

Der Alloy Calculator als Enabler für niederschwelligen Sekundär- aluminiumeinsatz



Inhalt

Einführung	4
Grundlegende Überlegungen und angewandte Methoden	7
Der Legierungsrechner in der Anwendung	9
Zusammenfassung und Ausblick	13
Literaturverzeichnis	14
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis	15

Impressum

Autoren

Robert Kleinhans,
Fraunhofer-Allianz autoMOBILproduktion

Niklas Klan,
Fraunhofer-Allianz autoMOBILproduktion

Dr.-Ing. Manuel Pintore,
Fraunhofer-Allianz autoMOBILproduktion

Satz und Design
Fraunhofer-Allianz autoMOBILproduktion &
FIR e. V. an der RWTH Aachen

Bildnachweise

Titel : © pinporn manosri – stock.adobe.com
S. 2: © Bernardo – stock.adobe.com
S. 5: © Kowit – stock.adobe.com
S. 6: © Thares2020 – stock.adobe.com
S. 8: © KI generiert über Adobe Firefly
S. 12-13: © KI generiert über Perplexity Pro

Lizenzbestimmung / Copyright

Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz „[Share alike – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International](#)“ (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht.



Projekt DiSerHub
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 55 | 52074 Aachen

E-Mail: projekt-DiSerHub@fir.rwth-aachen.de
diserhub.de

Stand: 12.2025

Einführung

Seit 2004 hat sich die globale Aluminiumproduktion bis 2024 auf über 73 Mio. t verdoppelt. Zusätzlich werden weitere 35 % sekundäres Aluminium weltweit verarbeitet¹. Dabei trägt der Aluminiumsektor zu 2 % zu den weltweiten Treibhausgasemissionen bei. Aluminium zeichnet sich durch eine geringe Dichte von 2,7 kg/dm³ aus, sowie durch eine sehr gute Verarbeitbarkeit und Witterungsbeständigkeit. Durch diese Eigenschaften wird auch künftig die Attraktivität von Aluminium als Konstruktionsmetall bewahrt. Die Herstellung von Primäraluminium ist jedoch extrem energieintensiv (ca. 167.748 MJ/t) im Vergleich zu Sekundäraluminium (ca. 11.160 MJ/t), sodass sich durch Verwendung von Letzterem der Energieverbrauch um bis zu 93 % senken lässt². Gleichzeitig belasten der Bauxitabbau und der dabei anfallende Rotschlamm Umwelt und Mensch gleichermaßen. Pro Kilogramm primäres Aluminium fallen etwa zwei Kilogramm Rotschlamm an³.

Um einen geschlossenen Kreislauf zu realisieren, ist ein Paradigmenwechsel nötig: Derzeit wird Schrott meist mit Schreddern zerkleinert und grob sortiert.

Aufgrund starker Verunreinigungen wie Eisen, Kupfer und Zink kommt es folglich häufig zur „Verdünnung“ mit Primärmaterial. Andernfalls könnten die Eigenschaften der Legierungen durch die Verunreinigungen beeinträchtigt werden⁴. Eine interne Prüfung zeigte, dass End of Life- (EoL) -Schrott mit Zinkgehalten > 1 % sich nur für eine Standardlegierung nach DIN EN 1706 (EN AC-46500) eignet. Ohne ausreichende Zumischung von Primärmetall droht Downgrading oder Downcycling. Prognostiziert wird ein Überschuss an Schrott, der weder in Guss noch in Knetlegierungen verwendet werden kann: ca. 4,2 Mt in 2030, bis zu 18,3 Mt in 2050^{5, 6}. Eine präzisere Sortierung zu einem früheren Zeitpunkt im Recyclingprozess, mithilfe fortschrittlicher Analytik und KI, gilt als Hebel, um diese Überschüsse zu vermeiden. Als aussichtsreiche Analysemethoden

¹ S. FALDO 2024

² S. SCHMITZ 2014

³ S. ALTENPOHL 2005

⁴ S. BEYER 2024

⁵ S. EYNDE 2022

⁶ S. MODARESI 2014



Abbildung 1: Zirkuläres Modell als Sinnbild für die anzustrebende Kreislaufwirtschaft (Quelle: © Fraunhofer IGCV)

dienen XRF (X-Ray Fluorescence) und LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), welche offline oder inline einsetzbar sind. LIBS ist aufgrund seiner Wirkweise zwar oberflächenbasiert, bei typischen monolithischen Gussteilen mit homogener Zusammensetzung ist dies jedoch kein Nachteil. Zukünftig soll die Demontage vor dem Zerkleinern intensiver vorangetrieben werden, beispielsweise bei Bauteilen wie Radträgern und Rädern (Felgen), wodurch ein Closed-Loop-Recycling ermöglicht wird (Abbildung 1).

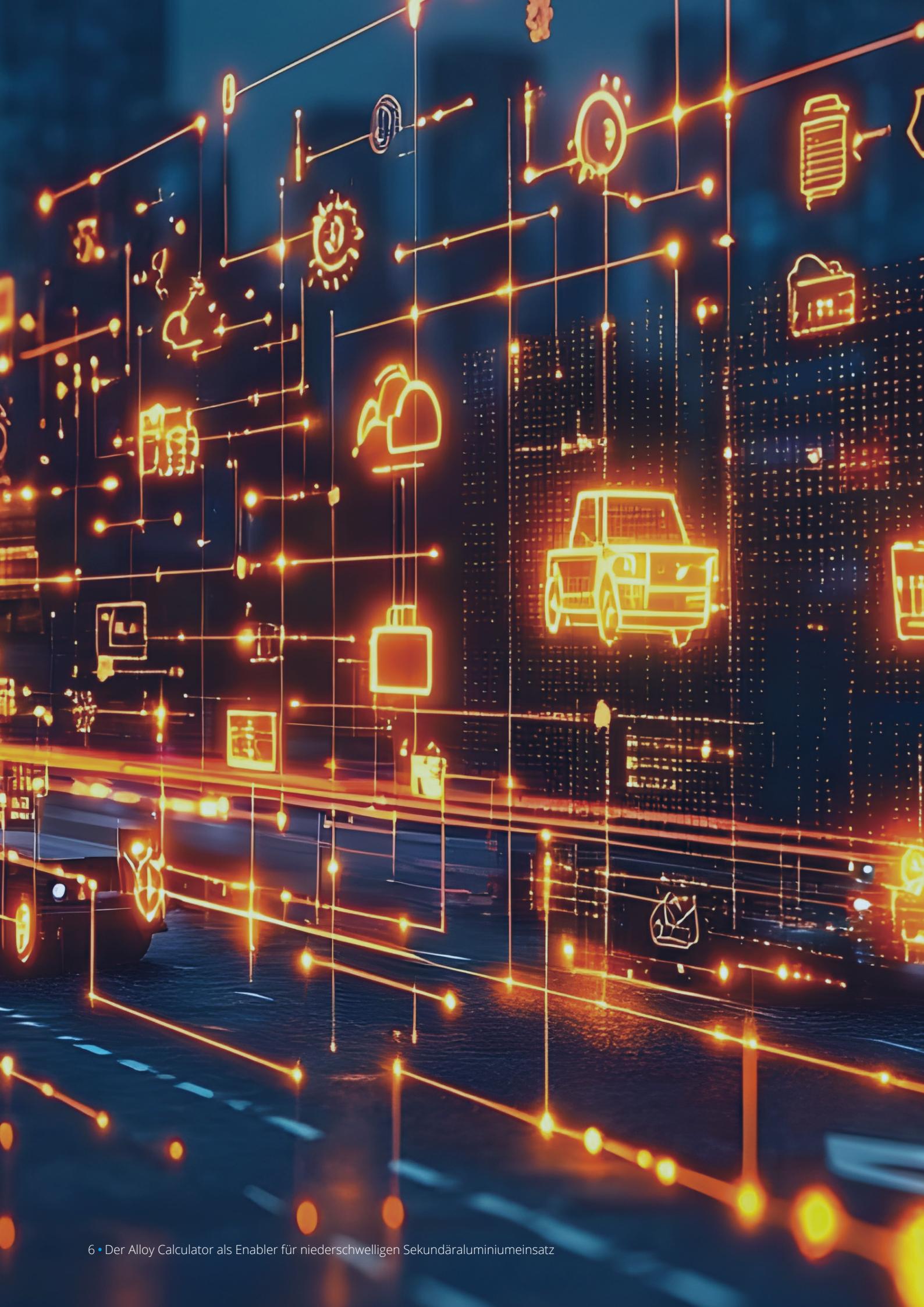
Forschungs- und Entwicklungsbedarf ergibt sich aus dem Mangel an fortschrittlichen computergestützten Werkzeugen, die numerische Vorhersagen auf Basis des verfügbaren und gut sortierten Schrottmaterials ermöglichen. Die Entwicklung benutzerfreundlicher Software, die auch von weniger erfahrenen Bedienern genutzt werden kann, verbessert die Schmelzprozesse erheblich und trägt dazu bei, hochleistungsfähige Ziellegierungen aus Schrotten zu erschmelzen. Gusslegierungen sind darauf ausgelegt, Bauteile zu bilden, die hohen Beanspruchungen standhalten müssen, wie Antriebs-Fahrwerks- oder Strukturbauenteile des Automobils. Aber auch in Schienenfahrzeugen oder im Schiffsbau finden sich vielerlei Anwendungen für hochwertige Gussteile aus Aluminium. Daher sollte der Ansatz genutzt werden, mit spezifischen Kalkulationswerkzeugen Gießereien dabei zu unterstützen, Recyclingstrategien zu optimieren und hohe Quali-

tätsstandards in der Legierungsproduktion zu wahren. Zudem wird die Vorhersagbarkeit hinsichtlich der Rohmaterialien verbessert und ermöglicht einen kosteneffizienten Schmelzprozess⁷.

Die daraus ableitbaren Herausforderungen können wie folgt beschrieben werden:

- Bestehende Systeme sind oft hochspezialisiert und verlangen einen hohen Grad an Expertise in der Bedienung.
- Oft liegt die Entwicklung derartiger Systeme längere Zeit zurück und spiegelt nicht den Stand der Technik wider.
- In den meisten Fällen werden Berechnungsprogramme nur für eisenbasierte Legierungen angeboten; andere metallische Legierungen, wie Aluminiumlegierungen, finden keine Berücksichtigung.
- Programme zur Berechnung der Legierungszusammensetzung werden in der Regel nur als Bestandteil umfassender Lösungen angeboten, was die Kosten erhöht und den Zugang erschwert.

⁷ S. HUSSAIN 2007



Grundlegende Überlegungen und angewandte Methoden

Mit der Entwicklung des Alloy Calculators wird insbesondere die Nichteisenindustrie adressiert. Als Grundprämissen galt zu Projektbeginn, dass die Software niederschwellig anwendbar und benutzerfreundlich sein soll. Die oberste Zielsetzung war, mit dem Tool für einen besseren Schrottausnutzungsgrad und einen effizienteren Schmelzbetrieb zu sorgen.

Daher fiel die Wahl auf eine webbasierte Lösung, um Tablets oder Smartphones innerhalb der Infrastruktur mit einbinden zu können. Darüber hinaus wird Akteuren entlang der Wirkungskette die Möglichkeit gegeben, barrierefrei über Datenbanken zu kollaborieren (Schrotthändler – Sortierbetriebe – Gießereien).

Die mathematische Grundlage für die Lösung des Problems liefert eine Massenbilanz der Legierungselemente, siehe Gleichung 1.

$$\begin{pmatrix} c_{1, \text{Si}} \\ \vdots \\ c_{1, \text{Al}} \end{pmatrix} \cdot x_1 + \begin{pmatrix} c_{2, \text{Si}} \\ \vdots \\ c_{2, \text{Al}} \end{pmatrix} \cdot \dots + \begin{pmatrix} c_{n, \text{Si}} \\ \vdots \\ c_{n, \text{Al}} \end{pmatrix} \cdot x_n = \begin{pmatrix} c_{\text{Ziel}, \text{Si}} \\ \vdots \\ c_{\text{Ziel}, \text{Al}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Gleichung 1 kann weiterführend zusammengefasst werden, sodass das typische Format eines linearen Gleichungssystems entsteht. Die Matrix C in Gleichung 2 beinhaltet alle Elementgehalte der Einsätze und der Vektor c_{Ziel} die Elementgehalte der Ziellegierung.

$$\begin{pmatrix} c_{1, \text{Si}} & \dots & c_{n, \text{Al}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1, \text{Al}} & \dots & c_{n, \text{Al}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{\text{Ziel}} \\ \vdots \\ c_{\text{Ziel}, \text{Al}} \end{pmatrix} \Leftrightarrow C \cdot x = c_{\text{Ziel}} \quad (2)$$

Zusätzlich muss Gleichung 3 aus Gründen der Massenerhaltung erfüllt sein, da die Gesamtmasse der

erzeugten Legierung der Summe der Einzelmassen der Einsätze entsprechen muss.

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (3)$$

Da für derartige Gleichungen typischerweise keine analytisch-exakte Lösung gefunden werden kann, wird nach einer bestmöglichen numerischen Annäherung des Problems gesucht. Gleichung 4 stellt das zugrunde liegende Minimierungsproblem dar, wobei das Quadrat der euklidischen Norm der Abweichung als Vergleichswert für den Fehler herangezogen wird.

$$\min \frac{1}{2} \|C \cdot x - c_{\text{Ziel}}\|^2 \quad (4)$$

Für den Nutzer ergibt sich folgender Ablauf:

- Bereitstellen einer Vielzahl von Ausgangslegierungen mit bekannten Anteilen der Legierungselemente
- Auswahl einer Ziellegierung und Festlegen der Gesamtmasse der Ziellegierung
- Optional Festlegen von Prioritäten einzelner Legierungselemente
- Festlegen von Mindesteinsatzmengen einzelner Ausgangsmaterialien
- Berechnung der Anteile der Ausgangslegierungen mit Hilfe eines Algorithmus

- Herstellung der Ziellegierung aus einer oder mehreren der bereitgestellten Ausgangslegierungen entsprechend der vom Algorithmus berechneten Anteile

Die Rechenweise sei hier als Resultat der Entwicklung des Tools erläutert:

Im Frontend wählt der Benutzer eine Teilmenge von Legierungen aus, woraufhin die dabei erfassten Legierungs-IDs über eine Application Programming Interface (API) an das Backend übermittelt werden. Im Backend werden diese IDs in die zugehörigen Basislegierungswerte (BLW) aufgelöst, wobei die BLW idealerweise als Mittelwert mehrerer Messungen interpretiert werden, um Rauschkomponenten zu reduzieren. Die aufgelösten BLW bilden zusammen mit der Ziellegierung (ZL) die Eingaben für die Berechnungseinheit im Backend, die daraufhin die optimale Mischung ermitteln soll. Die mathematische Modellierung zielt darauf ab, aus den BLW eine Faktorvariante $f: \mathbb{R}^n$ zu bestimmen, so dass das Modell den Vorgaben der gewünschten ZL möglichst genau entspricht und anschließende Mengenvorschläge der vorgegebenen Lagermaterialien im Endgemisch liefert.

Die zentrale Fehlerfunktion wird wahlweise von zwei unterschiedlichen Algorithmen, Non-Negative Least Squares (NNLS) oder Sequential Least Squares Programming (SLSQP) ausgeführt. Die Wahl der Algorithmen erfolgt im Hintergrund und ist abhängig von den Nutzereinstellungen. Diese kann wie folgt angeschrieben werden:

$$\text{Fehler(NNLS), (SLSQP)} = \sqrt{\sum_{n=1}^m \{p_n \left[\left(\sum_{i=0}^m c_{ni} x_i - c_{Ziel,n} \right) - t \right] \}^2} \quad (5)$$

wobei:

p_n Gewichtungsfaktor des n-ten Legierungs elements

$c_{n,i}$ Anteil des n-ten Legierungselements

x_i Entscheidungsvariable (0-1)

$c_{Ziel,n}$ Zielwert des n-ten Legierungselements

t Tendenzfaktor

innerhalb der geschwungenen Klammer findet die euklidische Norm Berücksichtigung.

Der Tendenzfaktor t nimmt bei der Anwendung von NNLS automatisch den Wert Null an.



Der Legierungsrechner in der Anwendung

Die Rechnung basiert auf den Vorgaben zu innerhalb des Systems verfügbaren Materialien, respektive Schrotten, Neumaterial, einzelnen Legierungselementen bzw. Vorlegierungen. Des Weiteren kann optional ein Vorgabewert für die Priorisierung von Elementen vorgenommen werden. Den Vorgabematerialien können Mindestaufgabemengen zugewiesen werden, die in der Berechnung berücksichtigt werden. Das für den Nutzer sichtbare Frontend ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Oberfläche ist intuitiv gestaltet, und kann über gängige Browser aufgerufen werden. Damit ist das Tool plattformunabhängig und kann auch auf Endgeräten wie Tablets oder Smartphones bedient werden. Die Daten werden zentral abgelegt und können, abhängig von

den jeweiligen Nutzerrechten über eine Historie abgerufen werden. Jede Berechnung ist individuell und wird systemseitig mit einer eindeutigen ID abgelegt, womit sie rückverfolgbar aus der Historie wieder aufgerufen werden können.

Im Folgenden lassen sich Tendenzen und Präferenzen zur Berechnung vorgeben. Diese geben die Präzision der Zielwerte vor, betreffend einzelne Legierungselemente. Das dazugehörige Fenster lässt sich mit dem Button „Settings“ öffnen. Standardmäßig sind neben dem Basiswerkstoff Aluminium 14 verschiedene Legierungselemente hinterlegt. Die Einstellungen lassen sich über einfache Regler vornehmen, siehe Abbildung 3.

The screenshot shows the user interface of the Alloy Calculator. At the top, there is a blue header bar with the text "Show History" on the right. Below this is a search bar with the placeholder "Ziellegierung vorgeben" and a dropdown menu "Select...". To the right of the search bar are buttons for "Show" (with value 100) and "Kg". The main content area has a green header "Einsatzmaterial vorgeben" with a dropdown menu "Select...". Below this are ten rows, each representing a material entry. Each row contains a "Primary" button with a dropdown menu "Select...", a "Show" button (with value 0), and a "Kg" button. At the bottom of the interface are buttons for "Settings", "Start Calculation", "Show", "Print", and a status bar showing "0 Kg Co² 0 %".

Abbildung 2: Ansicht des Frontend der browserbasierten Anwendung des Legierungsrechners (Quelle: © Fraunhofer IGCV)

Advanced Settings

X

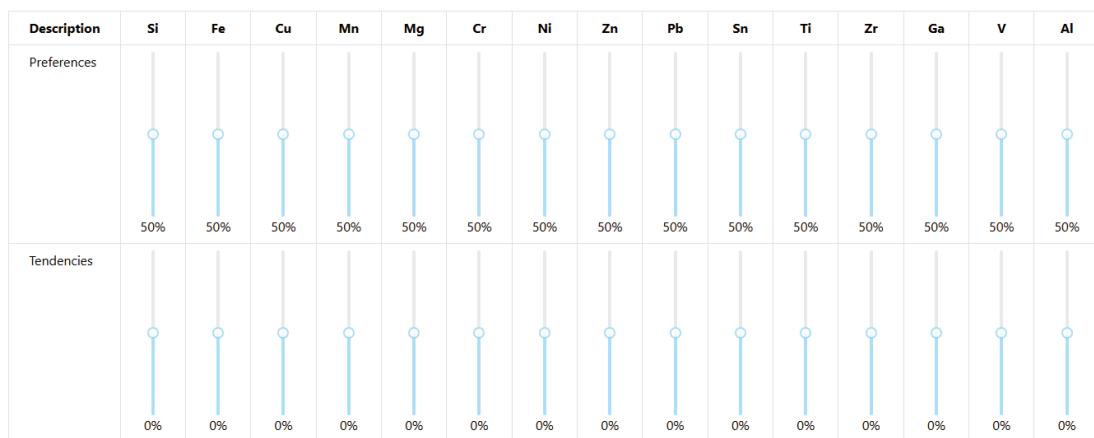


Abbildung 3: Möglichkeiten der Einstellungen Preferences/Tendencies; diese ermöglichen präzisere Berechnungsergebnisse bezogen auf einzelne Legierungselemente (Quelle: © Fraunhofer IGCV)

Anhand eines Beispiels soll die Funktionsfähigkeit des Legierungsrechners demonstriert werden. Dazu sollen die Konfigurationen aus Tabelle 1 zum Einsatz kommen.

Die beiden unterschiedlich agierenden Algorithmen werden, wie weiter oben beschrieben, durch die optionale Wahl von Präferenzen beschrieben und werden ebenso zur Anwendung kommen.

In diesem Beispiel wird auf die Vorwahl von Präferenzen verzichtet. Die Berech-

nung von genormten Legierungen bezieht sich stets auf die Mittelwerte der gemäß Norm zulässigen Gehalte. Für Maximalangaben, wie es für Verunreinigungen und Begleitelemente Usus ist, wird der Maximalwert herangezogen. In Abbildung 4 ist die Ausgabe der Berechnung zu sehen. Das Berechnungsprotokoll (Calculation Report) gibt die einzusetzenden Mengen der einzelnen gewählten Legierungen aus. Damit verbunden ist ein Soll-Ist Abgleich, welcher mittels Balkendiagramm visualisiert ist.

Rolle	Bezeichnung	genormte Bezeichnung	Präferenzen für Berechnung
Ziellegierung	AlSi5Cu1Mg	EN AC-45.300	keine
Einsatzmaterial	AlCu4Ti	EN AC-21.100	
	AlSi7Mg	EN AC-42.000	
	AlSi1Mg	EN AW-6082	
	AlCu4Mg1 AlSi1Mg	EN AW-2024	

Tabelle 1: Berechnungsbeispiel bei Legierungsrechner

Calculation Report

45300: AlSi5Cu1Mg

Material Composition

21100: AlCu4Ti	42000: AlSi7Mg	6082: AlSi1Mg0	2024: AlCu4Mg1
10.725 kg	69.587 kg	5.215 kg	13.993 kg
Total Mass: 99.519 kg			

Current match rate: 99.72%

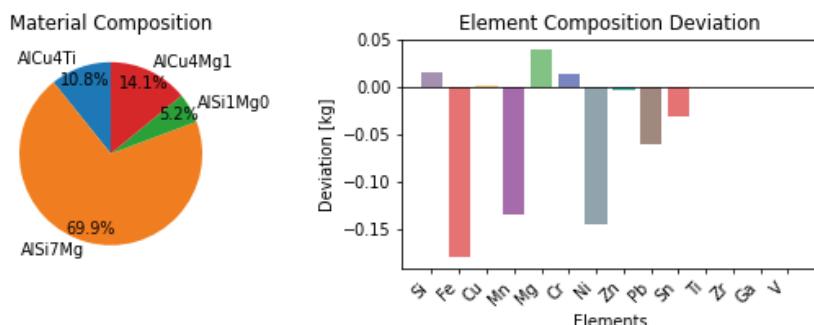


Abbildung 4: Ergebnis der Berechnung aus obigen Eingangsgrößen; Die Präzision ist bereits mit Standardbedingungen sehr hoch Empfehlungen werden angegeben, um beispielsweise mit Reinelementen die Treffsicherheit noch weiter zu erhöhen (Quelle: © Fraunhofer IGCV)

Im unteren Teil des Reports ist die Legierungszusammensetzung dargestellt, inklusive Sollwerten, welche der Datenbank entnommen ist. Die Darstellung unten lässt auf einen Blick erkennen, ob sich die errechnete Legierung innerhalb der Grenzen befindet. Der untere Teil des Be rechnungsprotokolls ist in Abbildung 5 zu sehen.

Wie in der Ausgabe zu erkennen, wurde die Einhaltung der Legierungskonfiguration laut Norm bereits mit den Standardeinstellungen erfüllt. Durch den Nutzer mögliche Einstellungen, wie z.B. Mindesteinsatzmengen von einzelnen Schrottsorten, würden zu einer veränderten chemischen Zusammensetzung führen und ggf. den Kupfergehalt auf einen überkritischen Wert ansteigen lassen.

Spurenelemente, welche oft unerwünscht sind, wie z.B. Eisen, werden für die Berechnung der Norm entnommen. Da hier Maximalwerte vorgegeben und für die Berechnung der Mittelwerte herangezogen werden, entspricht dieser Endwert nicht zwangsläufig der tatsächlichen Konzentration im Material. Oft weisen Gussteile wesentlich niedrigere Werte auf als in der Norm zulässig. Des Weiteren wurde in obiger Modellrechnung eine Legierung gewählt, welche ein höherer Eisengehalt zulässig ist als in den gewählten Ausgangslegierungen, was die Abweichung von 0,18 % erklärt. Der Wert für Magnesium liegt rechnerisch mit 0,04 % über dem Mittelwert der vorgegebenen Beimengung. Da sich der Wert innerhalb der Normgrenzen befindet, ist aber auch dies unkritisch. Außerdem neigt Magnesium aufgrund seiner

Details: 45300: AlSi5Cu1Mg and calculated values

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Zr	Ga	V
5.0	0.7	1.25	0.55	0.5	0.0	0.25	0.15	0.2	0.1	0.15	0.0	0.0	0.0
5.02	0.52	1.25	0.42	0.54	0.01	0.1	0.15	0.14	0.07	0.15	0.0	0.0	0.0
+0.02	-0.18	0.0	-0.13	+0.04	+0.01	-0.15	-0.0	-0.06	-0.03	0.0	0.0	0.0	0.0

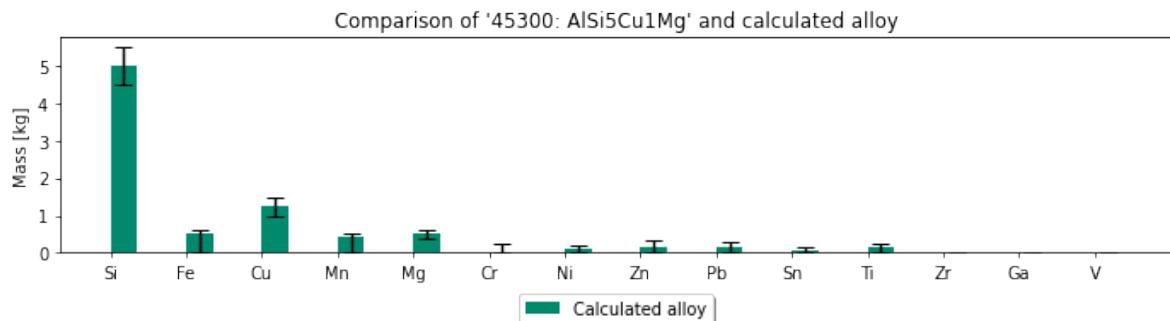


Abbildung 5: Unterer Teil des Berechnungsprotokolls mit Hilfe der zulässigen Grenzen aus der Norm (für Gusswerkstoffe DIN ISO 1706) (Quelle: © Fraunhofer IGCV)

erhöhten Sauerstoffaffinität zu moderatem Abbrand, weshalb eine etwas höhere Konzentration vorgehalten werden könnte. Da dieser Effekt jedoch ofenabhängig ist, wurde er nicht berücksichtigt.

Der Silizium- und Kupfergehalt erfährt eine exakte Berechnung. Derzeit können

gleichzeitig 10 verschiedene Einsatzmaterialien von der Software verarbeitet werden, wobei Werkstoffe aus der deutschen Normenreihe, sowohl Knet- als auch Gusslegierungen eingepflegt sind. Die Datenbanken sind frei erweiterbar und über eine Backend-GUI zugänglich.



Zusammenfassung und Ausblick

Der Alloy Calculator ist eine webbasierte Lösung zur Optimierung der Legierungszusammensetzung aus verfügbaren Ausgangslagen. Kernziel ist es, aus bestehenden Legierungen eine Ziellegierung unter Berücksichtigung von Normen und Randbedingungen zu erzeugen, ohne Downgrading zu riskieren. Die Lösung basiert auf einer Massenbilanz- bzw. linearen-Gleichungssystem-Logik und minimiert die Abweichung der gemischten Eingaben von der gewünschten Zielzusammensetzung. Anwender definieren Ausgangslegierungen, Ziellegierung, Prioritäten und optionale Mindesteinsätze; der Rechner bestimmt die passenden Anteile der Ausgangslager und erstellt ein Berechnungsprotokoll sowie Berichte.

Der Benutzer greift über ein benutzerfreundliches Frontend auf den Rechner zu, wählt Legierungen aus, setzt Ziellegierung und Randbedingungen und übermittelt Prioritäten. Im Backend werden die BLW-Werte (Basislegierungswerte) aus Messdaten extrahiert und gemittelt, um die Eingaben zu stabilisieren. Eine API verbindet Frontend und Optimierer, der die Anteile der Ausgangslagen ermittelt und die Ziellegierung zusammensetzt. Die Lösung nutzt

wahlweise NNLS oder SLSQP, um eine möglichst genaue Mischintention zu erreichen, und liefert neben den Anteilen ein Berechnungsprotokoll sowie einen Bericht zur Nachvollziehbarkeit. Analytik-Tools wie XRF und LIBS können offline oder inline eingesetzt werden, um Schrottmaterialien zu bewerten und die Sortierung zu unterstützen.

Zukünftig soll der Rechner betrieblichen Abläufen angepasst werden. Dazu werden erweiterte Legierungsdatenbanken und verbesserte KI-gestützte Vorschläge zur Sortierung,

Materialauswahl und Qualitätsbewertung mit einbezogen. Eine Standardisierung der Datenaustauschformate sowie eine stärkere Integration in industrielle Arbeitsabläufe sind geplant, um Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Effizienz im Closed-Loop-Recycling weiter zu erhöhen. Über empirisch ermittelte Zusammenhänge können zusätzliche Kriterien berücksichtigt werden, nebst der Priorisierung eines optimierten CO₂-Footprints. Langfristig sollen KI-gestützte Optimierer und Echtzeit-Feedback die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Mischvorschläge weiter verbessern.



Der Alloy Calculator als Enabler für niederschwellige Sekundäraluminiumeinsatz • 13

Literaturverzeichnis

FALDO (2024). Nina Faldo and Miles Prosser. Primary Aluminium Production: Date of Issue: 20 June 2024 URL: <https://inter-national-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-power-consumption-by-country/>. London, 2024. (visited on 11/27/2024).

SCHMITZ (2014). Christoph Schmitz, ed. Handbook of aluminium recycling: Mechanical preparation, metallurgical processing, heat treatment: page 29-30. 2. ed. Edition heat processing. Essen: Vulkan-Verl., 2014. ISBN: 9783802729706.

ALTENPOHL (2005). Dieter G. Altenpohl. Aluminium von innen, page 10: Das Profil eines modernen Metalles. 5. Aufl., unveränd. Nachdr. Düsseldorf: Aluminium-Verl., 2005. ISBN: 3870172355.

BEYER (2024). T. Beyer et al. "Influence of Increased Fe, Cu, and Zn Concentrations on Phase Formation in Aluminum A356 (AlSi7Mg0.3) Alloy". In: Light Metals 2024. Ed. by Samuel Wagstaff. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 234-240. ISBN: 978-3-031-50307-8. DOI: 10.1007/978-3-031-50308-5{\textunderscore}29.

EYNDE (2022). Simon van den Eynde et al. "Forecasting global aluminium flows to demonstrate the need for improved sorting and recycling methods". In: Waste management (New York, N.Y.) 137 (2022), pp. 231-240. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.019.

MODARESI (2014). Roja Modaresi, Amund N. Løvik, and Daniel B. Müller. "Component- and Alloy-Specific Modeling for Evaluating Aluminum Recycling Strategies for Vehicles". In: JOM 66.11 (2014), pp. 2262-2271. ISSN: 1047-4838. DOI: 10.1007/s11837-014-0900-8.

HUSSAIN(2007). Luay B. Hussain and Issa A. Ali Hakim. "Recycling and Formulation of Aluminum Scrap via Mass Balance Die Casting and Forming". In: Materials and Manufacturing Processes 22.7-8 (2007), pp. 916-921. ISSN: 1042-6914. DOI: 10.1080/10426910701451796.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zirkuläres Modell als Sinnbild für die anzustrebende Kreislaufwirtschaft.....	4
Abbildung 2: Ansicht des Frontend der browserbasierten Anwendung des Legierungsrechners	9
Abbildung 3: Möglichkeiten der Einstellungen Preferences/Tendencies; diese ermöglichen präzisere Berechnungs-ergebnisse bezogen auf einzelne Legierungselemente	10
Abbildung 4: Ergebnis der Berechnung aus obigen Eingangsgrößen; Die Präzision ist bereits mit Standardbedingungen sehr hoch Empfehlungen werden angegeben, um beispielsweise mit Reinelementen die Treffsicherheit noch weiter zu erhöhen.....	11
Abbildung 5: Unterer Teil des Berechnungsprotokolls mit Hilfe der zulässigen Grenzen aus der Norm (für Gusswerkstoffe DIN ISO 1706)	12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnungsbeispiel bei Legierungsrechner.....10

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BLW	Basislegierungswert
dm3	Kubikdezimeter
EOL	End of Life
f	Faktorvariante
ggf.	gegebenenfalls
GUI	Graphical User Interface
ID	Identifikationsnummer
kg	Kilogramm
KI	Künstliche Intelligenz
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy
Mio	Millionen
MJ	Megajoule
Mt	Megatonne
NNLS	Non-Negative Least Squares
SLSQP	Sequential Least Squares Programming
t	Tonne
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy
z.B.	zum Beispiel
ZL	Ziellegierung



Zuwendungsgeber:

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Förderkennzeichen: 16THB0004A
Laufzeit: 01.09.2022 – 31.12.2025
Projekträger:

VDI|VDE|IT

VDI / VDE Innovation + Technik GmbH

5 Partner. 5 Standorte. 1 Netzwerk.

fir
an der
RWTH Aachen

Fraunhofer
AUTOMOBIL

ifa Institut für
Automobilwirtschaft

SICP
Software Innovation Campus Paderborn
HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

TUCed
AN-INSTITUT FÜR TRANSFER
UND WEITERBILDUNG

diserhub.de