

# SiMo1000 – Ein aluminiumlegiertes Gusseisen für Hochtemperaturanwendungen

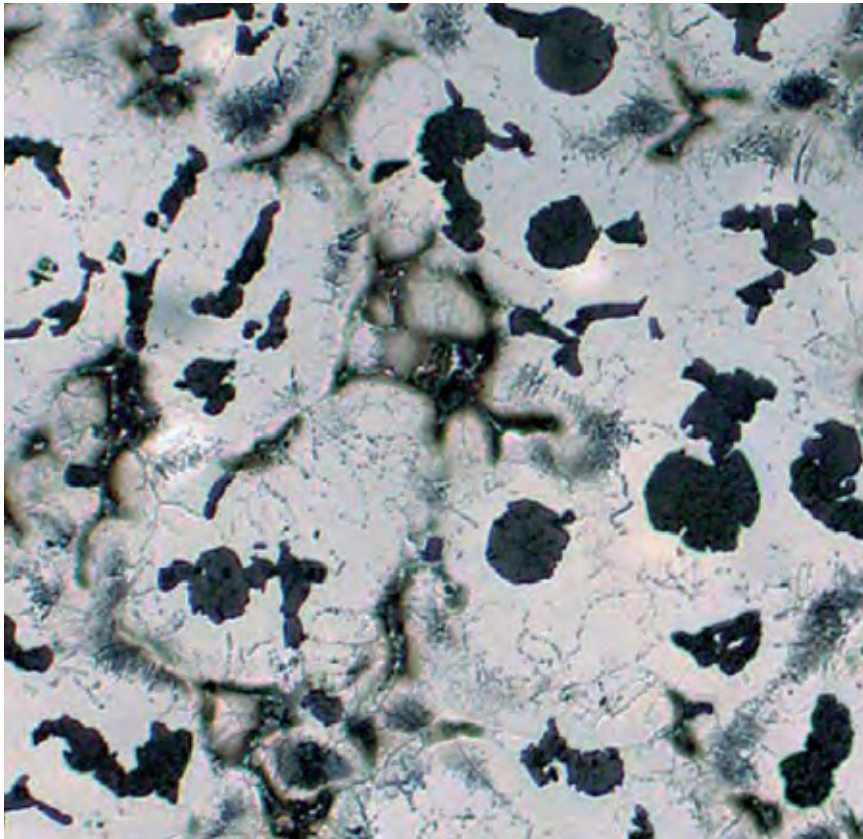


FOTO: GEORG FISCHER

Typische Mikrostruktur von SiMo1000

VON SIMON KLEINER, SCHAFFHAUSEN, SCHWEIZ, UND KURT TRACK, HERZOGENBURG, ÖSTERREICH

Die allgegenwärtige, öffentliche Diskussion über die Klimaerwärmung und die notwendige, drastische Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zwingt die Automobilhersteller dazu, möglichst rasch verbrauchsünstigere und emissionsärmere Fahrzeuge auf den Markt zu bringen. Bevor die derzeit vielgepriesenen alternativen Antriebskonzepte wie Elektro- oder Brennstoffzellen-Antrieb in Großserie und zu vertretbaren Kosten verfügbar sind, kann relativ kurzfristig über eine Optimierung der konventionellen Verbrennungsmotoren schon eine deutliche Verbrauchssenkung erzielt werden. Das Downsizing in Verbin-

dung mit Turboaufladung bietet hierzu ein großes Potential, und dieser Weg wird denn auch zurzeit von fast allen namhaften Automobilherstellern verfolgt.

Die Steigerung der spezifischen Leistung und des Mitteldruckniveaus bei Downsizing-Motoren sowie der weitgehende Verzicht auf eine Gemischanreicherung gehen einher mit einer Erhöhung der Abgastemperatur. Bei den Pkw-Dieselmotoren bewegen sich die maximalen Abgastemperaturen in Richtung 850 °C oder gar 900 °C, während bei hoch aufgeladenen Ottomotoren häufig der Wert von 1050 °C genannt wird [1]. Zusätzlich führt das Downsizing-Konzept auch dazu, bezogen auf das Zylindervolumen, steigende Energiemengen umgesetzt werden. In der Summe bedeuteten diese aktuellen Ent-

wicklungen im Motorenbau eine markant zunehmende, thermische Beanspruchung der abgasführenden Motorkomponenten wie Abgaskrümmen und Turbolader. Dadurch stoßen bislang eingesetzte Werkstoffe vermehrt an ihre Belastungsgrenze, und es müssen höherwertige Werkstofflösungen gefunden werden. Im Normalfall bleiben die maximalen Bauteiltemperaturen der abgasführenden Bauteile zwar etwa 50-80 °C unterhalb der Abgastemperatur, an besonders exponierten Stellen – z. B. in dünnen, mehrseitig von Abgas umströmten Bereichen – kann die Werkstofftemperatur jedoch nahezu die Abgastemperatur erreichen.

## Im Heißgasbereich eingesetzte Werkstoffe

Je nach Temperaturbereich finden verschiedene Werkstoffe Anwendung im Heißgasbereich. Bei Abgaskrümmen konkurrieren geschweißte Blechkonstruktionen (gebaute Krümmen) mit Gussteilen, während für Turboladergehäuse fast ausschließlich gegossene Komponenten eingesetzt werden.

Ferritische SiMo-Gusseisen mit 4-5 % Silicium und 0,5-1 % Molybdän, sowohl als Varianten mit Vermiculargraphit (GJV) als auch mit Kugelgraphit (GJS), finden ihren Anwendungsbereich bei Bauteiltemperaturen von bis zu rund 820 °C. Neben den Standardvarianten sind auch Werkstoffe mit zusätzlichem Chrom- oder Nickelanteil von 0,5-1 % auf dem Markt (SiMoCr respektive SiMoNi), welche eine etwas erhöhte Zunderbeständigkeit aufweisen sollen. Bei höheren Temperaturen bis maximal 930 bis 950 °C werden entweder austenitische Gusseisen wie GJSA-XNiSiCr35-5-2, auch bekannt als Ni-Resist D5S, oder hoch chromhaltige, ferritische Stähle eingesetzt. Im Bereich bis 1000 °C und leicht darüber erfüllen nur noch hoch legierte, austenitische Stähle die Anforderungen, und bei noch höheren Temperaturen muss schließlich auf Nickelbasislegierungen zurückgegriffen werden.

Da höherwertige Werkstoffe einen höheren Legierungselementanteil haben, steigen die Werkstoffkosten mit zunehmender Einsatzgrenze kontinuierlich an. Insbesondere Nickel wird in hohen Anteilen eingesetzt, und dieses Element zeigte in den letzten Jahren ein sehr volatiles Preisverhalten. Aus ökonomischer Sicht besteht daher der klare Wunsch, niedrig legierte und damit kostengünstige Werkstoffe auch bei höheren Temperaturen einzusetzen und die teureren, hoch legierten Varianten – wo immer möglich – zu substituieren.

Aufgrund dieser Tatsachen hat sich Georg Fischer Automotive, Schaffhausen, Schweiz, vor einigen Jahren dazu entschlossen, die Weiterentwicklung von ferritischen SiMo-Gusseisen zu forcieren, und deren Einsatzbereich für höhere Temperaturen zu erweitern. Als Maßstab sollte dabei der austenitische Werkstoff GJSA-XNiSiCr35-5-2 dienen, welcher üblicherweise bei Bauteiltemperaturen von etwa 820 °C bis 930 °C angewendet wird.

### Anforderungen an die Werkstoffe

Werkstoffe, die für Abgaskrümmen und Turboladengehäuse eingesetzt werden, unterliegen starker thermischer und thermomechanischer Belastung.

Zu den wichtigsten Eigenschaften der hier eingesetzten Materialien zählen deshalb [2]:

- > Zunderbeständigkeit,
- > Festigkeit, insbesondere Warmfestigkeit,
- > Gefügestabilität,
- > Temperaturwechselbeständigkeit.

Die Temperaturwechselbeständigkeit, oder allgemeiner die Beständigkeit gegen thermomechanische Ermüdung, ist keine einzelne Werkstoffkenngröße, sondern abhängig von verschiedenen Materialeigenschaften. Bei jeder Erwärmung und Abkühlung entstehen im Bauteil Temperaturunterschiede und damit auch thermisch induzierte Spannungen, da sich das Material an unterschiedlich heißen Stellen unterschiedlich stark ausdehnen möchte. Eine zusätzliche Dehnungsbehinderung entsteht durch die Anbindung des entsprechenden Bauteils an andere Komponenten wie z. B. den Zylinderkopf.

Die thermisch induzierte Spannung verhält sich in erster Näherung proportional zum E-Modul und zum thermischen Ausdehnungskoeffizienten, respektive umgekehrt proportional zur Wärmeleitfähigkeit. Die hohe Warm- und Kriechfestigkeit verhindert, dass die induzierten Spannungen zu einer starken plastischen Deformation oder einer frühzeitigen Rissbildung und damit zum Bauteilversagen führen.

### KURZFASSUNG:

Das Downsizing in Verbindung mit Turboaufladung bietet ein großes Potential zur Verbrauchsreduzierung bei Automotoren, führt jedoch auch zu einer markant zunehmenden thermischen Beanspruchung der abgasführenden Bauteile. Dadurch stoßen die bislang eingesetzten Werkstoffe vermehrt an ihre Belastungsgrenze und es müssen höherwertige Werkstofflösungen gefunden werden.

Im Artikel wird der neu entwickelte, aluminiumhaltige Gusseisenwerkstoff SiMo1000 vorgestellt, welcher aufgrund seines gegenüber den klassischen SiMo-Gusseisen deutlich verbesserten Eigenschaftsprofils – einer markant verbesserten Zunderbeständigkeit, einer erhöhten Warmfestigkeit und einer höheren Umwandlungstemperatur – den Einsatzbereich der ferritischen Gusseisen zu höheren Temperaturen erweitert und fallweise auch den teureren, austenitischen Werkstoff GJSA-XNiSiCr35-5-2 sehr gut substituieren kann.

Ein prinzipieller Vergleich der Werkstoffeigenschaften von ferritischen SiMo-Gusseisen und dem austenitischen GJSA-XNiSiCr35-5-2 zeigt die jeweiligen Vorteile dieser Sorten für den Einsatz im Heißgasbereich:

Vorteile SiMo-Gusseisen (GJS/GJV):

- > geringere thermische Ausdehnung;
- > höhere Wärmeleitfähigkeit, insbesondere als GJV-Variante;
- > höhere Festigkeit bei Raumtemperatur, insbesondere als GJS-Variante.

Vorteile GJSA-XNiSiCr35-5-2:

- > bessere Zunderbeständigkeit;
- > höhere Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit;
- > geringerer E-Modul;
- > keine Gitterumwandlung.

Ziel bei der Legierungsentwicklung der ferritischen SiMo-Gusseisen muss es also sein, diejenigen Eigenschaften zu optimieren, bei welchen das austenitische Gusseisen bislang die größten Vorteile besitzt. Bei den möglichen Verbesserungen sind uns natür-

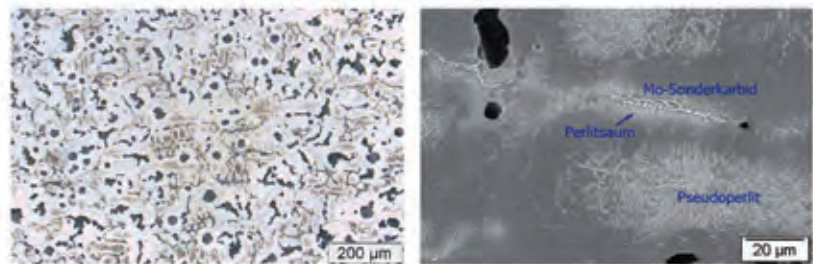


Bild 1: Charakteristisches Gefüge (geätzt) von SiMo1000; Lichtmikroskopie (links) und REM-Bild (rechts)

Elementgehalt im Austenit in Gew.-%

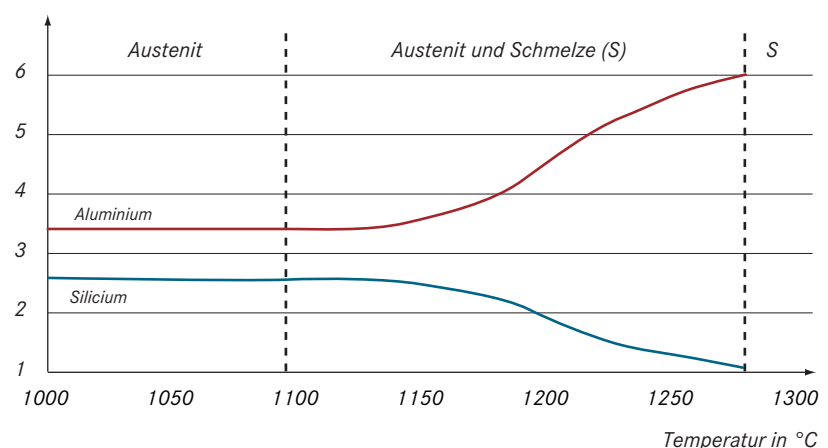
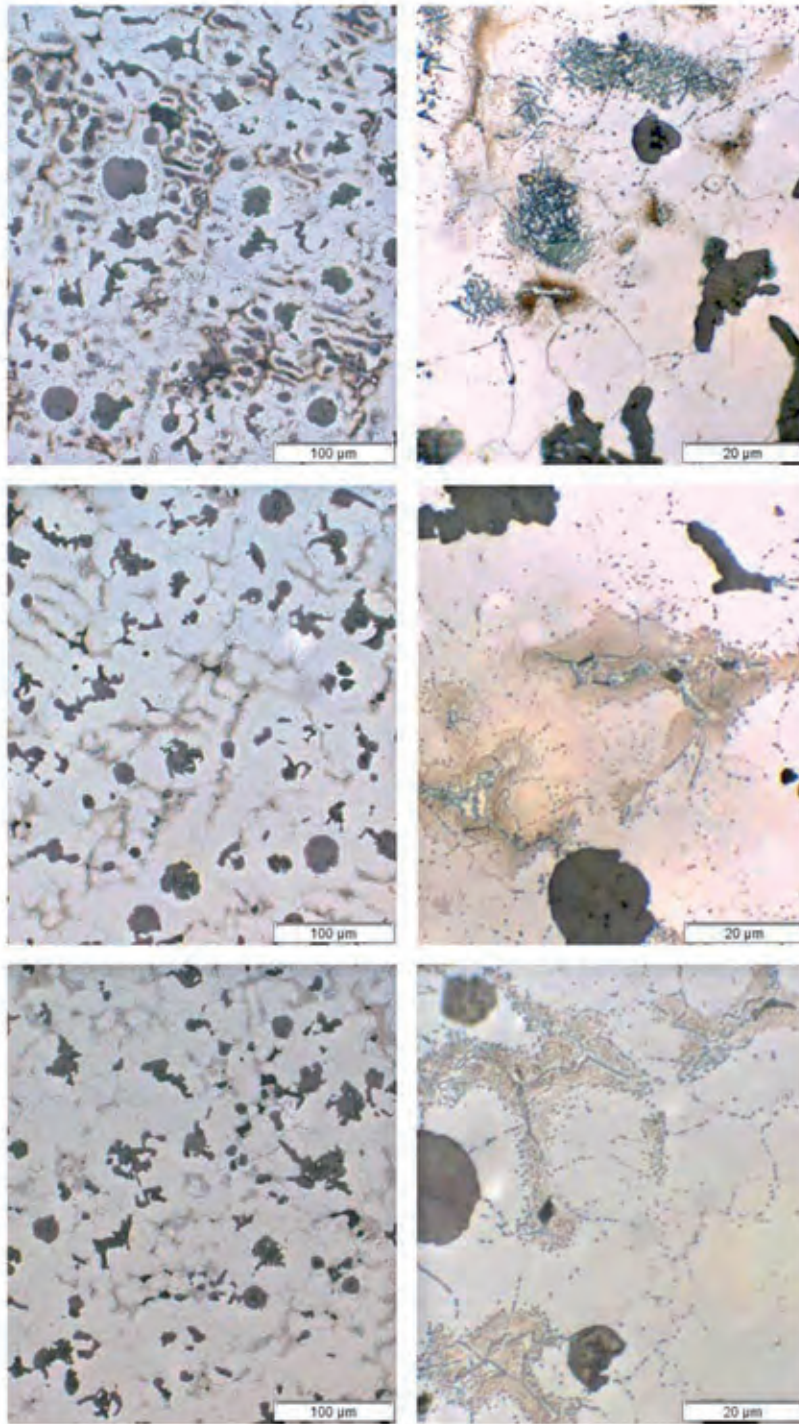


Bild 2: Elementgehalte von Si und Al im Austenit während der Erstarrung, berechnet mittels JMatPro



**Bild 3: Gefüge von SiMo1000 (geätzt). Von oben nach unten im Gusszustand, nach 30 Minuten bei 800 °C und nach 2 Stunden bei 800 °C. Rechts ist jeweils ein 5-fach vergrößerter Ausschnitt aus dem linken Bild dargestellt.**

lich einige werkstoffphysikalische Grenzen gesetzt, da das kubisch-flächenzentrierte (kfz) und damit dichtest gepackte austenitische Eisen andere Grundvoraussetzungen mitbringt, als das kubisch-raumzentrierte (krz) ferritische Eisen mit seiner offeneren Gitterstruktur.

So ist beispielsweise der Selbstdiffusionskoeffizient, den wir vereinfacht als Maß für die Beweglichkeit der Atome betrachten können, beim austenitischen Eisen

rund 350 Mal kleiner als beim ferritischen Eisen [3]. Das kfz-Gitter bietet also prinzipiell deutlich bessere Voraussetzungen für eine hohe Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit als das krz-Gitter.

### Legierungs- und Prozessentwicklung SiMo1000

Die Legierungsentwicklung ist im Allgemeinen ein sehr aufwendiger Prozess, bei

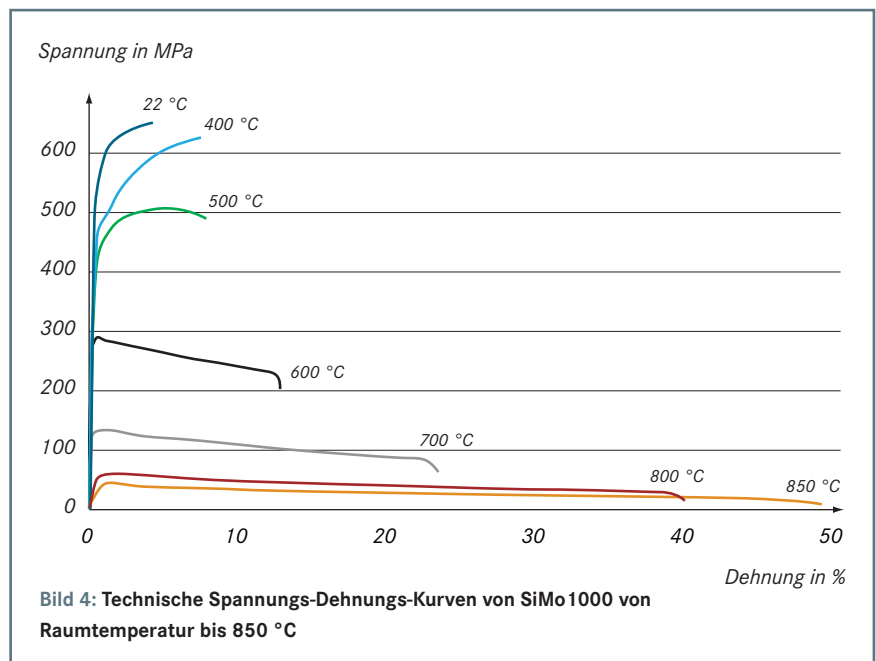
dem eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden müssen. In der Literatur finden sich zwar genügend Angaben über die Wirkung einzelner Legierungselemente auf die Eigenschaften von Gusseisen, die Wechselwirkungen bei der Kombination verschiedener Elemente sind jedoch nicht sehr umfassend dokumentiert. Um die Anzahl der benötigten Experimente zur Ermittlung der optimalen Legierungszusammensetzung zu reduzieren, bietet sich heute der Einsatz von thermodynamischen Berechnungen an. Für die klassischen Legierungselemente sind die dazu notwendigen Datenbanken für Eisenbasiswerkstoffe vorhanden, die Qualität der Berechnungen ist somit gut, während die Datenbasis für eher unübliche Legierungselemente wie Aluminium nicht sehr umfangreich ist und die Voraussagen doch deutlich vom experimentellen Befund abweichen können.

Bei der Entwicklung des SiMo1000 erwies sich von drei untersuchten Programmen nur das Softwarepaket JMatPro der Sente Software Ltd., Giulford, Großbritannien, als geeignet für die thermodynamische Simulation, da nur dieses bei Aluminiumgehalten von mehr als 0,5 % noch verlässliche Voraussagen lieferte. Die Simulation wurde in der Folge hauptsächlich für die Abschätzung der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur eingesetzt, lieferte aber ebenfalls wichtige Informationen über die Seigerungen beim Erstarren sowie über die Ausbildung verschiedener carbidischer und intermetallischer Phasen.

Das Hauptaugenmerk der Legierungsentwicklung lag zu Beginn auf einer Erhöhung der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur sowie der Verbesserung der Zunderbeständigkeit gegenüber den üblichen SiMo-Gusseisen. Gemäß Literatur lassen sich diese Eigenschaften vor allem durch die Legierungselemente Silicium und Aluminium positiv beeinflussen. Eine weitere Erhöhung des Silicium-Gehalts gegenüber dem bekannten GJS-SiMo5-1 ist jedoch nicht zielführend, da ein Anteil von mehr als 5 % Silicium zu einer sehr starken Versprödung des Gusseisens führt. Somit konzentrierten sich die Untersuchungen auf das Legierungselement Aluminium, respektive die geeignete Kombination von Al und Si. Aluminium ist ein stark ferritisierendes Element, das die Umwandlungstemperatur anhebt und dem Gusseisen eine erhöhte Beständigkeit gegen Verzunderung verleiht. Obwohl diese vorteilhafte Wirkung schon lange bekannt ist, verhinderten die Schwierigkeiten beim Gießen einen Einsatz von aluminiumlegierten Gusseisen bislang weitgehend [4].

Die hohe Sauerstoffaffinität einer aluminiumhaltigen Gusseisenschmelze führt sowohl zu vermehrter Schlackebildung als auch dazu, dass sich der Gießstrahl mit einer Oxidhaut überzieht. Dementsprechend sind verschiedene Anpassungen in der Schmelzföhrung und in der Gießtechnik notwendig, um diesen anspruchsvollen Werkstoff prozesssicher und in guter Qualität herstellen zu können. Im Laufe der Prozessentwicklung von SiMo1000 zur Serienreife wurden mit einem modifizierten Georg Fischer Konverter hauptsächlich Optimierungen im Bereich des Schmelzens und Schmelzbehandelns, des Laufsystems mit Filter, der Anschnitttechnik des Gussteils sowie der Speisergeometrie durchgeführt.

Während der Legierungsentwicklung zeigte sich, dass ein Siliciumgehalt von rund 2,5 % in Kombination mit einem Aluminiumgehalt von 3-3,5 % zu einem Werkstoff mit einem sehr ausgewogenen Eigenschaftsprofil führt. Als weitere Legierungselemente sind Nickel und Molybdän in Gehalten von jeweils knapp 1 % Bestandteile des heute in Großserie produzierten Gusseisens SiMo1000. Im Folgenden werden die mikrostrukturellen Charakteristika sowie die mechanischen und thermophysikalischen Eigenschaften des SiMo1000 im Vergleich mit anderen SiMo-Gusseisen



**Bild 4: Technische Spannungs-Dehnungs-Kurven von SiMo 1000 von Raumtemperatur bis 850 °C**

sowie dem austenitischen GJSA-XNiSi-Cr35-5-2 detailliert dargestellt.

#### Mikrostruktur

Das typische Gefüge von SiMo1000 enthält neben Vermicular- und Kugelgraphit sowie Ferrit noch drei weitere Phasen (Bild 1):

- > Molybdän-Sondercarbide (eutektische Carbide)
- > Perlitsaum rund um diese eutektischen Carbide mit sehr feinen, körnigen Ausscheidungen
- > Pseudoperlit (perlitähnliche Bereiche) mit teils lamellarer, teils körniger Struktur.

Funktionelle Lösungen zu Ihrem Vorteil.



**PUNKT-Speiser®**

---

**PUNKTGENAU**

- ✓ PUNKT-Speiser® für kleinste Aufsatzflächen
- ✓ Aufformdorn federnd oder starr
- ✓ Speiserhals rund oder oval

**ZUVERLÄSSIG**

- ✓ Prozesssichere Brechkante
- ✓ Reduzierte Putzkosten
- ✓ Fehlerfreie Gussoberfläche
- ✓ Fluorarme oder fluorfreie Qualität lieferbar

**INTELLIGENT**

- ✓ Gute Formstoffverdichtung unter dem Speiser
- ✓ Definiertes Speiservolumen
- ✓ Optimierte Speiserhals-Geometrie

---

*Unsere ganze Energie für gute Speiser.*






**GTP  
SCHÄFER**

Telefon 0 21 81/2 33 94-0  
www.gtp-schaefer.de

**AUSWAHL • QUALITÄT • SERVICE**




**GIessereIBEDARF von A – Z**  
**MODELLBAUBEDARF von A – Z**  
**WERKZEUGHARZE einschl. Zubehör**  
führend seit Jahrzehnten

**Bitte fordern Sie unsere Kataloge an.**



**Wir sind Partner und liefern  
das komplette Toolingprogramm  
der Firma  
SIKA Deutschland GmbH**

**HOHNEN & CO. • 33697 BIELEFELD**

Postfach 21 90 33 • Tel. (05 21) 9 22 12-0 • Telefax (05 21) 9 22 12-20  
Email: info@hohnen.de • Internet: www.hohnen.de

Die von einem Saum umgebenen Sondercarbide treten auch in klassischen SiMo-Gussteisen auf, der Pseudoperlit ist hingegen eine mikrostrukturelle Eigenheit von SiMo1000 und steht im Zusammenhang mit dem Aluminiumgehalt dieser Legierung.

In **Tabelle 1** sind die Elementgehalte aufgeführt, die mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) im Pseudoperlit, im Perlitsaum und in der ausscheidungsfreien Matrix bestimmt worden sind.

Es wird deutlich, dass der Pseudoperlit stark mit Aluminium angereichert ist. Silicium ist hingegen in geringeren Gehalten vorhanden als in der Matrix. Daher kann vermutet werden, dass es sich bei der carbidischen Phase im Pseudoperlit um ein Eisen-Aluminium-Carbid  $Fe_3AlC_x$  ( $x = 0,5-0,7$ ) handelt. Gemäß Literatur bildet diese Phase lamellare Strukturen ähnlich dem Perlit [5] und tritt bei einem Aluminiumgehalt größer 3 % auf [6].

Der Perlitsaum um die eutektischen Carbide ist stark angereichert an Molybdän, hat einen leicht erhöhten Siliciumgehalt und einen deutlich verminderten Aluminiumgehalt. Ein ähnlicher Saum tritt auch bei normalem SiMo auf und wird dort üblicherweise dem Perlit zugerechnet, obwohl es sich bei den feinen Ausscheidungen nicht um  $Fe_3C$ , sondern wahrscheinlich um  $Fe_2MoC$  und  $M_6C$  [7] handelt. Diese Ausscheidungen sind deutlich temperaturstabiler als normaler Perlit.

Die Anreicherung an Silicium im zuletzt erstarrenden Bereich ist ungewöhnlich, da es sich bei Silicium eigentlich um ein umgekehrt seigerndes Element handelt [8]. Die Simulationsrechnung zeigt jedoch, dass in Anwesenheit von Aluminium die Seigerungsneigung von Silicium zunimmt. Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse muss berücksichtigt werden, dass es sich um berechnete Gleichgewichtszustände handelt. In der Realität wird sich kaum je ein Gleichgewichtszustand einstellen, da sich Konzentrationsunterschiede in der Festphase nur durch Diffusionsprozesse – welche Zeit brauchen – ausgleichen können. Bei realen Abkühlgeschwindigkeiten werden deshalb Konzentrationsunterschiede bestehen bleiben, was ja auch im Gefüge festgestellt wird.

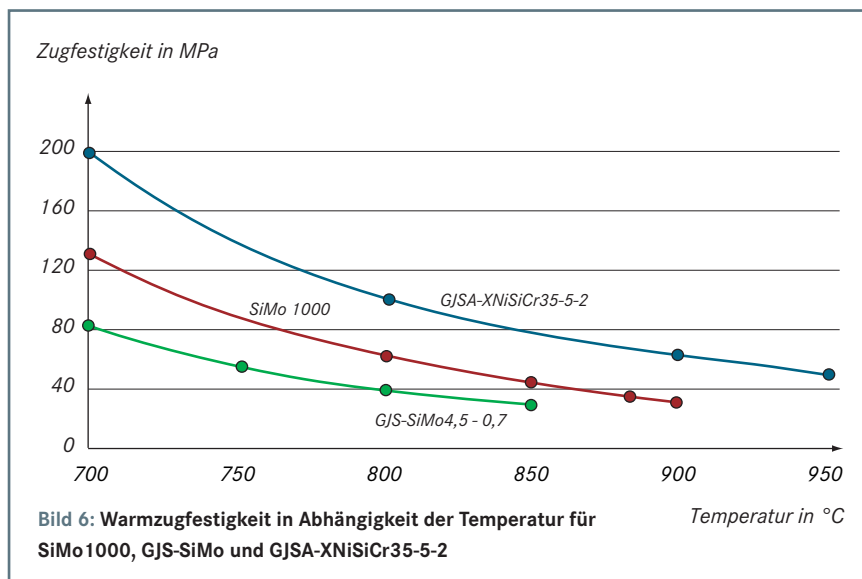
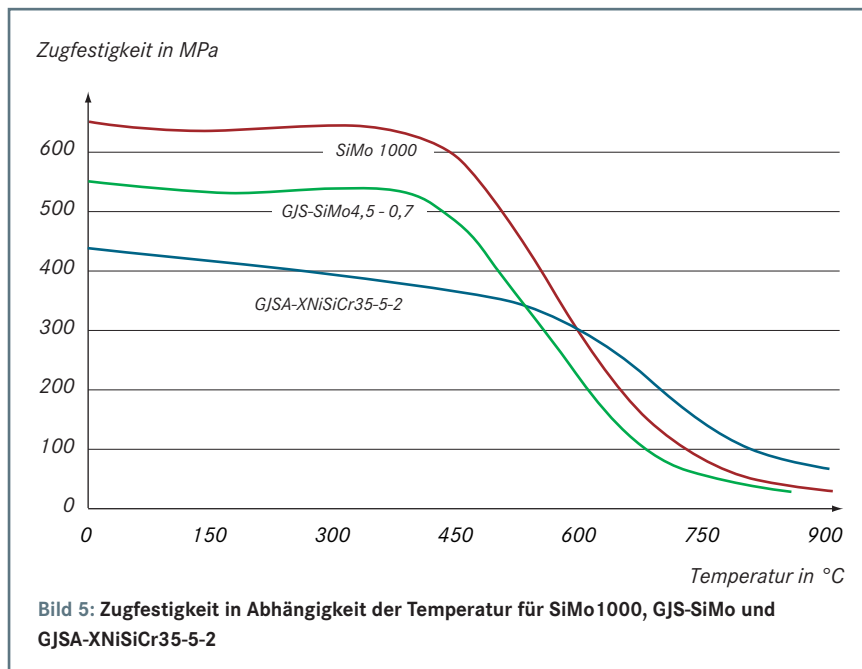
**Bild 2** zeigt, dass der zuerst erstarrende Austenit gemäß Rechnung stark an Aluminium angereichert ist (maximal rund 6 %), jedoch nur sehr wenig Silicium enthält (minimal rund 1,1 %). Mit sinkender Temperatur nimmt der Aluminiumgehalt im Austenit ab, der Siliciumgehalt hingegen zu. Trotzdem sind beispielsweise bei 1200 °C die Elementgehalte im Austenit mit rund 4,6 % Al und 1,9 % Si noch deutlich von der Grundzusammensetzung entfernt. Unter der realistischen Annahme einer nicht vollständigen Diffusion bestätigen diese Berechnungsergebnisse den experimentellen Befund von rund 5,2 % Al und 2 % Si in den zuerst erstarrenden Bereichen, welche bei weiterer Abkühlung in Pseudoperlit umwandeln.

Weil in der Festphase kein vollständiger Konzentrationsausgleich stattfindet, ist die zuletzt erstarrende Schmelze an Aluminium verarmt, und es besteht ein Überschuss an Silicium. Dies erklärt die festgestellten Gehalte an Si (3,9 %) und Al (1,2 %) im Saum rund um die groben Carbide.

Da im Gussgefüge lokal unterschiedliche Zusammensetzungen vorliegen, ist prinzipiell auch mit lokal unterschiedlichen Umwandlungstemperaturen zu rechnen. Für die lokal festgestellten Zusammensetzungen berechnen sich die Umwandlungstemperaturen zu rund 910 °C für die Matrix, 935 °C für die Bereiche mit Pseudoperlit und 860 °C für den Perlitsaum.

**Tabelle 1: Elementgehalte (Gew.-%) der wichtigsten Legierungselemente in einigen Phasen von SiMo1000**

Pseudoperlit	2,0 % Si	5,2 % Al	0,3 % Mo	0,8 % Ni
Perlitsaum	3,9 % Si	1,2 % Al	2,7 % Mo	0,8 % Ni
Matrix	2,8 % Si	3,4 % Al	0,4 % Mo	0,7 % Ni



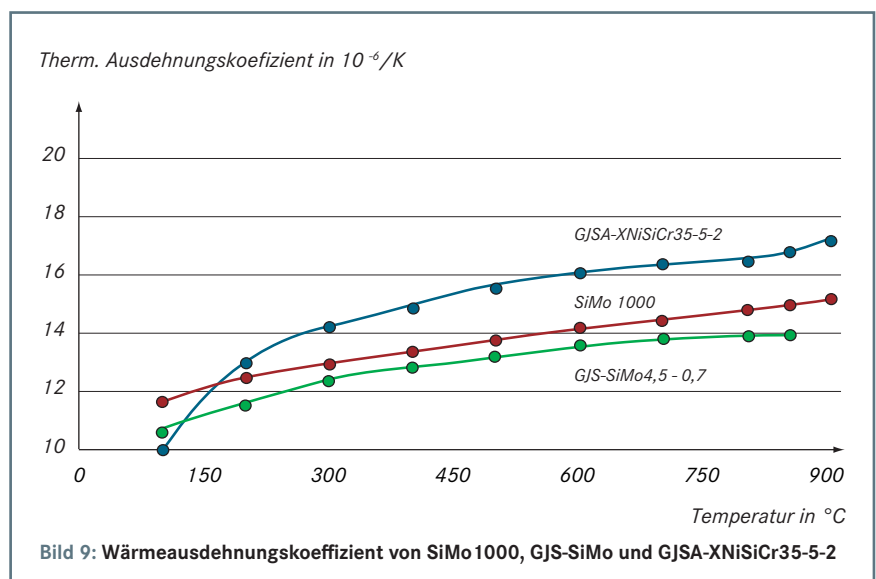
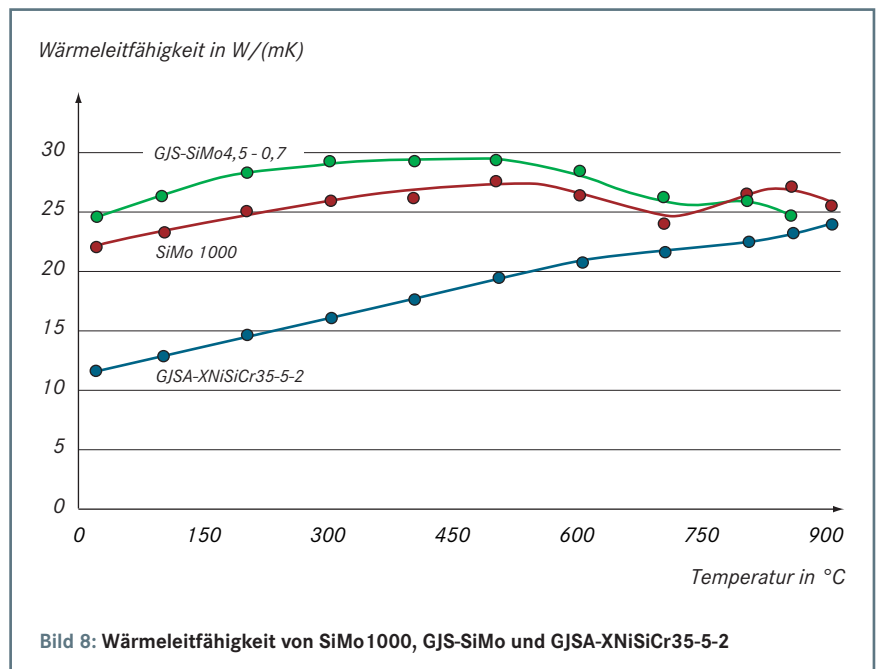
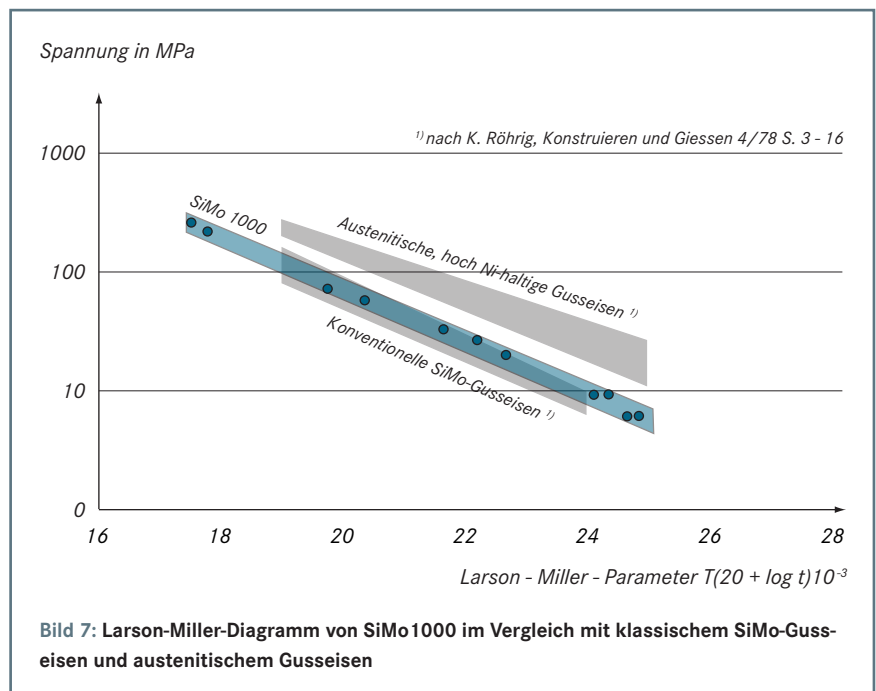
Grundsätzlich könnte also das Gefüge rund um die groben Sonderkarbide schon früher umwandeln, als gemäß Sollzusammensetzung zu erwarten wäre. Austenitierungsversuche zeigten allerdings, dass die berechnete Temperatur von 860 °C eine sehr konservative Schätzung ist, denn auch nach längerer isothermer Haltezeit bei dieser Temperatur und anschließender Abschreckung konnten im Gefüge keinerlei Anzeichen von Martensit oder Zwischenstufengefüge gefunden werden. Selbst bei einer isothermen Haltetemperatur von 880 °C wurden im Abschreckgefüge nur minimalste Anteile von weniger als 1 % an umgewandeltem Gefüge beobachtet.

Neben der Gitterumwandlung können auch andere Gefügeveränderungen zu einer unerwünschten Volumenänderung führen. Im Falle von Gusseisen ist es insbesondere die Perlitauflösung, welche zu einer signifikanten Volumenzunahme führt. SiMo1000 enthält jedoch keinen klassischen Perlit mit  $Fe_3C$ , sondern den beschriebenen Pseudoperlit mit  $FeAlC_x$ . Letztere Phase löst sich bei höheren Temperaturen zwar ebenfalls relativ schnell auf (Bild 3), im Dilatometerversuch kann jedoch kein Probenwachstum im betreffenden Temperaturbereich festgestellt werden, d. h. die Auflösung des Pseudoperlits scheint volumenneutral zu geschehen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Tatsache, dass bei der Auflösung von  $Fe_3C$  ein Kohlenstoffatom pro drei Metallatome freigesetzt wird, bei der Auflösung von  $Fe_3AlC_{0,5}$  hingegen nur ein Kohlenstoffatom pro acht Metallatome.

Der Perlitsaum, bei welchem es sich ebenfalls nicht um normalen Perlit handelt, löst sich bei Temperaturen bis 850 °C kaum auf, aber bei längeren Zeiten tritt eine gewisse Vergrößerung der carbidischen Ausscheidungen ein.

### Mechanische und thermophysikalische Eigenschaften

Bild 4 zeigt exemplarisch sieben Spannungs-Dehnungskurven (technisches  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm) von SiMo1000 bei unterschiedlichen Temperaturen bis 850 °C. Bis rund 500 °C zeigt der Werkstoff ein verfestigendes Verhalten bei plastischer Deformation. Ab 600 °C ändert sich das Deformationsverhalten deutlich, das Spannungsmaximum wird sehr früh durchlaufen, der Großteil der plastischen Deformation findet unter abnehmender Spannung statt. Auch das klassische SiMo-Gusseisen zeigt ein sehr ähnliches Deformationsverhalten in Abhängigkeit der Temperatur, erreicht jedoch über den gesamten Temperaturbereich nicht die Festigkeit von SiMo1000 (Bild 5). Die Warmfestigkeitswerte (Bild 6) des austenitischen GJSA-XNiSiCr35-5-2 lie-



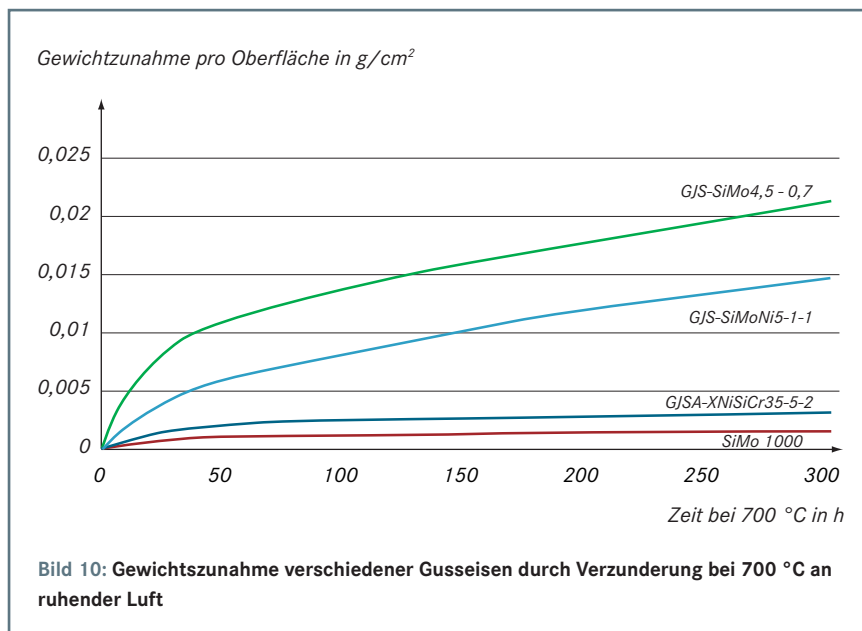


Bild 10: Gewichtszunahme verschiedener Gusseisen durch Verzunderung bei 700 °C an ruhender Luft

gen hingegen über denjenigen des SiMo1000.

Bezüglich des Kriechverhaltens zeigt sich eine ähnliche Reihung der Werkstoffe (Bild 7). SiMo1000 liegt im oberen Streubereich der üblichen SiMo-Gusseisen beziehungsweise leicht darüber, kann die bekanntermaßen gute Kriechfestigkeit der austenitischen Gusseisen jedoch nicht erreichen. Hier zeigt sich ganz klar der erwähnte, werkstoffphysikalische Vorteil des kfz-Gitters der austenitischen Eisensorten gegenüber dem krz-Gitter der ferritischen Sorten.

Bei den thermophysikalischen Eigenschaften zeigen die ferritischen SiMo-Gusseisen klare Vorteile gegenüber dem GJS-XNiSiCr35-5-2. Sie weisen sowohl eine höhere Wärmeleitfähigkeit (Bild 8) als auch eine geringere Wärmeausdehnung (Bild 9) auf, was den Aufbau von thermisch induzierten Spannungen bei zyklischer Temperaturbelastung reduziert.

Aufgrund seines erhöhten Legierungselementanteils erreicht SiMo1000 nicht ganz die Wärmeleitfähigkeitseigenschaften des normalen GJS-SiMo, obwohl die teilweise vermiculare Ausbildung des Graphits eigentlich eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mit sich bringen sollte. Der positive Effekt der Graphitform wird offenbar durch die Verminderung der Leitfähigkeit der ferritischen Matrix infolge der erhöhten Menge der im Mischkristall gelösten Legierungselemente zunichte gemacht.

Verglichen mit GJS-SiMo weist SiMo1000 zwar eine leicht höhere Wärmeausdehnung auf, doch über weite Teile des für abgasführende Komponenten relevanten Temperaturbereichs liegt die Wärmeausdehnung von SiMo1000 immer noch deutlich unter derjenigen des austenitischen GJS-XNiSiCr35-5-2, dessen geringe Wärmeausdehnung bei tiefen Temperaturen bis rund

200 °C im Zusammenhang mit dem Invar-Effekt steht, mit dem anormal kleine Wärmeausdehnungskoeffizienten von Legierungen in bestimmten Temperaturbereichen gemeint sind. Der Nickelgehalt der Matrixzusammensetzung von GJS-XNiSiCr35-5-2 entspricht ziemlich genau dem der klassischen Invar-Legierung FeNi36. Der Invar-Effekt nimmt jedoch mit steigender Temperatur ab und verschwindet oberhalb der Curie-Temperatur vollständig.

### Verzunderung

Die Verbesserung der Zunderbeständigkeit gegenüber den klassischen SiMo-Gusseisen war eines der Hauptziele bei der Entwicklung von SiMo1000. Verzunderung führt einerseits zu einer Schwächung der Wanddicke der typischerweise schon dünnwandigen Bauteile wie Abgaskrümmen und Turboladergehäuse, andererseits kann abplatzender Zunder zu Beschädigungen der Turbine oder Funktionsbeeinträchtigungen von Partikelfilter und Katalysator führen.

Die Zunderbeständigkeit ist keine absolute Werkstoffkennzahl, welche in einem genormten Test ermittelt werden könnte. Verzunderungsversuche sind deshalb meistens nur Relativvergleiche zwischen verschiedenen Werkstoffen. Im Bereich bis rund 750 °C ist die Messung der Gewichtszunahme eine geeignete Methode zur Quantifizierung der Verzunderung, da in diesem Temperaturbereich noch keine Entkohlung der Zunderschicht in der Regel noch unproblematisch ist. In Bild 10 ist die Verzunderung bei 700 °C unter normaler Luftatmosphäre dargestellt. SiMo1000 zeigt dabei eine rund fünf- bis zehnmals geringere Verzunderung als die anderen SiMo-Gusseisen und ist bei dieser Temperatur sogar

dem GJS-XNiSiCr35-5-2 überlegen. Dieses Bild bestätigte sich auch bei höheren Temperaturen bis rund 850 °C; darüber beginnt auch SiMo1000 verstärkt zu verzundern, während sich der GJS-XNiSiCr35-5-2 selbst dort noch zunderbeständig zeigt.

### Fazit und Ausblick

Durch die Entwicklung des SiMo1000 ist es gelungen, das Einsatzgebiet der ferritischen Gusseisen im höheren Temperaturbereich zu erweitern. Mit seinem gegenüber den klassischen SiMo-Gusseisen deutlich verbesserten Eigenschaftsprofil – einer markant verbesserten Zunderbeständigkeit, einer erhöhten Warmfestigkeit und einer höheren Umwandlungstemperatur – kann SiMo1000 bis zu einer Bauteiltemperatur von rund 860 °C den teureren, austenitischen Werkstoff GJS-XNiSiCr35-5-2 sehr gut substituieren. Aufgrund der Umwandlungstemperatur von etwa 900 °C sind kurzfristig auch etwas höhere Bauteiltemperaturen zulässig. Bei gleicher Geometrie des Bauteils bietet SiMo1000 wegen seiner geringeren Dichte zudem ein Gewichtseinsparpotential von etwa 8 %.

Das Hauptaugenmerk der laufenden Legierungsoptimierung liegt auf einer weiteren Steigerung der Warmfestigkeit. Erste Versuche mit einer geringen Zugabe von carbidbildenden Elementen der Gruppen 4 und 5 des Periodensystems weisen darauf hin, dass eine Steigerung der Warmfestigkeit um rund 20 % reproduzierbar erreicht werden kann.

Simon Kleiner, Georg Fischer Automotive AG, Schaffhausen, Schweiz, Kurt Track, Georg Fischer Eisenguss GmbH, Herzogenburg, Österreich

### Literatur

- [1] R. Krebs et al., MTZ 66 (2005) Nr. 11, S. 844-856.
- [2] W. Kallen, K. Röhrig, konstruieren + giessen 26 (2001) Nr. 4, S. 17-39.
- [3] R. Bürgel in: Handbuch Hochtemperaturwerkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage 2006.
- [4] K. Röhrig, D. Wolters in: Legiertes Gusseisen: Band 1, Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1970.
- [5] H. Ishii et al., Materials Transactions 44 (2003) Nr. 9, S. 1679-1681.
- [6] N. Aleksandrov et al., Patent DE2623239, 1977.
- [7] B. Black et al., SAE Paper No. 2002-01-2115, 2002.
- [8] S. Hasse in: Duktiler Gusseisen: Handbuch für Gusserzeuger und Gussanwender, Fachverlag Schiele Schön GmbH, Berlin, 1996.