

# Potenziale und Limitierungen von Si-mischkristallverfestigten GJS-Sorten

Die Eigenschaften von hoch Si-haltigen, mischkristallverfestigten Gusseisensorten mit Kugelgraphit wurden im Rahmen dieser Arbeit weiterführend erforscht. Schwerpunkte waren die Untersuchung des mikro- und nanostrukturierten Werkstoffaufbaues mittels modernster elektronenmikroskopischer Methoden und Vergleichscharakterisierungen bezüglich der statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften bei verschiedenen Temperaturen und Oberflächenmodifikationen (Verfestigung). In weiterer Folge wurden thermophysikalische Kennwerte, die Oxidationseigenschaften und der Einfluss von verschiedenen Legierungselementen untersucht.

Gert Gassner, Eduard Koppensteiner, Lena Glavanovic, Gerhard Schindelbacher und Peter Schumacher, Leoben, Österreich

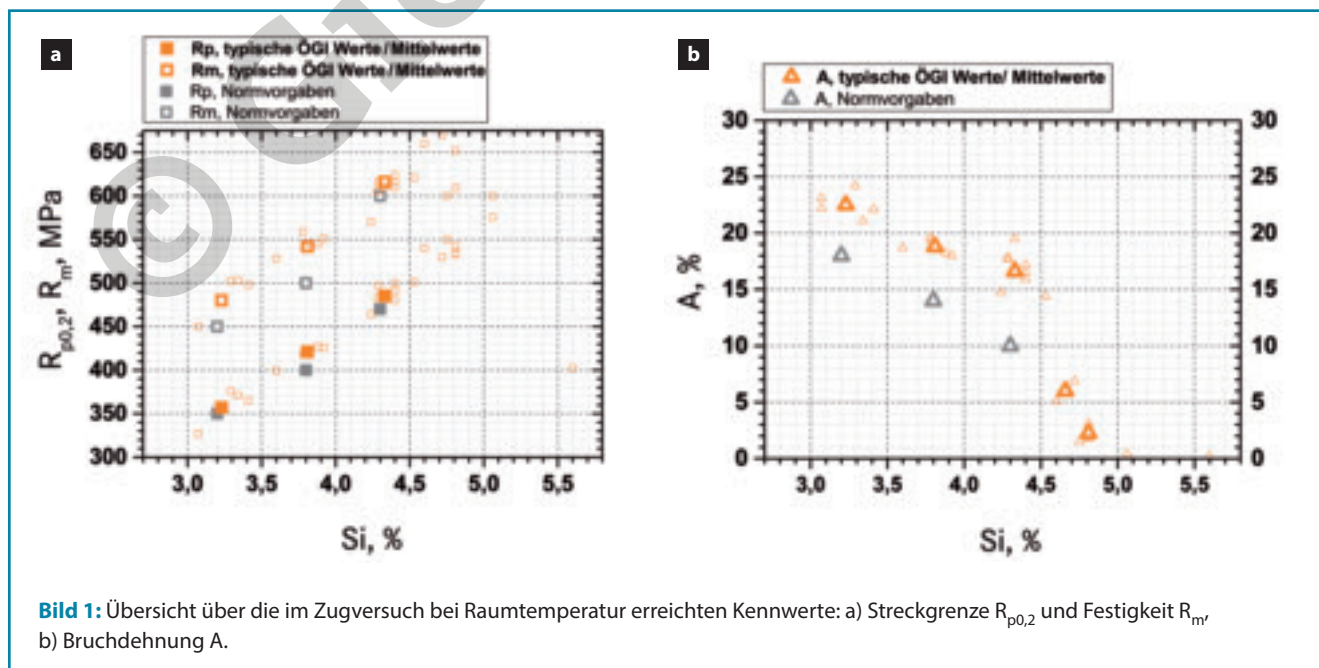
## 1 Einleitung

Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) wird seit über 50 Jahren in Europa industriell hergestellt. Die Welt-Gesamtproduktion von GJS betrug im Jahr 2015 etwa 25,6 Mio. t. Aufgrund der hervorragenden Gießeigenschaften bei kostenoptimiertem Materialeinsatz, der Beständigkeit gegen Verschleiß und Korrosion, aber vor allem der guten mechanischen Eigenschaften ist GJS ein sehr häufig und vielseitig eingesetzter Gusswerkstoff. Das Gefüge von GJS ist vielfältig beeinflussbar und das Anwendungspotenzial ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Durch die Erhöhung der Leistung und der Bauteilgrößen von Komponenten für die Energieerzeugung (Windkraft) kommt

es zu einem zunehmenden Einsatz dieser Werkstoffqualitäten bei gleichzeitiger Weiterentwicklung der mechanischen und insbesondere der dynamischen Eigenschaften. Die Attraktivität der duktilen Gusseisensorten, insbesondere der Sorten mit Mischkristallverfestigung aufgrund höherer Siliziumanteile, liegt in den angesprochenen guten mechanischen Eigenschaften bei guter Duktilität und wirtschaftlicher attraktiver Kosteneffizienz (Bild 1).

Bei der Revision der im März 2012 in Kraft getretenen ÖNORM EN 1563 wurden die ferritischen mischkristallverfestigten Werkstoffsorten GJS-450-18, GJS-500-14 und GJS-600-10 mit höhe-



**Bild 1:** Übersicht über die im Zugversuch bei Raumtemperatur erreichten Kennwerte: a) Streckgrenze  $R_{p0,2}$  und Festigkeit  $R_m$ , b) Bruchdehnung  $A_1$ .

ren Si-Gehalten neu aufgenommen. Während die herkömmlichen ferritisch/perlitischen Sorten weiterhin unverändert in der Norm bestehen bleiben, wird bei den neuen Sorten durch Legieren mit Silizium eine Steigerung der Festigkeit über die Mischkristallhärtung des Ferrits und nicht über den Perlitanteil im Gefüge erreicht. Durch den steigenden Siliziumgehalt wird auch die Ausbildung einer karbidfreien Gefügestruktur gefördert, und durch Stabilisierung des Ferritanteils kann bei hoher Festigkeit und Härte eine gute Dehnung erzielt werden [1-7].

Während die Si-Mischkristallverfestigung zu einem steten Ansteigen der statischen Festigkeitskenngrößen  $R_{p0,2}$  und  $R_m$  führt (Bild 1a), ist ab einem Si-Anteil von ca. 4,3 % ein starkes Abfallen der Bruchdehnung zu beobachten (Bild 1b). Dieses Versprödungsverhalten konnte auch in zahlreichen Bruchflächenanalysen von Zugproben und Bauteilversuchen aufgezeigt werden. Während die Sorte EN-GJS-450-18 noch ein vollständig duktiler Bruchbild zeigt, wandelt sich das Bruchverhalten mit steigenden Si-Anteilen über ein spröduktiles Bruchbild hin zum beinahe vollständigen Sprödbbruch der Sorte EN-GJS-600-10. Dieses Sprödbbruchverhalten zeigt sich neben den stark sinkenden Bruchdehnungskennwerten im statischen Zugversuch auch in den spezifischeren Kennwerten wie Rissinitiierung, Kerbschlag- und Bruchzähigkeiten und limitiert die möglichen Anwendungen erheblich [8]. Gleichsam konnte bereits in ersten größeren Versuchsreihen gezeigt werden, dass vor allem für die härteste Sorte EN-GJS-600-10 das Prozessfenster sehr klein ist, da auch Schwankungen der lokalen Impfwirkung und Kugelgratbildung über Kugelzahl und Kugelform große Auswirkungen auf die resultierenden Eigenschaften haben und es auch in Abhängigkeit der lokalen Seigerungsgradienten und Wanddicken zur verstärkten Ausbildung von Chunky-Grat kommen kann [8-10].

Mittels aufwendiger hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie konnte die Ursache dieser Versprödung mit steigender Si-Mischkristallverfestigung näher dargestellt werden [11-13]. Es konnte in diesen ausführlichen Versuchsreihen anhand der SAD-Beugungsbilder klar gezeigt werden, dass sich im Kristallgitter der Grundgefüge von Si-Mischkristallverfestigten GJS-Sorten ab einem Si-Anteil von ca. 3,9 % Überstrukturordnungen der Typen B2 und DO3 wiederfinden. Die Intensitäten und somit der Anteil dieser Cluster steigt mit dem Si-Anteil in den Proben weiter. Daher können diese Mechanis-

men als hauptursächlich für die zu beobachtenden Versprödungen analog zum Verhalten von Si-legierten Stählen angenommen werden [14].

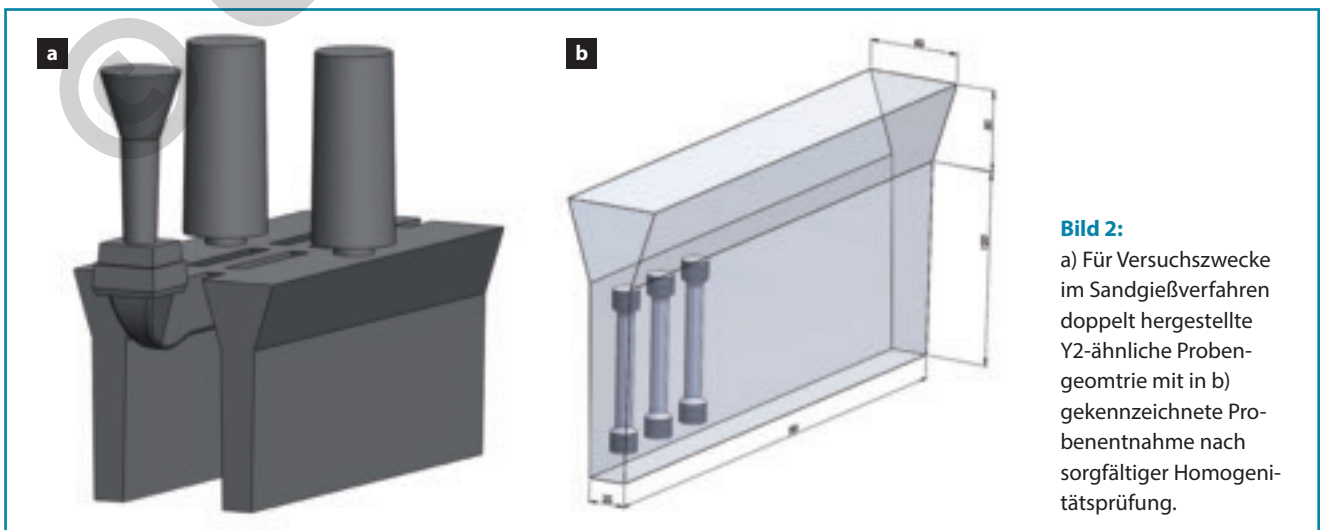
Dennoch legen diese Beobachtungen nahe, dass durch Austausch der Si-Atome im Mischkristall durch ähnlich wirkende Legierungselemente die negativen Versprödungserscheinungen abgemindert werden können, während die positiven Eigenschaften in ähnlicher Weise bestehen bleiben. Analog zu bereits in [15] berichteten ersten Erkenntnissen werden in diesem Beitrag hierzu Ergebnisse und Möglichkeiten gezeigt.

Dennoch weisen die Si-Mischkristallverfestigten GJS-Normsorten hinsichtlich der Anwendungen in Hochleistungsbauteilen mit hohen Anforderungen an statische Festigkeiten bei erhöhten Temperaturen sowie hohen notwendigen Ermüdungsfestigkeiten bei gleichzeitig guten thermophysikalischen Eigenschaften enormes Leistungspotenzial auf. Einige Aspekte dieser Eigenschaften wurden in einem gemeinsamen Projekt mit Gießereien und Gussanwendern, das von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert wurde, untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden näher beleuchtet.

## 2 Probenherstellung und Prüfmethoden

Geschmolzen wurde allgemein im Gießerei-Technikum des Österreichischen Giesserei-Instituts ÖGI im sauer zugestellten 150-kg-Mittelfrequenz-Induktionsofen. Nach Bedarf wurden entweder 120 kg im sauer zugestellten Ofen oder 50 kg im SiC/Grat-Tiegel erschmolzen. Als grundsätzliche Gattierung wurden jeweils etwa 40 % Kreislaufmaterial, 40 % Stahl sowie bis zu 20 % Roheisen (Sorelmetal TF-10) eingesetzt, die Schmelzeinstellung erfolgte mittels Elektrodengrafit, FeSi75 sowie FeMn- und Cu-haltigen Vorlegierungsmitteln nach Erfordernis. Behandelt wurde bei ca. 1500 °C (120 kg) durch Tauchen im Ofen mit 1,1 % Elmag 6039. Geimpft wurde beim Abstich in eine Si-phosphorpfanne (120 kg) mit 0,3 % VP 216.

Die im Sandgießverfahren hergestellten Probekörper basieren auf Y2- und Y4- Probegometrien mit leicht vergrößerten Abmessungen, um möglichst viele identische Proben mit einer Charge herstellen und fertigen zu können (Bild 2). Auf diesem Wege konnten aus einer Schmelze am ÖGI bis zu 84 Proben gegossen werden (Bild 2b). Die jeweiligen Abgüsse wurden



**Bild 2:**

a) Für Versuchszwecke im Sandgießverfahren doppelt hergestellte Y2-ähnliche Probengeometrie mit in b) gekennzeichnete Probenentnahme nach sorgfältiger Homogenitätsprüfung.

**Tabelle 1: Übersicht der hergestellten Proben.**

Schmelz- Nr.	Sorte	Statik Y2				Chemie					Gefüge						
	EN-GJS-	Proben-Nr.	R <sub>p</sub>	R <sub>m</sub>	A	% C	% Si	% Mn	% Cu	Sc*	III	V	VI	V+VI	Perlit, %	Kugeln / mm <sup>2</sup>	Größe
14-3-217	<b>GJS-400-18</b>	390	246	407	21,8	3,64	2,04	0,20	-	1,024	0,6	30	70	99,6	<2	179	6-7
15-3-303	<b>GJS-500-7</b>	669	348	597	12,5	3,56	2,31	0,15	0,33	1,007	0,9	25	74	98,7	59	286	6-7
13-3-209	<b>GJS-500-14</b>	356	427	312	18,2	3,09	3,88	0,21	-	1,009	8,0	33,0	57,0	90,0	<2	236	6-7
14-3-231	<b>GJS-600-3</b>	434	386	698	9,7	3,56	2,31	0,22	0,46	1,008	1,4	29	69	98,5	81	145	5-6
13-3-210	<b>GJS-600-10</b>	362	500	624	16,5	2,96	4,40	0,24	-	1,018	1,9	21,6	76,4	98,0	<2	373	6-7

anhand von gem. EN 1563 hergestellten separat vergossenen Y2-Proben mit Raumtemperatur-Zugversuchen nach EN ISO 6892-1 mit Probengeometrie B10 x 50 auf ihre Normsortenzugehörigkeit hin bewertet. In **Tabelle 1** sind neben den ermittelten Kennwerten auch die zu den Versuchschargen zuordenbaren chemischen Analysen sowie die mittels Bildanalyse ermittelten Gefügekenneiwerte angeführt.

Nach der Fertigung wurden die Proben in eine Zugprüfmaschine der Marke Zwick/Roell Z250 eingespannt und bei verschiedenen Temperaturen über die Streckgrenze hinaus geprüft. Wobei EN ISO 6892-1 für Raumtemperaturzugversuche und EN ISO 6892-2 für die Hochtemperaturzugversuche zur Anwendung kamen.

Die ungekerbten Zugstäbe B10 x 50 mit rundem Durchmesser wurden nach der Norm DIN 50125 in der Werkstätte des ÖGI gefertigt. Ermittelt wurden die Dehnung A, die Zugfestigkeit R<sub>m</sub> und die Streckgrenze R<sub>p0,2</sub>.

Die zyklischen Kennwerte der Sorten wurden anhand bearbeiteter mechanischer Rundproben ohne Kerbe mit Außendurchmesser 10 mm und Prüfdurchmesser 7 mm in Zug-Druck-Wechselbelastung bei einem Lastverhältnis von R-1 (Prüfmaschine Rumul Mikrotron, ca. 150 Hz Prüffrequenz) ermittelt. Hierzu wurden je EN-GJS-Normsorte zumindest 25 Proben zur Ermittlung einer Wöhlerkurve herangezogen. Das Dauerfestigkeitsziel wurde mit N = 10<sup>7</sup> Zyklen definiert. Die Versuchsplanung als auch die Darstellung und die statistische Bewertung der Wöhlerkurven erfolgten mit dem Softwarepaket SAFD.

Der nachfolgende Vergleich der Einflüsse unterschiedlicher Oberflächenzustände auf die zyklischen Kennwerte wurde mithilfe von speziellen Flachprobengeometrien ermittelt (**Bild 3**). Diese Proben wurden bereits in früheren Projekten am ÖGI erfolgreich verwendet [16, 17]. Im Rohgusszustand wurden pro Kasten 8 Proben mit folgenden Außenabmessungen hergestellt: Länge 200 mm, Breite 22 mm, Höhe 22 mm. Hieraus wurden die Proben seitlich und an den Einspannbacken auf eine Länge von 180 mm, eine Breite von 22 mm und eine Höhe von 18 mm überarbeitet oder für Vergleichszwecke zu den zyklischen Kennwerten vollflächig auf eine Breite von 22 mm und eine Höhe von 15 mm bearbeitet.

Die Nachbehandlung mittels Kugelstrahlens wurde am ÖGI-Gießereitechnikum mit einer Anlage des Typs Gläser DSK 1000-DT-DOSZ durchgeführt. Als Strahlmittel wurde Kugelgranulat mit einer nominellen Korngröße von 0,3 mm (Verteilung von 0,28 bis 0,43 mm) verwendet. Die Proben wurden jeweils für 30 s in einem Abstand von 8 cm gestrahlt. Um die Intensität der Oberflächenverfestigung charakterisieren zu können,

wurden analog zur Norm AMS 2432 sog. Almen-Blättchen des Typs A mitgestrahlt und anschließend deren Durchbiegung vermessen. Nach ersten Versuchsreihen mit unterschiedlichen Überdeckungen und Abständen wurde der Probenhalter fixiert. Der erreichte Wert von ca. 31 Almen A entspricht typischen Mindestvorgaben für Strahlintensitäten an Gussteilen. Um die erreichten Druckspannungen besser charakterisieren zu können, wurden an einzelnen Proben Eigenspannungsmessungen mithilfe eines Stresstech Xstress 3000 G2 mit einer Cr Ka Strahlenquelle durchgeführt (Spotgröße D = 3 mm, Belichtungsdauer 10 s). Die Eigenspannungstiefenprofile der Proben wurden in unterschiedlichen Messrichtungen axial und quer ermittelt. Ebenso wurde an ausgewählten Proben eine 3D-Oberflächencharakterisierung mithilfe eines Alicona Infinite Focus-Oberflächenprofilometers durchgeführt, um die typischen Rauigkeitskenngrößen zu ermitteln.



**Bild 3:** Flachbiegeproben für zyklische Dauerfestigkeitsversuche: a) im Gusszustand bzw. b) vollflächig bearbeitet und c) für Prüfung bearbeitet.

Die Temperaturleitfähigkeit wurde mit der Laserflash-Methode an einer Netzsch LFA 427-Anlage bestimmt. Dabei wird eine Fläche der Probe (Zylinder mit Durchmesser 12,55 mm, Höhe 3 mm) schlagartig mit einem Laserstrahl erwärmt und die Temperaturentwicklung auf der gegenüberliegenden Seite gemessen. Aus Anstiegszeit und Probendicke wird die Temperaturleitfähigkeit unter Berücksichtigung der thermischen Abstrahlung und Laserpulslänge berechnet.

Der dynamische spannungslose Elastizitätsmodul wird durch Anregung von stehenden Longitudinalwellen im Probestab ermittelt. Die Probe (Zylinder mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 150 mm) liegt auf Saiten in ihren Schwingungsknoten auf. Die Ultraschallanregung erfolgt an einer Stirnfläche mit einem elektromagnetischen Ultraschallgeber. Im Probekörper entstehen longitudinale Wellen, die zur Resonanz abgeglichen werden. An der anderen Stirnfläche wird die Schwingung an einen Aufnehmer übertragen, welcher ein äquivalentes elektrisches Signal erzeugt. Dieses wird verstärkt und elektronisch gezählt. Zur Messung wurde ein Netzsch-Analysator Bode 100 verwendet.

Die thermische Ausdehnung der Proben wurde mit einem Doppelschubstangendilatometer Netzsch 402CD durchgeführt. Dabei wird die Differenz der thermischen Ausdehnung einer Probe (Durchmesser 6 mm, Länge 25 mm) und eines Referenzstabs gemessen.

Die Bestimmung der Oberflächenoxidation in künstlicher Luft wurde mittels TGA durchgeführt. Die gefertigten Proben mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Höhe von 1,5 mm sind hierbei relativ klein.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

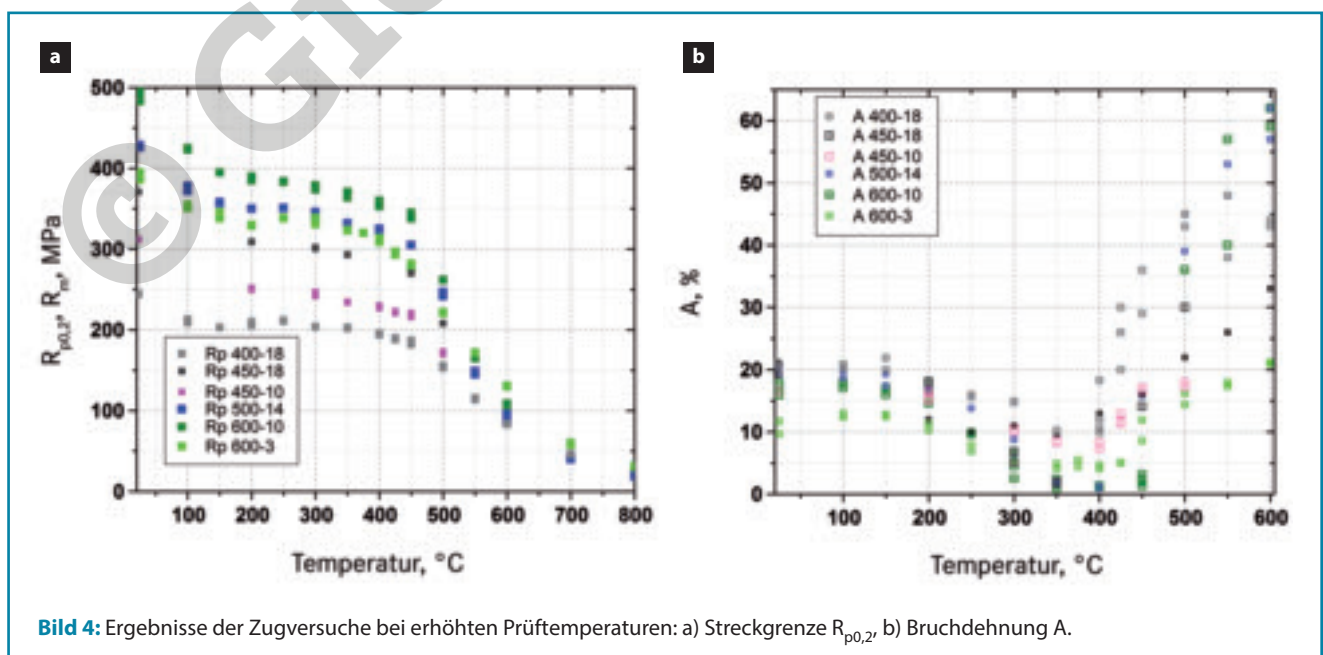
Die durchgeführten Zugversuche bei erhöhten Prüftemperaturen zeigen deutlich, dass sich die sehr hohen statischen Festigkeitskenngrößen bei Raumtemperatur am Beispiel der Streckgrenze  $R_{p0,2}$  zunächst auch hier widerspiegeln (Bild 4a). Allerdings nimmt die Wirkung der Mischkristallverfestigung mit steigender Temperatur deutlich ab, sodass ab Anwendungs-

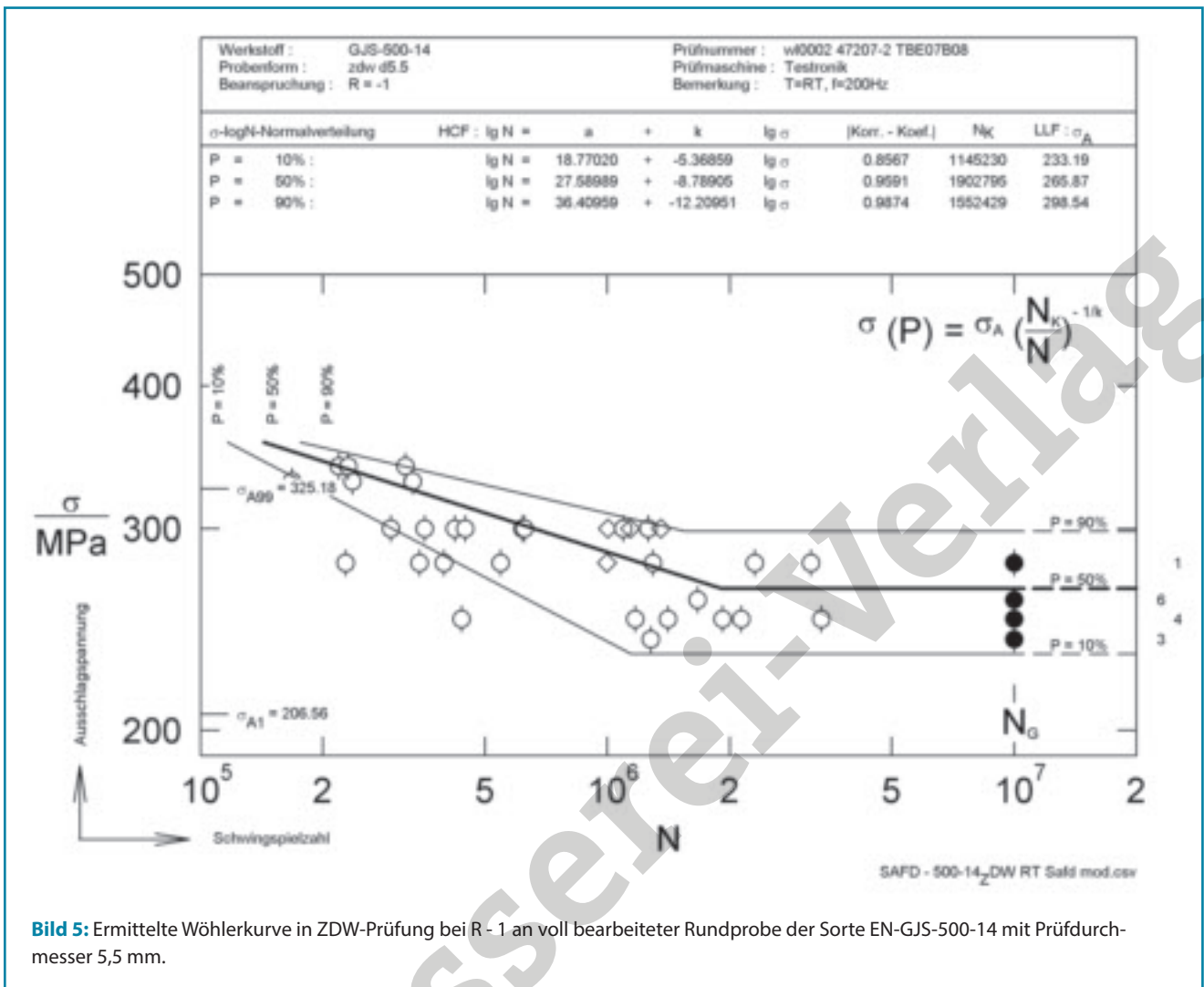
temperaturen von 450 °C und höher kein Vorteil zu den klassisch ferritisch-perlitischen Sorten mehr vorliegt.

Die ermittelten Bruchdehnungen zeigen ein ähnliches Bild. Auch die neuen Si-Mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten weisen ein ausgeprägtes Dehnungsminimum im Temperaturbereich zwischen 350 und 450 °C auf (Bild 4b) und limitieren so die konstruktiv dauerhaft sinnvolle Anwendungstemperatur der unlegierten GJS-Sorten. Es liegt nahe, dass die Hintergründe und möglichen Abhilfemaßnahmen analog zu den bisher untersuchten GJS-Sorten zu finden sind [16]. Erhöhte Phosphoranteile bei korrekt eingestellten Mg/P-Verhältnissen verbessern die Bruchdehnung in diesem Temperaturbereich.

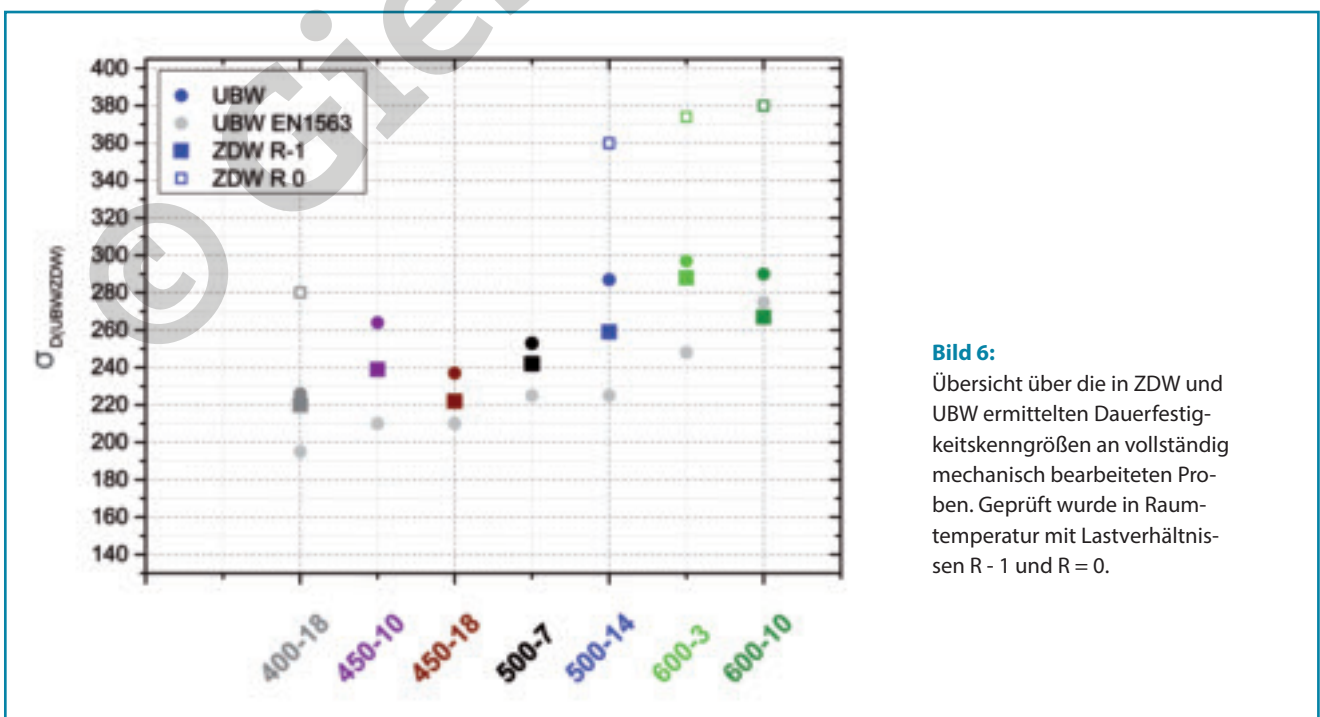
Für die konstruktive Auslegung von Hochleistungsgussteilen in Anwendungsfällen mit relativ konstanten Temperaturbereichen und ohne signifikante Dehnungsbehinderungen sind Dauerfestigkeitskennwerte von großer Bedeutung. Die Si-mischkristallverfestigten GJS-Sorten können hier den aus statischen Prüfungen bekannten Festigkeitsvorteil sehr gut in zyklische Kenngrößen übertragen. Bild 5 zeigt hier exemplarisch eine ermittelte Wöhlerkurve bei RT an voll bearbeiteten Rundproben ohne Kerbe gem. DIN 50500 der Sorte EN-GJS-500-14. Auffallend ist die für homogene Gusswerkstoffe mit gut polierten Probekörperoberflächen typische geringe Streubandbreite im HCF-Bereich (High Cycle Fatigue). Die bereits in den statischen Zugversuchen und Bruchflächenanalysen hinreichend gezeigten evidenten Versprödungsvorgänge bereits bei Si-Anteilen über 4,0 % lassen auch die Dauerfestigkeitskennwerte der Sorte EN-GJS-600-10 nur mehr geringfügig höher ausfallen als bei EN-GJS-500-14, wie die vergleichende Zusammenfassung der ermittelten Dauerfestigkeitskennwerte in Bild 6 zeigt.

In weiterer Folge wurde in Anlehnung an frühere Arbeiten von W. Bauer [17, 18] der Einfluss von Oberflächenverfestigungen auf das Dauerfestigkeitsverhalten der Si-mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten untersucht. Verglichen wurden auf Wunsch der am FFG-Projekt teilnehmenden Projektpartner aus der Gießerei-Industrie die Sorten EN-GJS-500-7 und EN-GJS-500-14 [19]. Bild 7 zeigt typische Oberflächenprofile der Proben vor und nach dem Kugelstrahlen mit Almen A 31. Obwohl hier eine

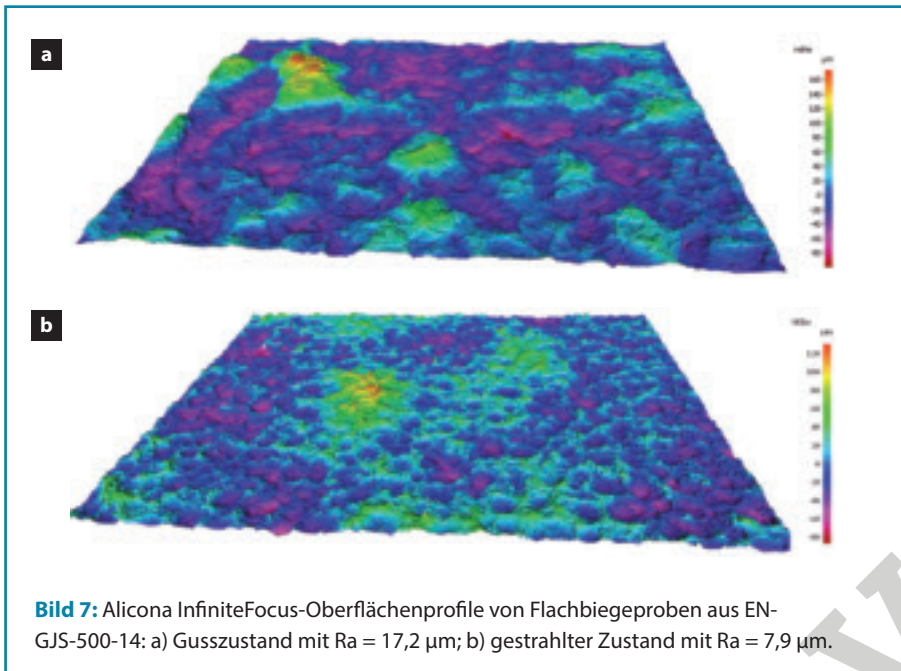




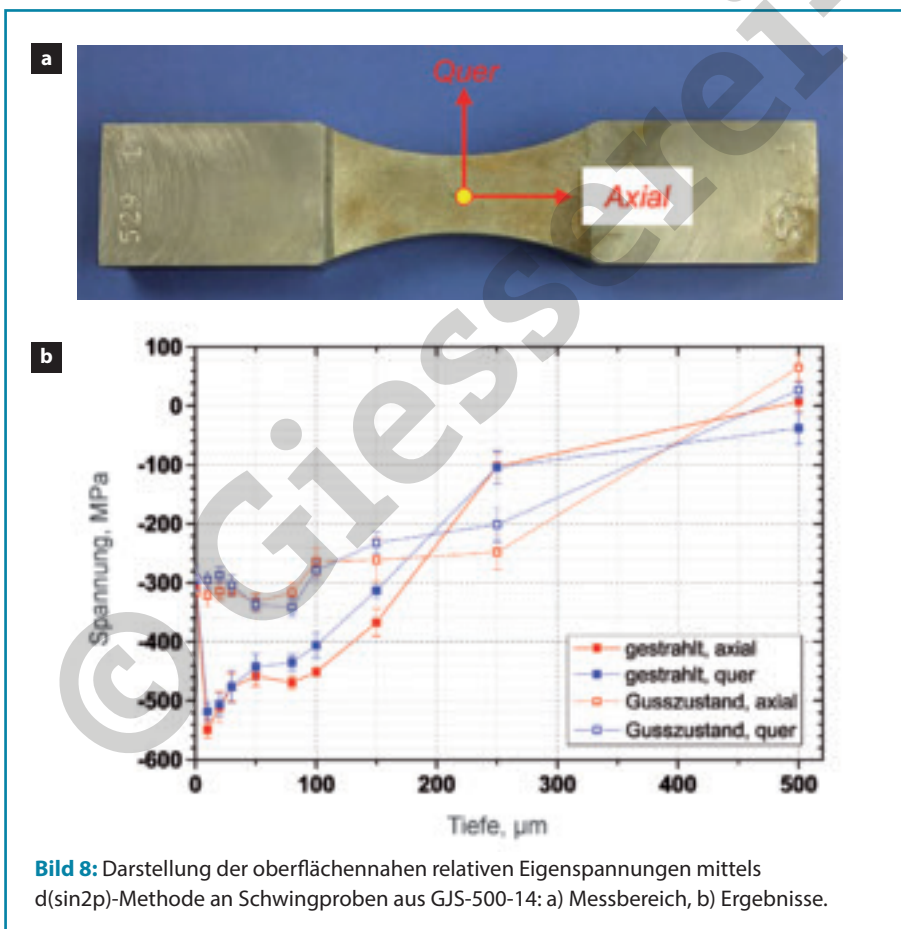
**Bild 5:** Ermittelte Wöhlerkurve in ZDW-Prüfung bei R = -1 an voll bearbeiteter Rundprobe der Sorte EN-GJS-500-14 mit Prüfdurchmesser 5,5 mm.



**Bild 6:** Übersicht über die in ZDW und UBW ermittelten Dauerfestigkeitskenngrößen an vollständig mechanisch bearbeiteten Proben. Geprüft wurde in Raumtemperatur mit Lastverhältnissen R = -1 und R = 0.



**Bild 7:** Alicona InfiniteFocus-Oberflächenprofile von Flachbiegeproben aus EN-GJS-500-14: a) Gusszustand mit  $R_a = 17,2 \mu\text{m}$ ; b) gestrahlter Zustand mit  $R_a = 7,9 \mu\text{m}$ .



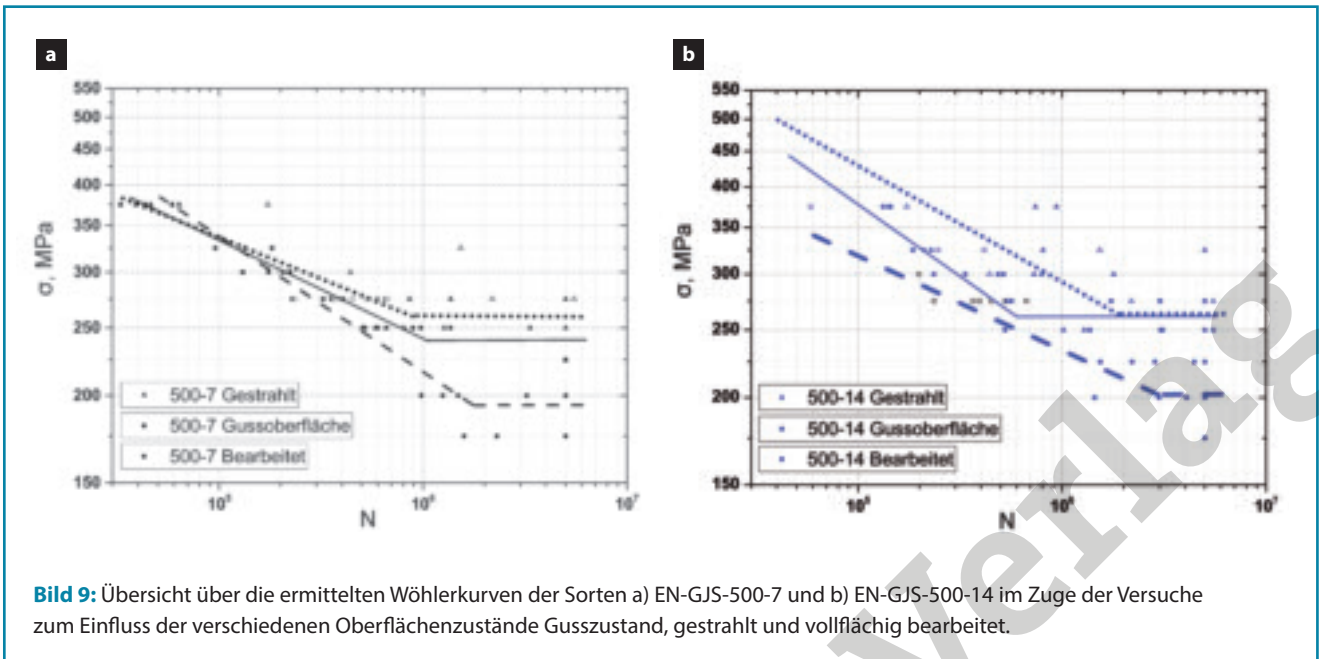
**Bild 8:** Darstellung der oberflächennahen relativen Eigenspannungen mittels  $d(\sin 2\psi)$ -Methode an Schwingproben aus GJS-500-14: a) Messbereich, b) Ergebnisse.

deutliche Einebnung der gestrahlten Oberfläche erkennbar ist, so sind die in Anlehnung an industrielle Einstellungen durchgeführten Versuche eventuell hinsichtlich Überdeckungsgrad und Homogenität noch weiter verbesserbar. Dennoch wurde über Querversuche die Reproduzierbarkeit innerhalb der Ver-

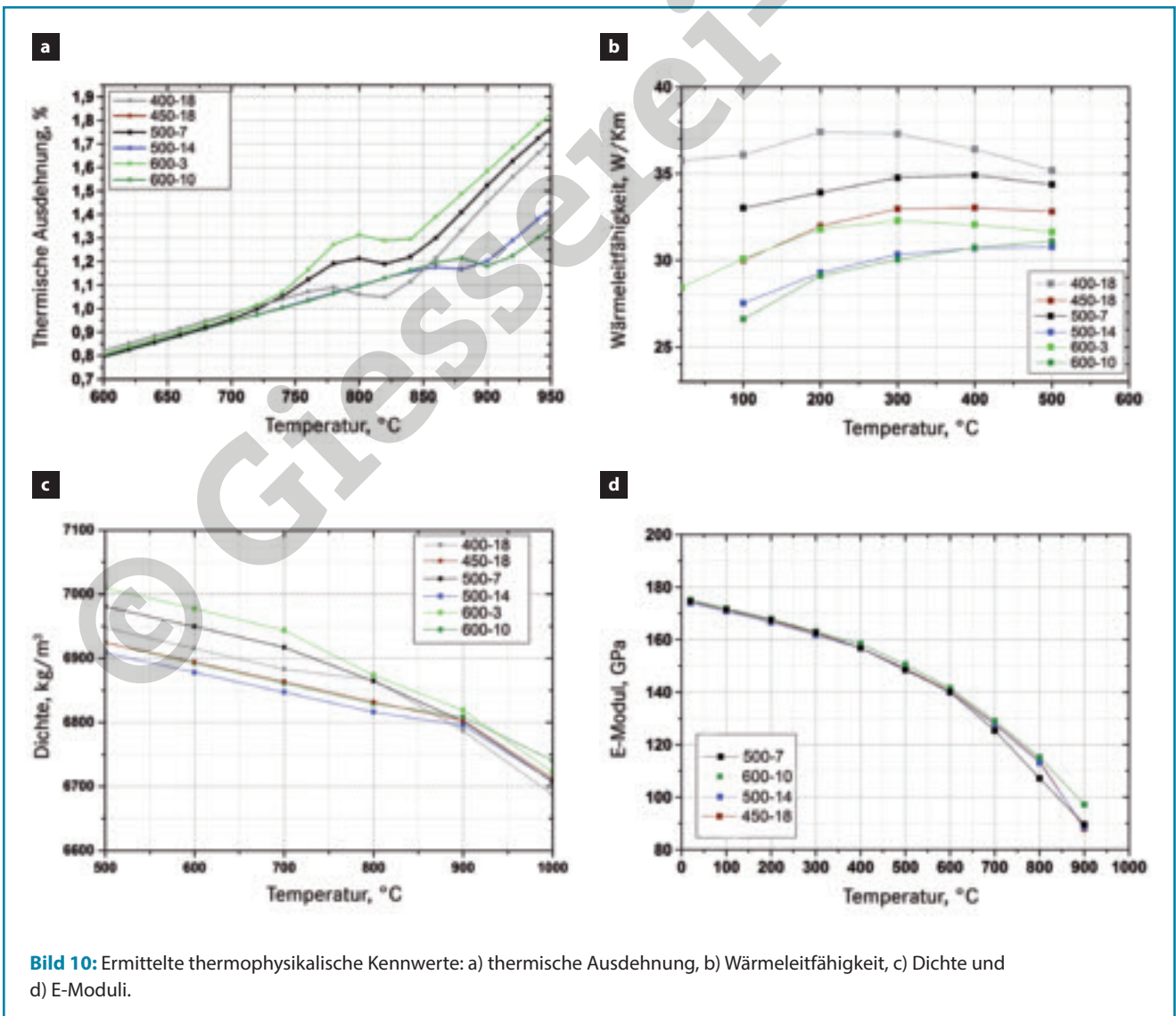
suchen sichergestellt. Das Kugelstrahlen führt über die Oberflächenverfestigung zum Eintrag von signifikanten Druckeigenspannungen bis in eine Wirtiefe von etwa  $300 \mu\text{m}$  (Bild 8).

Allgemein konnte gut gezeigt werden, dass der Einfluss der Gussoberflächen die Dauerfestigkeiten stark absenkt (Bild 9). Gleichermaßen steigt aufgrund der hohen Beeinflussung von Rissinitiierung und Rissfortschritt durch Oberflächenfehler, Einschlüsse und dergleichen auch die Streuung der Ergebnisse. Die durch Kugelstrahlen erzeugte Oberflächenverfestigung verbessert das Dauerfestigkeitsniveau deutlich und erhöht dieses wieder auf das Niveau der voll bearbeiteten Proben oder sogar leicht darüber. Dies gilt für beide geprüften Sorten gleichermaßen, allerdings verhält sich hier die Sorte EN-GJS-500-14 durch die bereits vorhandenen intrinsischen Eigenspannungen aufgrund der Si-Mischkristallverfestigung etwas schlechter als die Referenzsorte EN-GJS-500-7. Anhand der in Tabelle 2 gezeigten P50-Dauerfestigkeitskennwerten ist gut erkennbar, dass die Sorte EN-GJS-500-7 im gestrahlten Zustand sogar leicht höhere Dauerfestigkeitskennwerte als im voll bearbeiteten Zustand aufweist, während die Sorte EN-GJS-500-14 leicht unterhalb dieses Niveaus zu liegen kommt. Dennoch skalieren diese Dauerfestigkeitskenngrößen auch gut mit den ermittelten Werkstoffkenngrößen an voll bearbeiteten Proben im ZDW-Versuch (Bild 6).

Für die Verwendung der neuen EN-GJS-Normsorten sind im Anwendungsfall auch die genauen thermophysikalischen Kennwerte relevant, die aufgrund der Si-Mischkristallverfestigung von den bisherigen Kenngrößen abweichen können. Bild 10a zeigt die bestimmten thermischen Ausdehnungen der Proben, während in den Bildern 10b bis 10d die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten, die Dichte der Proben sowie die E-Moduli über der Temperatur dargestellt sind. Die Werte skalieren sehr gut mit der untersuchten Ausbildung der Grundmatrix (ferritisch, ferritisch-perlitisch, perlitisch bzw. ferritisch-mischkristallverfestigt). Ergebnisse der Sorten EN-GJS-450-18 und EN-GJS-500-7 stammen aus dem Cornet-Projekt „Siron“ und werden zu Referenzzwecken gezeigt. Die thermischen Aus-



**Bild 9:** Übersicht über die ermittelten Wöhlerkurven der Sorten a) EN-GJS-500-7 und b) EN-GJS-500-14 im Zuge der Versuche zum Einfluss der verschiedenen Oberflächenzustände Gusszustand, gestrahlt und vollflächig bearbeitet.



**Bild 10:** Ermittelte thermophysikalische Kennwerte: a) thermische Ausdehnung, b) Wärmeleitfähigkeit, c) Dichte und d) E-Moduli.

**Table 2:** Gefügeabhängige Biegewechselfestigkeit ( $P_{0.5}$  = 50 %) von Gusseisen mit Kugelgraphit in Abhängigkeit des Oberflächenzustandes.

Sorte EN-GJS-	500-7	500-14
Vollständig bearbeitet	239	269
Rohzustand (Gusshaut)	191	201
Kugelgestrahlt	259	260

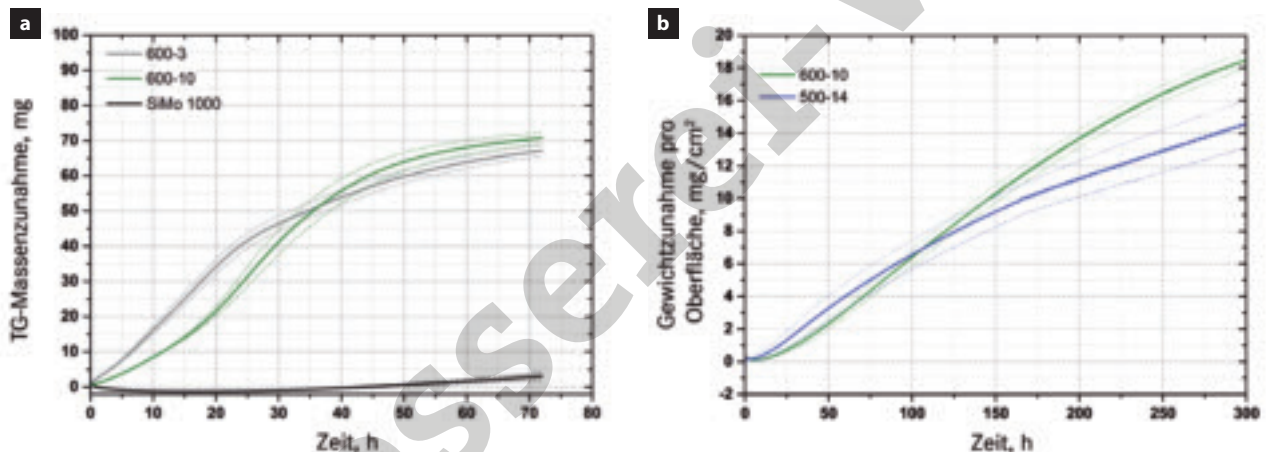
dehnungen zeigen sehr gut die Verschiebung der Umwandlungstemperaturen mit steigender Si-Mischkristallverfestigung auf. Auch die Wärmeleitfähigkeitskenngrößen sinken deutlich mit steigenden Si-Anteilen, während sich Dichte und E-Moduli nur gering bzw. kaum unterscheiden.

In weiterer Folge wurde das Oxidationsverhalten der neuen GJS-Sorten im Vergleich zur Referenz GJS-SiMo1000 (GF) ermittelt. Hierzu wurde seitens GF Herzogenburg eine Y2-Pro-

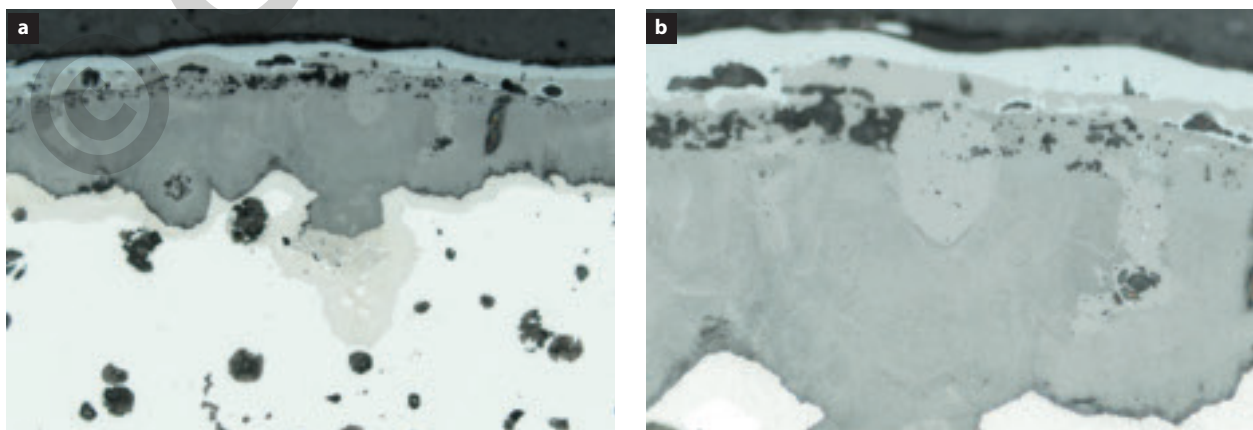
be zur Verfügung gestellt. Die Langzeitversuche wurden mittels TGA in künstlicher Luftatmosphäre bei 700 °C durchgeführt (Bild 11a). Neben den deutlich unterschiedlichen Massenzunahmen von den beiden SiMo-Sorten ist auffallend, dass sich die TG-Massenzunahmen der Sorten EN-GJS-600-3 und EN-GJS-600-10 ab einer Zeitdauer von ca. 40 h kaum unterschieden. Bild 11a zeigt hier jeweils Streuungen und Mittelwerte

aus 3 Messungen. Dies bestätigt bekannte Untersuchungen, dass der Silizium-Anteil im Grundgefüge die Oberflächenoxidation nur in geringem Ausmaß beeinflusst.

Ähnliche Ergebnisse konnten aus Vergleichsversuchen zwischen EN-GJS-500-14 und EN-GJS-600-10 bei Auslagerungen von 300 h bei 600 °C gewonnen werden (Bild 11b). Die starke Oxidationsschichtbildung der Proben ist exemplarisch am Querschnitt der Probe EN-GJS-600-10 nach Versuchsende in Bild 12



**Bild 11:** Oxidationsverhalten verschiedener GJS-Sorten bei: a) 700 °C für 70 h; b) 600 °C für 300 h in künstl. Luft; zu beachten sind die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achse.



**Bild 12:** Lichtmikroskopisches Querschliffbild einer EN-GJS-600-10-Probe nach 300 h bei 600 °C in künstl. Luft in: a) 200-facher und b) 500-facher Vergrößerung.



gezeigt, die ausgewerteten Schichtdicken für beide Versuche sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

Wie bereits kurz umrissen, ist der Einsatz weiterer mischkristallverfestigender Elemente, die gute Löslichkeiten mit Eisen aufweisen, zusätzlich oder als unmittelbarer Ersatz von Si in den Si-Mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten vielversprechend. Daher wurden in den letzten Jahren vermehrt Forschungsschwerpunkte in diese Richtung gesetzt, die auch am ÖGI in einigen Versuchsreihen umgesetzt wurden. Hierbei wurden die Elemente Mangan, Kupfer, Molybdän, Nickel und Kobalt jeweils einzeln zu den Normsorten EN-GJS-500-14 sowie EN-600-10 bzw. zu Sorten mit definierten Si-Gehalten zulegiert und die Auswirkungen in Gefüguuntersuchungen und Raumtemperatur-Zugversuchen ermittelt [20].

Mn zeigt bis zu einem Gehalt von 1,5 % positive, also höhere Festigkeitseigenschaften, allerdings bei Überschreiten dieser Anteile verstärkte Perlitbildung (siehe **Bild 13**). Kupfer wirkt bis zu einem Gehalt von 0,7 % verfestigend, bevor ebenfalls verstärkte Perlitbildung beobachtet werden kann. Molybdän kann bis zu einem Gehalt von 0,4 % positiv auf die Festigkeitseigenschaften wirken, allerdings können immer einige Korngrenzkarbide und bei steigenden Mo-Anteilen auch ein erhöh-

**Tabelle 3:** Auswertung von Oxidschichtdicken nach TGA-Auslagerungsversuchen.

700 °C, 70 h		600 °C, 300 h	
Sorte EN-GJS-	Oxidschicht, µm	Sorte EN-GJS-	Oxidschicht, µm
SiMo-1000	30	-	-
600-3	95	500-14	143
600-10	100	600-10	163

ter Perlitgehalt im Gefüge nachgewiesen werden. Nickel wirkt bis zu einem Anteil von ca. 1,0 % positiv, Kobalt hat stark positive Auswirkungen auf die Festigkeiten bei Anteilen von 1,0 bis 2,0 % [21]. Wie bereits erwähnt, können auch erhöhte Phosphoranteile bei korrekt eingestellten Mg/P-Verhältnissen zu deutlich verbesserten Bruchdehnungen bei erhöhten Anwendungstemperaturen im Bereich von 350 bis 450 °C führen. Praxisnahe Untersuchungen der Einflüsse dieser Optimierungen auf bauteilnahe Eigenschaften wie Dauerfestigkeiten stehen allerdings noch aus.

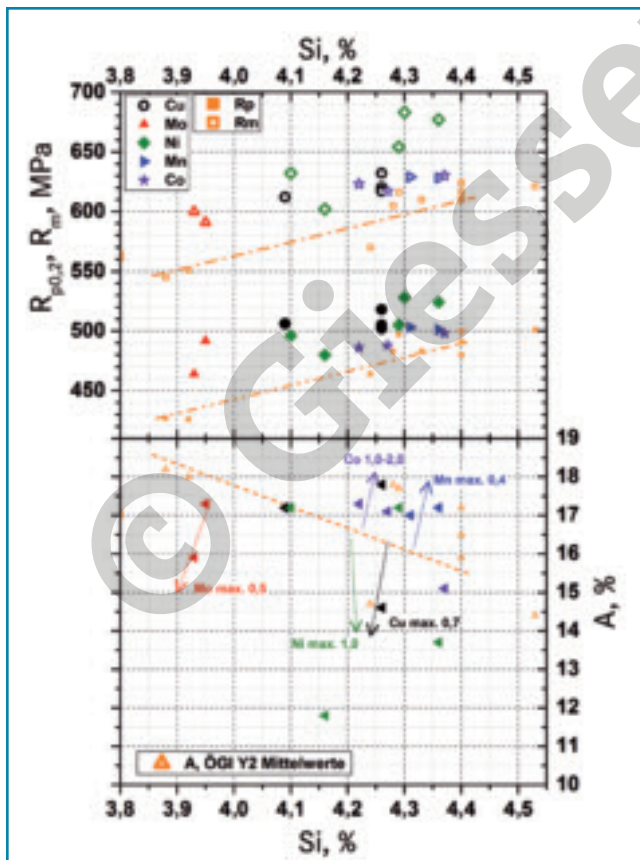
Als nächster Schritt müssen diese Legierungskonzepte in Kombination in ihren Möglichkeiten evaluiert werden. Hierzu wurden bereits erste, sehr vielversprechende Versuche gestartet [22].

#### 4 Zusammenfassung und Fazit

Si-mischkristallverfestigte Gusseisen zeigen sehr gute mechanische Eigenschaften, die sich auch in den Zugversuchen bei erhöhten Prüftemperaturen fortsetzen. Allerdings weisen diese neuen EN-GJS-Normsorten ähnliche Einschränkungen auf: die Streckgrenzen und Zugfestigkeiten nehmen bei Temperaturen oberhalb 350 °C signifikant ab, und die Bruchdehnung zeigt analog zu den konventionellen ferritisch-perlitischen EN-GJS-Sorten ein ausgeprägtes Dehnungsminimum zwischen Temperaturen von 350 bis 450 °C, die die mögliche Anwendung limitieren können.

Die in Zug-Druck-Wechselbelastung als auch die in Umlaufbiegeversuchen ermittelten Dauerfestigkeiten sind sehr hoch und skalieren ebenso mit dem Anteil an Silizium. Allerdings kann eine Sättigung beobachtet werden. Die Sorte EN-GJS-600-10 zeigt nur mehr geringfügige bzw. belastungsabhängige Steigerungen im Vergleich zur Sorte EN-GJS-500-14.

Vier-Punkt-Biegeversuche an speziellen Probengeometrien zeigen sehr gut die Einflüsse der Gussflächen auf die erzielbaren Dauerfestigkeitskennwerte auf. Weiterhin können auch bei den Si-Mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten analog zu den bekannten Ergebnissen an ferritisch-perlitischen Sorten derartige fehlerbehaftete Oberflächen mittels Kugelstrahlen verfestigt werden. Die durch Kugelstrahlen erzeugte Oberflächenverfestigung verbessert das Dauerfestigkeitsniveau deutlich und erhöht dieses wieder auf das Niveau der voll bearbeiteten Proben oder sogar leicht darüber. Dies gilt für beide geprüften Sorten gleichermaßen, allerdings verhält sich hier die Si-mischkristallverfestigte Sorte EN-GJS-500-14 durch die bereits vorhandenen intrinsischen Eigenspannungen aufgrund der Si-Mischkristallverfestigung etwas schlechter als die Referenzsorte EN-GJS-500-7.



**Bild 13:** Einfluss von zusätzlichen Legierungselementen auf: a) Streckgrenze  $R_{p0,2}$  und Zugfestigkeit  $R_m$ ; b) Bruchdehnung  $A$  bei Raumtemperatur.

Die ermittelten thermophysikalischen Kennwerte der Si-mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten sind in puncto thermische Ausdehnung und Wärmeleitfähigkeit etwas geringer als bei den konventionellen ferritisch-perlitischen Sorten. Allerdings müssen gegebenenfalls die veränderten Umwandlungstemperaturen bzw. Umwandlungsbereiche aufgrund der hohen Si-Anteile berücksichtigt werden. Die gemessenen Dichten und E-Moduli zeigen nur sehr geringe Unterschiede.

In TGA-Auslagerungsversuchen konnte kurz umrissen werden, dass die Verzunderungsbeständigkeit der Si-mischkristallverfestigten EN-GJS-Sorten sehr ähnlich zu den bekannten ferritisch-perlitischen Sorten ausgeprägt ist.

Schlussendlich wurden in ersten Versuchsreihen anhand von Zugversuchen die möglichen Potenziale von Legierungselementen in Addition oder Substitution zu Silizium erörtert, da diese Verfestigung auch gewisse Toleranzen der Elementzugaben ohne Gefügeveränderungen gestattet.

Klassische verfestigende Elemente wie Mangan zeigten bis zu einem Gehalt von 1,5 % positive, also höhere Festigkeitseigenschaften, allerdings bei Überschreiten dieser Anteile verstärkte Perlitbildung. Auch Kupfer wirkt bis zu einem Gehalt von 0,7 % verfestigend, bevor ebenfalls verstärkte Perlitbildung beobachtet werden kann. Molybdän kann bis zu einem Gehalt von 0,4 % zugegeben werden, allerdings beeinträchtigen immer einige Korngrenzkarbide die Bruchdehnungen.

Nickel wirkt bis zu einem Anteil von ca. 1,0 % positiv, Kobalt hat stark positive Auswirkungen auf die Festigkeiten bei Anteilen von 1,0 bis 2,0 % [21, 22]. Wie bereits erwähnt, können auch erhöhte Phosphoranteile bei korrekt eingestellten Mg/P-Verhältnissen zu deutlich verbesserten Bruchdehnungen bei erhöhten Anwendungstemperaturen im Bereich von 350 bis 450 °C führen. Praxisnahe Untersuchungen der Einflüsse dieser Optimierungen auf bauteilnahe Eigenschaften wie Dauereigenschaften stehen allerdings noch aus.

Der Großteil der vorgestellten Arbeiten entstand im Zuge des geförderten FFG-Projekts „Gusseisen mit verbesserten Eigenschaften durch hohe Si-Gehalte –EsiCast“, Projekt Nummer 854398, unter Beteiligung von Industriepartnern, wofür herzlich gedankt wird. Ein Dank gilt Prof. F. Hofer, Dr. Ch. Gspan und Herrn Ing. H. Schröttner vom ZFE – Zentrum für Elektronenmikroskopie in Graz,

Gert Gassner, während der Projektlaufzeit ÖGI – Österreichisches Gießerei Institut, Leoben, Österreich, seit Juli 2017 Maschinenfabrik Liezen und Giesserei GmbH, Liezen, Österreich, Dipl.-Ing. Eduard Koppensteiner, Dipl.-Ing. Lena Glavanovic und Dipl.-Ing. Gerhard Schindlbacher, ÖGI – Österreichisches Gießerei Institut, Leoben, Österreich, Prof. Dr.-Ing. Peter Schumacher, ÖGI – Österreichisches Gießerei Institut, Leoben, Österreich/Lehrstuhl für Gießereikunde, Montanuniversität, Leoben, Österreich.

## Literatur

- [1] DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gusseisen mit Kugelgraphit, 2012.
- [2] Larker, R.: Proc. of Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2008.
- [3] Björkegren, L. E.; Hamberg, K.: Proc. of Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2003.
- [4] Reynolds, C. F. u. a.: Transactions of the American Foundrymens Soc., 1952.
- [5] Lacy, C. E.; Gensamer, M.: Transactions of the American Foundrymens Soc., 1944.
- [6] Kikkert, J.: Tagungsband zum Deutschen Gießereitag, 2009.
- [7] H. Löblich, W. Stets: Giesserei 99 (2012), [Nr. 4], S. 28.
- [8] Giesserei 101 (2014), [Nr. 9], S. 70.
- [9] Stets, W.; Löblich, H.; Gassner, G.; Schumacher, P.: Proc. of Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2014.
- [10] Weiss, P.; Brachmann, J.; Bührig-Polaczek, A.; Fischer, S. F.: Mat. Scie. Technol. 31 (2015), [Nr. 12].
- [11] Metallurgical and Materials Transactions A39 (2008), [Nr. 2], S. 252.
- [12] Weiss, P.; Tekavcic, A.; Bührig-Polaczek, A.: Mat. Scie. Eng. A713 (2018).
- [13] Gassner, G.; Danesh, R.; Michel, D.; Schumacher, P.: Vortrag beim Österr. Gießereitag 2016.
- [14] Mat. Scie. Eng. A 212 (1996), [Nr. 1], S. 62.
- [15] Giesserei 104 (2017), [Nr. 7], S. 40.
- [16] Key Eng. Mat. 457 (2011), S. 428-432.
- [17] Bauer, W.: Konstruieren und Gießen 26 (2001), [Nr. 4].
- [18] Bauer, W.: Gießereiforschung 53 (2001), [Nr. 4].
- [19] Danesh, R.: Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2016.
- [20] Michel, D.: Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2016.
- [21] Giesserei 104 (2017), [Nr. 6], S. 38.
- [22] Riebisch, M.; Frieß, J.; Pustal, B.; Weiss, P.; Kutz, A.; Bührig-Polaczek, A.: Vortrag im Rahmen der 11. Bayerischen Barbara-Tagung, 15.12.2016.