

FOTOS UND DIAGRAMME: HYDRO ALUMINIUM

AlSi7Mg-Gusslegierungen

Auswirkung niedriger Magnesiumgehalte

Während die Europäischen Normen für Aluminium-Gusslegierungen bisher nur Varianten mit mindestens 0,25 m-% Mg abdeckten, berücksichtigen die aktuell überarbeiteten Versionen auch eine Variante mit 0,10-0,25 m-% Mg. Zugrunde liegt, dass mit der AlSi7Mg0,3 allgemein zwar die Festigkeitsvorgaben erfüllt werden, die geringe Duktilität jedoch oft problematisch ist. Über reduzierte Magnesiumgehalte und eine angepasste Wärmebehandlung können die mechanischen Eigenschaften nun besser abgestimmt werden.

VON INGRID MELING, PETER ÅSHOLT, SUNNDALSØRA, NORWEGEN UND LEONHARD HEUSLER, BONN

Magnesium (Mg) wird üblicherweise als Legierungselement zu Gusslegierungen auf Al-Si-Basis hinzugefügt. Ein Teil des Mg befindet sich im α -Mischkristall und bewirkt dadurch eine entsprechende Festigkeitssteigerung. Die Menge der Elemente im

Mischkristall hängt von der Erstarrungsgeschwindigkeit ab, die wiederum stark von der Gießtechnologie beeinflusst wird. Mit zunehmendem Magnesiumgehalt steigt auch die Menge an gelöstem Mg (Bild 1) und erwartungsgemäß sollte die Festigkeit ebenfalls ansteigen. Darüber hinaus verbindet sich Mg mit Si und bildet bei der Wärmebehandlung feine Ausscheidungen, die eine Aushärtung ermöglichen.

Das System Al-Si-Mg

Die Entwicklung der Elementkonzentrationen im Verlauf der Erstarrung von AlSi7(Mg) können basierend auf dem von Hydro entwickelten Alstruc-Erstarrungsmodell berechnet werden, das Erstarrungswege und Zusammensetzungen von Phasen auf der Grundlage der chemischen Zusammensetzung und der Erstarrungsbedingungen vorhersagt.

Niedrige Mg-Gehalte ertüchtigen AlSi7-Legierungen für duktile Anwendungen.

Demnach weist das Legierungssystem eine komplexe Ausscheidungssequenz auf, die mehrere metastabile Phasen umfasst. Die bei der Warmauslagerung gebildeten Ausscheidungsadeln im Nanometerbereich (**Bild 2**) bestehen aus Mg und Si (und möglicherweise Al) in verschiedenen Verhältnissen, wobei die genaue Stöchiometrie noch nicht vollständig verstanden ist. Die maximale Festigkeit (T6) wird erreicht, wenn hauptsächlich β'' -Ausscheidungen im Gefüge vorliegen. Entgegen früherer Annahmen, dass sie die Stöchiometrie Mg_2Si aufweisen, deuten neuere Studien auf Mg_5Si_6 und $Mg_5Al_2Si_4$ als wahrscheinlichere Zusammensetzung hin [1].

In traditionellen AlSi7Mg-Gusslegierungen ist der Si-Gehalt um ein Vielfaches höher als der Mg-Gehalt, was zu der bekannten Bildung untereutektischer Gefüge aus α -Al und Al-Si-Eutektikum führt. Nur maximal 1,4 m-% des Siliziums liegen gelöst im α -Mischkristall vor (s. Bild 1). Dies bedeutet, dass Silizium außerhalb des Mischkristalls im Vergleich zu Magnesium im Überschuss vorhanden ist. Daher kann erwartet werden, dass eine Senkung des Mg-Gehalts die Dichte von Ausscheidungen des Mg-Si-Typs zur Aushärtung verringert und bei wärmebehandelten Legierungsvarianten zu einer verminderten Festigkeit bei gleichzeitiger Zunahme der Duktilität führen sollte. Zusätzlich werden intermetallische Partikel in der Gussstruktur vorhanden sein. Für die in dieser Studie untersuchten Legierungen wird ein bestimmter Anteil der π -Phase mit der stöchiometrischen Zusammensetzung $Al_8Mg_3FeSi_6$ erwartet. Somit wird ein Teil des Magnesiums (und Siliziums) in die Bildung dieser nicht aushärtenden Phase gehen. Dies führt zu einem leicht verringerten Aushärtungspotenzial.

AlSi7Mg-Legierungen werden üblicherweise im wärmebehandelten Zustand für verschiedene Automobilteile im Schwerkraftgießverfahren und Räder im Niederdruckgießverfahren verwendet, da sie eine gute Kombination von mechanischen Eigenschaften und Gießbarkeit aufweisen. Die KSM Castings Group, ein globaler Herstellungs- und Entwicklungspartner von Al- und Mg-Gusskomponenten für die Automobilindustrie, verwendet für eine Fahrwerkskomponente eine AlSi7Mg-Legierung im Schwerkraftgießverfahren mit $Mg < 0,2$ m-%. Die Legierung wird mit einer zweistufigen Wärmebehandlung (T64) eingesetzt, wobei besondere Anforderungen an die Dehnung gestellt werden. Nach einem vom Kunden geforderten zusätzlichen Langzeitversuch bei erhöhter Betriebstemperatur errei-

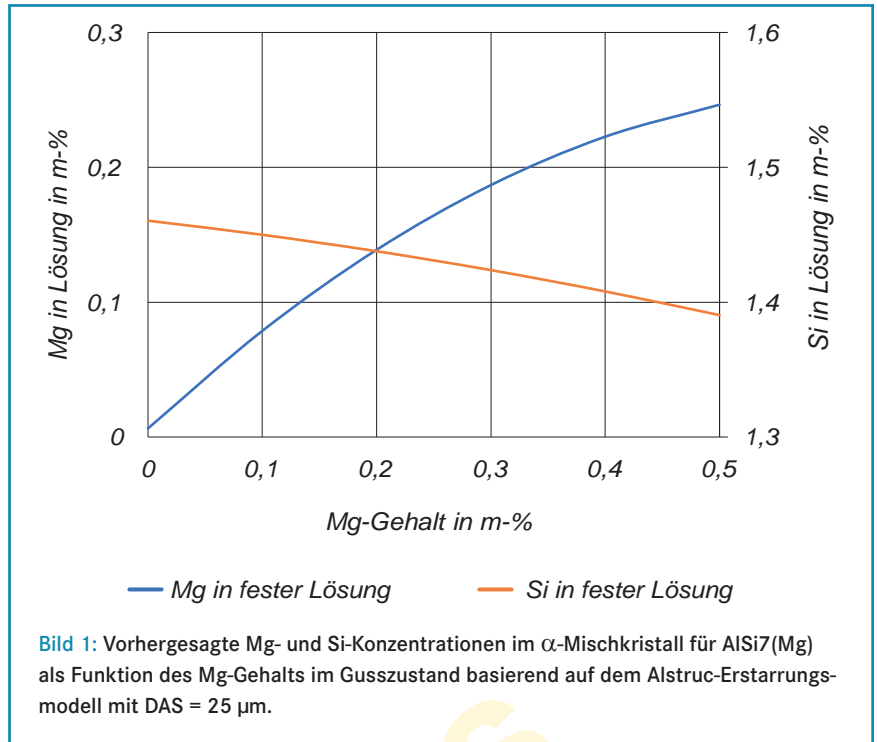


Bild 1: Vorhergesagte Mg- und Si-Konzentrationen im α -Mischkristall für AlSi7(Mg) als Funktion des Mg-Gehalts im Gusszustand basierend auf dem Alstruc-Erstarrungsmodell mit $DAS = 25 \mu m$.

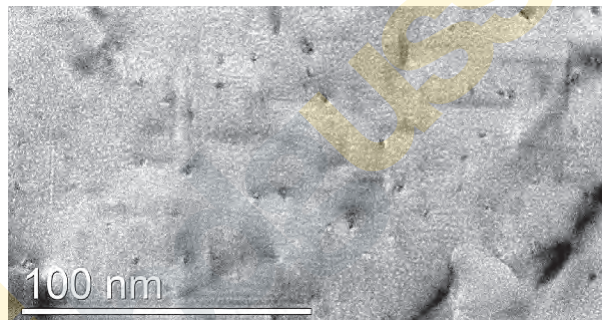


Bild 2: TEM-Aufnahme: Metastabile β'' -Ausscheidungsadeln in einer AlSi7Mg0,3-T6.

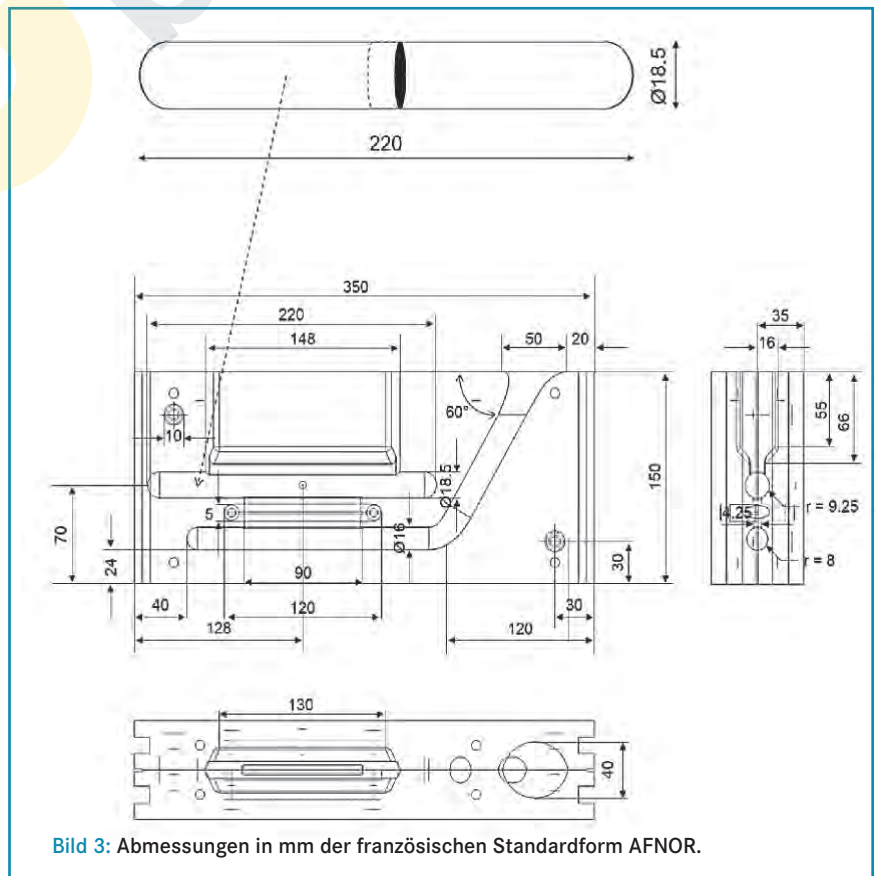


Bild 3: Abmessungen in mm der französischen Standardform AFNOR.

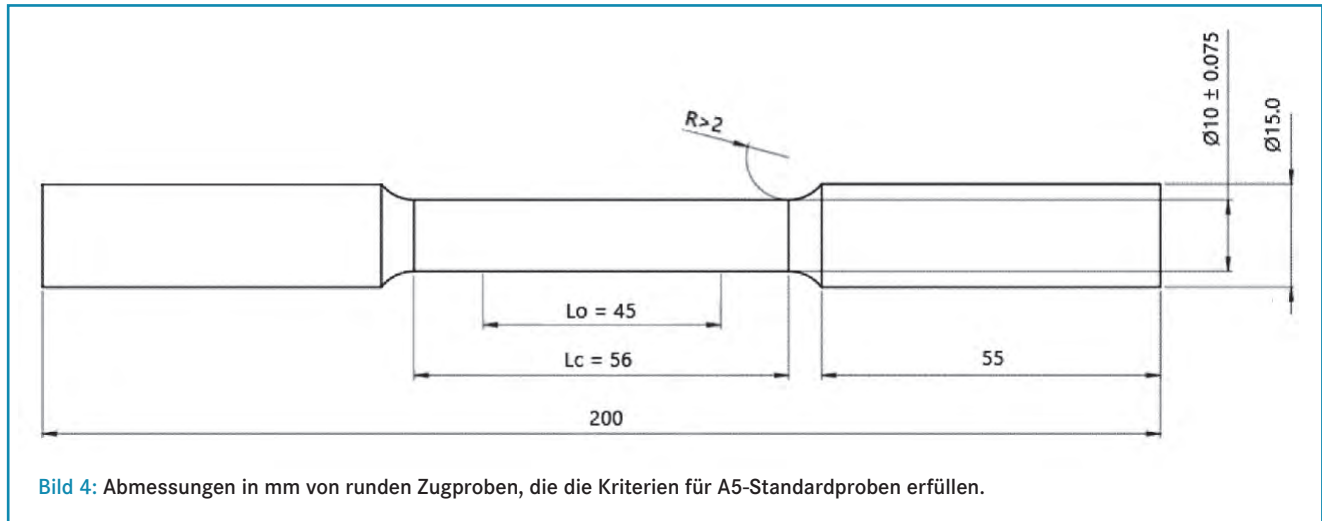


Bild 4: Abmessungen in mm von runden Zugproben, die die Kriterien für A5-Standardproben erfüllen.

Tabelle 1: Nominelle chemische Zusammensetzung der Legierungsvarianten in m-%

Leg. Nr.	Si	Mg	Fe	Ti	Sr
1		0.09			
2		0.13			
3		0.17			
4	7.0	0.21	0.12	0.05	0.020
5		0.25			
6		0.30			
7		0.50			

Tabelle 2: Wärmebehandlungsparameter

	T6-Wärmebehandlung		T64-Wärmebehandlung	
	Temperatur in °C	Zeit in h	Temperatur in °C	Zeit in h
Lösungsglühen	530	6	530	6
Lagerung bei RT	RT	1	RT	1
Künstliche Alterung	170	7	170	1.5

Tabelle 3: Ergebnisse der Zugversuche aller Legierungsvarianten

Mg in m-%	Gusszustand			T64			T6		
	R _{p0.2} in MPa	R _m in MPa	A in %	R _{p0.2} in MPa	R _m in MPa	A in %	R _{p0.2} in MPa	R _m in MPa	A in %
0.09	62	165	19.7				87	178	20.2
0.13	67	169	17.0				144	215	10.7
0.17	71	171	11.2	121	205	15.1	179	241	11.3
0.21	76	180	12.3				200	272	11.1
0.25	77	177	10.1				209	278	9.3
0.30	86	190	9.8				242	299	5.8
0.50	94	182	5.0				269	315	3.4

chen die Proben immer noch eine beachtliche Bruchdehnung von 10 % bei einer Dehngrenze von 220 MPa und einer Zugfestigkeit von 285 MPa.

Aufgrund des bekannten gegenläufigen Zusammenhangs zwischen Festigkeit und Duktilität, sollten niedrigere Mg-Gehalte die Duktilität der Legierungen erhöhen. Viele Kundenspezifikationen von AlSi7Mg0,3-Legierungen liegen daher am

unteren Ende des Normbereichs für Mg (0,25 - 0,45 m-%), um die geforderten Bruchdehnungswerte zu erfüllen. Dies führte zu dem Vorschlag, bei der kürzlich erfolgten Überarbeitung der Gusslegierungsnormen EN 1676 und EN 1706 die Legierungsvariante AlSi7(Mg) mit einem Mg-Gehalt von 0,10-0,25 % in die Normen aufzunehmen. Vor diesem Hintergrund war das Ziel dieser Arbeit auszuloten, in-

wieweit AlSi7Mg-Gusslegierungen mit Mg-Gehalten unter 0,25 m-% für Anwendungen mit hohen Duktilitätsanforderungen von industrieller Relevanz sein können.

Untersuchungen

AlSi7Mg-Legierungsvarianten mit 7 verschiedenen Mg-Gehalten (Tabelle 1) wurden in einem widerstandsbeheizten Ofen mit 50 kg Fassungsvermögen erschmolzen. Abgesehen von den Mg-Gehalten entsprechen die chemischen Zusammensetzungen typischen AlSi7Mg-Gusslegierungen. Als Basismetall wurde Al 99,8 verwendet und Si, Mg und Fe als reine Legierungselemente hinzugefügt. Ti wurde in Waffelform mit 10 m-% Ti und Sr als Draht mit 10 m-% Sr zulegiert. Zur Kornfeinung wurde AlTi3B1-Draht verwendet (1 kg/t). Die Schmelze wurde mittels Impeller und Argon entgast. Das Gießen erfolgte in eine vorgewärmte (300 °C) Zugstabform (französische AFNOR-Standardform, Bild 3) bei einer Schmelzetemperatur von 730 °C. Die erhaltenen Proben sind 220 mm lang, haben einen Durchmesser von 18,5 mm und einem typischen Dendritenarmabstand (DAS) von 20 - 25 µm. Aus den Gusszylindern wurden A5-Zugproben gearbeitet (Bild 4) und in einer Zugprüfmaschine gemäß NS-EN-ISO 6892-1:2009 geprüft.

Die Legierungen wurden im Gusszustand (F) und im wärmebehandelten Zustand (T6) getestet. Um die in der Norm EN 1706:2020 angegebenen Werte für nicht vollständig ausgehärtete Legierungen (T64) zu überprüfen, wurde eine Variante mit 0,17 m-% Mg ebenfalls entsprechend wärmebehandelt (T64) und dann geprüft. Die Proben wurden nach der Lösungsglühbehandlung in Wasser abgeschreckt und anschließend eine Stunde lang bei Raumtemperatur gelagert, bevor sie künstlich ausgehärtet wurden (Tabelle 2).

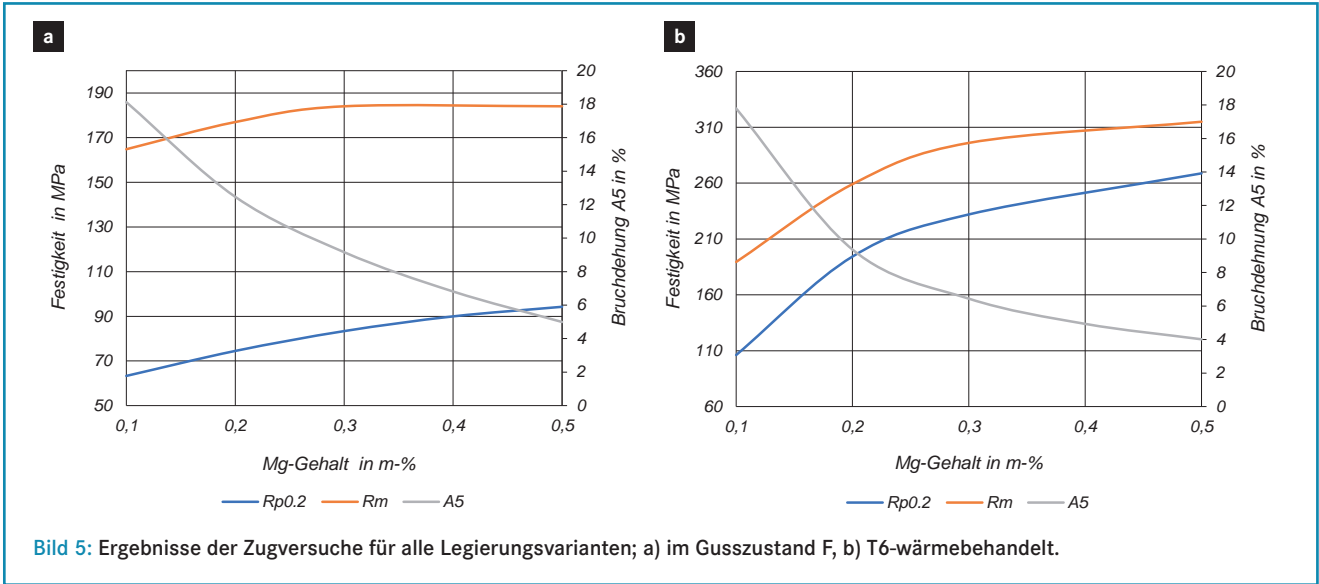


Bild 5: Ergebnisse der Zugversuche für alle Legierungsvarianten; a) im Gusszustand F, b) T6-wärmebehandelt.

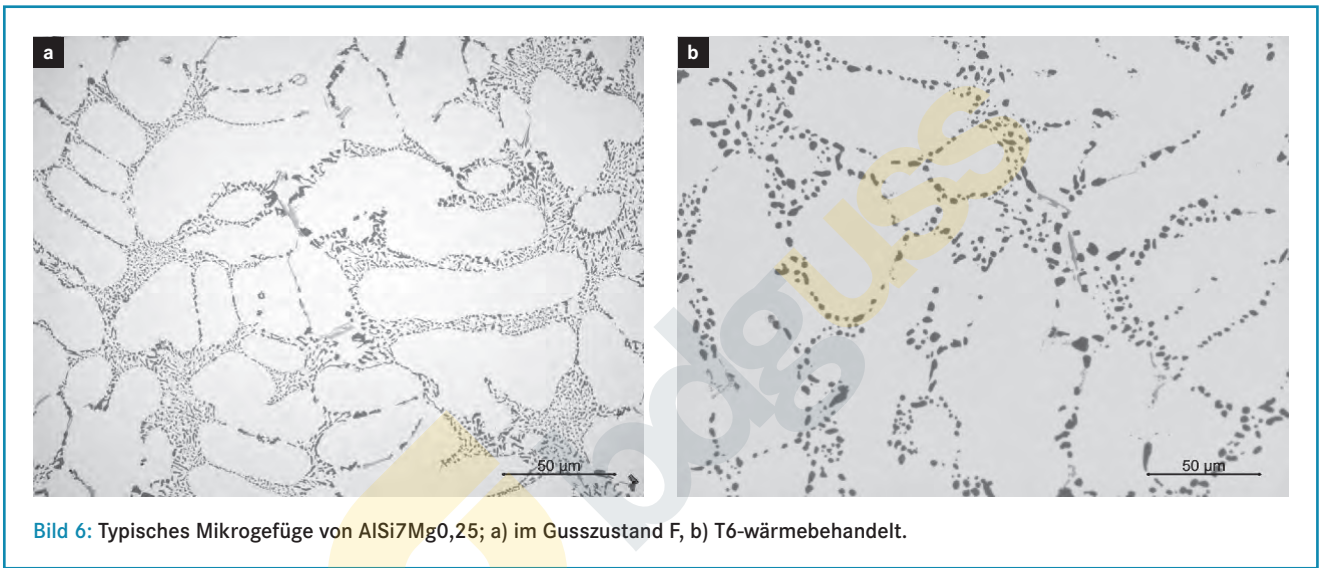


Bild 6: Typisches Mikrogefüge von AlSi7Mg0,25; a) im Gusszustand F, b) T6-wärmebehandelt.

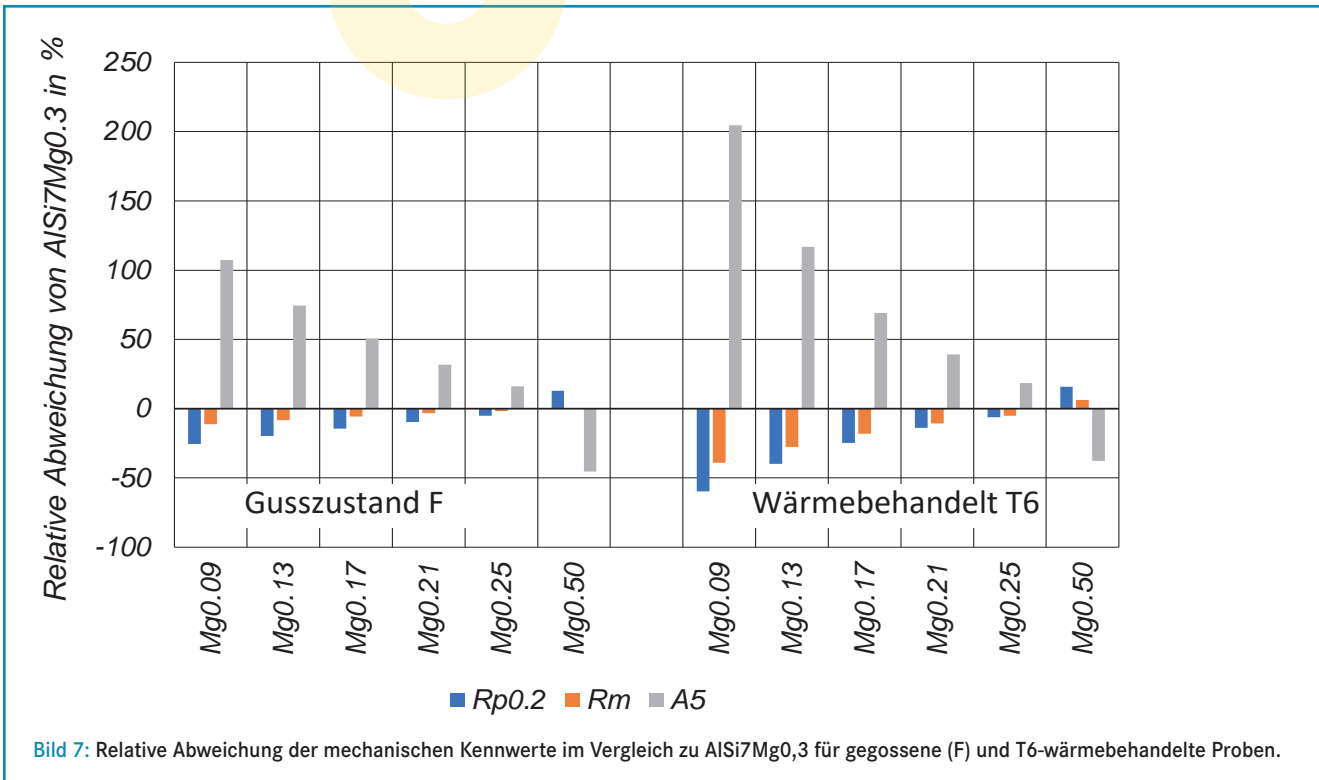


Bild 7: Relative Abweichung der mechanischen Kennwerte im Vergleich zu AlSi7Mg0,3 für gegossene (F) und T6-wärmebehandelte Proben.

Ergebnisse und Diskussion

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche für alle Legierungsvarianten, **Bild 6** korrespondierende, repräsentative Gefügaufnahmen. Für den Zustand F ergeben sich gut veredelte Gefüge, während in den wärmebehandelten Proben eine globulitische Einformung der eutektischen Si-Phasen zu erkennen ist. Wie erwartet, steigen Dehngrenze ($R_{p0.2}$) und Zugfestigkeit (R_m) mit zunehmendem Mg-Gehalt an, während bei der Bruchdehnung (A5) der entgegengesetzte Trend zu beobachten ist. Offensichtlich ist es möglich, durch eine Senkung des Mg-Gehalts unter 0,25 m-% eine signifikante Steigerung der Bruchdehnung für beide Zustände zu erreichen. **Bild 7** zeigt den relativen Unterschied in den mechanischen Eigenschaften aller betrachteten Legierungen und Wärmebehandlungen im Vergleich zu der AlSi7-Variante mit 0,3 m-% Mg. Bei einigen der untersuchten Legierungen mit niedrigem Mg-Gehalt ist der Gewinn an Bruchdehnung deutlich höher als die entsprechende Abnahme der Festigkeit. Daher könnten Legierungen mit niedrigem Mg-Gehalt vielversprechend für Anwendungen sein, die eine hohe Duktilität erfordern, sofern eine leicht reduzierte Festigkeit toleriert werden kann.

Die Legierungsvariante AlSi7Mg0,17, wärmebehandelt bis zu einem nicht vollständig ausgehärteten Zustand (T64), erreichte eine Dehngrenze von 121 MPa, eine Zugfestigkeit von 205 MPa und eine Bruchdehnung von 15 %. Diese Werte stimmen gut mit den in der Norm EN 1706:2020 angegebenen Werten überein, wobei sie in dieser Untersuchung noch etwas höher liegen. Die Ergebnisse aller getesteten Legierungsvarianten sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurden AlSi7Mg-Legierungen mit unterschiedlichen Mg-Gehalten im statischen Zugversuch untersucht, um den Einfluss von relativ niedrigen Mg-Gehalten auf die mechanischen Eigenschaften zu quantifizieren. Die Legierungen wurden im Gusszustand (F) und bei maximaler Festigkeit (T6) getestet, zusätzlich zu einer Variante, die nicht vollständig ausgehärtet war (T64).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse die erwarteten Trends, wobei eine klare Auswirkung eines reduzierten Mg-Gehalts auf Festigkeit und Dehnung zu erkennen ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass AlSi7Mg-Gusslegierungen mit Mg-Gehalten unter 0,25 m-% für Anwendungen, die eine hohe Duktilität erfordern, von industriellem Nutzen sein können. Es gibt zwar ein gegenläufiges Verhalten von Festigkeit und Dehnung, aber die relative Zunahme der Dehnung ist im Allgemeinen höher als der Verlust an Festigkeit.

Die Autoren bedanken sich bei Eva Mørtzell, die das Bild 2 mit dem Transelektronenmikroskop der NORTEM-Infrastruktur (NFR197405) im TEM Gemini Center, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), aufgenommen hat.

Weitere Informationen

Hydro Aluminium Deutschland GmbH

Aluminium Metal / Foundry Alloys / Technical Support

Leonhard Heusler

53117 Bonn

E-Mail: leonhard.heusler@hydro.com

Web: <http://www.hydro.com>

Literatur:

[1] Randi Holmestad u.a.: "Precipitation in 6xxx Aluminum Alloys"; Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, September 5-9, 2010, Yokohama, Japan; pp.30-39.