

## ARTICLE

# Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Zusammensetzung einer AlSi10MnMg-Sekundärlegierung

## Thermal conductivity as a function of the composition of an AlSi10MnMg secondary alloy

J. Kortsch-Banzhaf<sup>1</sup>  | S. Höing<sup>2</sup> | L. Kallien<sup>2</sup> | M. Merkel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Virtual Product Development, Aalen University of Applied Sciences, Aalen, Germany

<sup>2</sup>Gießereitechnik Aalen, Aalen University of Applied Sciences, Aalen, Germany

### Correspondence

J. Kortsch-Banzhaf, Institute for Virtual Product Development, Aalen University of Applied Sciences, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen, Germany.

Email:

[jens.kortsch-banzhaf@hs-aalen.de](mailto:jens.kortsch-banzhaf@hs-aalen.de)

### Funding information

Publikation gefördert durch die Hochschule Aalen

### Abstract

AlSi10MnMg-Legierungen werden mit verschiedenen Eisen-, Kupfer- und Zinkkonzentrationen untersucht. Neben den variierten Legierungskonzentrationen werden unterschiedliche Wärmebehandlungen (F, T5 und T7) durchgeführt und anschließend auf ihre Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität untersucht. Hergestellt werden die Prüfkörper mit Kokillenguss. Der Hintergrund der Untersuchungen ist die schlechte Recyclingbarkeit von Aluminiumlegierungen mit Legierungsbestandteilen von Eisen, Kupfer und Zink, da es bislang keine wirtschaftliche Methode gibt, diese Legierungsbestandteile zu entfernen. Zur Bestimmung des Einflusses der Legierungselemente Eisen, Kupfer und Zink werden Messungen der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität mit einer Hot-Disk mit transienter Messmethode durchgeführt.

### SCHLÜSSELWÖRTER

Aluminiumlegierung, Kokillenguss, Transient-Plane-Source-Verfahren, Wärmebehandlung, Wärmeleitfähigkeit

### Abstract

AlSi10MnMg alloys are investigated with different iron, copper and zinc concentrations. In addition to the varying alloy concentrations, different heat treatments (F, T5 and T7) are carried out and then tested for their thermal conductivity and heat capacity. The test specimens are produced using chill casting. The background to the investigations is the poor recyclability of aluminum alloys with alloy components of iron, copper and zinc, as there is currently no economical method of removing these alloy components. To determine the influence of the alloying elements iron, copper and zinc, measurements of the thermal conductivity and heat capacity are carried out using a hot disk with a transient measurement method.

### KEYWORDS

Aluminium alloy, chill casting, heat treatment, thermal conductivity, transient plane source method

## 1 | EINLEITUNG

Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen sind die weltweit am häufigsten eingesetzten Werkstoffe. Mit seiner geringen Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  von unlegiertem Aluminium trägt der Werkstoff einen entscheidenden Beitrag zur Gewichtsreduktion von Bauteilen bei. Insbesondere in der Automobilbranche kann durch den Einsatz von dem Leichtbauwerkstoff Aluminium (bzw. Aluminiumlegierung) die Masse eines Fahrzeugs enorm gesenkt werden. Fahrzeuge mit einer geringeren Gesamtmasse tragen einen wichtigen Teil dazu bei, den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß eines Fahrzeugs zu senken, Bild 1. Neben der Ersparnis von  $\text{CO}_2$  im Fahrzeugbetrieb kommt hinzu, dass Aluminium eines der am häufigsten vorkommenden Elemente der Welt ist. Jedoch liegt Aluminium nicht in Reinform vor, sondern muss aus Bauxit gewonnen werden [1–4].

Die Gewinnung, bzw. die Herstellung von Primäraluminium ist einer der größten Treibhausgasproduzenten der Welt. Vom weltweit ausgestoßenem  $\text{CO}_2$  können 3% auf die Gewinnung bzw. Herstellung von Aluminium umgelegt werden. Bei ausschließlicher Betrachtung der Industrie, sind es 15% mit  $1,1 \text{ Gt CO}_{2\text{eq}}/\text{Jahr}$  [1]. Um den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß durch die Gewinnung bzw. Herstellung von neuem Aluminium zu senken, bietet sich das Recyceln von aluminiumhaltigem Schrott an. Aluminium, das aus Schrott gewonnen wird, wird Sekundäraluminium genannt. Bei der Herstellung von Sekundäraluminium kann bis zu 95% der Energie eingespart werden, welche benötigt wird, um dieselbe Menge an Primäraluminium herzustellen [4,8,9].

Trotz eines erheblichen Aufwands während des Recyclingprozesses und der Vielzahl an Prozessmöglichkeiten zur Entfernung von Verunreinigungen gibt es Elemente, für welche es noch keinen (wirtschaftlichen) Prozess gibt, um diese Verunreinigungen zu entfernen. Beispiele hierfür sind Eisen, Kupfer und Zink [7,8,9].

Auch treten verschiedene Elemente gehäuft im Aluminiumschrott auf. Ein Beispiel hierfür sind die Elemente Kupfer und Zink, welche über das Recycling von alten Motorblöcken in den Schrottkreislauf eingebracht werden [1].

Um den Einfluss der Verunreinigungen auf die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen, werden Messungen der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmekapazität im transienten Verfahren durchgeführt. Da die thermischen Eigenschaften von Aluminium nicht nur durch die Zugabe von Legierungselementen beeinflusst werden kann, sondern auch durch die Abkühlgeschwindigkeit bzw. die Durchführung einer Wärmebehandlung, werden neben den unterschiedlichen Legierungskonzentrationen von Eisen, Kupfer und Zink, auch die Wärmebehandlungen T5 und T7 untersucht [1–3]. Eine hohe Abkühlgeschwindigkeit sorgt beispielweise für ein feinkörniges Gefüge [1]. Untersucht werden die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität mit einer Hot-Disk TPS 2500 S.

## 2 | METHODE

### 2.1 | Herstellung der Proben

Die Basis für die unterschiedlichen Legierungszusätze bildet  $\text{AlSi10MnMg}$ , welche mit unterschiedlichen Konzentrationen von Eisen, Kupfer und Zink legiert werden, um die Verunreinigungen des zu recycelnden Aluminiums abbilden zu können, Tabelle 1. Neben den unterschiedlichen Legierungskonzentrationen wurden unterschiedliche Wärmebehandlungen durchgeführt. Zum einen werden die Legierungen im Originalzustand untersucht. Diese dient als Referenzprobe, zum anderen werden die Wärmebehandlungen T5 und T7 durchgeführt. Die Proben, an denen eine Wärmebehandlung durchgeführt werden sollte, wurden nach dem Abguss in

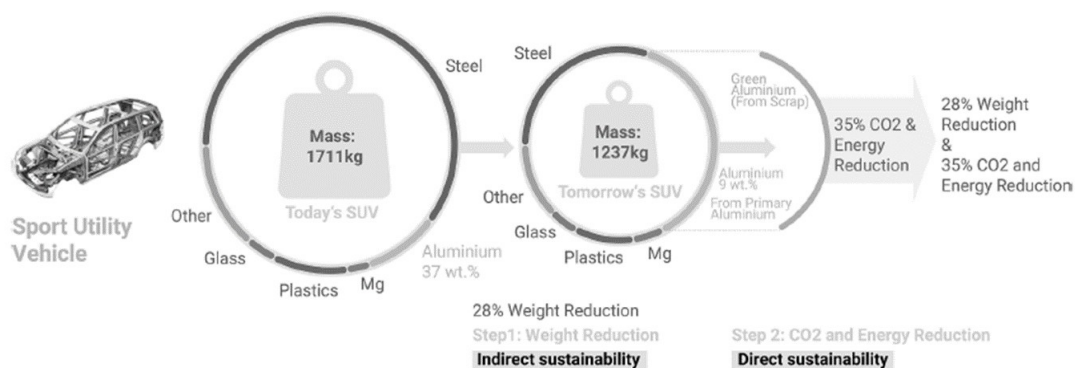


BILD 1 Gewichts- sowie  $\text{CO}_2$ -Einsparpotenzial im Automobilbau [1].

FIGURE 1 Weight and  $\text{CO}_2$  saving potential in automotive engineering [1].

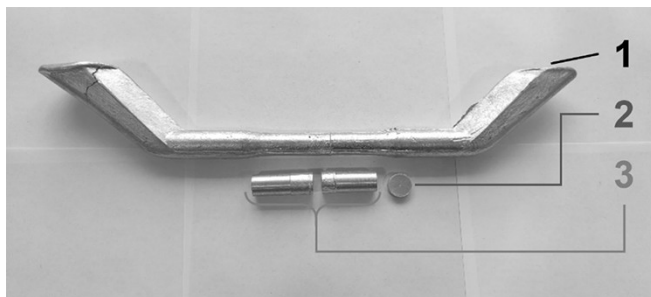
**TABELLE 1** Konzentrationen der Legierungselemente Eisen, Kupfer und Zink.

**TABLE 1** Concentrations of the alloying elements iron, copper and zinc.

Element/ Konzentrationen	Faktoren		
	Niedrig	Mittel	Hoch
Eisen	0,12	0,235	0,35
Kupfer	0,01	0,105	0,2
Zink	0,01	0,105	0,2

einem Gefrierschrank bei  $-28^{\circ}\text{C}$  gelagert um stattfindenden Diffusionsvorgängen entgegen zu wirken, bzw. diese zu unterbinden. Bei der Wärmebehandlung T5 wurden die Proben bei einer Temperatur von  $190^{\circ}\text{C}$  für 150 min ausgelagert. Die Proben mit der Wärmebehandlungsmethode T7 wurden für 60 min bei einer Temperatur von  $470^{\circ}\text{C}$  lösungsgeglüht, anschließend abgeschreckt und bei  $200^{\circ}\text{C}$  für 180 min warmausgelagert.

Aus den unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen wurden per Kokillenguss Proben gegossen. Um die finale Endgeometrie zu erhalten und um jeweils eine gleichbleibende Geometrie zu erhalten, wurden diese rund gedreht. Aus den dabei entstehenden Proben sind jeweils drei Stücke getrennt worden, Bild 2. Die zwei größeren Stücke sind notwendig um die Wärmeleitfähigkeit zu messen, das kleinere Stück dient zur Bestimmung der Dichte und der Wärmekapazität. Die großen Stücke haben einen Durchmesser von 16 mm und eine Länge von 45 mm, die kleinen Stücke haben einen Durchmesser von 17 mm und eine Dicke von 5 mm. Für eine gute und insbesondere plane Kontaktfläche, für die nachfolgenden Wärmeleitfähigkeits- und Wärmekapazitätsmessungen, wurden die jeweiligen Stirnflächen nach



**BILD 2** Gefertigte Probenkörper und deren Position im Gussstück, Nr. 1 ist das Gussstück, Nr. 2 das Probenstück für die Dichtemessung und Nr. 3 sind die beiden Stücke für die Messung der Wärmeleitfähigkeit.

**FIGURE 2** Manufactured test pieces and their position in the casting, no. 1 is the casting, no. 2 is the test piece for the density measurement and no. 3 are the two pieces for measuring the thermal conductivity.

dem Trennen mit einem feinen Schleifpapier nachbearbeitet.

## 2.2 | Bestimmung der Dichte

Zur Analyse der Dichte wird die Archimedes-Methode, mit einem „Sartorius MC1 Analytic AC 210 S“ in Kombination mit einem einzigartigen metallischen Archimedes-Aufsatz, eingesetzt. Das Glas steht auf einer Brücke, ohne direkten Kontakt zur Waage, wodurch die Messungen durchgeführt werden können, ohne Schwankungen oder Abweichungen durch die Verdunstung von Wasser zu unterliegen.

## 2.3 | Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit der Hot-Disk Methode gemessen. Das Hot-Disk-Verfahren zählt zu den transienten Verfahren und wird auch als Transient-Plane-Source-Methode bezeichnet. Bei der Durchführung dieses Messverfahrens, wird zwischen zwei Prüfkörpern, des zu untersuchenden Werkstoffes, ein Sensor eingeklemmt, wobei die Spannkraft nicht relevant ist. Der Sensor ist dabei als elektrisch isolierte Doppelspirale ausgeführt und stellt ein elektrisch beheiztes Widerstandselement dar. Dabei muss der Sensor selbst eine vernachlässigbare Wärmekapazität aufweisen. Der Sensor ist typischerweise aus Nickel oder Molybdän gefertigt und wird aus einer  $10 \pm 2 \mu\text{m}$  dicken Metallfolie ausgeätzt oder ausgeschnitten.

Andere Sensormaterialien können verwendet werden, müssen allerdings einen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes aufweisen, welcher ausreichend groß ist. Außerdem sollte dieser über einen weiten Temperaturbereich hinweg sehr stabil sein. Ein Nachteil der Verwendung von Nickel als Metall in der Doppelspirale besteht in dem Curie-Übergang von Nickel bei  $358^{\circ}\text{C}$  – dies erfordert viel Sorgfalt bei Messungen in diesem Temperaturbereich. Für die elektrische Isolation des Sensors wird meist ein Polymer wie Kapton® eingesetzt. Die Wahl des Isolationsmaterials ist dabei abhängig von der Umgebungstemperatur, bei welcher die Prüfung durchgeführt werden soll. Bei den Isolationsfolien muss auf eine geringe Dicke zwischen 7 und  $100 \mu\text{m}$  geachtet werden. Dies ist erforderlich, damit ein guter thermischer Kontakt zwischen Messfühlermaterial und den ebenen Oberflächen der Prüfkörper gewährleistet werden kann [8, 13–15].

Dadurch, dass bei der Hot-Disk-Methode der Sensor zwischen den rauen Oberflächen der Prüfkörper eingespannt wird, bildet sich eine sogenannte STR-Schicht

zwischen der Probenoberfläche und der Isolationsschicht des Sensors. (STR-Schicht: Kontakt-Wärmedurchlasswiderstand, Oberflächen-Wärmedurchlasswiderstand, en: surface thermal resistant, STR). Bei transienten Verfahren wird die STR-Schicht im Nachhinein mathematisch eliminiert. Da es verschiedene Sensoren gibt, sowie die Heizleistung und die Messzeit individuell festgelegt werden können, sind Messungen der Wärmeleitfähigkeit im Bereich von  $0,005 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  bis  $500 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  möglich. Zur Aufzeichnung des transienten Anstiegs des Sondenwiderstands und den damit einhergehenden Temperaturanstieg ist eine Brückenschaltung notwendig [8, 13–15].

### 3 | ERGEBNISSE

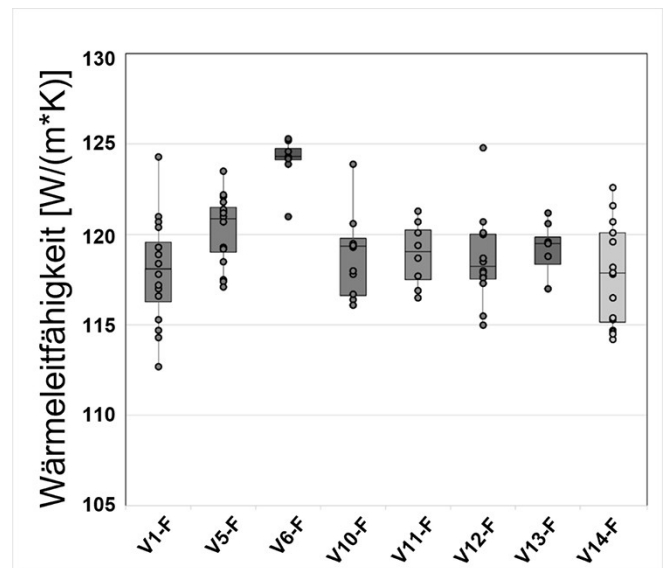
Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen der unterschiedlichen Legierungen dargestellt. Aufgeteilt wird hierbei in die Legierungen nach Veränderung der Legierungszusätze Eisen, Kupfer und Zink im Originalzustand. Bezeichnet werden die Proben mit dem Zusatz „F“ für fabricated. Die Proben im Gusszustand bilden dabei die jeweiligen Referenzproben, für die Untersuchungen der Legierungen, nach einer durchgeführten Wärmebehandlung. Als Referenzprobe für die Variation der Legierungskonzentrationen und deren Wärmebehandlung, dient die Probe V1-F, an dieser wurde keine Veränderung gegenüber dem Anlieferungszustand vorgenommen.

#### 3.1 | Wärmeleitfähigkeit Gusszustand

Bei den Untersuchungen der Proben, mit Variation der Legierungskonzentrationen Eisen, Kupfer und Zink, ist deutlich zu erkennen, dass eine unterschiedliche Konzentration keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit besitzt, Bild 3.

In der Graphik ist zu erkennen, dass die einzelnen Wärmeleitfähigkeits-Messwerte der unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen stellenweise zu 100% innerhalb der gemessenen Werte einer anderen Legierung liegen. Beispiele hierfür sind die Legierungen V5-F und V10-F, deren Messpunkte zu 100% innerhalb der Messpunkte der Basislegierung liegen.

Für Messungen der Wärmeleitfähigkeit, gibt der Hersteller einen Toleranzbereich von  $\pm 5 \%$  vor. Die in den Untersuchungen ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeiten liegen alle in dem angegebenen Toleranzbereich.



**BILD 3** Kastengrafik der Messergebnisse der Legierungen im Gusszustand: V1 – (Normzusammensetzung); V5 – (Cu=0,2%; Fe=0,12%; Zn=0,01%); V6 – (Cu=0,2%; Fe=0,35%; Zn=0,01%); V10 – (Cu=0,01%; Fe=0,35%; Zn=0,01%); V11 – (Cu=0,01%; Fe=0,35%; Zn=0,2%); V12 – (Cu=0,01%; Fe=0,12%; Zn=0,2%); V13 – (Cu=0,2%; Fe=0,12%; Zn=0,2%); V14 – (Cu=0,2%; Fe=0,35%; Zn=0,2%).

**FIGURE 3** Boxplot diagram of the measurement results of the alloys in the as-cast state: V1 – (standard composition); V5 – (Cu=0,2%; Fe=0,12%; Zn=0,01%); V6 – (Cu=0,2%; Fe=0,35%; Zn=0,01%); V10 – (Cu=0,01%; Fe=0,35%; Zn=0,01%); V11 – (Cu=0,01%; Fe=0,35%; Zn=0,2%); V12 – (Cu=0,01%; Fe=0,12%; Zn=0,2%); V13 – (Cu=0,2%; Fe=0,12%; Zn=0,2%); V14 – (Cu=0,2%; Fe=0,35%; Zn=0,2%).

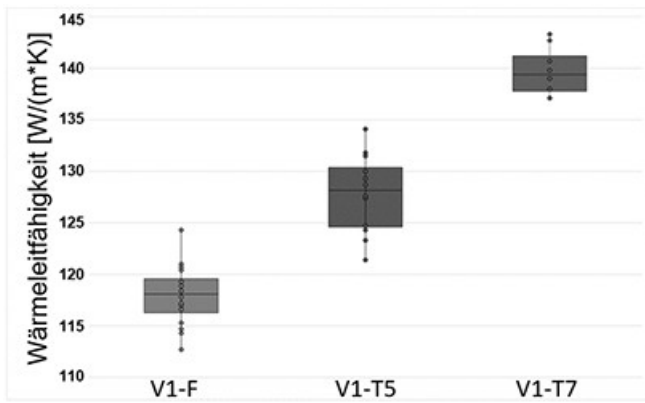
#### 3.2 | Wärmeleitfähigkeit Wärmebehandlung

Nach den Wärmebehandlung T5 und T7 der unterschiedlichen Legierungen ist ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Gusszustand der jeweiligen Legierungskonzentration erkennbar.

Bei der Untersuchung der Proben im Anlieferungszustand (V1) ist nach einer durchgeführten Wärmebehandlung T5 ein leichter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit gegenüber der Referenzprobe nachzuweisen. Der Anstieg beträgt hierbei ca.  $10 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ . Wird an der Probe V1 die Wärmebehandlung T7 durchgeführt steigt die Wärmeleitfähigkeit um ca.  $20 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  gegenüber dem Gusszustand. Dargestellt werden die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit der Proben aus V1 in einer Kastengrafik, Bild 4.

Verändert man die Legierungskonzentrationen von Eisen um 0,35%, Kupfer um 0,2% und Zink um 0,2% (V14) und führt anschließend die Wärmebehandlungen T5 und T7 durch, kann für die Probe V14-T5 lediglich





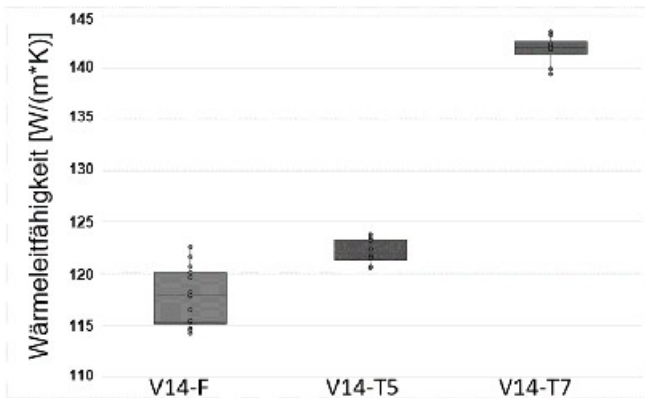
**BILD 4** Kastengrafik der Messergebnisse der Legierungen V1 (Normzusammensetzung) in den Wärmebehandlungszuständen F, T5 und T7.

**FIGURE 4** Boxplot diagram of the measurement results of alloys V1 (standard composition) in the heat treatment states F, T5 and T7.

ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von ca. 5 W/(m\*K) gegenüber der Probe V14-F festgestellt werden. Bei der Probe V14-T7 kann gegenüber dem Gusszustand (V14-F) eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um ca. 25 W/(m\*K) nachgewiesen werden, Bild 5.

## 4 | DISKUSSION

In der Literatur (DIN EN 1706) werden für Aluminiumlegierungen Wärmeleitfähigkeiten von 140 W/(m\*K)–170 W/(m\*K) angegeben. Die hier genannten Wärmeleitfähigkeiten beziehen sich jedoch auf Proben, die mit dem Gießverfahren Druckguss hergestellt werden.



**BILD 5** Kastengrafik der Messergebnisse der Legierungen V14 (Fe=0,35%; Cu=0,2%; Zn=0,2%) in den Wärmebehandlungszuständen F, T5 und T7.

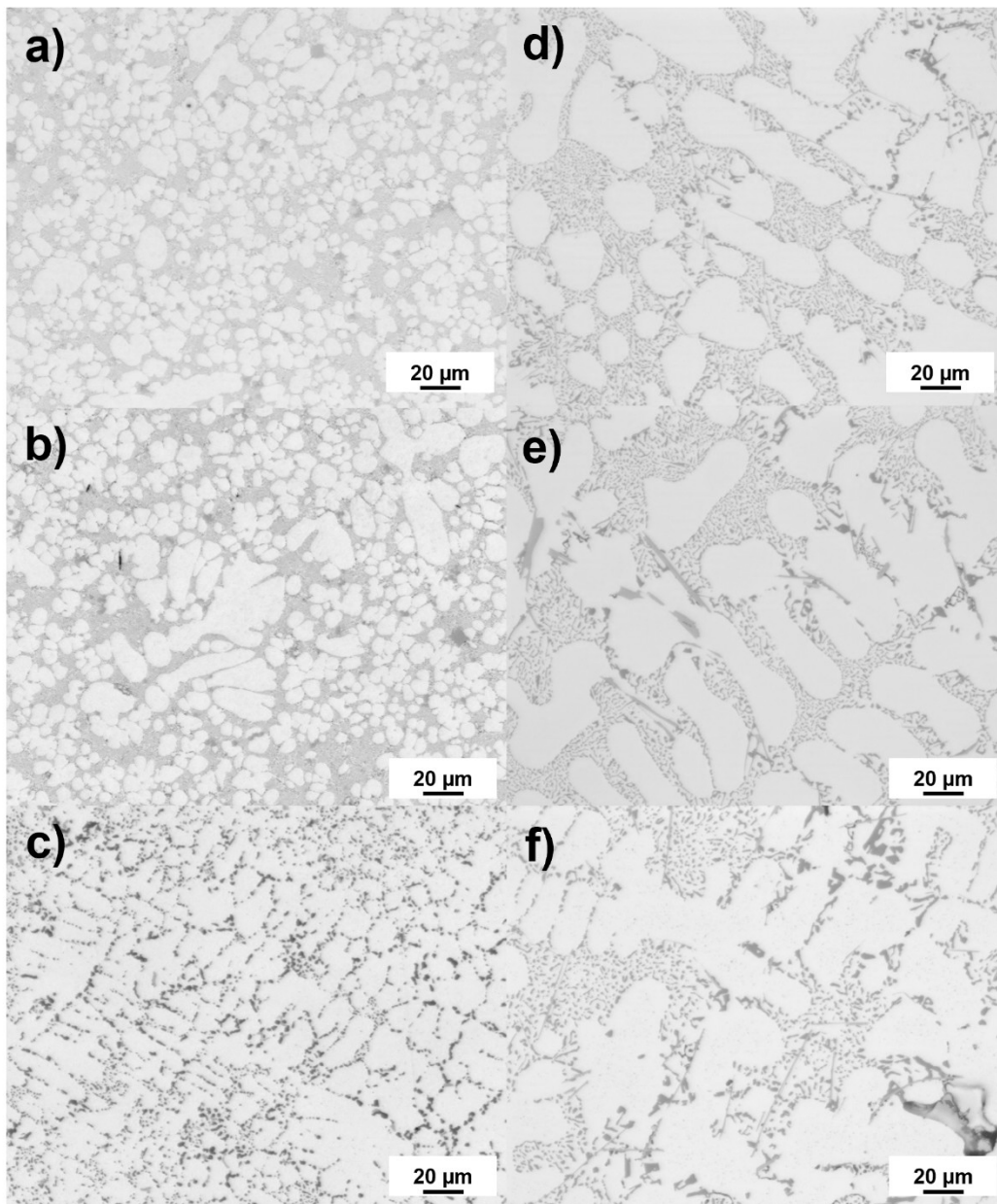
**FIGURE 5** Boxplot diagram of the measurement results of alloys V14 (Fe=0,35%; Cu=0,2%; Zn=0,2%) in heat treatment conditions F, T5 and T7.

Eingesetzt für die Herstellung der untersuchten Proben in dieser Veröffentlichung, wurde das Gießverfahren Kokillenguss 10. Die Variation des Gießverfahrens hat einen entscheidenden Unterschied auf das entstehende Materialgefüge, Bild 6. Das Materialgefüge von Proben aus Kokillenguss hat deutlich größere Körner, als das Materialgefüge von Proben aus Druckguss, ist jedoch auch deutlich weniger homogen, als das Gefüge aus Druckguss. Mit dem großen Unterschied in der Homogenität, lässt sich erklären, weshalb die Wärmeleitfähigkeiten im Gusszustand deutlich niedriger ausfallen gegenüber den angegebenen Werten aus der Literatur. Die geringere Anzahl an Korngrenzen kann die Inhomogenität nicht kompensieren. Die Konzentrationsveränderungen der Legierungszusätze Eisen, Kupfer und Zink, haben keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeiten der Proben im Gusszustand liegen im Durchschnitt bei 120 W/(m\*K), Bild 3.

Wird nach dem Abguss eine T5 bzw. T7 Wärmebehandlung durchgeführt, werden die Körner in den jeweiligen Materialgefügen größer. Bei großen Körnern sind deutlich weniger Korngrenzen im Material vorhanden, wodurch die Wärmeleitfähigkeit mit Zunahme der Korngröße steigt. In den Messwerten der Untersuchungen für die unterschiedlichen Legierungen, kann diese Annahme bestätigt werden. Die Wärmebehandlung T5 steigert die Wärmeleitfähigkeit minimal, jedoch nicht signifikant und kann daher vernachlässigt werden. Durch die Wärmebehandlung T7 steigt die Wärmeleitfähigkeit deutlich an. Damit kann nachgewiesen werden, dass eine Wärmebehandlung bei welcher die Korngröße deutlich vergrößert wurde, einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat [17].

Eine weitere Erklärung für eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit zeigen Untersuchungen der AMAG Austria Metall AG [16]. Bei deren Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit mit Zugabe von Legierungselementen sinkt. Untersucht wurde der Einfluss von Silizium auf die Wärmeleitfähigkeit. Bei einem Siliziumgehalt im Aluminium von 0% beträgt die Wärmeleitfähigkeit ca. 230 W/(m\*K). Durch die Erhöhung des Siliziumgehalts auf 20% sinkt die Wärmeleitfähigkeit auf ca. 160 W/(m\*K) [16].

Des Weiteren beschreiben sie, dass der Kupfergehalt in einer Aluminiumlegierung einen starken Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Jedoch wurden bei deren Experimenten, Konzentrationen von 0–4% Kupfer, untersucht. Der in dieser Publikation beschriebene Kupfergehalt variiert lediglich zwischen 0,01 und 0,2%. Damit lässt sich begründen, weshalb kein Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit durch die Veränderung der Legierungskonzentrationen nachgewiesen werden konnte.



**BILD 6** Vergleich des sich ausbildenden Gefüges zwischen Druckguss a-c und Kokillenguss d-f für eine AlSi10MnMg-Legierung in den Wärmebehandlungszuständen F (a und d), T5 (b und e) und T7 (c und f).

**FIGURE 6** Comparison of the microstructure formed between die casting a-c and chill casting d-f for an AlSi10MnMg alloy in the heat treatment states F (a and d), T5 (b and e) and T7 (c and f).

Für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit der Literatur, sollte eine neue Versuchsreihe durchgeführt werden, bei welcher die Proben mit Druckguss hergestellt werden. Um einen Einfluss von Eisen, Kupfer und Zink auf die Wärmeleitfähigkeit untersuchen zu können, sollte in der neuen Versuchsreihe zusätzlich die jeweilige Konzentration von Eisen, Kupfer und Zink deutlich erhöht werden.

Abschließend lässt sich jedoch festhalten, dass die geringe Konzentrationsveränderung der Legierungselemente Eisen, Kupfer und Zink im Gusszustand und

nach einer Wärmebehandlung mit T5, keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit besitzt. Durch eine Wärmebehandlung der Proben mit T7, kann eine Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden.

## 5 | ZUSAMMENFASSUNG GUSSZUSTAND UND WÄRMEBEHANDLUNG

Damit kann festgehalten werden, dass die Wärmebehandlung T5 kaum einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit besitzt, hier dargestellt an den Proben V1 und V14. Wird der Toleranzbereich des Messgeräts für die jeweiligen Gusszustände der Proben betrachtet, wird festgestellt, dass die ermittelten Werte nach einer T5 Wärmebehandlung in diesem Bereich liegen.

Wird an den Proben jedoch eine Wärmebehandlung mit T7 durchgeführt, kann festgehalten werden, dass die Wärmebehandlung einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Proben besitzt. Selbst nach Abzug der Toleranz des Messgeräts ist ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit nach einer T7 Wärmebehandlung mit erkennbar.

### DANKSAGUNG

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### ORCID

J. Kortsch-Banzhaf  <http://orcid.org/0009-0006-5662-2556>

### LITERATURVERZEICHNIS

1. M. Gustavsson, E. Karawacki, S. Gustafsson, *REV SCI INSTRUM* **1994**, 65, 3856.
2. Abschlussbericht Projekt Supercool, FKZ: 16KN039424 + FKZ: 16KN039425 **2018**.

3. L. Ventola, F. Robotti, M. Dialameh, F. Calignano, D. Manfredi, E. Chiavazzo, P. Asinari, *INT J HEAT MASS TRAN* **2014**, 75, 58.
4. 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, *PROG MATER SCI* **2022**, 128, 100947.
5. W. Fagner, P. Pucher, M. Hummel, *Giesserei* **2016**, 9, 24.
6. E. Sterling, *Giesserei* **2014**, 9, 44.
7. J. Tenkamp, *Springer*, Imprint Springer Vieweg, Wiesbaden **2022**.
8. R. Lumley, *Materials Science*, Cambridge **2011**.
9. DIN, *DIN EN 1676:2010-06*, **2020**.
10. DIN, *DIN EN 1706:2020-06*, **2021**.
11. G. W. Ehrenstein, *Hanser*, München **2020**.
12. P. Hofmann, *Wiley-VCH*, Weinheim **2013**.
13. B. Heine, *Leipzig im Hanser Verlag*, München **2015**.
14. C. V. Madhusudana, *Springer International Publishing AG* **2014**.
15. Hot Disk AB. Hot Disk Thermal Constants Analyser: Instruction Manual, **2019**.
16. *AluReport*, **2012**, 3, 16.
17. S. Holotescu, F. D. Stoian, *ADV MATER RES-SWITZ* **2011**, 42, 379.

**How to cite this article:** J. Kortsch-Banzhaf, S. Höing, L. Kallien, M. Merkel, *Materialwiss. Werkstofftech.* **2024**, 55, e202300408.  
<https://doi.org/10.1002/mawe.202300408>