

Schnittdarstellung des ersten, im Rahmen des Forschungsprojektes realisierten Radnabenmotors.

Beispiele zur Umsetzung von Elektromobilität mit Aluminium

VON ANDREAS KLEINE, HARZGERODE, MATTIAS REINEMANN, MAGDEBURG, HUBERT KOCH, ESSEN, UND ANDREAS ZÖRNIG, MAGDEBURG

Radnabenmotor

Die konsequenteste Form eines vollelektrischen Antriebs stellt der Radnabenmotor dar, weil bei diesem Konzept jedes für die Fortbewegung vorgesehene Rad direkt über einen Elektromotor angetrieben wird, wobei dieser Elektromotor in der Felge des entsprechenden Rades positioniert ist (Bild 1). Die Besonderheit, dass sich an jedem angetriebenen Rad ein unabhängiges Drehmoment einstellen lässt, erlaubt die Umsetzung neuer aktiver Fahrersicherheitskonzepte [1]. Weiterhin entfallen im Vergleich zu Elektrofahrzeugen mit einem Zentralmotor das Getriebe und der Antriebsstrang vollständig. Auf diese Weise kann Platz für weitere Batteriekapazität geschaffen und die Reichweite erhöht werden.

Betrachtet man nun, welchen Einsatzbedingungen der Radnabenmotor durch die Positionierung in der Felge ausgesetzt ist, so lassen sich hieraus schnell Aussagen über die werkstofftechnischen Anforderungen für die einzelnen Komponenten des Radnabenmotors ableiten:

- > Von großer Bedeutung ist, dass der Radnabenmotor äußeren Witterungseinflüssen (Schmutz, Steinschlag, Salzwasser, Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen) ausgesetzt ist, so dass der Werkstoff über eine gute Korrosionsbeständigkeit verfügen sollte.

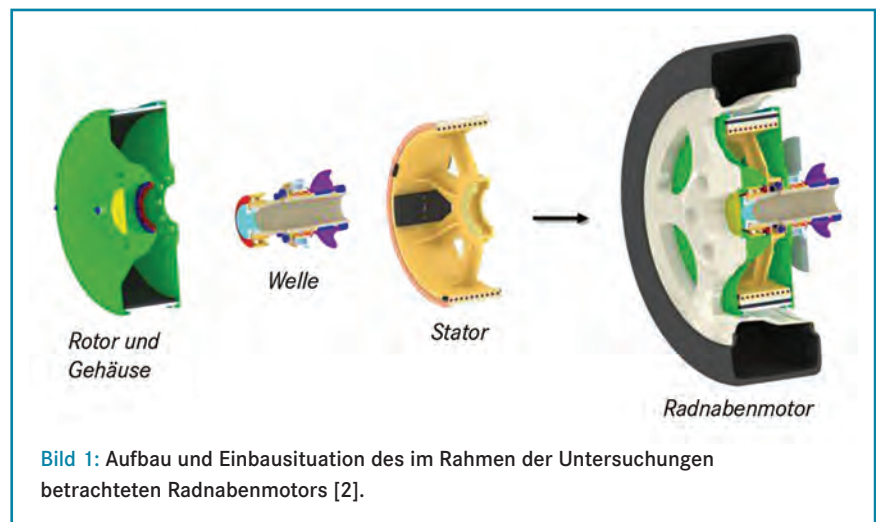


Bild 1: Aufbau und Einbausituation des im Rahmen der Untersuchungen betrachteten Radnabenmotors [2].

- > Darüber hinaus ist der Radnabenmotor einer thermischen Belastung ausgesetzt, die sich aus der Abwärme der Bremsscheibe sowie im Betrieb ergeben.

Um eine ausreichende Betriebsfestigkeit zu gewährleisten, ist eine gute Warmfestigkeit anzustreben.

Ein Bauteil mit zentraler Bedeutung für den Radnabenmotor ist der Stator. Er ist auch Träger der Luftspaltwicklung, welche den größten Teil des Wärmeeintrages verursacht. Unter diesen Einsatzbedingungen ist es sinnvoll, den Stator mit integrierter Innenkühlung auszustatten. Diese Kühlung ist umso effizienter, je besser die Wärmeleitfähigkeit des Statorwerkstoffes ist.

Von allgemein hohem Stellenwert ist die Forderung, dass das Gewicht der ungedeuteten Massen so gering wie möglich ausfällt. Ein wichtiger Teil der Lösung besteht darin, dass das Design des Stators und anderer Komponenten neben einer belastungsgerechten Auslegung über möglichst geringe Wanddicken verfügt. Unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten bietet diesbezüglich das Druckgießverfahren eine Reihe von Vorteilen.

Darüber hinaus soll beim Projekt „Radnabenmotor“ eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz realisiert werden. Dies gelingt unter anderem, wenn der zum Einsatz kommende Gusswerkstoff in einem möglichst großen Schmelzaggregat mit hohem Wirkungsgrad erschmolzen wird und wenn die Werkstoffpalette auf ein Minimum reduziert wird, um ein einfaches Recycling sowie eine hohe Recyclingquote zu gewährleisten.

Fasst man die o. g. Aspekte zusammen, so können hieraus im Wesentlichen zwei Forschungsaktivitäten formuliert werden:

- > Entwicklung einer Druckgusslegierung mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit und Warmfestigkeit bei gleichzeitig guter Korrosionsbeständigkeit und
- > Entwicklung eines druckgießgerechten Herstellungskonzepts für einen Leichtbaustator mit integrierter Innenkühlung.

Legierungsentwicklung

Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit

Als Basis für die Legierungsentwicklung wurde der Werkstoff AlSi8,5Mg0,2 gewählt, weil dieser eine gute gießtechnische Verarbeitbarkeit besitzt. Für die Auswahl weiterer Legierungselemente soll zunächst deren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit betrachtet werden. Da die

KURZFASSUNG:

Für die Umsetzung von Elektromobilität in einem Personenkraftwagen gibt es kein eindeutiges Konzept. Vielmehr existiert eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten, die vom Mildhybrid bis hin zum vollelektrisch angetriebenen Fahrzeug reichen.

Diese Situation wirft die Frage auf, welche Bauteile heutiger Fahrzeuge, die mehrheitlich durch einen Verbrennungsmotor angetrieben werden, erhalten bleiben und welche Komponenten entfallen, sich verändern oder vollständig neu entstehen. Neben dem Automobilhersteller ist diese Frage auch für den Werkstoffentwickler und Gießer von großer Bedeutung, da neue Bauteile und deren Anforderungen in vielen Fällen mit werkstoff- und verfahrenstechnischen Anpassungen oder Veränderungen verbunden sind.

Dieser Artikel möchte am Beispiel eines Radnabenmotors sowie einer Ölwanne für einen Range-Extender aufzeigen, welchen Beitrag der Werkstoff Aluminium sowie das Druckgießverfahren bei der Umsetzung von E-Mobilität leisten können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sowohl der hier beschriebene Radnabenmotor als auch der Range-Extender Forschungsschwerpunkte der vom Land Sachsen-Anhalt ins Leben gerufenen Landesinitiative ELISA sind. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, die in Sachsen-Anhalt existierenden Kompetenzen auf dem Gebiet zukünftiger Antriebstechnologien, Energiegewinnung und -speicherung sowie dem Feld des Leichtbaus zu bündeln und weiterzuentwickeln.

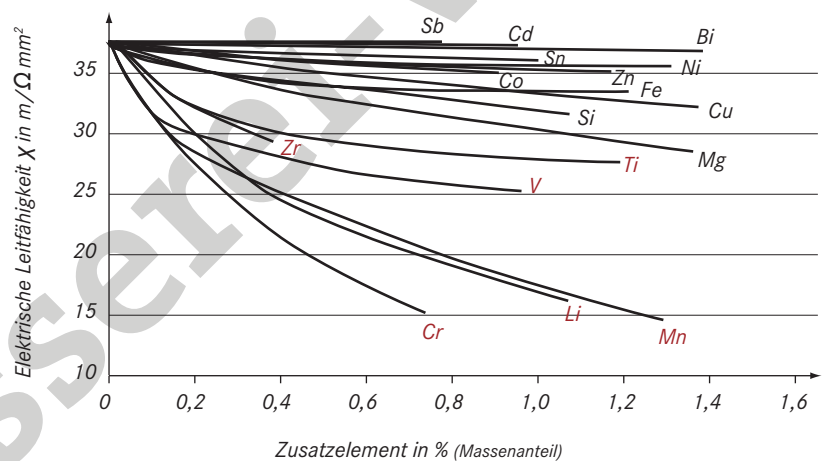


Bild 2: Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit von Aluminium durch Zugabe unterschiedlicher Legierungselemente [3].

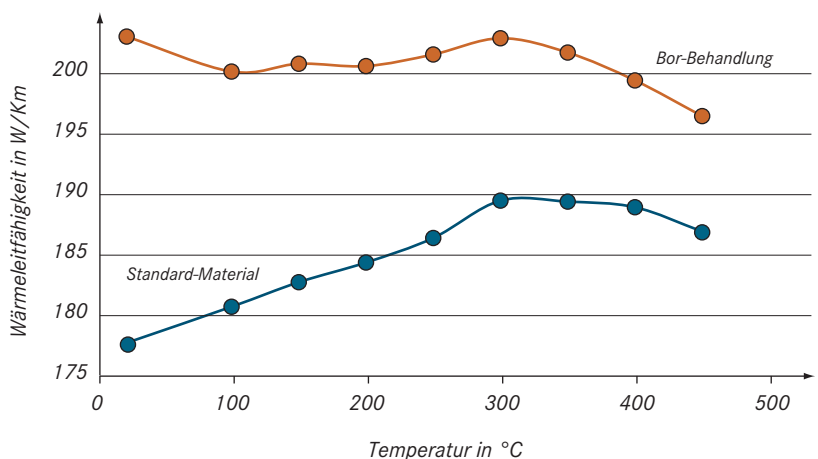


Bild 3: Darstellung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur für die Legierung AlSi7Mg auf der Basis von Standard-Aluminium und für die Legierung AlSi7Mg auf der Basis von borbehandeltem Aluminium [5].

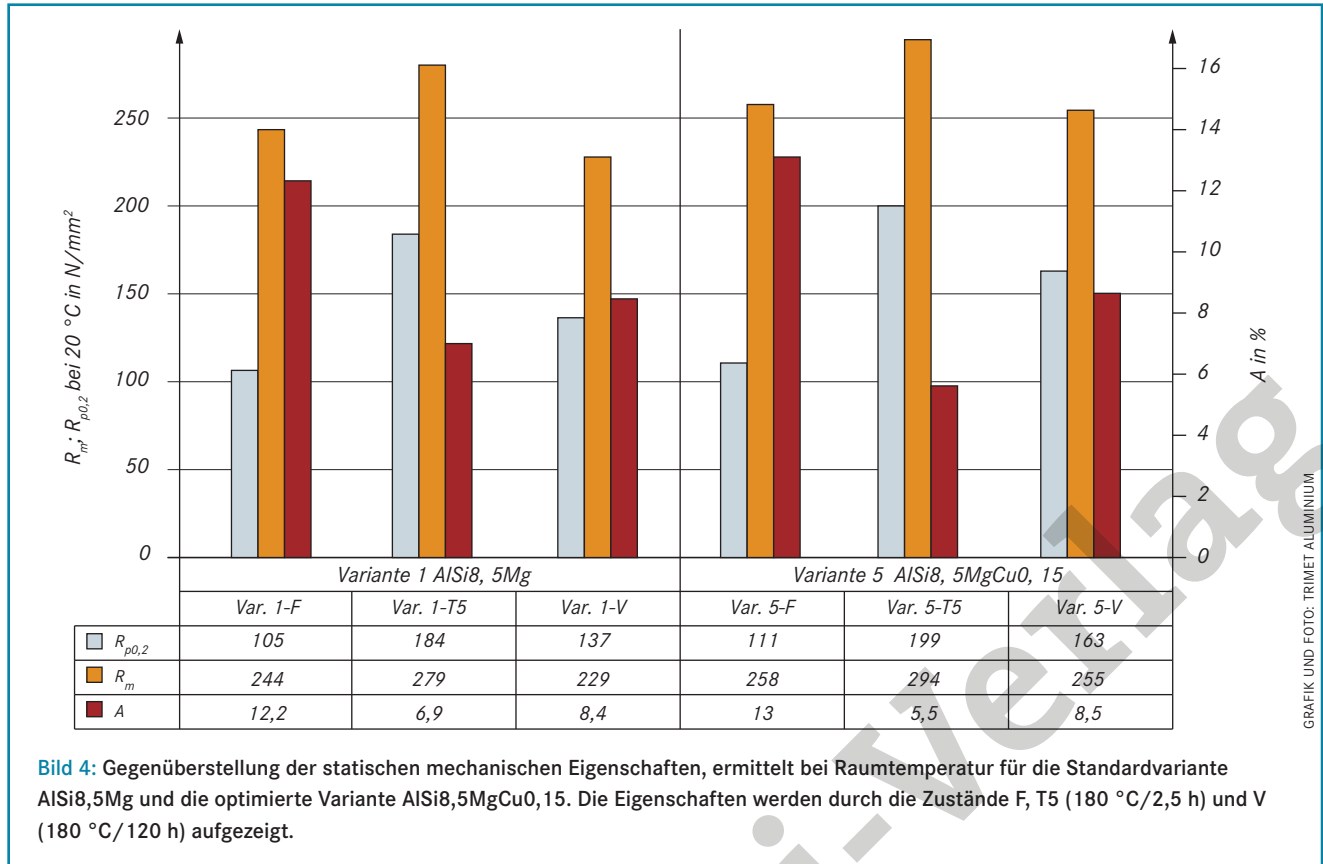


Bild 4: Gegenüberstellung der statischen mechanischen Eigenschaften, ermittelt bei Raumtemperatur für die Standardvariante AlSi8,5Mg und die optimierte Variante AlSi8,5MgCu0, 15. Die Eigenschaften werden durch die Zustände F, T5 (180 °C/2,5 h) und V (180 °C/120 h) aufgezeigt.

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit kosten- und zeitintensiv ist, rückt im Rahmen der Legierungsentwicklung ersatzweise die elektrische Leitfähigkeit in den Fokus des Interesses. Diese Vorgehensweise ist gerechtfertigt, da gemäß dem Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetz ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit besteht (Gleichung (1)). Daraus folgt, dass jede Maßnahme, die zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit führt, auch eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bewirkt. Den Einfluss einer Reihe von Legierungselementen auf die elektrische Leitfähigkeit verdeutlicht **Bild 2**.

$$\lambda \cong \sigma \cdot L \cdot T \tag{1}$$

- λ Wärmeleitfähigkeit in W/(K·m)
- σ elektrischen Leitfähigkeit in $m/(\Omega \cdot mm^2)$
- L Lorenz-Konstante in $W\Omega/K^2$
- T Temperatur in K

Wie Bild 2 zu entnehmen ist, sollte die Legierung nur niedrige Gehalte an Chrom, Lithium und Mangan besitzen, was eine Aluminiumbasis mit entsprechender Reinheit erforderlich macht. Darüber hinaus haben die Elemente Titan, Vanadium und Zirkon einen negativen

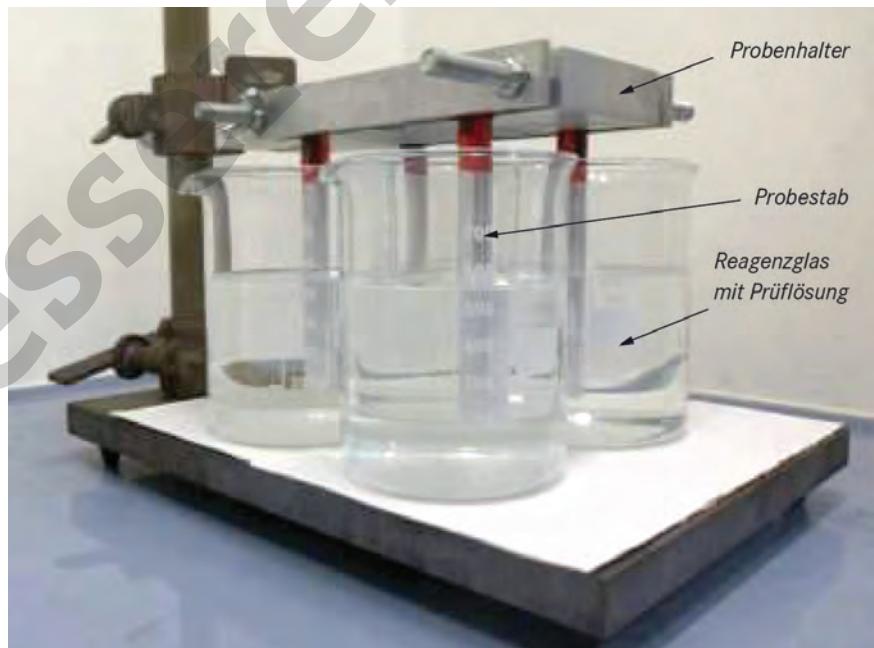
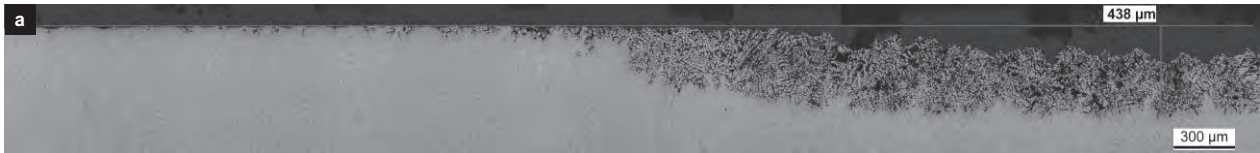


Bild 5: Versuchsaufbau zum Nachweis der IK-Resistenz gegenüber straßenüblichen korrosiven Medien.

Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit. Diese Elemente werden durch eine Fällungsreaktion mit Bor aus der Schmelze entfernt. Den Effekt dieser Schmelzebehandlung verdeutlicht **Bild 3** am Beispiel der Legierung AlSi7Mg. Klar ist ersichtlich, dass die mit Bor behandelte Variante eine über den gesamten Temperaturbereich höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt.

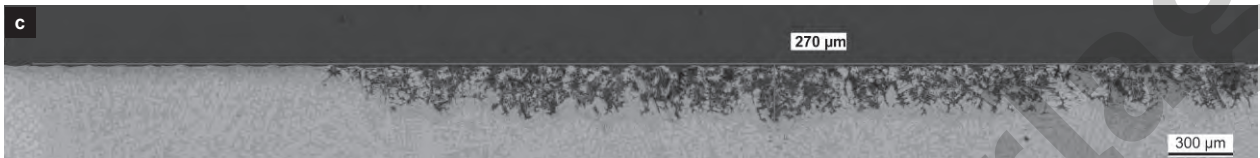
Untersuchung der mechanischen Eigenschaften
 Mit Blick auf eine Verbesserung der Warmfestigkeit wurden verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Cu- und Ni-Gehalten untersucht. Den besten Kompromiss aus verbesserter Festigkeit, guter Dehnung und geringen Legierungskosten weist dabei die Legierung AlSi8,5MgCu0, 15 auf. Die Ermittlung der mechanischen Eigen-



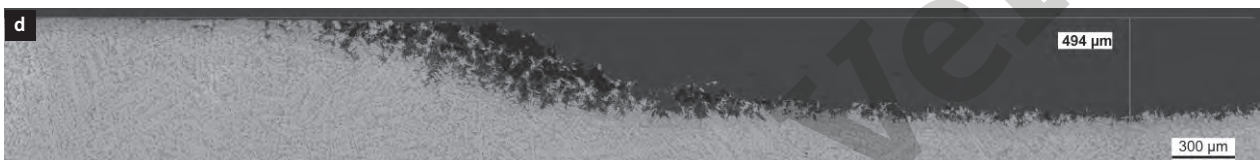
Variante: AISi8,5Mg (T5)



Variante: AISi8,5MgNi0,5Cu0,225 (T5)



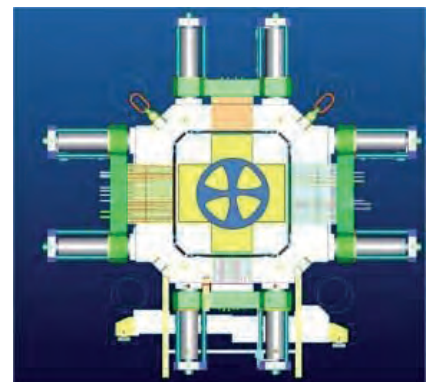
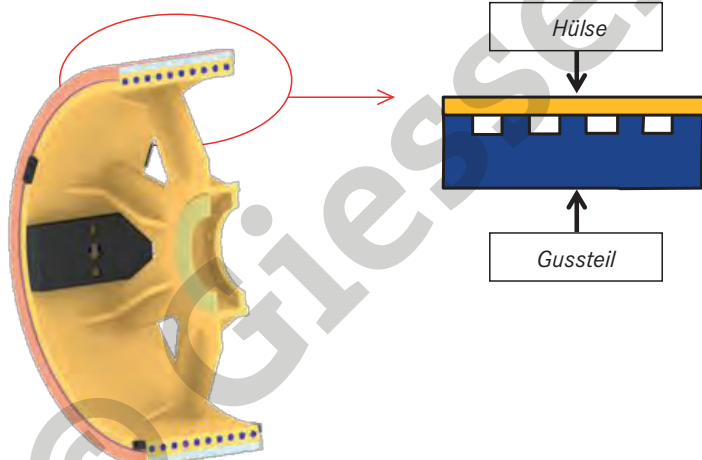
Variante: AISi8,5MgCu0,15 (T5)



Variante: AISi8,5MgNi1Cu0,15 (T5)

Bild 6: Vergleich von metallografischen Schlifflinien ausgewählter Legierungsvarianten zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens: a) AISi8,5Mg(T5), b) AISi8,5MgNi0,5Cu0,225 (T5), c) AISi8,5MgCu0,15 (T5), d) AISi8,5MgNi1Cu0,15(T5).

GRAFIKEN: TRIMET ALUMINIUM



Werkzeugkonzept

Bild 7: Zur Schaffung der umlaufenden Kühlkanäle sind einseitige Vertiefungen vorgesehen, die durch eine Hülse verschlossen werden. Druckgießtechnisch kommt hierzu ein Werkzeugkonzept mit vier Schiebern zum Einsatz. Durch lange, schmale Kerne an den Schiebern können auch Kanäle in den Speichen des Stators hergestellt werden.

schaften erfolgte bislang bei Raumtemperatur, allerdings fand neben dem Gusszustand eine T5-Wärmebehandlung (180 °C/2,5 h) und eine Vorauslagerung (180 °C/120 h) Berücksichtigung. Mit der Vorauslagerung soll eine thermische Beanspruchung des Werkstoffes während der Nutzungsphase simuliert werden.

Wie **Bild 4** zeigt, ist die relevante $R_{p0,2}$ -Dehngrenze der optimierten Variante

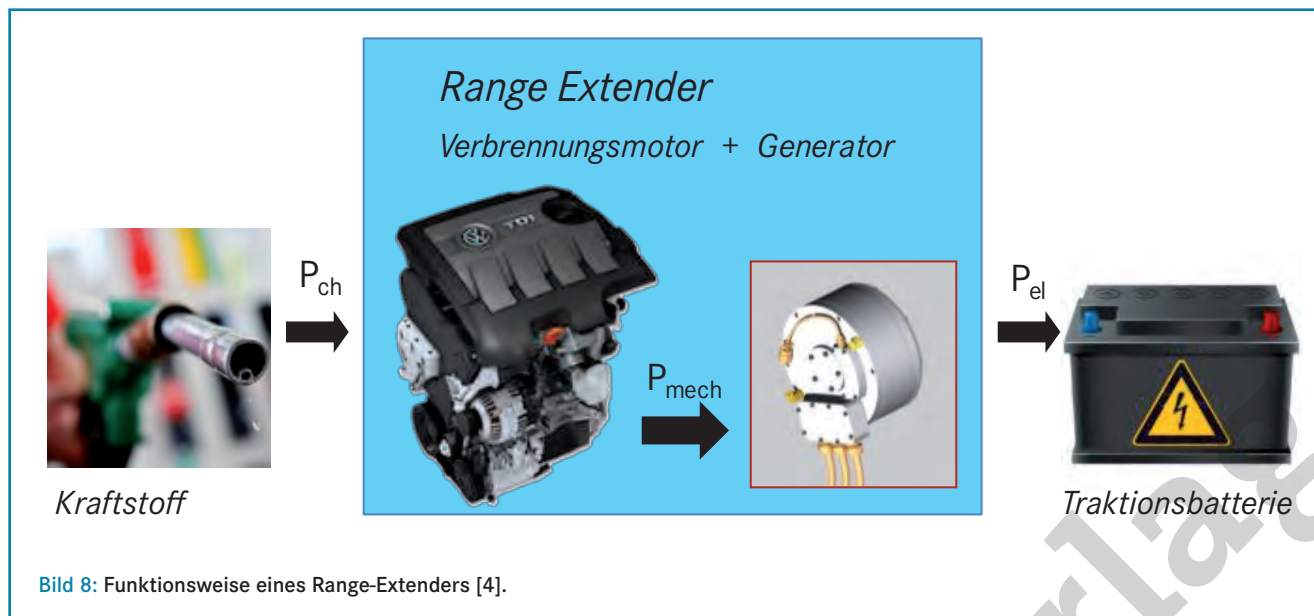
AISi8,5MgCu0,15 nach einer T5-Wärmebehandlung bis zu 8 % und nach einer Vorauslagerung bis zu 19 % höher als bei der Standardvariante AISi8,5Mg.

Ermittlung des Korrosionsverhaltens

Kennzeichnend für einen Radnabenmotor ist, dass dieser direkt in der Felge eines Fahrzeugs eingebaut wird. In dieser Einbausituation wirken eine Reihe von Um-

welteinflüssen auf den Radnabenmotor ein. Neben der thermischen Belastung und dem Steinschlag ist vor allem der korrosive Angriff durch salzhaltige Lösungen von großer Bedeutung. So kommt Salz insbesondere im Winter als Auftaumittel zur Beseitigung von Schnee und Eis zum Einsatz.

Zur Überprüfung des Korrosionsverhaltens fand im Rahmen der bisher durch-



geführten Arbeiten ein IK-Schnelltest (IK – interkristalline Korrosion) Anwendung. Intention des Tests ist es, dass in nur 2 h der korrosive Angriff simuliert wird, den ein Fahrzeug während der gesamten Nutzungsphase erfährt. **Bild 5** zeigt den für diesen Test verwendeten Versuchsaufbau, bei dem zuvor abgedrehte Probestäbe getrennt voneinander in eine Prüflösung eintauchen. Die Prüflösung bestand aus 500 ml Wasser (H_2O), 10 g Kochsalz (NaCl) und 50 ml konzentrierter Salzsäure (HCl 29-35 %ig). Das Probenvolumen-Prüflösungs-Verhältnis liegt bei $1 \text{ cm}^3 / 50 \text{ ml}$. Die Umgebungstemperatur betrug ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Bewertung des Korrosionsverhaltens erfolgt an metallografischen Schliffen. Der begutachtete Probenanschnitt konzentriert sich hierbei auf den Übergangsbereich vom ungeschädigten zum geschädigten Probenvolumen, um neben der Eindringtiefe vor allem eine Aussage über die gesamte Angriffstiefe machen zu können. **Bild 6** stellt die metallografischen Schliffe ausgewählter Legierungsvarianten gegenüber. Der Vergleich der metallografischen Schliffe ermöglicht eine qualitative und quantitative Aussage und lässt folgende Einordnung zu:

Überraschenderweise zeigt die Variante AlSi8,5MgCu0,15 mit einer Angriffstiefe von $270 \mu\text{m}$ trotz der Anwesenheit von Kupfer ein deutlich besseres Korrosionsverhalten als die niedriglegierte Variante AlSi8,5Mg (Angriffstiefe: $430 \mu\text{m}$). Dieses Ergebnis wurde durch zwei Wiederholungsprüfungen bestätigt.

Erwartungsgemäß besitzt die Variante AlSi8,5MgNi0,5Cu0,225 eine ausgeprägte Korrosionsempfindlichkeit. Neben dem erhöhten Kupfergehalt bewirkt die Anwe-

senheit von Nickel eine Verstärkung des korrosiven Angriffs. Die Angriffstiefe zeigt mit $570 \mu\text{m}$ den höchsten Wert.

Bei der Variante AlSi8,5Ni1Cu0,15 beträgt die Angriffstiefe $494 \mu\text{m}$. Im Vergleich zur Variante AlSi8,5MgCu0,15 entspricht dies einer Steigerung um den Faktor 1,8. Diese Beobachtung untermauert die Erkenntnis, dass insbesondere die gleichzeitige Anwesenheit von Kupfer und Nickel das Korrosionsverhalten deutlich verschlechtert.

Druckgegossener Leichtbaustator mit integrierter Innenkühlung

Wie eingangs erwähnt, ist eine effektive Kühlung, die im Wesentlichen über Kühlkanäle im Umfang und den Speichen des Stators erfolgen soll, von großer Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Radnabenmotors. Was die Herstellung von Kanälen oder Hohlräumen in Druckgussbauteilen betrifft, so kann dies zum einen durch das Um- oder Eingießen von gefüllten Einlegerohren erfolgen. Zum anderen besteht aber auch die Möglichkeit, Salzkerne einzugießen, die nachträglich mit Wasser ausgespült werden müssen.

Der seitens der Trimet Aluminium SE, Essen, im Rahmen des Projekts favorisierte Lösungsansatz soll ohne die Verwendung von Einlegeteilen oder Salzkerne umgesetzt werden. Die Geometrie des Stators bietet hierbei die Möglichkeit, die Kanalstruktur im Umfang des Stators zunächst nur einseitig als Vertiefungen auszubilden. Das Schließen der Kanäle erfolgt dann nachträglich durch eine Hülse. Zur Ausbildung der umlaufenden Vertiefungen ist eine 4-Schieber-Form vorgesehen. Bringt man an die Schieber zu-

sätzlich lange, schmale Kerne an, so lassen sich auch die Kanäle in den Speichen des Stators abbilden (**Bild 7**).

Funktionsintegrierte Ölwanne für einen Range-Extender

Der Range-Extender kommt in rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zum Einsatz. Er dient als eine Art Notstromaggregat, das nur dann zugeschaltet wird, wenn eine Strecke zurückgelegt werden soll, die größer ist als diejenige, die mit dem aktuellen Ladungszustand der Batterie erreicht werden könnte.

Der Range-Extender besteht aus einem kompakten Verbrennungsmotor und einem Generator, der durch den Verbrennungsmotor angetrieben wird. Auf diese Weise kann die im Kraftstoff gespeicherte chemische Energie P_{ch} in elektrische Energie P_{el} umgewandelt und für das Laden der Batterie genutzt werden (**Bild 8**).

Um den Wirkungsgrad des Range-Extenders zu steigern, ist es vorteilhaft, wenn die Öltemperatur bereits in der Startphase des Verbrennungsmotors auf hohem Niveau ist, da sich hierdurch Reibungsverluste reduzieren lassen. Darüber hinaus sollte die Öltemperatur nach dem Anschalten des Verbrennungsmotors auf hohem Niveau gehalten werden können, was eine gute thermische Isolierung voraussetzt. Bei der Realisierung der o. g. Anforderungen kann die Ölwanne, die bislang nur als Sammelgefäß für das Motoröl Verwendung findet, durch Funktionsintegration einen entscheidenden Beitrag leisten. Nachfolgend werden zwei Funktionsintegrationen und deren Umsetzung aufgezeigt.

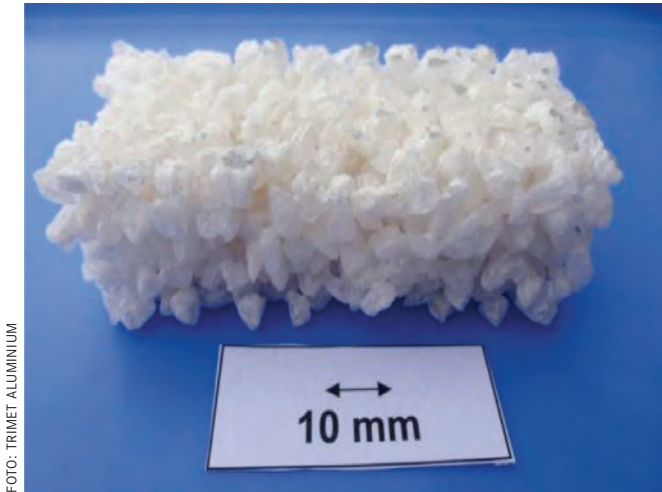


FOTO: TRIMET ALUMINIUM

Bild 9: Kern aus groben Salzkörnern.

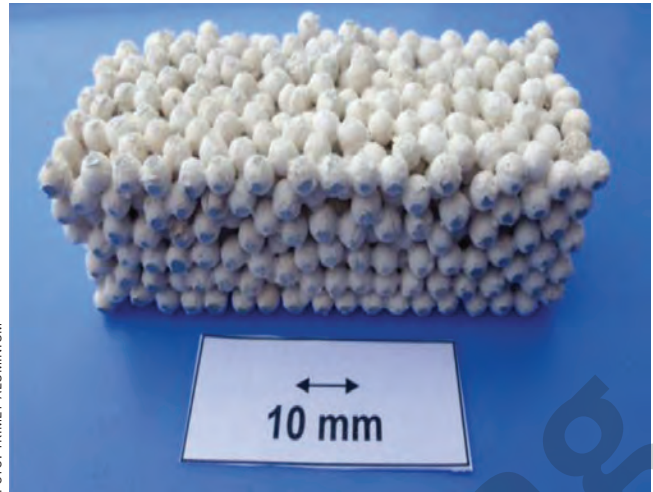


FOTO: TRIMET ALUMINIUM

Bild 10: Kern aus Salzkugeln.

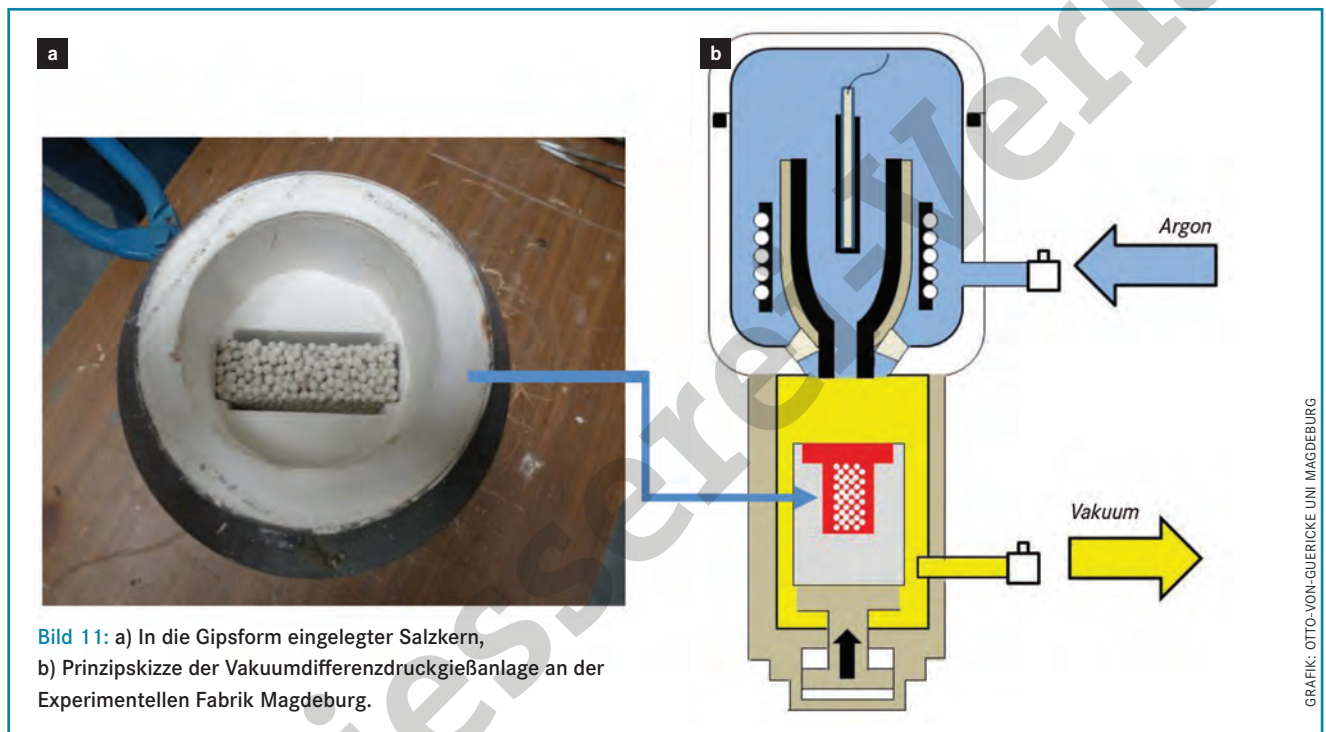


Bild 11: a) In die Gipsform eingelegter Salzkern, b) Prinzipskizze der Vakuumdifferenzdruckgießanlage an der Experimentellen Fabrik Magdeburg.

GRAFIK: OTTO-VON-GUERICKE UNI MAGDEBURG

Funktionsmerkmal: thermische Isolation und verringerte Schallemission

Aluminium weist eine vergleichsweise gute Wärmeleitfähigkeit und Schallausbreitungsgeschwindigkeit auf. Um eine thermische Isolation und verringerte Schallemission zu erreichen, wird in definierten Bereichen der Ölwanne die Ausbildung einer Aluminium-Integralschaumstruktur angestrebt. Dies erfolgt idealerweise in einem modifizierten Druckgießprozess, sodass verfahrenstechnisch nur eine schmelzmetallurgische Herstellungsmethode in Betracht kommt. Diesbezüglich bietet sich zum einen die Zugabe eines gasabsplattendes Treibmittels in die Aluminiumschmelze an. Als Reaktionsprodukt entsteht in der Regel Wasserstoff, der zu feinverteilten Gasporen innerhalb des erstarrenden Aluminiums führt. Alternativ dazu können Hohlräume inner-

halb des Aluminiums aber auch durch Platzhalter erzeugt werden. Nachfolgend soll dieser Lösungsansatz vorrangig betrachtet werden, da er fertigungstechnisch gut zu beherrschen ist. Die anschließenden Beschreibungen verdeutlichen den Stand der im Rahmen der bisher durchgeführten Grundsatzuntersuchungen erreichten Ergebnisse.

Als Platzhaltermaterial kam Salz zum Einsatz, das zum einen in Form grober Salzkörner und zum anderen in Form von Salzkugeln (Durchmesser 4 mm) vorlag. Die Stabilisierung der Körner bzw. Kugeln erfolgte mit einem anorganischen Binder (Bilder 9 und 10).

In den ersten Versuchen zeigte sich eine unzureichende Infiltration der Kerne beim Einsatz des Schwerkraftgießverfahrens. Aus diesem Grund fand nun ein effektiveres Gießverfahren Anwendung.

Die Kerne wurden, wie in Bild 11 a ersichtlich, in einer Küvette befindlichen Gipsform eingelegt und im Anschluss mit einer Aluminiumschmelze vom Typ Al-Si10MnMg infiltriert. Dies erfolgte in einer Vakuumdifferenzdruckgießanlage (Bild 11 b). Im Ergebnis konnte eine vollständige Aluminiumsandwichstruktur erzielt werden. Dazu gehört eine feste Deckschicht, die mit einem Kern, der eine sprunghaft absteigende Dichte besitzt, verbunden ist (Bild 12). Sowohl die Salzkörner als auch die Salzkugeln waren geeignet, um im Gussstück untereinander verbundene Hohlräume zu bilden. Die Proben besitzen eine Porosität von 37 % (Körner) bzw. 47 % (Kugel). Der Gusskörper aus Bild 13 weist in der Deckschicht Störstellen auf. Als Ursache kann eine ungleichmäßige Verteilung des Bindemittels innerhalb der Salzkorn-Binder-

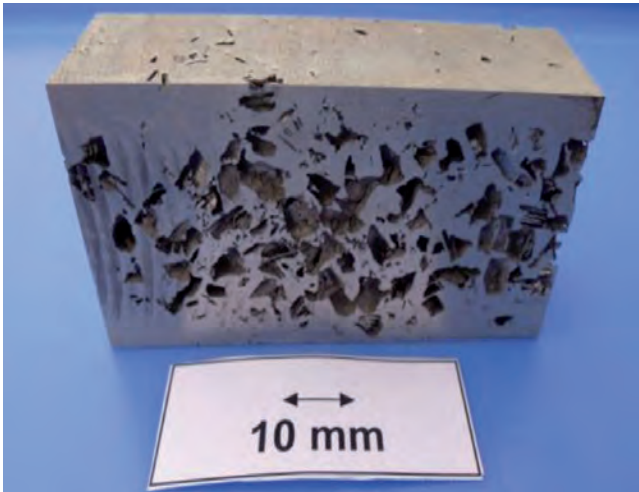


Bild 12: Gussstück, hergestellt mit Salzkörnern.

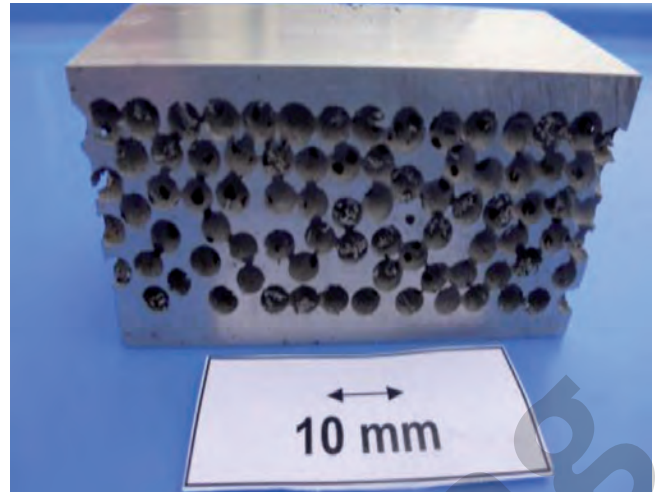


Bild 13: Gussstück, hergestellt mit Salzkugeln.

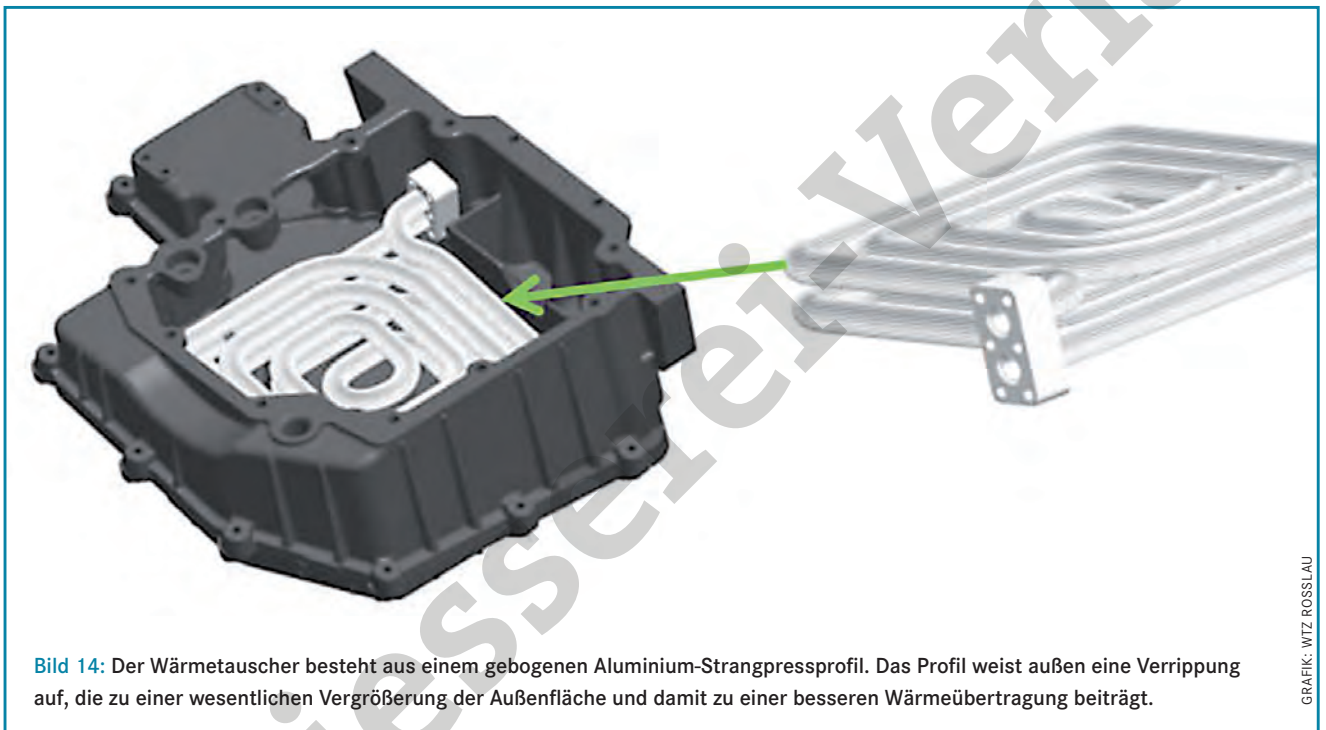


Bild 14: Der Wärmetauscher besteht aus einem gebogenen Aluminium-Strangpressprofil. Das Profil weist außen eine Verrippung auf, die zu einer wesentlichen Vergrößerung der Außenfläche und damit zu einer besseren Wärmeübertragung beiträgt.

Mischung angenommen werden, sodass partiell eine unzureichende Haftung der Salzkörner vorgelegen hat. Grundsätzlich ist der Lösungsansatz aber sehr vielversprechend. Deshalb soll die Nutzung salzbasierter Platzhalterkerne zukünftig auch im Rahmen von Druckgießversuchen erprobt werden.

Funktionsmerkmal: Einbindung in das Thermomanagement des Fahrzeuges

Wie eingangs beschrieben, ist der Verbrennungsmotor eines Range-Extenders nur sporadisch im Einsatz. Einerseits ist bereits in der Startphase eine hohe Öltemperatur gewünscht, um die Reibungsverluste zu verringern und somit den Wirkungsgrad zu steigern. Andererseits bietet das während des Betriebes erhitzte Öl die Möglichkeit, einen Teil der Wärme für andere Aufgaben im Fahrzeug zu nutzen.

Beide Aufgaben lassen sich durch die Integration eines Wärmetauschers realisieren. Bild 14 zeigt den im Projekt verfolgten Lösungsansatz.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen zukünftiger Arbeiten soll untersucht werden, ob für das Infiltrieren von Salzkernen auch das Druckgießverfahren geeignet ist. Die Herstellung von Aluminium-Schaumstrukturen soll ebenfalls Schwerpunkt der Untersuchungen sein.

Diese Arbeiten wurden durch das Land Sachsen-Anhalt im Rahmen der Landesinitiative „ELISA“ gefördert.

Dr.-Ing. Andreas Kleine, Trimet Aluminium SE, Harzgerode, Matthias Reinemann

(B. Sc.), Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Dr.-Ing. Hubert Koch, Trimet Aluminium SE, Essen, und Dipl.-Ing. Andreas Zörnig, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg

Literatur:

- [1] Konstruktion (2014), [Nr. 1(Sonderausgabe)], S. 48.
- [2] Zörnig, A.: Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Institut für Mobile Systeme, Lehrstuhl Mechatronik.
- [3] Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch. Bd. 1, 15. Aufl., Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [4] Höhne, F.: Präsentation zum ELISA-Projektsprechtag, 3.7.2012.
- [5] Kleine, A., u. a.: Structure optimization of Al-Si-type Alloys for thermal and mechanical high loaded components. Proc. TMS, San Antonio, USA, 2013.