

DIN EN 10371

ICS 77.040.10

**Metallische Werkstoffe –
Small-Punch-Test;
Deutsche Fassung EN 10371:2021**

Metallic materials –
Small punch test method;
German version EN 10371:2021

Matériaux métalliques –
Méthode d'essai de micro-emboutissage;
Version allemande EN 10371:2021

Gesamtumfang 66 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 10371:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 459/SC1 „Prüfverfahren für Stahl (andere als chemische Analysen)“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-43 AA „Zeitstand- und Relaxationsprüfung für Metalle“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 2768-1 siehe DIN ISO 2768-1

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 2768-1, *Allgemeintoleranzen — Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*

Deutsche Fassung

Metallische Werkstoffe — Small-Punch-Test

Metallic materials —
Small punch test method

Matériaux métalliques —
Méthode d'essai de micro-emboutissage

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 11. Januar 2021 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Bezeichnungen	11
5 Prüfkörper	14
5.1 Allgemeines	14
5.2 Werkstoffprobenahme	16
6 Prüfeinrichtung	17
6.1 Prüfmaschine	17
6.2 Prüfumgebung	17
6.2.1 Allgemeines	17
6.2.2 Heiz-/Kühlsystem	17
6.3 Aufbringen und Messen der Kraft	17
6.4 Stempel und Probenhalter	17
6.5 Messung der Verschiebung und/oder Durchbiegung	19
6.6 Messung der Prüftemperatur	20
7 Small-Punch-Test	20
7.1 Kurzbeschreibung	20
7.2 Prüfverfahren	21
7.2.1 Einlegen des Prüfkörpers	21
7.2.2 Vorlast	21
7.2.3 Verschiebungsrates	21
7.2.4 Überwachung der Prüfung	21
7.2.5 Ende der Prüfung	21
7.3 Charakteristische Parameter auf der Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$	21
7.3.1 Kraft an der Streckgrenze, F_e	21
7.3.2 Durchbiegung u_e bei F_e	25
7.3.3 Kraft bei Einsetzen der plastischen Instabilität, F_i	25
7.3.4 Höchstkraft während der Prüfung, F_m	25
7.3.5 Durchbiegung u_m bei F_m	26
7.3.6 Small-Punch-Energie ESP	26
7.4 Prüfbericht	26
8 Small-Punch-Kriechprüfung	27
8.1 Kurzbeschreibung	27
8.2 Besonderheiten der Prüfeinrichtung für Small-Punch-Kriechprüfungen	27
8.2.1 Prüfraumen	27
8.2.2 Prüfumgebung	27
8.3 Prüfverfahren	27
8.3.1 Vorbereitung der Prüfung	27
8.3.2 Temperierung	27
8.3.3 Aufbringen einer Vorlast	28
8.3.4 Aufbringen der Prüfkraft	28

8.3.5	Überwachung der Prüfung.....	28
8.3.6	Unterbrechung und Ende der Prüfung.....	28
8.3.7	Untersuchung nach der Prüfung.....	28
8.4	Eigenschaften der Durchbiegungs-Zeitkurve	29
8.5	Prüfbericht.....	30
Anhang A (informativ) Bestimmung der Nachgiebigkeit eines Small-Punch-Prüfstands für Verschiebungsmessungen.....		
A.1	Einleitung	31
A.2	Experimentelle Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems	32
A.3	Rechnerische Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems.....	33
Anhang B (informativ) Verfahren zur Temperaturregelung und -messung bei Small-Punch-Tests.....		
B.1	Überprüfung der Temperaturgleichmäßigkeit.....	34
B.2	Temperaturmessung.....	35
B.2.1	Allgemeines	35
B.2.2	Thermoelemente	35
B.2.3	Kalibrierung der Temperaturmessgeräte.....	37
B.2.4	Aufzeichnung der Temperatur	37
B.2.5	Erwärmung des Prüfkörpers für Prüfungen bei erhöhten Temperaturen.....	37
B.2.6	Abkühlung des Prüfkörpers für Prüfungen bei sehr tiefen Temperaturen.....	38
B.2.7	Prüfumgebung.....	38
Anhang C (informativ) Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m anhand von Small-Punch-Tests.....		
C.1	Allgemeine Verfahrensweise	39
C.2	Vorgabe der F_m -basierten Wechselbeziehung.....	39
C.3	Vorgabe der F_i -basierten Wechselbeziehung.....	40
Anhang D (informativ) Abschätzung der Dehngrenze $R_{p0,2}$ anhand von Small-Punch-Tests		
D.1	Kurzbeschreibung	43
D.2	Wechselbeziehungen	43
Anhang E (informativ) Abschätzung der DBTT anhand von Small-Punch-Tests.....		
E.1	Allgemeine Verfahrensweise	44
E.2	Bestimmung von T_{SP} basierend auf der SP-Energie.....	44
E.3	Bestimmung von T_{SP} basierend auf der effektiven Bruchdehnung.....	45
Anhang F (informativ) Abschätzung der Bruchzähigkeit anhand von Small-Punch-Tests.....		
F.1	Kurzbeschreibung.....	47
F.2	Zweistufige Wechselbeziehung zur Bestimmung von K_{Ic}	47
F.3	Empirische Wechselbeziehung zwischen ε_f und J_{Ic}	48
F.4	Bestimmung von δ_{Ic} mithilfe gekerbter Proben.....	48
Anhang G (informativ) Abschätzung der Kriecheigenschaften anhand von Small-Punch-Kriechprüfungen.....		
G.1	Allgemeine Verfahrensweise	50
G.2	Umwandlung der Kraft in Spannung.....	50
G.3	Prognose der Kriecheigenschaften unter Verwendung von experimentellen Wechselbeziehungen	53
G.4	Extrapolationen auf der Grundlage von SP-Kriechprüfungen.....	53
Anhang H (informativ) Untersuchung des Prüfkörpers nach der Prüfung.....		
H.1	Lichtmikroskopie	54
H.1.1	Allgemeines	54
H.1.2	Gesamtdurchbiegung.....	54
H.1.3	Verschlechterung des Zustands der Probe	54
H.1.4	Brucherscheinungsbild	54
H.2	Bestimmung der effektiven Bruchdehnung ε_f	56

H.2.1	Allgemeines	56
H.2.2	Schnitte.....	57
H.2.3	Zerstörungsfreie Verfahren.....	58
H.2.4	Messung von h_f	59
Anhang I (informativ) Maschinenlesbare Formate.....		60
I.1	Einleitung	60
I.2	Maschinenlesbare Formate für Small-Punch-Tests.....	60
Literaturhinweise.....		61

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 10371:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 459/SC 1 „Prüfverfahren für Stahl (andere als chemische Analysen)“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Oktober 2021, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Oktober 2021 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Dieses Dokument beschreibt den Small-Punch-Test für metallische Werkstoffe.

Es ist zwar anerkannt, dass der Small-Punch-Test nicht mit einer Prüfung mit einachsiger Beanspruchung gleichzusetzen ist und derzeit die Prüfungen mit einachsiger und mechanischer Bruchbeanspruchung an größeren Proben nicht ersetzen kann, er ermöglicht jedoch eine Abschätzung der Werte, die üblicherweise mit klassischen Proben in Standardgröße bei der Prüfung mit einachsiger und mechanischer Bruchbeanspruchung ermittelt werden.

Das Small-Punch-Prüfverfahren ist besonders nützlich, wenn nur geringe Werkstoffmengen zur Verfügung stehen, wie bei Versuchswerkstoffchargen, oder zur Beurteilung der Alterung von Bauteilen, bei denen die Entnahme klassischer Probentypen hohe Instandsetzungskosten verursachen würde. Weitere relevante Anwendungsbereiche des Small-Punch-Tests sind die Bestimmung der Eigenschaften von bestrahlten Werkstoffen, wobei kleine Proben die Strahlenbelastung des Laborpersonals oder die Untersuchung der unterschiedlichen Zonen in Schweißnähten minimieren.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt das Small-Punch-Prüfverfahren für metallische Werkstoffe und die Abschätzung der mechanischen Werkstoffeigenschaften in Bezug auf Zug, Kriechen und Bruch bei sehr tiefen bis hohen Temperaturen fest.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 60584-1, *Thermoelemente — Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1)*

EN ISO 148-1, *Metallische Werkstoffe — Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy — Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1)*

EN ISO 204, *Metallische Werkstoffe — Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung — Prüfverfahren (ISO 204)*

EN ISO 286-2, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — ISO-Toleranzsystem für Längenmaße — Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen (ISO 286-2)*

EN ISO 6892-1, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1)*

EN ISO 6892-2, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur (ISO 6892-2)*

EN ISO 7500-1, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen — Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung (ISO 7500-1)*

EN ISO 7500-2, *Metallische Werkstoffe — Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 2: Zeitstandprüfmaschinen für Zugbeanspruchung — Prüfung der angewendeten Kraft (ISO 7500-2)*

EN ISO 9513, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung (ISO 9513)*

ISO 2768-1, *General tolerances — Part 1: tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Stempel

massive Stange mit einer halbkugelförmigen Spitze oder zylindrische Stange in Kombination mit einer Kugel, die eingesetzt wird, um den scheibenförmigen Prüfkörper in der Mitte zu durchdringen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der halbkugelförmige Teil des Stempels bzw. die Kugel muss eine ausreichende Härte aufweisen, um die erforderliche Steifigkeit gegen Verformung während der Prüfung sicherzustellen. Ultraharte Kugeln für Kugellager können für diese Anwendung eingesetzt werden. Die Nachgiebigkeit des Stempels wirkt sich auf die Verschiebungsmessung aus (siehe 3.5).

3.2

Prüfkörper

runder, scheibenförmiger Körper aus dem zu untersuchenden Werkstoff

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Prüfung anderer Geometrien ist nach diesem Dokument zulässig, wenn der aktive Teil der Probe eine flache zylindrische Form aufweist und die Einspannfläche genauso groß oder größer ist als die der in diesem Dokument aufgeführten Proben.

3.3

Small-Punch-Test

SP-Test

wenn die Stempelspitze/Kugel bei konstanter Querhauptverschiebungsrates $\dot{w}$ durch die Probe getrieben wird und die Kraft F in Abhängigkeit von der Durchbiegung u /Verschiebung v gemessen wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Prüfung kann zur Abschätzung der Zug- und Brucheigenschaften des Werkstoffs eingesetzt werden. Wird mit Verschiebung gearbeitet, muss auf die Nachgiebigkeit der Maschine geachtet werden (Anhang A).

3.4

Small-Punch-Kriechprüfung

SP-Kriechprüfung

wenn die Stempelspitze/Kugel mit konstanter Kraft F durch die Probe getrieben wird und die Durchbiegung u /Verschiebung v in Abhängigkeit von der Zeit gemessen wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Prüfung kann zur Abschätzung der Werkstoffeigenschaften in Bezug auf einachsiges Kriechen eingesetzt werden.

3.5

Verschiebung v der Stempelspitze

Weg, den die Stempelspitze nach dem ersten Kontakt mit der Probenoberfläche zurückgelegt hat

3.6

Querhauptverschiebung

w

Weg, den der Querhaupt nach dem ersten Kontakt der Stempelspitze mit der Probenoberfläche zurückgelegt hat

3.7

Durchbiegung

u

Weg, um den sich der Punkt in der Mitte der Probe auf der Oberfläche gegenüber dem Berührungspunkt zwischen Stempel und Probe nach dem ersten Kontakt der Stempelspitze mit dem Prüfkörper bewegt hat

3.8

Kriech-Durchbiegungskurve

$u(t)$

Aufzeichnung der Durchbiegung u in Abhängigkeit von der Zeit t für eine gegebene aufgebrachte Kraft F aus einer Small-Punch-Kriechprüfung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Belastungsdauer ist Teil der Kriech-Durchbiegungskurve. $t = 0$, $F = 0$ (oder $F = \text{Vorlast}$) bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem die Belastung anfängt.

3.9

Kriech-Verschiebungskurve

$v(t)$

Verlauf der Verschiebung v in Abhängigkeit von der Zeit t für eine gegebene aufgebrachte Kraft F aus einer Small-Punch-Kriechprüfung

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Belastungsdauer ist Teil der Kriech-Verschiebungskurve. $t = 0$, $F = 0$ (oder $F = \text{Vorlast}$) bezieht sich auf den Zeitpunkt, an dem die Belastung anfängt.

3.10

Kraft-Durchbiegungskurve

$F(u)$

Verlauf der Kraft F , die erforderlich ist, um den Stempel bei konstanter Querschnittverschiebungsrates $\dot{w}$ zu bewegen, in Abhängigkeit von der Durchbiegung

3.11

Kraft-Verschiebungskurve

$F(v)$

Aufzeichnung der Kraft F , die erforderlich ist, um den Stempel bei konstanter Querschnittverschiebungsrates $\dot{w}$ zu bewegen, in Abhängigkeit von der Verschiebung der Stempelspitze

Anmerkung 1 zum Begriff: Wird die Verschiebung nicht an der Stempelspitze gemessen, sondern aus der Verschiebung des Querschnitts oder an einem anderen Punkt entlang der Kraftlinie abgeleitet, muss das Wegsignal mit der Nachgiebigkeit korrigiert werden. Für ausführlichere Informationen siehe Anhang A.

3.12

Duktil-zu-spröde-Übergangstemperatur

$DBTT$

(en: ductile to brittle transition temperature)

Temperatur, bei der das Bruchverhalten eines gegebenen Werkstoffs nach EN ISO 148-1 von spröde zu duktil übergeht

3.13

Small-Punch-duktil-zu-spröde-Übergangstemperatur

T_{SP}

charakteristische Temperatur, bei der das Bruchverhalten in einem Small-Punch-Test von spröde zu duktil übergeht (Anhang E)

3.14

Small-Punch-Energie

E_{SP}

Integral der Kraft-Durchbiegungskurve bis zur Durchbiegung bei Höchstkraft u_m

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Energie wird zur Bestimmung von T_{SP} verwendet. Im Falle eines Lastabfalls (Pop-in-Ereignis) erfolgt die Integration bis zum ersten signifikanten Pop-in-Ereignis (Anhang E).

Anmerkung 2 zum Begriff: Anstelle der Durchbiegung darf die Verschiebung eingesetzt werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Bei duktilen Werkstoffen ist bei Erreichen der Höchstkraft F_m noch kein Versagen aufgetreten. Die Beschränkung der Integration auf die Durchbiegung bei Höchstkraft u_m erlaubt jedoch eine harmonisierte Behandlung von duktilem und sprödem Versagen.

3.15 **normierte Small-Punch-Energie**

E_n
auf die Höchstkraft F_m normierte Energie E_{SP}

3.16 **Energie der Hochlage**

E_{US}
(en: upper shelf energy)
einige Werkstoffe wie ferritische/martensitische Stähle zeigen einen deutlichen Übergang von $E_{SP}(T)$ von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau bei einer gegebenen Temperatur T_{SP} , das höhere Niveau von $E_{SP}(T)$ wird als Energie der Hochlage E_{US} bezeichnet

3.17 **Energie der Tieflage**

E_{LS}
(en: lower shelf energy)
einige Werkstoffe wie ferritische/martensitische Stähle zeigen einen deutlichen Übergang von $E_{SP}(T)$ von einem niedrigeren auf ein höheres Niveau bei einer gegebenen Temperatur T_{SP} , das niedrigere Niveau von $E_{SP}(T)$ wird als Energie der Tieflage E_{LS} bezeichnet

3.18 **für die Berechnung von E_{SP} signifikanter Lastabfall**

Ereignis während eines SP-Tests, bei dem die Kraft in der $F(u)$ - oder $F(v)$ -Kurve quasi abrupt abfällt und wieder ansteigt.

Anmerkung 1 zum Begriff: Lastabfall (Pop-in-Ereignis) ist ein Anzeichen für Sprödiversagen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für die Berechnung von E_{SP} ist ein signifikanter Lastabfall als ein Kraftabfall um 10 % der Höchstkraft F_m an einer beliebigen Stelle während der Prüfung definiert (Anhang E).

3.19 **Kriechbruchzeit aus Prüfung mit einachsiger Beanspruchung**

t_u
Zeit bis zum Bruch eines Prüfkörpers bei der festgelegten Temperatur T unter der Anfangsspannung R_0 wie in EN ISO 204 festgelegt

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einer einachsigen Kriechprüfung dürfen dem Formelzeichen t_u als Hochzahl die festgelegte Temperatur in Grad Celsius und als Tiefzahl die Anfangsspannung R_0 in Megapascal zugeordnet werden.

3.20 **Kriechbruchzeit aus Small-Punch-Test**

t_r
Zeit bis zum Bruch eines Prüfkörpers bei der festgelegten Temperatur T unter einer konstanten Kraft F in einer Small-Punch-Kriechprüfung

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einer einachsigen Kriechprüfung dürfen dem Formelzeichen t_r als Hochzahl die festgelegte Temperatur in Grad Celsius und als Tiefzahl die Kraft F in Newton zugeordnet werden.

3.21

Dehngrenze

R_p

in Prüfverfahren mit einachsiger Zugbeanspruchung nach EN ISO 6892-1 und EN ISO 6892-2 ermittelte Dehngrenze oder anhand von Small-Punch-Tests geschätzte Dehngrenze (Anhang D)

Anmerkung 1 zum Begriff: Auf das Formelzeichen folgt ein Suffix mit dem vorgeschriebenen Prozentsatz der Dehnung, zum Beispiel $R_{p0,2}$.

3.22

Streckgrenze

R_{eL} , R_{eH}

in Prüfverfahren mit einachsiger Zugbeanspruchung nach EN ISO 6892-1 und EN ISO 6892-2 ermittelte obere und untere Streckgrenze oder anhand von Small-Punch-Tests geschätzte obere und untere Streckgrenze (Anhang D)

3.23

Grenzzugfestigkeit

R_m

Spannung, die der Höchstkraft in Prüfungen mit einachsiger Zugbeanspruchung nach EN ISO 6892-1 und EN ISO 6892-2 entspricht, oder anhand von Small-Punch-Tests geschätzte Spannung (Anhang C)

3.24

Bruchzähigkeit bei ebenem Dehnungszustand

K_{Ic}

Beständigkeit gegen Rissverlängerung bei ebenem Dehnungszustand an der Risspitze, die als kritischer Wert des Spannungsintensitätsfaktors ausgedrückt wird

3.25

Bruchzähigkeit des J -Integrals bei ebenem Dehnungszustand

J_{Ic}

Beständigkeit gegen Rissverlängerung bei ebenem Dehnungszustand an der Risspitze, die als kritischer Wert des Spannungsintensitätsfaktors des J -Integrals J_{Ic} ausgedrückt wird

3.26

effektive Bruchdehnung

ε_f

natürlicher Logarithmus des Verhältnisses der Anfangsprobendicke h_0 zur Dicke nach der Prüfung in der Nähe der Bruchfläche h_f (Anhang H)

4 Symbole und Bezeichnungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole und Bezeichnungen.

ANMERKUNG Diese Liste enthält nur die wichtigsten Symbole. Weniger wichtige Symbole, die nur in einem bestimmten Kontext verwendet werden, sind nicht aufgeführt.

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Bezugsdokument
A_{gt}	%	gesamte Gleichmaßdehnung in der Prüfung mit einachsiger Zugbeanspruchung	Anhang C
A, B	mm	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_n(T)$	Anhang E
$A_\varepsilon, B_\varepsilon$	–	Parameter in der tanh-Anpassung von $\varepsilon_f(T)$	Anhang E
α	–	Übertragungsfaktor zwischen T_{SP} und T_{CVN} : $T_{SP} = \alpha T_{CVN}$	Anhang E

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Bezugsdokument
α_ϵ	–	Übertragungsfaktor zwischen $T_{SP,\epsilon}$ und T_{CVN} : $T_{SP,\epsilon} = \alpha_\epsilon T_{CVN}$	Anhang E
β_{Rm}	–	Korrelationskoeffizient für die Schätzung von R_m	Anhang C
C	K	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_n(T)$	Anhang E
C_ϵ	K	Parameter in der tanh-Anpassung von $\epsilon_f(T)$	Anhang E
C_P	mm/N	Nachgiebigkeit von Stempel und Schubstange	Anhang A
d	mm	Durchmesser der Stempelspitze	Abschnitt 6
D	mm	Durchmesser der Aufnahmebohrung (untere Matrize)	Abschnitt 6
$DBTT$	°C, K	Duktil-zu-spröde-Übergangstemperatur	Anhang E
D_S	mm	Durchmesser des Prüfkörpers	Abschnitt 5
E_{LS}	mJ	Energie der Tieflage	Anhang E
EMF	–	Thermospannung (en: electromotive force)	Anhang B
E_n	mm	E_{SP} , auf F_m normiert	Anhang E
E_{SP}	mJ	Small-Punch-Energie	Anhang E
E_{US}	mJ	Energie der Hochlage	Anhang E
E_{LS}	mJ	Energie der Tieflage	Anhang E
E_Y	GPa	Elastizitätsmodul	Anhang A
ϵ_f	–	effektive Bruchdehnung $\epsilon_f = \ln(h_0/h_f)$	Anhang E
ϵ_{LS}	–	effektive Bruchdehnung in der Tieflage	Anhang E
$\dot{\epsilon}_{min}$	1/h	geschätzte Mindestdehnungsrate unter einachsiger Beanspruchung, die der Mindestdurchbiegungsrate in einer SP-Kriechprüfung entspricht	Anhang G
ϵ_{US}	–	effektive Bruchdehnung in der Hochlage	Anhang E
F	N	auf die Probe einwirkende Kraft	Abschnitt 7, Abschnitt 8
F_e	N	Elastisch-plastische Übergangskraft in einem Small-Punch-Test	Abschnitt 7, Anhang D
F_m	N	Höchstwert von F während der Prüfung	Anhang C, Anhang E
F_i	N	Kraft bei der Durchbiegung u_i oder der Verschiebung v_i , verwendet für die Abschätzung von R_m	Anhang C
h	mm	Dicke des Prüfkörpers	Abschnitt 5
h_0	mm	Anfangsdicke des Prüfkörpers (zu Beginn der Prüfung)	Abschnitt 5
h_f	mm	Enddicke des Prüfkörpers neben der Bruchfläche	Anhang E, Anhang H
J_{Ic}	N/mm	Bruchzähigkeit des J-Integrals bei ebenem Dehnungszustand	Anhang F
K_{Ic}	MPa m ^{0,5}	Bruchzähigkeit bei ebenem Dehnungszustand	Anhang F
L	mm	Länge der Fase in der Aufnahmebohrung	Abschnitt 6
Ψ	N/MPa	Kraft-Spannungsverhältnis in SP-Kriechprüfung	Anhang G
r	mm	Radius der Stempelspitze	Abschnitt 6

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Bezugsdokument
R	mm	Radius der Aufnahmebohrung (untere Matrize)	Abschnitt 6
R_0	MPa	Anfangsspannung in der Kriechprüfung mit einachsiger Beanspruchung	Anhang G
R_a	μm	Oberflächenrauigkeit (des Prüfkörpers)	Abschnitt 5
R_m	MPa	Grenzzugfestigkeit	Anhang C
R_p	MPa	Dehngrenze	Anhang D
σ	MPa	Vergleichsspannung	Anhang G
T	$^{\circ}\text{C}$, K	Prüftemperatur	Abschnitt 6, Abschnitt 7, Abschnitt 8, Anhang B
T_{CVN}	$^{\circ}\text{C}$, K	Charpy-Übergangstemperatur, festgelegt bei 50 % der Energie der Hochlage (siehe EN ISO 148-1)	Anhang E
t_r	h	Bruchzeit in SP-Kriechprüfung	Anhang G
T_{SP}	$^{\circ}\text{C}$, K	im SP-Test ermittelte Duktil-zu-spröd-Übergangstemperatur	Anhang E
$T_{\text{SP},\epsilon}$	$^{\circ}\text{C}$, K	T_{SP} , bestimmt aus der Bruchdehnung	Anhang E
t_u	h	Kriechbruchzeit mit einachsiger Beanspruchung	Anhang G
u	mm	Durchbiegung der Probe	Abschnitt 7, Abschnitt 8
u_e	mm	Durchbiegung bei F_e	Anhang D
u_i	mm	charakteristische Durchbiegung zur Abschätzung von R_m	Anhang C
u_m	mm	Durchbiegung bei F_m	Anhang C, Anhang E
u_{min}	mm	Durchbiegung bei der Minstdurchbiegungsrate $\dot{u}_{\text{min}}$ in einer SP-Kriechprüfung	Anhang G
$\dot{u}$	mm/h	Durchbiegungsrate	Anhang G
$\dot{u}_{\text{min}}$	mm/h	Minstdurchbiegungsrate in einer SP-Kriechprüfung	Anhang G
u_{p1}	mm	Durchbiegung beim ersten signifikanten Lastabfall (Pop-in-Ereignis)	Anhang E
v	mm	Verschiebung der Kugel/Stempelspitze	Abschnitt 7, Abschnitt 8
v_i	mm	charakteristische Verschiebung, verwendet zur Abschätzung von R_m	Anhang C
v_{p1}	mm	Verschiebung beim ersten signifikanten Lastabfall (Pop-in-Ereignis)	Anhang E
v_r	mm	Verschiebung bei Bruch	Anhang G
w	mm	Verschiebung des Querhaupts	Anhang A

5 Prüfkörper

5.1 Allgemeines

Die Prüfkörper, die verwendet werden sollten, sind kreisförmige Scheiben mit einem Durchmesser von $D_S = 8 \text{ mm}$ und einer Anfangsdicke von $h_0 = 0,5 \text{ mm}$. Die Verwendung anderer Probenformen ist nach diesem Dokument zulässig, sofern die Anforderungen an Dicke und Oberflächengüte erfüllt sind und sie ordnungsgemäß eingespannt werden können.

Die Verwendung von kleineren Prüfkörpern ($D_S = 3 \text{ mm}$, $h_0 = 0,25 \text{ mm}$) ist nach diesem Dokument ebenfalls zulässig. Dies ermöglicht die Verwendung von Proben, die an die Größe eines TEM-Probenhalters angepasst sind.

Um makroskopische Werkstoffeigenschaften zu erhalten, muss die Probendicke ein repräsentatives Volumenelement umfassen. Die Probe sollte mindestens 5 Körner im Dickenquerschnitt enthalten, jedoch können in bestimmten Fällen Ausnahmen für grobkörnige, gerichtet erstarrte oder einkristalline Werkstoffe gemacht werden.

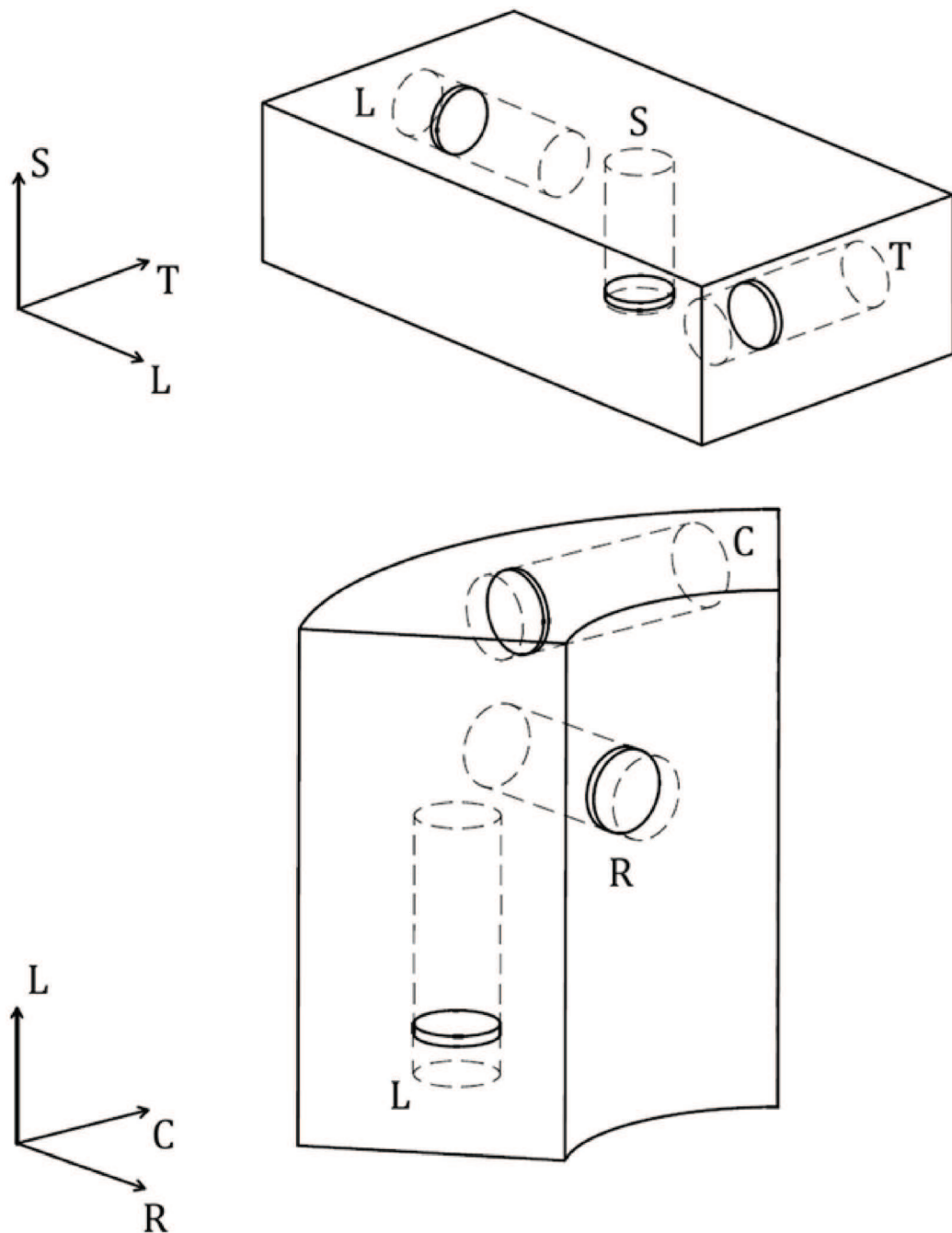
Diese Fälle müssen entsprechend in den Prüfbericht aufgenommen werden; die empfohlenen Wechselbeziehungen für Zug- und Bruchschätzwerte gelten möglicherweise nicht.

Um den Einfluss von Oberflächenschäden auszuschließen, sollte die Probe auf eine Mindestdicke von $h_0 + 0,1 \text{ mm}$ bearbeitet, beidseitig mit Schleifpapier mit der empfohlenen Schleifkorngrößenbezeichnung P320 geschliffen und danach fein geschliffen (P1200) werden, um die Enddicke mit einer Toleranz von maximal 1 % zu erreichen. Beim Schleifen auf beiden Seiten muss ein Materialabtrag von mindestens 0,03 mm auf jeder Seite des Prüfkörpers erreicht werden. Da die Probe während der Prüfung eingespannt wird, ist das Grenzabmaß des Durchmessers D_S nicht kritisch, darf aber nicht unter dem in Tabelle 1 angegebenen Wert liegen, um eine ausreichende Einspannung sicherzustellen. Die Dicke der Scheibenproben muss an 4 Stellen am Umfang jeweils im Abstand von 90° und im Mittelpunkt gemessen werden. Jede Messung muss innerhalb der Vorgaben liegen. Der Durchmesser muss an 2 Positionen, jeweils um 90° versetzt zueinander, gemessen werden.

Tabelle 1 — Erforderliche Abmessungen, Toleranzen und Oberflächenrauigkeiten der Prüfkörper

D_S [mm]		h_0 [mm]		R_a [μm]
ø 8	0	0,50	+0,005	< 0,25
	−0,1		−0,005	
ø 3	0	0,25	+0,002 5	< 0,25
	−0,025		−0,002 5	

Die Ausrichtung des Prüfkörpers muss wie in Bild 1 im Prüfbericht festgelegt werden.



Legende

- L Längsrichtung (d. h. Walzrichtung)
- T Querrichtung
- S Querrichtung kurze Seite
- C Umfangsrichtung
- R Radialrichtung

ANMERKUNG Die Proben sind klassifiziert, wobei der Achsenbezeichnungsbuchstabe gleichzeitig auch die Achse bezeichnet, entlang derer die Kraft aufgebracht wird. Aufgrund des mehrachsigen Spannungszustandes stimmen die in einem SP-Test geprüften Richtungen nicht mit der Kraftachse überein.

Bild 1 — Ausrichtung der SP-Probe

5.2 Werkstoffprobenahme

Ein großer Vorteil des Small-Punch-Tests besteht darin, dass er die Abschätzung der tatsächlichen mechanischen Eigenschaften von Betriebskomponenten oder Baustoffen ermöglicht, ohne deren Unversehrtheit und Gebrauchstauglichkeit zu beeinträchtigen. Die Probenahme kann auf minimalinvasive, nahezu zerstörungsfreie Weise erfolgen. Das bedeutet, dass der zu prüfende Werkstoff aufgrund des geringen Entnahmevolumentens, das zur Herstellung von Proben für den SP-Test erforderlich ist, ohne nachträglichen Instandsetzungsbedarf aus dem Bauteil entnommen werden kann. Aktuell erfordern genormte mechanische Prüfungen dagegen relativ große Werkstoffmengen, die nicht ohne nachfolgende Instandsetzung aus im Betrieb befindlichen Komponenten entnommen werden können.

Für die Werkstoffprobenahme können bestehende Entnahmetechniken wie mechanisches oder funkenerosives Abtragen (EDM, en: electric discharge machining) eingesetzt werden. Als universelles System zur Probenahme aus unterschiedlichen Komponenten kann eine Probenahmetechnik mit Schaufelfräser eingesetzt werden, da mit dieser Technik keine wesentliche Beeinträchtigung der Bauteiloberfläche auftritt und keine Instandsetzung bzw. kein Umbau des Bauteils erforderlich ist. Mit einem speziellen halbkugelförmigen Fräser mit Flüssigkeitskühlung kann das Probenahmegerät eine ausreichende Werkstoffmenge ohne mechanische Verformung oder thermische Degradation des Bauteils entnehmen. Das Prinzip der Probenahme mit diesem Gerät wird schematisch in Bild 2 [1]–[3] dargestellt.

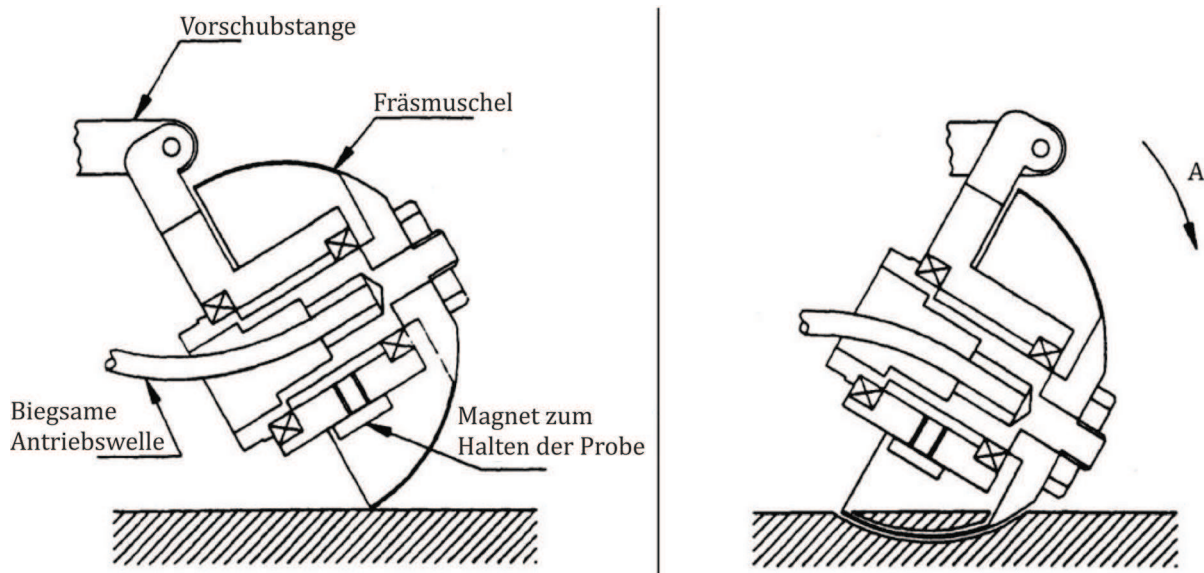


Bild 2 — Schematische Darstellung des Spinnfräasers mit Abrasivschneide [2]

6 Prüfeinrichtung

6.1 Prüfmaschine

Universalprüfmaschinen werden häufig für SP-Tests eingesetzt (Abschnitt 7), während SP-Kriechprüfungen hauptsächlich mit speziellen Druckwaagen durchgeführt werden (Abschnitt 8). Bei beiden Prüfungsarten wird ein scheibenförmiger Prüfkörper zwischen einen oberen und einen unteren Teil des Probenhalters eingespannt. Ein halbkugelförmiger Stempel oder eine Kugel verformt die Scheibenprobe, bis der Bruch durch einen Kraftabfall (SP-Test) oder einen abrupten Anstieg der Durchbiegung/Verschiebung (SP-Kriechprüfung) angezeigt wird.

Für beide Prüfungsarten muss die Prüfkraft in der Prüfmaschine lotrecht auf die Oberfläche des Prüfkörpers aufgebracht werden und ungewolltes Kippen des Stempels oder Fehlausrichtung der Probe vermieden werden. Vor der Prüfung sollte die Maschine einer Sichtprüfung unterzogen werden, um sicherzustellen, dass der Stempel, der Probenhalter, die Kardangelenke und zugehörigen Maschinenteile in gutem Zustand sind.

6.2 Prüfumgebung

6.2.1 Allgemeines

Wenn bei einer gegebenen Temperatur und der erwarteten Prüfdauer die Probe oxidiert, muss die Prüfung in einer inerten Umgebung oder im Vakuum durchgeführt werden.

6.2.2 Heiz-/Kühlsystem

Small-Punch-Tests können in einem weiten Temperaturbereich durchgeführt werden, d. h. von sehr tiefen bis zu hohen Temperaturen. In allen Fällen ist die Messung der tatsächlichen Prüftemperatur von großer Bedeutung (Anhang B und Anhang G). Bei sehr tiefen Temperaturen sollte darauf geachtet werden, dass die Durchbiegungs-/Verschiebungsmessung und die tatsächlich aufgebrachte Kraft nicht durch Eisbildung beeinflusst werden.

6.3 Aufbringen und Messen der Kraft

In SP-Tests und SP-Kriechprüfungen muss die Kraft gleichmäßig und stoßfrei aufgebracht werden.

Für SP-Tests (und SP-Kriechprüfungen mit Kraftmessung) muss das Kraftmesssystem die Anforderungen der Klasse 1 oder höher nach EN ISO 7500-1 erfüllen. Für statische Druckwaagen (ohne Kraftmessung) sind die Anforderungen in EN ISO 7500-2 festgelegt.

Es ist wichtig sicherzustellen, dass die tatsächlich auf die Probe aufgebrachte Kraft bekannt ist, d. h. Reibungsverluste und ähnliche Wirkungen von Durchführungen, Riemenscheiben und Hebeln müssen berücksichtigt werden.

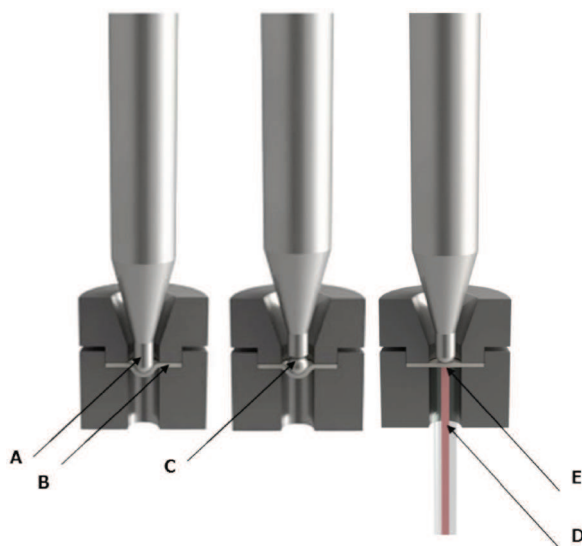
6.4 Stempel und Probenhalter

2 unterschiedliche Stempellösungen können eingesetzt werden. Sowohl ein Stempel mit halbkugelförmiger Spitze als auch eine Kugel können wie in Bild 3 gezeigt, eingesetzt werden. Die Maße des in dieser Prüfanordnung einzusetzenden Probenhalters, die sich für Standardproben (Tabelle 1) eignen, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Bei der Herstellung des Probenhalters sind Allgmeintoleranzen nach Toleranzgrad „f“ (fein) nach ISO 2768-1 zulässig. Die Aufnahmebohrung, die Fase und der halbkugelförmige Stempel/die Kugeln müssen die Anforderungen an die Toleranzen von H6 nach EN ISO 286-2 erfüllen. In Bild 4 ist ein Probenhalter exemplarisch dargestellt.

Die Oberflächen des Probenhalters müssen eben und lotrecht zur Krafrichtung angeordnet sein. Die Oberflächen, die Einfluss auf die Probenposition und -einspannung haben, müssen sauber und frei von Oxidablagerungen, Korrosion und Schmutz sein. Die Arbeitsflächen des oberen und unteren Teils des Probenhalters müssen bei den Prüftemperaturen eine gute Oxidationsbeständigkeit aufweisen. Der Probenhalter selbst oder eine separate Halterung muss für ausreichende Einspannung sorgen, d. h. ein Biegen der Probe nach oben zuverlässig verhindern. Bei Einspannvorrichtungen mit mehreren Spannschrauben ist es wichtig, beim Anziehen der Schrauben nach jeder Schraube auf die gegenüberliegende Seite zu wechseln, um eine ungleichmäßige Einspannung zu vermeiden. Zu starke Einspannung muss vermieden werden, da eine plastische Vorverformung das Prüfergebn beeinflussen könnte. Zur besseren Wiederholbarkeit der Einspannung sollte ein Drehmomentschlüssel eingesetzt werden, um eine gleichbleibende Torsionsbelastung sicherzustellen.

Bei SP-Kriechprüfungen unter hohen Temperaturen stellen die Oxidation und der Verschleiß des Stempels ein Problem dar, insbesondere wenn metallische Stempel eingesetzt werden. Es wird empfohlen, die Halbkugelsempel regelmäßig auf Verschleiß zu prüfen, um sicherzustellen, dass die geforderten Toleranzen weiterhin eingehalten werden.



Legende

- A Stempel
- B Probe
- C Stanzkugel
- D Keramikstab zur Messung der Durchbiegung (und Messung der Temperatur E)
- E Stelle, an der ein Thermoelement in den keramischen Durchbiegungsmessstab integriert werden kann

Bild 3 — Prüfanordnung und Probe

Tabelle 2 — Erforderliche Maße bei der Prüfanordnung

	Erforderliche Maße bei der Prüfanordnung für den Durchmesser der Aufnahmebohrung	Stempelradius	Fasenlänge
Prüfkörper	D [mm]	r [mm]	L [mm]
Standardprobe	4	1,25	0,2
Kleinstprobe	1,75	0,5	0,2