



Der Einsatz von Sekundäraluminium kann gegenüber Primäraluminium bis zu 85 % CO₂-Emissionen und bis zu 95 % Energie einsparen.

FOTO: ALBERT HÄNDTMANN METALLGUSSWERK

AlSi10MnMg-Legierung

Einfluss eines erhöhten Recyclinganteils auf deren Eigenschaften

VON VALENTIN ZIEGLER, MAX SCHÜTZE, LOTHAR KALLIEN, DENIS HOPP, KATHARINA FAERBER

In einer Welt, in der Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu vorrangigen Zielen zählen, etabliert sich die metallurgische Industrie als Schlüsselfeld für innovative Entwicklungen. Aluminium ist ein vielfältiger Leichtbauwerkstoff und steht im Zentrum dieser Transformation, indem es zu Energieeinsparungen und Effizienzsteigerungen beiträgt. Trotz dieser Vorteile bleibt die konventionelle Herstellung von primärem Aluminium aus Bauxit ein Prozess mit hoher Energiebilanz.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Nutzung von Sekundäraluminium, hergestellt durch Recyclingprozesse, zunehm-

end an Bedeutung. Sie stellt einen wesentlichen Schritt auf dem Weg zur Reduzierung von CO₂-Emissionen dar und ermöglicht beträchtliche Energieeinsparungen. Es ist erwiesen, dass der Einsatz von Sekundäraluminium gegenüber Primäraluminium bis zu 85 % CO₂-Emissionen und bis zu 95 % Energie einsparen kann [1].

Angesichts einer prognostizierten Verdoppelung des recycelten Aluminiums bis zum Jahr 2050 eröffnen sich nicht nur wirtschaftliche Perspektiven, sondern auch die Chance, eine nachhaltigere Produktion im Sinne eines geschlossenen Kreislaufs zu realisieren. Es ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung die Auswirkungen verschiedener schrottbezogener Verunreinigungen auf

die Eigenschaften der Aluminiumlegierungen zu untersuchen, um zukünftige Sekundärlegierungen so zu gestalten, dass ihre Eigenschaften eine Toleranz gegenüber unterschiedlichen Zusammensetzungen aufweisen [2].

Ziel ist es bei Sekundärlegierungen Eigenschaften zu erreichen, die mit denen der Primärlegierungen vergleichbar sind. Dies gewinnt vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung der Rückführung von Schrotten in den Stoffkreislauf zur Reduzierung der CO₂-Emissionen weiter an Bedeutung.

Die Eigenschaften von Aluminiumlegierungen reagieren empfindlich auf Schwankungen in der Zusammensetzung. Die Schwierigkeit bei der Herstellung besteht darin, dass die gewünschten Schrot-

te verfügbar sein müssen und in ihrer Zusammensetzung variieren können. Die Erweiterung des Toleranzbereichs für die Legierungszusammensetzung ist daher von entscheidender Bedeutung, um den Anteil von Recyclingmaterial in Aluminiumlegierungen unter Beibehaltung der gewünschten Materialeigenschaften zu erhöhen.

Durch den verstärkten Einsatz von Recyclingschrott, wie z. B. Motorblöcken und anderen Komponenten aus Verbrennermotoren, erhöht sich der Gehalt an Eisen, Kupfer und Zink in den Recyclinglegierungen. Diese „Verunreinigungen“ können derzeit nicht wirtschaftlich aus der Schmelze entfernt werden und beeinflussen die mechanischen und technischen Eigenschaften des Werkstoffs erheblich [3].

Einfluss von Verunreinigungen

Eisen

Eisen als eine der häufigsten Verunreinigungen in Aluminiumlegierungen kann bei höheren Gehalten die Duktilität erheblich negativ beeinflussen, insbesondere durch die Bildung intermetallischer Phasen wie der β -Al₅FeSi-Phase [4].

Kupfer

Die Anwesenheit von Kupfer in Aluminiumlegierungen führt immer zu einer Erhöhung der Festigkeit, Härte, Kriechbeständigkeit und Warmfestigkeit. Dieser Effekt wird durch die gleichzeitige Anwesenheit von Magnesium oder Zink verstärkt. Diese Kombination ermöglicht die Entwicklung von Legierungen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften, was insbesondere für Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an Festigkeit und Stabilität von Vorteil ist [5]. Dabei ist zu beachten, dass Kupfer in Aluminiumlegierungen zwar die mechanischen Eigenschaften verbessert, sich aber nachteilig auf die Korrosionsbeständigkeit in aggressiven Medien wie Säuren, Laugen und Meerwasser auswirkt [6].

Zink

Der Zusatz von Zink zu Aluminiumlegierungen führt zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit. Bis zu einem Zinkgehalt von etwa 2 % kann ein leichter Anstieg beobachtet werden. Ab einem Zinkgehalt von

KURZFASSUNG

In einem gemeinsamen Projekt der Hochschule Aalen und den Druckguss-Experten von Handmann wurde der Einfluss eines erhöhten Recyclinganteils auf die Eigenschaften der AlSi10MnMg-Legierung untersucht. Dabei ging es um die Effekte von Eisen-, Kupfer- und Zinkverunreinigungen, die beim Recycling auftreten, auf mechanische Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Mikrogefüge. Die Ergebnisse zeigen, dass ein höherer Recyclinganteil die Festigkeit meist nicht ändert oder verbessert, die Bruchdehnung sinkt teilweise. Die Wärmeleitfähigkeit wird stärker von Wärmebehandlungen als von Verunreinigungen beeinflusst. Eine leicht geringere Korrosionsbeständigkeit bei mehr Recyclinganteil wurde beobachtet. Dennoch ermöglicht ein höherer Recyclinganteil eine CO₂-Reduktion ohne wesentliche Einbußen bei den Materialeigenschaften. Die Studienergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für die Gießerei-Industrie und unterstützen nachhaltigere Produktionsprozesse.



Bild 1: Kaltkammerdruckgussmaschine (Frech DAK 400)/Bewegliche Formhälfte/Druckgussplatte.

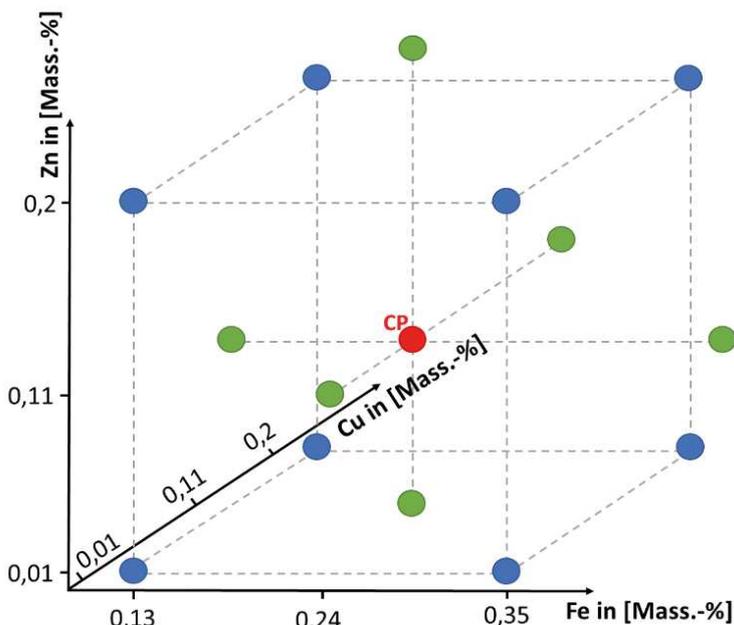


Bild 2: Schematische Darstellung des CCD-Versuchsraums.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung in % einer AlSi10MnMg [8].										
Legierungsbezeichnung	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Andere		Aluminium
								Je	Gesamt	
AlSi10MnMg	9,0 bis 11,5	0,25	0,05	0,40 bis 0,80	0,10 bis 0,60	0,07	0,20	0,05	0,15	Rest

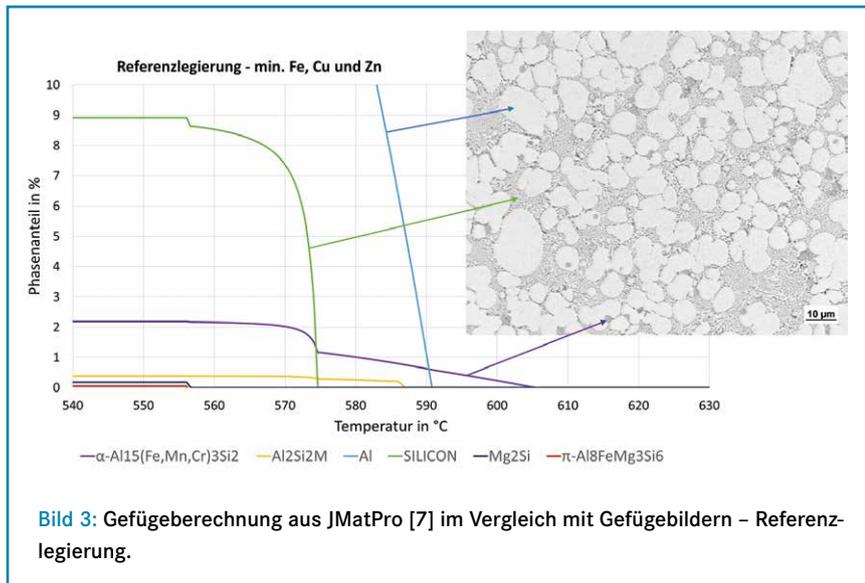


Bild 3: Gefügeberechnung aus JMatPro [7] im Vergleich mit Gefügebildern – Referenzlegierung.

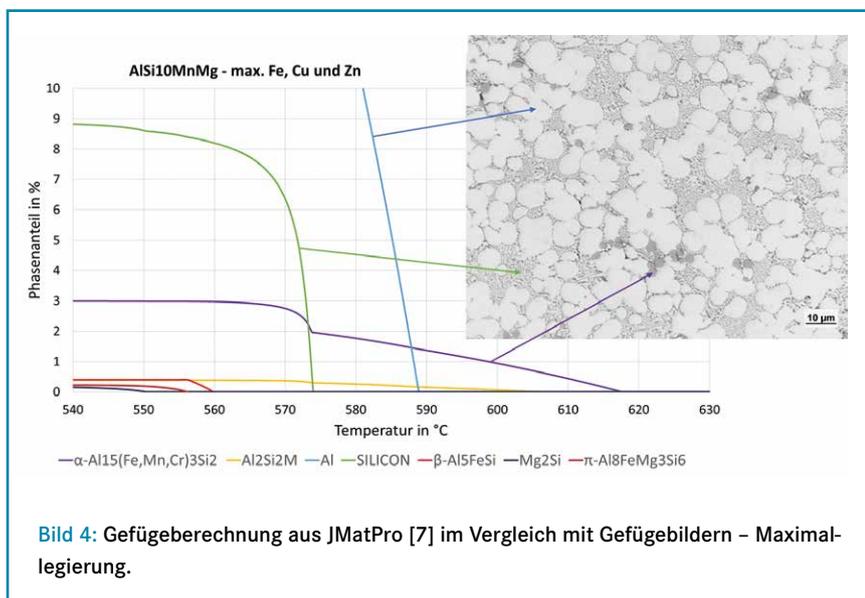


Bild 4: Gefügeberechnung aus JMatPro [7] im Vergleich mit Gefügebildern – Maximallegierung.

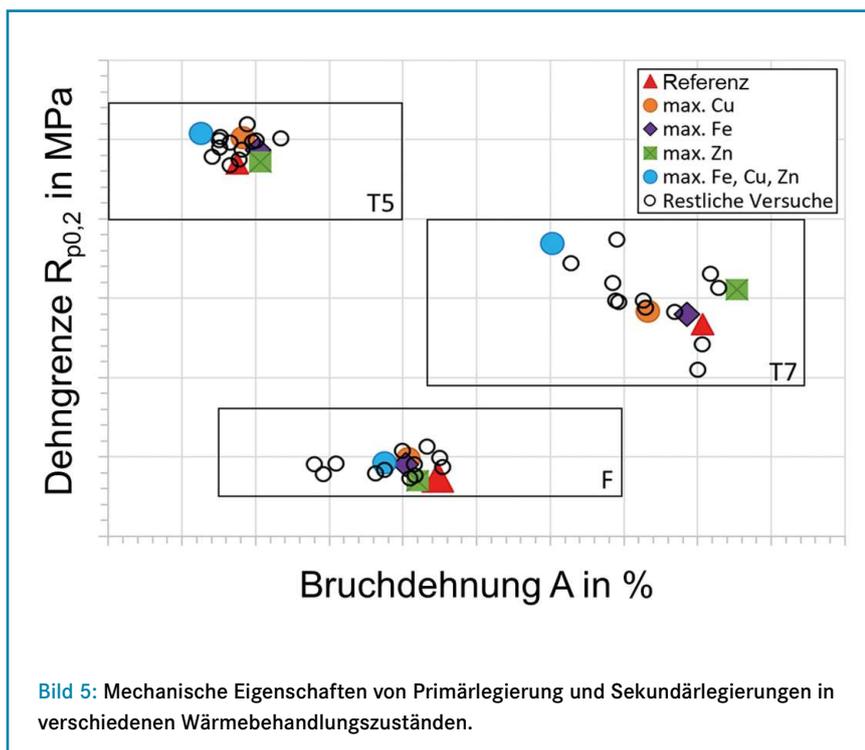


Bild 5: Mechanische Eigenschaften von Primärlegierung und Sekundärlegierungen in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen.

2 % und bei längeren Auslagerungszeiten nimmt die Dehnung jedoch wieder ab [5].

Untersuchung der Legierung AlSi10MnMg

Das Gießereilabor der Hochschule Aalen und die Albert Handtmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG haben für die Untersuchung die für Strukturbauteile eingesetzte Aluminiumlegierung AlSi10MnMg ausgewählt. Diese Legierung ist in der Automobilindustrie weit verbreitet und weist neben hohen Festigkeiten auch hohe Dehnungen und eine gute Korrosionsbeständigkeit auf. Viele OEMs verwenden diese für Gussteile in Elektrofahrzeugen sowie im Struktur- und Fahrwerksbereich.

Ziel ist es die Auswirkungen von erhöhten Recyclinggehalten und damit erhöhten Gehalten von Eisen, Kupfer und Zink auf die mechanischen Eigenschaften, die Wärmeleitfähigkeit, die Korrosionsbeständigkeit und das Mikrogefüge zu untersuchen. Die Herstellung der plattenförmigen Proben erfolgte an der Hochschule Aalen auf einer Kaltkammer-Druckgießmaschine (Bild 1) mit einer Schließkraft von 400 t. Die Gussplatten mit einer Wanddicke von 4 mm wurden vakuumunterstützt gegossen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der AlSi10MnMg-Legierung. Die Eisengehalte schwankten zwischen 0,13 % und 0,40 %, die Kupfer- und Zinkgehalte zwischen 0,01 % und 0,20 %. Der Mangangehalt blieb konstant bei 0,65 %. Die Strontiumgehalte lagen bei 0,02 % und die Magnesiumgehalte bei 0,29 %.

Im Rahmen eines Design of Experiment (DOE) wurde, ein Central-Composite-Design (CCD) angewendet, wie in Bild 2 schematisch dargestellt, um eine große Bandbreite an Legierungsvarianten untersuchen zu können. Dieses basiert auf einem 2³-Versuchsplan (Würfel, blau), der durch einen „Stern“ (grün) und sogenannte „Center Points“ (rot) ergänzt wird [9]. Es wurden der Gusszustand und zusätzlich die Wärmebehandlungszustände T5 und T7 berücksichtigt. Der Center Point wurde dreimal wiederholt, um eine Aussage über die Wiederholgenauigkeit treffen zu können. Drei der „Sternpunkte“ wurden in die Ebene gelegt, da sie im negativen Bereich des Versuchsraums lagen.

Die Gussproben wurden unmittelbar nach dem Entformen in Wasser abgeschreckt. 24 Stunden nach der Herstellung der Gussplatten wurden diese bei -28 °C eingefroren, um Diffusionsvorgänge zu unterbinden. Anschließend wurden die Platten wärmebehandelt. Die Wärme-

behandlung T5 erfolgte über einen Zeitraum von 150 min bei einer Temperatur von 190 °C. Bei der Wärmebehandlung T7 erfolgte eine Lösungsglühung bei 470 °C für 60 min mit anschließender sofortiger Abschreckung in Wasser. Die anschließende Warmauslagerung erfolgte bei einer Temperatur von 200 °C über einen Zeitraum von 180 min. Die Flachzugproben wurden nach DIN 50 125 Form E durch Fräsen hergestellt.

Ziel der umfassenden Untersuchung war die Erarbeitung einer Datenbasis mit Materialkennwerten. Diese Datenbasis ermöglicht eine schnelle Abschätzung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung bzw. des Recyclinggehaltes.

Mikroskopie

Die mikroskopische Auswertung der Gefügebilder zeigt ein feinkörniges Gefüge. Selbst bei einem maximalen Eisengehalt von 0,40 % sind keine unerwünschten nadelförmigen Fe-Ausscheidungen nachweisbar. Um die Phasenentwicklung besser zu verstehen, wurde eine Simulation der schematischen Gefügeentwicklung mit JMatPro durchgeführt [7]. Diese Simulation zeigt, welche Phasen sich wann bilden und in welchem prozentualen Verhältnis sie auftreten.

Die **Bilder 3** und **4** zeigen die simulierte Gefügeentwicklung sowie die realen Gefügebilder der Referenzlegierung und der Legierung mit maximalen Fe-, Cu- und Zn-Gehalten. Phasenanteile unter 1 % sind im Schlibbild nur schwer nachweisbar [7], sodass in den Gefügebildern nur die α -Al₁₅(Fe,Mn,Cr)₃Si₂-Phase, der Al-Mischkristall und das Al/Si-Eutektikum in den Gefügebildern ersichtlich sind.

Die Ergebnisse dieser Gefügeuntersuchung weisen eine typische feine Mikrostruktur auf. Sie zeigen, dass ein erhöhter Eisengehalt zu einem erhöhten Phasenanteil der α -Al₁₅(Fe,Mn,Cr)₃Si₂-Phase führt. Außerdem bildet sich die α -Al₁₅(Fe,Mn,Cr)₃Si₂-Phase bei höheren Eisengehalten früher aus. Die β -Al₅FeSi-Phase und die π -Al₈FeMg₃Si₆-Phase treten bei max. Fe-Gehalten auf, jedoch lassen sich diese nur in der Simulation erkennen.

Ergebnisse der Zugprüfung

Insgesamt wurden 1020 Zugversuche an der Hochschule Aalen durchgeführt. **Bild 5** zeigt die Dehngrenze und die Bruchdehnung für die insgesamt 51 Versuchsvarianten. Die Referenzlegierung, die Varianten mit den maximalen Gehalten an Eisen, Kupfer und Zink, bei denen jeweils nur ein Element erhöht wurde, sowie die Variante, bei der alle drei Elemente gleichzeitig maximiert wurden, sind separat markiert. Die schwarzen Umrandungen der einzelnen Wärmebehandlungszustände zeigen die minimalen und maximalen Abweichungen der Messwerte. Demnach hat die Wärmebehandlung einen größeren Einfluss auf die Streckgrenze und die Bruchdehnung als die Variation der Legierungselemente.

Einfluss des Legierungselements Eisen

Die Zugfestigkeit und die Streckgrenze scheinen, wie aus **Bild 6** ersichtlich, keinen signifikanten Einfluss in Abhängigkeit vom Eisengehalt aufzuweisen. Allerdings ist eine leichte Abnahme der Bruchdehnung im Gusszustand zu erkennen. Diese Abnahme ist jedoch im Zusammenhang mit der

1/2

Seite hoch

85 x 260

CHPT Germany

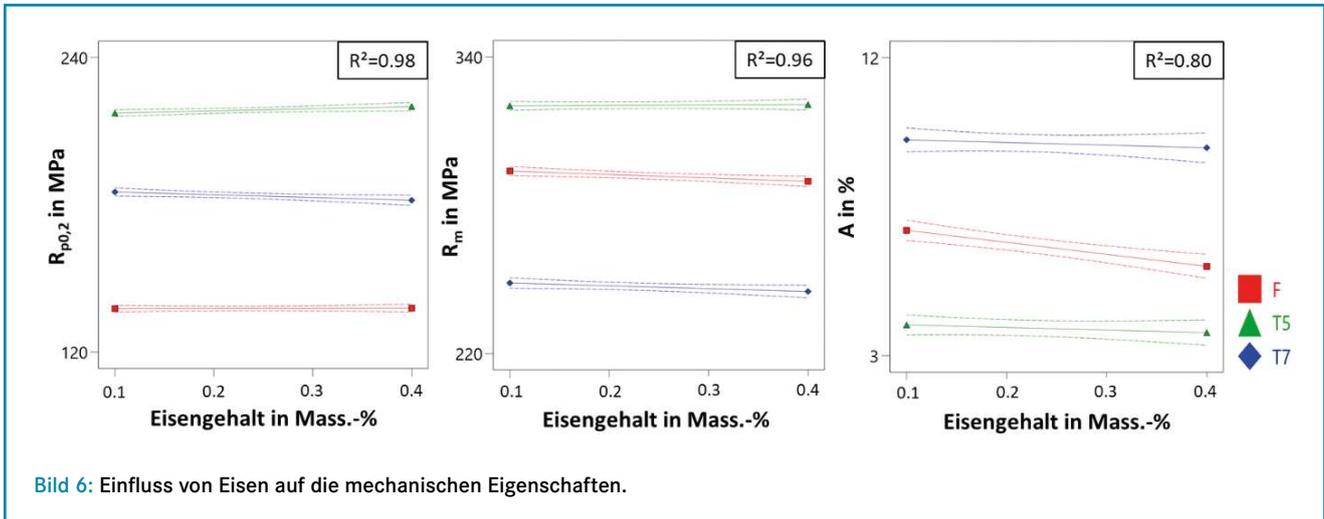


Bild 6: Einfluss von Eisen auf die mechanischen Eigenschaften.

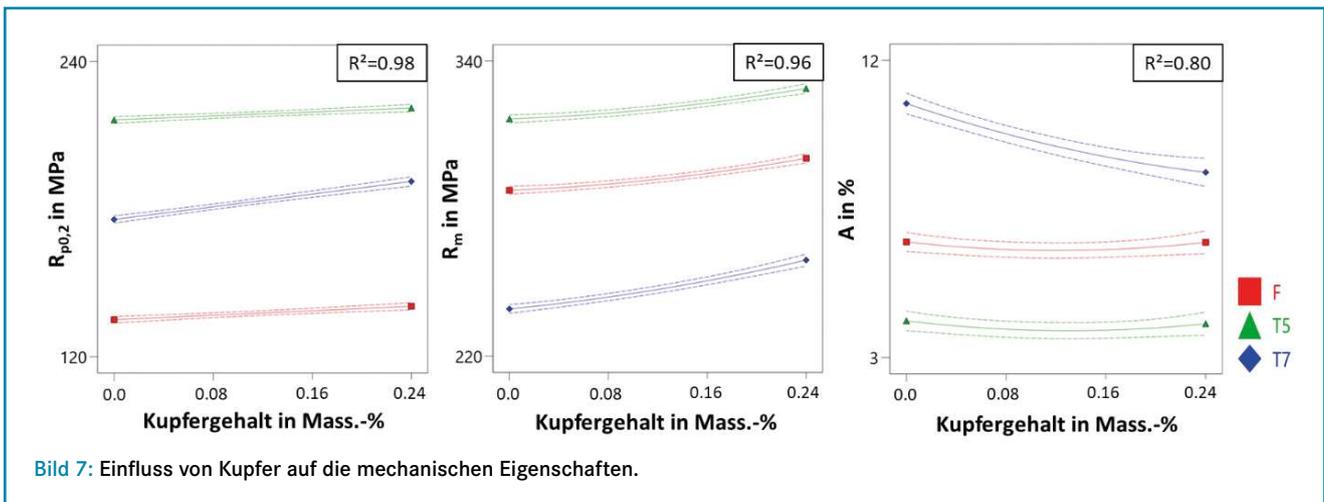


Bild 7: Einfluss von Kupfer auf die mechanischen Eigenschaften.

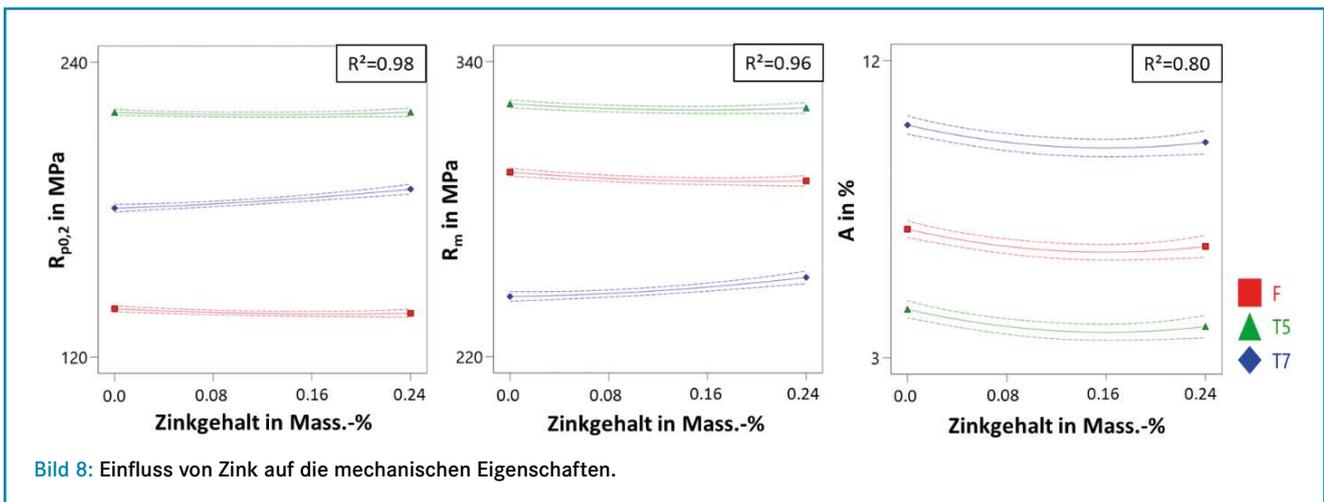


Bild 8: Einfluss von Zink auf die mechanischen Eigenschaften.

Messabweichung und einem R^2 von 0,804 als äußerst gering einzustufen. R^2 dient als Gütemaß für die Regression und damit für die lineare Anpassung, wobei ein Wert von 1 eine perfekte Anpassung darstellt.

Einfluss des Legierungselements Kupfer

Die Erhöhung des Kupfergehaltes führt, wie in Bild 7 dargestellt, bei allen drei

Wärmebehandlungszuständen zu einem Anstieg von $R_{p0,2}$ und R_m . Allerdings ist eine deutliche Abnahme der Bruchdehnung A im Wärmebehandlungszustand T7 zu beobachten.

Einfluss des Legierungselements Zink

Eine Erhöhung des Zinkgehaltes führt nur im Wärmebehandlungszustand T7 zu ei-

ner Erhöhung der Zugfestigkeit und der Streckgrenze (Bild 8). Im Gusszustand und im Wärmebehandlungszustand T5 bleiben diese konstant. Bei der Bruchdehnung ist zunächst eine leichte Abnahme zu beobachten, ab etwa 0,1 % Zink bleibt die Bruchdehnung linear.

Die höheren Eisengehalte haben wenig Einfluss auf die Eigenschaften, da Mangan eine Umwandlung der schädlichen β -Al₅FeSi-Phase in feinere Eisenverbindun-

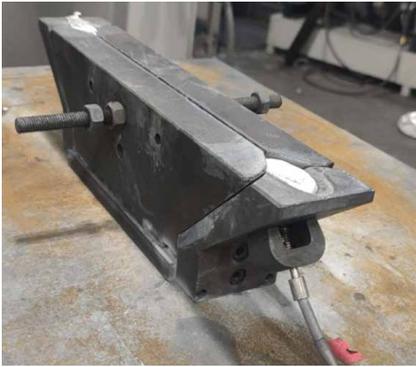


Bild 9: Dietz-Kokille mit Temperaturfühler [11].

gen und/oder die „Chinesen Schrift“ ermöglicht. Das optimale Mangan-Eisen-Verhältnis beträgt 2/3 [10]. Da der maximale Eisengehalt unterhalb des optimalen Mangan-Eisen-Verhältnisses liegt, wird die nadel- bzw. plattenförmige β -Al₅FeSi-Phase unterdrückt, weshalb kein negativer Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden konnte.

Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurden, wie in **Bild 9** dargestellt, zusätzlich Proben im Kokillengussverfahren mit

einem Durchmesser von 17 mm hergestellt. Um eine möglichst homogene Versuchsumgebung zu gewährleisten, erfolgte der Abguss der Proben in einem standardisierten Intervall von 35 s. Dabei wurde die Dietz-Kokille mit einem Temperatursensor überwacht. Nach dem Gießvorgang wurden die Rundproben in Wasser abgeschreckt.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit der Hot-Disk-Methode an der Hochschule Aalen bestimmt, wobei sich bei den verschiedenen Legierungsvarianten keine signifikanten Änderungen ergaben [11]. **Bild 10** zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsaufbaus. Die Wärmebehand-

lungen überlagern, wie aus **Bild 11** ersichtlich, den Einfluss der Legierungseinstellung auf die Wärmeleitfähigkeit.

Die geringen Unterschiede zwischen dem Gusszustand und dem Wärmebehandlungszustand T5 in der Versuchsvariante mit den maximalen Eisen-, Kupfer- und Zinkgehalten lassen vermuten, dass die Lösungsglüh-temperatur einen signifikanten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ausübt. Während des Lösungsglühens findet einerseits eine globulare Umwandlung des eutektischen Siliziums statt, andererseits wird das in der Legierung AlSi10MnMg enthaltene Magnesium im α -Mischkristall gelöst [13].

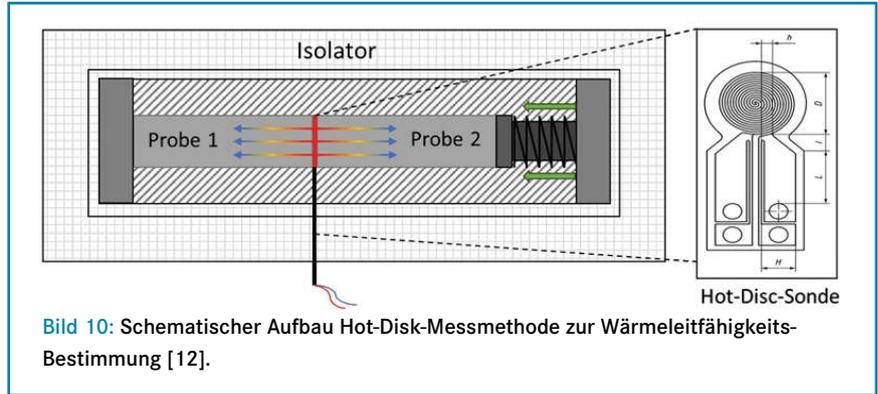


Bild 10: Schematischer Aufbau Hot-Disk-Messmethode zur Wärmeleitfähigkeits-Bestimmung [12].

1/4
Seite postkarte
 85 x 128
S'US

1/4
Seite postkarte
 85 x 128
Hohnen

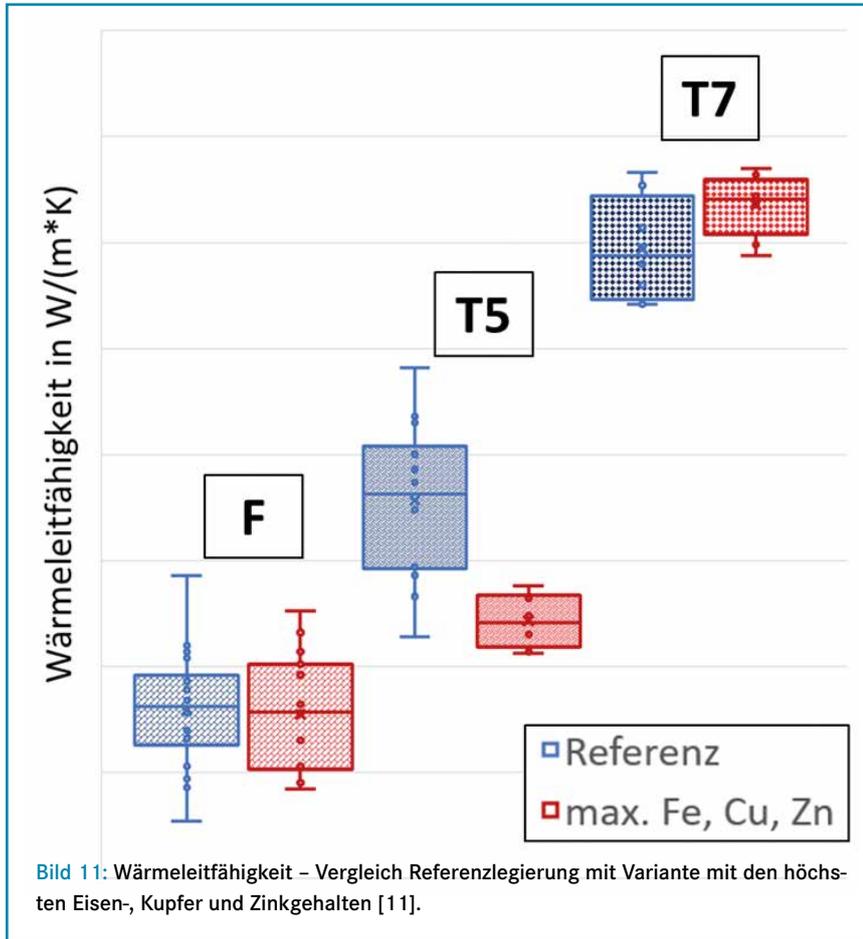


Bild 11: Wärmeleitfähigkeit – Vergleich Referenzlegierung mit Variante mit den höchsten Eisen-, Kupfer und Zinkgehalten [11].

Die globale Umformung des eutektischen Siliziums (Bild 12) während des Lösungsglühens trägt zu einer Homogenisierung des Gefüges bei, was potenziell zu einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit führt [14].

Die Schlussfolgerung, dass höhere Lösungsglühentemperaturen zu einer besseren Wärmeleitfähigkeit führen, erscheint plausibel. Es wäre jedoch wichtig, weitere Untersuchungen durchzuführen, um die genauen Mechanismen dieser Verbesserung zu verstehen und die optimalen Lösungsglühentemperaturen für die gegebene Legierung zu bestimmen. Darüber hinaus könnten weitere Parameter, wie z. B. die Haltezeit beim Lösungsglügen, weiter analysiert werden, um den Werkstoff gezielt zu optimieren.

Korrosionsbeständigkeit

Zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit wurden ausgewählte Varianten der Gussplatten im Gusszustand von der Albert Handmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG einem Salzsprühnebeltest unterzogen. Dieser umfasste sowohl eine Zeitdauer von 24 Stunden als auch von 72 Stunden. Der 24-stündige Salzsprühnebeltest wurde ausschließlich visuell beurteilt (Bild 13). Hierbei zeigte sich, dass die Variante mit dem höchsten Kupfergehalt (Sternpunkt) die geringste Korrosionsbeständigkeit aufwies. Nach dem 72-stündigen Salzsprühnebeltest wurde auch eine optische Beurteilung vorgenommen. Ergänzend wurden Mikroschliffe angefertigt, um eine genaue Bestimmung der Korrosions-

tiefe zu ermöglichen. Wie aus Bild 14 ersichtlich ist, weisen die Variante mit dem höchsten Eisengehalt und die Variante, bei der alle drei Elemente maximal erhöht wurden, die größten Korrosionstiefen auf.

Die Anordnung der Standardpotenziale in Bild 15 zeigt, dass Kupfer ein höheres Potenzial als Eisen aufweist. Nach dem elektrochemischen Prinzip sollte eine höhere Position in der elektrochemischen Spannungsreihe ein höheres Korrosionspotential und damit eine größere Korrosionstiefe aufzeigen. In diesem Zusammenhang wäre zu erwarten, dass Legierungen mit höherem Kupfergehalt eine größere Korrosionstiefe aufweisen als solche mit höherem Eisengehalt.

Recyclinggehalt und CO₂-Fußabdruck

Die Definition der zulässigen Verunreinigungselemente ist u. a. in der DIN EN 1706 [17] sowie in OEM-Normen festgelegt. Die engen Toleranzen erlauben nur einen geringen bis mittleren Einsatz von Recyclingmaterial in der Basislegierung (20 bis 50 %), der CO₂-Fußabdruck der Gesamtlegierung liegt damit bei 4 bis 6 kg CO₂/kg. Bild 16 zeigt, wie sich der mögliche Recyclinggehalt und der CO₂-Fußabdruck verändern, wenn die zulässigen Zusammensetzungen, die im Rahmen dieses Projekts untersucht wurden, erweitert werden.

Fazit und Ausblick

In einem gemeinsamen Projekt der Hochschule Aalen und der Druckguss-Experten von Handmann wurde der Einfluss des Recyclinganteils auf die Eigenschaften von Aluminiumlegierungen umfassend untersucht. Zulässige Grenzwerte der Chemie, dazugehörige Recyclingraten und daraus resultierende CO₂-Fußabdrücke konnten ermittelt werden. Die Ergebnisse fließen in die zukünftige Fertigung von nachhaltigen Strukturteilen ein, die alle Kundenanforderungen erfüllen. Mit dieser Forschungsarbeit tragen die Hoch-

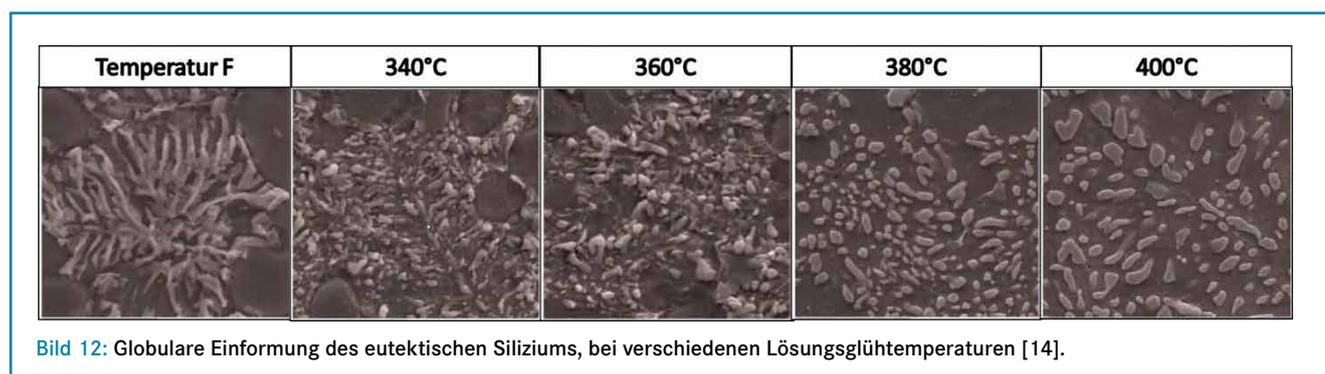


Bild 12: Globulare Einformung des eutektischen Siliziums, bei verschiedenen Lösungsglühentemperaturen [14].



Bild 13: Gussplatten nach 24-stündigem Salzsprühnebeltest [15].

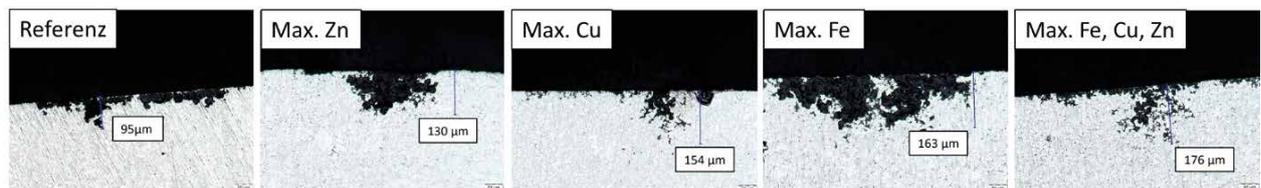


Bild 14: Mikroschliffe nach 72-stündigem Salzsprühnebeltest [15].

schule Aalen und Handtmann dazu bei wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen in der Branche voranzutreiben und den Einsatz von recyceltem Material zu maximieren, denn als familiengeführtes Unternehmen ist das Thema Nachhaltigkeit ein integraler Bestandteil der Unternehmenskultur von Handtmann und ein wichtiger Baustein der Klimastrategie.

Die Untersuchung zeigt den Einfluss eines erhöhten Recyclinganteils auf die mechanischen Eigenschaften, die Korrosionsbeständigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Bei den mechanischen Eigenschaften werden mit steigendem Recyclinganteil konstante oder steigende Zugfestigkeit und Streckgrenze beobachtet. Bei der Bruchdehnung kommt es bei

einigen Wärmebehandlungszuständen zu einer leichten Verschlechterung. Eine Erhöhung des Recyclinganteils führt zu einer leichten Verschlechterung der Korrosionsbeständigkeit. In Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit wurde festgestellt, dass die Veränderungen in der Legierungseinstellung durch die verschiedenen Wärmebehandlungszustände überwiegen. Die im Rahmen dieses Projektes ermittelten Ergebnissen, zeigen dass eine signifikante Erhöhung des Recyclinganteils zu einer Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks führt. Darüber hinaus erfüllt die Studie die Kundenanforderungen hinsichtlich spezifischer Werkstoffeigenschaften bei gleichzeitiger Nachhaltigkeit.

Aufgrund des geringen Einflusses des

Eisengehaltes wird in einer Folgestudie der kritische Eisengehalt ($Fe_{krit} = 0,74 \%$) mit dem idealen Mangan-Eisen-Verhältnis ($Fe = 0,98 \%$) verglichen. Ebenso soll ein extremer Eisengehalt von 1,61 % untersucht werden.

www.hs-aalen.de/de/facilities/71
www.handtmann.de

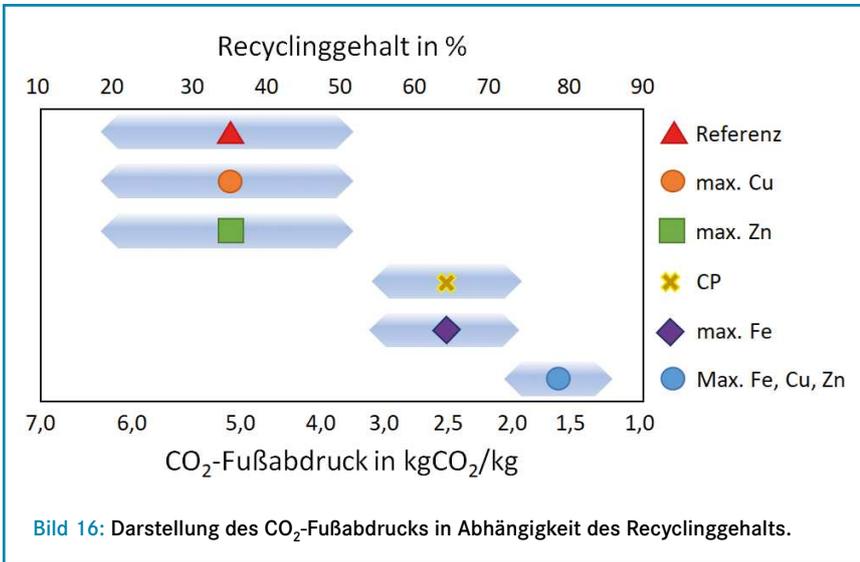
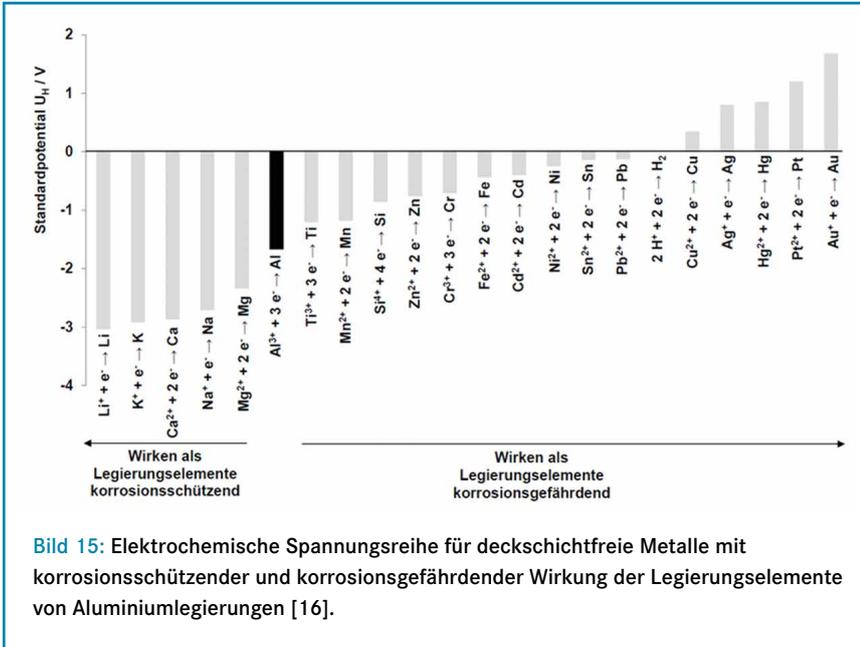
Die zugrundeliegenden Ergebnisse wurden mit Mitteln des BMBF gefördert: Förderkennzeichen 13FH4110IA, SmartPro FH-Impuls (Project SmartPro, Subproject Smart-LIGHT)

Valentin Ziegler, Max Schütze, Prof. Dr. Lothar Kallien, Hochschule Aalen, Denis

1/6 Seite quer

174 x 42

Tribo



Hopp, Abteilungsleiter Werkstofftechnologie und Prozessentwicklung, Katharina

Faerber, Innovation Manager, Albert Handtmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG

Literatur

[1] RECYCLING magazin – Trends, Analysen, Meinungen und Fakten zur Kreislaufwirtschaft 02/2022 (S.16)
 [2] D. Raabe; D. Ponge; P. J. Uggowitzer; M. Roscher; M. Paolantonio; C. Liu; H. Antrekowitsch; E. Kozeschnik; D. Seidmann; B. Gault; F. de Geuser; A. Deschamps; C. Hutchinson; C. Liu; Z. Li; P. Prangnell; J. Robson; P. Shanthraj; S. Vakili; C. Sinclair; L. Bourgeois; S. Pogatscher: Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys (2022) PII: S0079642522000287
 [3] A. Marquart; A. Siemund; T. Beyer; M. Rosefort: Recyclinganteil steigern und Materialqualität sichern (12/2022) Gießerei Heftnummer: 109 / (S. 24 - 28)
 [4] J. A. Taylor: The Effect of Iron in Al-Si

Casting Alloys in 35th Australian Foundry Institute National Conference, 2004
 [5] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie: Aluminium-Guss – Grundlagen – Anwendungen – Legierungen – Beispiele (2013) ISBN: 978-3-872-60175-9
 [6] F. Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium. (2014) ISBN: 978-3-662-43807-7
 [7] T. Stürzel Lightmetals Technology and Asynchronous Rotor Technology Specialist, ZF Friedrichshafen AG: Tool: JMatPro, the Materials Property Simulation Package, persönliche Mitteilung, 2023
 [8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1706 – Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften. (2020) ICS 77.150.10
 [9] W. Kleppmann: Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren (2020) ISBN: 978-3-446-46146-8
 [10] A. Niklas, A. Bakedano, S. Orden, E. Nogués, M. da Silva, A. I. Fernández-Calvo: Microstructure and Mechanical Properties of a New Secondary AlSi10MnMg(Fe) Alloy for Ductile High Pressure Die Casting Parts for the Automotive Industry. (2016) ISSN: 1662-9795, Vol. 710
 [11] S. Höing: Messung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Zusammensetzung einer AlSi10MnMg-Sekundärlegierung. (2023) Masterarbeit, Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft
 [12] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 22007-2 – Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit – Teil 2: Transientes ebenes Wärmequellenverfahren (Hot-Disc-Verfahren) (2022) DE_352432001
 [13] C. Herrmann, G. Hartmann, H. Pries: Energie- und Ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss. (2013) ISBN: 978-3-642-39852-0
 [14] H. Koch, A. Kleine: Aluminiumlegierungen für Strukturbauteile und deren Wärmebehandlung. (2018) 3. Internationale VDI-Fachtagung, Gießen von Fahrwerks- und Karosseriekomponenten
 [15] Albert Handtmann Metallgusswerk GmbH & Co. KG: SmartLight Untersuchung einer AlSi10MnMg mit erhöhtem Kupfer-, Eisen- und Zinkanteil – Prüfungsergebnisse Korrosionsprüfung (neutrale Salzsprühnebelprüfung nach DIN EN ISO 9227) (2023)
 [16] B. Heine: Skript zur Vorlesung: „Aluminiumlegierungen – Eine Einführung“ Hochschule Aalen (2023)
 [17] DIN EN 1706:2013-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 1706:2020 (ICS 77.150.10)

1/8 Seite
54 x 74
Bobe