



Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit ferritischer Gusseisenwerkstoffe

INHALT

1 Zielstellung	S.1
2 Geltungsbereich	S.2
3 Formelzeichen und Benennungen	S.2
4 Prüfmethode	S.3
5 Prüfeinrichtung	S.4
6 Versuchsdurchführung	S.5
7 Versuchsauswertung und Kennwert	S.6
8 Protokoll	S.8
9 Normen, Richtlinien, Schrifttum	S.9
10 Anhang	S.11

Vom Fachausschuss „Eisenguss“ im BDG erstellte Richtlinie

1 Zielstellung

Bei einer umfassenden Bewertung der Bruchsicherheit von Gussteilen unter Einbeziehung nicht auszuschließender bzw. hypothetisch angenommener Gussinhomogenitäten (Poren, Lunker, Risse u. a.) kommen bruchmechanische Konzepte unter Beachtung der Regelwerke [1] bis [4] zur Anwendung.

Treten infolge stoßartiger Belastungen schnelle Änderungen des Spannungs- und Dehnungszustandes auf, muss die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs im Bauteil auf der Basis dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte nachgewiesen werden, wie es z. B. in [2] für Transportbehälter für radioaktive Stoffe aus Gusseisen mit Kugelgraphit bei -40 °C gefordert wird. Die hier vorgestellte Prüfmethode berücksichtigt in Anlehnung an die Prüfempfehlung ESIS P2-92 [5] sowie die Normen ISO 12135 [6], DIN EN ISO 14566 [7] und ASTM E 1820 [8] die werkstoffspezifischen Besonderheiten ferritischer Gusseisenwerkstoffe bei der experimentellen Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitswerte.



2 Geltungsbereich

Die beschriebene Prüfmethode wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Bestimmung dynamischer Rissinitiiierungswerte für ferritisches Gusseisen (DCI)“ [9-14] entwickelt und in Fortsetzung der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Versuchsprogramm zur Bewertung des Einflusses der Probengröße auf den dynamischen bruchmechanischen Kennwert für Gusseisen mit Kugelgraphit nach GNS-Spezifikation (DYNSIZE)“ [15-17] angewendet.

Sie beschreibt die experimentelle Bestimmung dynamischer Rissinitiiierungswerte an ISO-V-Proben mit Ermüdungsriss im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis -40°C nach dem J-Integral-Konzept für duktile ferritische Gusseisenwerkstoffe, bei denen der Bruch durch eine stabile spaltflächige Rissausbreitung erfolgt.

3 Formelzeichen und Benennungen

Die verwendeten Formelzeichen und ihre Benennungen sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1: Verwendete Formelzeichen und Definitionen

Symbol	Definition	Einheit
a	Risslänge	mm
a_0	Ausgangsrislänge	mm
a_{end}	Endrislänge (Summe aus Ausgangsrislänge und stabiler Rissausbreitung)	mm
a_K	Kerbtiefe	mm
A_0	Ausgangsenergie	J
B_N	Netto-Probendicke der seitengekerbten Probe	mm
E	Elastizitätsmodul	GPa
f	Probendurchbiegung	mm
F	Kraft	N
\dot{F}	Geschwindigkeit der Kraft	N/s
g	Fallbeschleunigung	m/s^2
h	Fallhöhe	m
J_d	Dynamisches J-Integral	kJ/m^2
$J_{d/\Delta a=0}$	Dynamisches J-Integral bei Rissinitiiierung (lineare Extrapolation der J_d - Δa -Werte auf $\Delta a=0$ mm)	kJ/m^2
$J_{d,\text{max}}$	Maximales dynamisches J-Integral bei der Bestimmung von Risswiderstandskurven	kJ/m^2
$K_{f\text{max}}$	Maximaler Spannungsintensitätsfaktor am Ende der Ermüdungsriss erzeugung	MPa $\text{m}^{0,5}$
\dot{K}	Geschwindigkeit des Spannungsintensitätsfaktors	MPa $\text{m}^{0,5}/\text{s}$
L	Länge des Pendelhammers	m
m	Pendelhammermasse	kg
R	Spannungsverhältnis	-
R_m	Zugfestigkeit	MPa



R_{md}	Dynamische Zugfestigkeit bei der Dehngeschwindigkeit und Prüftemperatur der bruchmechanischen Prüfung	MPa
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze	MPa
$R_{p0,2d}$	Dynamische 0,2%-Dehngrenze bei der Dehngeschwindigkeit und Prüftemperatur der bruchmechanischen Prüfung	MPa
S	Stützweite bei Dreipunkt-Biegebeanspruchung (lichte Weite im Pendelschlagwerk)	mm
s	Durchbiegung, (Hammerweg)	mm
t	Zeit	s
t_f	Zeit bis zum pop-in bzw. bis zur maximalen Durchbiegung	s
U_d	Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve	J
v	Geschwindigkeit	m/s
v_0	Hammergeschwindigkeit bei Schlagbeginn (Aufschlaggeschwindigkeit)	m/s
W	Probenbreite	mm
α	Fallwinkel	Grad
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit	1/s
Δa	Betrag der stabilen Rissausbreitung	mm
Δa_{max}	Zulässiger Maximalbetrag der stabilen Rissausbreitung für die Aufnahme einer Risswiderstandskurve	mm
τ	Periodendauer der Kraft-Oszillation	s

4 Prüfmethode

Die Prüfmethode zur Ermittlung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte für ferritisches Gusseisen basiert auf der Mehrprobenmethode nach dem low-blow-Verfahren an einem instrumentierten Pendelschlagwerk mit seitengekerbten ISO-V-Proben mit Ermüdungsanriss. Die Verwendung anderer Prüfeinrichtungen (z. B. Fallwerke) ist möglich und kann sinngemäß angewendet werden.

4.1

Mehrere seitengekerbte ISO-V-Proben mit Ermüdungsanriss einer Prüfserie werden bei Variation der Schlagenergie beansprucht. Dabei wird ein stabiles Wachstum des Ausgangsrisses ausgelöst, ohne dass die Probe bricht.

4.2

Zielstellung ist die Aufnahme der dynamischen Risswiderstandskurve (J_d - Δa -Kurve) und Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit $J_{id/\Delta a=0}$.



5 Prüfeinrichtung

5.1

Es wird empfohlen, die Versuche an einem instrumentierten Pendelschlagwerk nach DIN EN ISO 14556 [17] durchzuführen. Details zur Instrumentierung und Kalibrierung der Prüfmaschine sind in der DIN EN ISO 14556 enthalten. Im Falle der Verwendung anderer Prüfeinrichtungen sind die Anforderungen der DIN EN ISO 14556 sinngemäß anzuwenden.

5.2

Die Positionierung des Pendelhammers muss stufenlos mit definierten Ausgangsenergien A_0 (Fallwinkel α bzw. Fallhöhe h) erfolgen.

5.3

Die Prüfeinrichtung muss über eine Vorrichtung zur gezielten Abbremsung der Fallmasse nach dem Schlag verfügen, um nach dem elastischen Rückschwingen der nicht durchgebrochenen Probe einen erneuten Schlag auszuschließen.

6 Versuchsdurchführung

Das **Bild 1** verdeutlicht den Ablauf von der Probenfertigung bis zur Kennwertermittlung.

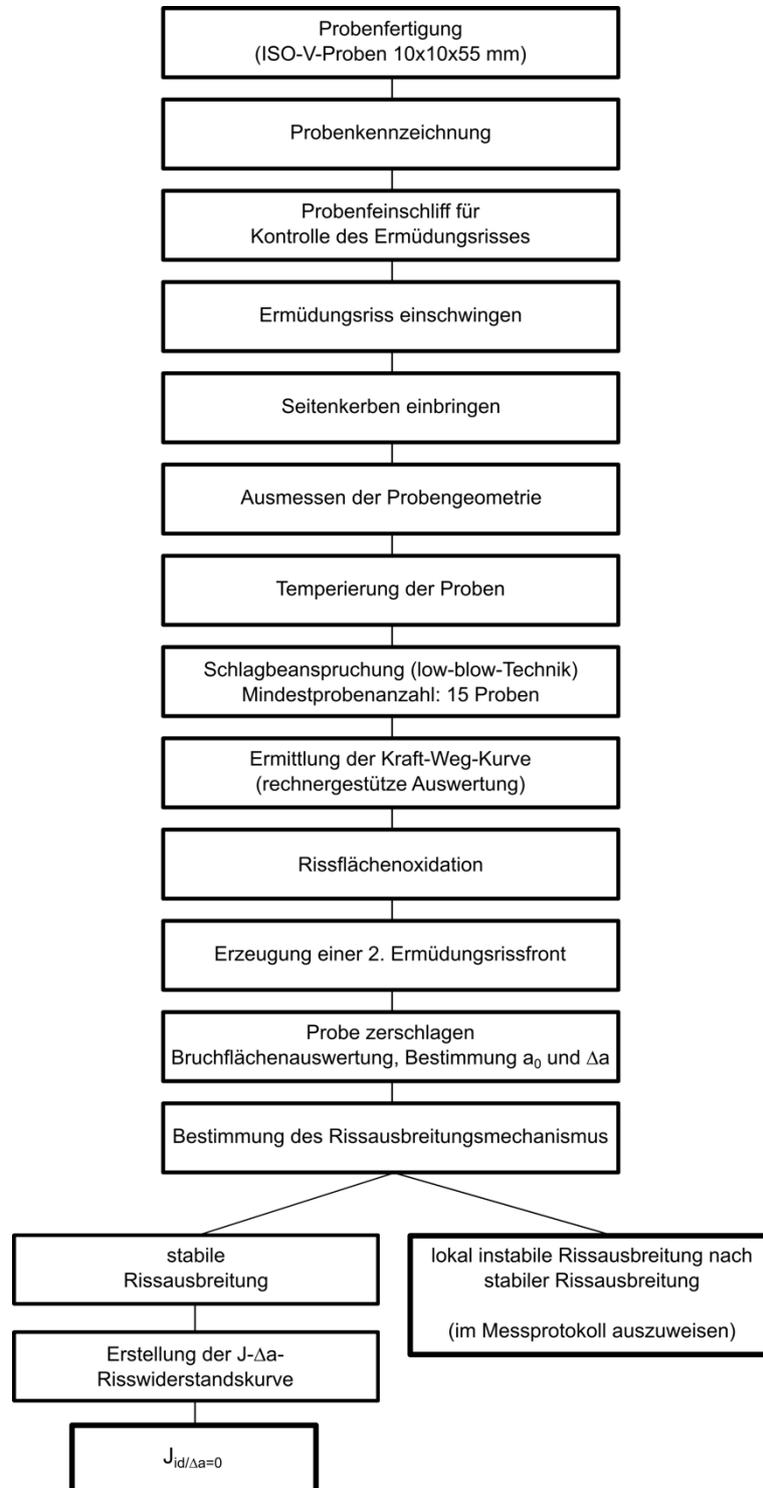


Bild 1: Versuchsablauf



6.1

Mehrere seitengekerbte ISO-V-Proben mit Ermüdungsriss (**Anhang A**) einer Prüfsérie werden mit unterschiedlicher Ausgangsenergie A_0 schlagartig beansprucht und dabei ein stabiles Risswachstum des Ausgangsrisses ausgelöst, ohne dass die Probe bricht.

6.2

Es ist abzusichern, dass im Augenblick des Schlages die Temperatur im Probeninnern (in Rissnähe) sowie an der Probenoberfläche der geforderten Prüftemperatur mit einer Genauigkeit von ± 2 K entspricht.

6.3

Der Kraft-Zeit-Verlauf des Schlages wird registriert und daraus der Kraft-Weg-Verlauf berechnet (**Anhang B**).

Hinweis: Im Falle einer Prüfung bei tiefen Temperaturen kann die Probenoberfläche sowie die Bruchfläche durch die Luftfeuchtigkeit vereisen und ggf. korrodieren. Aus diesem Grunde muss die Probe nach der Prüfung umgehend getrocknet werden.

6.4

Zur besseren Markierung der Bruchflächenanteile muss eine thermische Bruchflächenmarkierung durch Oxidation bei 360 °C über ca. 15 Minuten (z. B. in einem Luftumwälzofen) und nachfolgend die Erzeugung einer zweiten Ermüdungsrissfront größer als 2 mm bei $\Delta K = 13$ bis 15 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ und einem Spannungsverhältnis $R = F_{\text{min}}/F_{\text{max}} = 0,1$ bis 0,3 erfolgen. Nach erneuter Tiefkühlung wird die Probe aufgebrochen und sofort getrocknet.

6.5

Ausgehend vom Kraft-Weg-Diagramm erfolgt die Bewertung des Versagensverhaltens (**Anhang C**) und unter Verwendung der ermittelten Risslängen (**Anhang D**) die Bestimmung der dynamischen J-Integralwerte (**Anhang C**), die Aufstellung dynamischer Risswiderstandskurven (**Punkt 7**) und die Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit $J_{\text{id}/\Delta a=0}$ (**Punkt 7**).

7 Versuchsauswertung und Kennwert

7.1

Die Ergebnisse von mindestens 15 Proben mit einer stabilen Rissausbreitung werden in einer dynamischen Risswiderstandskurve ($J_{\text{d}}-\Delta a$ -Kurve) zusammengefasst (**Bild 2**). Durch die Prüfung ist abzusichern, dass sich die Messpunkte möglichst gleichmäßig auf die 4 Teilabschnitte verteilen. Mindestens ein Messpunkt muss sich in jedem Teilabschnitt befinden.

Hinweis: Proben mit lokaler instabiler Rissausbreitung („pop-in“) werden nicht zur Aufstellung einer dynamischen Risswiderstandskurve herangezogen! Entsprechend muss der Probenumfang erhöht werden, um die Mindestprobenanzahl von 15 Proben für die Risswiderstandskurve zu erreichen. Das Auftreten von pop-in-Ereignissen ist im Messprotokoll zu dokumentieren.

7.2

Der stabile Risswachstumsbetrag muss zwischen einem minimalen, noch messtechnisch bestimmbar, stabilen Risswachstum von $\Delta a_{\min} = 0,1 \text{ mm}$ sowie einem maximal noch zulässigen stabilen Risswachstum von $\Delta a_{\max} = 0,1 \cdot (W - a_0)$ liegen.

7.3

Der maximal zulässige dynamische J-Integral-Wert $J_{d,\max}$ wird nach **Gl. (7.1a bis 7.1c)** bestimmt

$$J_{d,\max} = a_0 \cdot [(R_{p0,2d} + R_{md}) / 20] \quad (7.1a)$$

$$J_{d,\max} = B \cdot [(R_{p0,2d} + R_{md}) / 20] \quad (7.1b)$$

$$J_{d,\max} = (W - a_0) \cdot [(R_{p0,2d} + R_{md}) / 20] \quad (7.1c)$$

und erfordert die Kenntnis der mechanischen Kennwerte $R_{p0,2d}$ sowie R_{md} bei der im Versuch vorliegenden dynamischen Beanspruchungsgeschwindigkeit und bei der Prüftemperatur.

Hinweis: Zur Bestimmung von $J_{d,\max}$ -Werten können auch mechanische Kennwerte genutzt werden, welche bei quasistatischen Beanspruchungsraten und Raumtemperatur ermittelt wurden, weil diese konservative Ergebnisse zur Folge haben.

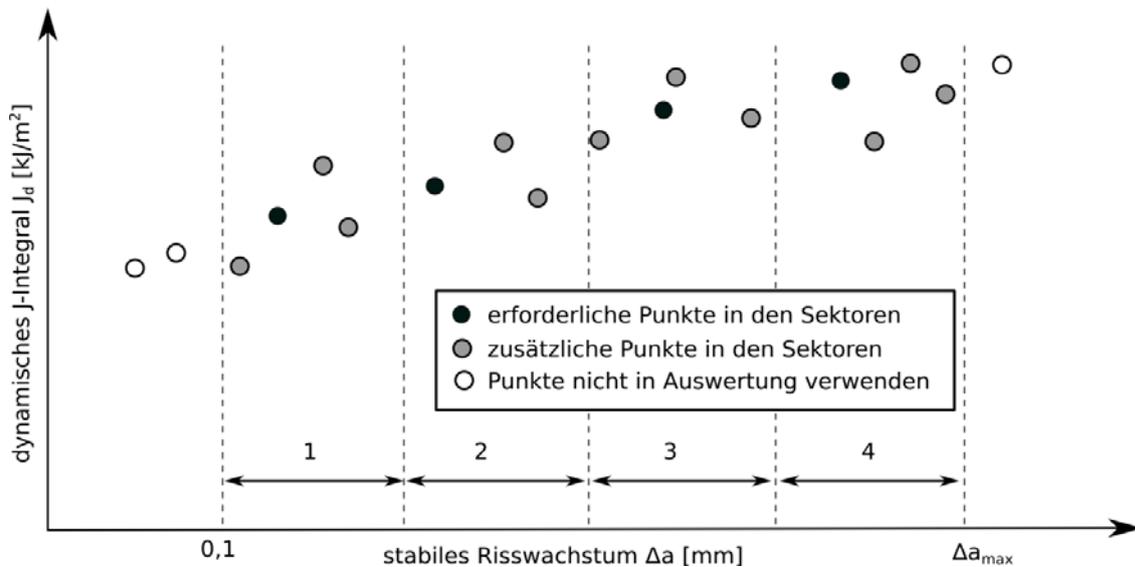


Bild 2: Dynamische Risswiderstandskurve (schematisch)

7.4

Die Risswiderstandskurve wird durch eine Geradenfunktion $J_d = P_0 + P_1 \cdot \Delta a$ beschrieben. Die Koeffizienten der Geradenfunktion werden mittels linearer Regressionsanalyse ermittelt, **Gl. (7.2)** und **Gl. (7.3)**.

Anstieg P_1 :

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i \cdot J_{d_i}) - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \Delta a_i \cdot \sum_{i=1}^n J_{d_i})}{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \Delta a_i)^2} \quad (7.2)$$

Absolutglied P_0 :

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^n J_{d_i}}{n} - P_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i}{n} \quad (7.3)$$

7.5

Der Rissinitiierungspunkt (dynamische Bruchzähigkeit $J_{id/\Delta a=0}$) wird durch Extrapolation der Risswiderstandskurve auf $\Delta a = 0$ mm festgelegt, **Gl. (7.4)** und **Bild 3**:

$$J_{id/\Delta a=0} = P_0 = \frac{\sum_{i=1}^n J_{d_i}}{n} - P_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i}{n} \quad (7.4)$$

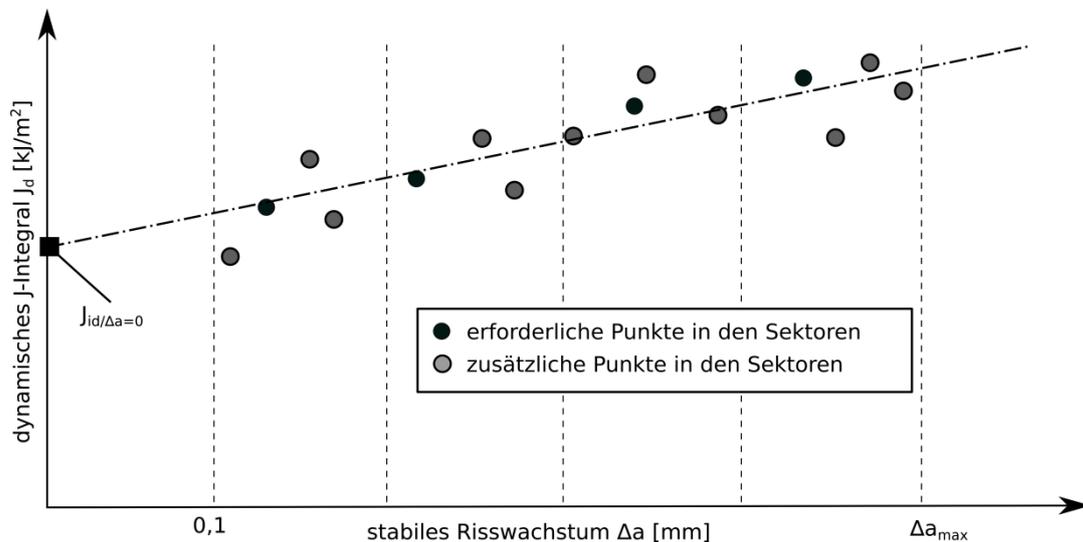


Bild 3: Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit $J_{id/\Delta a=0}$ (schematisch)

8 Protokoll

Das Protokoll muss folgende allgemeine Informationen enthalten:

- Verweis auf diese Richtlinie;
- Abmessungen der Probe;
- Probenbezeichnung;
- Lage und Ausrichtung der Probe im Ausgangsmaterial;
- Ausgangsrislänge a_0 ;
- Methode und Messbedingungen der Risslängenvermessung;
- Unregelmäßigkeiten bei der Rissfrontausbildung (falls vorhanden);
- Details der Ermüdungsrisserzeugung;
- Details zur Versuchseinrichtung (Typ, Messeinrichtungen, Messbedingungen usw.);
- Prüftemperatur;
- Ausgangsenergie A_0 und Aufschlaggeschwindigkeit v_0 ;
- Mechanische Eigenschaften ($R_{p0,2}$, R_m) bei der Temperatur der Ermüdungsrisserzeugung;
- Mechanische Eigenschaften ($R_{p0,2d}$, R_{md}) bei der Temperatur und der \dot{K} -äquivalenten Dehngeschwindigkeit der bruchmechanischen Versuche;
- E-Modul.



Das Protokoll muss folgende bruchmechanische Informationen enthalten:

- a. Bilder mit dem gemessenen Kraft-Zeit- sowie errechneten Kraft-Weg-Verlauf der Proben;
- b. Bewertung des Versagensverhalten (Typ des Kraft-Weg-Diagramms) der Proben;
- c. Realisierte Beanspruchungsgeschwindigkeiten \dot{K} der Proben;
- d. Ermittelte J_{σ} -Wert der Proben;
- e. Betrag des stabilen Risswachstums Δa der Proben;
- f. Überprüfung und Erfüllung aller Anforderungen an die Risslängen und Rissfronten sowie zur Ablenkung des Ermüdungsanrisses von der Symmetrieebene des mechanischen Kerbs;
- g. Ermittelte dynamische Bruchzähigkeitswerte, $J_{id/\Delta a}=0$;
- h. Hinweise auf pop-in-Ereignisse;
- i. Überprüfung und Erfüllung des 3τ -Kriteriums.

Die Ergebnisse sind in einem Prüfbericht zusammenfassend darzustellen. In diesen Prüfbericht sind mindestens die in Kapitel 8 genannten obligatorischen Angaben und Ergebnisse aufzunehmen.

9 Normen, Richtlinien, Schrifttum

- [1] FKM (Forschungskuratorium Maschinenbau) - Richtlinie Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/M., 2006
- [2] BAM-GGR 007: Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe, Revision 0, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Juni 2002
- [3] Germanischer Lloyd: Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen, 2010, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH Hamburg
- [4] Zerbst, U.; Hübner, P.: Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen. Merkblatt DVS 2401, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), August 2004
- [5] ESIS P2-92: Procedure for determining the fracture behaviour of metallic materials. European Structural Integrity Society, Delft, Jan. 1992
- [6] ISO 12135: Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. Nov. 2016
- [7] ISO 26843: Metallic materials – Measurement of fracture toughness at impact loading rates using precracked Charpy-type test pieces. Dec. 2015
- [8] ASTM E 1820: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM International, 2016
- [9] Abschlussbericht FuE/Projekt: Bestimmung dynamischer Rissinitiiierungswerte für duktilen Gusseisen (DCI). TU Bergakademie Freiberg, Institut für Werkstofftechnik, Juli 2008 (intern)



- [10] Ludwig, A.; Pusch, G.; Trubitz, P.; Winkler, H.-P.; Hüggenberg, R.: Ermittlung und Definition dynamischer Bruchzähigkeitswerte für ferritische Gusseisenwerkstoffe. Giesserei-Praxis 63 (2012) 1-2, S. 10-13
- [11] Ludwig, A.; Pusch, G.; Trubitz, P.; Winkler, H.-P.; Hüggenberg, R.: Gefügeabhängigkeit statischer und dynamischer Rissinitiierungswerte für ferritisches Gusseisen. Giesserei-Praxis 63 (2012) 3, S. 52-57
- [12] Trubitz, P.; Pusch, G.; Ludwig, A.; Winkler, H.-P.; Hüggenberg, R.: Bestimmung der Rissauffangfähigkeit von duktilem Gusseisen. Giesserei-Praxis 63 (2012) 7-8, S. 294-298
- [13] Winkler, H.-P.; Hüggenberg, R.; Ludwig, A.; Pusch, G.; Trubitz, P.: Determination and definition of fracture toughness of dynamically loaded ductile cast iron. 12th International Conference on Fracture (ICF 12), 12.-17. July 2009, Ottawa
- [14] Trubitz, P.; Winkler, H.-P.; Hüggenberg, R.; Ludwig, A.; Pusch, G.: Effect of the pearlite content of ferritic cast iron material on the crack resistance behaviour under dynamic load. 13th International Conference on Fracture (ICF 13), 16.-21. June 2013, Beijing
- [15] Trubitz, P.; Ludwig, A.; Pusch, G.; Krüger, L.: Determination of dynamic fracture toughness of ductile cast iron (DCI). 14th International Conference on Fracture (ICF 14), 18.-23. June 2017, Rhodes, Greece
- [16] Trubitz, P.; Ludwig, A.; Pusch, G.; Krüger, L.: Bestimmung der dynamischen Bruchfähigkeit bei streuenden Messpunkten. 35. Vortrags- und Diskussionstagung Werkstoffprüfung 2017, 30. November bis 01. Dezember 2017, Berlin
- [17] DIN EN ISO 14556: Stahl: Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (V-Kerb). Instrumentiertes Prüfverfahren, Februar 2016

Anhang A: Proben und Ermüdungsrisszerzeugung

A.1 Die Proben sind nach DIN EN ISO 14556 [17] mit einer 2,0 mm tiefen V-Kerbe herzustellen (Bild A1).

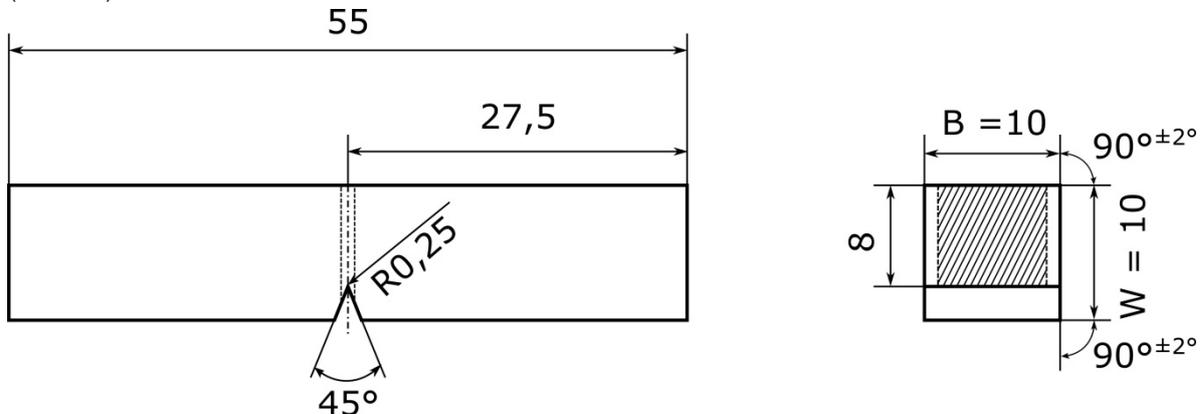


Bild A1: ISO-V-Probe für die dynamischen bruchmechanischen Prüfungen (die Seitenkerben werden erst nach der Ermüdungsrisszerzeugung eingebracht!)

A.2 Die Ermüdungsrisszerzeugung hat in Übereinstimmung mit ISO 26843 [7] bei einem Spannungsverhältnis $R = F_{min}/F_{max}$ zwischen 0 und 0,1 zu erfolgen.

A.3 Die Ermüdungsrisszerzeugung erfolgt stufenweise. F_{max} muss in Übereinstimmung mit ISO 12135 nach den Formeln (A1) bzw. (A2) bestimmt werden. Das kleinere der beiden F_{max} -Kriterien muss für mindestens die letzten 1,3 mm der Ermüdungsrisszerzeugung unterschritten werden.

$$F_{max} = 0,8 \cdot \frac{B (W - a_0)^2}{S} \cdot R_{p0,2} \quad (A1)$$

$$F_{max} = \xi \cdot E \cdot \frac{(W \cdot B \cdot B_N)^{0,5}}{f\left(\frac{a_0}{W}\right)} \cdot \frac{W}{S} \cdot \frac{R_{p0,2}}{R_{p0,2d}} \quad (A2)$$

Mit $\xi = 1,6 \cdot 10^{-4} \sqrt{m}$ und

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a_0}{W}}}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(1,99 - \frac{a_0}{W} \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93 \cdot \frac{a_0}{W} + 2,7 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2\right)\right) \quad (A3)$$

Für ausgewählte Werte ist das Ergebnis der Geometriefunktion $f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ in Tab. C1 angegeben.

Hinweis: Die beanspruchungsgeschwindigkeits- und temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften ($R_{p0,2}$, $R_{p0,2d}$) sind für die Formel (A2) vor Versuchsbeginn zu ermitteln.

A.4 Die Ausgangsrisslänge a_0 (Summe aus Kerb und Ermüdungsriss) der ISO-V-Probe soll im Bereich $4,5 \text{ mm} \leq a_0 \leq 5,5 \text{ mm}$ liegen.

A.5 Die Ablenkung des Ermüdungsrisses von der Symmetrieebene des mechanischen Kerbes muss weniger als 10° betragen.

A.6 Nach der Ermüdungsrisszerzeugung müssen die Proben beidseitig jeweils mit einer Tiefe von 1 mm mittels ISO-V-Kerbfräser seitengekerbt werden.



Anhang B: Ermittlung des Kraft-Weg-Verlaufes

B.1 Das Kraftsignal in Volt ist mittels Kalibrierfaktor entsprechend DIN EN ISO 14556 [17] in die Kraft in Newton umzurechnen.

B.2 Die Probendurchbiegung $f(t)$ kann berührungslos gemessen werden. Üblicherweise wird die Durchbiegung $f(t)$ als Weg $s(t)$ aus dem Kraft-Zeit-Verlauf durch zweifache Integration berechnet (siehe auch DIN EN ISO 14556 [17]). Die erste Integration führt zum Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf $v(t)$ (**Gl. B1**) und die zweite Integration zum Weg-Zeit-Verlauf $s(t)$ (**Gl. B3**):

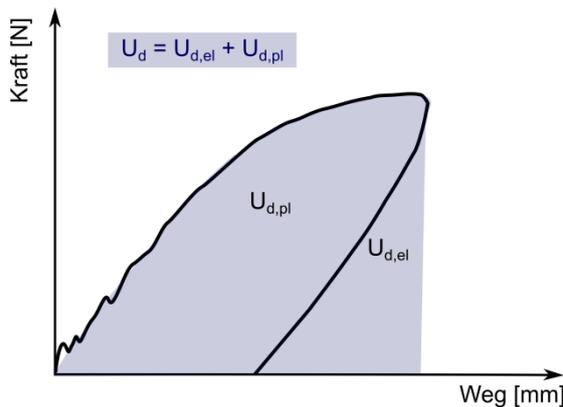
$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \cdot \int_{t=0}^t F(t) dt \quad (\text{B1})$$

$$\text{mit } v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \alpha)} \text{ beim Pendelschlagwerk} \quad (\text{B2})$$

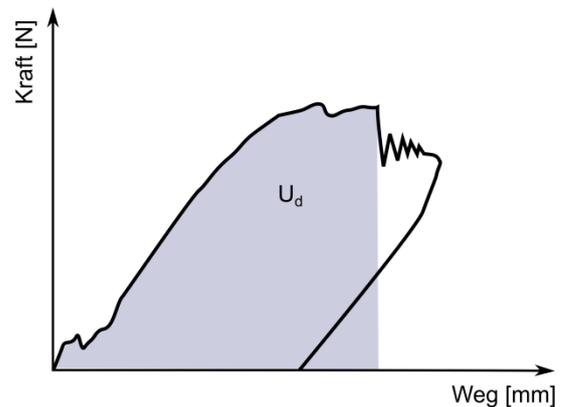
$$s(t) = \int_{t=0}^t v(t) dt \quad (\text{B3})$$

Anhang C: Bestimmung des bruchmechanischen Kennwertes

C.1 Bild C1 zeigt typische Kraft-Weg-Verläufe bei dynamischer Beanspruchung. Für ferritische Gusseisenwerkstoffe sind im Temperaturbereich bis -40 °C die stabile Rissausbreitung (Teilbild **C1a**) sowie ggf. auch die stabile Rissausbreitung mit lokaler Instabilität („pop-in“, Teilbild **C1b**) typisch. Pop-in-Effekte sind das Ergebnis lokaler Gefügeheterogenitäten (Perlitinseln, Graphitentartungen u.a.m.) vor der Risspitze, die einen lokalen Rissprung verursachen. Proben mit pop-in-Verhalten (unabhängig von deren Ausprägung) werden nicht zur Aufnahme dynamischer Risswiderstandskurven herangezogen!



C1a: elastisch-plastisch ohne instabile Rissausbreitung



C1b: elastisch-plastisch mit lokaler instabiler Rissausbreitung (nach signifikanter stabiler Rissausbreitung)

Bild C1: Typische dynamische Kraft-Weg-Verläufe für das Versagensverhalten ferritischer Gusswerkstoffe im Temperaturbereich bis -40 °C

C.2 Das elastisch-plastische Werkstoffverhalten wird mit dem dynamischen J-Integral beschrieben. Das dynamische J-Integral J_d wird in Übereinstimmung mit ESIS P2 [5] nach **Gl. (C1)** berechnet (siehe auch **Bild C1a**):

$$J_d = \frac{2 \cdot U_d}{B_N \cdot (W - a_0)} \cdot \left(1 - \frac{0,5 \cdot \Delta a}{W - a_0} \right) \quad \text{(C1)}$$

Diese Formel ist in Übereinstimmung mit ISO 26843 [7] anwendbar, wenn die Versuchsdauer t_f bis zur maximalen Probendurchbiegung bzw. bis zum pop-in größer ist als die dreifache Periodendauer der Kraft-Oszillation ($t_f > 3\tau$). **Bild C2** verdeutlicht die Vorgehensweise zur Überprüfung des 3τ -Kriteriums im Kraft-Weg-Diagramm.

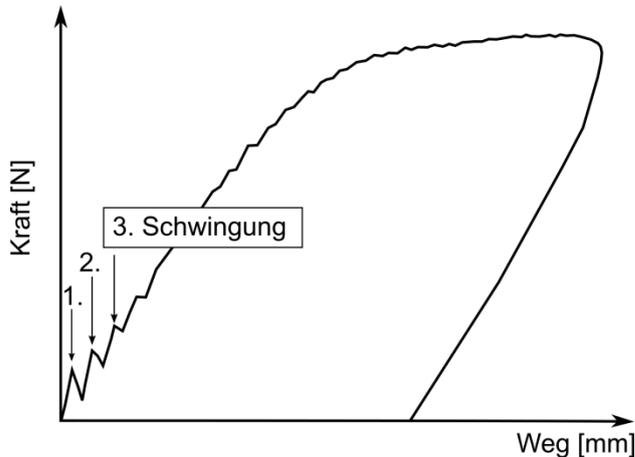


Bild C2 Kraft-Weg-Verlauf mit typischen Oszillationen im Anfangsbereich (schematisch)

C.3 Bei stabiler Rissausbreitung wird die verbrauchte Energie U_d unter Verwendung der Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve bis zur maximalen Probendurchbiegung bestimmt (**Bild C1a**). In Verbindung mit der auf der Bruchfläche ermittelten stabilen Rissverlängerung ergibt sich damit ein Punkt in der Risswiderstandskurve.

C.4 Zur quantitativen Charakterisierung der Beanspruchungsgeschwindigkeit dient die Geschwindigkeit des Spannungsintensitätsfaktors K nach **Gl. (C2)**

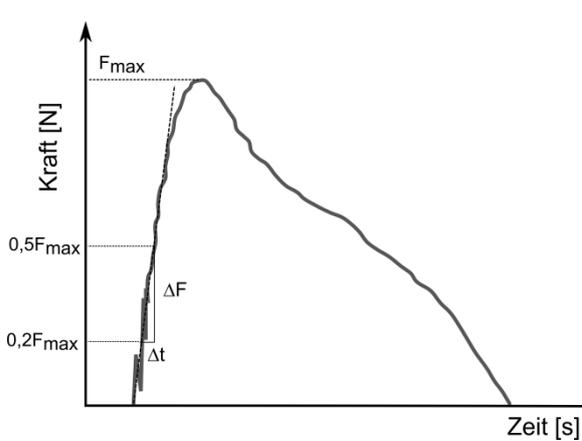
$$\dot{K}_I = \frac{\dot{F} \cdot S}{\sqrt{B \cdot B_N \cdot W^3}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (\text{C2})$$

mit

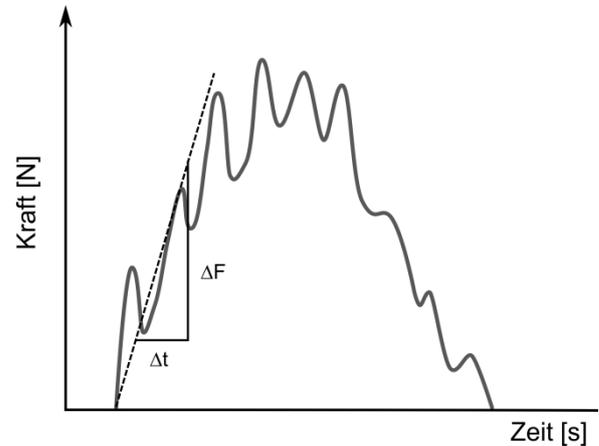
$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a_0}{W}}}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(1,99 - \frac{a_0}{W} \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(2,15 - 3,93 \cdot \frac{a_0}{W} + 2,7 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2\right)\right) \quad (\text{C3})$$

Bei Versuchen mit geringer überlagerter Schwingung im Kraft-Zeit-Verlauf (**Bild C3a**) kann die Geschwindigkeit der Kraft $\dot{F} = \Delta F / \Delta t$ direkt aus dem Kurvenverlauf mittels linearer Regression in einem Kraft-Bereich zwischen $0,2 \cdot F_{\max}$ und $0,5 \cdot F_{\max}$ bestimmt werden.

Bei stark schwingenden Kraft-Zeit-Kurven (**Bild C3b**) wird die Geschwindigkeit der Kraft $\dot{F} = \Delta F / \Delta t$ aus dem Anstieg der Sekante an den zweiten Peak der Kraft-Zeit-Kurve bestimmt.



C3a: Kraft-Zeit-Verlauf mit geringen Schwingungen



C3b: Kraft-Zeit-Verlauf mit starken Schwingungen

Bild C3: Ermittlung der Beanspruchungsgeschwindigkeit \dot{K}_I aus dem Anstieg des Kraft-Zeit-Verlaufs im elastischen Bereich (schematisch)

C.5 Die **Tabelle C1** enthält ausgewählte Werte der Geometriefunktion nach **Gl. (C3)**.

Tabelle C1: Ausgewählte Werte der Geometriefunktion $f\left(\frac{a}{W}\right)$, **Gl. (C3)**, aus [6]

a/W	$f\left(\frac{a}{W}\right)$	a/W	$f\left(\frac{a}{W}\right)$
0,450	2,29	0,575	3,43
0,455	2,32	0,580	3,50
0,460	2,35	0,585	3,56
0,465	2,39	0,590	3,63
0,470	2,43	0,595	3,70
0,475	2,46	0,600	3,77
0,480	2,50	0,605	3,85
0,485	2,54	0,610	3,92
0,490	2,58	0,615	4,00
0,495	2,62	0,620	4,08
0,500	2,66	0,625	4,16
0,505	2,70	0,630	4,25
0,510	2,75	0,635	4,34
0,515	2,79	0,640	4,43
0,520	2,84	0,645	4,53



a/W	$f\left(\frac{a}{W}\right)$	a/W	$f\left(\frac{a}{W}\right)$
0,525	2,89	0,650	4,63
0,530	2,94	0,655	4,73
0,535	2,99	0,660	4,84
0,540	3,04	0,665	4,95
0,545	3,09	0,670	5,06
0,550	3,14	0,675	5,18
0,555	3,20	0,680	5,30
0,560	3,25	0,685	5,43
0,565	3,31	0,690	5,57
0,570	3,37	0,695	5,71
		0,700	5,85

Anhang D: Risslängenmessung auf der Probenbruchfläche

D.1 Die Risslängenvermessung auf der Probenbruchfläche erfolgt mittels lichtoptischer Mikroskopie bei einer Genauigkeit von mind. 0,05 mm. Die Messung der Ausgangsrisslänge a_0 , der Endrisslänge a_{end} und des stabilen Risswachstums Δa hat an neun äquidistanten Stellen zu erfolgen (**Bild D1**).

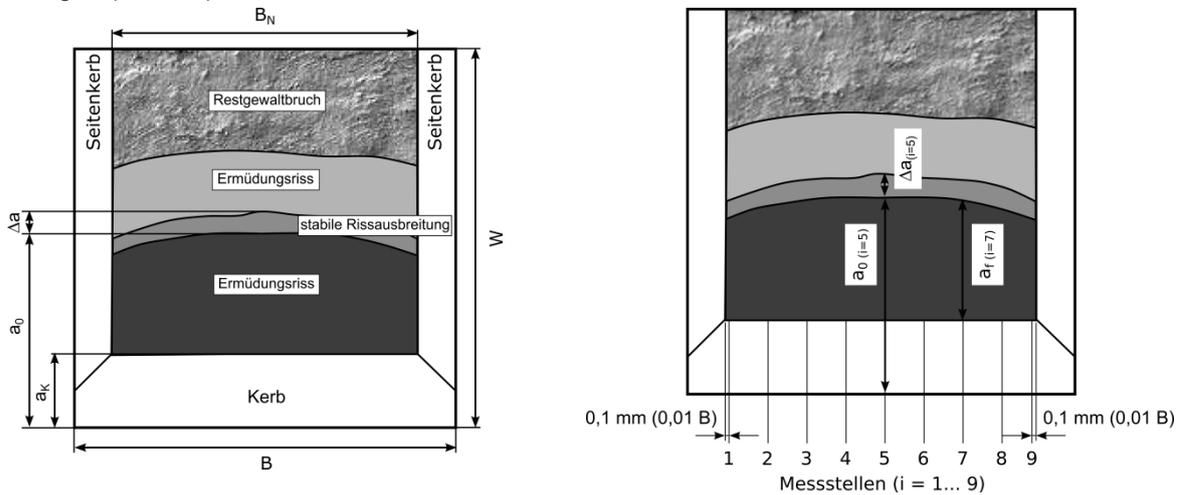


Bild D1: Probenbruchfläche und Messstellen für die Risslängenmessungen

Die Mittelwertbildung erfolgt gemäß ISO 12135 nach **Gl. (D1)**.

$$a_0 = \frac{1}{8} \left[\frac{a_{0_1} + a_{0_9}}{2} + \sum_{j=2}^8 a_{0_j} \right] \quad \text{(D1a)}$$

$$a_{end} = \frac{1}{8} \left[\frac{a_{end_1} + a_{end_9}}{2} + \sum_{j=2}^8 a_{end_j} \right] \quad \text{(D1b)}$$

$$\Delta a = \frac{1}{8} \left[\frac{\Delta a_1 + \Delta a_9}{2} + \sum_{j=2}^8 \Delta a_j \right] \quad \text{(D1c)}$$

Hinweis: Lokale instabile Rissausbreitung („pop-in“) zeigt sich auf der Bruchfläche in einem lokal voreilenden Rissfrontverlauf („spikes“). Diese Bereiche werden bei der Vermessung ignoriert und an dieser Stelle das Risswachstum subjektiv gemittelt. Dieser Sachverhalt muss im Messprotokoll dokumentiert werden!

D.2 Für gültige Datenpunkte muss die Rissfrontausbildung (Ermüdungsriss und stabiles Risswachstum) in Übereinstimmung mit ISO 12135 [6] nachfolgende Kriterien erfüllen. Andernfalls ist die Probe als ungültig zu bewerten und darf nicht in die weiteren Auswertungen eingebunden werden:

D.2.1 An keiner der sieben inneren Messstellen ($i = 2 \dots 8$) darf die Abweichung der Einzelmessung vom Mittelwert größer als 10 % sein. Diese Forderung gilt für die Messungen der Ausgangsrisslänge a_0 sowie der Endrisslänge a_{end} .

D.2.2 Die Länge des Ermüdungsrisses muss an allen 9 Messstellen mindestens 1,3 mm betragen. Zusätzlich muss das Kriterium für a_0 gemäß Kapitel A.4 eingehalten werden.



Anhang E: Muster-Messprotokoll (informativ, beispielhaft)

Dokument Nr. _____ Anlage zu Zeugnis Nr. _____ Seite ____ von ____

Ident- / Gieß.-Nr. _____

Prüfgegenstand (zugeordnete Gefügeprobe) _____

Gemäß Probenlageplan _____ Kom.-Nr. _____

Proben

Typ = ISO-V-Probe

Material

Materialbezeichnung = _____

Mechanische Eigenschaften

E = _____ GPa

$R_{p0,2}$ bei der Ermüdungsriss­erzeugung = _____ MPa

R_m bei der Ermüdungsriss­erzeugung = _____ MPa

Prüf­temperatur = _____ °C

$R_{p0,2d}$ bei der Prüf­temperatur und \dot{K} -äquivalenten Dehnrate = _____ MPa

R_{md} bei der Prüf­temperatur und \dot{K} -äquivalenten Dehnrate = _____ MPa

Allgemeine Versuchsbedingungen

Stützweite S = _____ mm

Ausgangsris­slänge: a_0 = _____ mm

Ermüdungsriss­erzeugung

Maximalkraft zum Ende der Ermüdungsriss­erzeugung = _____ N

F_{fmax}

Maximaler zyklischer Span­nungsintensitätsfaktor zum Ende der Ermüdungsriss­erzeugung K_{fmax} = _____ $MPa\sqrt{m}$

Details zur Versuchseinrichtung

Typ _____

Messeinrichtungen _____



Methode und Messbedingungen der Risslängenvermessung

Methode _____

Messbedingungen _____

Resultate

Risswiderstandskurve: $J_d = \text{_____} + \text{_____} \cdot \Delta a$

Rissinitiiierungspunkt: $J_{id/\Delta a=0} = \text{_____} \text{ kJ/m}^2$

Die gemessenen Kraft-Zeit- sowie errechnete Kraft-Weg-Verläufe der Proben sind dem Versuchsprotokoll beizufügen.



Änderungsvermerk:

Ersatz für Ausgabe Oktober 2014

gegenüber der vorigen Ausgabe wurden folgende Änderungen vorgenommen:

Aktualisierung und neue Formatierung