

## **Festigkeit und Zähigkeit von Aluminium-Druckgusslegierungen nach Wärmeeinwirkung**

AiF-Nr.:  
17786

Obmann:  
Alfred Sollich

beteiligte Unternehmen  
ZF Friedrichshafen AG, Albert Handtmann  
Metallgusswerk GmbH&Co. KG, Ritter  
Leichtmetallguss GmbH, Sennestahl GmbH  
Stahlhärtereier, cAlor GmbH, Daimler AG,  
Brabant Alucast Wendlingen GmbH

Laufzeit:  
01.08.2013 – 31.07.2016

Erstelldatum:  
24.01.2017

Forschungsstelle:  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:  
Brigitte Clausen

Sachbearbeiter:  
Jens Schumacher

Forschungsvereinigung:  
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 24 (Wärmebehandlung von  
Nichteisenmetallen)

### **Zielsetzung und Lösungsweg**

In diesem Vorhaben sollen die statische und zyklische Festigkeit sowie die Zähigkeit von Aluminium-Druckguss mit und ohne Maßstabilisierungsglühung bei unterschiedlicher Wärmeeinwirkung (Betriebstemperatur) im Gusszustand untersucht werden. Hierdurch sollen folgende Ziele erreicht werden:

1. Verständnis des Zusammenhangs zwischen Wärmeeinwirkung, Belastung und Maßänderung
2. Verständnis des Zusammenhangs zwischen Wärmebehandlung und statischer sowie zyklischer Festigkeit wie auch Zähigkeit bei Raum- und Betriebstemperatur
3. Verständnis des Einflusses der Herstellungstechnik vacural/konventionell auf Festigkeitseigenschaften und Maßänderung durch gießunterstützende Maßnahmen

Um die angestrebten Ziele zu erreichen, wurde die Maßänderung von Proben aus der Aluminiumdruckgusslegierung AlSi9Cu3(Fe), die nach dem Druckgießen 14 Tage kaltausgelagert wurden, während unterschiedlicher zusätzlicher Warmauslagerungen an einem Dilatometer erfasst. Der Einfluss von erhöhten Betriebstemperaturen auf

die Maßänderung wurde an Zugproben, deren Länge vor und nach der Warmauslagerung an einem Koordinatenmessgerät ermittelt wurde, bestimmt. Der Einfluss der unterschiedlichen Warmauslagerungen auf die statische Festigkeit und Zähigkeit wurde an druckgegossenen Zugproben und Risszähigkeitsproben ermittelt.

Ermüdungsversuche wurden an kaltausgelagerten und an warmausgelagerten druckgegossenen Ermüdungsproben bei Raumtemperatur und bei 120 °C durchgeführt. Hierdurch kann der Einfluss der Maßstabilisierungsglühung auf die Schwingfestigkeit der Aluminiumdruckgusslegierung ermittelt werden. Durch eine Überwachung der Ermüdungsprobenlänge während der Schwingprüfung konnte die Maßstabilität der unterschiedlich wärmebehandelten Proben bei unterschiedlichen Prüfbedingungen ermittelt werden.

### **Herstellung der Proben**

Nach Konstruktion von Gussteil und Gießsystem konnte ein Druckgießwerkzeug gebaut werden, welches mit konventioneller sowie Vacuralgießtechnik betrieben werden kann.

Ein wesentliches Bauteil ist die Rißzähigkeitsprobe die aufgrund einer Wanddicke von 8mm direkt angegossen werden musste. Das unter Bild 1 vorgestellte Simulationsergebnis zeigt, dass mit

einem optimal dimensionierten Anschnitt ausreichend nachgepeist werden kann.

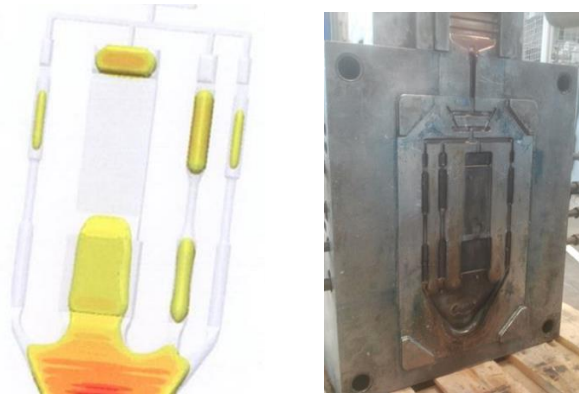


Bild 1: Gussteilauslegung Bild 2: Das Werkzeug

Bild 2 zeigt das fertige Druckgießwerkzeug. Dabei handelt es sich um ein Methodenwerkzeug, da sich das Gussteil aus zwei Zugproben, einer Schwingprobe und einer Reißzähigkeitsprobe zusammensetzt. Man erkennt deutlich die Waschbrettentlüftung, die für eine optimale Gussteilqualität notwendig ist.

Die Gussteile wurden mit einer Kaltkammermaschine DAK400 von Frech hergestellt.



Bild 3: Aluminiumgussteil

Nach dem Entformen wurde der Abguss im Wasser abgeschreckt. Anschließend wurden das Gießsystem und die Überläufe abgesägt. Die einzelnen Proben blieben aber unbearbeitet.

## Ergebnisse

### Maßstabilität bei erhöhten Temperaturen

Neben der thermischen Maßänderung von Proben, die durch das Ausdehnen beim Erwärmen oder durch das Schrumpfen beim Abkühlen verursacht werden, finden in der Aluminiumlegierung AlSi9Cu3(Fe) bei erhöhter Temperatur Ausscheidungsprozesse statt, die auch nach der Abkühlung zu einer bleibenden Maßänderung führen. Diese Maßänderungen sind für unterschiedlichen Auslagerungstemperaturen und Auslagerungsdauern in Bild 1 dargestellt.

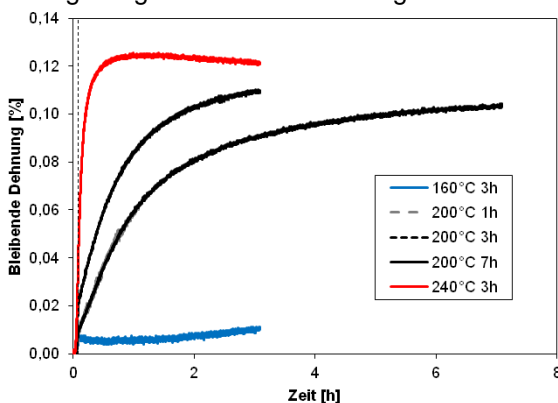


Bild 1: Bleibende Dehnung der Dilatometerproben während der Warmauslagerung

Mit steigender Auslagerungstemperatur nimmt die Geschwindigkeit der Maßänderung zu. Bei 240 °C tritt nach etwa einer halben Stunde keine weitere Maßänderung auf. Bei 200 °C und 160 °C sind die Maßänderungen in dem betrachteten Zeitraum noch nicht vollständig abgeschlossen. Die bleibende Maßänderung liegt nach der Auslagerung bei 240 °C

von mindestens einer halben Stunden bei etwa 0,12 %.

Durch eine zusätzliche Warmauslagerung im Anschluss an den Druckgussprozess wird die Maßstabilität von Bauteilen erhöht, wie in Bild 2 dargestellt ist. Die kaltausgelagerten Proben erfahren eine Längenzunahme wenn erhöhte Betriebstemperaturen von 120 °C vorliegen. Nach 500 Stunden bei 120 °C beträgt die Längenzunahme 0,08 %. Die Längenänderung ist zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht abgeschlossen. Nach 1000 Stunden bei 120 °C beträgt die Längenzunahme über 0,1 % und liegt in der Größenordnung der Längenänderung von Probe, die bei 240 °C warmausgelagert werden. Durch ein Glühen der Proben bei 200 °C für drei Stunden wird ein Teil Maßänderung vorweggenommen. Die Maßänderung der zusätzlich warmausgelagerten Proben liegt nach einer 1000-stündigen Auslagerung bei 120 °C bei unter 0,02 %. Damit beträgt die Maßänderung der zusätzlich warmausgelagerten Probe ein Siebtel der kaltausgelagerten Probe. Liegen während des Betriebs Temperaturen im Bereich von 20 °C (RT) vor, dann finden sowohl bei der zusätzlich warmausgelagerten als auch bei der kaltausgelagerten Variante keine Maßänderungen auf.

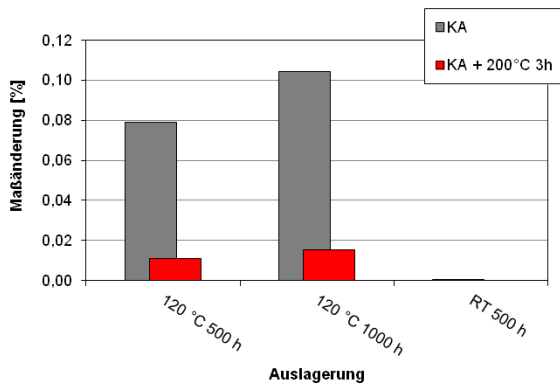


Bild 2: Längenänderung von kaltausgelagerten (KA) und zusätzlich bei 200 °C für 3 h ausgelagerten Zugproben, die bei Raumtemperatur für 500 h und bei 120 °C für 500 h und 1000 h zusätzlich ausgelagert wurden

### Statische mechanische Eigenschaften

Nach der 2-wöchigen Kaltauslagerung liegt die Dehngrenze der Legierung AlSi9Cu3(Fe) bei 154 MPa und die Zugfestigkeit bei 296 MPa. Durch eine zusätzliche Warmauslagerung nimmt die Festigkeit der Aluminiumlegierung zu, wie in Bild 3 dargestellt. Nur nach der 3-stündigen Auslagerung bei 240 °C fällt die Zugfestigkeit etwas geringer aus als im Ausgangszustand. Längere Auslagerungen der Proben bei Raumtemperatur beeinflussen die statische Festigkeit nicht. Treten jedoch Betriebstemperaturen von 120 °C auf, dann erzielen die kaltausgelagerten Proben die größte Festigkeitssteigerung.

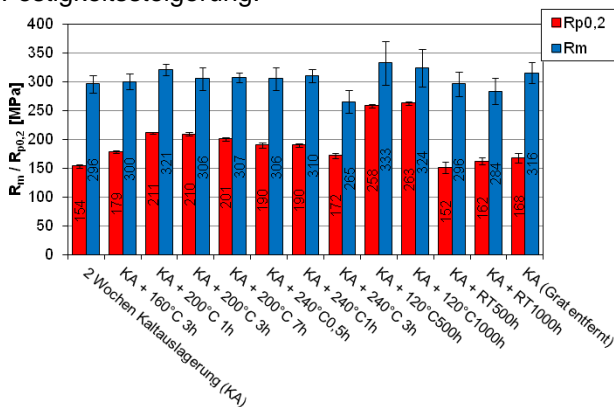


Bild 3: 0,2-%-Dehngrenze und Zugfestigkeit der unterschiedlichen Wärmebehandlungszustände

Für rissbehaftete Bauteile sind die Risszähigkeit oder die kritische Spannungsintensität die entscheidenden Kennwerte für die Auslegung. Eine zusätzliche Warmauslagerung zeigt jedoch keinen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit rissbehafteter Proben. Die in Bild 4 dargestellten kritischen Spannungsintensitäten sind nahezu identisch.

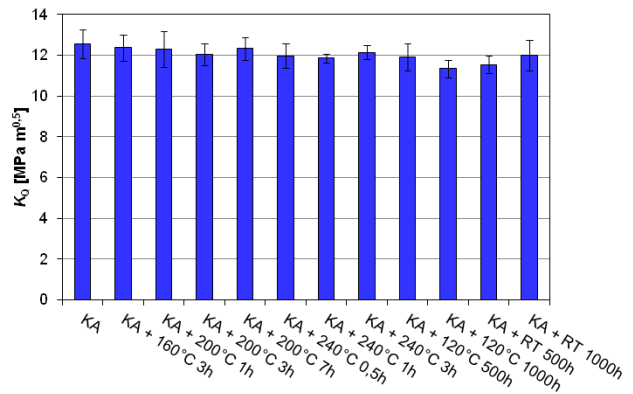


Bild 4: Kritischen Spannungsintensitäten der unterschiedlich wärmebehandelten und unter Betriebsbedingungen ausgelagerten Risszähigkeitsproben

### Schwingfestigkeit

Die Ermüdungsprüfung erfolgte an ungekerbten zylindrischen Proben. Sowohl kaltausgelagerte als auch zusätzlich bei 200 °C für drei Stunden warmausgelagerte Proben wurden wechselnd und schwelend bei Raumtemperatur sowie bei einer Temperatur von 120 °C geprüft. Für eine Grenzschriftspielzahl von 10 Millionen wurden die Dauerfestigkeiten für die gegebenen Prüfbedingungen ermittelt. Bild 5 zeigt, dass die zusätzliche Warmauslagerung unter allen Prüfbedingungen zu einer Abnahme der Dauerfestigkeit führt.

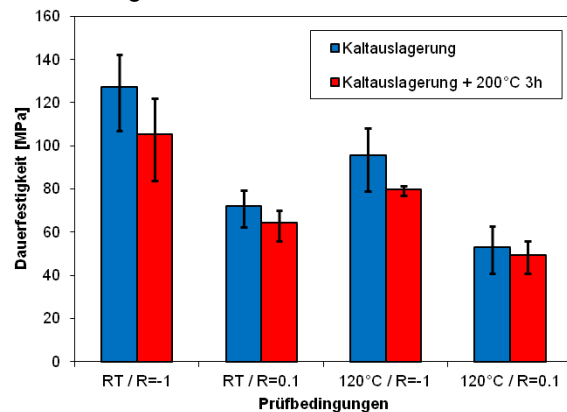


Bild 5: Dauerfestigkeiten der kaltausgelagerten Proben sowie der kaltausgelagerten und zusätzlich warmausgelagerten Proben bei wechselnder und schwelender Belastung bei Raumtemperatur und bei 120 °C. Jeder Balken steht für die Dauerfestigkeit der Proben mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von 50 % bei einer Grenzschriftspielzahl von 10 Millionen Lastwechseln. Das obere und das untere Ende der Fehlerbalken stehen für die Spannungsamplituden mit einer Bruchwahrscheinlichkeit von 90 % bzw. von 10 %.

Als die dominanten Versagensursachen der Ermüdungsproben wurden bei beiden Wärmebehandlungsvarianten die Oberfläche und Hohlräume im Inneren der Proben identifiziert. Wird die Versagensursache in Abhängigkeit von den

Prüfbedingungen betrachtet, dann zeigt sich, wie in Bild 6 dargestellt, dass bei Raumtemperatur bei beiden Spannungsverhältnissen die Oberfläche und innere Hohlräume zum Versagen führen. Wird die Ermüdungsprüfung bei 120 °C durchgeführt, dann findet bei beiden Spannungsverhältnissen die Rissinitiierung nahezu ausschließlich an Hohlräumen statt.

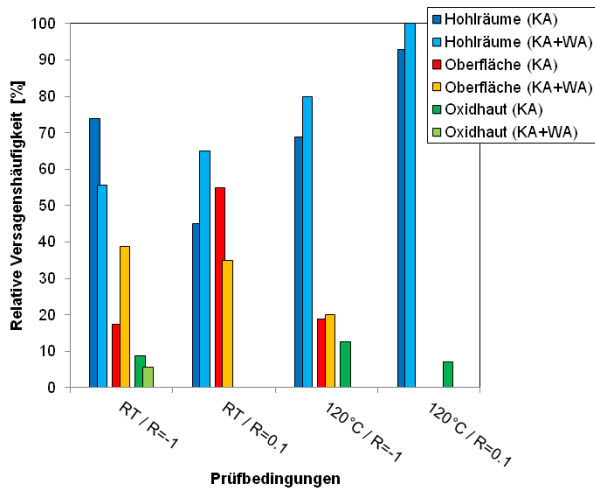


Bild 6: Relative Versagenshäufigkeiten an den Bruchflächen der kaltausgelagerten Proben (KA) und an den Bruchflächen der kaltausgelagerten und warmausgelagerten Proben (KA+WA)

### Maßstabilität unter zyklischer Belastung

Während der zyklischen Belastung unterliegt die Länge der Ermüdungsproben einer ständigen Änderung. Sie pendelt während eines Schwingspiels zwischen ihrer maximalen Länge bei Erreichen der Oberspannung und ihrer minimalen Länge bei Erreichen der Unterspannung. Um eine Aussage über das Materialverhaltens vom Anfang der Ermüdungsprüfung bis zum Ende zu erhalten, wurde bei den Ermüdungsprüfungen bei Raumtemperatur die Längenänderung mit einem Ansatzdehnungsaufnehmer ermittelt und eine Sinusfunktion an die Dehnungsamplituden angepasst. Die für jede Schwingspiel bestimmte Dehnungsamplitude  $\varepsilon_a$  gibt eine Information darüber, ob das Material während der Ermüdungsprüfung ver- oder entfestigt. Eine sich ändernde mittlere Dehnung  $\varepsilon_m$  zeigt an, ob eine Maßänderung auftritt. In Bild 7 ist jeweils ein typisches Beispiel für den Verlauf der Dehnungsamplitude und der mittleren Dehnung für eine wechselnde und eine schwellende Belastung dargestellt. Bei der wechselnden Belastung (Bild 7a) pendelt die mittlere Dehnung um den 0%-Wert. D. h. es findet keine Maßänderung statt. Die minimalen Schwankungen der mittleren Dehnung wurden durch Temperaturschwankungen im Prüflabor hervorgerufen. Bedingt durch das Arbeitsprinzip der Resonanzprüfmaschine steigt die Belastungsamplitude während der ersten Zyklen der Ermüdungsprüfung an, bis die Sollamplitude erreicht ist. Folglich steigt auch, wie in Bild 7a zu erkennen ist, die Dehnungsamplitude zu Beginn des Versuchs an. Nachdem die Sollspannungsamplitude erreicht

wurde, bleibt auch die Dehnungsamplitude konstant. Demzufolge tritt keine Ver- oder Entfestigung des Werkstoffs während der Ermüdungsprüfung auf. Bei der schwellenden Ermüdungsbelastung (Bild 7b) tritt ebenfalls keine Ver- oder Entfestigung auf. Zu Beginn des schwellenden Ermüdungsversuchs steigt die mittlere Dehnung an und erreicht deutlich höhere Werte als auf Basis des Hookeschen Gesetzes (schwarz gestrichelte Linie in Bild 7b) erwartet werden. Folglich findet eine Längenzunahme zu Beginn des Versuchs statt. Die Oberspannung überschreitet, bis die Sollspannungsamplitude erreicht wird, die Streckgrenze der Aluminiumlegierung. Entsprechend findet eine plastische Dehnung der Proben statt.

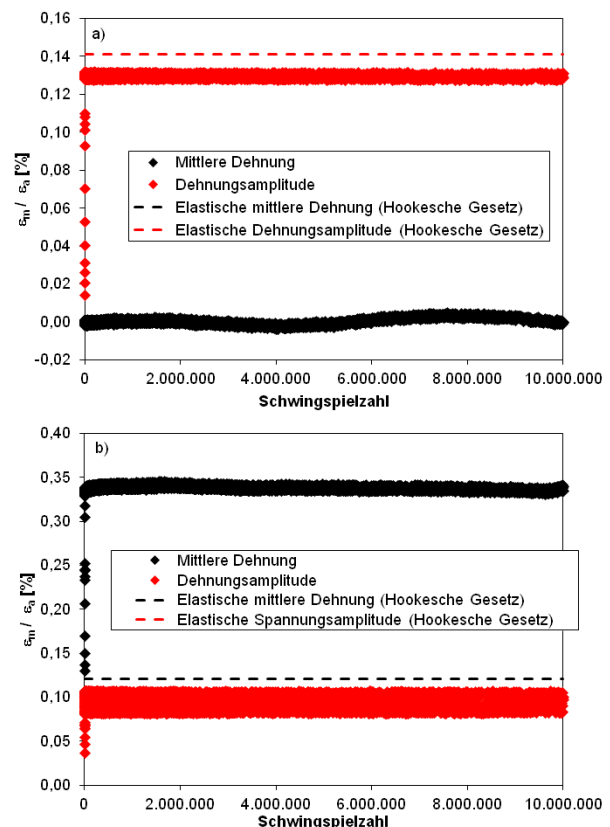
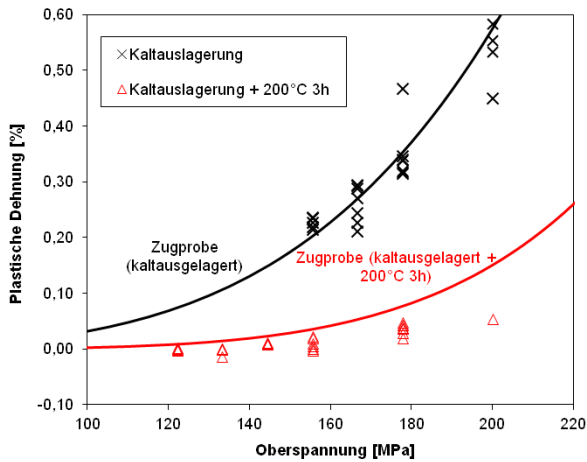


Bild 7: Gemessene und auf Basis des Hookeschen Gesetzes berechnete mittlere Dehnung  $\varepsilon_m$  und Dehnungsamplitude  $\varepsilon_a$  während der zyklischen Belastung einer kaltausgelagerten Probe bei einer a) Zug-Druck-Belastung ( $S_a = 100 \text{ MPa} / S_m = 0 \text{ MPa}$ ); b) Zug-Schwell-Belastung ( $S_a = 70 \text{ MPa} / S_m = 86 \text{ MPa}$ )

Das Ausmaß der Maßänderung hängt folglich von der Oberspannung, die bei dem jeweiligen Ermüdungsversuch eingestellt wurde, ab. Bild 8 zeigt die plastische Dehnung der Ermüdungsproben in Abhängigkeit von der eingestellten Oberspannung. Mit steigender Oberspannung nimmt die Maßänderung der Ermüdungsproben zu. Da die zusätzlich warmausgelagerten Ermüdungsproben eine höhere Dehngrenze aufweisen als die kaltausgelagerten Proben, ist bei gleicher Oberspannung die plastische Dehnung der zusätzlich warmausgelagerten Proben geringer als bei den kaltausgelagerten Proben. Die plastische

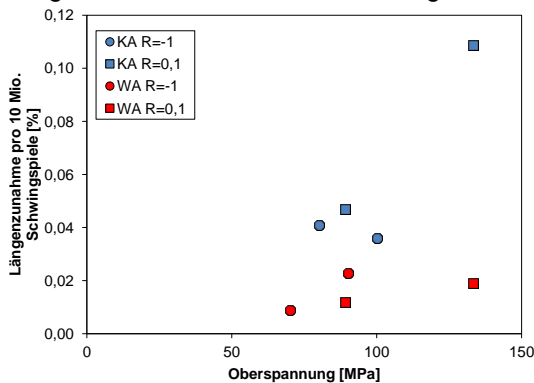


Dehnung von kalt- und warmausgelagerten Zugproben in Abhängigkeit von der aufgebrachten Spannung ist ebenfalls in Bild 8 dargestellt. Die plastische Dehnung der Zugproben zeigt dabei eine gute Übereinstimmung mit der plastischen Dehnung der Proben während der Ermüdungsprüfung.



**Bild 8: Einfluss der Oberspannung auf die plastische Dehnung der Ermüdungsproben bei schwelender Belastung**

Die Maßänderung der Ermüdungsproben bei einer Prüfung bei 120 °C wurde stichprobenartig untersucht. Zusätzlich zu dem plastischen Fließen zu Beginn des Ermüdungsversuchs, wenn die Oberspannung die Streckgrenze der Aluminiumlegierung überschreitet, findet eine kontinuierliche Längenzunahme während des Schwingversuchs statt. Bild 9 zeigt die kontinuierliche Längenzunahme der Ermüdungsproben bezogen auf 10 Millionen Schwingspiele in Abhängigkeit von der Oberspannung. Mit steigender Oberspannung nimmt die Maßänderung der Ermüdungsproben zu. Bei den kaltausgelagerten Ermüdungsproben fällt die Maßänderung deutlich stärker aus als bei den zusätzlich warmausgelagerten Ermüdungsproben. Bei den kaltausgelagerten Proben treten Ausscheidungsprozesse bei 120 °C auf, die gegenüber der warmausgelagerten Variante, bei der dieser Effekt nicht stattfindet, zusätzlich zu dem Längenwachstum der Proben beitragen.



**Bild 9: Längenänderung der Ermüdungsproben bezogen auf 10 Millionen Schwingspiele in Abhängigkeit von der Oberspannung während einer zyklischen Belastung bei 120 °C**

### Zusammenfassung

Eine zusätzliche Warmauslagerung nach dem Druckgussprozess führt bei der Aluminiumlegierung AlSi9Cu3(Fe) zu Ausscheidungsvorgängen, die eine Volumenzunahme hervorrufen. Für den Fall, dass im Einsatz erhöhte Betriebstemperaturen vorliegen, treten diese Ausscheidungsvorgänge mit der damit verbundenen Volumenänderung nach der Warmauslagerung nicht erneut auf, sodass zusätzlich warmausgelagerte Bauteile gegenüber ausschließlich kaltausgelagerten Bauteilen eine erhöhte Maßstabilität aufweisen. Ein weiterer Vorteil der Warmauslagerung ist, dass die statische Festigkeit der Bauteile erhöht wird. Die Risszähigkeit der Aluminiumlegierung wird hingegen nicht beeinflusst. Ein Nachteil der zusätzlichen Warmauslagerung ist hingegen, dass die Schwingfestigkeit gegenüber den kaltausgelagerten Proben herabgesetzt wird. Unter allen Prüfbedingungen erreichten die warmausgelagerten Proben eine geringe Dauerfestigkeit als die kaltausgelagerten Proben. Die Maßstabilität bei schwingender Beanspruchung wird durch die Warmauslagerung jedoch verbessert. Bei der Schwingprüfung bei Raumtemperatur traten Maßänderungen ausschließlich zu Beginn des Ermüdungsversuchs auf, wenn die Streckgrenze während der Schwingprüfung von der Oberspannung überschritten wird. Die Höhe der plastischen Dehnung korreliert dabei mit der plastischen Dehnung von Zugproben, die auf Höhe der Oberspannung beansprucht werden. Folglich weisen die zusätzlich warmausgelagerten Proben, aufgrund ihrer höheren Streckgrenze, eine höhere Maßstabilität auf als die kaltausgelagerten Proben. Bei der Schwingprüfung bei 120 °C treten bei den kaltausgelagerten Proben Ausscheidungsprozesse auf, die zu einer zusätzlichen Längenzunahme der Proben führen. Dieser Effekt wurde bei den warmausgelagerten Proben nicht festgestellt. Entsprechend ist die Maßstabilität der zusätzlich warmausgelagerten Proben der Maßstabilität der kaltausgelagerten Probe bei einer Schwingprüfung bei erhöhter Temperatur überlegen.

## **Danksagung**

Das IGF-Vorhaben Nr. 17786 der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 24 (Wärmebehandlung von Nichteisenmetallen) der AWT betreut.

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Kontakt: Prof. Dr.-Ing. habil. Brigitte Clausen