

Bewilligungsempfänger:

Franz Schneider Brakel GmbH & Co. KG



**Verwendung von AlMg3-Recycling-Material
zur umweltschonenden und materialeffizienten Herstellung
hochdekorativer Gussteile**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 39057/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



M.Sc. André Bergmann Kremer

Dr.-Ing. Andreas Keßler

M. Sc. Marc Unverzagt

Freiberg, den 26.06.2026

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	39057/01	Referat	21/2	Fördersumme	283.042 €
Antragstitel		Verwendung von AlMg3-Recycling-Material zur umweltschonenden und materialeffizienten Herstellung hochdekorativer Gussteile			
Stichworte		Sekundäraluminium, Anodisierung, hochdekorative Gussteile			
Laufzeit 24 Monate		Projektbeginn 27.03.2024		Projektende 26.03.2026	
Zwischenberichte		Kurzbericht zum Projektfortschritt		Projektphase(n) Berichtszeitraum 27.03.24 – 10.02.2025	
Bewilligungsempfänger		Franz Schneider Brakel GmbH & Co. KG			Tel +49 5272 608 538 Fax Projektleitung Marc Unverzagt Bearbeiter André Bergmann Kremer
Kooperationspartner		Gießerei-Institut (TU Bergakademie Freiberg) Hydro Aluminium Deutschland GmbH			
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zur Nutzung von AlMg-Sekundärlegierungen für die Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Gussteile unter Einhaltung der vorgegebenen technischen und optischen Qualitätsanforderungen, die bislang ausschließlich mit AlMg-Primärlegierungen erreicht werden konnten.					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden Die erforderlichen Entwicklungsarbeiten wurden in aufeinander abgestimmte Arbeitspakete der Projektpartner gegliedert. Zu Beginn des Projekts analysierte die Firma Hydro Aluminium Deutschland GmbH, die Zugang zu dem neu verfügbaren AlMg-Schrott besitzt, die Qualität des eingesetzten Schrottmaterials. Parallel dazu bereitete FSB die erforderlichen Werkzeuge vor und stellte diese für die Herstellung der Gussteile am Gießerei-Institut der TU Bergakademie Freiberg zur Verfügung. Mithilfe dieser Werkzeuge wurde am GI ein eigener Gießplatz eingerichtet, an dem sämtliche im Rahmen des Projekts untersuchten Proben gefertigt wurden. Nach dem Gießen der Versuchsträger wurden die Proben an FSB übermittelt, wo die mechanische Bearbeitung, die Anodisierung sowie die anschließende Qualitätskontrolle durchgeführt wurden.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass bestimmte chemische Elemente den Anodisierungsprozess beeinflussen und kritisch zu bewerten sind, da sie Farbabweichungen sowie eine reduzierte Helligkeit verursachen können. Zusätzlich konnte das Auftreten ungelöster Verunreinigungen im AlMg-Schrott näher untersucht und besser verstanden werden. Erste Ergebnisse mit Filtrationsverfahren sind vielversprechend, insbesondere im Hinblick auf eine Reduzierung der Oxidfracht im Schrottmaterial. Eine Spezifikation zur Verwendung von Sekundärmaterial zur Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Gussteile konnte erfolgreich erstellt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgt durch die Präsentation der Ergebnisse des Projektes auf dem Ledebur-Kolloquium am 24.10.25 und der Veröffentlichung einer Dissertation zu dieser Thematik. Ebenfalls werden die Ergebnisse in einem Arbeitskreis des Branchenverbandes vorgestellt.

Fazit

Das Ziel wurde im Wesentlichen erreicht. Obwohl der Einsatz von Sekundärmaterial in der Produktion von Al-Mg-Gussteilen eine vollständige Ablösung der Primärlegierung nicht ermöglichen konnte, wurde erfolgreich eine Spezifikation erarbeitet, die die zulässigen Bereiche bzw. Grenzwerte für sieben relevante chemische Elemente definiert. Zudem wurde der mögliche Anteil an Sekundärmaterial untersucht. Dabei zeigte sich, dass bis zu 25% AlMg-Schrott in der Herstellung gegossener, anodisierter Türdrücker eingesetzt werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	7
Zusammenfassung	8
Einleitung.....	9
Hauptteil.....	11
AP1: Definition und Bereitstellung von AlMg3-Versuchsmaterial	11
AP2: Konstruktion, Fertigung Versuchswerkzeug.....	13
AP3: Einrichtung eines Gießplatzes am GI	13
AP4 + AP5 + AP6: Schmelztechnische Untersuchungen + Gießen von Versuchsträgern + Produktspezifische Qualitätsanalyse	14
<i>Untersuchung der gelösten Verunreinigungen</i>	<i>15</i>
<i>Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen</i>	<i>22</i>
AP7: Erstellen Spezifikation, Dokumentation der Ergebnisse und Abschlussbericht	32
Fazit.....	33
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Neue verfügbares AlMg-Schrottmaterial.	12
Abbildung 2: Beispiel einer Formhälfte mit aufgebrachtter Beschichtung im Bereich der Kavität.	13
Abbildung 3: Gießstation am GI.....	14
Abbildung 4: Beispiel der drei hergestellten Oberflächen. Naturanodisiert (links), schwarzanodisiert (mitte) und mechanisch bearbeitet (rechts).	16
Abbildung 5: Vergleich zwischen C1 (Referenzprobe) und einer Probe aus der Mg-Charge mit erhöhtem Mg-Anteil für die naturanodisierte Oberfläche.	17
Abbildung 6: Vergleich zwischen C1 (Referenzprobe) und einer Probe aus der Cr-Charge mit erhöhtem Cr-Anteil für die naturanodisierte Oberfläche.	18
Abbildung 7: Flecken auf der schwarzanodisierten Oberfläche von der Fe-Charge.	20
Abbildung 8: Farbabweichung der mit roten Pfeilen gekennzeichneten Probe aus der Charge mit Zugabe von Mg, Mn, Cr, Cu, Fe, Si und Zn im Vergleich zu akzeptierten Proben.	21
Abbildung 9: Überführung der Schmelze vom Induktionsofen in die Gießpfanne (oben links), Schaumkeramikfilter nach der Filtration (unten links), gefiltertes Material in der Form (mitte), Abgießen in der Filtrationsanlage (rechts).	23
Abbildung 10: Vergleich zwischen einer Kontrollprobe (Primär AlMg3) und einer Probe aus der ersten Versuchsreihe zu den ungelösten Verunreinigungen.	24
Abbildung 11: Prefil/PoDFA Gerät (links) und Prefil/PoDFA Probe (rechts).	25
Abbildung 12: Balkendiagramm mit den Prefil/PoDFA-Messungen für die Proben aus der Versuchsreihe 1 zu den ungelösten Verunreinigungen.	26
Abbildung 13: Schwarzanodisierte Proben aus der Versuchsreihe 2 zu den ungelösten Verunreinigungen.	29
Abbildung 14: Anodisierte Proben der letzten Charge aus der Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen.	30
Abbildung 15: Verschiedene Modelle von Turldrückern, die mit den vorbereiteten Masseln hergestellt wurden.	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der abweichenden Elemente im Schrottmaterial im Vergleich zu DIN EN 1706-ALMg3 und der internen FSB-Spezifikation.	11
Tabelle 2: Ergebnisse von Prefil/PoDFA mit den Arten und dem Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen im ALMg-Schrottmaterial.	12
Tabelle 3: Versuchsplan - Versuchsreihe 1 zu den gelösten Verunreinigungen.	15
Tabelle 4: Qualitätsbewertung für die Chargen C2-C5. Der Gehalt ist relativ zum Spezifikationsgrenzwert des Projektpartners angegeben.	16
Tabelle 5: Versuchsplan für Fe, Si und Zn - Extra Versuchsreihe zu den gelösten Verunreinigungen.	19
Tabelle 6: Qualitätsbewertung für die Chargen C6 (Fe), C7 (Si) und C8 (Zn).	19
Tabelle 7: Versuchsplan zu den ungelösten Verunreinigungen mit verschiedenen Kombinationen zwischen Impellerzeit und der Menge an Reinigungssalz.	23
Tabelle 8: Prefil/PoDFA Messungen für die Proben aus der Versuchsreihe 1 zu den ungelösten Verunreinigungen.	26
Tabelle 9: Versuchsplan für die Versuchsreihe 2 zu den ungelösten Veunreinigungen.	28
Tabelle 10: Verallgemeinerte finale Spezifikation.	32

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

AlMg	Aluminium-Magnesium
AP	Arbeitspaket
C1	Charge 1
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
Fe	Eisen
Kg	Kilogramm
m	Mit
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
o	Ohne
OES	Optische Emissionsspektroskopie
P	Primärmaterial
PoDFA	Porous Disc Filtration Analysis
S	Sekundärmaterial
Si	Silizium
Symbol	Bedeutung
Zn	Zink

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die Umweltauswirkungen des Einsatzes von Primäraluminium in der Gießereiindustrie untersucht dieses Projekt die Möglichkeit, AlMg-Sekundärmaterial für die Herstellung hochdekorativer anodisierter Gussteile zu verwenden. Es wurde eine Spezifikation erstellt, die den maximalen Gehalt an wichtigen chemischen Elementen sowie das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundäraluminium festlegt, damit hochwertige anodisierte Gussteile hergestellt werden können.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei parallele Untersuchungen durchgeführt, in denen der Einfluss gelöster Verunreinigungen (chemische Elemente) und ungelöster Verunreinigungen (Oxide und andere nichtmetallische Einschlüsse) auf die Gieß-, mechanischen, korrosiven und insbesondere optischen Eigenschaften nach der Anodisation analysiert wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass bestimmte chemische Elemente für den Anodisierungsprozess besonders kritisch sind und zu Farbabweichungen sowie zu einer Verringerung der Helligkeit führen. Bei dekorativen Gussteilen führen bereits geringfügige Unterschiede an der Oberfläche zu Ausschuss. Darüber hinaus konnte das Vorkommen ungelöster Verunreinigungen im AlMg-Schrott aufgeklärt und untersucht werden. Filtrationsverfahren zeigen vielversprechende Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich der Verringerung der Oxidfracht im Schrott.

Es wurde erfolgreich eine Spezifikation erstellt, die zulässige Bereiche bzw. Grenzwerte für mehrere relevante chemische Elemente beschreibt. Der Anteil an Sekundärmaterial wurde ebenfalls untersucht, wobei sich zeigte, dass ein definierter Anteil AlMg-Schrott grundsätzlich in die Produktion von gegossenen anodisierten Türdrückern eingesetzt werden kann. Weitere Untersuchungen können den Einsatz höherer Schrottmengen ermöglichen, was zu noch größeren Umweltvorteilen führen könnte.

Projektpartner und Aktenzeichen:

Bewilligungsempfänger: Franz Schneider Brakel GmbH & Co. KG (FSB)

Kooperationspartner: Gießerei-Institut – TU Bergakademie Freiberg (GI)
Hydro Aluminium Deutschland GmbH

Das Projekt wurde gefördert unter dem Aktenzeichen 39051/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Einleitung

Die Nachfrage nach Aluminium auf dem Markt steigt von Jahr zu Jahr. Zwischen 2012 und 2022 stieg die weltweite Jahresproduktion von Aluminium von 60 Millionen auf etwa 100 Millionen Tonnen [1]. Das bedeutet, dass die Produktion von Primäraluminium schnell zunimmt, was aus ökologischer Sicht kritisch zu bewerten ist, da der Herstellungsprozess von Primäraluminium mit einem enormen Energieverbrauch und der Emission großer Mengen an Treibhausgasen verbunden ist. Zudem ist der Abbau von Bauxit in der Regel mit der Abholzung riesiger Flächen für den Bergbau verbunden [2,3].

Andererseits lässt sich durch die Verwendung von Aluminium aus Sekundärquellen der Energieverbrauch im Vergleich zum Primärverfahren um bis zu 95 % senken. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Aluminiumschrottmaterial ist die erhebliche Reduzierung der CO₂-Emissionen [4].

Angesichts der steigenden Produktion von Primäraluminium ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren mehr Aluminiumschrott anfallen wird [5]. Bis 2050 wird erwartet, dass der Einsatz von Sekundäraluminium in der Aluminiumindustrie den von Primäraluminium ausgleichen wird [1]. Daher ist es notwendig, neue Anwendungsbereiche für diesen neu anfallenden Schrott zu finden, um diesem Material ein angemessenes Ende seiner Lebensdauer zu ermöglichen und so eine Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten [6].

Trotz der ökologischen Vorteile von Sekundäraluminium gibt es Nachteile, die dessen Einsatz in bestimmten Anwendungsbereichen bislang verhindert haben. Diese Nachteile hängen mit der im Vergleich zu Primärlegierungen geringeren Qualität dieses Materials zusammen, das einen höheren Anteil an unerwünschten Elementen sowie ungelöste nichtmetallische Verunreinigungen enthält [7]. Die Auswirkungen solcher Verunreinigungen sind besonders kritisch bei hochdekorativen anodisierten Gussteilen, da zusätzliche Störelemente zu Farbabweichungen führen können und ungelöste Verunreinigungen punktuelle Oberflächenfehler verursachen können [8].

Insbesondere bei hochdekorativen anodisierten Gussteilen wirkt sich die Konzentration der üblicherweise in den verfügbaren Aluminiumschrotten vorhandenen Verunreinigungselemente (z. B. Fe, Cu) negativ auf die erzielte Oberfläche aus. Zu diesen Auswirkungen zählen unter anderem eine Beeinträchtigung der

Korrosionsbeständigkeit sowie Oberflächenfehler [8]. Dies führt zu einer Einschränkung hinsichtlich der Art von Schrott, der für solche Anwendungen verwendet werden kann.

Beispielsweise dominiert Al-Si-Cu-Schrott aus der Automobilindustrie den Aluminiumschrottmarkt. Aufgrund der genannten Nachteile ist diese Legierungsgruppe jedoch nicht für die Herstellung hochdekorativer anodisierter Gussteile geeignet. Andere Legierungsgruppen, insbesondere Al-Mg-Legierungen, wären für solche Zwecke besser geeignet [1]. Allerdings ist ihre Verfügbarkeit auf dem Schrottmarkt begrenzt, sodass die Herstellung solcher Gussteile nach wie vor von Primäraluminium und dessen ökologischen Nachteilen abhängig ist.

Diese Situation hat sich nun jedoch aufgrund einer erwarteten Rückführung erheblicher Mengen an AlMg-Schrott aus dem Offshore-Sektor erheblich verändert. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft wäre es eine hervorragende Idee, die Eignung dieses Materials für die Herstellung hochdekorativer anodisierter Gussteile, wie beispielsweise Türdrücker, zu prüfen. Die Herausforderung besteht in den strengen Vorgaben hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und des Vorhandenseins nichtmetallischer Einschlüsse, die für diese Klasse von Gussteilen erforderlich sind.

Zu den Umweltzielen dieses Projekts gehört die Aufbereitung dieses neu verfügbaren AlMg-Schrotts, um dessen Eigenschaften als potenzieller Ersatz für die derzeitige Primärlegierung AlMg3 zu bewerten, die für das Gießen von anodisierten Türdrückern verwendet wird, was mehrere ökologische Vorteile wie die Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen mit sich bringt.

Zu diesem Zweck wird eine eingehende Untersuchung durchgeführt, die den Einfluss chemischer Elemente – bezeichnet als gelöste Verunreinigungen – und nichtmetallischer Einschlüsse – bezeichnet als ungelöste Verunreinigungen – auf die Gießbarkeit, Bearbeitbarkeit und Anodisierbarkeit von Türdrückern umfasst.

Als Endziel des Projekts soll eine Spezifikation für die Verwendung von AlMg3-Sekundärmaterial bei der Herstellung hochdekorativer, anodisierbarer Türdrücker erstellt werden. Diese Spezifikation soll Angaben zu den Konzentrationsgrenzwerten für alle relevanten chemischen Elemente sowie zur Menge an ungelösten Verunreinigungen enthalten. Dies soll die Verwendung von AlMg3-Sekundärmaterial bei der Herstellung hochdekorativer, anodisierter Gussteile ermöglichen und damit zahlreiche wirtschaftliche und insbesondere ökologische Vorteile mit sich bringen.

Hauptteil

AP1: Definition und Bereitstellung von AlMg3-Versuchsmaterial

Zu Beginn des Projekts wurde die Qualität des Schrottmaterials durch einen Industriepartner analysiert, der Zugang zu den Sekundärmaterialien besitzt. Diese Analyse umfasste die Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung zwischen dem Sekundärmaterial und der Primärlegierung AlMg3 (EN AC-51100 gemäß DIN EN 1706), welches als Referenzmaterial dient.

Die Analyse erfolgte mittels optischer Emissionsspektroskopie (OES). Es zeigte sich, dass insbesondere bei ausgewählten Legierungselementen signifikante Abweichungen im Vergleich zu normativen sowie anwendungsspezifischen Zielwerten vorliegen. Betroffen sind insbesondere Magnesium, Mangan, Chrom und Kupfer.

Tabelle 1 gibt einen qualitativen Überblick über die festgestellten Abweichungen der relevanten Elemente im Schrottmaterial im Vergleich zu Referenz- und Zielzuständen.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der abweichenden Elemente im Schrottmaterial im Vergleich zu DIN EN 1706-AlMg3 und der internen FSB-Spezifikation.

Chem. Zusammensetzung	Mg	Mn	Cr	Cu
AlMg Sekundärmaterial	erhöht	erhöht	leicht erhöht	im Grenzbereich
DIN EN 1706 - AlMg3 (Primär)	2,70 - 3,5%	0,45%	<0,05%	<0,03%
Anwendungsspezifikation	enger spezifiziert	eingeschränkt	limitiert	streng limitiert

Die festgestellten Abweichungen sind im Wesentlichen auf die heterogene Herkunft des Sekundärmaterials zurückzuführen, welches aus unterschiedlichen aluminiumhaltigen Knetlegierungen mit variierenden Legierungsschwerpunkten besteht. Diese werkstoffbedingt variierende Ausgangszusammensetzung wird in den nachfolgenden Analysen entsprechend berücksichtigt.

Darüber hinaus untersuchte der Industriepartner auch das Vorhandensein nichtmetallischer Einschlüsse mithilfe der sogenannten Prefil/PoDFA-Methode. Diese Analyse bringt qualitative und quantitative Informationen, sodass die Arten der Einschlüsse und deren Mengen bewertet werden konnten. Tabelle 2 zeigt ein Beispiel

für ein Prefil/PoDFA-Ergebnis einer AlMg-Schrottprobe. Es ist ersichtlich, dass die wichtigsten in diesem Schrott vorhandenen Einschlussarten Oxide und TiB_2 - bzw. Ti-reiche Partikel sind. Außerdem enthält die Probe eine geringe Menge an Karbiden.

Tabelle 2: Ergebnisse von Prefil/PoDFA mit den Arten und dem Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen im AlMg-Schrottmaterial.

Prefil/PoDFA Analyse	Gewicht	Oxide	Karbide	TiB ₂ /Ti-reiche	Insgesamt
AlMg Sekundärmaterial	0.98 Kg	dominant	gering	signifikant	0.45 mm ² /Kg

Wie in der Einleitung erwähnt, wurden zwei parallele Untersuchungen durchgeführt: die Untersuchung der gelösten und der ungelösten Verunreinigungen sowie deren Einfluss auf die Qualität anodisierter Türdrücker. Insbesondere für die Analyse der ungelösten Verunreinigungen wurde eine Charge von rund 500 kg AlMg-Sekundärmaterial vom Industriepartner bereitgestellt und an das Gießereiinstitut der TU Bergakademie Freiberg (GI) geschickt, wo die Untersuchungen stattfanden. Abbildung 1 zeigt das Aussehen der gelieferten Charge.

Zur Analyse der gelösten Verunreinigungen wurde zusätzlich Referenzmaterial in Form einer primären AlMg-Legierungsvariante bereitgestellt, das den in der industriellen Anwendung eingesetzten Werkstoffen entspricht.



Abbildung 1: Neues verfügbares AlMg-Schrottmaterial.

AP2: Konstruktion, Fertigung Versuchswerkzeug

Parallel zu den im AP1 durchgeführten Untersuchungen bereitete FSB die erforderlichen Werkzeuge vor und stellte diese zur Verfügung, um das Gießen der Proben am GI zu ermöglichen. Dazu gehörte die Herstellung einer Kokille, die an die in der industriellen Anwendung eingesetzten Gießwerkzeuge angelehnt ist.

Diese Kokille besteht aus zwei Hälften aus Stahl und enthält neben der Kavität auch ein geeignet ausgelegtes Angusssystem, einen Raum für das Einbringen des metallischen Kerns sowie eine geeignete Entlüftung. Zudem ist die Kokille beschichtet, um definierte thermische Randbedingungen während der Erstarrung sicherzustellen. Abbildung 2 zeigt eine der Formhälften mit der weißen Beschichtung auf dem Hohlraum.

Zu den weiteren bereitgestellten Materialien gehören Werkzeuge zur Instandhaltung der Form und des Kerns sowie prozessübliche Hilfsstoffe zur Unterstützung des Gießprozesses.

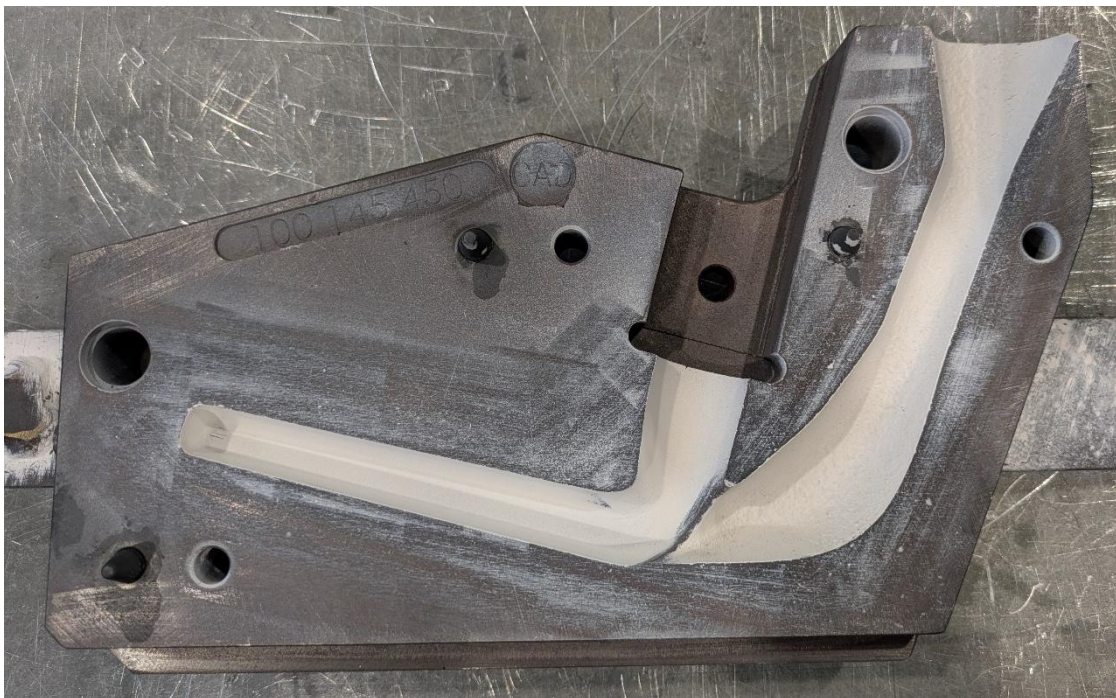


Abbildung 2: Beispiel einer Formhälfte mit aufgebrachteter Beschichtung im Bereich der Kavität.

AP3: Einrichtung eines Gießplatzes am GI

Es wurde ein Gießplatz eingerichtet, an dem die im Projekt untersuchten Proben hergestellt wurden. Die Einrichtung eines Gießplatzes war notwendig, da das

verwendete Sekundärmaterial Verunreinigungen enthalten kann, die zu Beeinträchtigungen der Prozessstabilität führen könnten.

Es wurde eine manuelle Gießstation aufgebaut, die typische Merkmale industrieller Gießanlagen abbildet und auf dem Kippkokillengießverfahren basiert.

Die Durchführung der Gießprozesse sowie der vor- und nachgelagerten Arbeitsschritte erfolgte unter praxisnahen Bedingungen, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Versuchsaufbau der Gießstation.

Zusätzlich erfolgte eine fachliche Abstimmung zwischen den Projektpartnern, einschließlich einer Einweisung in die relevanten Verfahrensschritte.



Abbildung 3: Gießstation am GI.

AP4 + AP5 + AP6: Schmelztechnische Untersuchungen + Gießen von Versuchsträgern + Produktspezifische Qualitätsanalyse

Die Arbeitspakete 4, 5 und 6 wurden parallel im Verlauf des Projekts durchgeführt. Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurden die Untersuchungen in zwei verschiedene Bereiche unterteilt: den Einfluss der gelösten und der ungelösten Verunreinigungen auf die Qualität gegossener und oberflächenbehandelter Aluminiumbauteile. Im AP5 wurden die Proben an der Gießstation des Gießerei-Instituts (AP3) gegossen. Die im Rahmen von Arbeitspaket 6 durchgeführten Analysen umfassten neben einer visuellen Bewertung der optischen Eigenschaften auch mechanische und korrosionsbezogene

Prüfungen. Die mechanischen und korrosiven Eigenschaften wurden bei keiner der hergestellten Proben wesentlich beeinflusst. Aus diesem Grund werden diese Ergebnisse nicht dargestellt, und AP6 konzentriert sich auf die Bewertung der Oberflächenqualität, insbesondere auf Farb- und Helligkeitsabweichungen.

Untersuchung der gelösten Verunreinigungen

Die Untersuchung der gelösten Elemente begann mit der Entwicklung einer Versuchsreihe zur Analyse des Einflusses von Mg, Mn, Cr und Cu auf die Eigenschaften hergestellten Bauteile. Die Auswahl der untersuchten Elemente erfolgte auf Grundlage des Vorversuchs aus AP1. Tabelle 3 zeigt den entworfenen Versuchsplan, bei dem in jeder Charge jeweils nur ein einzelnes Element als Verunreinigung in fünf unterschiedlichen Konzentrationsstufen zu einer aus Primär- AlMg_3 hergestellten Schmelze hinzugefügt wurde. Insgesamt wurden für jede Konzentrationsstufe jeder Charge 15 Proben gegossen. Zusätzlich wurde eine Charge mit 15 Proben aus Primär- AlMg_3 ohne jegliche Verunreinigung als Referenz zum Vergleich hergestellt.

Tabelle 3: Versuchsplan - Versuchsreihe 1 zu den gelösten Verunreinigungen.

Charge	Zugabe (Ziel)
C1 – AlMg_3 (Referenz)	Ohne
C2 – AlMg_3 + Mg	Mehrstufige Einzelvariation
C3 – AlMg_3 + Mn	Mehrstufige Einzelvariation
C4 – AlMg_3 + Cr	Mehrstufige Einzelvariation
C5 – AlMg_3 + Cu	Mehrstufige Einzelvariation

Alle hergestellten Proben wurden anschließend unter industrienahen Bedingungen weiterverarbeitet. Dies beinhaltet typische nachgelagerte Bearbeitungsschritte sowie die Herstellung drei verschiedener Oberflächenvarianten. eine silber-anodisierte Oberfläche, eine schwarz-anodisierte Oberfläche sowie eine mechanisch bearbeitete Oberfläche ohne Anodisierung. Für jede Konzentrationsstufe jeder Charge wurden jeweils fünf Proben jeder Oberflächenvariante hergestellt. Das gleiche Verfahren wurde auch für alle weiteren Untersuchungen innerhalb dieses Projekts angewendet. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der drei erhaltenen Oberflächen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Oberflächen als Naturanodisiert, Schwarzanodisiert und mechanisch bearbeitet bezeichnet.



Abbildung 4: Beispiel der drei hergestellten Oberflächen. Naturanodisiert (links), schwarzanodisiert (mitte) und mechanisch bearbeitet (rechts).

Nach der Bearbeitung und Oberflächenbehandlung wurden die Proben einer visuellen Qualitätsbewertung unterzogen. Dabei erfolgte ein Vergleich mit definierten Referenzmustern hinsichtlich relevanter optischer Merkmale, insbesondere Farbe, und Helligkeit. Die Ergebnisse wurden in Form einer qualitativen Einordnung in unauffällige beziehungsweise auffällige Proben zusammengefasst (Tabelle 4).

Tabelle 4: Qualitätsbewertung für die Chargen C2-C5. Der Gehalt ist relativ zum Spezifikationsgrenzwert des Projektpartners angegeben.

Charge	Konzentrationsstufen				
C2 – Mg	1,1x Spez.	1,3x Spez.	1,45x Spez.	1,6x Spez.	1,8x Spez.
C3 – Mn	1,3x Spez.	1,7x Spez.	2,1x Spez.	2,6x Spez.	3x Spez.
C4 – Cr	Im Grenzbereich	1,6x Spez.	2,4x Spez.	3,2x Spez.	4x Spez.
C5 – Cu	2x Spez.	4x Spez.	6x Spez.	8x Spez.	10x Spez.

Wie zu sehen ist, ergaben die Versuche 3 und 5, die sich auf Mangan bzw. Kupfer bezogen, ausschließlich akzeptable Proben. Das bedeutet, dass innerhalb der betrachteten Konzentrationsbereiche keine optischen Beeinträchtigungen festgestellt wurden. Magnesium und Chrom zeigten hingegen einen deutlicheren Einfluss auf das Erscheinungsbild der Oberfläche.

Erhöhte Magnesiumgehalte führten zu einer rauerer Oberfläche, die nicht mehr zulässig war. Diese Proben waren optisch nicht so glänzend wie die Standardprobe

(C1). Abbildung 5 zeigt einen Vergleich zwischen einer Probe mit einem akzeptierten Mg-Gehalt (aus C1) und einer Probe mit zu hohem Mg-Gehalt. Dieses Problem war nur bei den naturanodisierten Proben sichtbar.



Abbildung 5: Vergleich zwischen C1 (Referenzprobe) und einer Probe aus der Mg-Charge mit erhöhtem Mg-Anteil für die naturanodisierte Oberfläche.

Bei der Chromzugabe bestand das Problem in einer Farbabweichung. Je höher der Chromgehalt, desto gelblicher war die anodisierte Oberfläche. Dies trat sowohl bei natur- als auch bei schwarzanodisierten Proben auf. Abbildung 6 zeigt diese Farbabweichung, die aber auf dem Bild möglicherweise nicht so deutlich erkennbar ist wie mit bloßem Auge.



Abbildung 6: Vergleich zwischen C1 (Referenzprobe) und einer Probe aus der Cr-Charge mit erhöhtem Cr-Anteil für die naturanodisierte Oberfläche.

Auf Grundlage der Einzeluntersuchungen konnten für mehrere der untersuchten Elemente erweiterte tolerierbare Konzentrationsbereiche im Vergleich zum ursprünglichen Referenzzustand identifiziert werden. Dabei zeigte sich jedoch, dass die aus Einzelvariationen abgeleiteten Bewertungsgrenzen nicht ohne Weiteres auf Mehrkomponentensysteme übertragbar sind.

Im nächsten Schritt wurde überprüft, ob die vier Elemente in Kombination bis zu den neu erreichten Grenzwerten einer Aluminiumschmelze zugesetzt werden können und dennoch den Qualitätsansprüchen gerecht werden. Dazu wurde eine Schmelze aus AlMg3-Primärlegierung vorbereitet und eine Zugabe von Mg, Mn, Cr und Cu bis zu den neuen Grenzwerten hinzugefügt. Alle für diese Charge hergestellten Proben wurden als in Ordnung bewertet, einschließlich der drei verschiedenen Oberflächen.

Im weiteren Verlauf dieses Projekts wurde im Anschluss an die parallele Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen bestätigt, dass einige Chargen des untersuchten Schrottmaterials höhere Gehalte an Fe, Si und Zn aufwiesen. Entgegen den Angaben im Projektantrag waren nicht nur vier Elemente entscheidend für die Untersuchung, sondern sieben. Daher wurde eine neue Versuchsreihe organisiert, um zu untersuchen, ob die Grenzwerte für diese drei Elemente ebenfalls erhöht werden könnten. Dies führte natürlich zu einem erhöhten Zeitaufwand und einem größeren Arbeitsaufwand für die Untersuchung der gelösten Verunreinigungen.

Zunächst wurden die Elemente Fe, Si und Zn als einzelne Zusätze zur Primär- AlMg_3 untersucht, genau wie zuvor Mg, Mn, Cr und Cu. Der einzige Unterschied bestand darin, dass vier verschiedene Konzentrationstufen (drei für Silizium) anstelle von fünf getestet wurden. Tabelle 5 zeigt die Zielwerte für die Konzentrationen von Fe, Si und Zn.

Tabelle 5: Versuchsplan für Fe, Si und Zn - Extra Versuchsreihe zu den gelösten Verunreinigungen.

Charge	Zugabe (Ziel)
C6 – AlMg_3 + Fe	Mehrstufige Einzelvariation
C7 – AlMg_3 + Si	Mehrstufige Einzelvariation
C8 – AlMg_3 + Zn	Mehrstufige Einzelvariation

Das gleiche Verfahren wurde für diese Versuchsreihe angewendet, die das Gießen der Proben bei GI, den Versand zur Weiterverarbeitung und die Vorbereitung der drei verschiedenen Oberflächen der Türdrücker umfasste.

Es erfolgte eine erneute Qualitätsbewertung. Tabelle 6 zeigt die Bewertung der Chargen nach „in Ordnung“ bzw. „nicht in Ordnung“. Diesmal zeigte nur Eisen bei den untersuchten Konzentrationen einen negativen Einfluss auf die Oberflächenqualität. Dieser Einfluss trat ausschließlich bei den schwarzanodisierten Proben auf, bei denen ein Fe-Gehalt von über 0,3 % zu Flecken auf der Oberfläche führte, wie in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 6: Qualitätsbewertung für die Chargen C6 (Fe), C7 (Si) und C8 (Zn). Der Gehalt ist relativ zum Spezifikationsgrenzwert des Projektpartners angegeben

Charge	Concentration Levels			
C6 – Fe	1,1x Spez.	1,5x Spez.	1,9x Spez.	2,3x Spez.
C7 – Si	1,25x Spez.	1,5x Spez.	1,75x Spez.	-
C8 – Zn	2x Spez.	4x Spez.	6x Spez.	8x Spez.

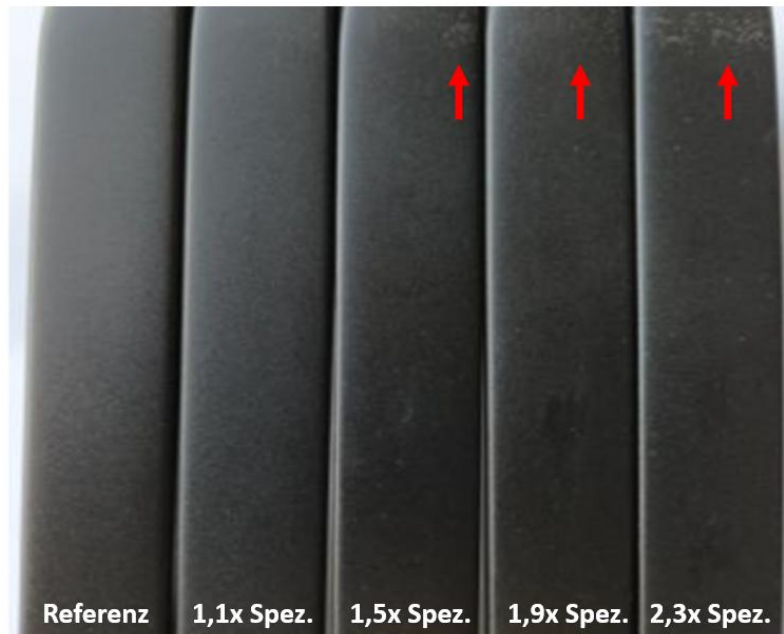


Abbildung 7: Flecken auf der schwarzanodisierten Oberfläche von der Fe-Charge.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten für Eisen, Silizium und Zink erweiterte tolerierbare Einzelbereiche gegenüber dem ursprünglichen Referenzzustand abgeleitet werden. Der nächste Versuch wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob die neuen Grenzwerte in Kombination mit den für Mg, Mn, Cr und Cu ermittelten Grenzwerten berücksichtigt werden können. Im nächsten Schritt wurde untersucht, ob die aus den Einzeluntersuchungen abgeleiteten tolerierbaren Bereiche auch bei gleichzeitiger Anwesenheit mehrerer relevanter Elemente aufrechterhalten werden können. Hierzu wurde eine Versuchscharge mit einer kombinierten Anhebung aller zuvor als relevant identifizierten Elemente auf maximaler Einzelkonzentrationsstufe hergestellt.

Nach der Vorbereitung der drei verschiedenen Oberflächen wurde nochmals eine Qualitätskontrolle durchgeführt. Diesmal trat bei den schwarzanodisierten Oberflächen eine Farbabweichung auf, die eine deutlich hellere Farbe aufwies. Dies ist in Abbildung 8 zu sehen.



Abbildung 8: Farbabweichung der mit roten Pfeilen gekennzeichneten Probe aus der Charge mit Zugabe von Mg, Mn, Cr, Cu, Fe, Si und Zn im Vergleich zu akzeptierten Proben.

Aufgrund dieser Farbabweichung konnte die Kombination der sieben untersuchten Elemente nicht als Konzentrationsgrenzwert für die Herstellung akzeptabler Türdrücker validiert werden. Es wurde eine abschließende Versuchsreihe konzipiert, mit dem Ziel, einen Grenzwert für die Kombination aus Mg, Mn, Cr, Cu, Fe, Si und Zn zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden 18 Chargen hergestellt, die Kombinationen der sieben Elemente in unterschiedlichen Konzentrationen enthielten. In dieser Versuchsreihe wurden Mg, Mn und Cu innerhalb der zuvor ermittelten individuellen Grenzwerte gehalten, während der Chromgehalt in zwei Chargen reduziert wurde, da dieses Element bei der Einzeluntersuchung zu Farbabweichungen geführt hat. Der Fe-Gehalt variierte zwischen seinem neuen Grenzwert und dem Grenzwert der FSB-Spezifikation. Darüber hinaus wurden die Gehalte an Si und Zn gründlich untersucht, indem sie in jeder Charge geringfügig variiert wurden.

Nach der Sichtprüfung wurde keine der hergestellten Chargen freigegeben. Auch diesmal waren die schwarzanodisierten Proben nicht schwarz genug bzw. zu hell. Eine weitere Untersuchung wurde aus Zeitgründen nicht durchgeführt. Die dunkel anodisierten Proben wiesen erneut ein aufgehelltes Erscheinungsbild und damit eine relevante Farbabweichung gegenüber der Referenz auf.

Insgesamt zeigte sich, dass sich nur für einen Teil der untersuchten Elemente auf Basis der Einzelvariationen belastbare erweiterte Konzentrationsbereiche ableiten ließen, während sich diese in Mehrkomponentensystemen nicht vollständig bestätigen ließen.

Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen

Die Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen begann, nachdem der Projektpartner das Sekundärmaterial an das GI geschickt hatte. Zunächst wurde eine Probe des Schrotts eingeschmolzen und aus der Schmelze eine Spektro-Probe entnommen, um die chemische Zusammensetzung mittels eines optischen Emissionsspektrometers zu überprüfen. Die chemische Analyse zeigte, dass mehrere der relevanten Legierungselemente in erhöhten Konzentrationen im Vergleich zu den angestrebten Referenzbereichen vorlagen. Diese Abweichungen wurden bei der späteren Einstellung definierter Mischungsverhältnisse zwischen Primär- und Sekundärmaterial berücksichtigt.

Um große, ungelöste Verunreinigungen aus der Schmelze zu entfernen, wurde ein Filtrationsverfahren durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde am GI eine Filtrationsanlage errichtet, die über einen Einguss und zwei Ausgüsse für die Aluminiumschmelze verfügt. In der Mitte der Anlage befindet sich eine Filterkammer, in die ein Schaumkeramikfilter eingesetzt wurde. Auf diese Weise bleiben große Partikel wie Oxide oberhalb des Filters zurückgehalten und werden aus der Schmelze entfernt.

Pro Charge wurden etwa 80 kg AlMg-Schrott verwendet. Das Material wurde zunächst in einem Induktionsofen geschmolzen, in eine Gießpfanne gegossen, mit einem Kran zur Filtrationsanlage transportiert und in den Einguss der Anlage gegossen. Die Schmelze lief durch den Filter, und anschließend wurden zwei zylindrische Sandformen unterhalb der Ausgüsse positioniert, um die gefilterte Schmelze aufzufangen und erstarren zu lassen. Am Ende wurden zwei Zylinder aus gefiltertem AlMg-Sekundärmaterial hergestellt. Abbildung 9 zeigt die wichtigsten Schritte dieses Verfahrens.



Abbildung 9: Überführung der Schmelze vom Induktionsofen in die Gießpfanne (oben links), Schaumkeramikfilter nach der Filtration (unten links), gefiltertes Material in der Form (mitte), Abgießen in der Filtrationsanlage (rechts).

Die Zylinder wurden anschließend in kleinere Stücke geschnitten, damit sie in den kleineren Tiegel passten, der zur Herstellung der Proben verwendet wurden. Die erste Versuchsreihe hat untersucht, ob die Dauer des Impellerprozesses und die Menge des jeder Schmelze zugesetzten Reinigungssalzes einen Einfluss auf den Gehalt an Oxiden und die eventuelle Bildung von Oberflächenfehlern hatten. Der Einsatz des Impellers erfolgte unter industrienahen Bedingungen.

Es wurden neun verschiedene Schmelzen mit jeweils 30 kg AlMg-Schrott hergestellt, wobei drei verschiedene Laufzeiten des Impellerprozesses und drei verschiedene Mengen an Reinigungssalz kombiniert wurden. Tabelle 7 zeigt die neun verschiedenen Chargen von Türdrückern, die mit den genannten Kombinationen hergestellt wurden.

Tabelle 7: Versuchsplan zu den ungelösten Verunreinigungen mit verschiedenen Kombinationen zwischen Impellerzeit und der Menge an Reinigungssalz.

Impellerzeit	Menge an Reinigungssalz		
	30 g	60 g	90 g
8 min	30 g	60 g	90 g
12 min	30 g	60 g	90 g
16 min	30 g	60 g	90 g

Bei allen Chargen wurden keine Oberflächendefekte festgestellt, die auf ungelöste partikuläre Verunreinigungen zurückzuführen sind. Die optischen Eigenschaften der

Türdrücker weisen jedoch Abweichungen hinsichtlich Helligkeit und Farbe auf, die auf einen hohen Gehalt an Elementen wie Mg, zurückzuführen sind, der über den bei der Untersuchung der gelösten Verunreinigungen festgestellten Grenzwerten lag. Dies wird in Abbildung 10 veranschaulicht.



Abbildung 10: Vergleich zwischen einer Kontrollprobe (Primär AlMg3) und einer Probe aus der ersten Versuchsreihe zu den ungelösten Verunreinigungen.

Darüber hinaus wurden während der Vorbereitung der Schmelzen vor dem Gießen vier dieser Kombinationen ausgewählt, um Proben für eine Untersuchung der Arten und Mengen nichtmetallischer Einschlüsse mittels Prefil/PoDFA-Analyse herzustellen. Darüber hinaus wurden zwei weitere Proben für die Prefil/PoDFA-Analyse hergestellt, wobei das Sekundärmaterial vor und nach der Filtration verwendet wurde, ohne Einsatz des Impellers und ohne Zugabe von Reinigungssalz.



Abbildung 11: Prefil/PoDFA Gerät (links) und Prefil/PoDFA Probe (rechts).

Abbildung 11 zeigt, wie das Prefil/PoDFA-Gerät und die hergestellten Proben aussehen. Etwa 2,5 kg der aufbereiteten Schmelze wurden in einen metallbeschichteten Tiegel gegossen, der in die Anlage eingesetzt wird. Der Tiegel enthält unten einen sehr feinen Filter, der verhindert, dass die Schmelze durchfließt. Die Tiegelkammer wird verschlossen und mit Druckluft beaufschlagt, wodurch die Schmelze durch den Filter fließen kann. Eventuelle Einschlüsse werden dann direkt oberhalb des Filterbereichs zurückgehalten. Nachdem etwa 1,5 kg Schmelze durch den Filter geflossen sind, wird die Einblasung von Druckluft gestoppt und der Tiegel mit der Schmelze und den Einschlüssen erstarren gelassen. Anschließend wird die Probe in Längsrichtung in der Mitte durchgeschnitten, und der Bereich oberhalb des Filters wird mikroskopisch untersucht. Die von den verschiedenen Einschlüssen eingenommene Fläche sowie deren Art wurden gemessen. Dies ermöglicht eine qualitative und quantitative Analyse der im Schrott vorhandenen Einschlüsse sowie einer möglichen Reduzierung, die nach der Filtration, dem Einsatz des Impellers und der Salzzugabe erzielt wurde.

Tabelle 8 zeigt den Gehalt der wichtigsten im Schrott vorhandenen Einschlüsse vor und nach der Filtration sowie vier verschiedene Kombinationen aus Impellerzeit und Salzmenge. Diese Ergebnisse sind zur leichteren Interpretation auch in Balkendiagrammen (Abbildung 12) dargestellt.

Tabelle 8: Profil/PoDFA Messungen für die Proben aus der Versuchsreihe 1 zu den ungelösten Verunreinigungen.

Probe	Partikeloberfläche [mm ² /Kg]					
	Al-Oxid	Ti-Borid	Al-Nitrid	Spinell	Verschmutzung	Summe
Vor Filtration	0,162	0,054		0,216	0,108	0,540
Nach Filtration	0,230	0,014		0,147	0,060	0,451
8 min – 30 g	0,495		0,171	0,102	0,068	0,836
8 min – 90 g	0,402		0,056	0,045	0,039	0,542
12 min – 30 g	1,066			0,188	0,000	1,254
12 min – 90 g	0,560			0,05	0,218	0,828

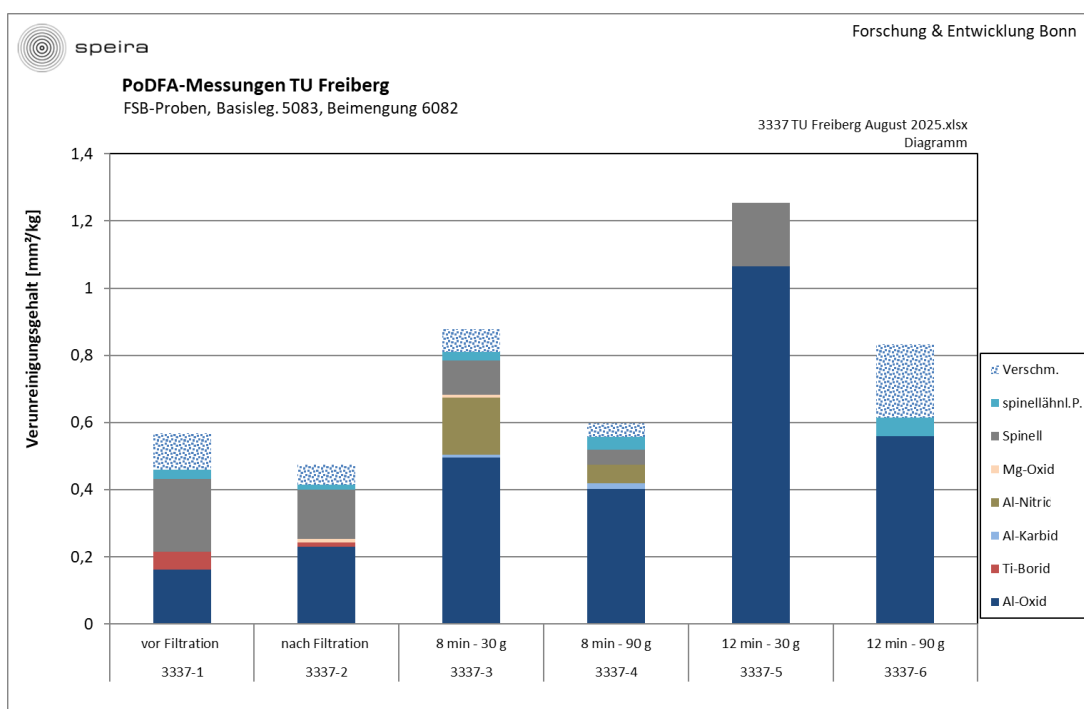


Abbildung 12: Balkendiagramm mit den Profil/PoDFA-Messungen für die Proben aus der Versuchsreihe 1 zu den ungelösten Verunreinigungen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Proben eine erhebliche Menge an Verunreinigungen aus externen Quellen aufweisen. Diese Quellen können beispielsweise die Beschichtung der PoDFA-Tiegel sein. Darüber hinaus weisen die Proben, die nach dem Impeller + Salz hergestellt wurden im Vergleich zu den Proben vor und nach der Filtration einen höheren Gehalt an Al-Oxiden auf. Der Grund dafür liegt darin, dass die Proben nach der Filtration wieder geschmolzen werden mussten, wodurch eine größere Menge an Oxiden entsteht.

Dennoch lassen sich anhand der Ergebnisse einige Tendenzen erkennen. Der Spinellgehalt konnte durch Filtration und bei den meisten getesteten Proben noch

effizienter durch die Behandlung mit Impeller und Salz reduziert werden. Dieses Mineral mit der Formel $MgAl_2O_4$ ist sehr hart und kann zu Defekten an den anodisierten Oberflächen sowie zu Verschleiß an den Werkzeugen führen, die zur Verarbeitung verwendet werden. Ein weiterer Trend ist die höhere Wirksamkeit bei höheren Salzmengen. Beim Vergleich von 8–30 mit 8–90 sowie von 12–30 mit 12–90 lässt sich eine stärkere Entfernung von Verunreinigungen, insbesondere von Al-Oxiden, beobachten. Diese Analyse war wichtig für das Verständnis der Beschaffenheit und der Menge der ungelösten Partikel in der Schmelze. Die hergestellten Proben wiesen jedoch keine durch solche Partikel verursachten Defekte auf den Oberflächen auf. Der Einfluss gelöster Partikel (chemischer Elemente) spielt eine größere Rolle für die Qualität der Proben, zumindest bei der in diesem Projekt untersuchten Art von Sekundärmaterial.

Um das Problem des übermäßigen Gehalts bestimmter chemischer Elemente im Schrott zu lösen, wurde eine Verdünnung unter Verwendung der von FSB bereits eingesetzten Primärlegierung AlMg3 geplant. Auf der Grundlage der Zusammensetzung des Schrotts und der AlMg3-Legierung wurde ein Verhältnis von 75 % Primär- und 25 % Sekundärmaterial als maximaler Schrottanteil berechnet, der noch eine Schmelze mit einer chemischen Zusammensetzung innerhalb der erweiterten Spezifikation ergibt. Als besonders begrenzender Faktor erwies sich der Magnesiumgehalt, da dieses Element die deutlichste Abweichung zwischen Sekundärmaterial und Referenzzusammensetzung aufwies. Daher wurde in der nächsten Versuchsreihe ein marktübliches additives Schmelzebehandlungsmittel zur gezielten Magnesiumreduktion eingesetzt.

Der Mg-Entferner ist ein Schmelzbehandlungsmittel, das zur Entfernung von Magnesium aus Aluminiumlegierungen entwickelt wurde. Während der Reaktion werden Substanzen freigesetzt, die sich bevorzugt mit Magnesium verbinden und es aus der Schmelze entfernen. Der Einsatz dieses Behandlungsmittels ermöglichte eine relevante Absenkung des Magnesiumgehalts auf Werte innerhalb des angestrebten Untersuchungsbereichs.

In der neuen Versuchsreihe unter Verwendung des Schrottmaterials wurden drei verschiedene Verhältnisse von Primär- zu Sekundär-AlMg sowie der Einsatz des Mg-Entferners untersucht. Bei einer der Chargen, die 25 % Schrott und 75 % Primär-AlMg3 enthielt, wurden Mn, Cr und Cu bis zur maximalen Konzentration gemäß der neu

ermittelten Spezifikation der Schmelze zugesetzt. Tabelle 9 zeigt die geplanten Versuche.

Tabelle 9: Versuchsplan für die Versuchsreihe 2 zu den ungelösten Verunreinigungen.

Anteil	Mg-Entferner	Bemerkungen
75% P / 25% S	Ohne	
75% P / 25% S	Ohne	Zugabe von Mn, Cr, Cu bis zur Maximalgrenze
50% P / 50% S	Mit	
25% P / 75% S	Mit	

Die Zugabe des magnesiumreduzierenden Behandlungsmittels erfolgte schrittweise entsprechend den anwendungstechnischen Vorgaben. Nach jeder Behandlungsstufe wurde die Schmelze erneut analysiert, um die Zielerreichung hinsichtlich des Magnesiumgehalts zu überprüfen.

Trotz einiger geringfügiger Abweichungen bei einigen Chargen lag die Zusammensetzung innerhalb der Anwendungsspezifikation bzw. der neu festgelegten Grenzwerte für Mg, Mn, Cr und Cu.

Die Abbildung 13 zeigt, wie die schwarzanodisierten Proben im Vergleich zu einer Kontrollprobe aus 100% AlMg₃-Primärmaterial aussehen. Die Proben 75% P / 25% S (+Mn, Cr, Cu, dritte Probe von links) und 25% P / 75% S mit Mg-Entferner (fünfte Probe von links) wurden aufgrund einer helleren Oberfläche als nicht konform bewertet. Diese Proben sehen ähnlich aus wie die in früheren Tests aussortierten Proben. Die beiden anderen Proben wurden trotz geringfügiger Farbabweichungen als unauffällig eingestuft. Die naturanodisierten Proben waren bei allen Chargen in Ordnung.

Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass Chrom insbesondere in Kombination mit weiteren Elementen einen maßgeblichen Beitrag zu den beobachteten Farbabweichungen leisten kann. Aus diesem Grund wurde der für die weitere Optimierung zugrunde gelegte Chrombereich gegenüber der zuvor betrachteten Einzelvariation reduziert.



Abbildung 13: Schwarzanodisierte Proben aus der Versuchsreihe 2 zu den ungelösten Verunreinigungen.

Es wurde eine letzte Charge von Türdrückern hergestellt, die zu 75% aus Primär- und zu 25% aus Sekundärmaterial bestand, um die Auswirkung eines reduzierten Chromgehalts zu überprüfen. Obwohl die Probe mit 50% Schrott akzeptable Türdrücker ergab, gab es bei den schwarzanodisierten Proben eine leichte Farbabweichung; daher wurde ein Schrottanteil von 25% gewählt, um eine bessere Oberflächenqualität zu erzielen. Der neue Cr-Grenzwert wurde genau erreicht, und auch die anderen Elemente blieben innerhalb der Grenzwerte. Abbildung 14 zeigt Beispiele der Proben aus dieser Charge nach dem Anodisieren. Alle Proben zeigten in der visuellen Bewertung ein unauffälliges Erscheinungsbild.



Abbildung 14: Anodisierte Proben der letzten Charge aus der Untersuchung der ungelösten Verunreinigungen.

Validierung der Untersuchungen

Der nächste Schritt bestand darin, unter Berücksichtigung der erweiterten Spezifikation eine Validierung unter praxisnahen industriellen Bedingungen durchzuführen.

Zu diesem Zweck wurde im GI eine Charge AlMg-Masseln hergestellt, indem 25% des untersuchten Schrotts mit 75% primären AlMg3-Masseln gemischt wurden. Die Schrottplatten wurden zuvor unter Verwendung derselben Filtrationsanlage gefiltert, um den Oxidgehalt zu reduzieren, wobei das bereits beschriebene Verfahren befolgt wurde. Die Charge wurde in zwei Chargen unter Verwendung eines Induktionsofens zum Schmelzen der primären AlMg3-Masseln und des gefilterten Schrotts vorbereitet. Die Zusammensetzung wurde mit einem optischen Emissionsspektrometer überprüft, um sicherzustellen, dass alle Elemente innerhalb der Spezifikationsgrenzen lagen. Anschließend wurde die Schmelze in eine Gießpfanne überführt, die dann mit einem Kran zu der Stelle transportiert wurde, an der sich eine Metallform in der Form von Masseln befand, und dort erfolgte das Abgießen.

Die Weiterverarbeitung der Schmelze erfolgte unter industrienahen Standardbedingungen einschließlich üblicher Schmelzebehandlungsschritte. Anschließend wurde die Schmelze zur Herstellung von Türdrückern durch manuelles Gießen verwendet, wobei verschiedene im Unternehmen vorhandene Kokillen zum

Einsatz kamen, um unterschiedliche Designs von Türdrückern herzustellen. Nach der Weiterverarbeitung und Anodisierung wurden alle Proben einer abschließenden visuellen Bewertung unterzogen und als unauffällig eingestuft. Abbildung 15 zeigt Beispiele für Türdrücker, die mit den hergestellten Masseln im Vergleich zu primärem AlMg3 gefertigt wurden. Es konnten keine Farbabweichungen oder andere Oberflächenfehler festgestellt werden.



Abbildung 15: Verschiedene Modelle von Türdrückern, die mit den vorbereiteten Masseln hergestellt wurden.

AP7: Erstellen Spezifikation, Dokumentation der Ergebnisse und Abschlussbericht

Nach der Validierung der Zusammensetzungsgrenzen für die wichtigsten Legierungselemente sowie des Gehalts an Sekundärmaterial konnte erfolgreich eine Spezifikation (Tabelle 10) erstellt werden, die von FSB für den Erwerb von sekundärmaterialhaltigen Masseln zur Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Gussteile verwendet werden soll. Die Dokumentation aller Gießversuche und Ergebnisse ist in diesem Bericht enthalten.

Tabelle 10: Verallgemeinerte finale Spezifikation.

Verallgemeinerte Spezifikation für die Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Gussteile unter Verwendung von AlMg-Sekundärmaterial	
Anteil von AlMg-Sekundärmaterial	begrenzt, im unteren zweistelligen Prozentbereich
Mg-Gehalt	enger anwendungsbezogener Bereich
Mn-Gehalt	erweiterter zulässiger Bereich
Cr-Gehalt	besonders kritisch; enger Grenzbereich erforderlich
Cu-Gehalt	begrenzt zulässiger Bereich
Si-, Zn- und Fe-Gehalt	im engen Rahmen der Qualitätsanforderungen zu halten

Im Vergleich zur bisherigen FSB-Spezifikation konnten die zulässigen Bereiche für einzelne Elemente erweitert werden. Zudem ergibt sich die Möglichkeit, einen deutlich höheren Anteil an Sekundärmaterial einzusetzen als bisher. Der wichtigste ökologische Vorteil dieser neuen Erkenntnisse ist die deutliche Reduzierung der CO₂-Emissionen je Kilogramm Aluminium. Dies stellt einen wichtigen Schritt hin zu einer ressourcenschonenderen Gießerei und einer klimaneutraleren Industrie dar.

Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse sollen auf Konferenzen sowie auf Messen präsentiert werden. Darüber hinaus ist die Veröffentlichung wissenschaftlicher Artikel mit den wichtigsten Erkenntnissen geplant.

Fazit

Ziel des Projekts war es, die Eignung einer neuen Art von Al-Mg-Sekundärmaterial für die Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Türdrücker zu überprüfen. Bislang war nicht bekannt, welche Elemente eine Rolle für die Oberflächenqualität nach dem Anodisierungsprozess spielen und welchen Einfluss ungelöste Verunreinigungen haben. Es konnte nachgewiesen werden, dass bestimmte Elemente von entscheidender Bedeutung für die optischen Eigenschaften anodisierter Türdrücker sind, und ihre Grenzwerte wurden erfolgreich ermittelt.

Ein weiteres Ziel des Projekts war die Einführung von Sekundärmaterial in die Produktion von Al-Mg-Gussteilen, bis hin zu einer möglichen Ablösung der derzeit verwendeten Primärlegierung AlMg3. Dies war leider nicht möglich, da das untersuchte Schrottmaterial hohe Gehalte an wichtigen Elementen wie Mg und Fe aufweist, die eine Verdünnung mit Primärmaterial erfordern, um akzeptable anodisierte Oberflächen zu erzielen.

Dennoch liefern die im Rahmen dieses Projekts erzielten Ergebnisse wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Verwendung von Sekundäraluminiumlegierungen für die Herstellung hochdekorativer anodisierbarer Gussteile. Ein eventueller Ersatz der Primärlegierung AlMg3, d. h. die Verwendung von 100% Schrottmaterial für die Herstellung solcher Gussteile, erfordert weitere Untersuchungen. Solche Untersuchungen können beispielsweise darin bestehen, neue Schrottquellen zu erschließen oder metallurgische Verfahren anzuwenden, um den Gehalt wichtiger Elemente im Schrottmaterial zu reduzieren.

Dank dieses Projekts ist nun ein Grenzwert für den Gehalt aller wichtigen chemischen Elemente bei der Herstellung hochwertiger anodisierter Türdrücker bekannt, was weitere Untersuchungen ermöglicht, die schrittweise zu einer nachhaltigen Aluminiumgussindustrie führen können.

Literaturverzeichnis

- [1] Raabe, D. et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science*. 2022. **128**.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
- [2] Ratvik, A.P., Mollaabbasi, R. & Alamdari, H. Aluminium production process: from Hall-Héroult to modern smelters. *Chemtexts*. 2022. **8**(10).
<https://doi.org/10.1007/s40828-022-00162-5>
- [3] Ujaczki, E. et al. Re-using bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2018. **93**. <https://doi.org/10.1002/jctb.5687>
- [4] Gutowski, T.G. et al. The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2013. **371**(1986).
<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>
- [5] Umweltbundesamt. (2019). *Factsheet Aluminium*. Dessau-Roßlau. Abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet-aluminium_fi_barrierefrei.pdf
- [6] Gaustad, G. et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. **135**.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.002>
- [7] Švecová, I. et al. Possibilities of predicting undesirable iron intermetallic phases in secondary Al-alloys. *Transportation Research Procedia*. 2021. **55**.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.047>
- [8] Tajima, S. Luminescence, breakdown and colouring of anodic oxide films on aluminium. *Electrochimica Acta*. 1977. **22**.