere Aufbereitung von Lithium-basierten Batterien durch thermische Konditionierung* und Prof. Tobias Elwert sieht die Firma Duesenfeld *Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen-Batterien*.

Über *Aktuelle Trends in der Batterieentwicklung und die sich daraus ergebenden Herausforderungen für das Recycling* berichtet Prof. Arno Kwade. Frau Christin Stallmeister befasst sich mit dem *Early-Stage Li-Removal – Vermeidung von Lithiumverlusten im Zuge der Thermischen und Chemischen Recyclingrouten von Batterien*. Frau Eva Gerold thematisiert letztlich die *Pyrometallurgische Aufarbeitung von Zwischenprodukten beim Batterierecycling*.

5. Digitalisierung und Robotik

An Bedeutung zunehmen werden in Zukunft Digitalisierung und Robotik auch in der Kreislaufwirtschaft.

Hendrik Poschmann beleuchtet die *Robotergestützte Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft*. Prof. Reinhard Noll gibt einen Einblick in eine *Process Line for the Automated Dismantling and Sorting of Valuable Components from Printed Circuit Boards*.

Wie sich Stoff- und Komponentenströme mit Informationsströmen kombinieren und zu einer effizienteren Kreislaufwirtschaftsführung organisieren lassen, thematisieren Mathias Nippraschk mit Berichten zum Projekt *Recycling 4.0 – System Dynamics als Steuerungstool für Rohstoff- und Informationsflüsse in der Kreislaufwirtschaft* und Prof. Johannes Gottschling zu *Cloudbasiertem Rohstoffhandel unter besonderer Berücksichtigung datengetriebener Optimierung der Metallschmelze*.

Den nächsten Schritt in Richtung Circular Economy, der den Wandel von Produkt- zu Dienstleistungsangebot integriert und dabei Digitalisierung einsetzt, geht Florian Hansen mit seinem Beitrag *Modulare LED-Beleuchtungssysteme für Lighting-as-a-Service*.

6. Zum Abschluss

Wissenschaftliche Leitung und Programmkoordination der Veranstaltungsreihe Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz hoffen, auch in diesem Jahr ein gleichzeitig aktuelles und zukunftsweisendes Programm gestaltet zu haben, welches der gesamten Gemeinschaft des Recyclings in Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Politik Überblicke und Impulse geben kann. Die Beiträge zu diesem Tagungsband – sowie die lediglich auf der Konferenz gehaltenen Vorträge – , die von einer breiten Gemeinschaft an Partnern mit hoher Kompetenz gestaltet wurden geben Anlass, den Herausforderungen der Zukunft mit Optimismus entgegenzusehen.

Inhaltsverzeichnis

Rahmenbedingungen

Bewertung von Risiken in Rohstofflieferketten – von der Konzeption bis zur Umsetzung
Gudrun Franken, Volker Steinbach, Lucas Gilsbach, Konstantin Kühnel und Martin Erdmann 2

Einschränkung der Abfalleinfuhren in China und Auswirkungen auf den Recyclingmarkt – Beispiel Kupferschrott –
Yun Schüler-Zhou und Martin Schmitz 16

Warum wir nicht nachhaltiger sind und wie wir es werden können
Christian Berg 32

Unser Umweltproblem: Zu viel Geld!
Rainer Bunge 42

Zusammenhänge zwischen Circular Economy und Rohstoffkritikalität
Luis A. Tercero Espinoza 54

Business as Unusual – Anforderungen an eine Kreislaufwirtschaft von Lithium-Ionen-Batterien | Die Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)
Christian Hagelüken | Susanne Kadner und Reinhard von Wittken 62

Urban Mining – nachhaltige Kunststofflösungen bei Bosch
Martin Giersbeck, Stefan Apelt und Anika Harbord 82

FairCup: ein Best Practice Beispiel für angewandte Kreislaufwirtschaft
Sibylle Meyer und Meta Thurid Lotz 90

Innovative Geschäftsmodelle als Basis einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft – Die BMBF-Fördermaßnahme ReziProK –
Helmut Löwe 100

Betriebswirtschaftliche Konzepte zur integrierten Planung von Recycling und Produktion
Christian Scheller, Kerstin Schmidt und Thomas S. Spengler 114

Einsatz von Post Consumer Kunststoffrezyklaten in der Elektronikbranche als erfolgsversprechendes Geschäftsmodell der Kreislaufwirtschaft
Johanna Emmerich, Franziska Maisel, Gergana Dimitrova und Anton Berwald 128

NE-Metalle im anthropogenen Lager Deutschlands
Winfried Bulach, Daniel Bleher, Matthias Buchert und Felix Müller 142

Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz
Mario Schmidt, Philipp Schäfer und Nadine Rötzer 156

Elektroautos als Teil der Circular Economy: Tradeoffs und Werttreiber
Peter Letmathe, Bernd Friedrich, Achim Kampker und Uwe Sauer 172

Kunststoffe

Systematisierung des Kunststoffrecyclings
Thomas Obermeier und Isabelle Henkel 184

Sind neue Materialien auch Recyclingfähig? – Herausforderungen an die Sortierbarkeit von Verbundmaterialien und Abfall-Mischfraktionen
Gilian Gerke und Gunter Weißbach 210

Bewertung des Recyclingprozesses von Kunststoffverpackungen
Kerstin Kuchta 220

Recycling von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten – Wie optimale Partikelgrößen die Trennleistung hochwertiger Kunststoffe verbessern können
Franziska Maisel, Johanna Emmerich und Gergana Dimitrova 232

Entwicklungen im Bereich der Sortiertechnologie – Closed-Loop-Recycling für Kunststoffe
Charlotte Glassneck 248

Tracer-Based Sorting als Querschnittstechnologie für die Kreislaufwirtschaft
Jörg Woidasky, Johannes Gasde, Claus Lang-Koetz und Jochen Moesslein 256

Chemisches Recycling – Aktueller Stand und neue Entwicklungen
Patricio Mamani-Soliz, Ludwig Georg Seidl, Florian Keller, Roh Pin Lee und Bernd Meyer 268

ReOil – die Komplementierung im Recycling von Altkunststoffen
Wolfgang Hofer und Stefan Pirker 286

Wertschöpfung durch CTC-Technologie – nachhaltig, wirtschaftlich, dezentral umsetzbar
Christian Haupts 296

Metalle und Elektronikschrott

Nachhaltiges Recycling von Aluminium-Getränkedosen in einem vollintegrierten Aluminiumrecyclingwerk
Tom Rosenhagen und Anke Höbelmann 308

Verhalten von Mg-Si-reichen Phasen in Aluminiumdosenblechen und deren Einfluss auf die industrielle thermische Vorbehandlung
Jan Steglich, Christiane Matthies, Marcel Rosefort und Bernd Friedrich 324

CENELEC 50625 zertifiziertes Recycling von Elektro- und Elektronikschrotten bei Aurubis
Andreas Nolte 338

UrbanGold-Prozesse – effizientes Recycling von Elektronikschrotten
Rolf Degel 350

Verbesserung des Recyclings von Haushaltskleingeräten im Hinblick auf strategische Metalle durch ein bestmögliches Behandlungs- und Zerlegesystem
Laura Robert 366

DISPLAY Aufskalierung eines Prozesses zur Materialrückgewinnung aus Bildschirmgeräten und bestückten Leiterplatten
Katrin Bokelmann, Sven Grieger, Martin Schlummer, Wladislaw Benner und Malte Vogelgesang 380

Where have all the Panels gone? – Verbesserung der Datenverfügbarkeit für die Kreislaufwirtschaft am Beispiel von PV-Modulen
Kristine Sperlich, Paul Martin Mählitz, Michelle Wagner und Vera Susanne Rotter 394

Aus Abfall wird Rohstoff: Verwertung metallhaltiger Schlämme, Pulver und Stäube
Filipe Manjolinho Costa, Alia Smektala und Daniela Steidle 412

Charakterisierung von Metallschrott durch Multisensor-Systeme
Max Kölking, Sabine Flamme und Sigrid Hams 424

Metallrecycling 4.0 – Sortenreine Metallaufbereitung durch präzise quantitative Inline-Analyse
Christian Bohling und Madlen Chao 444

Batterien

Das Batteriegesetz – Aktuelle Rechtslage, Kritikpunkte und Änderungsvorhaben des BMU-Arbeitsentwurfes
Stefan Kopp-Assenmacher 458

Umgang und Lagerung von Lithiumbatterien
Hans-Peter Fröhlich 474

Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterien: Sind unsere Anlagen noch versicherbar?
Thomas Nigl und Roland Pomberger 482

Herausforderung hinsichtlich der Brandschutztechnologien in Recyclinganlagen insbesondere bei der Verarbeitung von Li-Ionen-Traktionsbatterien
Wolfgang van Pels..... 496

Sichere Aufbereitung von Lithium-basierten Batterien durch thermische Konditionierung
Reiner Thomas Sojka 506

Auf dem Weg zu einem geschlossenen Stoffkreislauf für Lithium-Ionen-Batterien
Tobias Elwert und Julia Frank 524

Aktuelle Trends in der Batterieentwicklung und die sich daraus ergebenden Herausforderungen für das Recycling
Stefan Doose, Julian Mayer und Arno Kwade 532

Early-Stage Li-Removal – Vermeidung von Lithiumverlusten im Zuge der Thermischen und Chemischen Recyclingrouten von Batterien –
Christin Stallmeister, Lilian Schwich und Bernd Friedrich 544

Pyrometallurgische Aufarbeitung von Zwischenprodukten beim Batterierecycling
Eva Gerold, Stefan Luidold, Christian Bartelme und Helmut Antrekowitsch 558

Digitalisierung und Robotik

Robotergestützte Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft
Hendrik Poschmann, Holger Brüggemann und Daniel Goldmann 570

Process Line for the Automated Dismantling and Sorting of Valuable Components from Printed Circuit Boards
Reinhard Noll, Maik Bergamos, Klaus Bergmann, Holger Brumm, Marcus Eschen, Cord Fricke-Begemann, Tadeusz Gorewoda, Joachim Makowe, José Saenz, Frederik Schreckenberg, Alice Tori and Filippo Veglia 587

Recycling 4.0 – System Dynamics als Steuerungstool für Rohstoff- und Informationsflüsse in der Kreislaufwirtschaft
Mathias Nippraschk und Daniel Goldmann 610

Cloudbasierter Rohstoffhandel unter besonderer Berücksichtigung datengetriebener Optimierung der Metallschmelze
Johannes Gottschling, Caroline Biedermann, Dierk Hartmann und Annika Tonnius 624

Modulare LED-Beleuchtungssysteme für Lighting-as-a-Service
Florian Hansen und Jan Henning Seelig 636

Dank 651

Autorenverzeichnis 655

Inserentenverzeichnis 660

Schlagwortverzeichnis 665