

Einsatz des AlOx in
einem Warmhalteofen in
einer Al-Gusslegierung.

Neues Messsystem AloX

Mit Ultraschall Schmelzereinheit nachweisen

Das AloX-Messsystem ist eine gemeinsame Entwicklung des Fraunhofer-Instituts für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (Fraunhofer IZFP) und Partnern aus der Gießerei-Industrie. Es wird seit August 2022 zur ultraschallbasierten Detektion von nichtmetallischen Einschlüssen in Aluminium-Schmelzen industriell eingesetzt. Die Ergebnisse in betrieblichen Schmelzen sowie Benchmarkversuche mit dem Messsystem LiMCA zeigen vielversprechende Ergebnisse und werden im Folgenden vorgestellt.

THOMAS WASCHKIES, ANDREA MROSS, NICO BROSTA, NIZAMETTIN DENGIZ, TAMMO KOCH, THIEN DANG, JAN KRAMPE

Auminiumwerkstoffe erfreuen sich aufgrund ihrer Eigenschaften wie gute chemische Beständigkeit, Umform- und Gießbarkeit, ihrem geringen spezifischen Gewicht oder ihrer sehr guten Recyclingfähigkeit weiterhin großer Beliebtheit [1]. Daraus ergeben sich zunehmende Einsatzmöglichkeiten in Bereichen hoher geometrischer Komplexität und maximalem Leichtbau wie z. B. Strukturguss für Fahrzeugkarosserien, Motorgehäuse und Aggregatehalter für E-Mobilität, aber auch im Bereich der Verpackung [2, 3].

Insbesondere die weltweit verschärften Klimaschutzziele hinsichtlich der Reduktion von CO₂-Emissionen verstärken den zunehmenden Trend zum Leichtbau und machen Aluminium aufgrund seiner besonderen Eigenschaften nach Stahl zum am häufigsten verwendeten Metall [1]. Hiermit wächst jedoch auch der Wunsch nach immer dünneren Wandstärken und der komplexeren Gestaltung von Bauteilen. Gleichzeitig steigen die zu erfüllenden mechanischen und thermischen Anforderungen. Verunreinigungen, wie z. B. nichtmetallische Einschlüsse, verringern hierbei entscheidend die Werkstoffqualität und führen zu einer erhöhten Ausschussrate.

Um den hohen Anforderungen an die Bauteileigenschaften gerecht zu werden, ist es daher dringend erforderlich, nichtmetallische Einschlüsse in der Schmelze und damit im späteren Bauteil zu verhindern bzw. deren Gehalt frühzeitig zu bestimmen. Ein gesicherter Nachweis von



Bild 1: Aufbau des AloX.

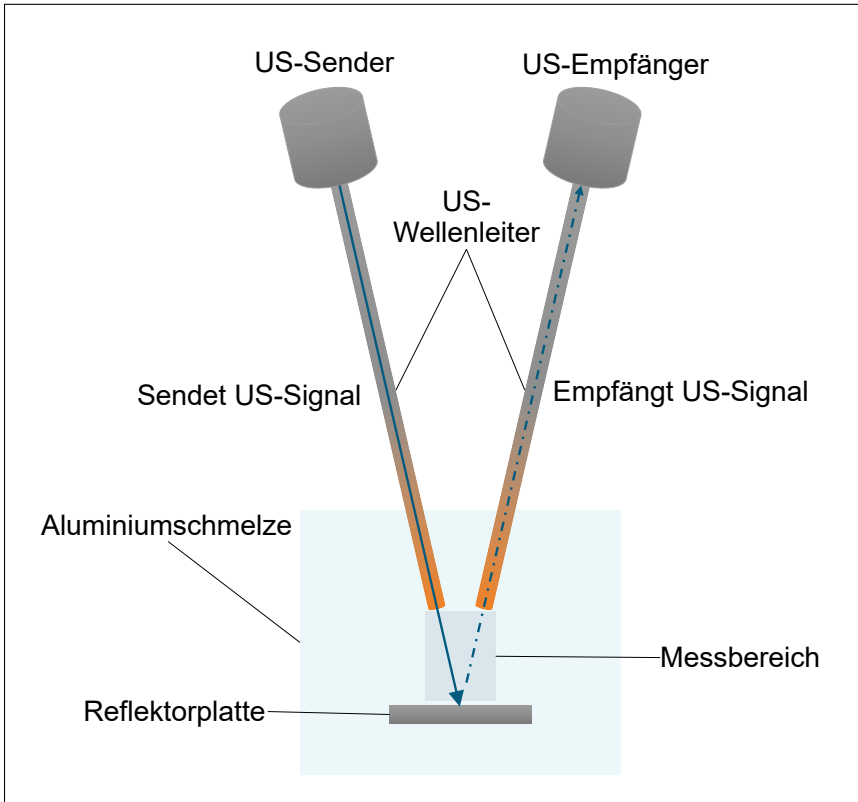


Bild 2: Schematische Darstellung des Messprinzips.

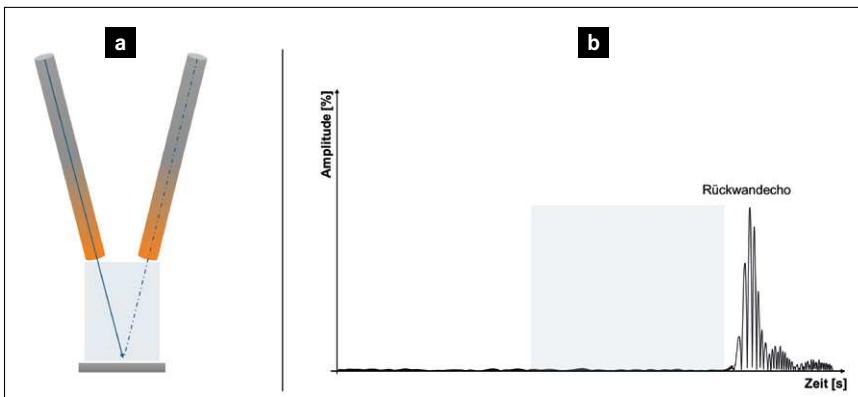


Bild 3: a) Schematische Darstellung des Messbereichs ohne Partikel; b) simuliertes Ultraschallsignalsignal.

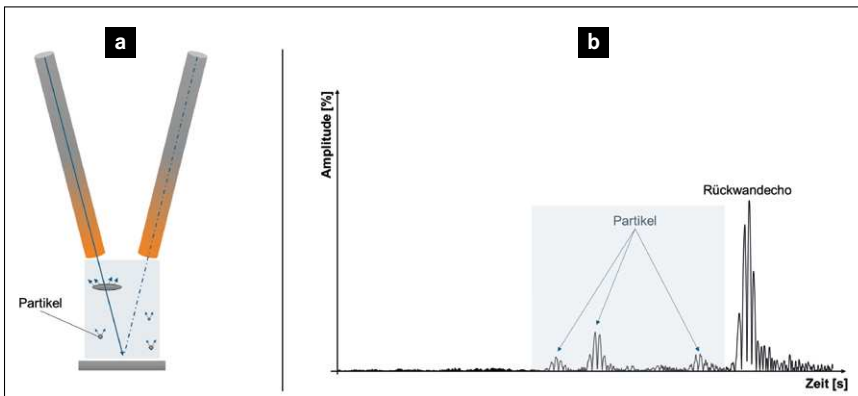


Bild 4: a) Schematische Darstellung des Messbereichs mit Partikeln; b) simuliertes Ultraschallsignalsignal.

Einschlüssen in einer Aluminiumschmelze ist jedoch aktuell nicht hinreichend schnell bzw. nur zu sehr hohen Kosten möglich [4,

5]. Gießereien stellen zudem hohe Anforderungen an den Nachweis bereits geringer Konzentrationen von Verunreinigungen.

Ein gängiges Verfahren zur Analyse der Schmelzequalität ist PoDFA (Porous Disc Filtration Analyzer), das jedoch eine Offline-Analyse mit aufwendiger Probenpräparation und metallografischer Analyse durch Experten erfordert, sodass das Ergebnis erst einige Tage nach dem Guss vorliegt. Somit ist es nicht für eine schnelle und kontinuierliche Analyse der Schmelzequalität einsetzbar. Das derzeit einzige auf dem Markt verfügbare Verfahren, das eine schnelle Analyse der Schmelze hinsichtlich der Gesamtmenge an Verunreinigungen sowie deren Größenverteilung erlaubt, ist das sogenannte LiMCA (Liquid Metal Cleanliness Analyzer) [6]. Allerdings weist auch dieses Verfahren Nachteile auf, wie z. B. die sehr hohen Anschaffungs- und Betriebskosten, das geringe Messvolumen sowie die Notwendigkeit der Bedienung durch einen erfahrenen Anwender. Des Weiteren ist die Messung in der Praxis auf Einschlüsse von Größen unter 150 µm beschränkt.

Daher wurde ausgehend von einem Projekt der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Vorhaben Nr. 1806 1 N) gemeinsam mit dem Gießerei-Institut der RWTH Aachen und Partnern aus der Industrie ein neues auf Ultraschall basierendes Messprinzip zur Bestimmung der Schmelzequalität von Aluminiumlegierungen untersucht. Die Arbeiten wurden im Anschluss im Rahmen des Forschungsclusters AMAP P20 (Advanced Metals and Processes) fortgesetzt. Gemeinsam mit der Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, der Nemak Europe GmbH, der Trimet Aluminium SE und der Ohm & Häner Metallwerk GmbH & Co. KG wurde das Messsystem AloX entwickelt und aufgebaut (Bild 1), das die Lücke zu den bisherigen Messverfahren schließt und die Anforderungen für einen breiten industrietauglichen Einsatz erfüllt. Das AloX kommt mit niedrigen Investitions- und Betriebskosten aus, bietet eine einfache Handhabung, erfordert kein Expertenwissen und liefert hinreichend genaue und reproduzierbare Messergebnisse.

Funktionsweise des AloX

Ultraschall kommt in der Werkstoffprüfung seit langem zum Nachweis von Fehlern wie z. B. Lunkern, Poren und Einschlüssen zum Einsatz. Hierbei wird über ein Koppelmedium (z. B. Öl oder Wasser) Ultraschall in das zu untersuchende Bauteil eingebracht. Anschließend breitet sich der Schall mit einer charakteristischen Geschwindigkeit, Streuung und Schwächung durch das Material aus. An Grenzflächen verschiedener Materialien werden die Schallwellen ganz

oder teilweise reflektiert. Diese Einflussgrößen geben Rückschluss auf den Bauteilzustand. So kann aus der Höhe und Lage des von einer Fehlstelle reflektierten Ultraschallsignals eine Aussage über die Fehlergröße sowie deren Position im Bauteil getroffen werden.

Die Ultraschallprüfung ist jedoch nicht nur für Festkörper, sondern auch für Flüssigkeiten bzw. Metallschmelzen geeignet. Trifft der Ultraschall auf Verunreinigungen wie z. B. ein Partikelfeld oder Gasblasen, kommt es ebenfalls zur Wechselwirkung. Eine Wechselwirkungsart ist die sogenannte Ultraschallstreuung, aus der sich die Größe oder die Konzentration der Verunreinigungen bestimmen lässt. Auf diesem Messprinzip beruht auch die Funktionsweise des AloX, um den Reinheitsgrad der Aluminiumschmelze zu charakterisieren. **Bild 2** zeigt schematisch das Messprinzip. Aufgrund der sehr hohen Einsatztemperatur, welche im Bereich zwischen 600 und 800 °C liegt, muss der Ultraschall über spezielle Ultraschall-Wellenleiter in die Schmelze eingekoppelt werden. Hierbei dient ein US-Wellenleiter als Ultraschall-Sender, ein weiterer Wellenleiter als Ultraschall-Empfänger.

In reinen Schmelzen (**Bild 3a**) stellt sich das Ultraschallzeitsignal (A-Bild) wie in **Bild 3b** gezeigt dar. Das A-Bild zeigt ausschließlich das Rückwandecho, das durch die Reflexion des Ultraschalls an der sogenannten Reflektorplatte entsteht. Diese Reflektorplatte ist Bestandteil des AloX und dient als Referenz um die eingekoppelte Ultraschallenergie zu überwachen. Befindet sich nun ein Partikelfeld im Messbereich zwischen den Ultraschallwellenleitern und der Reflektorplatte, so findet zusätzlich eine Streuung des Ultraschalls an einzelnen Partikeln statt (**Bild 4a**). Dies führt zu zusätzlichen Ultraschallanzeigen wie in **Bild 4b** dargestellt. Durch Auswertung von Höhe und Anzahl dieser partikelbedingten Ultraschallanzeigen bestimmt das AloX die Reinheit der Aluminiumschmelze. Das Messvolumen entspricht hierbei einigen Kubikzentimetern Schmelze und ergibt sich aus dem ausgebildeten Ultraschallfeld zwischen den Ultraschallwellenleitern und der Reflektorplatte.

In **Bild 5** ist das beschriebene Messprinzip grafisch dargestellt. Die zusätzlichen Ultraschallanzeigen innerhalb des Messbereichs werden registriert und entsprechend ihrer prozentualen Bildschirmhöhe zugeordnet. Im dargestellten Fall liegen zwei Streueignisse zwischen 10 % und 20 % Bildschirmhöhe und ein Streueignis zwischen 30 % und 40 % Bildschirmhöhe. Die Auswertung vieler sol-

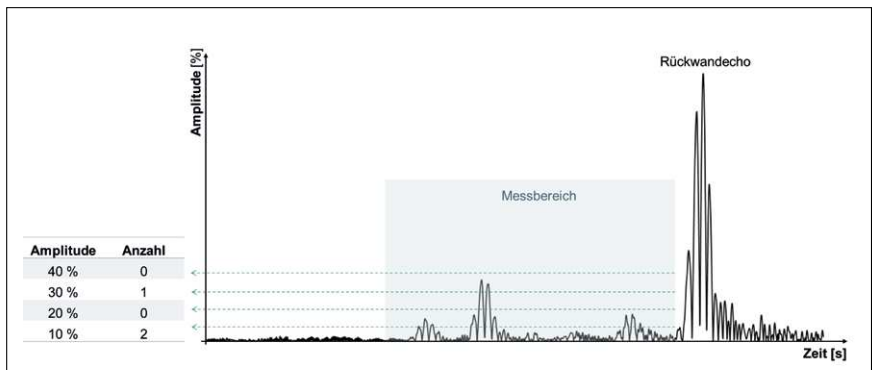


Bild 5: Grafische Darstellung des Messprinzips.

cher A-Bilder über ein vordefiniertes Zeitintervall stellt die Messgröße des AloX, die sog. AloX-Counts, in der Einheit [Counts/Zeitintervall] dar. AloX20-Counts sind hierbei alle Streueignisse oberhalb von 20 % Bildschirmhöhe, AloX25-Counts entsprechend oberhalb von 25 % Bildschirmhöhe usw. Durch die Auftragung der AloX-Counts über die Zeit kann zusätzlich eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Reinheit der Aluminiumschmelze getroffen werden.

Realer Messbetrieb

Das Aufmacherbild und **Bild 6** zeigen das AloX im realen Messbetrieb. Das AloX besteht, wie auch in **Bild 1** dargestellt, aus einem Messwagen, welcher an die speziellen Umgebungsbedingungen der Gießerei-Industrie angepasst wurde, sowie der eigentlichen AloX-Messeinheit. Der Messwagen dient als Positionier- und Transporteinheit des AloX und wurde so entwickelt und aufgebaut, dass eine Reinheitsgradmessung in allen üblichen Be-



Bild 6: Einsatz des AloX in einer Rinne mit Al-Knetlegierung.

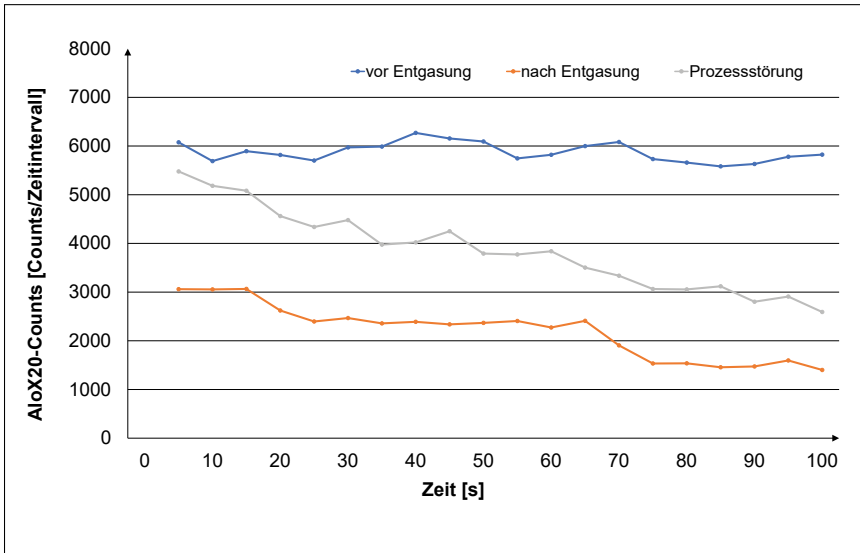


Bild 7: Messungen vor und nach dem Entgasungsprozess der Schmelze sowie bei Einbringung einer Prozessstörung.

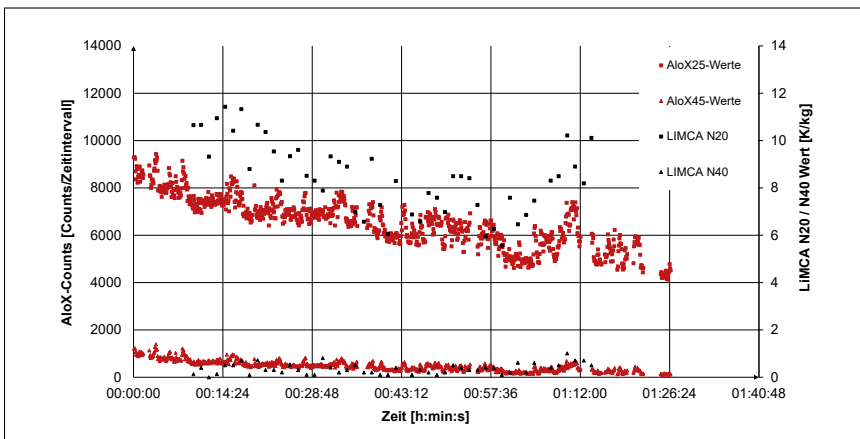


Bild 8: Vergleich der AloX-Counts mit den LiMCA-Messwerten im zeitlichen Verlauf.

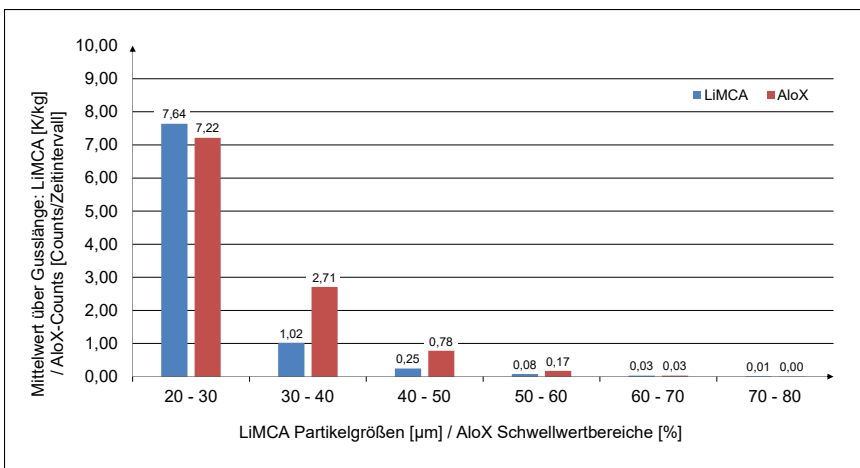


Bild 9: Vergleich der AloX-Counts mit LiMCA-Messwerten über die Verteilung der Partikelgrößen.

reichen einer Gießerei möglich ist. Mithilfe des Messwagens kann das AloX somit an gängige Messpositionen in Rinnen und Tiegeln eingesetzt und über eine elektrisch verfahrbare Hubeinheit in die Schmelze eingetaucht werden. Die Steuerung der Hubeinheit kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Da für reproduzier-

bare Messungen der Schmelzereinheit eine konstante Eintauchtiefe der US-Wellenleiter unerlässlich ist, wird diese im Automatikbetrieb mittels Abstandslaser überwacht und geregelt.

Die eigentliche AloX-Messeinheit besteht aus einem vollständig gekühlten Aluminiumgehäuse mit integrierter Tem-

peraturüberwachung sowie den aus Titan gefertigten US-Wellenleitern. Ein vom IZFP patentiertes Verfahren erlaubt den schnellen Tausch der US-Wellenleiter, da diese aufgrund der schmelzebedingten Korrosion nach längerer Einsatzzeit getauscht werden müssen. Weiterhin befindet sich an der AloX-Messeinheit der zuvor beschriebene keramische Reflektor, der zur kontinuierlichen Überwachung der Benetzung der US-Wellenleiter mit der Aluminiumschmelze dient. Die Bedienung des AloX erfolgt über einen robusten Laptop mit integrierter Ultraschallkarte sowie der am Fraunhofer IZFP entwickelten Ultraschall-Software „US-Studio“. Das Gesamtsystem wurde vollständig am Fraunhofer IZFP in Kooperation mit den Industriepartnern entwickelt und aufgebaut.

Voraussetzung für die Einbringung des Ultraschalls in die Aluminiumschmelze ist eine gute Benetzung zwischen den US-Wellenleitern und der Schmelze. Verunreinigungen wie z. B. oxidische, nichtmetallische Einschlüsse, die an den Stirnflächen der Wellenleiter haften, führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Benetzung und damit der Einkopplung von Ultraschall in die Schmelze. Daher wurde in das AloX eine separate, niederfrequente Leistungultraschalleinheit integriert, die zur Reinigung der verbauten US-Wellenleiter dient. Der Leistungultraschall wird jeweils zu Beginn jeder Messung eingesetzt sowie auch während der Messung, wenn die Überwachung des Rückwandechos eine kritische Verschlechterung der Benetzung zeigt.

Ergebnisse aus dem Industrieinsatz

Das AloX befindet sich seit August 2022 im industriellen Einsatz bei Nemak Europe, bei Trimet Aluminium und bei Ohm & Häner. Es wurden Messungen in unterschiedlichen industriellen Einsatzbereichen vom Warmhalteofen bis zur Rinne durchgeführt, wodurch bislang vielversprechende Ergebnisse erzielt werden konnten, welche die Leistungsfähigkeit des AloX zeigen.

Das Aufmacherbild zeigt den Messeinsatz in einem Warmhalteofen in ruher Schmelze mit einem Schmelzvolumen von 1500 kg. In diesem Fall sollte der Reinheitsgrad einer AlSi-Gusslegierung vor und nach der Entgasung bestimmt werden. Die Temperatur der Schmelze wurde während des Versuchs konstant gehalten. Mit dem AloX wurden für einen Zeitraum von knapp 2 min Messungen vor und nach dem Entgasungsprozess der Schmelze durchgeführt. **Bild 7** zeigt den zeitlichen Verlauf

der AloX20-Counts für einen Amplitudenschwellwert von 20 % über die Zeit. Wie aus den unterschiedlichen Kurvenverläufen ersichtlich, liegen die AloX20-Counts vor der Entgasung signifikant höher als nach der Entgasung. Dies entspricht auch den Erwartungen, da der Entgasungsprozess dazu führt, dass neben der Reduzierung des Wasserstoffgehalts auch Verunreinigungen aus der Schmelze entfernt werden. Beide Zustände lassen sich demnach sehr gut durch das AloX unterscheiden. Um die Empfindlichkeit des AloX zu demonstrieren, wurde zusätzlich eine Prozessstörung während des Entgasungsprozesses eingebracht, sodass diese vom Serienprozess abweicht. Wie aus **Bild 7** ersichtlich, beschreiben die AloX20-Counts mit Prozessstörung erwartungsgemäß einen gereinigten, aber nicht optimalen Zustand. Die AloX20-Counts liegen demnach zwischen den zuvor beschriebenen Messungen.

An einer Stranggussanlage für großformatige Aluminium-Halbzeuge fanden zum Benchmark und zur Beurteilung der Messgenauigkeit des AloX Versuche mit gleichzeitigem Einsatz eines LiMCA3 als Referenzsystem statt (siehe **Bild 6**). Die untersuchte Schmelze bestand aus einer typischen Knetlegierung für Stranggussbolzen. An einem Rinnen-Teilabschnitt wurden das LiMCA3 und das AloX nebeneinander positioniert. Zudem wurde darauf geachtet, dass der Partikel-Messbereich beider Geräte auf etwa gleicher Höhe liegt. Die Aufnahme der Messwerte erfolgte für eine Dauer von ca. 90 min. Die LiMCA N20-Werte in der Einheit [K/kg] (Anzahl der Einschlüsse mit einem Durchmesser $\geq 20 \mu\text{m} \times 1000$ pro kg Aluminiumschmelze) sowie die N40-Werte (Anzahl der Einschlüsse mit einem Durchmesser $\geq 40 \mu\text{m} \times 1000$ pro kg Aluminiumschmelze) als auch die AloX-Counts für einen Amplitudenschwellwert von 25 % und 45 % sind in **Bild 8** über der Zeit aufgetragen.

Wie aus **Bild 8** deutlich wird, korrelieren die LiMCA N20-Werte qualitativ und auch quantitativ sehr gut mit den AloX25-Counts, sowie die LiMCA N40-Werte mit den AloX45-Counts. **Bild 9** zeigt den Vergleich zwischen dem AloX und dem LiMCA,

indem die zeitlichen Mittelwerte für verschiedene Größenklassen von 20 bis 30 μm bis hin zu 70 bis 80 μm Partikelgröße gegeneinander aufgetragen wurden. Wie aus der Abbildung ersichtlich, stimmen die Ergebnisse über den gesamten Größenbereich tendenziell gut überein. Im Partikelgrößenbereich zwischen 30 und 50 μm gibt es die größte Abweichung. Diese könnten durch eine lokale Schwankung in der Partikelbeladung der Schmelze begründet werden, die das AloX aufgrund des deutlich größeren Messvolumens im Vergleich zum LiMCA registriert hat.

Fazit und Ausblick

Nach fast einem Jahr Einsatz des AloX in betrieblichen Schmelzen zeigt sich das hohe Potenzial des neu entwickelten Messsystems. Durch die enge Kooperation mit den Industriepartnern konnte das AloX so konzipiert und umgesetzt werden, dass es sich zum Einsatz in fast allen gängigen Messsituationen in Gießereien eignet. Dadurch werden Aussagen zur Schmelzereinheit und somit zur Produktqualität ermöglicht, die insbesondere vor dem Hintergrund des steigenden Einsatzes von Recyclingmaterial bedeutsamer werden. Im Vergleich zum teureren LiMCA lassen sich mit dem ultraschallbasierten AloX bei größerem Messvolumen sehr gute Messgenauigkeiten erreichen. Für den einfachen Betrieb wurde zudem auf die Nutzung von Druckluft verzichtet. Durch das vom Fraunhofer IZFP patentierte System ist zudem ein schneller Wechsel der Ultraschallwellenleiter problemlos möglich. Mit dem AloX steht ein industrietaugliches und präzises Messsystem zur Verfügung, das von den Anwendern ohne Expertenerfahrung einsetzbar ist. Das Ergebnis steht dem Anwender bereits während der Messung zur Verfügung. Durch den engen Austausch mit den Anwendern aus der Industrie tragen zudem Erfahrungen im betrieblichen Einsatz des AloX zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung und Verbesserung des Messsystems bei.

www.izfp.fraunhofer.de, www.nemak.com, www.trimet.eu, www.ohmundhaener.de

Dr. Thomas Waschkies, Andrea Mroß, Nico Brosta, Nizamettin Dengiz, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Tammo Koch, Nemak Europe GmbH, Thien Dang, TRIMET Aluminium SE, Jan Krampe, Ohm & Häner Metallwerk GmbH & Co. KG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18061N der Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V. (FVG), Hansaallee 203, Düsseldorf, wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Literatur

- [1]: Bader, S., u.a. (25.10.22): Werkstoffe im Leichtbau: Aluminium, [online] <https://www.leichtbauwelt.de/werkstoffe-im-leichtbau-aluminium/> [abgerufen am 22.06.2023]
- [2]: Postler, A: Der Werkstoff Aluminium und die Arbeit von Aluminium Deutschland, [online] www.aluminiumdeutschland.de/themen/werkstoff/ [abgerufen am 22.06.2023]
- [3]: Aluminium in der Anwendung, [online] <https://allesueberalu.de/aluminium-in-der-anwendung.html> [abgerufen am 22.06.2023]
- [4]: Hudson, S. W., u.a.: Inclusion Detection In Molten Aluminum: Current Art And New Avenues For In Situ Analysis. *International Journal Of Metalcasting* (2016), 10(3), S. 289-305
- [5]: Poynton S, u.a.: A Review of inclusion detection methods in molten aluminium. *Light Metals* (2009), TMS, S. 681 - 687
- [6]: Mobile liquid aluminium cleanliness analyzer LiMCA II, [online] <https://new.abb.com/products/measurement-products/analytical/metallurgical-analyzers/limca-iii> [abgerufen am 22.06.2023]