

FOTOS: RWTH AACHEN

Innenliegende, nicht bearbeitbare Gusshautrandzonen: ein bisher wenig beforschter Aspekt der Lebensdauerprognose von Bauteilen.

Einfluss von Gusshautrandzonen auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgrafit

Während für außen liegende Gusshäute bei Bauteilen aus Gusseisen mit Kugelgrafit (GJS) verschiedene Nachbehandlungsverfahren wie Strahlen oder Randschichthärten eingesetzt werden, um die Schwingfestigkeit bzw. Lebensdauer zyklisch beanspruchter Komponenten zu steigern, gibt es nach wie vor Herausforderungen bei der Lebensdauerbeurteilung von innen liegenden Gusshäuten. Vor diesem Hintergrund wurde die Schwingfestigkeit von GJS unter Berücksichtigung von nicht nachbearbeitbaren Gusshautrandzonen untersucht.

VON CHRISTOPH BLEICHER, TOBIAS MELZ UND KIM BERGER, DARMSTADT UND ADALBERT KUTZ UND ANDREAS BÜHRIG-POLACZEK, AACHEN

Das zyklische Werkstoffverhalten für bestehende Auslegungskonzepte wird bisher mit Kennwerten von allseitig bearbeiteten Proben beschrieben und die Gusshaut dabei fast

ausschließlich als Oberflächenrauheit in Form von Abschlagsfaktoren, wie dem Rauheitsfaktor $K_{r,\sigma}$ der FKM-Richtlinie, berücksichtigt [1]. Diese vernachlässigen jedoch den Einfluss von Ungängen wie inhomogene Mikrostrukturen, Drosseinschlüsse, Poren etc. in der Randschicht des Gussbauteils (Bild 1). Somit kann keine Beurteilung der Schwingfestigkeit auf Basis der tatsächlich vorliegenden Rand-

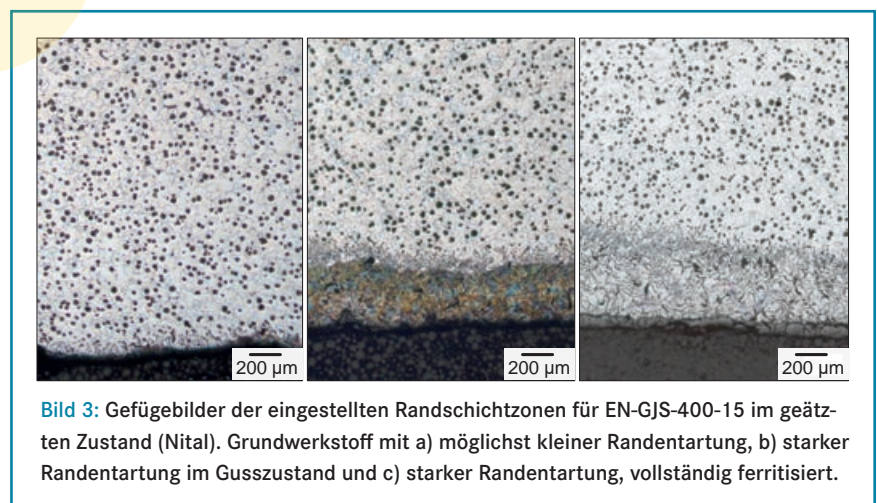
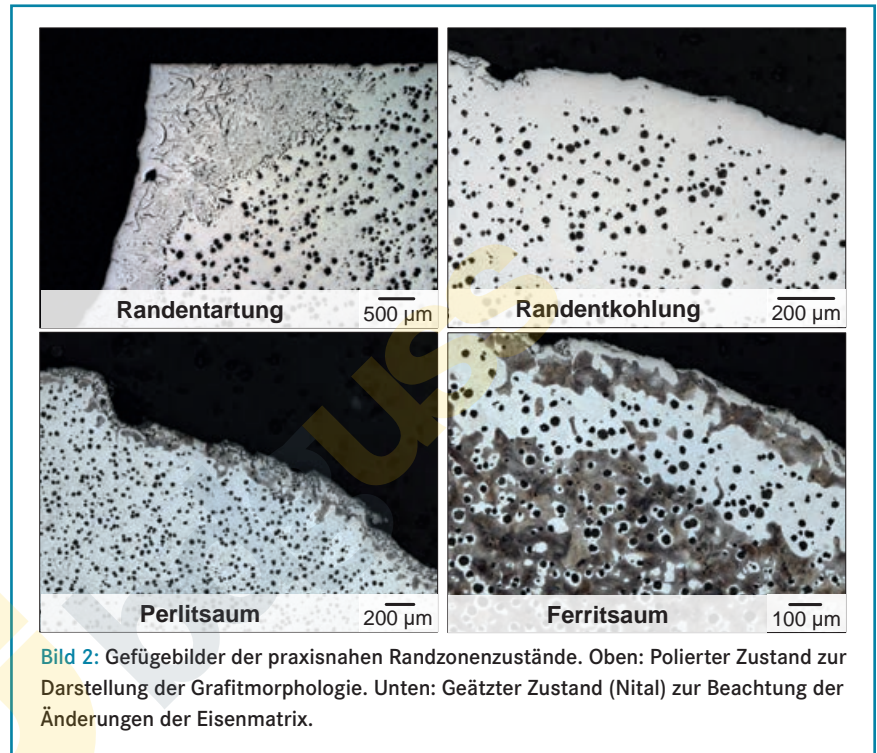
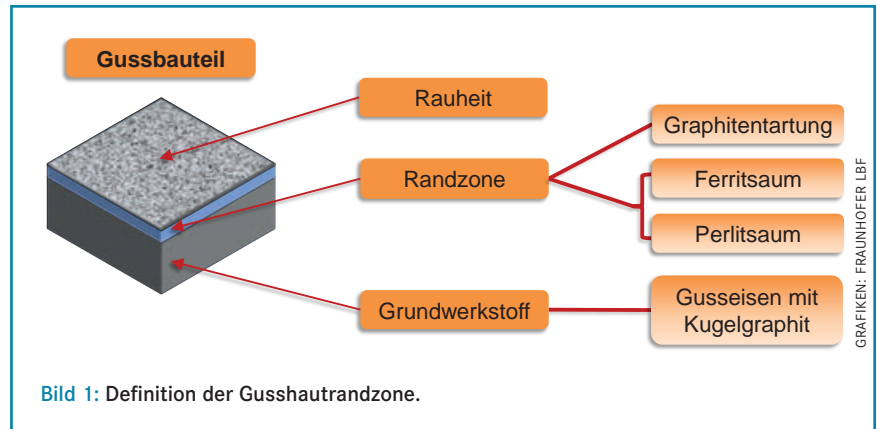
schichtdicke erfolgen, da dies eine Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens des Grundwerkstoffes mit der überlagerten Randzone inklusive der Entartungen erfordert. Im Rahmen des AiF-Vorhaben „Gusshaut“ wurde in Zusammenarbeit des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), des Fachgebiets Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinen-

akustik SAM der TU Darmstadt sowie des Gießerei-Instituts der RWTH Aachen neben der Analyse der Gusshautrandzone hinsichtlich ihrer Entstehung und typischer Ausprägungsformen auch ihr Einfluss auf die Betriebsfestigkeit eingehend untersucht und beschrieben.

Werkstoff und Versuchskörper

Zunächst wurden am Gießerei-Institut der RWTH Aachen typische, praxisnahe Gusshautrandzone und deren Ausprägungsformen anhand von Probestücken identifiziert. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Dokumentation der Randzonenzustände am Bauteil in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff und dem verwendeten Formstoff-Binder-System. Hierfür wurden durch die beteiligten Projektpartner Abschnitte von Gussbauteilen unterschiedlichster Abmessungen aus der Serie zur Verfügung gestellt, die aus den Grundwerkstoffen EN-GJS-400-15, EN-GJS-500-14 oder EN-GJS-700-2 bestanden und Gusshautrandzonen aufwiesen. Dabei zeigte sich, dass abhängig vom Bindersystem im Wesentlichen vier formstoffbedingte Randzonenzustände auftreten (Bild 2): Grafitdegenerationen von Kugeln zu Lamellen (Randentartung), Verarmung an Kohlenstoff (Randentkohlung) sowie die Änderung der Eisenmatrix (Perlit- und Ferritsaum).

Die Dicke der Randschicht ist neben den formstofftechnischen Einflüssen primär von den thermischen Randbedingungen wie Wanddicke und Gießtemperatur abhängig. Die verwendete GJS-Legierung hat abgesehen vom eingestellten Restmagnesiumgehalt keinen Einfluss. Während die Randzonenzustände Randentkohlung, Perlitsaum und Ferritsaum überwiegend bei der Verwendung von Grünsand auftreten und nur geringe Schichtdicken von maximal 200 µm erreichen, weisen Randentartungen weit höhere Größenskalen auf. Insbesondere bei dickwandigen, handgeformten Bauteilen können Schichtdicken von über 10 mm auftreten. Aufgrund der dadurch bedingten starken Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften und des omnipräsenten Auftretens des Randzonenzustandes bei bentonit- und kaltharzbasierenden Bindersystemen wurde der Fokus der Untersuchungen auf die Randentartungen gelegt. Um deren Einfluss auf die zyklischen Werkstoffeigenschaften von GJS darstellen zu können, wurden Gussrohlinge mit definierten Randschichten hergestellt [2]. Ziel war hierbei die Einstellung einer möglichst homogenen Randentartung mit einer Schichtdicke von mindestens 400 µm bei



einem gleichzeitig trennscharfen Übergang vom lamellaren Grafit im Randgefüge zum nodularen Grafit im Grundgefüge. Die eingestellten Randgefüge sind exemplarisch für die Gussrohlinge aus EN-GJS-400-15 in Bild 3 dargestellt.

Zunächst wurden Proben mit einer möglichst geringen Randschicht erzeugt (Bild 3 a), die eine Charakterisierung des Grundwerkstoffes und des Einflusses der Rauheit ermöglichen. Die Proben mit Randentartung wurden im Gusszustand

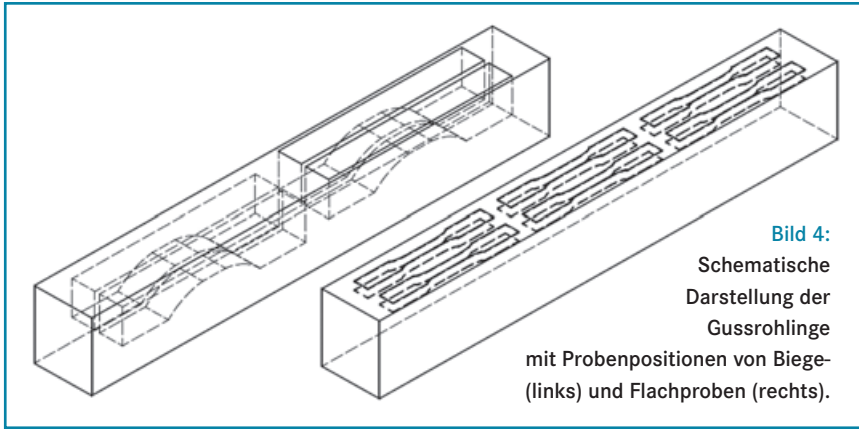


Bild 4:

Schematische Darstellung der Gussrohlinge mit Probenpositionen von Biege- (links) und Flachproben (rechts).

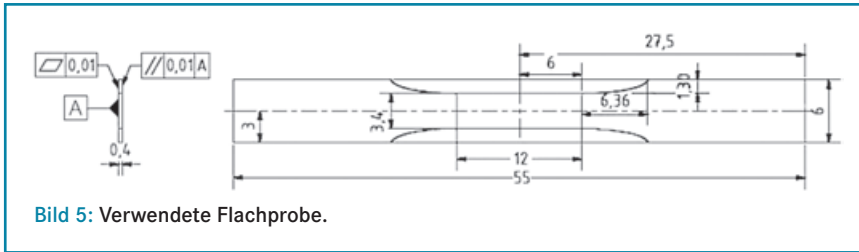


Bild 5: Verwendete Flachprobe.

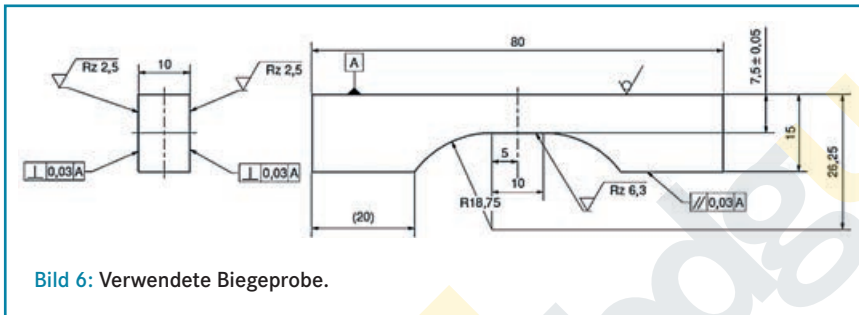


Bild 6: Verwendete Biegeprobe.

(Bild 3 b) zyklisch beansprucht, um den Einfluss einer real auftretenden Entartung in Zusammenhang mit dem Spannungsgradienten und dem unter der Randzone vorliegenden Grundwerkstoff darzustellen. Bedingt durch die Änderung der Grafitmorphologie und die Aufnahme von Schwefel und Sauerstoff im Randbereich des Gussstückes wird die Randentartung oftmals auch von einer Änderung der Matrix begleitet. In diesem Fall bildet sich im Gegensatz zum ferritischen Grundgefüge eine perlitische Randschicht mit Lamellengrafit aus. Um aber ausschließlich den Einfluss der Grafitmorphologie des Randbereiches darstellen zu können, wurden zusätzlich Proben mit Randentartung bis zur Einstellung einer vollständig ferritischen Randschicht weichgeglüht (Bild 3 c). Prozessbedingt war das Einstellen einer vollständig homogenen Randentartung nicht möglich.

Für die Ermittlung der zyklischen Materialkennwerte an EN-GJS-400-15, EN-GJS-700-2 und EN-GJS-500-14 mit Gusshautrandzone wurden aus den Gussrohlingen (Bild 4) Biegeproben und Flachproben hergestellt (Bild 5 und Bild 6). Dabei kamen die Flachproben mit einer

Dicke $t = 400 \mu\text{m}$ für die dehnungsbasierte Charakterisierung der Randzone selbst zum Einsatz, während die Biegeproben das spannungsbasierte Werkstoffverhalten beschreiben. Insbesondere überlagern sich bei den Biegeproben Effekte aus dem Spannungsgradienten mit dem Werkstoffgradienten bestehend aus Gusshautrandzone, Rauheit und Grundwerkstoff. Zusätzlich standen in einer Versuchsreihe Biegeproben zur Verfügung, bei denen quasi keine Randzone vorlag und somit der Einfluss der reinen Gussrauheit auf das Schwingfestigkeitsverhalten untersucht werden konnte. Dabei lag im Schnitt eine Oberflächenrauheit R_z von $67 \mu\text{m}$ vor. Auch wurden Referenzuntersuchungen an allseitig bearbeiteten Biegeproben durchgeführt, die nur aus Grundwerkstoff ohne Randzone bestanden.

Das zyklische Werkstoffverhalten der Randzone an den Flachproben wurde durch zyklische dehnungsgeregelte Versuche unter Wechselbelastung ($R_\sigma = -1$) an Flachproben bestimmt, die aus der Randzone entnommen wurden. Um den Einfluss der Oberflächenrauheit sowie von Spannungsgradienten auf die Schwingfestigkeit zu untersuchen, wurden zykli-

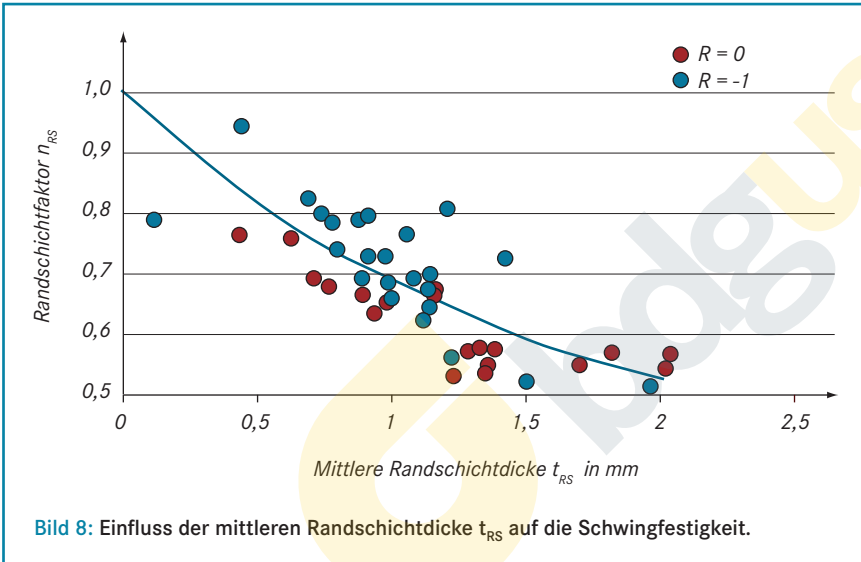
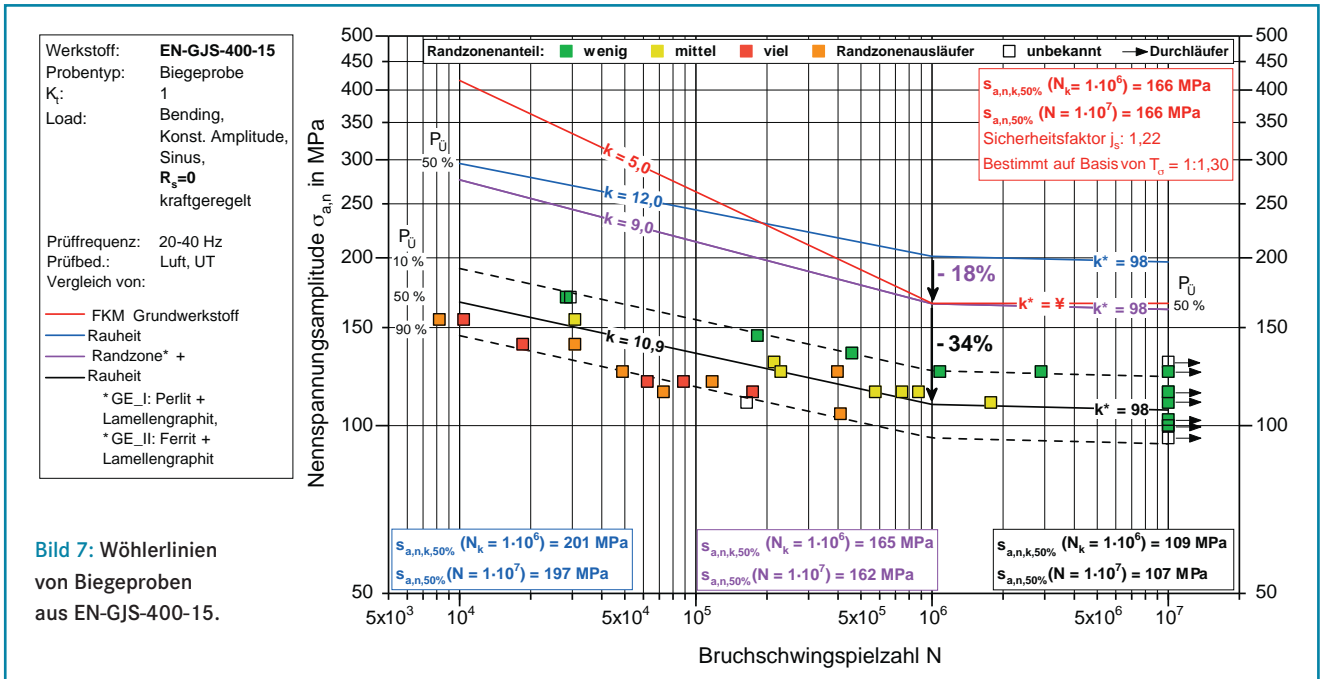
sche 2-Punkt-Biegeversuche unter wechselnder ($R_\sigma = -1$) und zugschwellender ($R_\sigma = 0$) Belastung durchgeführt. Dabei dienen die ermittelten Kennwerte als Eingangsparemeter für ein numerisches Bemessungskonzept, das es erlaubt, die Schwingfestigkeit von nicht nachbearbeitbaren Gusshautrandzonen zu beurteilen.

Ergebnisse

Beispielhaft werden die Ergebnisse, die an EN-GJS-400-15 ermittelt wurden, im Folgenden vorgestellt. Dazu zeigt Bild 7 die Ergebnisse der Wöhlerversuche unter Zugschwellbeanspruchung ($R_\sigma = 0$). Für den Referenzzustand der allseitig bearbeiteten Biegeproben wird dabei bei der Grenzschwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\dot{U}} = 50 \%$ mit $\sigma_{a,n,k,50\%} = 197 \text{ MPa}$ eine um 35 MPa höhere Schwingfestigkeit erreicht als bei den Biegeproben mit reiner Rauheit ($\sigma_{a,n,k,50\%} = 162 \text{ MPa}$). Ein Vergleich zur Bauteilwöhlerlinie nach der FKM-Richtlinie [1] zeigt, dass diese zwar die Schwingfestigkeit über die gemessene mittlere Oberflächenrauheit R_z von $67 \mu\text{m}$ gut abschätzt, jedoch im Bereich der Zeitfestigkeit mit $k = 5,0$ eine deutlich zu steile Neigung abschätzt. Diese liegt für den Referenzzustand und die Biegeproben mit reiner Rauheit bei $k = 12,0$ bzw. $k = 9,0$.

Für die Biegeproben mit Lamellengrafit in ferritischer bzw. perlitischer Randzone zeigt sich ein weiterer Abfall der Schwingfestigkeit. Dies ist auf die hohe innere Kerbwirkung des Lamellengrafit in der Randzone zurückzuführen, wodurch auch eine höhere Festigkeit der Matrix (perlitisch gegenüber ferritisch) zu keiner Schwingfestigkeitssteigerung führt (vgl. Bild 7). Dies erlaubt eine gemeinsame Auswertung der Schwingproben mit ferritischer und perlitischer Randzone. Für die Schwingfestigkeit wird bei N_G nur noch eine Nennspannungsamplitude von $\sigma_{a,n,k,50\%} = 107 \text{ MPa}$ erreicht.

Weitere Untersuchungen der Gusshautrandzone hinsichtlich der Dicke und Beschaffenheit der ferritischen und perlitischen Eisenmatrix innerhalb der Randentartung zeigten zudem, dass diese je Schwingprobe mehr oder weniger stark ausgeprägt ist. Basierend auf metallografischen Untersuchungen konnte dabei gezeigt werden, dass eine Einteilung der tatsächlich vorliegenden Randzone in vier Dickenkategorien möglich ist. Daraus geht hervor, dass Biegeproben mit einer tendenziell dünnen Randzone eine höhere Schwingfestigkeit erreichen (vgl. Bild 7). Dies legt die Vermutung nahe, dass nicht



AF

Weitere Informationen:
Dr.-Ing. Christoph Bleicher
 Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF,
 E-Mail: info@lbf.fraunhofer.de
 Internet: www.lbf.fraunhofer.de

Kim Bergner M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
 Systemzuverlässigkeit und Maschinenaustik SAM, TU Darmstadt,
 E-Mail: info@sam.tu-darmstadt.de
 Internet: www.sam.tu-darmstadt.de

die Matrix der Randzone, sondern viel mehr deren Dicke einen entscheidenden Einfluss auf die Schwingfestigkeit der Bauteile besitzt.

Um den Einfluss der Randschicht zu beschreiben, wurde zu jeder Biegeprobe nach dem Schwingfestigkeitsversuch die Randschicht vermessen und eine mittlere Randschichtdicke bestimmt. Anschließend wurde mithilfe der an den Flachproben bestimmten dehnungsbasierten Kennwerte ein Randschichtfaktor n_{RS} für Wechsel- und Zugschwellbelastung ermittelt (**Bild 8**). Dieser dient im Zusammenhang mit der jeweilig auftretenden Randschichtdicke t_{RS} am Bauteil als Abminderungsfaktor für die Bauteilwöhlerlinie, die für einen Werkstoffzustand mithilfe allseitig bearbeiteter Proben bestimmt wird. Dies lässt die Abschätzung lokaler Beanspruchbarkeiten bei bekannter Dicke der Gusshautrandzone zu.

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem IGF-Vorhaben 18976 N der „FVG – Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V.“, das im Rahmen des Verbundprogramms IGF vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Die Autoren bedanken sich ebenfalls bei den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses.



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Adalbert Kutz M.Sc., Univ. Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek
 Gießerei-Institut der RWTH Aachen,
 E-Mail: sekretariat@gi.rwth-aachen.de
 Internet: www.gi.rwth-aachen.de

Literatur:
 [1] R. Rennert, E. Kullig, M. Vormwald, A. Esderts und D. Siegele, FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6. Auflage, Hrsg. VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/M., 2012.
 [2] A. Kutz, P. Martin und A. Bührig-Polaczek, Microstructural Adjustment of the Degenerated Graphite Layer in Ductile Iron for Targeted Evaluation and the Fatigue Properties, Proceedings of the Keith Millis Symposium on Ductile Iron, Hilton Head Island, SC, USA, 2018.