



## Transfertagung „Leichtbau mit GJS-Si-Werkstoffen“

Die Teilnehmer der FVG-Transfertagung diskutierten sowohl aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zu GJS-Si-Werkstoffen als auch bestehende Fördermöglichkeiten.

Thematischer Schwerpunkt der ersten Transfertagung der Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V. (FVG) waren die mischkristallverfestigten Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit (GJS), die seit etwa 2000 auf dem Markt verfügbar sind. Organisiert wurde sie von der FVG gemeinschaftlich mit dem BDG-Fachausschuss „Konstruieren in Guss“. Viele der mehr als 50 Teilnehmer aus Gießereien und Forschungseinrichtungen kannten sich bereits, denn sie haben in den laufenden und vorhergehenden Forschungsvorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) zu diesem Thema zusammengearbeitet.

Der Termin der Transfertagung wurde mit dem 27. Juni 2018 bewusst gewählt, denn das IGF-Projekt „Schädigungspotenzial GJS-Si“ wurde als letztes von drei thematisch aneinander anschließenden Forschungsvorhaben abgeschlossen. Die Vorgängerprojekte wurden Mitte 2017 bzw. Ende 2017 abgeschlossen. Anfang 2018 ist ein Anschlussvorhaben angelaufen und ein weiterer stand zum Zeitpunkt der Tagung gewissermaßen in den Startlöchern.

Im Bereich der Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit sind in den letzten Jahren international verschiedene Forschungsaktivitäten durchgeführt worden. Dennoch sind noch längst nicht alle Fragen geklärt, oder es wurden auch neue Fragen aufgeworfen, beispielsweise zur Zähigkeit dieser Werkstoffgruppe. Dies wurde zu einem kritischen Resümee darüber genutzt, welche Ergebnisse in den vorhergehenden Forschungsvorhaben erzielt und bereits in die Praxis umgesetzt wur-

den. Zum anderen sollte analysiert werden, ob noch Wissenslücken bestehen und gegebenenfalls mit dieser Tagung der Weg für Folgeforschungsvorhaben bereitet werden.

### Ergebnistransfer in die Praxis

Die IGF-Anwendungsforschung ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Industrie (BMWi) gefördertes, wettbewerblesches Programm, das seit

1954 vor allem dem deutschen Mittelstand zu Gute kommt. Heute sind mehr als 50 000 KMU über die 100 Forschungsvereinigungen in dieses Netzwerk eingebunden.

Die Mitarbeit großer Unternehmen in den Forschungsvorhaben ist gewünscht, um den Erfahrungsaustausch mit den KMU zu fördern. „Vorwettbewerblichkeit“ meint, dass Aufgabenstellungen bearbeitet werden, die für eine größere Zahl von Unternehmen interessant sind – und nicht zur Erarbeitung eines Wettbewerbsvorteils für einzelne Unternehmen dient. Die IGF-Forschung wurde aktuell kartellrechtlich geprüft und ist unbedenklich.

Wirtschaftsminister Peter Altmaier regte eine „Transfer-Initiative“ in der Forschung an – hier ist sie: Der Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis ist ein wesentliches Element der IGF-Forschung, deren Vorhaben auch einen hohen wissenschaftlichen Anspruch haben. Am Ende jedes Vorhabens stehen Validierungsversuche, um die Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis zu erproben. Die Ergebnisse werden veröffentlicht, z.B. in der GIESSEREI.

Neben der IGF-Forschung gibt es weitere Programme, die Michael Krause, Geschäftsführer der IGF, gern erläuterte (Bild 1). Beim Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) zum Beispiel, arbeitet eine Forschungsstelle mit einem KMU-Unternehmen zusammen. Hier geht es vor allem um Produkte, die kurz vor der Markteinführung stehen. Das Unternehmen bringt Eigenmittel ein, die Ergebnisse unterliegen keiner breiten Veröffentlichungspflicht – nur einer Berichtspflicht gegenüber dem Fördermittelgeber. Krause nannte auch die binationalen CORNET-Projekte, bei denen es übrigens noch Potenzial für weitere Anträge gibt. Interessant könnte auch die Initiative „Start-up trifft den Mittelstand“ sein. Näheres zu diesen Programmen lässt sich auf der Homepage des BMWi nachlesen.

Damit das Forschungsnetzwerk des Mittelstands (AiF) weiterhin ein Erfolg bleibt, sind konstante Fördermittel erforderlich. Dr. Ingo Steller von der FVG wies darauf hin, dass sich zurzeit 169 Mio. Euro im IGF-Fördertopf befinden. Die 100 AiF-Forschungsvereinigungen reichen jährlich rund 1000 Projektanträge ein, von denen zuletzt rund 50 % eine Förderung erhielten. Verglichen mit anderen Programmen – man denke an Horizont 2020 – ist dies eine gute Förderquote! Angesichts der hohen Antragszahlen wäre die kurzfristige Aufstockung des Fördertopfs auf 200 Mio. Euro wünschenswert.

### Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V. (FVG)

Die Aktivitäten der FVG umfassen

- > Feststellen und Aufgreifen von Themen mit Forschungsbedarf für die Gießereibranche aus den BDG-Fachausschüssen (Eisen-, Stahl-, NE-Metallguss),
- > Vermitteln von Forschungseinrichtungen mit passenden Schwerpunkten,
- > Vermitteln von interessierten Unternehmen (vorrangig BDG-Mitgliedsunternehmen: Gießereien und Zulieferer) in die projektbegleitenden Ausschüsse (PbA),
- > Unterstützung von jährlich 12–15 laufenden Forschungsvorhaben mit einem Fördervolumen von 1,5 Mio. Euro.

Die Aufgaben der FVG liegen insbesondere in

- > der Antragsberatung,
- > der Abwicklung,
- > dem Controlling,
- > dem Berichtswesen und
- > der Verantwortung gegenüber dem Fördermittelgeber.

Die Ergebnisse

- > sind nutzbar für viele Unternehmen der Branche (vorwettbewerblich) und
- > dienen dem Ergebnistransfer in die Wirtschaft (Gießereien).



FOTO: DARIUS SÖSCHINSKI/BDG

**Bild 1:** Michael Krause, Geschäftsführer der IGF, erläuterte unterschiedliche Förderprogramme zum Forschungstransfer in die Praxis.

### Eröffnung

Herr Stefan Buchholz, Geschäftsführer der Fa. Buchholz & Cie., Zweibrücken, eröffnete die Tagung. Sein Unternehmen ist ein klassischer Mittelstandsbetrieb und reagiert flexibel auf Bestellungen von kleinen Serien. Die mischkristallverfestigten GJS-Werkstoffe erweitern sein Werkstoff-Portfolio, seit er an verschiedenen IGF-Forschungsvorhaben mitgearbeitet hat. Diese hat er durch Versuchsschmelzen in seiner Gießerei sowie durch Hinweise in den Projektsitzungen unterstützt. Gleichzeitig ist Buchholz Leiter des BDG-Fachausschusses „Konstruieren in Guss“, der sich mit technischen Argumenten zur Vermarktung der (Ei-

sen-) Gusswerkstoffe beschäftigt und Input für Regelwerke generiert.

### GJS-Si-Werkstoffe

Die Mischkristallverfestigung wird in der Stahlindustrie schon lange genutzt. Dabei besetzen Legierungsatome reguläre Plätze im Kristallgitter und sorgen so für leichte Verzerrungen, welche die Versetzungsbewegung erschweren und den Werkstoff verfestigen. Dies steigert die statischen mechanischen Kennwerte, senkt aber auch die Bruchdehnung. Auch Gusseisenwerkstoffe werden schon seit langem legiert, doch das Konzept der Mischkristallverfestigung wurde erst mit den Silizium legierten Werkstoffsorten publik gemacht.



FOTO: GF CASTING SOLUTIONS

**Bild 2:** Prüfstand für schlagartige Belastung von Bauteilen und Proben bei GF Casting Solutions.

Die „mischkristallverfestigten“ GJS-Werkstoffe werden höher mit Silizium legiert, so beispielsweise die in Schweden vor rund 20 Jahren propagierten Werkstoffe. Wenig später gab es andere Entwicklungen, worunter „SiBoDur“ von Georg Fischer zu den bekanntesten zählt. Auch bei anderen Werkstoffen (GJL, GJV, ADI) wurde eine Mischkristallverfestigung untersucht. Aktuell wird die Substitution des Siliziums durch andere den Mischkristall verfestigende Elemente erforscht.

### Publikationen

Das Legieren mit Silizium wurde schon in früheren Arbeiten ausgelotet, doch erst mit den Untersuchungen von L.-E. Björkegren und K. Hamberg Mitte der 1990er Jahre und den entsprechenden Anwendungen in der Automobilindustrie wurden die Gießereifachleute auf das Potenzial

der Si-legierten Werkstoffe aufmerksam. Propagiert wurde zunächst der Werkstoff GJS-500-10 (bis dahin war in der EN 1563 nur der EN-GJS-500-7 festgeschrieben). Weitere internationale Veröffentlichungen folgten, auch zum Potenzial von mischkristallverfestigtem ADI. Zahlreiche ab 2012 folgende Veröffentlichungen in der deutschsprachigen Fachliteratur stellen die Ergebnisse aus abgeschlossenen öffentlich geförderten Forschungsvorhaben dar; eine weiterführende Auflistung relevanter Literatur findet sich am Ende dieses Beitrags.

### Wichtigste Erkenntnisse, Stand der Technik

Durch Legieren mit Silizium lässt sich die Zunderbeständigkeit verbessern, was – einschließlich dem Zulegieren von Molybdän – zu den begrenzt warmfesten

SiMo-Werkstoffen führte. Dies geht auf Arbeiten aus den 1960er und 1970er Jahren zurück.

Dass sich durch höheres Legieren mit Silizium die Bruchdehnung steigern lässt, wobei das vollferritische Gefüge erhalten bleibt und die Zerspanbarkeit nicht beeinträchtigt wird, war vermutlich teilweise klar, wurde aber durch Björkegren und Hamberg herausgearbeitet. Die einphasige Matrix verringert auch die Streuung der Eigenschaften, verglichen mit EN-GJS-500-7 mit einer ferritisch-perlitischen Matrix. Später wurde dieser Effekt auch bei GJL und GJV bestätigt. Gleichzeitig war bereits 2003 klar, dass die Sprödbbruch-Übergangstemperatur ansteigt und der Werkstoff sich weniger duktil verhält als beispielsweise EN-GJS-400-15.

Die bruchmechanischen Kennwerte wurden bereits von Björkegren u.a. untersucht (zunächst ohne Angabe des Gefüges) und später im Rahmen einer Werkstoff-Einzelzulassung ermittelt (2012). Um 2012 wurde auch klar, dass es einen praktischen Grenzgehalt gibt (etwa 4,3 % Si), oberhalb dessen der Werkstoff stärker versprödet. Dieser Richtwert diente bereits für metallurgische Optimierungsarbeiten, obwohl der zugrundeliegende Mechanismus erst 2017 aufgeklärt wurde.

Fließigenschaften und Lunkerverhalten wurden untersucht, ergaben aber teils widersprüchliche Ergebnisse und werden aktuell weiter erforscht. Dass sich dickwandige Bauteile aus siliziumlegiertem GJS herstellen lassen, wurde bereits im Bereich Werkstoffmarketing dargestellt.

Zuletzt wurde der Einfluss von Gefügeabweichungen und Begleitelementen auf die Werkstoffeigenschaften untersucht, wobei zwischen statischen und dynamischen Kennwerten differenziert werden muss. Hier gibt es noch zahlreiche offene Fragen.

### Forschungsvorhaben

In den vergangenen Jahren wurde eine beachtliche Zahl von Forschungsvorhaben zu der neuen Werkstoffklasse durchgeführt. Richtig in Schwung kamen die Arbeiten in Deutschland in 2010. Die ersten Arbeiten befassten sich noch mit metallurgischen Aspekten, weitere betrachteten bestimmte Werkstoffeigenschaften (nicht Bauteileigenschaften, allerdings sollen die Ergebnisse am Ende jedes Vorhabens an Realbauteilen validiert werden!).

Parallel zu der Gemeinschaftsforschung haben natürlich einzelne Hersteller ihre eigene Forschung betrieben; im Ergebnis wurden einige Werkstoffe klassifiziert und zugelassen oder sogar patentiert.

## Einführung der Si-legierten Werkstoffe in der Normung

Es gab schon länger Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgrafit, die die Eigenschaften nach Norm übertrafen, teils durch leichte Modifikation der Zusammensetzung. Den ersten Schritt in die Richtung der mischkristallverfestigten Werkstoffe machte Björkegren mit einem Si-legierten Werkstoff, der gemeinsam mit Volvo entwickelt und 1994 patentiert wurde. Es folgten seither einige Normen und Richtlinien, zum Beispiel:

- > Sonderwerkstoffe: GJS-520-12 (Kugelanstangen), GJS-620-7 (Getriebebau),
- > Swedish standard SS 14 07 25 1998,
- > SiBoDur-Werkstoffe (Georg Fischer) ca. 2004,
- > ISO 1083:2004 Annex A: S.G. cast irons with high Si content (= 500-10),
- > EN 1563:2011 Anhang A: Zusätzliche Eigenschaften zu mischkristallverfestigten ferritischen Gusseisen mit Kugelgrafit (mit Streuband); strittig: Anhang F: Bruchzähigkeit, Schlagenergie und Duktilität,
- > EN 16124:2012 Gießereiwesen – Gusseisen-Strangguss (mit 500-14).
- > ISO 1083:2018-04 Spheroidal graphite cast irons – Classification, mit überarbeitetem Annex C Fracture Mechanical Approach,
- > prEN 1563:2018 – angelehnt an ISO 1083:2018,
- > ISO/DIS 945-4:2018-02 – Test method for evaluation of nodularity,
- > Guideline for the certification of wind turbines. GL 2010. (2015?),
- > FKM-Richtlinie Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis... FKM 2009.

### Aktuelle Fragestellungen

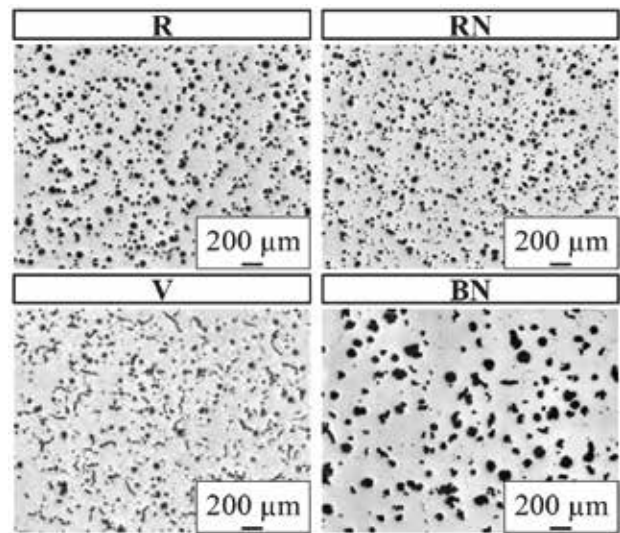
Viele Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Werkstoffe EN-GJS-500-14 und EN-GJS-600-10, eher wenige auf den „einfacheren“ Werkstoff EN-GJS-450-18.

Die wichtigste konstruktive Fragestellung betrifft die genaue Charakterisierung des Zähigkeitsverhaltens im Werkstoff und – was viel wichtiger ist – lokal im Bauteil. Wichtig ist die lokale Beanspruchung, aber auch die Beanspruchungsgeschwindigkeit.

Und wenn die Eigenschaften optimiert werden könnten, durch welche metallurgischen Maßnahmen lässt sich dies erreichen? Auch vor dem Hintergrund, dass wachsende Begleitelementgehalte in den Stahlschrotten kompensiert werden müssen.

Letztlich soll eine Aufklärung der letzten offenen Fragen dazu führen, dass das Verhalten dieser Werkstoffe realistisch eingeschätzt wird. Vorbehalte, die sich in

**Bild 3:** Untersuchte Grafitmorphologien (R: Referenz, hohe Nodularität; RN: reduzierte Nodularität; V: erhöhter Vermiculargrafitanteil; BN: große Kugeln).



erhöhten Sicherheitsbeiwerten oder größeren Wanddicken äußern, sollen aufgelöst werden. Denn nur so lässt sich das Leichtbaupotenzial dieser Werkstoffe erschließen. Geringere Wanddicken verringern die Masse des Bauteils und erlauben wiederum größerformatige Bauteile.

### Praxisbeiträge zum Einsatz hoch Si-haltiger Werkstoffe

Dr. W. Knothe, Franken Guss, unterstrich, dass es nicht auf das Werkstoffverhalten ankomme, sondern auf das Verhalten des Bauteils. Das Bauteil muss entsprechend der vorliegenden Spannungen ausgelegt werden. Der Konstrukteur muss dazu alle Lastfälle und Missbrauchsfälle kennen. Er bezog sich bei seinen Betrachtungen auf die Ergebnisse aus Forschungsvorhaben, die nur eine Orientierung geben könnten. Dort werde unter Laborbedingungen (an Kleinproben einfacher Geometrie und optimaler Oberfläche) das reine Werkstoffverhalten untersucht – der Werkstoff im realen Bauteil reagiere durchaus anders. Bei Franken Guss wurde der Werkstoff EN-GJS-450-18 metallurgisch optimiert, qualifiziert und nun mit Erfolg in der Großserie eingesetzt. Das Bauteil verfügt über ein ausreichendes Verformungsverhalten, nachzuweisen im Crash-Versuch. Grundlage sei eine enge Entwicklungspartnerschaft mit den Kunden. Ein Weg, den jede Gießerei unter Beachtung ihrer individuellen Prozessroute selbst gehen muss.

Dr. W. Menk, GF Casting Solutions, verglich den Werkstoff EN-GJS-500-14 mit SiBoDur. Bei Betrachtung der Mindestkennwerte nach EN 1563 bringt der Einsatz mischkristallverfestigter GJS-Werkstoffe mit einer deutlich höheren Bruch-

dehnung bei gleicher oder besserer Zugfestigkeit Vorteile gegenüber konventionellem GJS. Das höhere Streckgrenzenverhältnis könnte allerdings zu einem spröden Bauteilversagen führen. Im GF-Labor wurden Impact-Versuche bei hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt (Bild 2). Der neue hochfeste und hochduktiler Werkstoff „SiBoDur500“ zeigt einen wesentlich höheren Energieverbrauch bis zum Bruch und ist dem konventionellen EN-GJS-500-14 überlegen, auch hinsichtlich der Tieftemperatureigenschaften.

### Berichte aus den Forschungsprojekten

#### Abschlussbericht IGF 18524

#### „Simulationsgestützte Ermittlung des Versagenspotenzials von GJS-Si bei schwingender Beanspruchung“

(C. Gebhardt M.Sc., Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der RWTH Aachen, J. Frieß M.Sc., Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

Das IGF-Forschungsvorhaben wurde zum Zeitpunkt der Tagung abgeschlossen. Ziel war die Untersuchung des Einflusses verschiedener Gefügeabweichungen auf die Schwingfestigkeit. Die Ergebnisse sollen noch separat in einem Fachartikel ausführlich veröffentlicht werden, seien hier aber bereits kurz vorgestellt. An den Werkstoffen EN-GJS-500-14 und EN-GJS-600-10 wurde das Gefüge gezielt eingestellt (Bild 3). Der Einfluss von Gefügeabweichungen (reduzierte Nodularität, größere Kugeln und größere Anteile von Vermiculargrafit) wurde anhand eines repräsentativen Volumenelements modelliert und anschließend mit Wöhlerversu-

**Tabelle 1: Aktuelle und geplante Forschungstätigkeiten im Bereich konventionelles und hoch legiertes Si-GJS am Gießerei-Institut der RWTH Aachen**

Fragestellung	Laufende F&E-Vorhaben	Zukünftige F&E-Vorhaben
Grafitmorphologie und Entartung	Diagraph 1 (AiF) Versagenspotenzial (AiF)	Diagraph II (AiF) Optiguss (AiF) CHG Micress
Optimierung mechanischer Eigenschaften	MK-Optimierung (AiF)	Dehnratenabhängigkeit (AiF) Schädigungsmechanismen
Dünnwand-GJS	ThinWins (ZIM) Leichtbaupotenzial (AiF)	
Begleit- und Spurenelemente	Karbidvorhersage (AiF) Smartsrap (Cornet)	SUSpekt (ZIM)
Randschichten	Gusshaut (AiF)	Bearbeitbarkeit

chen (axial und Torsion) an Gussproben validiert. Das Ziel der Vorhersage der Dauerfestigkeit aus einem Werkstoff mit bekanntem Gefüge wurde qualitativ erreicht (Bild 4). Die Korrelation zwischen den Gefügeparametern und der Ermüdungsfestigkeit ist allerdings nicht einfach, sodass noch keine quantitative Aussage gemacht werden kann. Es bleiben einige interessante Fragen für weitere Forschungsvorhaben offen.

**Aktuelle und geplante Forschungstätigkeiten von konventionellen und hochsiliziumhaltigem GJS am Gießerei-Institut der RWTH Aachen**

(Dr.-Ing. B. Pustal, Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

Am Gießerei-Institut werden aktuell folgende Fragestellungen betrachtet, wovon die meisten anwendungsorientierte IGF-Vorhaben der AiF sind (Tabelle 1):

- > DIAGraph: Ziel des bis Anfang 2019 laufenden Vorhabens ist die einheitliche, systemunabhängige, automatische Bildanalyse von GJS, einschließlich der Bestimmung der Nodularität nach ISO 945-4. Eine automatische Klassifikationsmethodik für Grafit und Grafitentartungen wird entwickelt (Bild 5).
- > Im Folgevorhaben DIAGraph II (wird beantragt) soll die bereichsbezogene Klassifikation von Grafitausbildungen in GJL und GJV betrachtet werden – der Fokus liegt auf 3-D-Grafit-Verzweigungen, wobei ebenfalls Entartungen betrachtet werden.

- > Die Erschließung des Leichtbaupotenzials von GJS-Si (im März angelaufen) ist das Ziel eines weiteren Vorhabens, in dem u.a. die Gießereigenschaften dieser Werkstoffgruppe eingehend untersucht werden. Dies soll dünnwandigere Gussteile ermöglichen, die mit reduziertem Speisereinsatz gegossen werden.
- > In einem geplanten grundlagenorientierten DFG-Vorhaben soll das spröde Bruchverhalten in Abhängigkeit des Si-Gradienten untersucht werden. Ziel ist die Vorhersage makroskopischer Eigenschaften mittels eines neuen Modells.

An den laufenden Vorhaben dürfen sich gerne weitere Unternehmen beteiligen.

**Metallurgische Optimierung von hochsiliziumhaltigem mischkristallverfestigtem Gusseisen mit Kugelgrafit hinsichtlich der Sicherstellung der Zähigkeit und Prozessierbarkeit**

(J. Frieß M. Sc., Dr.-Ing. P. Weiß, Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

Ziel des Mitte 2017 abgeschlossenen IGF-Vorhabens war die Erarbeitung der Effekte weiterer Legierungselemente in hochsiliziumhaltigem GJS; einerseits die Verbesserung der Kennwerte durch gezieltes Legieren, andererseits die teilweise Substitution von Silizium durch andere Mischkristallbildner. Zunächst wurden die Einzel- und Kombinationswirkungen

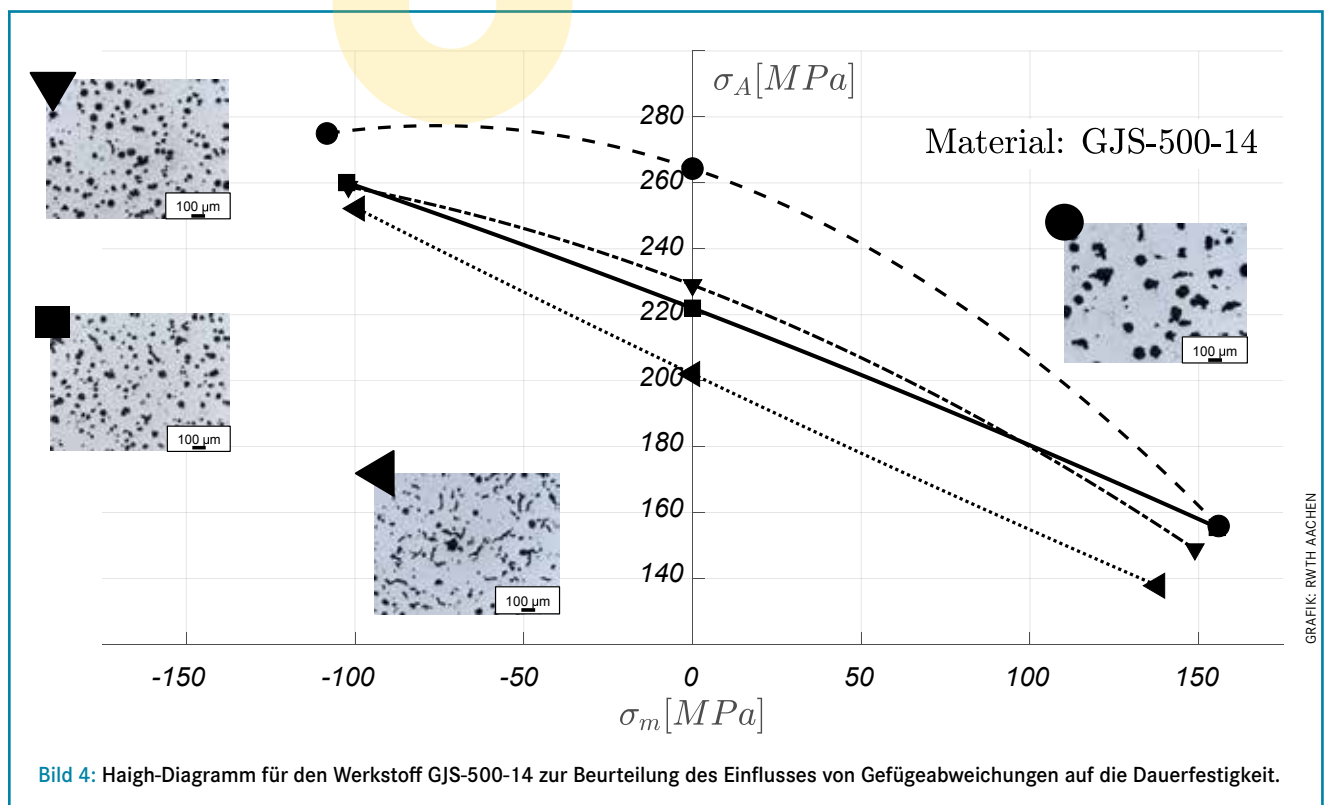


Bild 4: Haigh-Diagramm für den Werkstoff GJS-500-14 zur Beurteilung des Einflusses von Gefügeabweichungen auf die Dauerfestigkeit.

verschiedener Legierungselemente bestimmt. Eine Kombination von Ni und Al erwies sich hierbei am besten geeignet und ermöglichte eine weitere Steigerung gegenüber konventionellen GJS-Si-Werkstoffen. Ferner wurden in diesem Vorhaben erstmalig die versprödenen Überstrukturen mittels TEM nachgewiesen (Bild 6). Teilaspekte des Projekts wurden bereits von P. Weiß u. a. in der Materials Science and Engineering, Volume 713, 24 January 2018, (s. a. Abschnitt weiterführende Literatur) veröffentlicht.

### Schädigungsmechanische Ansätze zur gezielten Einstellung und effizienten Nutzung der Zähigkeitseigenschaften von hochsiliziumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit

(D. Franzen M. Sc., Gießerei-Institut der RWTH Aachen, M. Könemann M.Sc, Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen)

Die Kerbschlagzähigkeit der mischkristallverfestigten Werkstoffe ist für manche Anwendungen nicht ausreichend, was auf eine ausgeprägte Dehnratensensitivität zurückgeführt wird. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen die Zähigkeitseigenschaften unter dem Einfluss der Be-

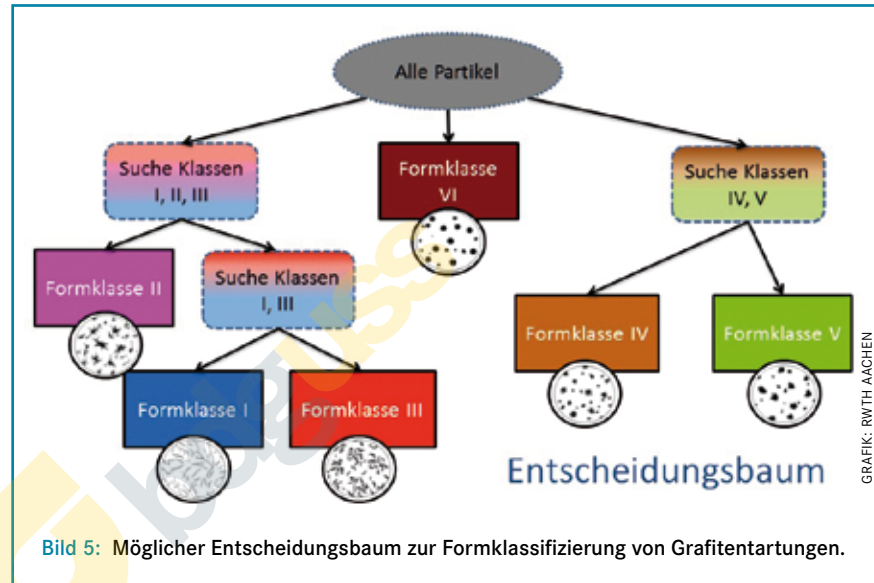


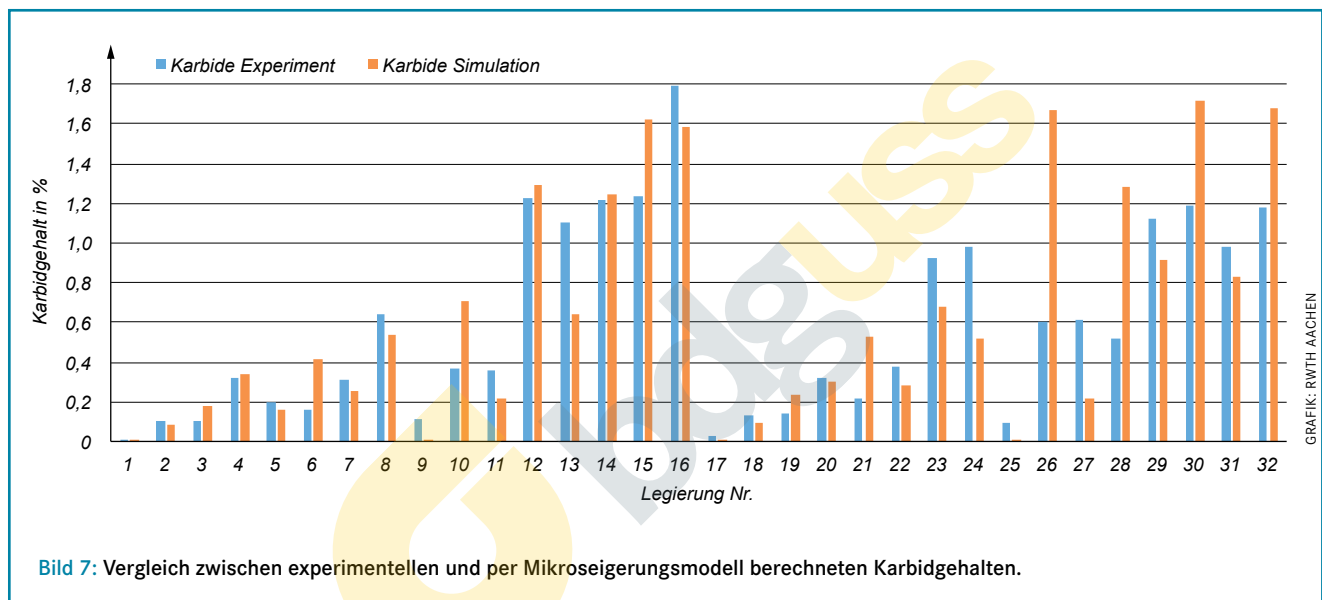
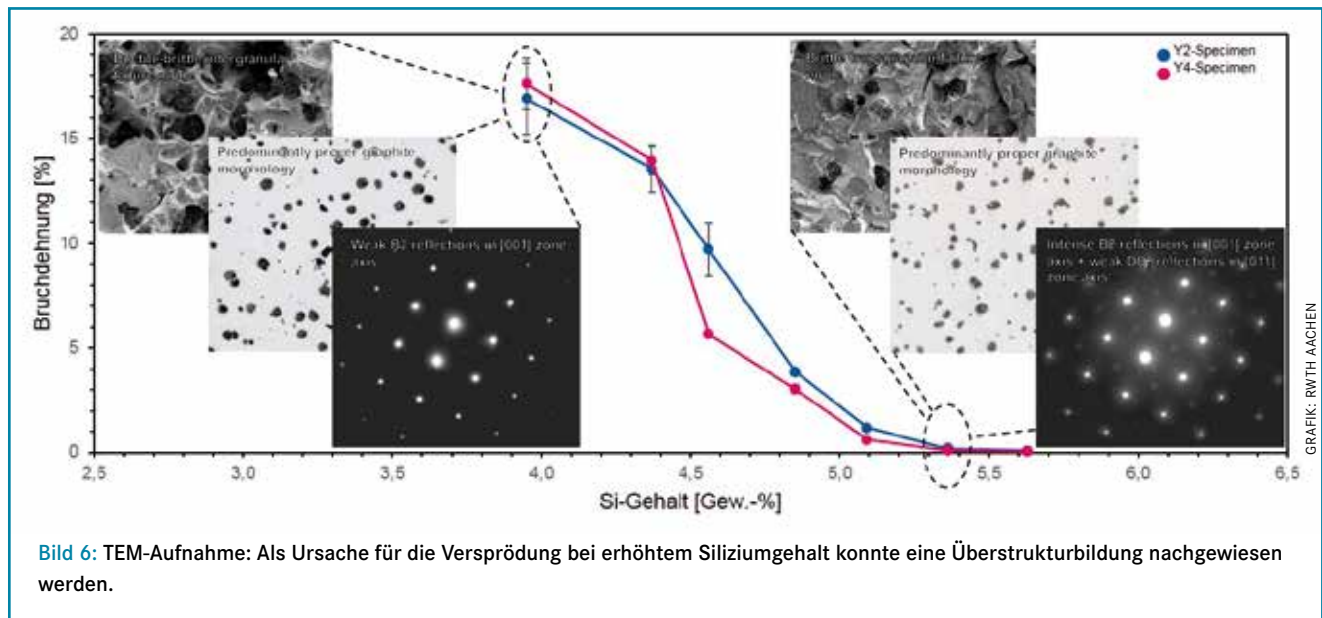
Bild 5: Möglicher Entscheidungsbaum zur Formklassifizierung von Grafitentartungen.

GRAFIK: RWTH AACHEN

anspruchungssituation sowie der Mikrostruktur des Werkstoffs charakterisiert werden. Dazu werden numerische Modelle angewendet, mit denen die Zähigkeitseigenschaften bei konkret vorliegender Beanspruchung und definiert eingestelltem Gefüge simuliert werden können. Es folgt die experimentelle Validierung der Ergebnisse sowie die Herstellung gezielt

entwickelter Legierungen. Diese werden im weiteren Verlauf mithilfe eines zum Kerbschlagbiegeversuch alternativen Prüfverfahrens, das eine beanspruchungsge-rechte Prüfung der Zähigkeit erlaubt, geprüft.

Das Vorhaben ist noch nicht angelau-fen, Interessenten können gerne noch teilnehmen.



**Quantitative Karbidvorhersage**  
 (M. Riebisch M.Sc., Gießerei-Institut der RWTH Aachen)

Ziele des Vorhabens waren die Erweiterung des Prozessfensters zur Herstellung von EN-GJS-500-14 hinsichtlich des Einsatzes verunreinigter Schrotte, die Vorhersage von Gefüge und Eigenschaften anhand der chemischen Analyse und die quantitative Vorhersage der auftretenden Karbide. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine benutzerfreundliche Karbidatendbank mit Excel-Schnittstelle erstellt, in welche die Ergebnisse von Schmelzversuchen mit den legierten Karbidbildnern Chrom, Mangan, Molybdän, Niob und Vanadium (einzeln und in Kombinationen) eingegeben wurden. Hierüber, sowie mit Hilfe des am Gießereinstitut entwickelten Mikroseigerungsmodells, lassen sich die Anteile von Perlit und Karbid für verschie-

dene Abkühlbedingungen korrekt vorher-sagen (Bild 7). Auch Gefüge und mechanische Kennwerte können über empirische Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen vorhergesagt werden.

**Zyklisches Werkstoffverhalten von Si-GJS – Stand des Wissens und Wissenslücken**  
 (Dr. C. Bleicher, Dr. H. Kaufmann, Fraunhofer LBF, Darmstadt)

Die Ergebnisse bisheriger Forschungsvorhaben am Fraunhofer Institut für Leichtbauforschung (LBF) lassen eine zyklische Verfestigung der Si-GJS-Werkstoffe erkennen. Aktuelle Richtlinien unterschätzen die Mittelspannungsempfindlichkeit. Bisherige Forschungsvorhaben betrafen z.T. den Werkstoff EN-GJS-450-18 und zeigten Lücken, z.B. bei den Werkstoffen EN-GJS-500-14 und 600-10, im Tieftempera-

turbereich oder hinsichtlich der Bewertung von Fehlstellen.

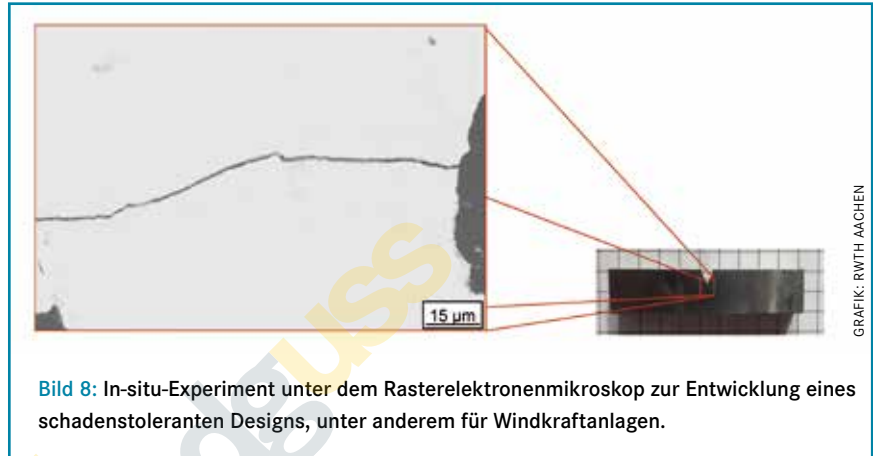
Im 2011 abgeschlossenen Vorhaben „MEGAWind“ wurde ein neuer GJS-Si-Werkstoff für große Windenergieanlagen (WEA) qualifiziert. Das BMWi-Vorhaben „Lunkerfest“ (bis 2016) zielte auf die Vergleichbarkeit der zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) mit dem Gefüge und diente der Steigerung des Auslastungsgrades von WEA-Komponenten aus GJS-Si-Werkstoffen. „SWL Eisenguss“ entwickelt synthetische Wöhlerlinien für die Bewertung von konventionellen und ausgewählten hoch Si-legierten GJS-Werkstoffen. Im gerade angelaufenen Vorhaben „Grenzqualifizierung“ wird die lokale, zyklische Beanspruchbarkeit von Bauteilen mit Gefügeabweichungen untersucht, um ein Qualitätssicherungskonzept auf Basis von ZfP-Methoden sowie virtueller Grenzmu-sterbauteile zu erstellen.

Dr. Bleicher wies darauf hin, dass die Ergebnisse vieler Vorhaben aufgrund begrenzter Fördermittel eher schlaglichtartig seien und manche Fragen offen lassen müssten. Aufgrund einer minimalen Probenzahl sei nur eine Abschätzung der zyklischen Eigenschaften möglich und keine genaue Eigenschaftsvorhersage. Im Sinne des Leichtbaus sollten fundierte Datensätze für Konstruktionsrichtlinien (FKM, etc.) bereitgestellt werden.

Es fehle eine konsequente Betrachtung aller drei Werkstoffe hinsichtlich Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Mittelspannungsempfindlichkeit (in Abhängigkeit vom Gefüge), Stütz- und Kerbwirkung sowie die Untersuchung des gefügeabhängigen Größeneinflusses. Notwendig sei ein größeres, umfassendes Forschungsvorhaben, das im Übrigen auch von der FVG unterstützt werden würde.

### **Schadenstolerante Auslegung von Strukturbauteilen aus hochfestem Gusseisen (damage tolerant design)**

*(L. Heine, Prof. Dr.-Ing. C. Broeckmann, C. Gebhardt M.Sc., Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der RWTH Aachen)*



**Bild 8:** In-situ-Experiment unter dem Rasterelektronenmikroskop zur Entwicklung eines schadenstoleranten Designs, unter anderem für Windkraftanlagen.

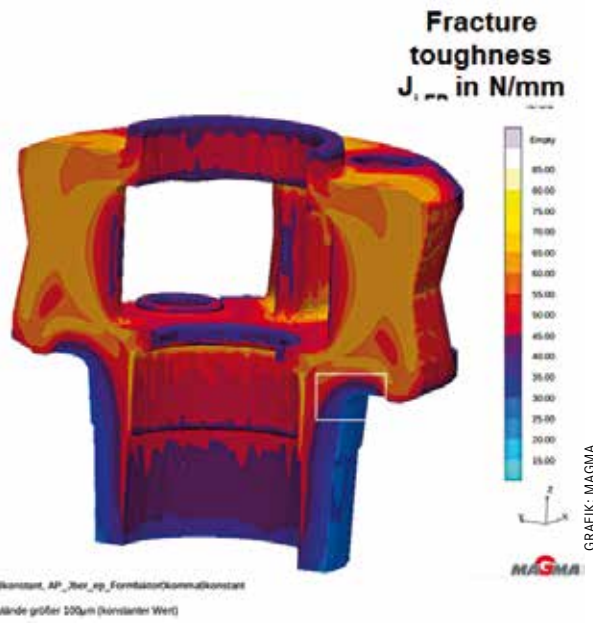
Leichte Ungängen können im Gefüge von Gusseisenwerkstoffen (Poren, etc.) auftreten. Die Bauteillebensdauer wird durch Rissstart und -wachstum (nach Kitagawa) bestimmt, was wiederum von der Beanspruchungsart abhängt. Untersucht wurde ein Planetenträger aus EN-GJS-700-2 (nicht GJS-Si aber methodisch interessant) mit typischen Ungängen. Modifizierte Ermüdungsversuche zeigten eine Lage im unteren Streuband. In-situ-Risswachstumsversuche im REM wurden zur Bestimmung der Nachgiebigkeit herangezogen,

die über ein Riss schließen oder eine weitere Rissöffnung entscheidet (**Bild 8**). Dieser Übergang ist entscheidend für die einheitliche Betrachtung des Risswachstums und die fortschrittliche, schadenstolerante Auslegung von Windenergieanlagen.

Aktuell wird in der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) das Forschungsvorhaben „Leichtkonstruktion Guss“ durchgeführt, in dem für einen Planetenträger die alternativen Werkstoffe EN-GJS-700-2 und ADI verglichen werden.



**Bild 9:** Berechnungen an einem Planetenträger sollen die Zähigkeit aus der Erstarrungssimulation heraus bestimmen: „Hot Spots“ zeigen Spannungen an der Bauteiloberfläche, die jedoch in Richtung Bauteilinneres rasch abklingen.



**Einsatz bruchmechanischer Methoden im Life-Cycle-Management von Bauteilen aus GJS unter Berücksichtigung der Gussimulation**

(Prof. Dr.-Ing. P. Langenberg, Dr.-Ing. P. Kucharczyk, IWT Solutions, Aachen, C. Thomsen, Dr.-Ing. J.C. Sturm, MAGMA Gießertechnologie, Aachen)

Professor Langenberg zeigte deutlich auf, dass es sich bei der Bruchmechanik nicht alleine um ein Prüfverfahren handelt, sondern primär um eine Berechnungsmethode, die bereits im frühen Design-Stadium eingesetzt werden kann. So lassen sich Zähigkeitsanforderungen an den Werkstoff auf Basis von Design-relevanten Eingangsgrößen ermitteln (z. B. Spannungen und Fehlstellen, die noch mit ZfP-Prüfverfahren nach DIN EN 12680 bestimmt werden). Dies stellt einen deutlichen Vorteil gegenüber der Kerbschlagarbeit dar, die ein rein erfahrungsbasiertes, nicht übertragbares Kriterium liefert. Auch im Betrieb hilft die Bruchmechanik, Bauteile mit Fehlstellen im Betrieb zu halten und ihren sicheren Ausbaupunkt zu ermitteln.

In der aktuellen Studie wird gemeinsam mit MAGMA untersucht, wie die häufig fehlende bruchmechanische Risszähigkeit aus der Erstarrungssimulation heraus bestimmt werden kann (Bild 9). Damit werden die hohen Kosten der Bruchmechanischen Prüfung vermieden und das Gießen, zum Beispiel eines komplexen Bauteils wie dem Planetenträger, im Vorfeld optimiert.

**Diskussion: Was benötigen die Konstrukteure?**

Hier wurden die Ergebnisse einer vor der Tagung durchgeführten Umfrage vorge-

stellt. Die ersten fünf Punkte wurden mehrfach genannt und sind als besonders wichtig anzusehen. Die Antworten geben Hinweise darauf, welche konstruktiven Anforderungen noch zu erfüllen sind:

- > Hohe Festigkeit, hohe Streckgrenze: Leichtbaupotenzial,
- > Hohe Dehnung / Zähigkeit: Sicherheit bei der Simulation und Auslegung der Produkte, die durch geringere Wandstärken und optimiertes Design ausgenutzt werden können,
- > Gute Zerspanbarkeit / Bearbeitbarkeit (< 5 % Perlit),
- > Hohe Schwingfestigkeit,
- > Temperaturabhängige Kennwerte: Änderung bei hohen (bis 200 °C) und tiefen (-20 °C/-40 °C) Temperaturen,
- > Risszähigkeit bei statischer Belastung/Rissverhalten bei zyklischer Belastung (in Abhängigkeit von der Temperatur),
- > Aussagen zur Bruchmechanik: z. Zt. kein geeignetes Verfahren zur prozessbegleitenden Prüfung, KV ungeeignet.
- > Mechanische Kennwerte für 60 – 200 mm Wanddicke (nicht in der Norm): Kennwerte aus dem Bauteil müssen EN 1563 Tabelle 3, t < 30 mm entsprechen,
- > „Garantie“ wanddickenabhängiger Eigenschaften,
- > Reduktion der Sicherheitsbeiwerte, optimierte Auslegungsprozesse (bzgl. Dynamik).

Aktueller Forschungsbedarf wird hinsichtlich „Big Data“ gesehen. Heutige Messmethoden erlauben die Erfassung zahlreicher Prozessparameter, die in Modelle gefasst werden könnten. Auch bei den Prüfverfahren ist gemäß den vorhergehen-

den Vorträgen zu überlegen, welche sich für die Beschreibung des Bauteilverhaltens bzw. der Zähigkeit am besten eignen.

**Ausblick**

Kurzfristig sollten Hinweise für die Anwendung von mischkristallverfestigtem Guss-eisen mit Kugelgraphit, zur Information, angegeben werden. Die Werkstoffsorten haben ein unterschiedliches Zähigkeitsverhalten. Um ein bestmögliches Bauteilverhalten zu erzielen, sollten die Werkstoffe gemäß ihrer Stärken eingesetzt werden. Anwendungsbeispiele je nach Werkstoffsorte finden sich in verschiedenen Normen und sollten auf die EN 1563 übertragen werden. Dies betrifft auch die Abgrenzung von den konventionellen GJS-Werkstoffen und den ADI-Werkstoffen. Der BDG-Fachausschuss „Konstruieren in Guss“ wird sich hiermit in nächster Zeit auseinandersetzen. Auf der Agenda stehen die folgenden Fragestellungen:

- > Festlegung von Anwendungsbeispielen für Si-legierte GJS-Werkstoffe, abhängig von der Beanspruchung (statisch, dynamisch, Überlast),
- > Vorbereitung eines informativen Anhangs zur DIN EN 1563,
- > Sicherheitsbeiwerte in Konstruktionsregelwerken,
- > Begleitung von IGF-Forschungsvorhaben und neue Projektskizzen.

Es hat sich gezeigt, dass das Verhalten der Werkstoffe noch nicht voll umfänglich bekannt ist; auf einigen Gebieten besteht noch Forschungsbedarf. Zu diesen Themen sollten kurzfristig Forschungsanträge vorbereitet werden, um noch fehlende Erkenntnisse zu den GJS-Si-Werkstoffen zu gewinnen. Vielversprechend sind unter anderem das gerade angelaufene IGF-Vorhaben „Leichtbaupotenzial GJS-Si“ und das IGF-Vorhaben „Schädigungsmechanik“, das im Herbst 2018 anlaufen soll.

Der nächste Schritt ist eine gezielte „Vermarktung“ dieser Werkstoffgruppe, um den Kunden die Eigenschaftspotenziale darzustellen. Hierfür plant der BDG eine Tagung mit dem Arbeitstitel „Guss-eisen-Forum“ im November 2019. Bis dahin werden weitere, abgesicherte Erkenntnisse vorliegen, u.a. aus zurzeit laufenden IGF-Forschungsvorhaben. All das wird bisherige Hemmnisse bei der Anwendung dieser interessanten Werkstoffklasse beseitigen.

**Forschungsvorhaben**

- > BMU 0327593 MEGAWind („Si-Wind“) (1.8.2006 – 31.10.2011),

- > IGF 16255N (IfG) „Ermittlung v. zyklischen Werkstoffeigenschaften f. dünnwandige Gussstücke aus hoch Si-haltigen Gusseisenlegierungen“ (1.11.2009 – 30.9.2012),
- > IGF 41EN (Cornet, IfG mit ÖGI) „Werkstoff- u. fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch Si-haltigem GJS“ (1.7.2010 – 30.6.2012),
- > IGF 16670N (IfG) „Erarbeitung eines Prozessfensters zur Herstellung von Gussstücken aus GJV-Si ...“ (1.8.2012 – 31.7.2014),
- > IGF 17316N (IfG) „Charakterisierung der Porositätsverteilung in GJS und ihr Einfluss auf die zyklischen mechanischen Eigenschaften“ (1.11.2011 – 28.2.2014),
- > FFG Nr. 854398 (A) „Gusseisen mit verbesserten Eigenschaften durch hohe Si-Gehalte“ – EsiCast (Abschluss 2016),
- > IGF 18524N „Versagenspotenzial GJS-Si“ (IWM mit IfG/GI, 1.4.2015 – 30.6.2018),
- > IGF 18554N „Metallurgische Optimierung GJS-Si“ (GI, 1.1.2015 – 30.6.2017),
- > IGF 18555N „Carbidvorhersage GJS-Si“ (IfG/GI mit IWM, 1.4.2015 – 31.12.2017),
- > IGF 18976N „Gusshaut“ (SAM, LBF, GI, 1.1.2016 – 30.6.2019),
- > IGF 19257BG „SWL Eisenguss“ (LBF, IWM, MFPA, 30.11.2016 – 1.4.2019),
- > IGF 19769N „Leichtbaupotenzial GJS-Si“ (GI, 1.1.2018 – 30.6.2020).

#### Weiterführende Literatur

- > Björkegren, L.E.; Hamberg, K.: Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability. Proc. Keith Millis Symposium, Hilton Head, USA, 2003,
- > Menk, W.; Prukner, S.; Kniewallner, L.: Gussteile erobern das Hoheitsgebiet der Schmiedeteile. Giesserei 12/2007 S. 31 ff,
- > Larker, R.: Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators. China Foundry 4/2009,
- > Mikoleizik, P.; Kleinkröger, W.: Werkstoffentwicklung für Windenergieanlagen im Multi-Megawatt-Bereich Offshore – MEGA-Wind (Abschlussbericht 2012),
- > Löblich, H.; Stets, W.: Hoch Si haltiges GJS toleriert größere Anteile an carbidbildenden Elementen. Giesserei 4/2012, S. 28ff,
- > Gassner, G.; Bauer, W.; Schumacher, P.; Löblich, H.; Stets, W.: Zwischenbericht Cornet-Projekt „SIRON“ Giesserei 5/2012, S. 18ff,
- > Vollrath, K.: Neue hochinteressante GJS-Werkstoffe. Giesserei 9/2013, S. 70ff.
- > Chailier, K.; Gilles, R. (CTIF). Fonderie Revue 39 (2013) S. 17ff,
- > Bleicher, C; Kaufmann, H.: Die Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit bei Tieftemperaturen (WEA). Giesserei 10/2014 S. 38ff,
- > Mikoleizik, P.; Geier, G.: Si-Wind – Giesserei 9/2014 S. 64ff,
- > Bleicher, C.; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Melz, T.: Si-Wind – Neuer Werkstoff für Offshore-Windenergieanlagen. Giesserei 9 + 10/2014,
- > Pusch, G.; u.a.: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte Si-MX-verfestigter GJS-Werkstoffe im Hinblick auf ihren Einsatz in WEA. Giesserei-Rundschau 1/2016,
- > Werner, H.; Lappat, I.; Aurich, B.: Mischkristallverfestigte EN-GJS-Werkstoffe für Groß- und Schwergussteile. Giesserei 2/2016, S. 38ff,
- > Bleicher, C.: Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Großgussbauteilen aus GJS mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von Lunkern auf die Bauteillebensdauer.

- er. Diss. TU Darmstadt, April 2016 (mit GJS-450-18),
- > Seidel, S.: Machbarkeitsstudie zur Herstellung von mischkristallverfestigtem ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit im Großguss. Giesserei 7 + 8/2016,
- > Michel, D.: [Einfluss div. MX-Härter auf GJS-500-14 und 600-10] (ÖGI M.Sc. 2016),
- > Fischer, S.; Brachmann, J.; Bührig-Polaczek, A.; Weiß, P.: Metallurgische Verbesserung von mischkristallverfestigten Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei 6+7/2017,
- > Riebisch, M.; Pustal, B.; Bührig-Polaczek, A.; Hallstedt, B.: Einfluss karbidbildender Elemente auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von hoch Si-haltigem GJS. Giesserei Special 1/2018, S. 43ff.,
- > Gassner, G.; Koppensteiner, E.; Glavanovic, L.; Schindelbacher, G.; Schumacher, P.: Potenziale und Limitierungen von Si-mischkristallverfestigten GJS-Sorten. Giesserei Special 1/2018, S. 70ff,
- > Knothe, W.: Bewertung von Bauteilen aus GJS für dynamische Lastfälle – auch unter extremen Kältebedingungen. Giesserei 6/2018 S. 42ff,
- > Philipp Weiß, Anže Tekavčič, Andreas Bührig-Polaczek: Mechanistic approach to new design concepts for high silicon ductile iron, Materials Science and Engineering: A, Volume 713, 24 January 2018, Pages 67-74.,

#### Weitere Informationen

Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V. FVG

#### Dr. Ingo Steller

Hansaallee 203, 40549 Düsseldorf

Tel.: 02 11/6871-342, Mail: fvg@bdguss.de

Web: www.fvguss.de