

Ermittlung von Bruchmechanik

Kennwerten an Strangguss-Werkstoffen aus Kugelgraphit

1 Einleitung

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 Zähigkeit 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 Druckgeräte, Off-Shore Installationen, Schiffbau, Stahlbau und Windenergie zur Anwendung kommen. Eine anerkannte und praktisch anwendbare technische Lieferbedingung, die aktuelle technischen Entwicklungen des Marktes widerspiegelt, ist damit eine wichtige Voraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit in 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 Grauguss (DIN EN 1561) und für Kugelgraphitguss (DIN EN 1563), sind beide für Sandguss 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 Herstellungsart Sandguss und kontinuierlicher Strangguss 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 oben 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].

Als derzeit beste, weil technisch ausge-
 rifte und allgemein anerkannte Alter-
 native, sind bruchmechanische Kenn-
 werte zu nennen. Diese ermöglichen
 dem Anwender eine angepasste Werk-
 stoffauswahl im Hinblick auf Zähigkeit
 und Bauteilsicherheit, da eine zähig-
 keitsorientierte Bauteilberechnung mög-
 lich wird. Entsprechende Berechnungs-

richtlinien und Prüfnormen sind na-
 tional und international vorhanden
 z. B.: ISO 12135. Um für Strangguss
 bruchmechanische Kennwerte aus ver-
 schiedenen Produktionen zu erhalten,
 wurden durch Zusammenarbeit mit
 der CAEF Sektion Strangguss und allen
 europäischen Herstellern von Strang-
 guss als Grundlage für die neue Strang-

gussnorm prEN 16482:2012 Werkstoff-
 erprobungen durchgeführt. Folgende
 Unternehmen waren beteiligt: ACO-
 Guss GmbH, A/S Tasso, Contifonte S.A.,
 Gontermann-Peipers GmbH, United
 Cast Bar Ltd. Die Versuche wurden an
 der Bergakademie Freiberg durchge-
 führt.

1. Aufgabenstellung der Untersuchung an Stranggussproben

Die konstruktive Auslegung wird durch
 Kennwerte oder Materialeigenschaf-
 ten 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 dreiaxiale Beanspruchung ist
 daraus nicht abzuleiten. Für die Erstel-
 lung der Bruchmechanikproben wurde

deshalb Probematerial aus Strangguss
 aus den verschiedenen Kugelgraphit-
 werkstoffen mit folgenden Kennwer-
 ten bereitgestellt:

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 (527)	15,1 (16,5)
	-20 °C	382	558	15,9
EN GJS 500 -14 C	RT	391 (395)	504 (504)	19,7 (23,0)
	-20 °C	421	535	20,3
EN GJS 600 -3C	RT	448 (436)	782 (719)	7,0 (7,5)
	-20 °C	473	753	2,9
EN GJS 400 -18 U LT	RT	256 (247)	372 (371)	22,6 (23,5)
	-20 °C	277	397	19,6

RT = Raumtemperatur
 Wert in Klammern = Mittelwert aus 3 Proben

Tabelle 1: Untersuchte Werkstoffe und deren Kennwerte

Die statischen bruchmechanischen Ver-
 suche wurden bei -20 °C an fünf Paral-
 lelproben mit quasistatischer Prüfge-
 schwindigkeit durchgeführt, und die
 Kennwerte des J-Integrals nach ISO 12135
 wurden bestimmt. Außerdem wurden
 die 0,2 %-Dehngrenze R_p , 0,2 und die
 Zugfestigkeit R_m sowie der Elastizitäts-
 modul E bei Raumtemperatur und bei

-20 °C aus dem gleichen Probemate-
 rial ermittelt, um die Proben hinsicht-
 lich der Materialqualität mit der Norm
 EN 1563 vergleichen zu können. Die Fest-
 tigkeitskennwerte wurden im statischen
 Zugversuch (an drei Parallelproben bei
 Raumtemperatur) und der Elastizitäts-
 modul über Laufzeitmessungen von
 Ultraschallwellen bestimmt. Das Ver-

suchsmaterial wurde in Form von Roh-
 lingen mit Aufmaß von GP übergeben.
 Die Entnahme der Rohlinge erfolgte
 durch GP nach Norm prEN 16482:2012
 und die Probenfertigung durch die
 Technische Universität Bergakademie
 Freiberg [2].

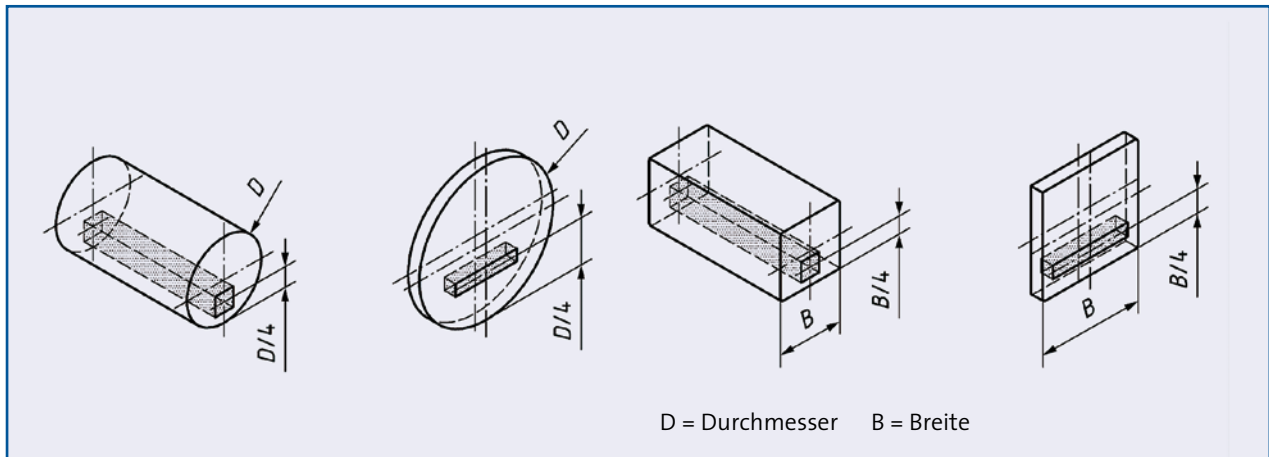


Bild 1: Entnahme der Proben aus Strangguss (5)

2. Ablauf und Auswertung der Versuche

2.1. Bruchzähigkeitsversuche

Die Bestimmung der statischen Bruchzähigkeit wurde nach ISO 12135 an seitengekerbten und mit einem 8 mm tiefen Rissstarterkerb (siehe **Bild 5** auf Seite 7) versehenen SEN(B) 10-Proben der Abmessung $10 \times 20 \times 100$ (BWL) mm durchgeführt. Bei -20°C wurden fünf Parallelproben und bei Raumtemperatur wurden drei Parallelproben je Werkstoff geprüft. Die Ermüdungsrissrisserzeugung erfolgte an einer Resonanzprüfmaschine Typ »RUMUL TESTRONIC 250 kN«. Die Versuche wurden mit der RUMUL-Software »Anschwingen« gefahren. Als Versuchsbedingungen der Ermüdungsrissrisserzeugung 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 Ermüdungsrissrisserzeugung
- Einstellung einer Ermüdungsrisslänge, 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 Rissinitiierungspunkt existiert, der als ein »auf ein Bauteil übertragbarer Kennwert« angesehen wird. Die Bestimmung dieses physikalischen Rissinitiierungswertes 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 Bestimmung der $R_{po,2}$ 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 Abrundung der Risspitze einstellte, das sogenannte Blunting. Die entsprechende Hilfsgerade erhielt dann anhand einer allgemeinen Bauteilfließlastlösung der Form $(R_{po,2} + R_m)/2$ 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. Dem gegenüber 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 (SZW)-Methode (**Bild 3**). Dabei wird angenommen, dass die Größe der SZW (also die auf der Probe nach dem Versuch mittels Raster Elektronenmikroskop 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 ent-

sprechend streuanfällig hinsichtlich der Genauigkeit der Risswiderstandskurvenermittlung im Anfangsbereich

und der Stretch Zone Width Messung, die einige Erfahrung und ein Raster-Elektronen Mikroskop erfordert.

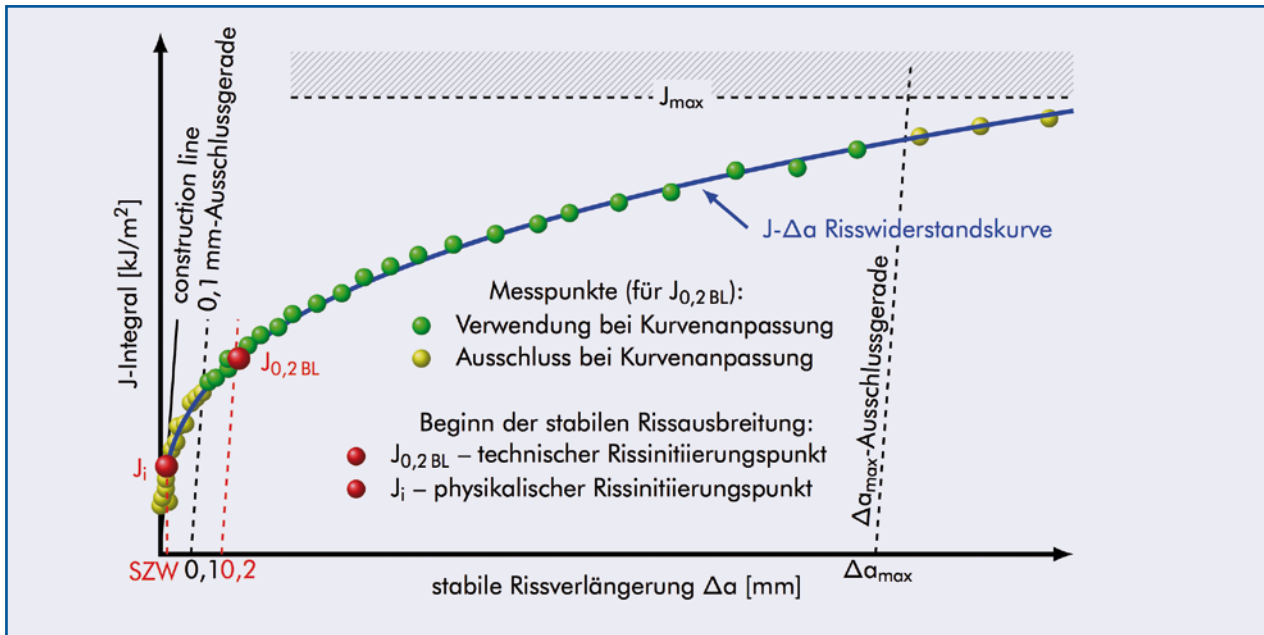


Bild 2: Rissinitierungspunkt

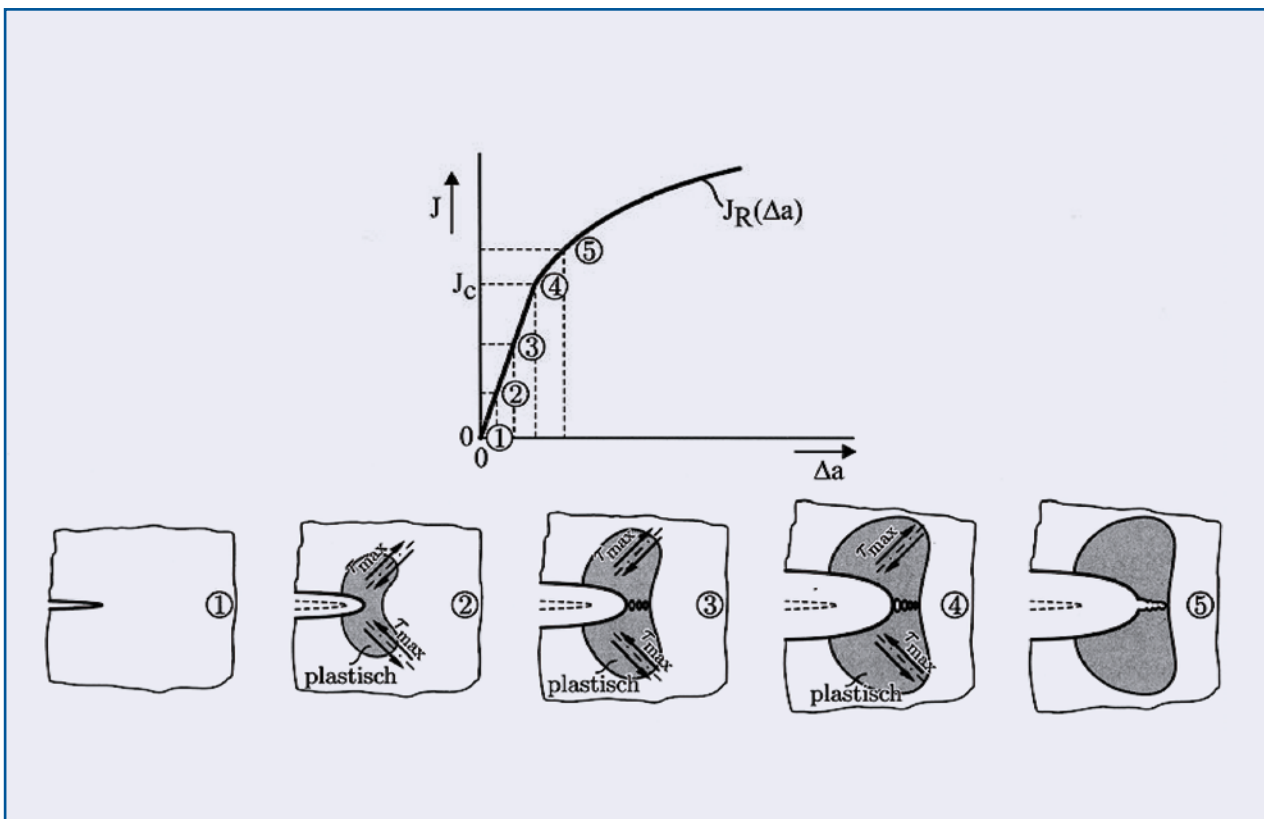


Bild 3: Was ist Blunting und wie verläuft die Rissinitierung?

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 (Risstreibende Kraft) ermöglicht. Diese besteht darin, dass J_i und J_c Werte in einen äquivalenten Spannungsintensitätsfaktor K_J oder

auch K_{mat} 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 instabi-

len Rissausbreitung evtl. auch nach anfänglich stabilem Risswachstum), wird entweder nach dem K_{Ic} -Konzept (K_{Ic} , Kurventyp (1) evtl. auch (2) und (3) oder dem J-Integral-Konzept am Instabilitätspunkt (J_c bzw. J_{uc} , Kurventyp (4) und (5) in **Bild 4**) ausgewertet.

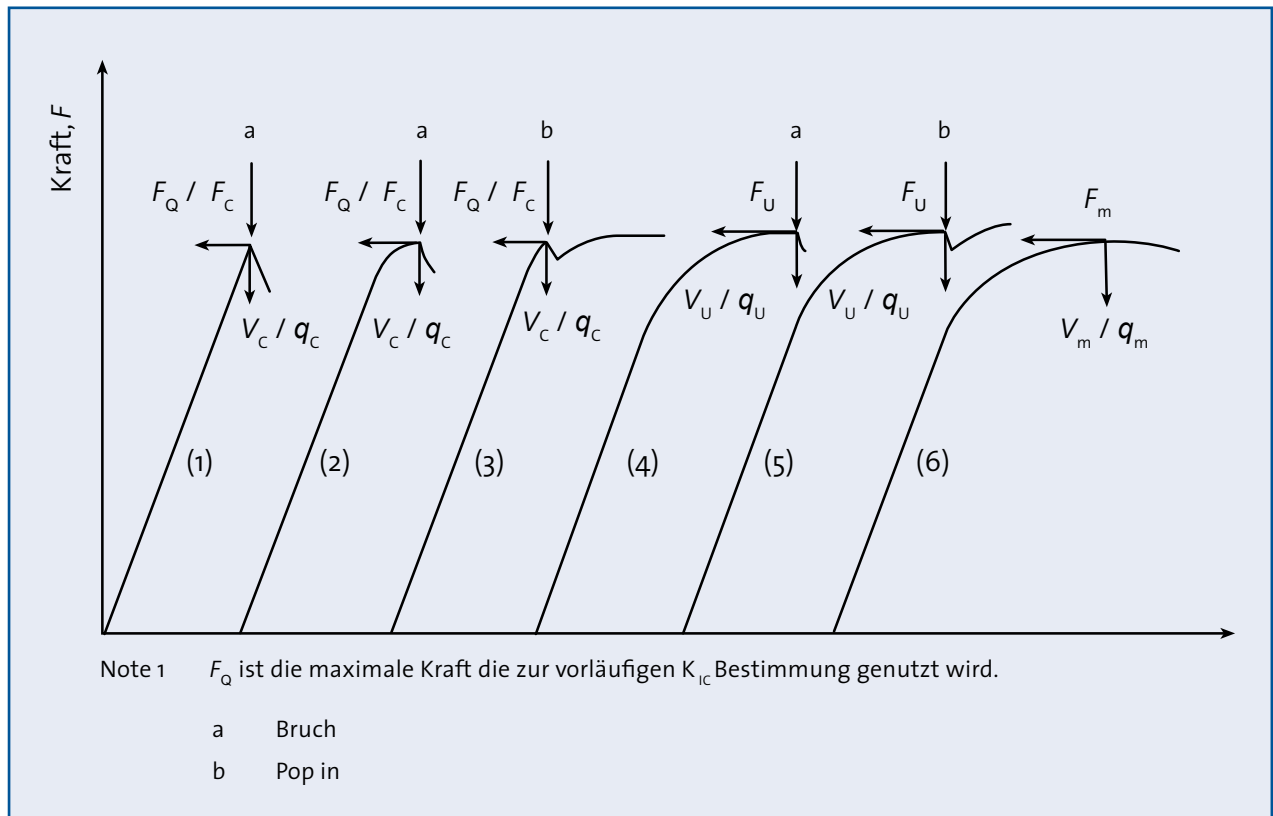


Bild 4 : Unterschiedliche Rissausbreitung

Bei der Anwendung der kritischen J-Integralwerte am Instabilitätspunkt J_{uc} ist zu beachten, dass dieser Wert nicht auf andere Bauteildimensionen übertragbar ist und auch nicht in ei-

nen kritischen Spannungsintensitätsfaktor umgerechnet werden darf. Der J_c Wert kann dagegen direkt verwendet werden, da er noch keine Anteile von stabilem Risswachstum enthält,

aber gegenüber dem K_{Ic} Wert den Effekt lokaler Plastizität vor der Rissspitze richtig berücksichtigt.

2.2. 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 Ultraschall-Prüfköpfe 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 Eintreffen des Rückwandechos 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 ρ berechnet werden [3]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Ergebnisse der statischen Bruchmechanikanalyse bei Raumtemperatur

An den verschiedenen Gusswerkstoffen wurde bei Raumtemperatur die Bestimmung der Bruchzähigkeit nach ISO 12 135 durchgeführt.

Die wichtigsten Ergebnisse bei RT 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/cI analytisch aus dem Schnittpunkt der Risswiderstandkurve 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 der EN GJS 400 18 ULT ein stabiles Risswachstum
- Es konnten ohne REM Untersuchungen keine bauteilübertragbaren Rissinitiierungspunkte J_i bei diesen Temperaturen ermittelt werden.
- Es wurden folgende Mittelwerte für die Werkstoffe ermittelt:

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

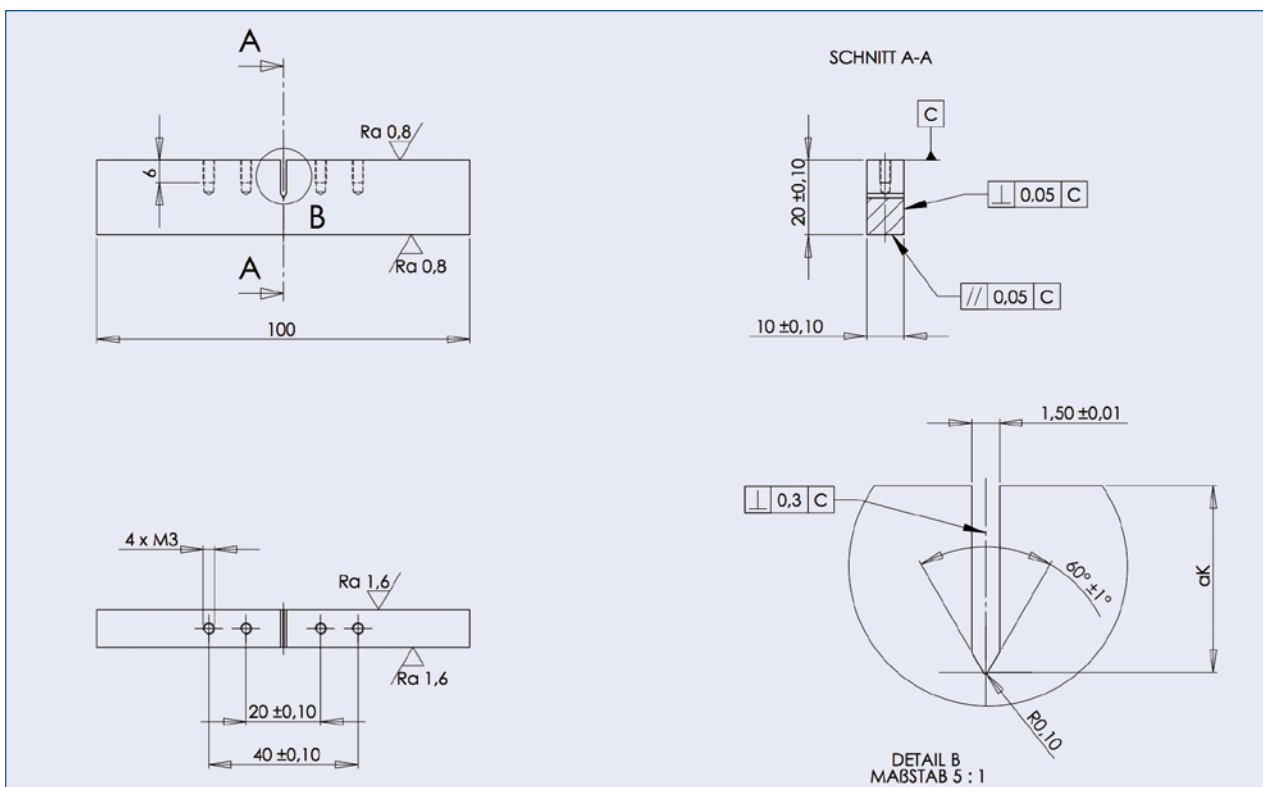


Bild 5: Zeichnung der SEN (B) 10-Probe

Werkstoffkurzzeichen \sqrt{m}	Prüf­temperatur	Elastizitätsmodul b	Bruch­zähigkeit a, c
		E	K_J
		GN/m ²	MPa
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 _(KIC)
	- 20 °C	167	—

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

Tabelle 2: E-Modul und Bruch­zähigkeit

4. Zusammenfassung

Die dargestellten Werkstoffuntersuchungen zeigen deutlich, dass Gusseisen mit Kugelgraphit 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 Silizium Anteils 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 Merkmale 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, wie in **Bild 6**, des Hydraulikblockes durchgeführt. Eine Position im sogenannten Spool Hous wurde mit dem in **Bild 7** dargestellten Modell Rohr 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 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 von dem eingesetzten Material und der gewählten Konstruktion. Es werden weitere Untersuchungen zu

diesem Thema folgen, die dann ein größeres Spektrum an Herstellern und Werkstoffen sowie mehr Proben mit einbeziehen.

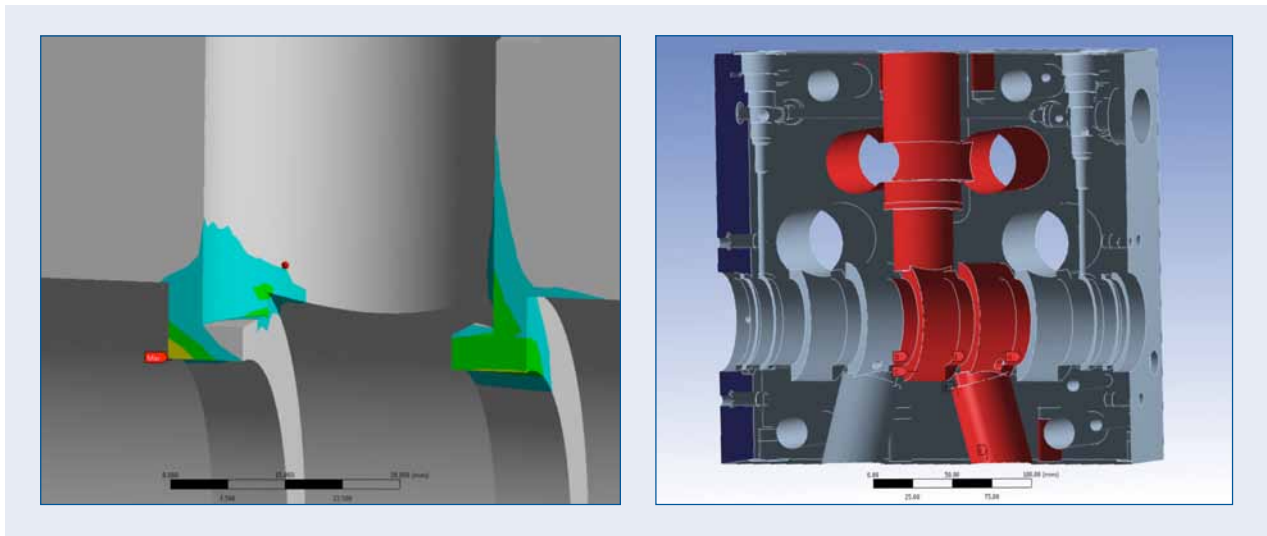


Bild 6

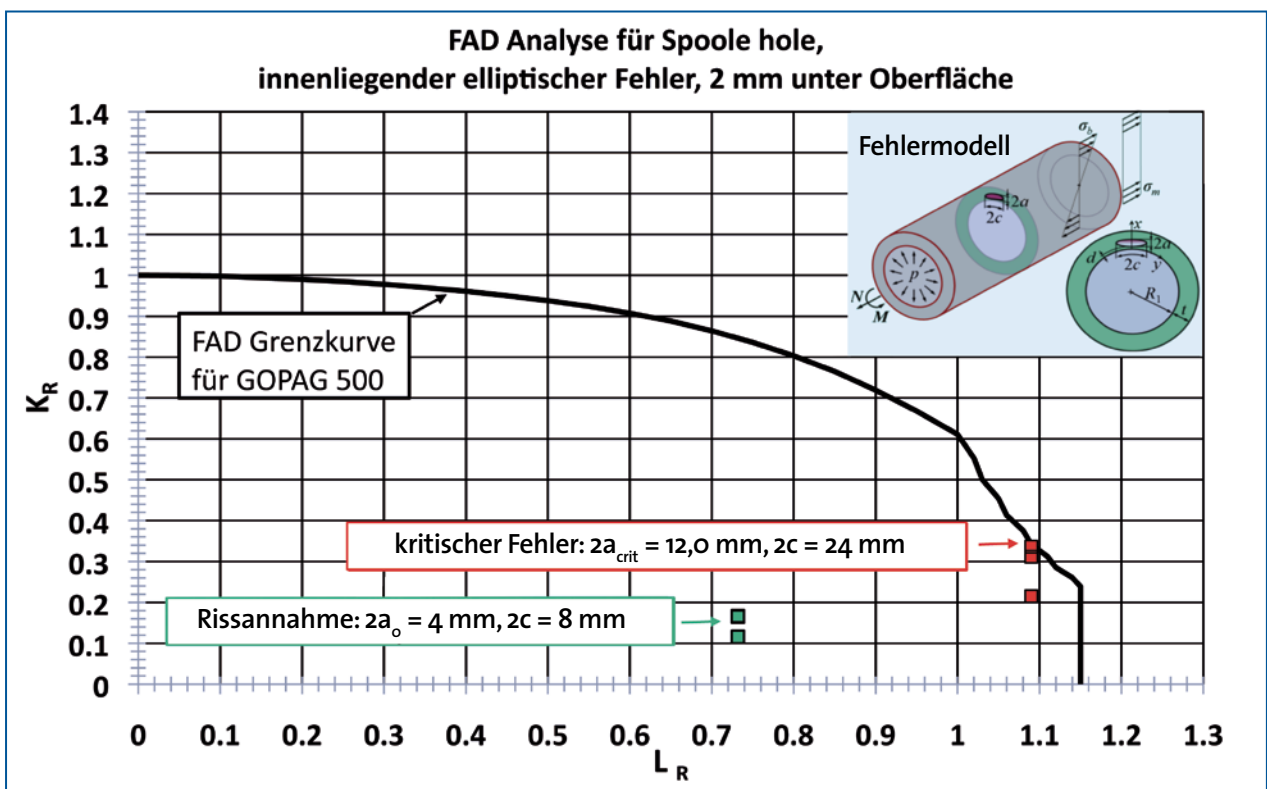


Bild 7: FA Diagramm Hydraulik Block

Literatur

- [1] Stefan Hasse , Duktiles Gusseisen, Handbuch für Gusserzeuger und Gussverwender, Verlag Schiele & Schön
- [2] Prüfbericht vom 21.02.2012 von 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