

# Einsatz von End-of-Life-Schrotten zur Herstellung von hochbeanspruchten Aluminiumschmiedeteilen für die Automobilindustrie



Nachhaltiger und kosteneffizienter Leichtbau gehört zu den zentralen Herausforderungen im Bereich der Mobilität. Die konsequente Umsetzung von Leichtbaukonzepten in Mobilitätsanwendungen führt zu einer Absenkung des streckenspezifischen Energieverbrauchs, insbesondere bei den teil- oder vollelektrischen Fahrzeugen. Der Vorteil des Einsatzes von aluminiumbasierten Leichtbaukonzepten in hochbelasteten Bauteilen, wie beispielsweise Achskomponenten und Fahrzeugstrukturen, wird technologisch bereits genutzt, ist allerdings derzeit meist aus Kostengründen auf hochpreisige Fahrzeugklassen beschränkt. Zugleich muss berücksichtigt werden, dass bei der Herstellung dieser Leichtbaukomponenten durch Strangpressen und/oder Schmieden aufgrund des bislang überwiegenden Einsatzes von Primäraluminiumlegierungen große Mengen an Treibhausgasen entstehen. Zukunftsfähige automobiler Leichtbaukonzepte müssen daher nicht nur die hohen technologischen Anforderungen erfüllen, sondern sie müssen insbesondere auch klimaschonend und nachhaltig sein.

## AUTOREN



**Dr.-Ing. Thomas Witulski**

ist Leiter Werkstoff- und Prozessentwicklung bei der Otto Fuchs KG in Meinerzhagen



**Edwin Büchter**

ist geschäftsführender Gesellschafter der Clean-Lasersysteme GmbH in Herzogenrath



**Dr. Donatus Halpaap**

ist Mitarbeiter Forschung und Entwicklung bei der cleansort GmbH in Rösraath



**Dr.-Ing. Bernd Koch**

ist Projektmanager Werkstoffinnovation bei der Matplus GmbH in Wuppertal



**Dr.-Ing. Marcel Rosefort**

ist Leiter Forschung und Entwicklung bei der TRIMET Aluminium SE in Essen



**Dominik Steinacker**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Allgemeine Werkstoffeigenschaften (WWI) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)



**Priv.-Doz. Dr.-Ing. Heinz Werner Höppel**

ist Gruppenleiter am Lehrstuhl Allgemeine Werkstoffeigenschaften (WWI) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)



**Dr.-Ing. Anton Stich**

ist Fachexperte in der Technischen Entwicklung der AUDI AG in Ingolstadt

Bei der Beurteilung der Ressourceneffizienz und des CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzials darf nicht nur der betriebsbedingte Ausstoß an CO<sub>2</sub> betrachtet werden, sondern es müssen auch die herstellungsbedingten Emissionen der Strukturkomponenten, der Ressourcenverbrauch und die Nachhaltigkeit gesamtheitlich bewertet werden. In diesem Zusammenhang rücken Sekundäraluminiumlegierungen in den Fokus, da diese Legierungen es erlauben, bis zu 95 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber Primärmaterial einzusparen.

Ziel des im Folgenden beschriebenen Verbundprojekts „Green-Al-Light“; ist die Entwicklung und Erprobung von neuen Sekundär-Knetlegierungen zur Herstellung von hochbelasteten Aluminiumschmiedeteilen. In diesem Projekt haben sich industrielle und universitäre Partner zusammengeschlossen, die die gesamte Prozesskette von der Sortierung der Schrotte über das Gießen, Schmieden, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Anwendung im Automobil abdecken (Bild 1).

## SORTIEREN VON END-OF-LIFE-(EOL)-SCHROTTEN

Im Hinblick auf die Sortier- und Kosteneffizienz bildet die Weiterentwicklung der Sortiertechnologie für EoL-Aluminiumschrotte auf Basis der LIBS (Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy) einen Schwerpunkt. Das LIBS-Verfahren ist eine Variante der Atomemissionsspektroskopie, bei der der Strahl eines Lasers hoher Intensität auf das zu analysierende Material fokussiert wird, wodurch dieses im oberflächennahen Bereich verdampft und ionisiert wird. Das entstehende Plasma entsendet Licht, dessen Spektrum einem charakteristischen Fingerabdruck der enthaltenen Elemente entspricht.

Mittels chemometrischer Methoden kann quantitativ ermittelt werden, welche Mengen an Legierungselementen sich im Material befinden. Die LIBS-Technologie wurde dahingehend optimiert, dass verschmutzte, lackierte oder anderweitig oberflächenbehandelte EoL-Schrotte zuverlässig analysiert und mit industrietauglichen Durchsätzen von bis zu zehn Tonnen pro Stunde sortiert werden.



Bild 1: Projektstruktur und Projektpartner

Der hohe Materialdurchsatz wird durch den Einsatz von parallel arbeitenden „clean2sort“-Messmodulen erreicht (Bild 2). Durch den kaskadierten Aufbau sind die Förderbreite und damit der zu realisierende Durchsatz variabel. Momentan benötigen die clean2sort-Module 0,0064 Sekunden für die Vorreinigung und die quantitative Analyse eines Schrottstücks. Bei einer Förderbreite von 1,2 Meter, einer Fördergeschwindigkeit von 3 Meter pro Sekunde und fünf clean2sort-Modulen werden bis zu 100 Teile pro Sekunde analysiert und sortiert.

Die eigentliche Sortierung in zwei Fraktionen findet am Ende des Transportbands durch Luftimpulse statt. In einem Sortierversuch wurden zwei Tonnen aus geschreddertem Al-EoL-Mischschrotten (Korngröße 30 – 95 mm, Bild 3) Zielmaterial

mit den in Tabelle 1 aufgelisteten Legierungselementgehalten aussortiert.

Die per LIBS ermittelten Legierungselementgehalte in der sortierten Fraktion wurden im Folgenden durch die Analyse zweier Einschmelzversuche vom Verbundprojektpartner Trimet validiert. Die absoluten Abweichungen von LIBS-Sortierung und Schmelzanalyse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

In der nächsten Sortierkampagne werden geschredderte Audi-Fahrzeuge per LIBS-Technik gemäß den Legierungselementgrenzen einer neuen Recyclinglegierung sortiert, um aus dem sortierten Material Fahrwerkslenker und Räder mit hohem Recyclinganteil herzustellen.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
LIBS	0,51	0,17	0,017	0,063	0,48	0,024	0,031

Tabelle 1: LIBS-Durchschnittsanalysen in Massenprozent

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
Abweichung Schmelze 1	0,08	-0,05	-0,002	0,035	0,04	0,018	0,012
Abweichung Schmelze 2	0,03	-0,02	0,004	0,040	0,09	0,019	0,006

Tabelle 2: Absolute Abweichung der Schmelzanalyse von der mittleren LIBS-Analyse in Massenprozentpunkten



Bild 2: Fünf parallel arbeitende clean2sort LIBS-Messmodule (Förderbreite 1,2 m)

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die Förder- und Analysetechnik sowie die Algorithmen zur Bestimmung der Legierungselementgehalte des Sortierprodukts ständig optimiert – mit dem Ziel, den Austrag zu maximieren. So wird ein chargierfähiges Ready-to-melt-Produkt mit maximalem Schrotteinsatz erzeugt.

#### ENTWICKLUNG VON SEKUNDÄR-KNETLEGIERUNGEN

Ein Ziel des Projekts ist, eine neue „robuste Sekundär-Knetlegierung“ zu entwickeln. Durch das Einfließen von Schrotten in die Legierungserzeugung kommt es zu Verunreinigungen, welche die etablierten Legierungsgrenzen zum Beispiel der EN AW 6082 überschreiten. Die Verwendung von spezifischen Schrotten ist unwirtschaftlich, wirtschaftlich attraktive EoL-Schrotte enthalten größere Mengen an hoch siliziumhaltigen Gusslegierungen, unter anderem aus Haushaltsgeräten und Kraftfahrzeugen, und können daher bisher nicht genutzt werden. Die Herausforderung ist deshalb, die Toleranz der Legierungs- und Verunreinigungsgrenzen zu erproben und eine neue, angepasste Spezifikation zu entwickeln. Schwerpunkte der Erprobung sind dabei die Anreicherung der Elemente Silizium, Eisen und Kupfer und deren Auswirkungen auf Verarbeitung, statische und dynamische Festigkeit sowie Korrosionsverhalten.



Bild 3: Geschredderter und gesiebter Al-EoL-Schrott. Der weiße Balken entspricht 10 cm

Das Zielfenster für die Legierungserprobung wurde mit der Software JMat-Pro® berechnet [1]. Hierbei wurden die diskreten Stützpunkte so gewählt, dass sich voll faktoriell ca. 20.000 Legierungsberechnungen ergaben. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der Software Matplus EDA®, die es ermöglicht, Zielkonflikte aufzulösen [2]. Dazu werden aus der Fülle von berechneten kontinuierlichen Eigenschaftsverläufen pro Legierungsvariante diskrete Punkte extrahiert und mit Methoden der explorativen Datenanalyse ausgewertet. Mit Hilfe der in EDA verfügbaren Datenbank aller weltweit registrierten Al-Knetlegierungen können die Varianten mit unterschiedlichen Ziellegierungen korreliert werden [3].

Neben der Legierungszusammensetzung beeinflusst die eingesetzte Sortiertechnik die Kosten und die Qualität des Endprodukts erheblich. Können die Schrotte bereits nach der Entsorgung sortenrein (nach Legierungen getrennt) und ohne Anhaftungen oder bestehende Materialverbunde sortiert werden, so könnte die Wiederaufbereitung sehr viel effizienter erfolgen. Die Menge Abbrand, die beim erneuten Einschmelzen und der Rückführung in den Kreislauf entsteht, ist dabei Gegenspieler des effizienten Recyclings. Bei hohen Abbrandmengen, bedingt durch starke Verunreinigung mit ölhaltigen oder anderen organischen Stoffen, entstehen beispielsweise hohe

Durchlauf	Einsatzgewicht	Sekundärmaterial	Krätze	Abbrand
Durchschnitt	1,96 (100 %)	1,71 (87,2 %)	0,200 (10,2 %)	0,049 (2,6 %)

Tabelle 3: Aufschlüsselung der Anteile „direkt zu entnehmendes Sekundärmaterial“, entstehende Krätze und Abbrand bezogen auf das Einsatzgewicht. Alle Angaben in kg

Kosten im Zusammenhang mit Arbeits- und Umweltschutz bei der Verarbeitung. Viel direkter mindert der Abbrand allerdings die Einsatzmenge. Eine Fragestellung des Projekts ist, welchen Einfluss eine mögliche Verunreinigung durch Oxide, zugegeben als Partikel in Farben, oder durch andere chemische Verbindungen auf die Eigenschaften des zukünftigen Sekundärmaterials hat. Ebenso ist das Wissen über die zu erwartenden Mengen und die

Zusammensetzung der Krätze, die durch die Verunreinigung und bereits vorhandene Oxidation am Einsatzmaterial dominiert wird, von großer Wichtigkeit. Außerdem beeinflusst das Wechselspiel zwischen Volumen und Oberfläche des eingesetzten Schrotts im Wesentlichen die Mengen an rezyklierbarem Material, das direkt (das heißt ohne Aufbereitung der Krätze) entnommen und weiterverarbeitet werden kann.

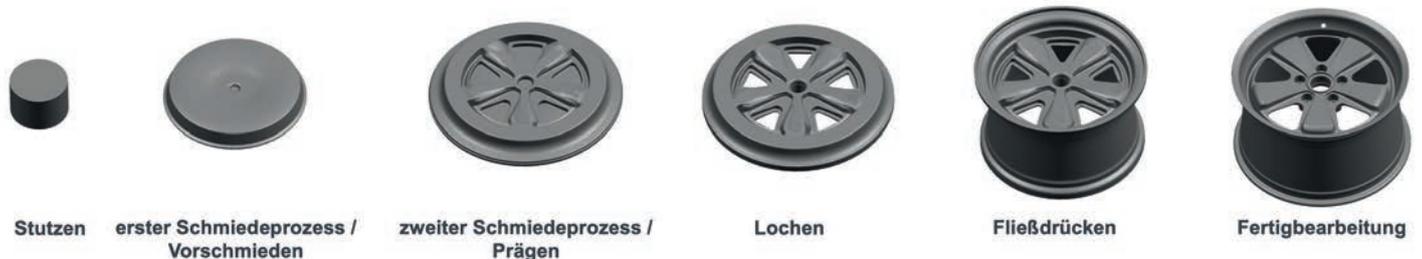


Bild 4: Umformschritte bei der Herstellung eines geschmiedeten Rads



Bild 5: Prozessrouten für die Herstellung von Rädern und Querlenkern aus Sekundärknetlegierungen

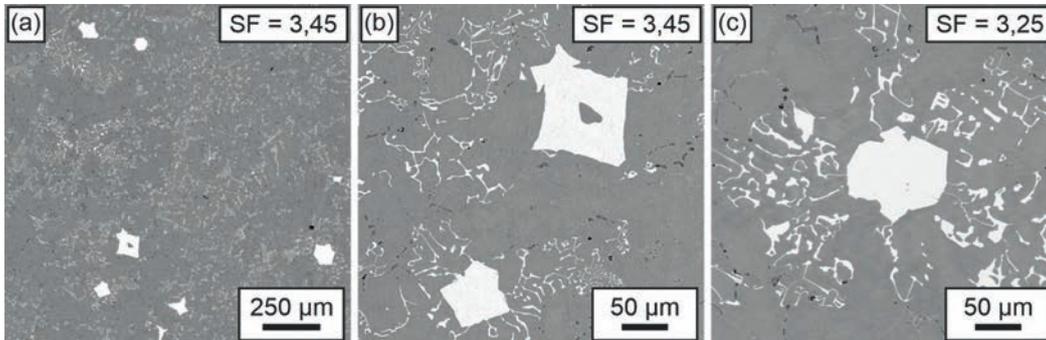


Bild 6: Sludge-Phasen in verschiedenen Experimentallegierungen auf Basis der EN AW 6082 mit unterschiedlichen Legierungsanteilen an Fe, Mn und Cr. a) Zahlreiche Sludge-Phasen in der Übersicht bei einem SF von 3,45. Grobe Sludge-Phasen umgeben von sogenannten Chinese-Skript-Phasen bei einem Segregationsfaktor SF von b) 3,45 beziehungsweise (c) 3,25 im Detail. REM-Aufnahmen

Zur Klärung dieser Fragestellungen hat TRIMET Aluminium SE Umschmelz-Versuche durchgeführt. In einem widerstandsbeheizten Laborofen wurden dafür zu Beginn repräsentative Mengen einer EoL-Schrottfraction umgeschmolzen, die von den Projektpartnern Clean-Lasersysteme und cleansort bereitgestellt wurden. Aus der entstandenen Sortierfraktion wurden drei statistische Mengen zu je zwei Kilogramm Einsatzgewicht entnommen und bei einer Temperatur von 750 °C umgeschmolzen. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der Umschmelzversuche zusammen.

1,2 Tonnen aus dem Sortierversuch bei cleansort wurden anschließend bei TRIMET Aluminium SE als Probemenge aufgeschmolzen. Die Ergebnisse daraus sind in Tabelle 2 genannt. Diese Versuchsmenge wurden auf der TRIMET-eigenen F&E-Stranggussanlage im Produktionsmaßstab von D = 207 mm abgegossen und für die Herstellung von Schmiedeteilen der Otto Fuchs KG zu Verfügung gestellt.

### SCHMIEDETEILFERTIGUNG

Im Rahmen des Projekts sollen die entwickelten Sekundärknetlegierungen bei der Otto Fuchs KG zu Schmiedeteilen verarbeitet werden. Dafür wurden zwei Bauteilklassen ausgewählt: Fahrwerkslenker und Schmiederäder.

Die Umformschritte beim Schmieden von Aluminiumrädern sind in Bild 4 dargestellt. Als Ausgangsmaterial wird ein Gussstutzen eingesetzt, der nach dem Aufheizen auf Schmiedetemperatur in einem automatisierten Schmiedeprozess die ersten drei

Umformschritte erfährt. Das Felgenbett wird im letzten Umformschritt mittels eines Drückwalzverfahrens geformt. Im Nachgang werden die mechanischen Eigenschaften durch Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern eingestellt. Abschließend werden die Räder in der Fertigbearbeitung zerspannt, poliert und lackiert.

Zur Herstellung von Querlenkern wird üblicherweise stranggepresstes Vormaterial eingesetzt, das auf vollautomatisierten Schmiedepressen in mehreren Stufen gesenkgeschmiedet und anschließend warmbehandelt wird. Um den Prozess effizienter zu gestalten und vor allem den Energieverbrauch zu reduzieren, werden immer mehr Lenker direkt aus der Schmiedehitze abgeschreckt und angelassen. Durch das sogenannte Pressabschrecken wird das erneute Aufheizen der Lenker auf Lösungsglühtemperatur vermieden. Dies reduziert den Energieverbrauch und damit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Zusätzlich lässt sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch horizontal stranggegossenes Vormaterial minimieren, welches direkt im passenden Durchmesser gegossen wird und ohne den Strangpressprozess auskommt. Somit entfallen der Strangpressprozess und die damit verbundene Erwärmung auf die notwendige Umformtemperatur (Bild 5).

### EIGENSCHAFTEN

Der Einsatz von Sekundäraluminiumlegierungen für hochbelastete Schmiedeteile bedingt eine kritische Betrachtung der Auswirkungen der legierungstechnischen und mikrostrukturellen

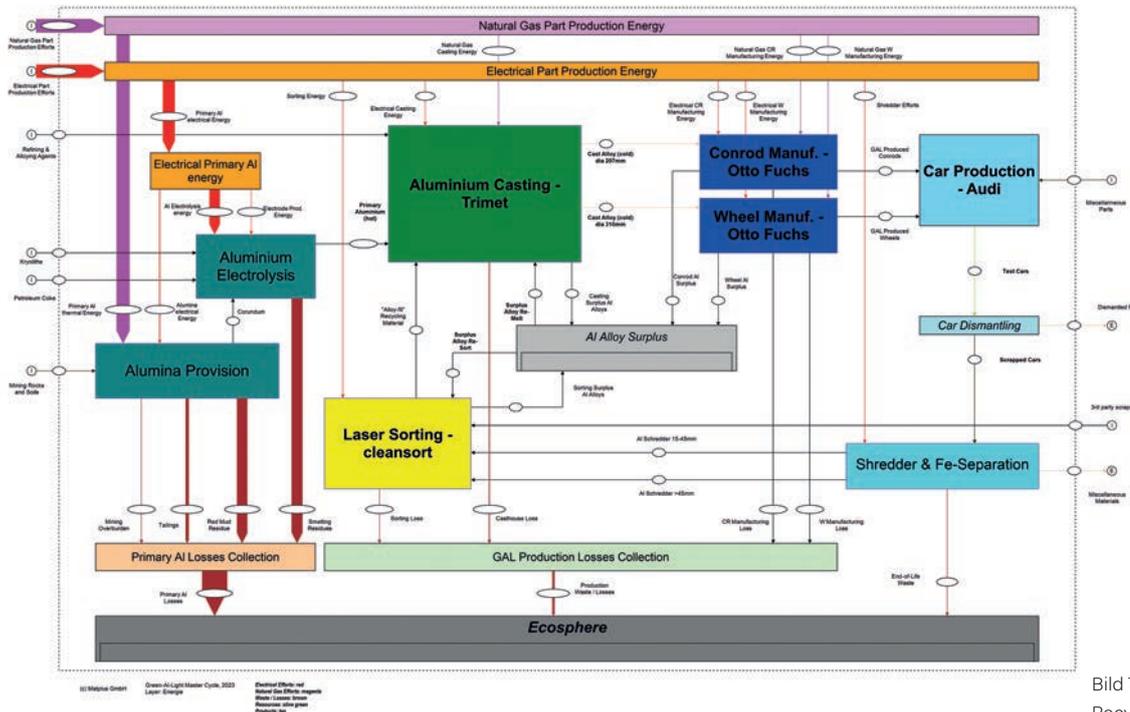


Bild 7: Energieflussanalyse des Recyclingkreislaufs, Bilder: Autoren

Veränderungen, die damit einhergehen. Dabei ist insbesondere zu beachten, welche Gehalte an „kritischen“ Elementen aus dem Sekundärlegierungsaufbereitungsprozess mitgeführt werden, die zu einer Verschlechterung der mechanischen und korrosiven Eigenschaften führen können. Als typische Elemente sind hier unter anderem Eisen, Kupfer, Nickel, Chrom und Zink zu nennen. Insbesondere der maximal tolerierbare Eisengehalt stellt dabei eine wichtige Designgröße dar. Die Löslichkeit von Eisen in Al-Gitter ist über den gesamten Temperaturbereich des Phasendiagramms sehr gering. Dadurch bilden sich bei der Herstellung des Materials bereits eisenreiche Erstarrungsphasen (Primärphasen), die jedoch in Abhängigkeit der Legierungselementanteile in ihrer Morphologie und Zusammensetzung stark variieren können und die sich nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen auswirken können.

Untersuchungen im Bereich von Al-Gusslegierungen [4 – 5] zeigen, dass es beispielsweise zur Bildung der sogenannten  $\beta$ -Phase  $Al_5FeSi$  kommen kann, die aufgrund ihrer nadelförmigen Morphologie die Duktilität des Werkstoffs herabsetzt. Diese Mikrostrukturentwicklung kann durch Zulegierung von Mangan effektiv unterdrückt werden, da stattdessen die Bildung der  $\alpha$ -Phase  $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$  bewirkt wird. Die  $\alpha$ -Phase besitzt im Gegensatz zur  $\beta$ -Phase ein polymorphes Erscheinungsbild und kann von chinesenschriftartigem, sechseckigem, polyedrischem (Bild 6a), globulitischem, sternförmigem und blockigem Erscheinungsbild sein [6 – 9].

Neben der lokalen chemischen Zusammensetzung beeinflusst auch die Erstarrungsgeschwindigkeit die sich einstel-

lende Morphologie. Die Kompensation des Eisenanteils durch Mangan ist allerdings nicht uneingeschränkt möglich, da es ab einem zu hohen Legierungsanteil zur Bildung von sogenannten intermetallischen Sludge-Phasen (Bild 6b) mit einer variablen Zusammensetzung kommt, die sich als  $\alpha-Al_x(Fe, Mn, Cr)_ySi_z$  beschreiben lässt, [7], welche die Duktilität und die Ermüdungslebensdauer des Werkstoffs ebenfalls negativ beeinflussen [4, 5, 10]. In diesem Zusammenhang wurde ein Segregationsfaktor (Sludge Factor SF) entwickelt [11, 12], der eine Abschätzung der Auftretswahrscheinlichkeit dieser groben intermetallischen Phasen erlaubt:

$$SF = 1 \times Fe/Gew. - \% + 2 \times Mn/Gew. - \% + 3 \times Cr/Gew. - \%$$

Dabei sollte nach [11] der SF, der für Druckgusslegierungen bestimmt wurde, maximal bei 1,8 liegen, um die Bildung von intermetallischen Sludge-Phasen zu vermeiden.

Auch im Fall der Knetlegierungen spielt der SF offensichtlich eine wichtige Rolle. So treten bei Experimentallegierungen bei einem SF von 3,25 beziehungsweise 3,45 ausgeprägte grobe Sludge-Phasen auf (Bild 6). Die Bildung von Sludge-Phasen ist aufgrund der negativen Auswirkung auf die Duktilität und das Verformungsverhalten unerwünscht.

Ein zentrales Thema des Verbundprojekts ist daher, die technologisch vertretbaren Grenzen der Anteile an verunreinigenden Legierungselementen zu ermitteln, die einerseits einen hohen Anteil von Sekundäraluminium erlauben, andererseits die hohen Anforderungen an das mechanische und korrosive Verhalten sicher erfüllen.

## FLUSSANALYSEN UND CO<sub>2</sub>-BILANZ

Der gesamte Prozess der Erzeugung von Bauteilen aus Sekundärlegierungen inklusive Schreddern der Schrotte, Sortieraufwänden, Gießen und Fertigung wird über eine erweiterte Stoff- und Energieflussanalyse abgebildet (Bild 7). Hierbei werden die deutlichen Vorteile des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Sekundärroute gegenüber der Verwendung von Primärmaterial quantifiziert. Die Integration in das System Matplus EDA® ermöglicht den Aufbau eines physikalisch konsistenten Modells der gesamten Prozesskette und erschließt damit Optimierungspotenziale: Völlig neue Verknüpfungen zwischen den Prozessparametern und Produkteigenschaften erlauben die Variation unterschiedlicher Szenarien mit den Möglichkeiten zur Minimierung von Zielfunktionen.



Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projekts „Green-Al-Light“ im Rahmen des Technologietransferprogramms Leichtbau.



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz**



- [1] Diekmann, U.: "Produktorientierte Werkstoffentwicklung," Metall, vol. 68, no. 11, S. 448 – 450, 2014
- [2] <https://matplus.eu/de/products/eda/>, abgerufen am 03.08.2023
- [3] <https://matplus.eu/de/products/databases/aa-international-alloy-designations-and-chemical-composition-limits-for-wrought-aluminum-and-wrought-aluminum-alloys/>, abgerufen am 08.08.2023
- [4] Bösch, D.; Pogatscher, S.; Hummel, M. et al.: Secondary Al-Si-Mg High-pressure Die Casting Alloys with Enhanced Ductility. Metall Mater Trans A 46, pp.1035 – 1045 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2700-8>
- [5] Bösch, D.: Entwicklung hochfester, duktiler Gusswerkstoffe auf Basis von Sekundäraluminium, Dissertation FAU Erl.-Nbg., ISBN 978-3-8439-2463-4
- [6] Taylor, J. A.: Iron-Containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys, Proceedings Materials Science, Vol. 1, 2012, S. 19 – 33, [doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.004](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.004)
- [7] Shabestari, S. G.: The effect of iron and manganese on the formation of intermetallic compounds in aluminum-silicon alloys, Mat. Sci. Eng. A 383, 2, 2004, pp. 289 – 298, [doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.022](https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.06.022)
- [8] Shouxun J; Wenchao, Y; Gao, F; Watson, D; Zhongyun F: Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si diecast alloys, Mat. Sci. Eng A 564, 2013, 130 – 139, [doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.095](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.095)
- [9] J.Y. Hwang, H.W. Doty, M.J. Kaufman, The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys, Mat. Sci. Eng. A 488, 1 – 2, 2008, 496-504, [doi.org/10.1016/j.msea.2007.12.026](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.12.026)
- [10] Ceschini, L; Morri, A; Toschi, S; Bjurenstedt, A.; Seifeddine, S.: Influence of Sludge Particles on the Fatigue Behavior of Al-Si-Cu Secondary Aluminium Casting Alloys. Metals 2018, 8, S. 268, <https://doi.org/10.3390/met8040268>
- [11] Jorstad, J.: Understanding Sludge. In: Die Casting Engineer, Vol. 11-12 (1986), pp. 30 – 36
- [12] Gobrecht, J.: Ségrégations par gravité du fer, du manganèse et du chrome dans les alliages aluminium-silicium de fonderie, Fonderie 367, pp. 171 – 173, 1977