

DIN EN 10371

ICS 77.040.10

Einsprüche bis 2019-08-21

Entwurf**Small punch test für metallische Werkstoffe;
Deutsche und Englische Fassung prEN 10371:2019**

Small Punch Test Method for Metallic Materials;
German and English version prEN 10371:2019

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-06-21 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 126 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 10371:2019) 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).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text

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

ISO 2768-1:1989 siehe DIN ISO 1991-06

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 1991-06, *Allgemeintoleranzen — Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung; Identisch mit ISO 2768-1:1989*

Small punch test für metallische Werkstoffe

Small Punch Test Method for Metallic Materials

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokument-Stage: CEN-Umfrage
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9p

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Bezeichnungen	10
5 Prüfkörper	13
5.1 Allgemeines	13
5.2 Werkstoffproben	15
6 Prüfeinrichtung	15
6.1 Prüfmaschine	15
6.2 Prüfumgebung	16
6.2.1 Allgemeines	16
6.2.2 Heiz-/Kühlsystem	16
6.3 Aufbringen und Messen der Kraft	16
6.4 Stempel und Probenhalter	16
6.5 Messung der Verschiebung bzw. Durchbiegung	18
6.6 Messung der Prüftemperatur	18
7 Small-Punch-Test	19
7.1 Kurzbeschreibung	19
7.2 Prüfverfahren	19
7.2.1 Einlegen des Prüfkörpers	19
7.2.2 Vorlast	19
7.2.3 Verschiebungsrates	19
7.2.4 Überwachung der Prüfung	20
7.2.5 Ende der Prüfung	20
7.3 Charakteristische Parameter auf der Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$	20
7.3.1 Kraft an der Streckgrenze, F_e	20
7.3.2 Durchbiegung u_e bei F_e	23
7.3.3 Kraft bei Einsetzen der plastischen Instabilität, F_i	23
7.3.4 Höchstkraft während der Prüfung F_m	23
7.3.5 Durchbiegung u_m bei F_m	24
7.3.6 Small-Punch-Energie, E_{sp}	24
7.4 Prüfbericht	24
8 Small-Punch-Kriechprüfung	24
8.1 Kurzbeschreibung	24
8.2 Besonderheiten der Prüfeinrichtung für Small-Punch-Kriechprüfungen	25
8.2.1 Prüfraumen	25
8.2.2 Prüfumgebung	25
8.3 Prüfverfahren	25
8.3.1 Vorbereitung der Prüfung	25
8.3.2 Temperierung	25

8.3.3	Aufbringen einer Vorlast.....	25
8.3.4	Aufbringen der Prüfkraft.....	26
8.3.5	Überwachung der Prüfung.....	26
8.3.6	Unterbrechung und Ende der Prüfung.....	26
8.3.7	Untersuchung nach der Prüfung.....	26
8.4	Eigenschaften der Durchbiegungs-Zeitkurve	27
8.5	Prüfbericht.....	27
Anhang A (informativ) Bestimmung der Nachgiebigkeit eines Small-Punch-Prüfstands für Verschiebungsmessungen.....		
A.1	Einleitung	28
A.2	Experimentelle Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems	29
A.3	Rechnerische Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems	30
Anhang B (informativ) Verfahren zur Temperaturregelung und -messung bei Small-Punch-Tests		
B.1	Überprüfung der Temperaturgleichmäßigkeit.....	31
B.2	Temperaturmessung.....	32
Anhang C (informativ) Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m anhand von Small-Punch-Tests		
C.1	Allgemeine Verfahrensweise	36
C.2	Vorgabe der F_m -basierten Wechselbeziehung.....	36
C.3	Vorgabe der F_f -basierten Wechselbeziehung	37
Anhang D (informativ) Abschätzung der Dehngrenze $R_{p0,2}$ anhand von Small-Punch-Tests		
D.1	Kurzbeschreibung.....	40
D.2	Wechselbeziehungen	40
Anhang E (informativ) Abschätzung der DBTT anhand von Small-Punch-Tests		
E.1	Allgemeine Verfahrensweise	41
E.2	Bestimmung von T_{SP} anhand der SP-Energie.....	41
E.3	Bestimmung von T_{SP} anhand der effektiven Bruchdehnung	42
Anhang F (informativ) Abschätzung der Bruchzähigkeit anhand von Small-Punch-Tests		
F.1	Kurzbeschreibung.....	45
F.2	Zweistufige Wechselbeziehung zur Bestimmung von K_{IC}	45
F.3	Empirische Wechselbeziehung zwischen ε_f und J_{IC}	46
F.4	Bestimmung von δ_{IC} mithilfe gekerbter Proben.....	46
Anhang G (informativ) Abschätzung der Kriecheigenschaften anhand von Small-Punch-Kriechprüfungen.....		
G.1	Allgemeine Verfahrensweise	48
G.2	Umwandlung der Kraft in Spannung.....	48
G.3	Prognose der Kriecheigenschaften unter Verwendung von experimentellen Wechselbeziehungen	50
G.4	Extrapolationen auf der Grundlage von SP-Kriechprüfungen.....	51
Anhang H (informativ) Untersuchung des Prüfkörpers nach der Prüfung.....		
H.1	Lichtmikroskopie	52
H.2	Bestimmung der effektiven Bruchdehnung ε_f	54
Anhang I (informativ) Maschinenlesbare Formate.....		
I.1	Einleitung	58
I.2	Maschinenlesbare Formate für Small-Punch-Tests	58
Literaturhinweise.....		59

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 10371:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 459 SC 1 "Prüfverfahren für Stahl (andere als chemische Analysen)" erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird CWA 15627:2007 ersetzen.

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 interessante Anwendungsbereiche des Small-Punch-Prüfverfahrens sind die Bestimmung der Eigenschaften von bestrahlten Werkstoffen, wobei kleine Proben die Strahlenbelastung des Laborpersonals minimieren, oder die Untersuchung der unterschiedlichen Zonen in Schweißnähten.

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 ISO 148-1:2016, *Metallische Werkstoffe — Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy — Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2016)*

EN ISO 204:2018, *Metallische Werkstoffe — Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung — Prüfverfahren (ISO 204:2018)*

EN ISO 286-2:2010, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — ISO-Toleranzsystem für Längenmaße — Teil 2: Tabellen der Grundtoleranzgrade und Grenzabmaße für Bohrungen und Wellen (ISO 286-2:2010)*

EN ISO 6892-1:2016, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016)*

EN ISO 6892-2:2018, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur (ISO 6892-2:2018)*

EN ISO 7500-1:2018, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung und Überprüfung von statischen und einachsigen Prüfmaschinen — Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen — Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung (ISO 7500-1:2018)*

EN ISO 7500-2:2006, *Metallische Werkstoffe — Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 2: Zeitstandprüfmaschinen für Zugbeanspruchung — Prüfung der angewendeten Kraft (ISO 7500-2:2016)*

EN ISO 9513:2012, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung (ISO 9513:2012)*

EN 60584-1:2013, *Thermoelemente — Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013)*

ISO 2768-1:1989, *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 <http://www.electropedia.org/>

— ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Stempel

Eine massive Stange mit einer halbkugelförmigen Spitze oder eine zylindrische Stange in Kombination mit einer Kugel wird eingesetzt, um den scheibenförmigen Prüfkörper in der Mitte zu durchdringen. 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 dieser Norm zulässig, wenn der aktive Teil der Probe eine flache zylindrische Form aufweist und die Einspannfläche genauso groß oder größer ist als die der in dieser Norm aufgeführten Proben.

3.3

Small-Punch-Test (SP-Test)

wenn die Stempelspitze/Kugel bei konstanter Verschiebungsrates des Kreuzkopfs $\dot{w}$ 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

Kreuzkopfverschiebung

w

Weg, den der Kreuzkopf 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 dem Berührungspunkt zwischen Stempel und Probe gegenüberliegenden Oberfläche 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

$v(t)$

Aufzeichnung 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

$F(u)$

Aufzeichnung der Kraft F , die erforderlich ist, um den Stempel bei konstanter Kreuzkopfverschiebung $\dot{w}$ 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 Kreuzkopfverschiebung $\dot{w}$ 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 Kreuzkopfes 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 Spröd 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 Spröd-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 von Anfangsrischwachstum (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 Energieniveau 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 Energieniveau bei einer gegebenen Temperatur T_{SP} . Das niedrige Niveau von $E_{SP}(T)$ wird als Energie der Tieflage E_{LS} bezeichnet.

3.18

für die Berechnung von E_{SP} relevantes Anfangsrisswachstum

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Für die Berechnung von E_{SP} ist ein signifikantes Anfangsrisswachstum 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 definiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei einer einachsigen Kriechprüfung dürfen dem Formelzeichen t 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, z. B. $R_{p0,2}$.

3.22

Streckgrenze

R_{eL} , R_{eH}

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

3.23

Zugfestigkeit

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	mJ	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_{SP}(T)$	Anhang E
A_ε , B_ε	-	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_{SP}(T)$	Anhang E
α	-	Übertragungsfaktor zwischen T_{SP} und T_{CVN} : $T_{SP} = \alpha T_{CVN}$	Anhang E
α_ε	-	Übertragungsfaktor zwischen $T_{SP,\varepsilon}$ und T_{CVN} : $T_{SP,\varepsilon} = \alpha_\varepsilon T_{CVN}$	Anhang E
β_{Rm}	-	Korrelationskoeffizient für die Schätzung von R_m	Anhang C
C	K	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_{SP}(T)$	Anhang E

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Bezugsdokument
C_ε	K	Parameter in der tanh-Anpassung von $E_{SP}(T)$	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 Spröd-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	mJ	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 $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$	Anhang E
ε_{LS}	-	effektive Bruchdehnung in der Tieflage	Anhang E
$\dot{\varepsilon}_{min}$	1/h	geschätzte Mindestdehnungsrate unter einachsiger Beanspruchung, die der Minstdurchbiegungsrate 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	Kraft an der Streckgrenze 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
R	mm	Durchmesser der Aufnahmebohrung (untere Matrize)	Abschnitt 6

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Bezugsdokument
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
T	$^{\circ}\text{C}$, K	Prüftemperatur	Abschnitt 6, Abschnitt 7, Abschnitt 8, Anhang B
σ	MPa	nominelle Spannung	Anhang G
T_{CVN}	$^{\circ}\text{C}$, K	Übergangstemperatur nach Charpy, definiert 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
$T_{\text{SP},\varepsilon}$	$^{\circ}\text{C}$, K	T_{SP} , bestimmt aus der Bruchdehnung	Anhang E
t_u	h	Anfangsspannung in Kriechprüfung 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 $\dot{u}_{\min}$ in einer SP-Kriechprüfung	Anhang G
$\dot{u}$	mm/h	Durchbiegungsrate	Anhang G
$\dot{u}_{\min}$	mm/h	Minstdurchbiegungsrate in einer SP-Kriechprüfung	Anhang G
u_{p1}	mm	Durchbiegung beim ersten signifikanten Anfangsrisswachstum (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 Anfangsrisswachstum (Pop-in-Ereignis)	Anhang E
v_r	mm	Verschiebung bei Bruch	Anhang G
w	mm	Verschiebung des Kreuzkopfs	Anhang A

5 Prüfkörper

5.1 Allgemeines

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

Die Verwendung von kleineren Prüfkörpern ($D_S = 3$ mm, $h_0 = 0,25$ 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 fünf Körner im Dickenquerschnitt enthalten, jedoch können in bestimmten Fällen Ausnahmen für grobkörnige, gerichtet, erstarrte oder einkristalline Werkstoffe gemacht werden.

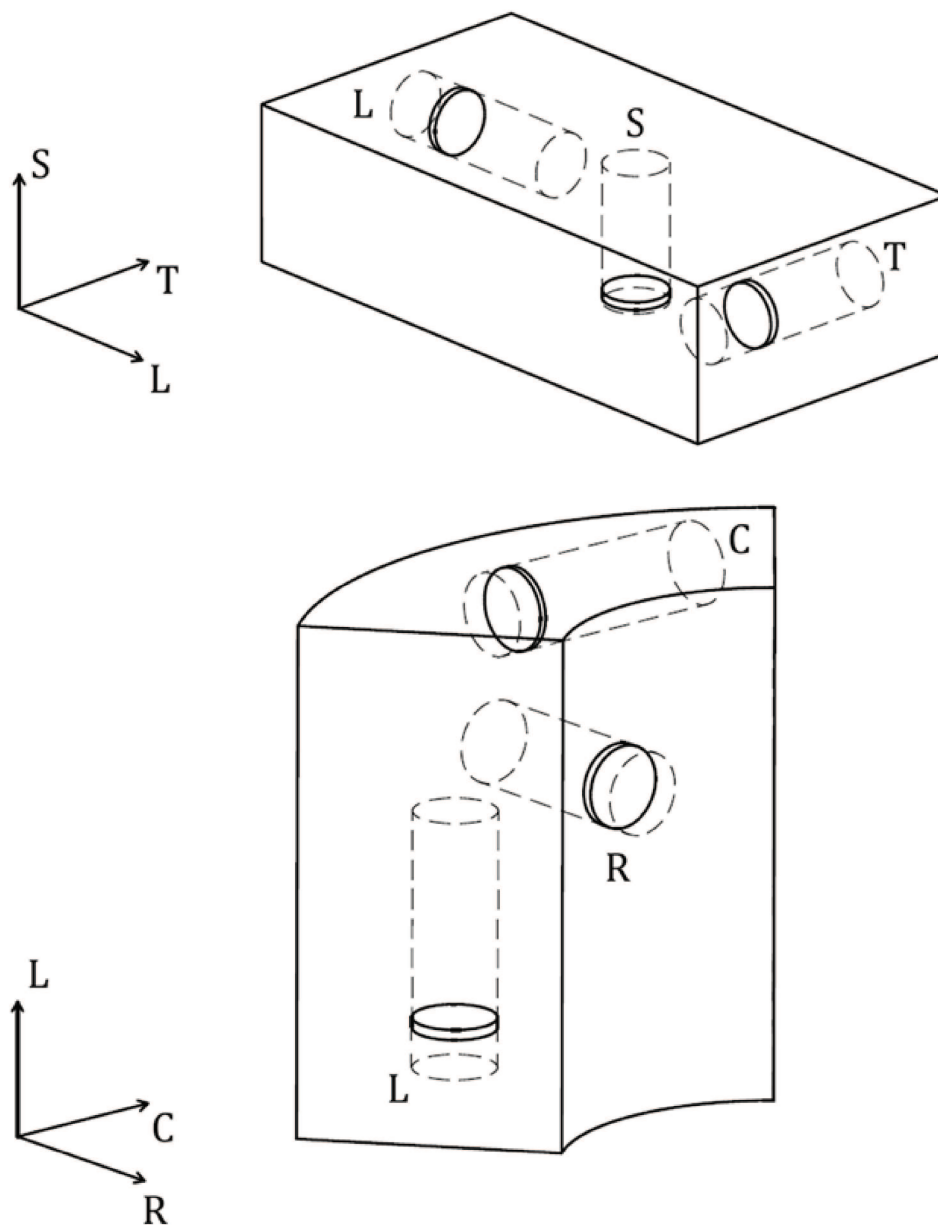
Diese Fälle sind entsprechend in den Prüfbericht aufzunehmen; die empfohlenen Wechselbeziehungen für Zug- und Bruchschätzwerte gelten möglicherweise nicht.

Um den Einfluss von Oberflächenschäden auszuschließen, sollte die Probe auf eine Mindestdicke von $h_0 + 0,1$ mm bearbeitet, beidseitig mit Schleifpapier mit der empfohlenen Schleifkorngrößenbezeichnung P320 geschliffen und danach fein geschliffen (P1200) werden, um die Enddicke mit einer Grenzabweichung 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 zu gewährleisten. Die Dicke der Scheibenproben muss an vier Stellen am Umfang jeweils im Abstand von 90° und im Mittelpunkt gemessen werden. Jede Messung muss innerhalb der Vorgaben liegen. Der Durchmesser muss an zwei Positionen, jeweils um 90° versetzt zueinander, gemessen werden.

Tabelle 1 — Erforderliche Abmessungen, Grenzabmaße und Oberflächenrauigkeiten der Prüfkörper

D_S [mm]		h_0 [mm]		Ra [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 ist in Bild 1 des Prüfberichts festzulegen.



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 Probe für den SP-Test

5.2 Werkstoffproben

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 Entnahmevolumens, 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) eingesetzt werden. Als universelles System zur Probenahme aus unterschiedlichen Komponenten kann eine Probenahmetechnik mit Schaufelfräser (z. B. SSamTM-2-Probennehmer von Rolls-Royce plc.) 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 wird schematisch in Bild 2 [1] – [3] dargestellt.

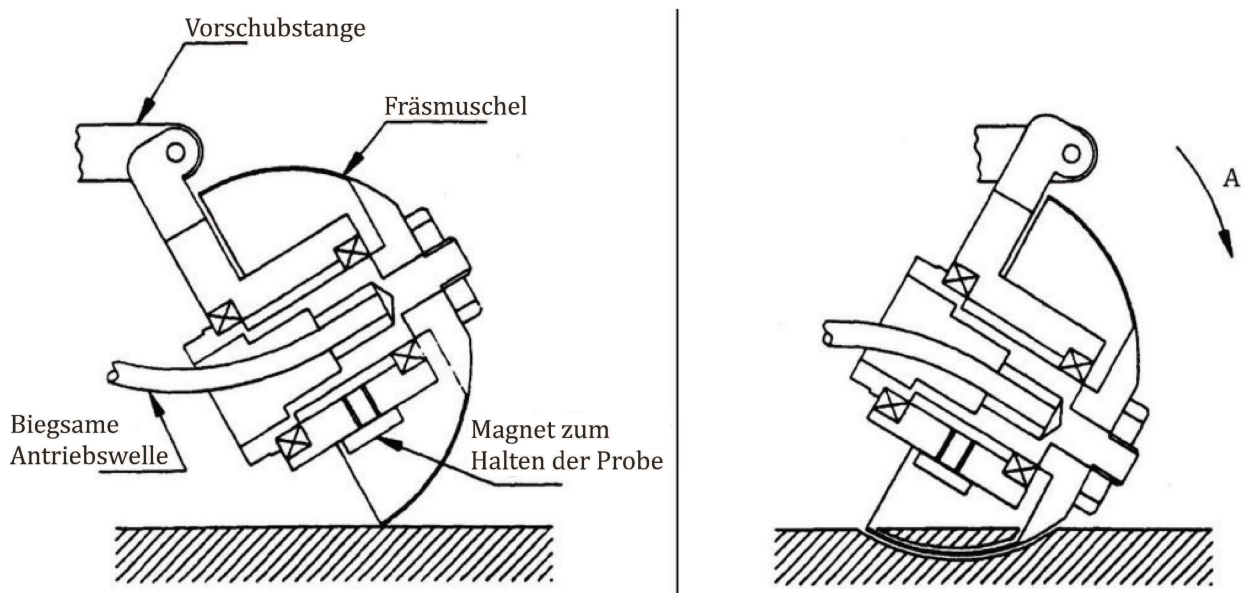


Bild 2 — Schematische Darstellung des Spinnfräasers mit Abrasivschneide [2]

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 Prüfungsumgebung

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). 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 muss sichergestellt werden, dass die tatsächlich auf die Probe aufgebrachte Kraft bekannt ist, d. h. Reibungsverluste und ähnliche Wirkungen von Durchführungen, Riemenscheiben und Hebeln sind zu berücksichtigen.

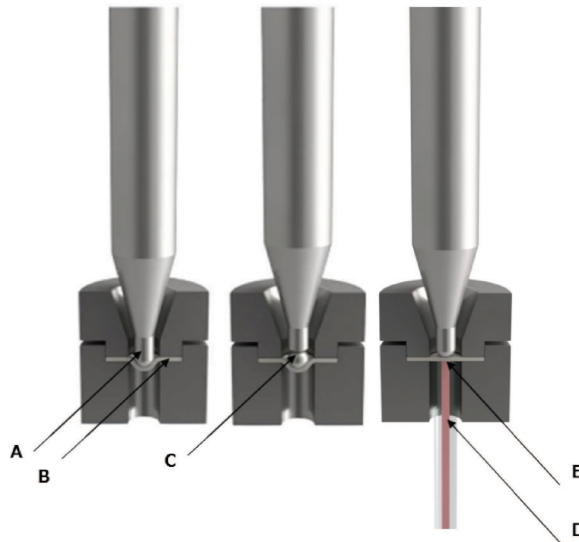
6.4 Stempel und Probenhalter

Zwei 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 Grenzabmaße 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 Prüfergebnis 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 Halbkugelstempel regelmäßig auf Verschleiß zu prüfen, um sicherzustellen, dass die geforderten Grenzabmaße weiterhin eingehalten werden.



Legende

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

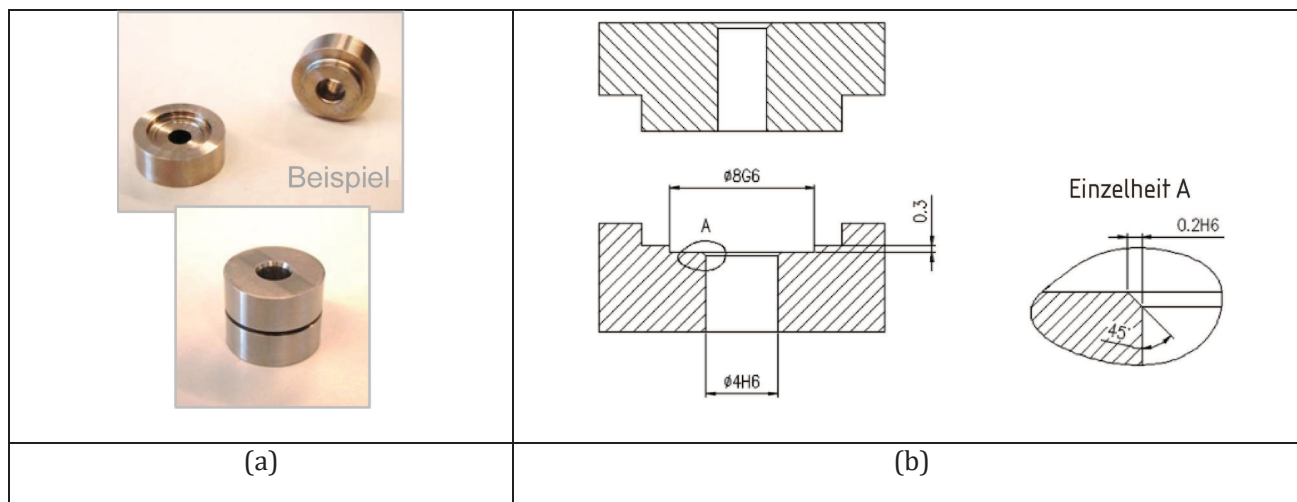
Bild 3 — Prüfanordnung und Probe

Tabelle 2 — Erforderliche Maße bei der Prüfanordnung

Prüfkörper	D [mm]	r [mm]	L [mm]
Standardprobe	4	1,25	0,2
Kleinstprobe	1,75	0,5	0,2

ANMERKUNG In der Vergangenheit kamen andere Stempelradien zur Anwendung (z. B. 1,0 mm). Die Verwendung einer anderen Stempelgröße ist zulässig, um während längerer Prüfungsreihen Konsistenz sicherzustellen. Die Bewertung des Werkstoffverhaltens kann in diesen Fällen jedoch nicht anhand der in dieser Norm angegebenen Wechselbeziehungen vorgenommen werden. Vom Einsatz anderer Stempelgrößen wird abgeraten, um die zukünftige Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus SP-Tests und SP-Kriechprüfungen sicherzustellen.

Es wird empfohlen, einen Probenhalter aus einem Werkstoff mit einem dem Probenwerkstoff ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu verwenden, um Spannungen durch thermische Ausdehnung zu minimieren. Besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe von Stempel, Scheibe und Probenhalter, so müssen die Auswirkungen der thermischen Belastung bewertet werden.



Die flache Aussparung zur Fixierung der Probenposition muss die Grenzabmaße der Probe berücksichtigen ($8_{-0,1}^0$ siehe Abschnitt 5), um sicherzustellen, dass die Probe eben und nicht in einer geneigten Position im Probenhalter liegt, z. B. $\varnothing 8G6$.

Bild 4 — Beispiel eines Probenhalters

6.5 Messung der Verschiebung bzw. Durchbiegung

In SP-Tests oder SP-Kriechprüfungen muss die Verschiebung (oder Durchbiegung) mit einem Dehnungsmessgerät gemessen werden, das die Leistungsanforderungen der Klasse 1 oder höher nach EN ISO 9513 erfüllt, oder durch andere Mittel, die die gleiche Messgenauigkeit sicherstellen. Das Dehnungsmessgerät kann direkt an der Unterseite des Prüfkörpers anliegen (Durchbiegung) und/oder an einer Laststange bzw. dem Stempel befestigt sein (Verschiebung). Auch berührungslose Verfahren wie optische Dehnungsmessgeräte oder Laserextensometer können eingesetzt werden.

Die Dehnungsmessgeräte müssen für einen geeigneten Messbereich in Abhängigkeit von der zu erwartenden Versagensverschiebung/-durchbiegung kalibriert werden, z. B. von 0 mm bis 5 mm.

Das Dehnungsmessgerät muss in Zeitabständen von höchstens einem Jahr neu kalibriert werden. Falls die erwartete Prüfdauer über das Ablaufdatum des Kalibrierscheins hinausreicht, muss das Dehnungsmessgerät vor Beginn der Prüfung neu kalibriert werden.

6.6 Messung der Prüftemperatur

Es wird empfohlen, für die Messung der Prüftemperatur das oder die Thermoelemente mit der Probe in Kontakt zu bringen. Die bevorzugte Messposition ist unter der Probe im Einspannbereich oder von unten durch ein Thermoelement, das in den für die Durchbiegungsmessung verwendeten Keramikstab eingebaut ist. Auch eine andere Positionierung des Prüftemperaturfühlers in unmittelbarer Nähe der Probe ist erlaubt, sofern die tatsächliche Probentemperatur innerhalb der Grenzabweichungen abgeleitet werden kann. In allen Fällen sollte die Temperatur an der instrumentierten SP-Probe wie in Anhang B beschrieben eingemessen werden. Wird ein großes Temperaturgefälle in Längs- oder Dickenrichtung der Probe festgestellt, müssen Abhilfemaßnahmen ergriffen werden.

Zulässige Abweichungen der angezeigten Temperatur T_i von der festgelegten Prüftemperatur T während der Prüfung sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 — Zulässige Abweichungen von T_i und T

Festgelegte Prüftemperatur T °C	Zulässige Abweichung von T_i zu T °C
$T < 600$	± 2
$600 < T \leq 800$	± 3
$800 < T \leq 1\,000$	± 4
$1\,000 < T \leq 1\,100$	± 5

Für Temperaturen über 1 100 °C müssen die zulässigen Werte in Hinblick auf die beabsichtigte Anwendung und durch Absprache unter den beteiligten Parteien bestimmt werden.

7 Small-Punch-Test

7.1 Kurzbeschreibung

Die in diesem Teil der Norm beschriebenen Prüfverfahren umfassen den SP-Test von metallischen Werkstoffen. Nach der Definition in Abschnitt 3 muss der SP-Test mit einer konstanten Verschiebungsrate des Kreuzkopfes der Prüfmaschine $\dot{w}$ durchgeführt werden. Als Ergebnis des Tests wird die Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$ oder alternativ die Kraft-Verschiebungskurve $F(v)$ direkt ausgegeben. Mehrere charakteristische Kenngrößen können von diesen Kurven abgeleitet werden. Insbesondere die Kraft an der Streckgrenze F_e , die Durchbiegung u_e bei F_e (oder alternativ die Stempelspitzenverschiebung v_e bei F_e), die Höchstkraft während der Prüfung F_m , die Durchbiegung u_m bei F_m (oder alternativ die Stempelspitzenverschiebung v_m bei F_m), die Durchbiegung/Verschiebung bei u_i/v_i , das Einsetzen einer plastischen Instabilität F_i , die Kraft bei u_i oder v_i und die Energie E_{SP} bis F_m können über die Prüfkurven bestimmt werden. Diese Parameter bilden zusammen mit den Nachuntersuchungen der Prüfkörper (Anhang H) die Grundlage für die Wechselbeziehungen, die eine Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m (Anhang C), der Dehngrenze R_p (Anhang D), der Spröd-Duktil-Übergangstemperatur T_{SP} (Anhang E) und der Bruchzähigkeit (Anhang F) ermöglichen.

7.2 Prüfverfahren

7.2.1 Einlegen des Prüfkörpers

Der Prüfkörper muss sauber sein und zwischen der oberen und unteren Matrize des Probenhalters im Prüfgerät nach den Anforderungen aus 6.4. eingespannt sein. Weicht die Prüftemperatur von der Raumtemperatur ab, muss die Prüfanordnung mindestens 10 min oder länger vor Beginn der Prüfung auf die Solltemperatur gebracht und gehalten werden, falls dies aufgrund des Temperatúrausgleichs in der Prüfeinrichtung erforderlich ist. Die Temperatur sollte nach Anhang B geregelt werden.

7.2.2 Vorlast

Der SP-Test beginnt, wenn die auf die Probe aufgebrachte Kraft zunimmt. Aus praktischer Sicht kann das Aufbringen einer Vorlast zweckmäßig sein. Der zulässige Höchstwert für diese Vorlast beträgt 10 % von F_e .

7.2.3 Verschiebungsrate

Der SP-Test muss mit einer konstanten Verschiebungsrate des Kreuzkopfs $\dot{w}$ der Prüfmaschine durchgeführt werden. Die Verschiebungsrate w sollte zwischen 0,2 mm/min und 2,0 mm/min liegen.

ANMERKUNG Für die Prüfung und Feststellung von Werkstoffwechselbeziehungen für Stähle wurde in dieser Norm eine Verschiebungsrate von 0,5 mm/min verwendet.

7.2.4 Überwachung der Prüfung

Während der Prüfung sind sowohl die Kraft F als auch die Durchbiegung u nach Abschnitt 6 zu messen. Alternativ kann die Verschiebung der Stempelspitze v ermittelt werden. Die Verschiebung der Stempelspitze v kann aus der Verschiebung des Kreuzkopfes w der Prüfmaschine abgeleitet werden, indem dieser Wert mit der Nachgiebigkeit der Vorrichtung in der Kraftlinie korrigiert wird (Anhang A). Die Häufigkeit der Datenaufnahme sollte so angepasst werden, dass mindestens 500 Datenaufnahmepunkte pro Prüfung erreicht werden.

7.2.5 Ende der Prüfung

Die Prüfung gilt als beendet, wenn die Kraft auf einen Wert unter $0,8 F_m$ abfällt.

ANMERKUNG Kraftschwankungen von über 20 % können bei den niedrigsten Belastungsstufen gleich zu Beginn einer Prüfung auftreten und könnten sich auf das automatisch programmierte Prüfungsende auswirken. Um ein vorzeitiges Ende der Prüfung zu vermeiden, kann eine geringe Vorlast aufgebracht werden (siehe 7.2.2).

7.3 Charakteristische Parameter auf der Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$

7.3.1 Kraft an der Streckgrenze, F_e

Der Übergang vom elastischen in den plastischen Zustand in einem SP-Test kann durch die Kraft F_e gekennzeichnet werden. Diese Kraft kann zur Abschätzung der Streckgrenze R_p des Werkstoffs eingesetzt werden (Anhang D). Die Verfahren zur Bestimmung von F_e sind nachstehend beschrieben. Werden die Werte für F_e in den Prüfbericht aufgenommen, muss immer das Bestimmungsverfahren angegeben werden.

Bilineares Verfahren - F_e kann über die Kraft f_A bestimmt werden (Bild 5). Diese Kraft f_A kann durch Anpassen einer bilinearen Funktion $f(u)$ vom Ursprung der Kurve durch die Punkte A und B wie folgt bestimmt werden:

$$f(u) = \begin{cases} \frac{f_A}{u_A} u & \text{für } 0 \leq u < u_A \\ \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A & \text{für } u_A \leq u \leq u_B \end{cases} \quad (1)$$

Diese bilineare Funktion kann durch Variieren der Parameter f_A , f_B und u_A und durch Minimieren des Fehlers auf folgende Weise einfach angepasst werden:

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du \quad (2)$$

Für u_B wird ein fester Wert, der gleich h_0 ist, empfohlen (Tabelle 1).

Trilineares Verfahren - Wenn alternativ die Verschiebung v anstelle der Durchbiegung u aufgezeichnet wird, kann F_e über die Kraft f_A bestimmt werden (Bild 6). Diese Kraft f_A kann durch Anpassen einer trilinearen Funktion $f(v)$ vom Ursprung der Kurve durch die Punkte 0, A und B wie folgt bestimmt werden:

$$f(v) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq v < v_0 \\ \frac{f_A}{v_A - v_0}(v - v_0) & \text{für } v_0 \leq v < v_A \\ \frac{f_B - f_A}{v_B - v_A}(v - v_A) + f_A & \text{für } v_A \leq v \leq v_B \end{cases} \quad (3)$$

Diese trilineare Funktion kann durch Variieren der Parameter f_A , f_B , v_0 und v_A und durch Minimieren des Fehlers auf folgende Weise einfach angepasst werden:

$$err = \int_0^{v_B} [F(v) - f(v)]^2 dv \quad (4)$$

Für v_B wird ein fester Wert, der gleich h_0 ist, empfohlen (Tabelle 1).

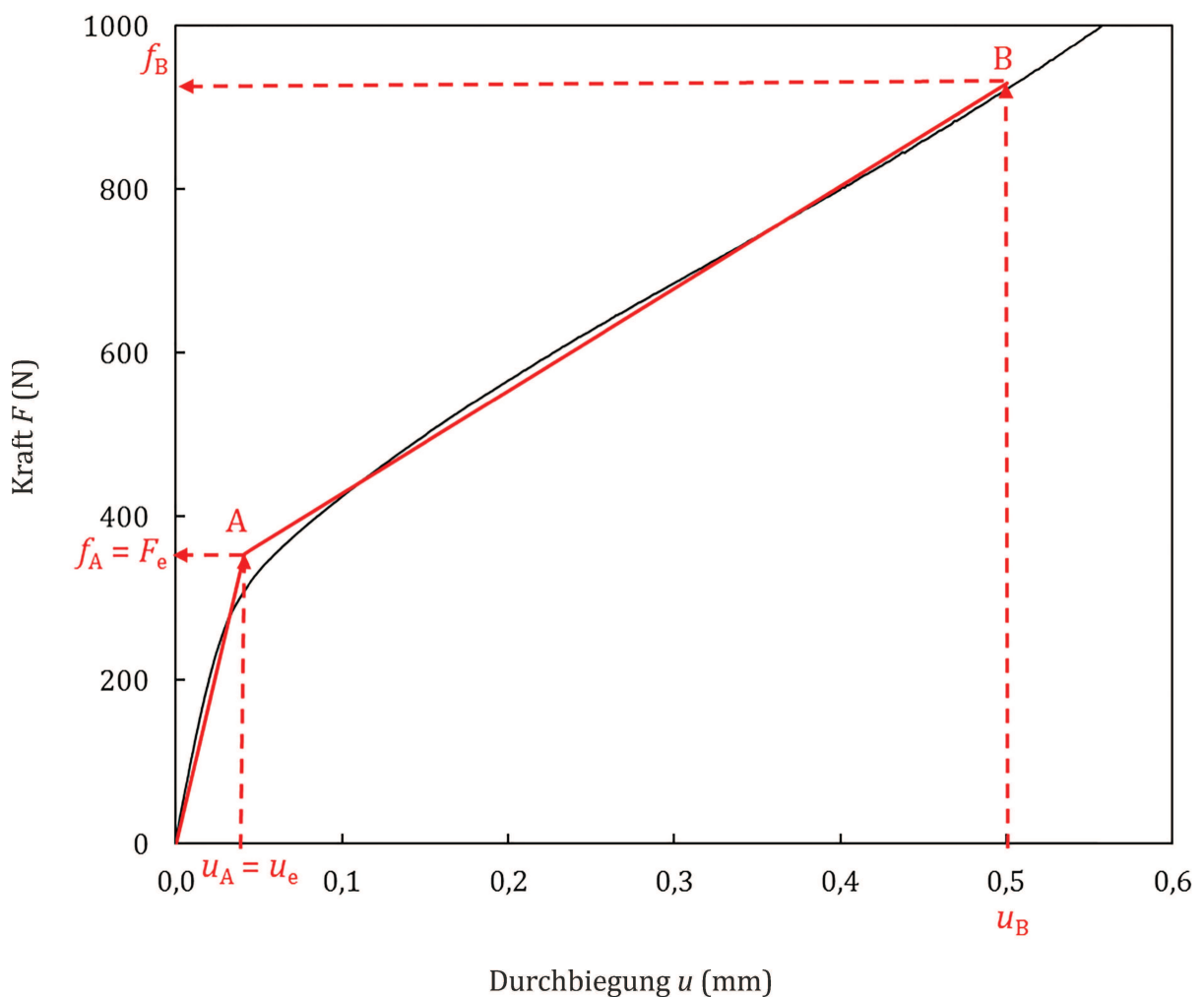


Bild 5 — Bestimmung von F_e und u_e nach dem bilinearen Verfahren

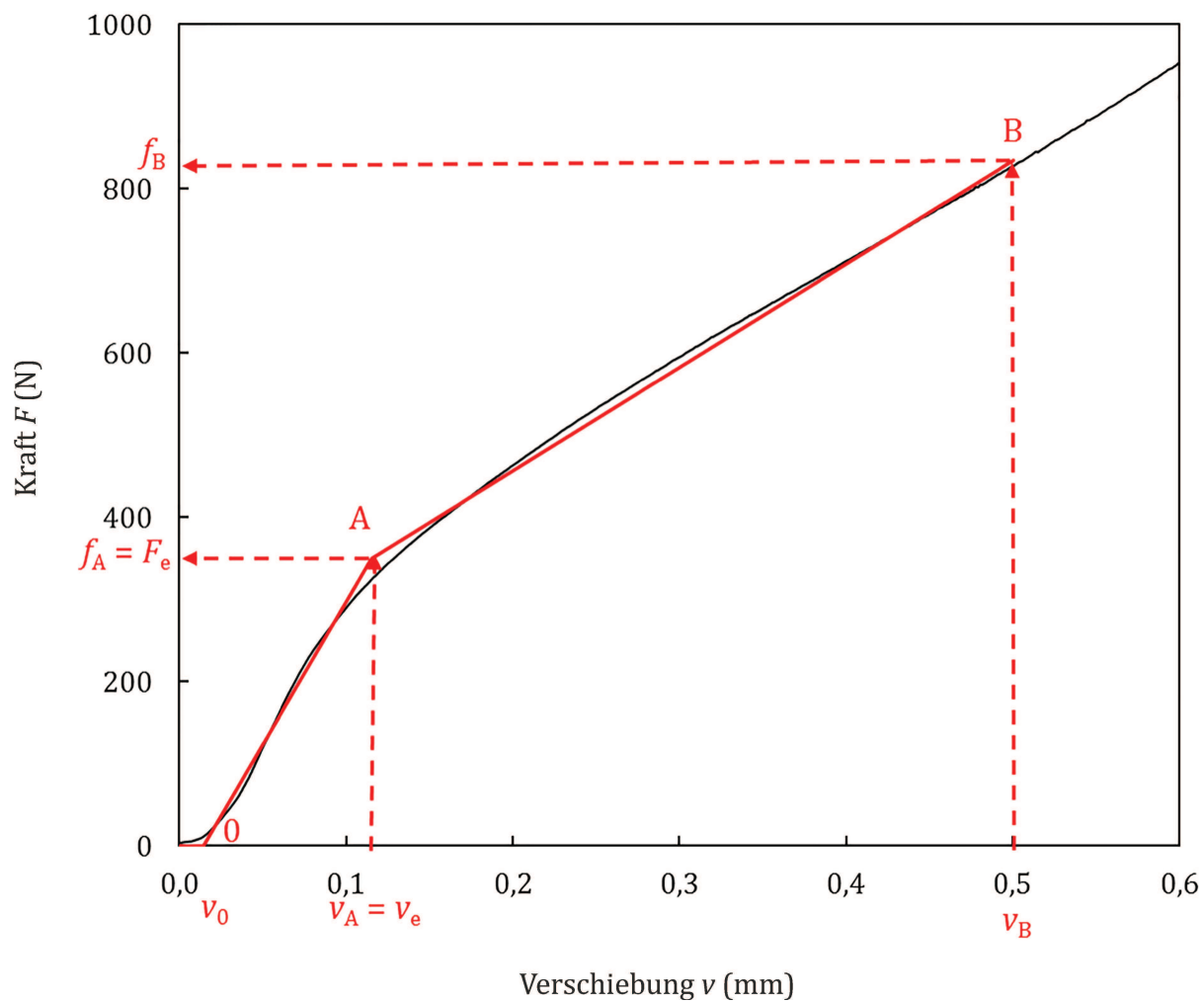


Bild 6 — Bestimmung von F_e und v_e nach dem trilinearen Verfahren (Kraft-Verschiebungskurven)

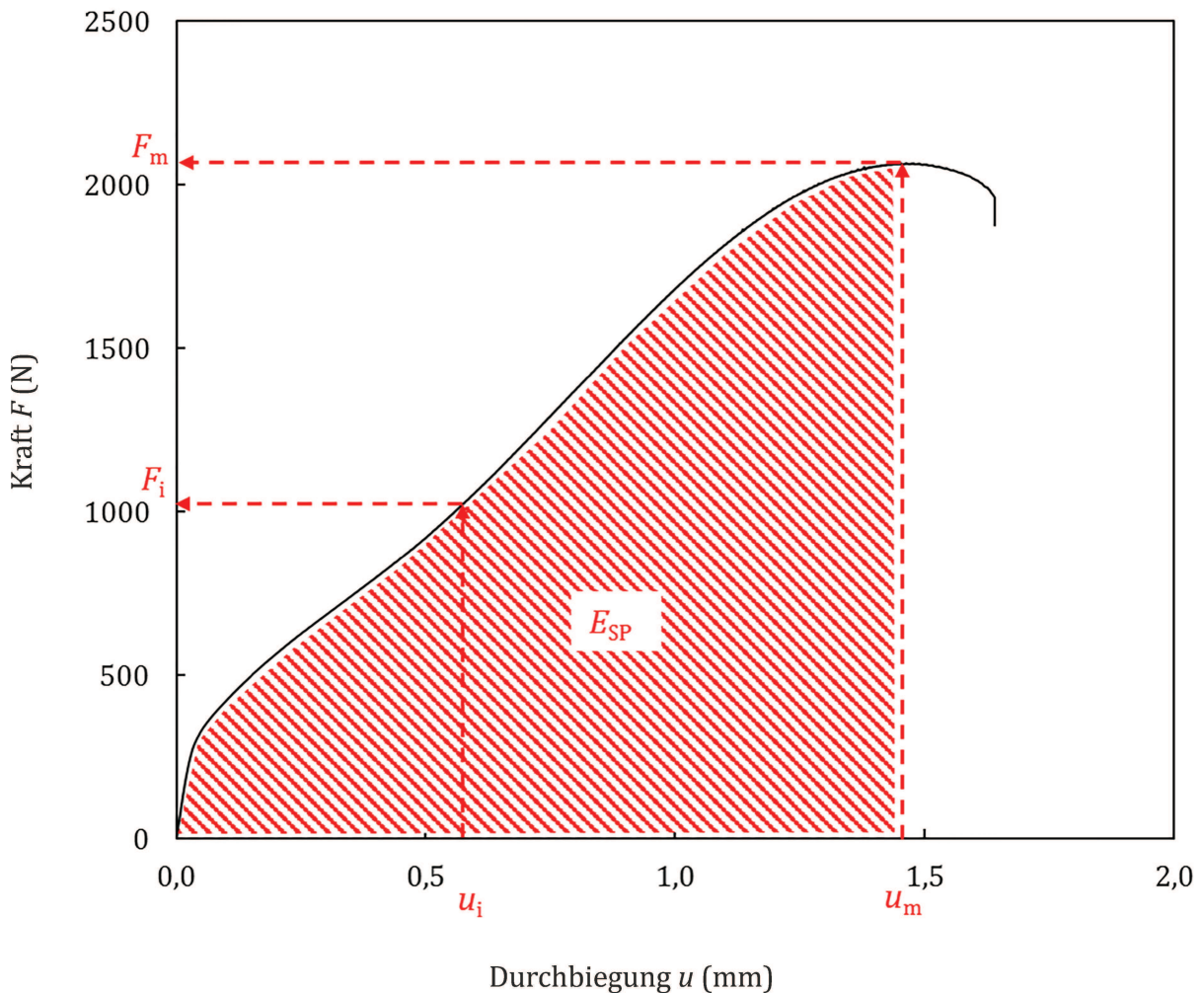


Bild 7 — Bestimmung von F_m , u_m , F_i , u_i und E_{SP}

7.3.2 Durchbiegung u_e bei F_e

u_e ist als die Durchbiegung definiert, die bei F_e auftritt, (Bild 5).

ANMERKUNG Wenn anstelle der Durchbiegung u die Verschiebung v aufgezeichnet wird, können die Werte für v_e bestimmt werden (Bild 6). Die Werte für v_e können nicht mit den Werten für u_e verglichen werden.

7.3.3 Kraft bei Einsetzen der plastischen Instabilität, F_i

F_i ist die Kraft beim Einsetzen der plastischen Instabilität bei der Verschiebung v_i oder der Durchbiegung u_i (C.3, Bild C.2).

7.3.4 Höchstkraft während der Prüfung F_m

F_m kann direkt über die bei der Prüfung gemessene Höchstkraft bestimmt werden (Bild 7). F_m wird in einigen der verfügbaren Wechselbeziehungen zur Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m eingesetzt (Anhang C).

7.3.5 Durchbiegung u_m bei F_m

u_m ist als die Durchbiegung definiert, die bei F_m auftritt (Bild 7). u_m wird in einigen der verfügbaren Wechselbeziehungen zur Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m eingesetzt (Anhang C).

ANMERKUNG Wenn anstelle der Durchbiegung u die Verschiebung v aufgezeichnet wird, können die Werte für v_m bestimmt werden. Die Werte für v_m können nicht mit den Werten für u_m verglichen werden.

7.3.6 Small-Punch-Energie, E_{SP}

E_{SP} ist die Fläche unter der Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$ (Bild 7). Die Werte für E_{SP} dienen zur Bestimmung von T_{SP} (Anhang E). Die Werte für E_{SP} können auch für die qualitative Abschätzung der Bruchfestigkeit des Werkstoffs herangezogen werden.

ANMERKUNG Wenn anstelle der Durchbiegung u die Verschiebung v aufgezeichnet wird, können die Werte für E_{SP} in ähnlicher Weise berechnet werden, sie können aber nicht mit den Werten aus den $F(u)$ -Kurven verglichen werden.

7.4 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden geforderten Informationen enthalten:

- Verweisung auf die Norm prEN 10371;
- Bezeichnung des Werkstoffs und der Probe;
- Beschreibung des Prüfkörpers, einschließlich der Anfangsabmessungen, der Ausrichtung, der Vorbereitung, der Oberflächenbeschaffenheit und etwaiger Besonderheiten;
- Beschreibung der Prüfanordnung (Fase, Radius, Prüfmaschinenbezeichnung);
- Prüfbedingungen, einschließlich der Prüftemperatur, der Vorlast, der Verschiebungsrate und der Prüfumgebung;
- Kraft-Durchbiegungskurve $F(u)$. Alternativ kann die Kraft-Verschiebungskurve $F(v)$ in den Prüfbericht aufgenommen werden;
- F_e und u_e (oder v_e) und das/die Verfahren zur Bestimmung dieser Werte;
- F_m und u_m (oder v_m);
- E_{SP} ;
- Ergebnisse der Untersuchung nach der Prüfung (Anhang H);
- andere interessante Aspekte oder Vorfälle während der Prüfung.

8 Small-Punch-Kriechprüfung

8.1 Kurzbeschreibung

Dieses Verfahren dient speziell zur Prüfung von kleinen Scheibenproben (Abschnitt 5) mit einem Stempel und einer Kugel oder einer massiven Stange mit einer halbkugelförmigen Spitze unter Einwirkung einer konstanten Kraft. Zwei Hauptarten von Daten können in Form von i) Durchbiegung vs. Zeit, $u(t)$ aus jeder einzelnen Prüfung und ii) Kraft vs. Zeit bis zum Bruch, $F(t_r)$ aus einer Testreihe generiert werden. Anschließend können zusätzliche Analysen durchgeführt werden, um Mindestdurchbiegungsraten und einachsige Wechselbeziehungen zu berechnen, wie in Anhang G vorgeschrieben.

ANMERKUNG Die Verschiebung v kann anstelle der Durchbiegung u eingesetzt werden.

8.2 Besonderheiten der Prüfeinrichtung für Small-Punch-Kriechprüfungen

8.2.1 Prüfraahmen

Eine Kalibrierung des Prüfrahmens (Krafteinleitung), des Dehnungsmessgeräts, des Temperaturaufzeichnungssystems und der vorgeschlagenen Einzelgewichte nach den relevanten Anforderungen (EN ISO 7500-2, EN ISO 9513) ist sicherzustellen.

8.2.2 Prüfumgebung

Aufgrund der geringen Abmessungen der Prüfkörper wird empfohlen, die Prüfungen in einer inerten Umgebung durchzuführen, um Oxidation oder Korrosion an den freiliegenden Prüfkörperoberflächen bei erhöhter Temperatur zu vermeiden. Die Umgebungslufttemperatur im Labor ist während der Prüfung ebenfalls aufzuzeichnen und sollte konstant gehalten werden. Dies geschieht mit einem kalibrierten digitalen Raumthermometer; weitere Informationen sind in B.2.7 aufgeführt.

8.3 Prüfverfahren

8.3.1 Vorbereitung der Prüfung

- a) Die Probe ist sauber zu halten und vorsichtig zu behandeln.
- b) Die Scheibenprobe mittig in eine geeignete Einspannvorrichtung (6.4) einlegen.
- c) Diese Kombination in den Prüfraahmen in geeigneter Weise einbringen.
- d) Die Messung der Durchbiegung/Verschiebung vorbereiten.
- e) Sicherstellen, dass die Stempelspitze/Kugel mittig auf der Oberseite der Probe aufliegt.

8.3.2 Temperierung

Der Prüfkörper ist auf die festgelegte Prüftemperatur T zu erwärmen. Thermoelemente sollten so angeordnet werden, dass sie die Unterseite der Scheibenprobe berühren (Bild 3), um sicherzustellen, dass die genaue Temperatur innerhalb der Grenzabweichung über die gesamte Probendicke eingehalten wird, wie in Anhang B vorgeschrieben. Während der Erwärmung sollte die festgelegte Prüftemperatur T im Prüfkörper zu keiner Zeit überschritten werden (6.6). Eine Überschreitung dieser Grenzabweichungen ist im Prüfbericht anzugeben.

Die Werkstoffe der oberen und unteren Matrize im Probenhalter sollten den gleichen oder einen ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen wie die zu prüfende Scheibe, um thermische Spannungen zu minimieren, wie in 6.4 vorgeschrieben. Besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe von Stempel, Scheibe und Matrize, sollten die Auswirkungen der thermischen Belastung bewertet werden.

8.3.3 Aufbringen einer Vorlast

Eine kleine Vorlast (von weniger als 10 % der Prüfkraft oder 25 N, wobei der kleinere Wert maßgebend ist) darf auf den Prüfkörper aufgebracht werden, um während des Aufheizens die Last konstant zentrisch in die Scheibenprobe einleiten zu können (d. h. vor $t = 0$).

8.3.4 Aufbringen der Prüfkraft

Die Prüfkraft muss in Richtung der Prüfachse mit einer Grenzabweichung von höchstens $\pm 1\%$ aufgebracht werden. In allen Fällen sollte die Prüfkraft gleichmäßig, schnell, stoßfrei, in Übereinstimmung mit dem in der Prüfmaschine integrierten Krafteinleitungssystem aufgebracht werden.

Der Beginn der Small-Punch-Kriechprüfung und der Messung der Scheibendurchbiegung ist der Zeitpunkt ($t = 0$), ab dem die Kraft auf die Probe aufgebracht wird ($F = 0$ oder $F = \text{Vorlast}$).

8.3.5 Überwachung der Prüfung

Die Prüfung sollte kontinuierlich überwacht und die geforderten Niveaustände während der gesamten Prüfung eingehalten werden, wie in Anhang B und Anhang G vorgeschrieben. Die Überwachungs- und Kontrollsysteme sollten vor jeder Prüfung überprüft werden. Die Häufigkeit der Datenaufnahme sollte so angepasst werden, dass mindestens 500 Datenaufnahmepunkte pro Prüfung erreicht werden und Datenerfassungsabhängigkeiten bei zunehmender Verschiebungsrate oder signifikanten Temperaturänderungen berücksichtigt werden.

8.3.6 Unterbrechung und Ende der Prüfung

Bei unvorhergesehenen Unterbrechungen der Prüfung, z. B. bei unterbrochener Temperierung, wird empfohlen, die Prüfung erneut durchzuführen, wenn dies jedoch nicht möglich ist, dürfen die Daten mit einer Minstdurchbiegungsrate bewertet werden, falls dieser Punkt überschritten wurde. Die Prüfung kann neu gestartet werden, wenn die Belastung der Probe unverändert geblieben ist. Die Bedingungen bei der Wiederaufnahme und die entsprechenden Maßnahmen sind in den Prüfbericht aufzunehmen.

Ein bevorstehender Bruch der Probe ist in der Regel an steigenden Durchbiegungsraten erkennbar. Die automatische Beendigung des Tests kann bei einer vorher festgelegten Durchbiegung über die erwartete Bruchdurchbiegung hinaus ausgelöst werden. Diese Beendigung kann automatisch oder manuell ausgelöst werden und sollte mit dem Abschalten der Prüfofens, dem Abnehmen der Prüfkraft und der Wiederherstellung der Umgebungstemperatur in der Probe einhergehen.

8.3.7 Untersuchung nach der Prüfung

Die Prüföfen- und Lasteinleitungsbaugruppen sollten vorsichtig demontiert und die Probe aus dem Prüfraum entnommen werden. Der Prüfkörper sollte per Sichtprüfung auf mögliche Anzeichen von Fehlausrichtung und Oxidation überprüft werden und das Ergebnis der Prüfung sollte anschließend aufgezeichnet werden. Die Gesamtdurchbiegung darf auch physikalisch gemessen werden, um sie mit der Durchbiegung des Dehnungsmessgeräts abgleichen zu können. Weitere Nachprüfungen werden empfohlen und sind in Anhang H dokumentiert.

8.4 Eigenschaften der Durchbiegungs-Zeitkurve

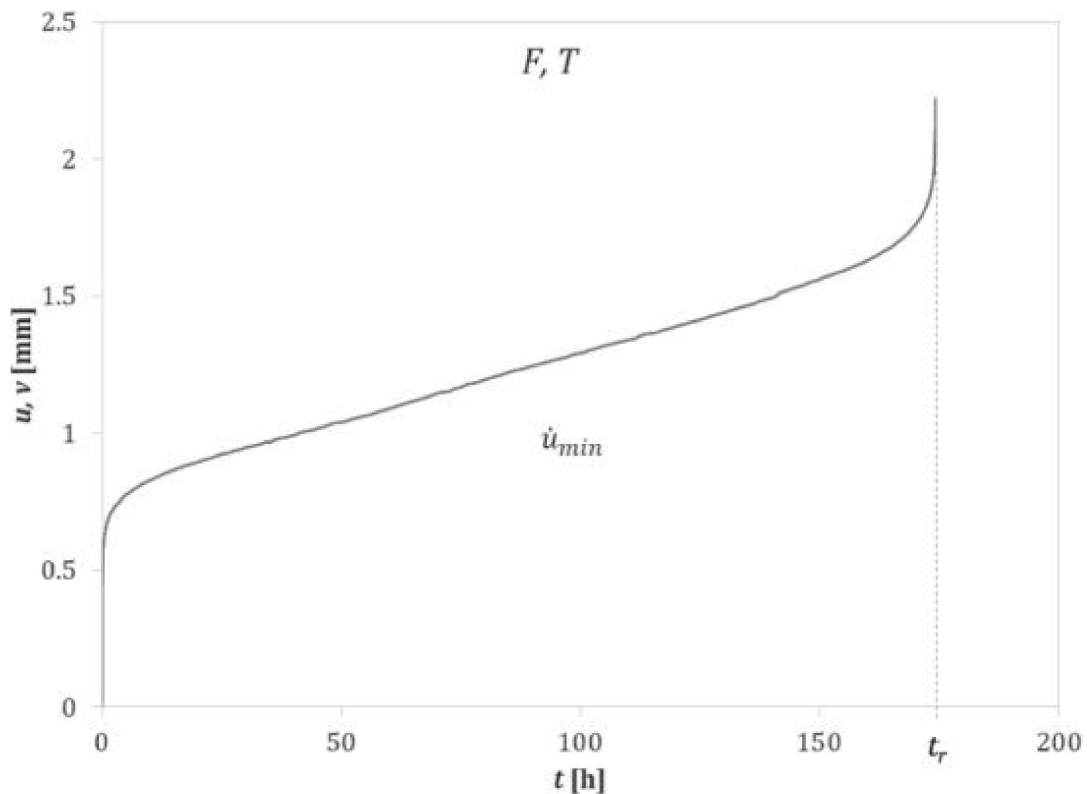


Bild 8 — Beispiel einer Durchbiegungs-Zeitkurve für eine Small-Punch-Kriechprüfung

8.5 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden geforderten Informationen enthalten:

- Verweisung auf die Norm prEN 10371;
- Bezeichnung des Werkstoffs und der Probe;
- Beschreibung des Prüfkörpers, einschließlich der Anfangsabmessungen, der Ausrichtung, der Vorbereitung, der Oberflächenbeschaffenheit und etwaiger Besonderheiten;
- Beschreibung der Prüfanordnung (Fase, Radius, Prüfmaschinenbezeichnung);
- Prüfbedingungen, einschließlich der Prüftemperatur, der Vorlast, der Prüfkraft und der Prüfumgebung;
- $u(t)$ - oder $v(t)$ -Kurve;
- Prüfergebnisse: i) Prüfdauer, ii) Zeit bis zum Erreichen der Temperatur und Haltezeit, iii) Temperatur-Zeit-Aufzeichnungen, iv) minimale Durchbiegungs-/Verschiebungsrate, $\dot{u}_{\min}/\dot{v}_{\min}$ und v) Durchbiegung bei $\dot{u}_{\min}$ /Verschiebung bei $\dot{v}_{\min}$, vi) $\dot{u}(t)$ - und/oder $\dot{v}(t)$ -Kurven;
- Ergebnisse der Untersuchung nach der Prüfung (Anhang H);
- etwaige Abweichungen von den Prüfbedingungen oder dem empfohlenen Verfahren, z. B. Unterbrechungen, Überschreiten der Grenzwerte der Prüftemperatur usw. sind in den Prüfbericht aufzunehmen;
- andere interessante Aspekte oder Vorfälle während der Prüfung.

Anhang A (informativ)

Bestimmung der Nachgiebigkeit eines Small-Punch-Prüfstands für Verschiebungsmessungen

A.1 Einleitung

Bei Verwendung der Kraft-Verschiebungskurve $F(v)$ zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens in einem SP-Test ist der Bezugspunkt für die Verschiebung v der Punkt an der Spitze des Stempels in direktem Kontakt zur Probe. Die Bewegung dieses Punktes kann jedoch nicht direkt gemessen werden; sie muss aus der Verschiebung v_{ref} abgeleitet werden, die an einem Bezugspunkt auf der Schubstange in Bezug auf einen Festpunkt gemessen wird (Bild A.1).

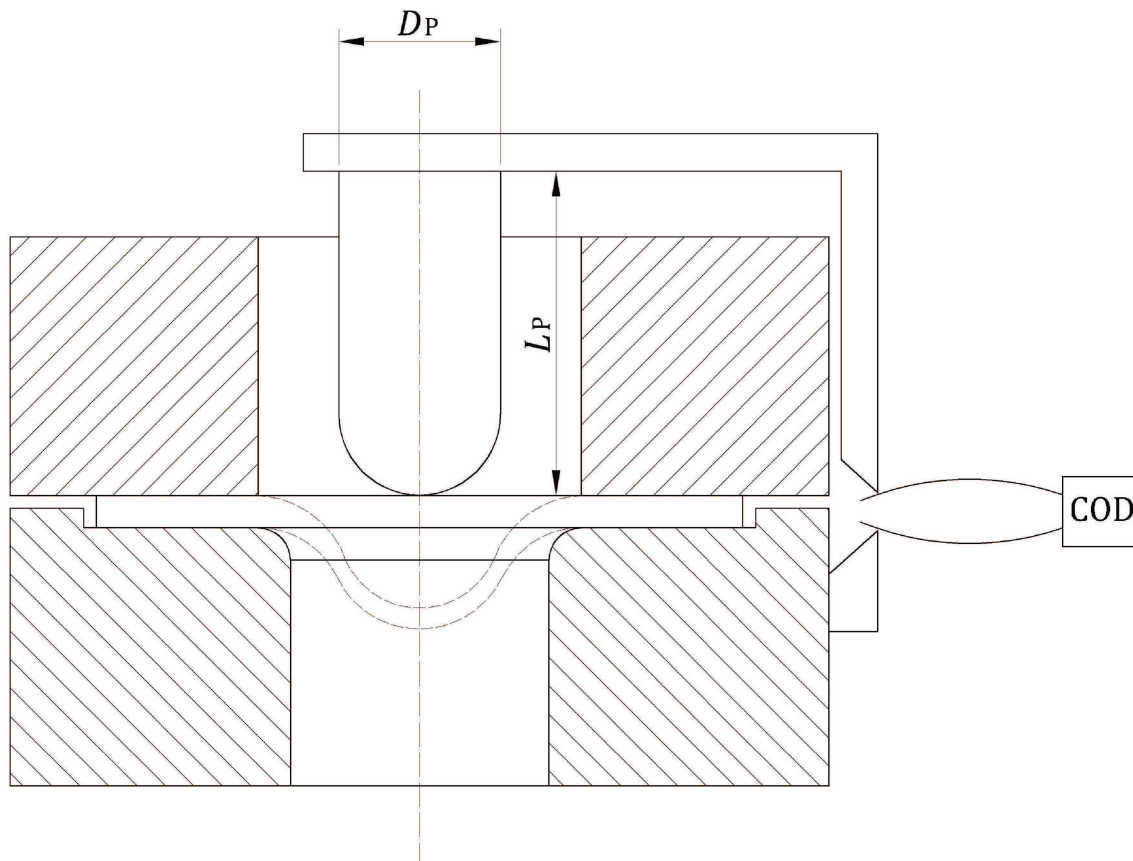


Bild A.1 — Prinzip der Prüfanordnung zur Messung der Stempelverschiebung mit einem Rissaufweitungsmessgerät (COD, en: crack opening displacement)

Die endliche Steifigkeit der Schubstange und des Stempels führt zu einer endlichen Stempelnachgiebigkeit C_P , d. h. zu einer Kontraktion von Schubstange und Stempel unter dem Einfluss der Kraft F [4]. Folglich ist die in einer Messkonfiguration nach Bild A.1 gemessene Verschiebung v_{ref} größer als die tatsächliche Verschiebung v der Stempelspitze.

Um die Verschiebung der Stempelspitze v bestimmen zu können, muss sie in Bezug auf die Nachgiebigkeit des Stempels C_p korrigiert werden. Die Nachgiebigkeit des Stempels C_p kann experimentell bestimmt oder berechnet werden. Typische Werte für C_p bei Raumtemperatur liegen in der Größenordnung von 10^{-5} mm/N bis $5 \cdot 10^{-4}$ mm/N, obwohl die tatsächlichen Werte von den Werkstoffen und Abmessungen des Stempels und der Schubstange abhängen.

Die Verschiebung des Stempels v kann dann aus der gemessenen Verschiebung v_{ref} wie folgt berechnet werden:

$$v = v_{ref} - F(v_{ref}) \cdot C_p \quad (A.1)$$

Der Elastizitätsmodul E_Y ist temperaturabhängig. Es ist daher zu prüfen, ob die Korrektur aufgrund der Nachgiebigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur durchgeführt werden muss.

A.2 Experimentelle Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems

Für die experimentelle Bestimmung der Nachgiebigkeit des Stempels sollte die Probe durch einen Block aus einem harten Werkstoff ersetzt werden. Die Konfiguration von Schubstange und Stempel und die Position des Referenzpunktes für die Verschiebungsmessung dürfen nicht verändert werden. Bei Prüfungen bei anderen Temperaturen als der Raumtemperatur ist darauf zu achten, dass die Temperaturverteilung in Stempel und Schubstange wie bei der Prüfung gehalten wird.

Die Stempelspitze wird mit der gleichen Verschiebungsrates des Kreuzkopfs $\dot{w}$ wie beim SP-Test auf den Block gedrückt und die gemessene Verschiebung v_{ref} wird als Funktion des gemessenen Verschiebungssignals aufgezeichnet. Die Prüfung, die beim SP-Test beobachtet wurde, sollte bis zum Erreichen der Höchstkraft F_m fortgesetzt werden. Bei den meisten Werkstoffen beträgt F_m weniger als 2 kN bis 3 kN. Es ist empfehlenswert, zur Überprüfung der Steifigkeit die Durchbiegung unter dem Block zu überwachen, wenn der Prüfstand dies zulässt.

Bild A.2 zeigt eine typische $F(v)$ -Kurve aus einer Systemnachgiebigkeitsbestimmung. Der nicht lineare Teil zu Beginn der Messung ist durch das anfängliche Eindringen des Stempels in den Block bedingt und nicht zu berücksichtigen. C_p ist der lineare Teil des Anstiegs.

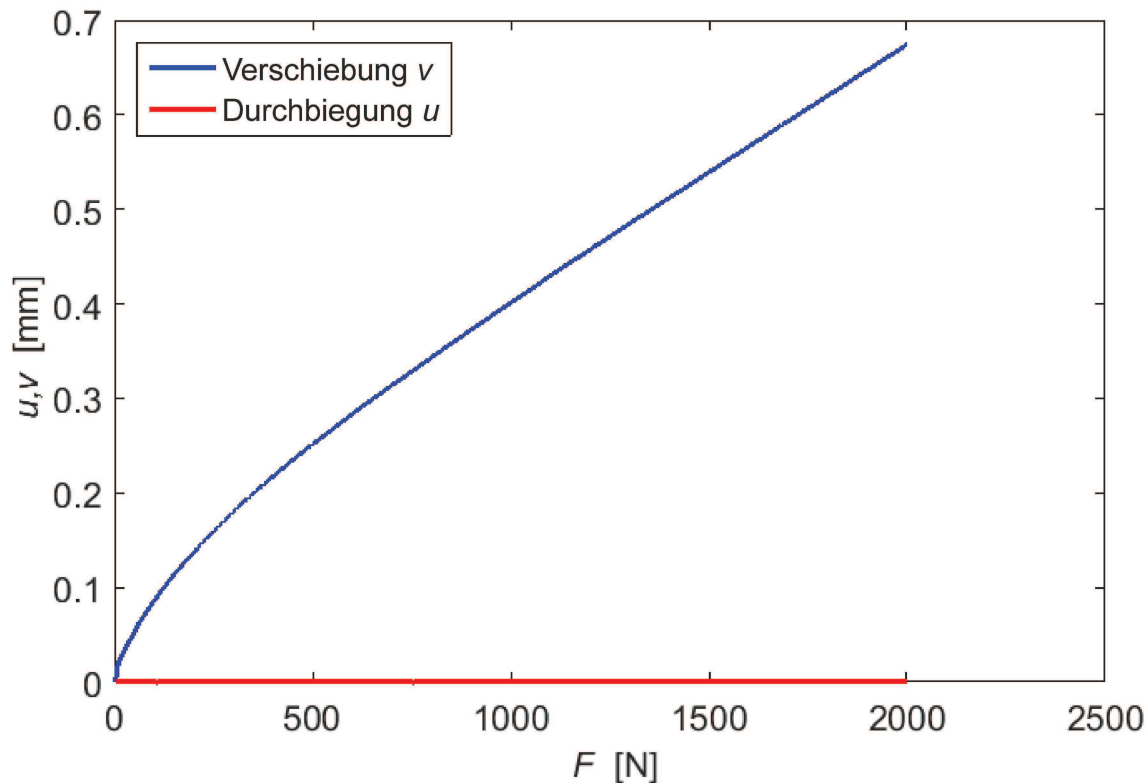


Bild A.2 — Typische Nachgiebigkeitskurve eines SP-Prüfstandes

A.3 Rechnerische Bestimmung der Nachgiebigkeit des Systems

Die Nachgiebigkeit des Stempels C_p kann mithilfe des Elastizitätsmoduls E_Y und der Geometrie berechnet werden. Es ist ausreichend, den Stempel als zylindrische Stange anzunehmen.

Für einen zylindrischen Stempel mit dem Durchmesser D_p , der Länge L_p und dem Elastizitätsmodul E_Y kann C_p wie folgt berechnet werden:

$$C_p = \frac{4}{\pi E_Y} \frac{L_p}{D_p^2} \quad (\text{A.2})$$

Besteht der Stempel aus mehreren Teilstücken mit unterschiedlichen Durchmessern, kann die Nachgiebigkeit des gesamten Stempels durch Addition der Nachgiebigkeiten der einzelnen Teilstücke bestimmt werden. Ebenso kann der Beitrag der Schubstange zur Nachgiebigkeit des eigentlichen Stempels addiert werden.

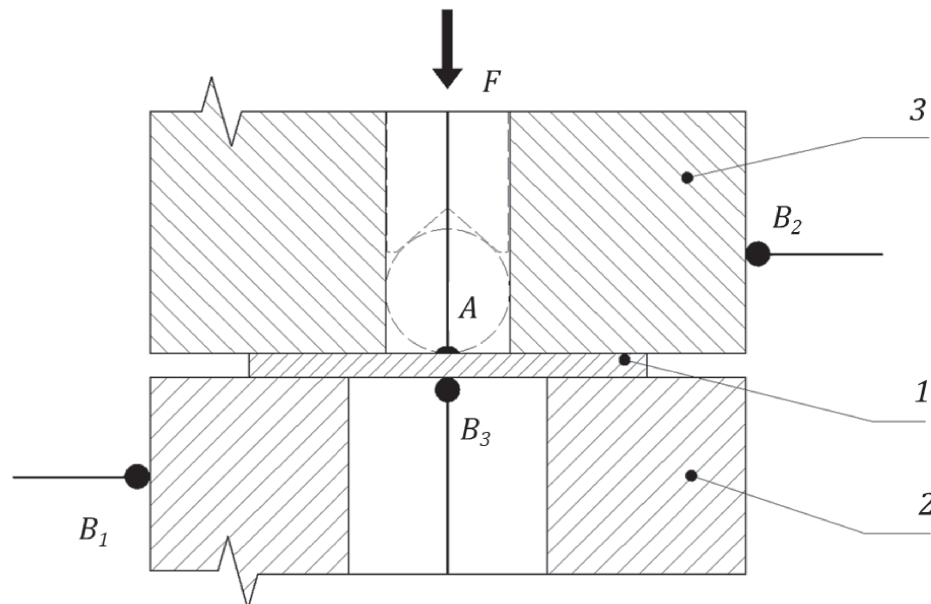
Anhang B (informativ)

Verfahren zur Temperaturregelung und -messung bei Small-Punch-Tests

B.1 Überprüfung der Temperaturgleichmäßigkeit

Die Gleichmäßigkeit der Temperatur über den gesamten Prüfkörper ist vor jeder Prüfreihe zu überprüfen, bei der eine neue Prüftemperatur eingeführt oder die Anordnung der Kühl-, Halte- oder Heizvorrichtung angepasst wird.

Die Überprüfung darf mithilfe eines Ersatzprüfkörpers mit gleicher Geometrie wie die zu prüfende Probe erfolgen. Es wird nahegelegt, die Temperatur mit einer Reihe von Thermoelementen in einer ähnlichen Konfiguration wie in Bild B.1 zu überwachen. Die Thermoelemente sollten in geeigneter Weise gegen die direkte Strahlungswärme des Heizgeräts abgeschirmt werden. Ein detaillierter Bericht über die Überprüfung der Probestemperatur sollte erstellt werden, um Konsistenz zu gewährleisten.



Legende

- 1 SP-Probe
- 2 untere Matrize
- 3 obere Matrize
- A geschweißtes Thermoelement
- B_1 , B_2 und B_3 typische Anbringungsstelle für Thermoelemente bei der Prüfung

Bild B.1 — Schematische Darstellung der Anordnung von Thermoelementen zur Temperaturprüfung

In Bild B.1 stellt A den empfohlenen Anbringungsstelle des Thermoelements für die Kalibrierung und Überprüfung der gewünschten Prüftemperatur dar. B_1 , B_2 und B_3 sind die typischen Stellen, an denen die Temperatur bei der Durchführung einer Prüfung gemessen werden kann. Das Thermoelement an einer dieser Stellen sollte vor der Prüfung mit dem Thermoelement A abgeglichen werden. Bei der Durchführung einer Prüfung sind die Temperaturunterschiede zwischen dem Thermoelement A und dem Thermoelement an B_1 , B_2 oder B_3 zu berücksichtigen und aufzuzeichnen.

Es wird empfohlen, während des Kalibriervorgangs eine Vorlast aufzubringen, um Beeinträchtigungen der Temperatur durch den metallischen Stempel zu berücksichtigen und einen guten thermischen Kontakt von B_3 zu gewährleisten. Ist dies jedoch nicht möglich, darf die Prüfung fortgesetzt werden, wenn sich B_3 nach dem Aufbringen der Last nicht ändert.

Kann die Gleichmäßigkeit der Temperatur mit diesem Vorgehen nicht gewährleistet werden, z. B. weil es nicht möglich ist, die Heizvorrichtung wiederholt korrekt zu positionieren, so ist bei jeder Prüfung eine ausreichende Anzahl an Temperatursensoren einzusetzen, um sicherzustellen, dass die Abweichung der angezeigten Temperatur an jeder Stelle des Prüfabschnitts die in Tabelle 3 angegebenen Werte nicht überschreitet.

Nach diesem Kalibrierverfahren sollte das Thermoelement, das in direktem Kontakt zur Unterseite der Probe steht, zur Temperaturüberwachung während der gesamten Prüfdauer eingesetzt werden. Dies kann mithilfe eines hohlen Quarz- oder Aluminiumoxidstabs/Dilatometers zur Aufnahme des Thermoelements erreicht werden, dass in Kontakt mit der Unterseite der Probe und dem LVDT bleiben sollte. Zur Verbesserung der Wärmeübertragung wird ein flacher Thermoelementkontakt bevorzugt. Die Temperaturmessabweichungen für dieses Thermoelement sind in Tabelle 3 angegeben.

B.2 Temperaturmessung

B.2.1 Allgemeines

Die Temperaturanzeige muss über eine Auflösung von mindestens $0,5\text{ °C}$ und die Temperaturmesseinrichtung über eine Fehlergrenze von höchstens $\pm 1\text{ °C}$ nach EN ISO 204 verfügen.

Es sind Temperaturmessgeräte mit einer Empfindlichkeit von mindestens 1 °C zu verwenden, um sicherzustellen, dass Temperaturschwankungen während der Prüfung die zulässige Grenzabweichung nach Tabelle 3 nicht überschreiten. Die Messgeräte müssen mindestens einmal pro Jahr über ihren Messbereich kalibriert und Abweichungen im Kalibrierschein aufgeführt werden.

B.2.2 Thermoelemente

B.2.2.1 Allgemeines

Die Messstellen des Thermoelements müssen für guten thermischen Kontakt sorgen. Die im Prüfofen verlaufenden Teile der Drähte müssen thermisch abgeschirmt und elektrisch isoliert werden.

Informationen zu unterschiedlichen Arten von Thermoelementen sind EN 60584-1 zu entnehmen.

Für Temperaturen ab 400 °C wird die Verwendung von Edelmetallthermoelementen, vorzugsweise des Typs S oder R, empfohlen.

Grundmetallthermoelemente des Typs K dürfen entweder nur für Temperaturen unter 400 °C oder, bei höheren Temperaturen, nur für Prüfzeiten von unter $1\,000\text{ h}$ eingesetzt werden und sollten nicht wiederverwendet werden.

Grundmetallthermoelemente des Typs N dürfen entweder nur für Temperaturen unter 600 °C oder, bei höheren Temperaturen, nur für Prüfzeiten unter $3\,000\text{ h}$ eingesetzt werden und sollten nach EN ISO 204 nicht wiederverwendet werden.

Änderungen in der Leistung eines Thermoelements können nicht nur auf chemische Veränderungen durch Verunreinigungen zurückzuführen sein, die zu Drift führen, sondern auch auf die Folgen von physischen Schäden durch die Handhabung. Daten zu diesen Veränderungen sollten aufgezeichnet werden und auf Anforderung verfügbar sein.

Im Einvernehmen zwischen dem Hersteller und dem Käufer des zu prüfenden Werkstoffs darf die Verwendung eines bestimmten Thermoelements zugelassen werden, nachdem durch Erfahrung mit den Prüfgeräten gezeigt werden konnte, dass die Temperaturschwankungen an jeder Stelle über den Durchmesser oder in Dickenrichtung des Prüfkörpers konstant innerhalb der in 6.6 festgelegten Grenzen liegen.

B.2.2.2 Kalibrieren von Thermoelementen

Edelmetallthermoelemente, die für Kurzzeitprüfungen (üblicherweise nicht über 500 h) eingesetzt werden, sollten alle 12 Monate kalibriert werden. Thermoelemente, die für Prüfzeiten von mehr als 12 Monaten eingesetzt werden, sollten nach EN ISO 204 wie folgt kalibriert werden:

- alle 4 Jahre für $T \leq 600\text{ °C}$;
- alle 2 Jahre für $600\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C}$;
- jedes Jahr für $T > 800\text{ °C}$.

Falls die Prüfdauer die aufgeführten Kalibrierintervalle überschreitet, muss das Thermoelement nach Beendigung der Prüfung neu kalibriert werden. Falls ein Thermoelement nachgeschweißt wurde, muss es vor dem erneuten Einsatz neu kalibriert werden.

Die Thermoelemente sind aus Drahtchargen herzustellen, die über den gesamten Messbereich anhand der für die Thermoelementkalibrierung anerkannten Festpunkte oder im Vergleich zu einem ähnlich kalibrierten und gewarteten Standard-Platin- bzw. Platin/Rhodium-Referenzthermoelement kalibriert wurden, welches alle 12 Monate neu zu kalibrieren ist. Edelmetallthermoelemente sind vorzuziehen und spätestens nach jeweils 4 000 Betriebsstunden zu kalibrieren.

Bei Thermoelementen ohne Messgeräte mit Vergleichsstellenkompensation müssen die Vergleichsstellentemperaturen üblicherweise innerhalb von $0,5\text{ °C}$ liegen. Die Kalibrierung der Vergleichsstellengeräte ist bei jeder Kalibrierung der Temperaturmesseinrichtungen durchzuführen.

Es ist nachzuweisen, dass der Messfehler des eingesetzten Thermoelements entweder bei der Prüftemperatur ermittelt wurde oder dass er typisch für den Temperaturbereich ist, in dem die Prüftemperatur liegt.

B.2.2.3 Informationen zum Kalibrieren von Thermoelementen

Für die Kalibrierung von Thermoelementen werden zwei Verfahren empfohlen. Das Ziel beider Verfahren ist es, sicherzustellen, dass die bei der Kalibriertemperatur vom Thermoelement angezeigte (und erforderlichenfalls um alle systematischen Messfehler korrigierte) Thermospannung (EMF) so nahe wie möglich an der Thermospannung liegt, die in der entsprechenden Bezugswerttabelle in EN 60584-1 für diese Temperatur festgelegt ist. Bei beiden Verfahren ist die Verwendung von Bezugsthermoelementen vorgesehen, die direkt auf eine nationale Norm zurückgeführt werden können. Als Voraussetzung gilt, dass die Messunsicherheit beim Kalibrieren neuer Thermoelemente der Klasse 1 von EN 60584-1 oder einer gleichwertigen Norm entspricht. Die Kalibrierung der Temperaturmesseinrichtungen kann separat oder während der Kalibrierung der Thermoelemente durchgeführt werden.

Das Verfahren 1 beruht auf einer In-situ-Kalibrierung des Thermoelements, d.h. die Kalibrierung des Thermoelements findet entweder im eingesetzten Prüfofen statt oder in einem Kalibrierofen bei gleicher Eintauchtiefe und gleichem Temperaturgefälle entlang der Thermodrähte. Mit dem bei der In-situ-Kalibrierung festgestellten Messfehler des Thermoelementes wird die für das Thermoelement festgelegte Temperatur korrigiert. Überschreitet der Messfehler den auf die Eintauchtiefe bezogenen Grenzwert, wird das Thermoelement ausgesondert. Die Drift des Bezugsthermoelements infolge unterschiedlicher Eintauchtiefen während des aktiven und passiven Einsatzes sollte überwacht und auf ein Mindestmaß begrenzt werden.

Das Verfahren 2 beruht auf einer Kalibrierung des Thermoelements in einem Kalibrierofen, in dem die Eintauchtiefe die gleiche wie im Prüfofen ist. Wird bei der Kalibrierung eine laborspezifische Messabweichung unter Berücksichtigung der Auswirkung der Eintauchtiefe überschritten, so wird das Thermoelement gekürzt, an der Messstelle erneut verschweißt und/oder geglüht und die Kalibrierung wiederholt. Wird bei der erneuten Kalibrierung die laborspezifische Messabweichung erneut überschritten, wird das Thermoelement ausgesondert.

B.2.2.4 Drift des Thermoelements

Die Drift des Thermoelements sollte innerhalb der Kalibrierdauer die folgenden Werte nicht überschreiten:

- $\pm 1\text{ °C}$ für $T \leq 600\text{ °C}$;
- $\pm 1,5\text{ °C}$ für $600\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C}$;
- $\pm 2\text{ °C}$ für $800\text{ °C} < T \leq 1\,100\text{ °C}$.

Zeigt sich, dass die Drift des Thermoelements diese zulässigen Temperaturabweichungen nicht beeinflusst, kann der Zeitraum zwischen den beiden Kalibriervorgängen verlängert werden.

Falls sich die Drift negativ auf die zulässigen Temperaturabweichungen auswirkt, sollte entweder häufiger kalibriert werden oder die vom Thermoelement angezeigte Temperatur darf korrigiert werden (EN ISO 204).

Die Wiederverwendung von Grundmetallthermoelementen, z. B. aus Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium, ist ohne Neukalibrierung nach jeder Prüfung nicht zulässig, es sei denn, Erfahrungswerte haben gezeigt, dass die Messfehler durch Drift 1 °C nicht überschreiten, in welchem Fall die Thermoelemente in Zeitabständen von maximal 500 Betriebsstunden oder nach Abschluss einer Prüfung mit einer Dauer von über 500 h kalibriert werden dürfen. Thermoelemente, die Messfehler von mehr als 1 °C aufweisen, dürfen eingesetzt werden, sofern die entsprechenden Korrekturen vorgenommen wurden.

Die Drift hängt von der Art des eingesetzten Thermoelements und der Einwirkzeit der Temperatur ab. Es wird empfohlen, Thermoelemente, die höheren Temperaturen ausgesetzt sind, häufiger zu überprüfen. Weiterhin wird empfohlen, die Überprüfung entweder in der eingesetzten Prüfmaschine oder in einem Kalibrierofen mit gleicher Eintauchtiefe wie in der Prüfmaschine durchzuführen.

B.2.3 Kalibrierung der Temperaturmessgeräte

Die Kalibrierung der Temperaturmessgeräte (einschließlich des Kabels, der Anschlüsse, der Vergleichsstellen, der Temperaturanzeigen und -aufnehmer, der Datenleitungen usw.) muss nach einem Verfahren erfolgen, das auf die Internationale Einheit (SI-Einheit) der Temperatur zurückgeführt werden kann.

Wenn möglich sollte die Kalibrierung einmal pro Jahr über den gesamten Messbereich der Temperaturmessgeräte erfolgen, und die Ergebnisse sind in einem Kalibrierbericht festzuhalten.

B.2.4 Aufzeichnung der Temperatur

Während der gesamten Prüfung ist es wichtig, die Temperatur des Prüfkörpers in ausreichendem Maß aufzuzeichnen, um Temperaturverhältnisse nach den Anforderungen von 6.6 nachzuweisen.

B.2.5 Erwärmung des Prüfkörpers für Prüfungen bei erhöhten Temperaturen

Für SP-Tests bei Temperaturen über der Raumtemperatur ist der Prüfkörper auf die festgelegte Prüftemperatur T zu erwärmen. Der Prüfkörper, die Einspannvorrichtung und andere Hilfseinrichtungen sind in ein thermisches Gleichgewicht zu bringen. Während der Erwärmung sollte die Temperatur der Probe zu keiner Zeit die festgelegte Prüftemperatur T überschreiten. Eine Überschreitung dieser Grenzwerte ist im Prüfbericht anzugeben. Beim ersten Erwärmen des Prüfkörpers von Raumtemperatur auf die Prüftemperatur dürfen die Aufwärm- und die Haltezeit zusammen 24 h nicht überschreiten.

Die Prüftemperaturverhältnisse sind, wie in 7.2.1 festgelegt, vor dem Aufbringen der Prüfkraft auf den Prüfkörper herzustellen, soweit die Produktnorm nichts anderes vorsieht.

Bei der Befestigung von Thermoelementen am Prüfkörper sind Vorkehrungen zu treffen, um eine Beschädigung der Oberfläche des Prüfkörpers zu vermeiden; Schweißen und die Verwendung von Klemmen sind nicht zulässig. Werden Thermoelemente mit Schutzfolien eingesetzt, sind diese so anzubringen, dass jedwede Gefahr von Kältezonen auf dem Prüfkörper vermieden wird. Für jeden eingesetzten Ofentyp ist eine erste Prüfung unter Verwendung eines Ersatzprüfkörpers durchzuführen, welcher in einem Matrizensatz mit Aufnahmebohrungen für Thermoelemente eingelegt ist, um die gleichmäßige Temperatur über den gesamten Querschnitt des Prüfkörpers nachzuweisen.

Mindestens ein Thermoelement sollte während der gesamten Prüfung eingesetzt, kalibriert und an den in B.1 festgelegten Stellen überprüft werden.

B.2.6 Abkühlung des Prüfkörpers für Prüfungen bei sehr tiefen Temperaturen

Für SP-Tests bei Temperaturen unter der Raumtemperatur erfolgt die Temperaturregelung durch eine Kombination aus Flüssigstickstoff und elektrischem Heizwiderstand. Die Stickstoffkammer, die Heizung und der Probenhalter sind in der Regel mit einer Wärmedämmung umhüllt. Für die Wärmedämmung wird in der Regel ein Werkstoff mit ausreichend niedriger Wärmeleitfähigkeit eingesetzt, wie beispielsweise ein glasfaserverstärkter Verbundwerkstoff ($k = 0,31 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), und der Matrizensatz und der Stempel werden aus einem entsprechend harten Metall gefertigt. Die Innenwand der Stickstoffkammer kann aus Cu bestehen.

Für die Temperaturregelung können zwei Thermoelemente an den in B.1 definierten Stellen eingesetzt werden. Der Flüssigstickstofffluss und die Heizleistung können in Abhängigkeit von den Signalen des einen oder des anderen Thermoelementsignals geregelt werden. Wenn das Thermoelement die Solltemperatur (Grenzabweichung 2°C) anzeigt, wird vor Beginn der Prüfung eine Haltezeit von 10 min eingehalten, um das endgültige thermische Gleichgewicht zu erreichen. Eine deutliche Reduzierung des Stickstoffverbrauchs wird durch einen Verdampfer erreicht, der sich in der Nähe des Stickstoffeinlaufs der Kühlkammer befindet. Dieser Verdampfer ermöglicht den Einsatz von Stickstoff in der flüssigen oder gasförmigen Phase, je nach Solltemperatur. Er wird durch ein zusätzliches Thermoelement am Auslass der Kühlkammer gesteuert.

Vor Beginn der Prüfung ist darauf zu achten, dass der Stempel nicht eingefroren und ausreichend beweglich für das Aufbringen der gewünschten Prüfkraft ist.

B.2.7 Prüfumgebung

Aufgrund der geringen Abmessungen des Prüfkörpers wird empfohlen, die Prüfungen bei erhöhten Temperaturen in einer inerten Umgebung durchzuführen, um Oxidation oder Korrosion an den freiliegenden Prüfkörperoberflächen zu vermeiden. Für Studien, bei denen die Auswirkungen der Prüfumgebung auf das Kriechverhalten von besonderem Interesse sind, dürfen andere Umgebungen gewählt werden, jedoch ist der Zweck der Prüfumgebung eindeutig im Prüfbericht und den veröffentlichten Prüfergebnissen anzugeben. Für alle Umgebungen, einschließlich inerter Umgebungen, sollte die Zusammensetzung bekannt sein und, falls erforderlich, innerhalb festgelegter Grenzen streng kontrolliert werden. Auch die Umgebungslufttemperatur der Maschine im Labor sollte beim Aufbau der Prüfanordnung aufgezeichnet werden. Dies geschieht mit einem kalibrierten digitalen Raumthermometer und wird in geeigneter Weise aufgezeichnet.

Anhang C (informativ)

Abschätzung der Grenzzugfestigkeit R_m anhand von Small-Punch-Tests

C.1 Allgemeine Verfahrensweise

Der Small-Punch-Test kann zur Abschätzung der durch eine genormte Prüfung mit einachsiger Zugbeanspruchung festgestellten Grenzzugfestigkeit R_m eingesetzt werden. Zwei Wechselbeziehungen werden für die Abschätzung von R_m [5] bis [9] vorgeschlagen:

$$R_m = \beta_{Rm} \cdot F_m / (h_0 \cdot u_m) \quad (C.1)$$

$$R_m = \beta_{Rm} \cdot F_i / h_0^2 \quad (C.2)$$

ANMERKUNG 1 β_{Rm} hat in Gleichung (C.1) und Gleichung (C.2) nicht den gleichen Wert. Für ausführlichere Informationen siehe C.2 und C.3.

Der Korrelationsfaktor β_{Rm} ist abhängig von den Geometrieparametern der SP-Prüfanordnung, insbesondere vom Radius der Stempelspitze, dem Durchmesser der Aufnahmebohrung, der Fasengröße und -form sowie der Probendicke (Tabelle 1 (Abschnitt 5) und Tabelle 2 (6.4)).

Bei Verwendung der Verschiebung v anstelle der Durchbiegung u in Gleichung (C.1) und Gleichung (C.2) ist sicherzustellen, dass die Verschiebung mit der Nachgiebigkeit des Prüfstandes in geeigneter Weise korrigiert wird (Anhang A).

ANMERKUNG 2 Bei anisotropen Werkstoffen kann der geschätzte R_m -Wert von der Ausrichtung der SP-Probe abhängen (Abschnitt 5).

C.2 Vorgabe der F_m -basierten Wechselbeziehung

Die Gleichung (C.1) wird in der Regel bestimmt, indem $F_m/(u_m \cdot h_0)$ in eine Wechselbeziehung zu Werten für R_m gesetzt wird, die sich in Zugversuchen mit einachsiger Belastung ergeben haben [6], [8], [9], [10]. Für die Standardgeometrie (Tabelle 1 (Abschnitt 5) und Tabelle 2 (6.4)) liegt der Koeffizient β_{Rm} im Bereich $0,19 \leq \beta_{Rm} \leq 0,32$ für die Gleichung (C.1) [8], [11]. Ein Beispiel mit Daten aus [9], [12] ist in Bild C.1 dargestellt.