



Stranggießanlage für ein rundes Strangprofil bei Gontermann-Peipers in Siegen.

## Bruchmechanikkennwerte für Stranggusswerkstoffe aus Kugelgrafit

Zur Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte für Strangguss als Grundlage für die neue Stranggussnorm EN 16482: 2014 wurden Werkstoffproben an der Bergakademie Freiberg durchgeführt.

VON RALF GORSKI, SIEGEN

Technische Lieferbedingungen für metallische Werkstoffe sind ein wichtiges Bindeglied für das Werkstoffverständnis zwischen Materiallieferant und Kunden. Die konstruktiven Anforderungen für ein bestimmtes Bauteil resultieren in Bestellanforderungen an den Werkstoffwiderstand, meist in Form von z. B. Festigkeit und Zähigkeit. Die Mindestangaben für Festigkeit und Zäh-

igkeit in technischen Lieferbedingungen (Nominalwerte, sortiert meist nach festigkeitsorientierten Werkstoffklassen) ermöglichen eine sichere Anwendung des gewählten Werkstoffs in der Verarbeitung. Diese Vereinbarung ist damit ein wichtiger Bestandteil vieler Regelwerke, die in aufsichtspflichtigen Bereichen wie zum Beispiel Druckgeräten, Off-Shore-Installationen, Schiffbau, Stahlbau und Windenergie zur Anwendung kommen. Eine anerkannte und

praktisch anwendbare technische Lieferbedingung, die aktuelle technische Entwicklungen des Marktes widerspiegelt, ist damit eine wichtige Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit im Sinne von Ressourceneffizienz. Aber auch bei Schadensfällen und Reklamationen ist eine Norm auf dem aktuellen Stand der Technik eine wichtige Basis für die Bewertung und Einordnung durch Gutachter und Gerichte.

Die aktuell gültigen Normen für Gusseisen mit Lamellengrafit (DIN EN 1561) und für Gusseisen mit Kugelgrafit (DIN EN 1563) sind beide für das Sandgießverfahren erstellt worden und erfassen Gussbauteile mit einer Wanddicke bis maximal 200 mm. Werden Gussprodukte mit mehr als 200 mm Wanddicke bestellt, so sind die Mindesteigenschaften mit dem Hersteller zu vereinbaren. Im Fall von Gusseisen aus Strangguss sind die Normen damit häufig nicht mehr anwendbar, da diese bis 600 mm Wandstärke produziert werden. Außerdem stellen die Herstellungsarten Sandgießen und kontinuierliches Stranggießen an sich Unterschiede dar, welche vom jetzt gültigen Regelwerk zum Nachteil des Stranggusses nicht abgebildet werden. Die verschiedenen Werkstoffeigenschaften sind für den Konstrukteur aus dem Regelwerk oft nicht einfach zu erfassen. So wird teilweise nach der Eigenschaft Härte bestellt, um optimale Bearbeitungseigenschaften in der Fertigung der Bauteile zu erreichen, jedoch wurde das Bauteil bei der Bauteilauslegung mit der Zugfestigkeit berechnet. Dieser Ansatz der Norm, entweder Härte oder Zugfestigkeit zu bestellen, ist vielen Einkäufern von Gusseisen oft nicht klar. Zur Verbesserung dieser, für Stranggusshersteller im speziellen und für wirtschaftliche und ressourcenorientierte Anwendung im Allgemeinen hinderliche Normensituation wurde in den letzten Jahren eine neue Norm für Strangguss erarbeitet. Dabei konnten die Erfahrungen der Stranggusshersteller aus vielen Erprobungen, bisherigen Anwendungen und eigenen, zum Teil veröffentlichten Untersuchungen, genutzt werden, um die notwendigen verlässlichen Mindestkennwerte für Gussprodukte aus Strangguss in die neue Norm zu integrieren.

Hinsichtlich der Frage nach der Mindestzähigkeit wurde gegenüber den zitierten Normen bewusst ein neuer Weg beschritten, der darin besteht, dass man zu Zähigkeitseigenschaften, die meistens über den Kerbschlagbiegeversuch ausgedrückt werden, keine Angaben mehr macht. Die Erfahrung, dass Konstrukteure hier häufig die gleichen Maßstäbe ansetzen wie bei Walz- oder Schmiedestahl, führte vielfach zu Irritationen und Ausschluss des Stranggusses von einer vielversprechenden Anwendung. Da die Kerbschlagarbeit ohnehin keine unmittelbare Anwendung für eine quantitative Bauteilberechnung zulässt, muss man sich also daher für eine erfolgreiche und sichere Anwendung des Stranggusses die Frage stellen, welche anderen Prüfungen/Kennwerte für die Bauteilauslegung verwendet werden können [1].

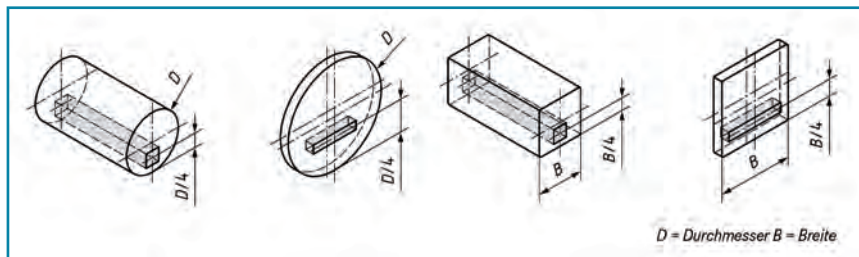


Bild 1: Entnahme der Proben aus Strangguss (5).

Tabelle 1: Untersuchte Werkstoffe und deren Kennwerte.

Werkstoff	Prüftemperatur	$R_{p0,2}$ (MPa)	$R_m$ (Mpa)	A(%)
EN GJS 400-18 C	RT	300 (291)	424 (424)	25,9 (25,5)
	-20 °C	330	453	23,3
EN GJS 500-7	RT	354 (358)	533 8(527)	15,1 (16,5)
	-20 °C	382	558	15,9
EN GJS 600-3C	RT	448 (436)	782 (719)	7,0 (7,5)
	-20 °C	473	753	2,9
EN GJS 400-18 ULT	RT	256 (247)	372 (371)	22,6 (23,5)
	-20 °C	277	397	19,6

RT = Raumtemperatur  
Wert in Klammern = Mittelwert aus 3 Proben

Als derzeit beste, weil technisch ausgereifte und allgemein anerkannte Alternative, sind bruchmechanische Kennwerte zu nennen. Diese ermöglichen dem Anwender eine angepasste Werkstoffauswahl im Hinblick auf Zähigkeit und Bauteilsicherheit, da eine zähigkeitsorientierte Bauteilberechnung möglich wird. Entsprechende Berechnungsrichtlinien und Prüfnormen sind national und international vorhanden z. B.: ISO 12135. Um für Strangguss bruchmechanische Kennwerte aus verschiedenen Produktionen zu erhalten, wurden durch Zusammenarbeit mit der Sektion Strangguss des Europäischen Gießereiverbands (CAEF) und allen europäischen Herstellern von Strangguss als Grundlage für die neue Stranggussnorm EN 16482:2014 Werkstoff erprobungen durchgeführt. Folgende Unternehmen waren beteiligt: ACO-Guss GmbH, Kaiserslautern, A/S Tasso, Odense, Dänemark, Contifonte S.A., Saverne, Frankreich, Gontermann-Peipers GmbH, Siegen, United Cast Bar Ltd., Derbyshire, Großbritannien. Die Versuche wurden an der Bergakademie Freiberg durchgeführt.

### Aufgabenstellung der Untersuchung an Stranggussproben

Die konstruktive Auslegung wird durch Kennwerte oder Materialeigenschaften beeinflusst. Dazu werden durch Zugproben

die Zugfestigkeit, Dehnung und die Streckgrenze ( $R_{p0,2}$ ) ermittelt. Diese Kennwerte stellen eine einachsige Beanspruchung für das Bauteil dar, eine dreiachsige Beanspruchung ist daraus nicht abzuleiten. Für die Erstellung der Bruchmechanikproben wurde deshalb Probematerial aus Strangguss aus den verschiedenen Kugelgrafitwerkstoffen mit den Kennwerten in **Tabelle 1** bereitgestellt.

Die statischen bruchmechanischen Versuche wurden bei -20 °C an fünf Parallelproben mit quasistatischer Prüfgeschwindigkeit durchgeführt, und die Kennwerte des J-Integrals nach ISO 12135 wurden bestimmt. Außerdem wurden die 0,2 %-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und die Zugfestigkeit  $R_m$  sowie der Elastizitätsmodul E bei Raumtemperatur und bei -20 °C aus dem gleichen Probematerial ermittelt, um die Proben hinsichtlich der Materialqualität mit der Norm EN 1563 vergleichen zu können. Die Festigkeitskennwerte wurden im statischen Zugversuch (an drei Parallelproben bei Raumtemperatur) und der Elastizitätsmodul über Laufzeitmessungen von Ultraschallwellen bestimmt. Das Versuchsmaterial wurde in Form von Rohlingen mit Aufmaß von der Gontermann-Peipers GmbH übergeben. Die Entnahme der Rohlinge nach Norm EN 16482:2014 (**Bild 1**) erfolgte ebenfalls durch das Siegener Unternehmen, die Probenfertigung

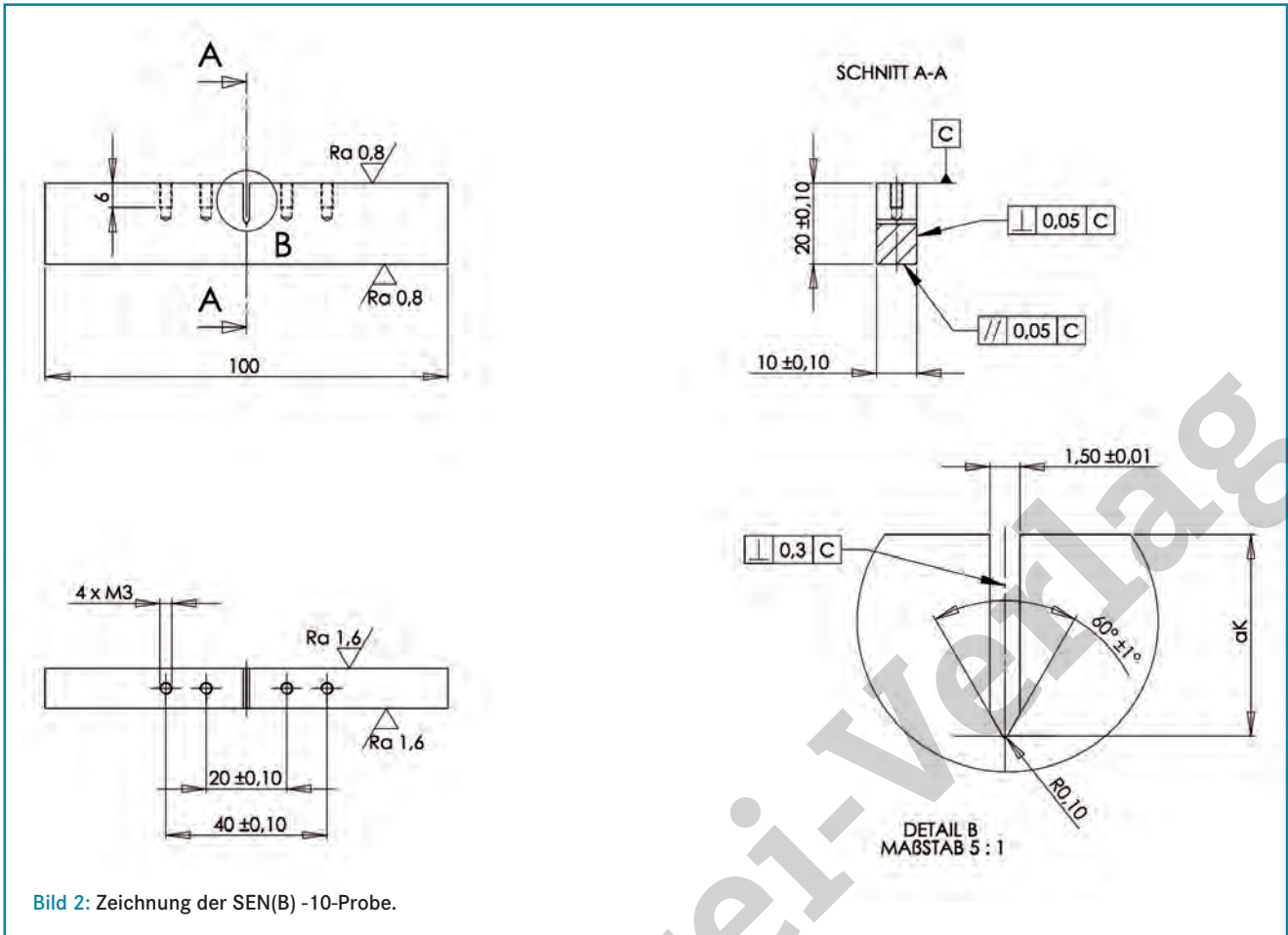


Bild 2: Zeichnung der SEN(B) -10-Probe.

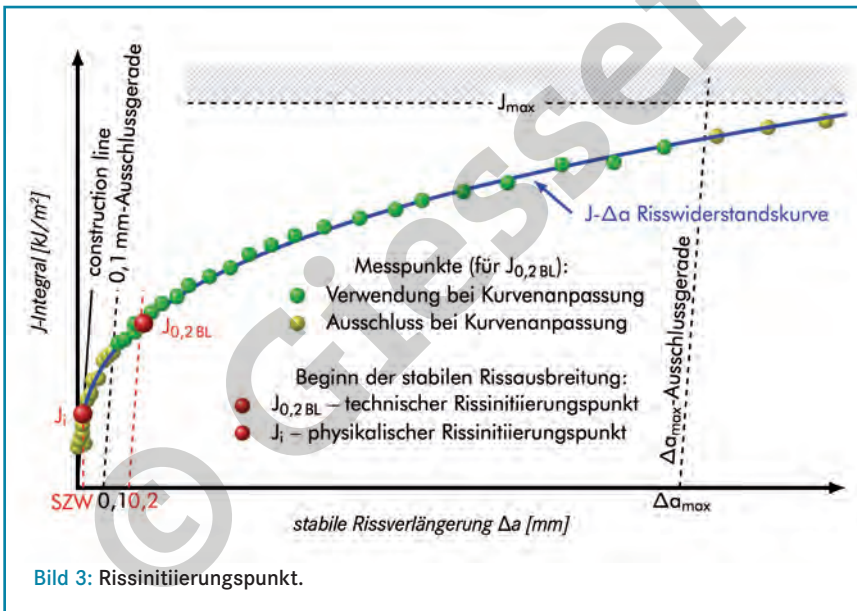


Bild 3: Rissinitiiierungspunkt.

durch die Technische Universität Bergakademie Freiberg [2].

### Ablauf und Auswertung der Versuche

#### Bruchzähigkeitsversuche

Die Bestimmung der statischen Bruchzähigkeit wurde nach ISO 12135 an seitengekertbten und mit einem 8 mm tiefen

Rissstarterkerb (Bild 2) versehenen SEN(B)-10-Proben der Abmessung 10 x 20 x 100 (BWL) mm durchgeführt. Bei -20 °C wurden fünf Parallelproben und bei Raumtemperatur wurden drei Parallelproben je Werkstoff geprüft. Die Ermüdungsrisserzeugung erfolgte an einer Resonanzprüfmaschine Typ „Rumul Testronic 250 kN“. Die Versuche wurden mit der Rumul-Software „Anschwingen“ gefahren.

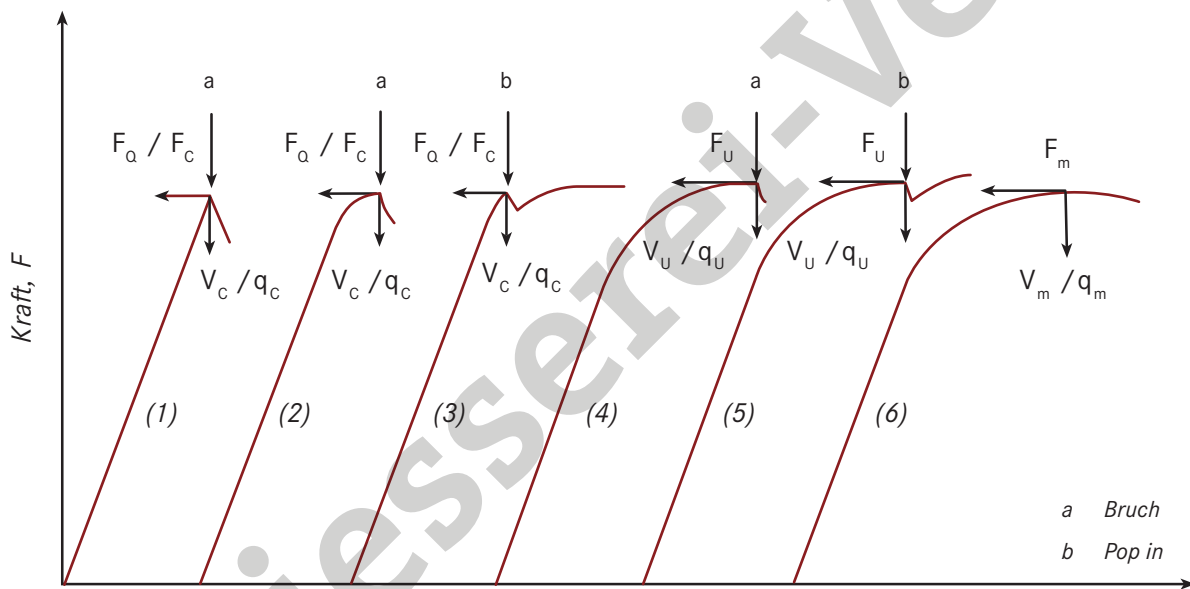
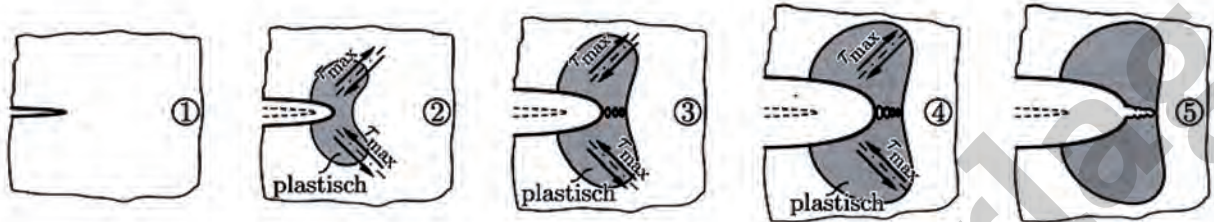
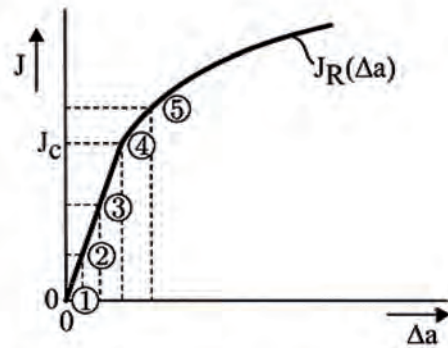
Als Versuchsbedingungen der Ermüdungsrisserzeugung wurden festgelegt:

- > Umgebungsbedingungen: Raumtemperatur, Laborluft
- > Prüfaufbau: Drei-Punkt-Biegung mit einer Stützweite  $S = 80$  mm, Kraftverhältnis:  $R = 0,1$
- > Systematische Verringerung der Beanspruchung nach einem definierten Frequenzabfall (Gesamtstufenanzahl = 4),  $K_f = 13 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$  am Ende der Ermüdungsrisserzeugung
- > Einstellung einer Ermüdungsrislänge, die zu einem  $a/W$ -Verhältnis von ca. 0,5 führt.

Nach dem Seitenkerben mit einem Spitzkerbfräser ( $0,1 \times B$  auf jeder Seite) erfolgte die statische Prüfung an einer rechnergesteuerten, servohydraulischen Prüfmaschine Typ „MTS 880“. Die Abkühlung auf -20 °C wurde in einer Kühlkammer unter Verwendung von Stickstoffdampf realisiert. Die Versuchsdurchführung erfolgte mit der MTS-Software „Fracture Toughness“ unter definierten normativen Bedingungen.

Bei der Anwendung der Elastischen Plastischen Bruchmechanik (EPBM) mit dem Kennwert J-Integral wird allgemein davon ausgegangen, dass ein physikalischer Rissinitiiierungspunkt existiert, der

**Bild 4:** Was ist Blunting und wie verläuft die Rissinitiation?



Note 1  $F_o$  ist die maximale Kraft die zur vorläufigen  $K_{IC}$  Bestimmung genutzt wird.

**Bild 5:** Unterschiedliche Rissausbreitung.

als ein „auf ein Bauteil übertragbarer Kennwert“ angesehen wird. Die Bestimmung dieses physikalischen Rissinitiiierungswertes (Bild 3) ist seit langem Bestandteil von Expertendiskussionen. Dabei haben sich 2 Pole herausgebildet, die in Genauigkeit und Praktikabilität ihren wesentlichen Unterschied finden. Im Allgemeinen wird bei der Ermittlung von elastisch plastischen J-Integral Werten eine Risswiderstandskurve aufgenommen, welche das J-Integral als Funktion des stabilen Risswachstums beinhaltet. Diese Kurve wird mit der Einprobenmethode (Compliance Technik) oder der Mehrprobenmethode ermittelt. Ähnlich zur Be-

stimmung der  $R_{p0,2}$ -Dehngrenze im einachsigen Zugversuch wird der kritische Wert des J-Integrals, also der übertragbare Kennwert, aus dem Schnittpunkt einer Hilfsgeraden, mit der Risswiderstandskurve ermittelt. In der ursprünglichen amerikanischen Norm der ASTM E 813 orientierte sich die Konstruktion der Hilfsgeraden an der Beobachtung, dass sich bei duktilen Werkstoffen vor der Rissauslösung eine Ausrundung der Risspitze einstellte, das sogenannte Blunting. Die entsprechende Hilfsgerade erhielt dann anhand einer allgemeinen Bauteilfließblastlösung der Form  $(R_{p0,2} + R_m)/2$  eine Steigung und wurde per Definition

an der Abszisse am Punkt  $\Delta = 0,2$  mm angesetzt. Dieser Wert wurde im Laufe der Jahre vielfach kritisiert, da nachgewiesen werden konnte, dass der Wert schon beträchtliche Anteile an stabilem Risswachstum enthält und damit nicht mehr als physikalischer Initiierungswert bezeichnet werden kann. Demgegenüber zeichnet er sich durch ein hohes Maß an Praktikabilität und Reproduzierbarkeit aus, da der Schnittpunkt die Risswiderstandskurve im abflachenden Teil erfasst, was zu einer geringeren Streuung führt. Untersuchungen zur Erfassung des tatsächlichen Initiierungswertes führten zu der Entwicklung der Stretch Zone Width

Tabelle 2: : E-Modul und Bruchzähigkeit.

Werkstoffkurzzeichen	Prüftemperatur	Elastizitätsmodul b in GN/m <sup>2</sup>	Bruchzähigkeit a,c in MPa √m
		E	K <sub>J</sub>
EN-GJS-400-18C-LT	RT	169	43,7
	- 20 °C	170	-
EN-GJS-400-18C	RT	171	50,3
	- 20 °C	172	-
EN-GJS-500-7C	RT	177	41
	- 20 °C	178	-
EN-GJS-500-14C	RT	173	46,5
	- 20 °C	175	-
EN-GJS-600-3C	RT	166	26,3 <sup>(KIC)</sup>
	- 20 °C	167	-

a Mittelwert aus 3 Messungen.  
b Mittelwert aus 5 Messungen.  
c An SEN (B) 10 Probenstück nach ISO 12135 geprüft [14].

(SZW)-Methode (Bild 4). Dabei wird angenommen, dass die Größe der SZW (also die auf der Probe nach dem Versuch mittels Rasterelektronenmikroskop vermessbare Ausdehnung der Blunting Zone in Risswachstumsrichtung) ein Maß für die Initiierung ist. Entsprechend wird mit dieser Eingangsgröße der Startpunkt der Hilfsgeraden auf der Abszisse abgetragen und eine Gerade ohne Steigung errichtet. Der Schnittpunkt liegt jetzt meistens im steilen Anstiegsbereich der Risswiderstandskurve und ist entsprechend streuanfällig hinsichtlich der Genauigkeit der Risswiderstandskurveermittlung im Anfangsbereich und der Stretch Zone Width Messung, die einige Erfahrung und ein Rasterelektronenmikroskop erfordert.

Ferner gibt es für die Anwendung bruchmechanischer Kennwerte der EPBM eine weitere Besonderheit, die eine Verknüpfung mit den einfacheren Rechenmethoden der Linear Elastischen Bruchmechanik (LEBM) auf der Beanspruchungsseite (rissstreibende Kraft) ermöglicht. Diese besteht darin, dass J<sub>I</sub>- und J<sub>C</sub>-Werte in einen äquivalenten Spannungsintensitätsfaktor K<sub>J</sub> oder auch K<sub>mat</sub> genannt nach folgender Gleichung, umgerechnet werden können:

$$K_J = \sqrt{\frac{E \cdot J_I}{1 - \nu^2}}$$

Falls das Werkstoffverhalten keine Aufnahme einer Risswiderstandskurve zulässt (z. B. infolge einer instabilen Rissausbrei-

tung evtl. auch nach anfänglich stabilem Risswachstum), wird entweder nach dem K-Konzept (K<sub>IC</sub>, Kurventyp (1) evtl. auch (2) und (3) oder dem J-Integral-Konzept am Instabilitätspunkt (J<sub>C</sub> bzw. J<sub>UC</sub>, Kurventyp (4) und (5) in Bild 5 ausgewertet. Bei der Anwendung der kritischen J-Integralwerte am Instabilitätspunkt J<sub>UC</sub> ist zu beachten, dass dieser Wert nicht auf andere Bauteildimensionen übertragbar ist und auch nicht in einen kritischen Spannungsintensitätsfaktor umgerechnet werden darf. Der J<sub>C</sub>-Wert kann dagegen direkt verwendet werden, da er keine Anteile von stabilem Risswachstum enthält, aber gegenüber dem K<sub>IC</sub>-Wert den Effekt lokaler Plastizität vor der Risspitze richtig berücksichtigt.

**Bestimmung des E-Moduls**

Die elastischen Eigenschaften sind u. a. von der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen im Werkstoff abhängig. Die Anregung einer elastischen Welle kann z.B. durch geeignete Ultraschallprüfköpfe erfolgen. Üblicherweise wird nach dem Impuls-Echo-Verfahren gearbeitet, d. h. es werden Schallimpulse (als Longitudinal- oder als Transversalwelle) in das Werkstück gesendet und die Zeit bis zum Rückwandecho ermittelt. Bei Kenntnis der Länge des Schallweges (d. h. der doppelten Wandstärke) können die entsprechenden Schallgeschwindigkeiten VL und VT abgeleitet werden. Die elastische Konstante Elastizitätsmodul E kann dann bei Kenntnis der Dichte p berechnet werden [3]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Versuchsergebnisse**

**Ergebnisse der statischen Bruchmechanikanalyse bei Raumtemperatur**

An den verschiedenen Gusswerkstoffen wurde bei Raumtemperatur die Bestim-

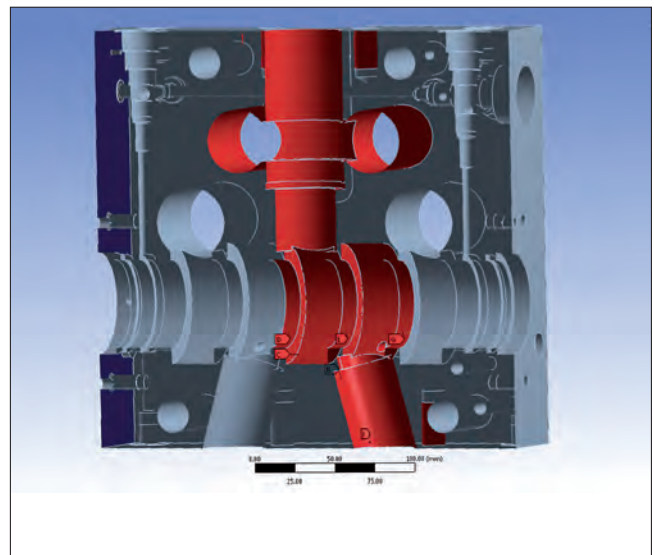
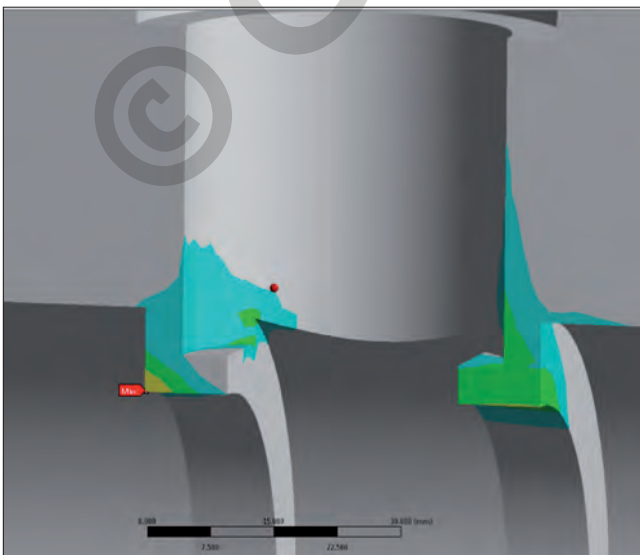


Bild 6: Bruchmechanische Berechnung bei kritischen Regionen eines Hydraulikblocks.

mung der Bruchzähigkeit nach ISO 12 135 durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind: Bei Raumtemperatur zeigt nur der Werkstoff EN GJS 600 - 3 C kein elastisch-plastisches Werkstoffverhalten mit stabilem Risswachstum. Aus den Erfahrungen mit dem GJS 400 (z. B. umfangreiche Castor-Untersuchungen) wurde der bauteilübertragbare Rissinitiierungspunkt  $J_i/c_i$  analytisch aus dem Schnittpunkt der Risswiderstandskurve mit der „construction line“ ermittelt. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

### Ergebnisse der statischen Bruchmechanikanalyse bei - 20 °C

Bei - 20 °C zeigen nur die Werkstoffe EN GJS 400 - 18C, EN GJS 500 7 CD und EN GJS 400 18 ULT ein stabiles Risswachstum. Es konnten ohne REM-Untersuchungen keine bauteilübertragbaren Rissinitiierungspunkte  $J_i$  bei diesen Temperaturen ermittelt werden. Folgende Mittelwerte wurden für die Werkstoffe ermittelt:

EN GJS 400 - 18C:  $J_{0,2BL} = 41,0 \text{ kJ/m}^2$   
 EN GJS 500 - 7CD:  $J_{0,2BL} = 30,5 \text{ kJ/m}^2$   
 EN GJS 400 - 18ULT:  $J_{0,2BL} = 50,0 \text{ kJ/m}^2$

### Zusammenfassung

Die dargestellten Werkstoffuntersuchungen zeigen deutlich, dass Gusseisen mit Kugelgrafit auch bei Strangguss sehr gute Materialeigenschaften aufweist. Die Rissausbreitung ist bei den geprüften Temperaturen nicht spröde, sondern es ist von einer duktilen stabilen Rissausbreitung auszugehen. Der Gefügeeinfluss auf die Werkstoffeigenschaften korrespondiert mit dem Abfall an Ferrit zu mehr Perlit. Auch bei dem Werkstoff EN GJS 500 - 14 mit 100 % Ferrit, ist trotz des hohen Siliziumanteils die Rissausbildung stabil duktil. Die bruchmechanischen Untersuchungen an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg zeigen, dass es zusätzlichen Bedarf für Untersuchungen mit dem Rastermikroskop an den Bruchflächen gibt, um das Bruchverhalten noch detaillierter zu beschreiben.

Die bisher häufig verfolgte Praxis, an jedem einzelnen Bauteil eine Bruchmechanikuntersuchung durchzuführen, sollte wegen der verfahrensspezifischen Merk-

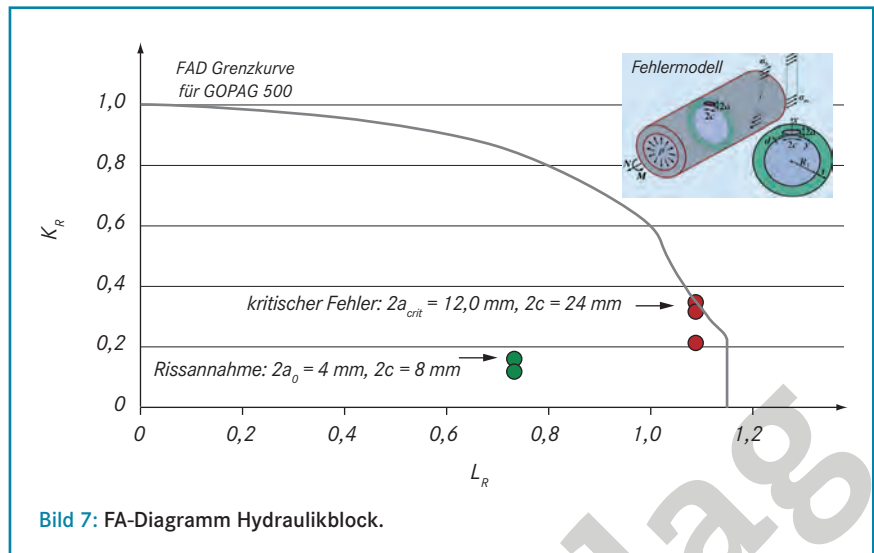


Bild 7: FA-Diagramm Hydraulikblock.

male für den Strangguss nur bedingt gelten, da für die geometrisch eindeutigen Halbzeuge in Rund- und Vierkantabmessungen sehr konstante Gießbedingungen erzielt werden und daher auch homogene Eigenschaften vorliegen.

So ist zum Beispiel die Rissinitiierung und die Rissausbreitung sehr vom Gefüge, der Teilchengröße und damit von den Gießparametern abhängig. Bei Strangguss sind diese weitgehend konstant. Folglich ergibt sich für den Konstrukteur eine gute Basis zur Berechnung mit den standardmäßig ermittelten Werkstoffkennwerten oder mit vereinbarten Mindesteigenschaften.

In einem Kundenprojekt [6] wurde für einen Hydraulikblock bei einer Belastung von 420 bar eine FEM-Berechnung durchgeführt und die Belastungsspitzen ermittelt. Um Bauteilversagen durch Rissbildung zu bewerten, wurde eine bruchmechanische Berechnung auf Rissinitiierung für kritische Positionen bei einem Hydraulikblock durchgeführt (Bild 6). Eine Position im sogenannten Spool Hous wurde mit dem in Bild 7 dargestellten Modellrohr mit innenliegendem Fehler unter Innendruck erfasst. Die Ergebnisse der Beanspruchungsrechnungen und der Risszähigkeitsprüfung wurden zu Grunde gelegt, um für einen Modellfehler von 4 mm Durchmesser und 8 mm Länge die Bauteilsicherheit zu ermitteln. Das Ergebnis ist im Failure Assessment Diagramm (FA) in Bild 7 dargestellt. Die grünen Bemessungspunkte liegen innerhalb

des Diagramms und zeigen gegenüber den Grenzpunkten, die sich bei einer weiteren Fehlervergrößerung ergeben würden (rote Punkte), eine deutliche Sicherheit. Der kritische Fehler beträgt 12,2 mm Höhe und 24,4 mm Länge bei einem Druck von 420 bar. Diese Art von Sicherheitsberechnungen geben dem Konstrukteur deutliche Hinweise auf die Eignung des eingesetzten Materials und der gewählten Konstruktion. Es werden weitere Untersuchungen zu diesem Thema folgen, die dann ein größeres Spektrum an Herstellern und Werkstoffen sowie weitere Proben mit einbeziehen.

Ralf Gorski, Geschäftsführer Gontermann-Peipers GmbH, Siegen

### Literatur:

- [1] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen, Handbuch für Gusserzeuger und Gussverwender, Verlag Schiele & Schön, 1996
- [2] Prüfbericht vom 21.02.2012 der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Bestellnummer 130379
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Norm DIN EN 843-2 Teil 2 Bestimmung des Elastizitätsmoduls, März 2007
- [4] ISO 12135:2002, Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness
- [5] pr EN 16482 (2012) Gießereiwesen – Gusseisen- Strangguss
- [6] Interner Untersuchungsbericht IWT (Dr. Langenberg) an einem Hydraulikblock bei 420 bar Druckbelastung