

Servohydraulische Prüfanlage (Zwick HB100) der Hochschule Kempten bei einer J-Integral-Prüfung einer 1" CT-Probe mit CTOD-Sensor nach ASTM E 1820.

verbunden, weshalb Anschaffung und Betrieb solcher Anlagen für Gießereien (speziell für mittelständische Unternehmen) nicht ökonomisch realisierbar sind. Die Auftragsprüfung stellt ebenfalls einen großen Kostenfaktor dar, weshalb seit 2013 an der Hochschule Kempten ein alternatives Konzept auf Basis des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches entwickelt wird.

### Grundlagen

Die Bruchmechanik ist grundsätzlich in zwei Bereiche zu trennen. Unter der linear elastischen Bruchmechanik (kurz LEBM) sind jene Konzepte gebündelt, welche das Material als linear-elastisches System betrachten. Als etabliertes Konzept aus der LEBM erfreut sich das Konzept auf der Basis des Spannungsintensitätsfaktors  $K$  (bzw. des Rissinitiiierungswertes  $K_{IC}$ ) großer Bekanntheit. Aufgrund der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens kann dieses Konzept strengenommen nur für spröde Materialien angewendet werden. Daher kann die LEBM um ein sogenanntes „Kleinstbereichfließen“ erweitert werden, welches minimale plastische Verformungen zulässt. Die Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors ist nach ASTM E 399 genormt und findet branchenübergreifend für eine große Anzahl an Werkstoffen Anwendung [1-2].

Die Fließbruchmechanik (FBM) ist im Vergleich zur LEBM in der Lage, nichtlineare und plastische Bruchvorgänge zu beschreiben. Die Grenzen der Prüfung liegen hier nicht mehr im Bereich der theoretischen Erfassung der Verformung, sondern in der Bildung von Scherlippen, welche im Regelfall nicht erfasst werden. Ein bekanntes Konzept ist die Ermittlung der Rissöffnungsweite (Crack Tip Opening Displacement, kurz CTOD) oder des Rissöffnungswinkels (Crack Tip Opening Angle, kurz CTOA). Ein weiteres Konzept der FBM ist das Rissspitzenintegral  $J$ , welches die vorliegende Energie an der Rissspitze während des Rissfortschrittes abbildet und damit eine geometrisch unabhängige energetische Aussage zum Widerstand des Materials gegen Rissinitiierung und -ausbreitung bereitstellt [1, 3].

Die Prüfung dieser Parameter ist nach ASTM E 1820 genormt und kann trotz er-

## Bruchmechanische Prüfung duktiler Gusseisen mit dem Kerbschlagbiegeversuch

VON JAKOB BREINER UND DIERK HARTMANN, KEMPTEN, ANDREAS BÜHRIG-POLACZEK, AACHEN

**D**uktile Gusseisen mit Kugelgraffit finden ihre Hauptanwendung im Windkraftanlagenbau, im allgemeinen Maschinen- und Anlagenbau sowie in der Fahrzeugtechnik. Speziell im Windkraftbereich sowie bei Sicherheits-

bauteilen ist der Bedarf an bruchmechanischen Prüfnachweisen zur Absicherung der Funktionsfähigkeit auch bei Extremfällen in den letzten Jahren stark gestiegen. Insbesondere der Sprödnachweis hat sich aufgrund diverser Zertifizierungsrichtlinien als bruchmechanischer Materialnachweis für tiefe Einsatztemperaturen etabliert. Die Prüfung ist jedoch mit enormen Anlagen- und Probenkosten

höher Komplexität des Prüfablaufs mittels vorgefertigter Prüfprogramme nach kurzer Einweisung durchgeführt werden.

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Duktilität und Zähigkeit von duktilem Gusseisen mit Kugelgrafit ist von der Verwendung der LEBM bzw. des Spannungsintensitätsfaktors  $K$  abzuraten. Daher wurde bei der Entwicklung der Prüfmethode als bruchmechanische Basis das Risspitzenintegral  $J$  ausgewählt.

Für eine bruchmechanische Prüfung ist generell ein Rissparameter (z. B. Risslänge, Rissöffnung, Rissöffnungswinkel etc.) notwendig. Dieser wird üblicherweise über einen zusätzlichen Sensor (z. B. CTOD Clip-On, s. Bild S. 50) erfasst. Alternativ kann die Risslänge direkt erfasst und verwendet werden. Bezüglich der Sensorik sind kontaktlose Messungen mittels 2-D- und 3-D-Hochgeschwindigkeitskameras sowie Lasermessungen möglich. Verfahren mit direktem Probenkontakt sind beispielsweise die bereits erwähnten Verfahren mit CTOD Clip-On-

## KURZFASSUNG:

In den letzten Jahren ist ein bruchmechanischer Prüfnachweis für viele Anwendungen von duktilen Gusseisen mit Kugelgrafit notwendig geworden. Die aktuellen Prüfmethode erfordern jedoch einen hohen Anlagen-, Probenherstellungs- und Arbeitsaufwand, um entsprechende Kennwerte zu ermitteln. Daher wurde seit 2013 an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten (im Zuge des BMBF Vorhabens „GussTough“) ein alternatives Prüfverfahren auf Basis des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches entwickelt.

Neben einigen kleineren Modifikationen wurde hierfür ein bestehendes Pendelschlagwerk mit einem auf der Elektropotenzialdifferenz basierenden Risslängenmesssystem nachgerüstet sowie die Prüfsoftware umfassend modifiziert und um ein variables Berechnungsmodell ergänzt. Als Nachweis der Befähigung des Anlagenprototypen wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt, mittels welcher eine Kalibrierung des instrumentierten Pendelschlagwerks als auch der Risslängenmessung durchgeführt werden konnte. Die Validierung anhand einer Referenzprüfung an einer servohydraulischen Prüfanlage ergab für EN GJS 400-18-LT eine  $J$ -Integral-Ergebnisdifferenz von 15,45 % ( $0,76 \text{ kJ/m}^2$ ) bei einer kombinierten Standardabweichung von 50,54 % ( $2,85 \text{ kJ/m}^2$ ) unter einer Datenbasis von ca. 40 Proben je Verfahren. Die hohe Streuung ist teilweise mit dem heterogenen Probenwerkstoff begründbar, weshalb zum aktuellen Zeitpunkt weitere Versuchsreihen an homogenen Werkstoffen sowie weitere Optimierungsmaßnahmen umgesetzt werden, um die Belastbarkeit der ermittelten Kennwerte zu erhöhen

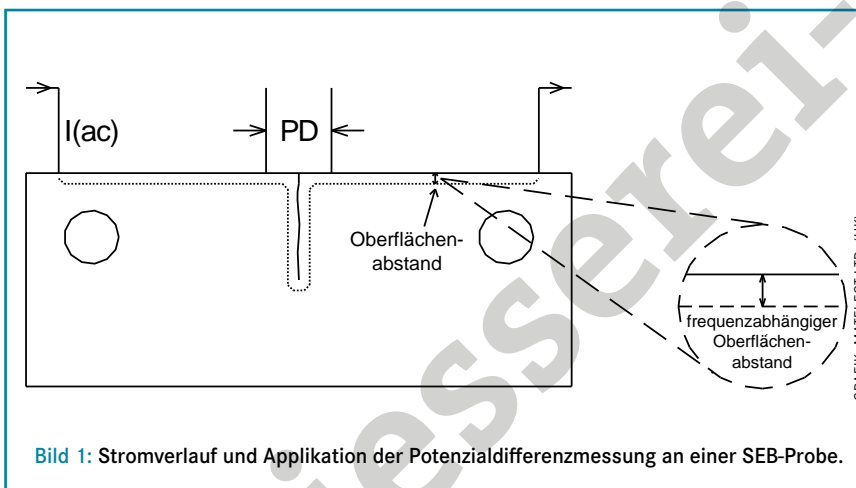


Bild 1: Stromverlauf und Applikation der Potenzialdifferenzmessung an einer SEB-Prob.



Bild 2: Bruchbild einer (per Low-Blow-Verfahren) angerissenen und oxidierten Probe zur Vermessung und zur Kalibrierung der Risslängenmessung.

Sensoren, Ultraschallmessungen sowie elektrische Verfahren. Aufgrund der verhältnismäßig kostengünstigen Beschaffung sowie der guten Handhabung kommt in der industriellen Anwendung hauptsächlich der CTOD Clip-On-Sensor zum Einsatz [1, 4].

Um eine einheitliche Grundlage bezüglich der Rissgrundscharfe (Radius am Kerbgrund) zu schaffen, wird die Probe vor der eigentlichen bruchmechanischen Prüfung zyklisch unterhalb des zu erwartenden Kennwertes belastet. Der Anriss der Probe (bis zu einem definierten Längenbereich) wird hierbei mittels einer zyklisch-dynamischen Prüfanlage inklusive der zusätzlichen Sensorik durchgeführt [1-3].

In der Regel erfolgt dieser Prozess mittels einer servohydraulischen Prüfanlage.

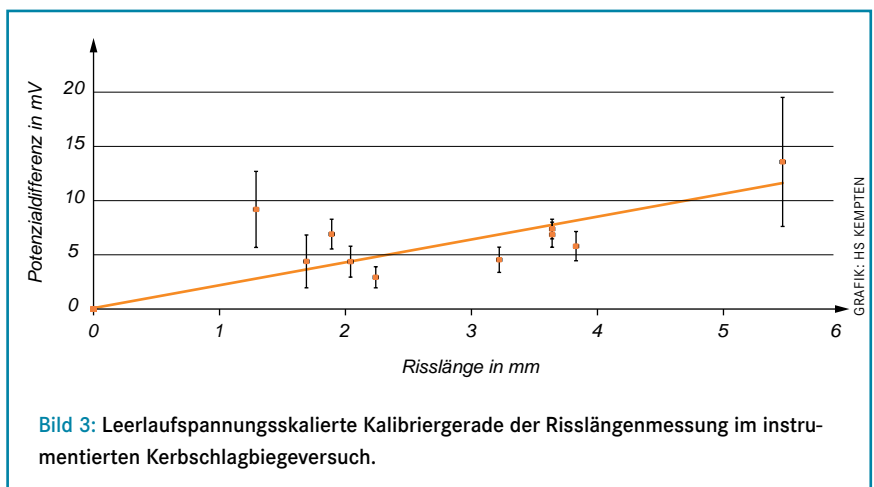


Bild 3: Leerlaufspannungsskalierte Kalibriergerade der Risslängenmessung im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch.

Hauptsächlich kommen dabei Kompaktzugversuch (CT)- oder Dreipunkt-Biegeversuch (SEB)-Proben zum Einsatz. In den letzten Jahren sind jedoch neue Systeme

wie z. B. Resonanz- oder linearelektrische Prüfanlagen entwickelt worden, mit welchen eine entsprechende Prüfung ebenfalls möglich ist [5, 6].

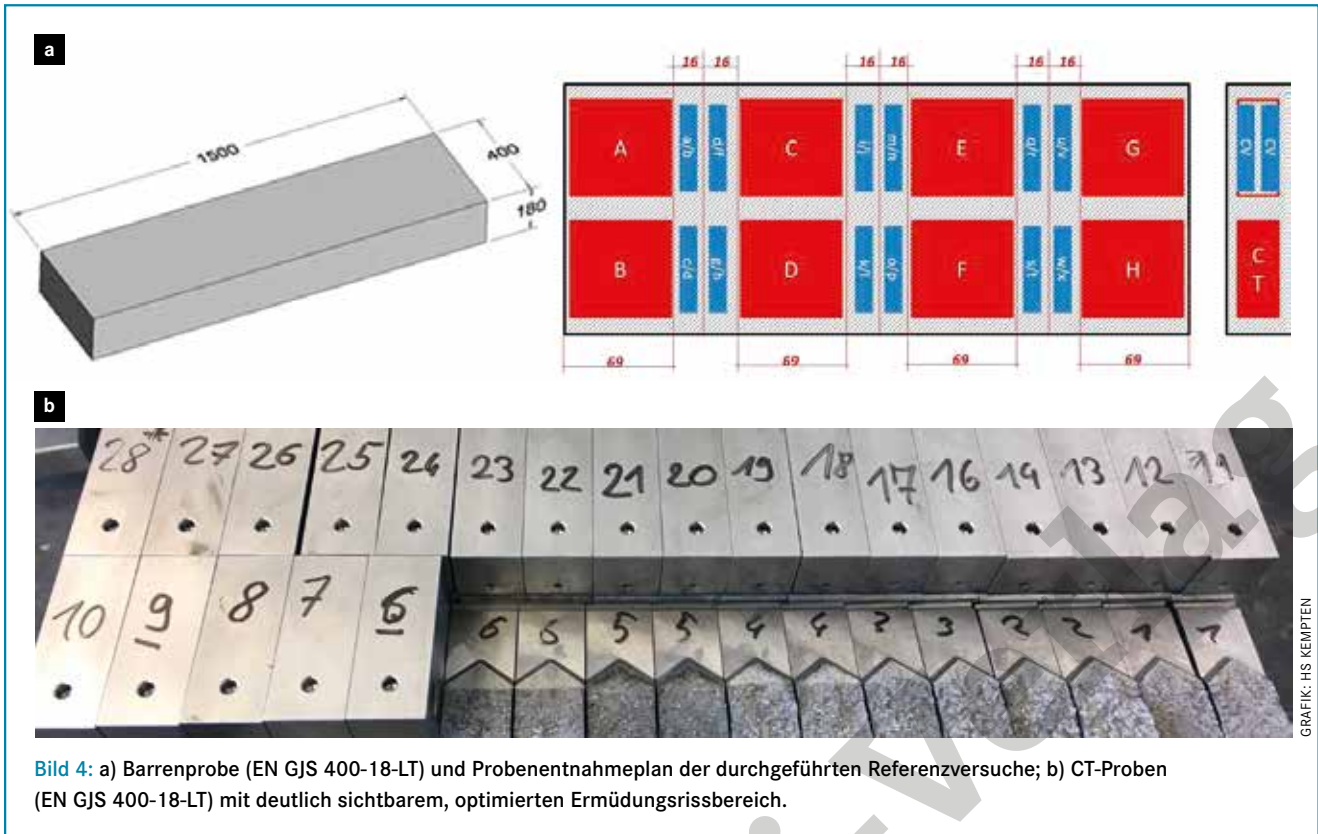


Bild 4: a) Barrenprobe (EN GJS 400-18-LT) und Probenentnahmeplan der durchgeführten Referenzversuche; b) CT-Proben (EN GJS 400-18-LT) mit deutlich sichtbarem, optimierten Ermüdungsrisssbereich.

In der praktischen Umsetzung resultiert hieraus ein hoher Aufwand – sowohl in der Anlagentechnik als auch in der Probenfertigung und der Arbeitszeit der Mitarbeiter. Bei Referenzprüfungen protokollierte Kenndaten ergaben einen durchschnittlichen Prüfaufwand von ca. 50 min pro Probe bei einer maximalen Einschwingfrequenz von 40 Hz. Unter der Berücksichtigung einer statistischen Sicherheit von mindestens drei Proben ergibt sich hieraus eine reine Prüfdauer von über 2,5 h. Hinzu kommt der Fertigungsaufwand für die relativ komplexen CT-Proben, welche sich um einen Kostenfaktor größer 4 (1“ CT gem. ASTM E 399/1820, zzgl. Sonderwerkzeugkosten) von üblichen Charpy-V-Proben unterscheiden.

### Entwicklung eines Anlagenprototypen auf Basis des Kerbschlagbiegeversuches

Der Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 ist ein weit verbreitetes und speziell in der Gießereibranche etabliertes Prüfverfahren zur Bewertung der Zähigkeit von Werkstoffen bei unterschiedlichen Temperaturen. Neben elastischer und plastischer Verformung sind ebenso bruchmechanische Prozesse wie die Rissinitiierung und der Rissfortschritt in der Kerbschlagarbeit aufsummiert. Ansatz der Anlagenentwicklung stellt hierbei die Separation der Bruchphasen mittels einer direkten

Risslängenmessung (abhängig von der Zeit) innerhalb des instrumentierten Kerbschlagversuches (nach DIN EN ISO 14556) dar. Mittels dieser Prüfdaten und einem modifizierbaren bruchmechanischen Berechnungsmodell ist die Berechnung des Risspitzenintegrals  $J$  möglich. Eine Anpassung dieses Modells zur Kompensation der geringen Rissgrundschärfe einer nicht angerissenen Charpy-V-Probe sowie der hohen Verformungsgeschwindigkeit von 5,5 m/s (Versuchsanlage mit 150-J-Hammer) des Pendelschlagwerks wurde durchgeführt.

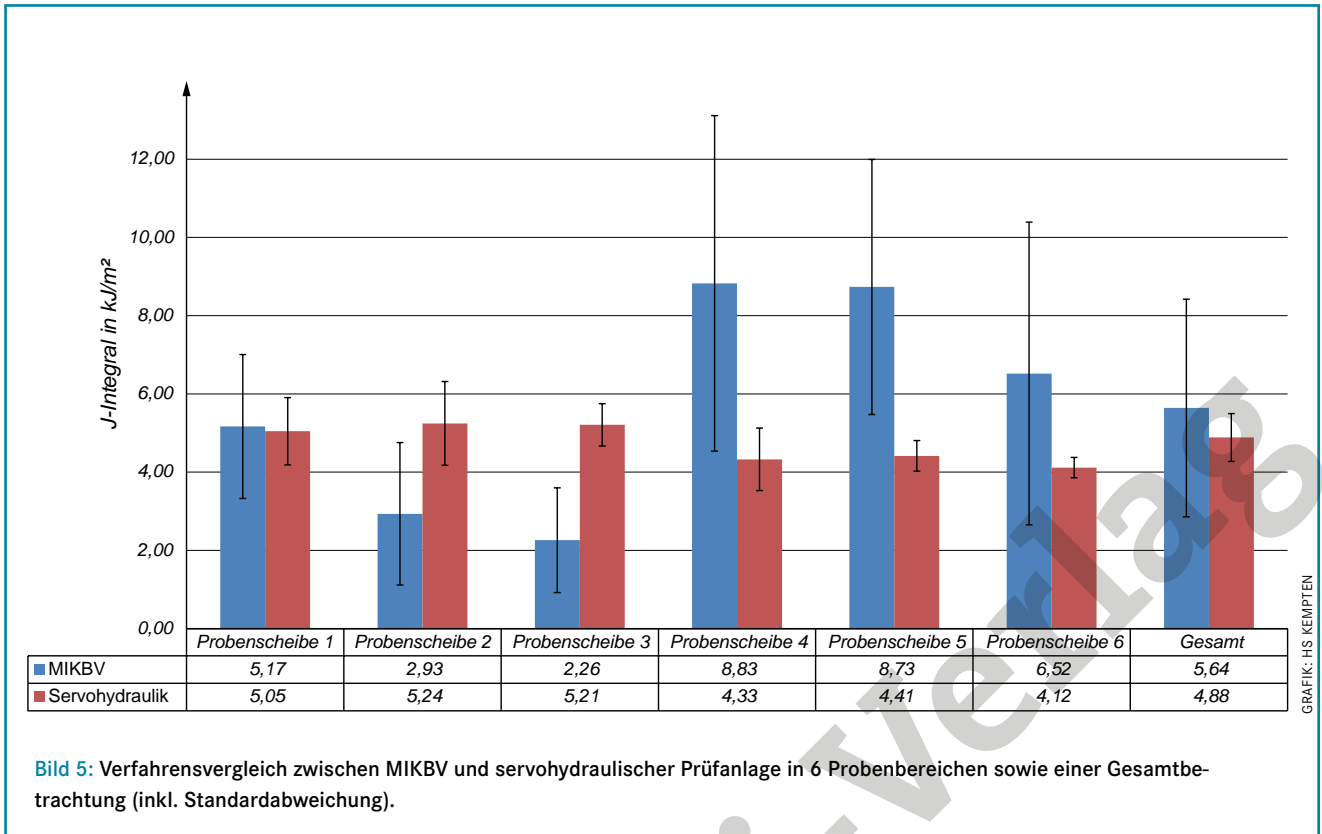
Als Verfahren zur direkten Risslängenmessung wurde die Bestimmung der Wechselstrom-Elektropotenzialdifferenz identifiziert. Neben einer hohen Abtastrate und Auflösung bietet dieses Verfahren eine ausgezeichnete Bauraum- und Prüfablaufeignung sowie eine hervorragende Temperaturbeständigkeit, was weiterhin eine nahezu beliebige Prüftemperatur erlaubt.

Wie in Bild 1 dargestellt, wird hierfür eine Probe mit zwei Versorgungs- und zwei Messkontakten ausgestattet. Zwischen den Versorgungskontakten wird ein Wechselstrom angelegt, welcher oberflächennah (Skin-Effekt) an der Bauteiloberfläche und der Kerbe bzw. dem Riss zwischen den Kontakten verläuft. Über die mittleren Messkontakte wird die Potentialdifferenz (PD) zwischen den Rissufern gemessen. Bei einer Zunahme der Riss-

länge steigt diese an, da der Stromweg und damit der elektrische Widerstand der Probe steigt [7].

Das Risslängenmessgerät ist direkt an den Ringpufferspeicher des Pendelschlagwerks (Zwick RKP 450) angeschlossen. Daher wird der Rissverlauf parallel zur Kraftmessung mit 1 MHz Abtastrate erfasst, direkt in die Prüfsoftware übertragen und dort weiterverarbeitet. Die Signalverarbeitung umfasst neben der Offsetbehebung, Filterung und Auswertung zusätzliche Funktionen wie eine Verpolungserkennung und eine automatische Kalibrierung anhand der Probenmaße. Zur parallelen Ermittlung der Proben temperatur (notwendig aufgrund der verlängerten Bestückungszeit) wurde ein Laserpyrometer in die Anlage integriert, welches die Proben temperatur kontaktlos erfasst und in das Prüfprotokoll übernimmt.

Zur Steigerung der Sensitivität der Potentialdifferenzmessung wurden zusätzlich die Widerlager der Prüfanlage elektrisch isoliert. Dies konnte mittels einer isolierenden Folierung, Kunststoff-Beilagscheiben sowie einem nichtleitenden Zentrierstift umgesetzt werden. Aufgrund dieses massiven Eingriffes in den Kraftfluss wurden umfangreiche Analysen zur Beeinflussung der Kerbschlagarbeit sowie der Maximalkraft durchgeführt. Hierbei konnten geringe Veränderungen festgestellt werden, welche jedoch nicht signifi-



**Bild 5:** Verfahrensvergleich zwischen MIKBV und servohydraulischer Prüfanlage in 6 Probenbereichen sowie einer Gesamtbetrachtung (inkl. Standardabweichung).

fikant ausfallen. Dies wurde bereits mehrfach durch Kalibrierungen der Anlage durch den Hersteller mit applizierter Isolierung nachgewiesen.

### Experimentelle Validierung

Als erster Schritt zur Validierung der Versuchsanlage wurde eine Kalibrierung der Risslängenmessung durchgeführt. Erste Versuche mittels drahtrodierter Kalibrierproben und statische Versuchsreihen (manuelle Rissinitiierung an Charpy-V-Proben) erzielten keine verwertbaren Ergebnisse. Nach Erprobung der Stop-Block-Methodik [1] (Abfangen des Pendelhammers an einer definierten Position durch eine Vorrichtung) wurde das Low-Blow-Verfahren [1] als anwendbare Kalibriermethode identifiziert. Hierbei wurde der Pendelhammer zwischen 39° und 41° ausgelenkt, um lediglich einen Anriss in den Charpy-V-Proben zu erzeugen. Diese angerissenen Proben wurden anschließend in einem Temperierofen angelassen und manuell getrennt. Wie in Bild 2 dargestellt, konnten dadurch eine klare Trennung zwischen den Bruchflächen erreicht und der Anriss optisch vermessen werden. Die mittels dieses Verfahrens erzielten Werte wurden anschließend mit der Leerlaufspannung des Risslängenmessgerätes skaliert, um die Schwankung der Übergangswiderstände zu kompensieren. Durch dieses Vorgehen konnte die in Bild 3

dargestellte Kalibriergerade ermittelt werden.

Nach der erfolgreichen Kalibrierung wurde eine Referenzversuchsreihe durchgeführt, um die Anwendbarkeit an duktilem Gusseisen nachzuweisen. Hierfür wurden aus einer EN GJS 400-18-LT-Barrenprobe mit den Abmaßen 1500 mm x 400 mm x 180 mm jeweils 40 mm breite Scheiben herausgetrennt, aus welchen wiederum CT- und Charpy-V-Proben aus dem direkten Umfeld gefertigt wurden, um eine optimale Vergleichbarkeit der Gefügemorphologie (Kugelzahl, -größe, -form, Ferrit/Perlit-Gehalt etc.) zu gewährleisten (Bild 4).

Anschließend wurden die CT-Proben einer J-Integral-Prüfung nach ASTM E 1820 an einer servohydraulischen 100-kN-Prüfanlage mit CTOD-Sensor unterzogen. Parallel dazu wurden die Charpy-V-Proben mit dem Anlagenprototypen des modifizierten, instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches (MIKBV) geprüft. Zur Differenzierung der gefügemorphologischen Unterschiede innerhalb der Barrenprobe wurden jeweils nur die ermittelten Kennwerte innerhalb der jeweiligen Probenscheibe miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieser gegenüberstellenden Prüfung zeigt Bild 5. In einer Gesamtbetrachtung über jeweils ca. 40 CT- und Charpy-V-Proben stellte sich eine statistische Abweichung von 15,45 % (0,76 kJ/m²) zwischen den beiden Prüf-

verfahren ein. Die dabei ermittelte kombinierte (inkl. Standardabweichung der Referenz) Standardabweichung der Prototypenanlage betrug 50,54 % (2,85 kJ/m²).

Um eine Beeinflussung der Kerbschlagergebnisse durch die zusätzliche Messtechnik – insbesondere den Kabelstrang sowie die Erwärmung der Probe durch die Stromdurchflutung – auszuschließen, wurden bei der Referenzversuchsreihe ebenso die Kerbschlagarbeiten aufgezeichnet und mit einer konventionellen Kerbschlagprüfung aus dem Probenbarren abgeglichen (Bild 6). Die hieraus ersichtliche statistische Abweichung beträgt 1,4 J bei einer Standardabweichung von 1,6 J (mit bruchmechanischer Messung) und 2,0 J (konventionell). Unter Berücksichtigung dieser verhältnismäßig geringen Beeinflussung ist eine parallele Erfassung von Kerbschlagarbeit und bruchmechanischen Kennwerten möglich.

### Diskussion der Ergebnisse

Die hohe Ergebnisstreuung und Sensitivität bezüglich jeglicher Form von Gussungenzen des konventionellen (instrumentierten) Kerbschlagbiegeversuches ist hinlänglich bekannt und wird seit langem kontrovers diskutiert. Die Ergänzung dieser Prüftechnologie um einen weiteren Messkanal sowie ein komplexes Berech-

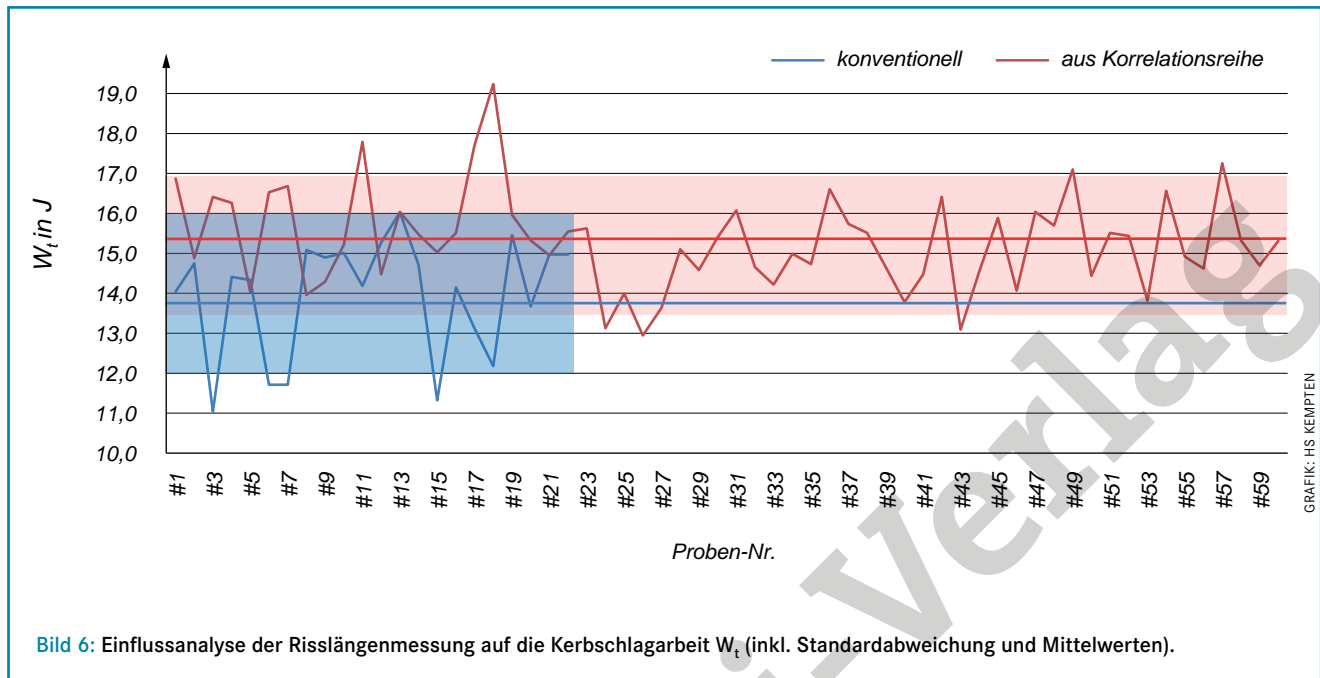


Bild 6: Einflussanalyse der Risslängenmessung auf die Kerbschlagarbeit  $W_t$  (inkl. Standardabweichung und Mittelwerten).

GRAFIK: HS KEMPTEN

nungsmodell erzeugt dahingehend eine weitere Addierung von Messunsicherheiten, was zu einer weiteren Erhöhung der Standardabweichung führt. Wie Bild 5 jedoch deutlich zeigt, ist kein Trend hinter den Streuungen des MIKBV erkennbar. Es wurden deshalb weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Herkunft dieser großen Abweichungen zu ermitteln. Im Zuge von Gefügeanalysen an den Bruchflächen der Charpy-V-Proben konnten enorme Unterschiede in der Kugelzahl und -form sowie in einigen Fällen Mikrolunker als Ursache für eine erhöhte Streuung der Prüfergebnisse identifiziert werden. Daher wird zum aktuellen Zeitpunkt eine Untersuchung der Standardabweichung des Prüfverfahrens bei der Verwendung eines homogeneren Probenwerkstoffes durchgeführt.

Es kann jedoch ebenso abgeleitet werden, dass trotz großer Bedenken bezüglich der hochsensiblen und störeinflussanfälligen (insbesondere gegenüber induktiven Fehlerquellen) Potentialdifferenz-Risslängenmessung sowie der rein über das Berechnungsmodell erfolgten Prüfgeschwindigkeits- und Rissgrundschärfenkompensation Ergebnisse erzielt werden konnten, welche teilweise eine

geringe Abweichung zur Referenz aufweisen. Eine Anpassung des Berechnungsmodells zur Eliminierung der Gesamtabweichung kann über statistische Korrekturfaktoren erfolgen. Daher ist anzunehmen, dass bei einer weiteren Eingrenzung der Standardabweichung über messtechnische sowie softwareseitige Optimierungsmaßnahmen eine praktische industrielle Anwendung des Prüfverfahrens auch bei heterogenen, duktilen Gusseisenwerkstoffen erfolgen kann. Zudem ist es möglich, bei einer entsprechenden Probenanzahl zur Abbildung einer statistischen Sicherheit belastbare und vergleichbare bruchmechanische Kennwerte mit diesem Verfahren zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der geringen Beeinflussung der gemessenen Kerbschlagarbeit durch die Erfassung des J-Integrals ist zudem ein paralleler Prüfbetrieb möglich.

Die Entwicklung dieser Prüftechnologie erfolgt an der Hochschule Kempten im Rahmen einer kooperativen Promotion mit dem Gießerei-Institut der RWTH Aachen über das BMBF-Verbundforschungsvorhaben „GussTough“. Die Autoren danken der Zwick GmbH & Co. KG sowie der Matelect

Ltd. für die fachliche Unterstützung bei der Umsetzung dieser Entwicklung.

Dipl.-Ing. (FH) Jakob Breiner und Prof. Dr.-Ing. Dierk Hartmann, Forschungszentrum Allgäu, Labor für Werkstofftechnik und Betriebsfestigkeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Kempten, Kempten, (Univ.) Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek, Gießerei Institut der RWTH Aachen, Aachen.

#### Literatur:

- [1] Blumenauer, H.; Pusch, G.: Technische Bruchmechanik. 3. Auflage, Wiley-VCH, 1993.
- [2] Gross, D.; Seelig, T.: Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik. 3. Auflage, Springer-Verlag, 2001.
- [3] Kuna, M.: Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen. 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [4] Gesellschaft für optische Messtechnik: System Aramis. Homepage, 2017.
- [5] Zwick Dynamik Symposium. Tagungsband 2015.
- [6] Zwick Dynamik Symposium. Tagungsband 2016.
- [7] Matelect Ltd: User Manual CGM7. V.25, 2015.