

ICS 77.040.10

Prüfverfahren zur Ermittlung von Fließkurven und Vergleichskennwerten zum Zugversuch mittels zerstörungsarmem Prüfeindruck, 3D-Vermessung und Finite-Elemente Werkstoffmodell

Test method for the determination of flow curves and benchmark characteristic values for tensile testing by means of minor destructive indentation, 3D measurement and finite-element material models

Méthode de test pour déterminer des courbes d'écoulement et des valeurs de référence utilisées pour l'essai de traction au moyen de l'effet du test peu destructif, mesure tridimensionnelle et modèle de matériaux des éléments finis

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer PAS erstellt.

Gesamtumfang 48 Seiten

Dieses Dokument wurde durch die im Vorwort genannten Verfasser erarbeitet und verabschiedet.

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Symbole	8
5 Kurzbeschreibung	9
6 Prüfsystem	10
7 Probenkörper	10
8 Eindringkörper	11
9 Prüfverfahren	13
9.1 Allgemeines	13
9.2 Prüfzyklus	14
9.3 3D-Vermessung des Prüfeindrucks	15
9.4 Berechnung durch inverses Verfahren.....	16
9.4.1 Aufbau des Lösungsverfahrens und Datenverarbeitung	16
9.4.2 FEM-Simulation und Berechnung der Zielfunktion	17
9.4.3 Minimierung der Zielfunktion	21
9.5 Berechnung der technischen Spannung-Dehnung-Kurven und der Vergleichskennwerte	22
10 Prüfbericht.....	23
Anhang A (normativ) Kalibrierung der Prüfmaschine	24
A.1 Kalibrierung der Prüfmaschine	24
A.2 Direkte Kalibrierung der Prüfmaschine	24
A.2.1 Allgemeines	24
A.2.2 Kalibrierung der Prüfkraft	25
A.2.3 Kalibrierung des Eindringkörpers und Überprüfung des Eindringstempels.....	25
A.2.4 Prüfzyklus	26
A.2.5 Indirekte Überprüfung und Kalibrierung des 3D-Sensors in X-Y-,Z-Richtung	27
A.2.6 Indirekte Kalibrierung	27
A.3 Tägliche Überprüfung der Prüfmaschine	29
Anhang B (informativ) Korrelation zum Zugversuch.....	30
B.1 Allgemeine Hinweise.....	30
B.2 Untersuchung an statistisch abgesichertem Material.....	31
B.3 Stahlwerkstoffe	33
B.4 Aluminiumwerkstoffe.....	41
Anhang C (informativ) Messunsicherheiten.....	45
C.1 Messunsicherheit der Kalibrierung der Prüfkraft.....	45
C.2 Messunsicherheit der indirekten Kalibrierung	47
Literaturhinweise.....	48

Vorwort

Diese DIN SPEC wurde nach dem PAS-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung von DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren erfolgt in DIN SPEC (PAS)-Konsortien und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Die vorliegende DIN SPEC (PAS) ging aus dem DIN-Connect-Projekt „Eindruckverfahren — Präzise Festigkeitsbestimmung durch schnelle, kostengünstige, zerstörungsfreie und automatisierbare Prüfmethodik mittels Werkstoffmodell in Anlehnung zum Zugversuch“ hervor.

Die Erarbeitung und Verabschiedung des Dokuments erfolgten durch die nachfolgend genannten Initiatoren und Verfasser:

- Andreas Braun, Ariane Group;
- Dr. Thomas Chudoba, ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH;
- Dr. Michael Griepentrog, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM);
- Michael Schäfer, Feinguss Blank GmbH;
- Dr. Bernd Hachmann, F. W. Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG;
- Dr.-Ing Benjamin Schmaling, Imprintec GmbH;
- Peter Zok, Imprintec GmbH;
- Peter Beisel, KB Prüftechnik GmbH;
- Philipp Reinstädt, Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen;
- Febo Menelao, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Für dieses Thema bestehen derzeit keine Normen im Deutschen Normenwerk.

DIN SPEC (PAS) sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Für diese DIN SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann der Workshop weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Benutzung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass der Workshop für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden DIN SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Die kostenfreie Bereitstellung dieses Dokuments als PDF-Version über den Beuth Webshop wurde im Vorfeld finanziert

Einleitung

Die beiden meist angewendeten Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit von Werkstoffen sind die Härteprüfung und der Zugversuch. Metalle, Kunststoffe und nahezu alle weiteren Werkstoffe können mit einem oder beiden Verfahren geprüft werden. Die Härteprüfung ist hierbei ein Verfahren zur Bestimmung der Härte und darüber hinaus ein Näherungsverfahren, welches sehr häufig als Abschätzung für die (Zug-)Festigkeit von Bauteilen, Halbzeugen und sonstigen Proben genutzt wird. Die Abschätzung erfolgt hierbei durch Umwertung der Härte in die Zugfestigkeit mithilfe empirisch ermittelter Tabellen. Diese existieren für ausgewählte Stahlwerkstoffe und stellen einen Anteil von etwa 15 % bis 25 % an sämtlichen Stahlwerkstoffen dar. Weitere Stahl-, sowie Aluminium- und Magnesiumwerkstoffe können mithilfe der Härteprüfung nicht auf ihre Festigkeit oder weitere mechanische Eigenschaften, sondern nur auf Ihre Härte geprüft werden. Zur Ermittlung der Festigkeiten müssen diese Werkstoffe mithilfe der Zugprüfung zerstörend geprüft werden. Aufgrund der einfachen und schnellen Handhabung wird die Härteprüfung häufig intern und im Bereich der Festigkeitsbestimmung zur groben Abschätzung angewendet. Die Genauigkeit der mittels Härteprüfung umgewerteten Zugfestigkeitswerte liegt dabei bei etwa 5 % bis 15 % (DIN EN ISO 18265 [1]) oder schlechter. Diese hohe Abweichung ist für die betriebliche Qualitätssicherung vielfach nicht mehr zeitgemäß.

Das hier beschriebene Prüfverfahren soll die Lücke zwischen den genannten Verfahren schließen und dient zur Erreichung der folgenden Ziele:

- gegenüber dem gegenwärtigen Stand der Technik soll ein Verfahren verfügbar gemacht werden, das die Einfachheit der Härteprüfung mit einer höheren Aussagekraft –„ähnlich der Zugprüfung“ versieht;
- Vermeidung von Umwertungen nach DIN EN ISO 18265 zur Erhöhung der Genauigkeit und Robustheit durch ein Indentierungsverfahren;
- Vermeidung der Erzeugung von unternehmensinternen Umwertetabellen nach DIN EN ISO 18265;
- Zerstörungsarme, schnelle, kostengünstige, lokale und automatisierbare Prüftechnik;
- je nach bestehender Oberflächengüte einer Probe kann eine aufwendige Probenvorbereitung vermieden werden.

Konventionelle Härteprüfverfahren nutzen als Messparameter die Fläche des Härteeindrucks oder die Eindringtiefe. Beim Härteprüfverfahren nach Brinell z. B. wird der Durchmesser des Härteeindrucks gemessen und eine Brinell-Härte berechnet. Bei der Härteprüfung nach Vickers werden die Diagonalen des Eindrucks, bei der Rockwellprüfung wird die Eindringtiefe zur Härteberechnung verwendet. Lediglich bei der Eindring- und Martenshärte wird die komplette Kraft-Eindringtiefe-Kurve während der Belastungs-, der Halte- und der Entlastungsphase erfasst um weitere Kennwerte abzuleiten. Die Besonderheit des hier beschriebenen Prüfverfahrens ist die Berechnung von Materialeigenschaften aus der dreidimensionalen Gestalt eines Prüfeindrucks.

Das hier beschriebene Eindruckverfahren erlaubt die Bestimmung einer Fließkurve. Aus dieser Kurve werden die folgenden Kennwerte ermittelt:

- Vergleichsdehngrenze aus dem Eindruckverfahren $R_{p0,2}^I$;
- Vergleichszugfestigkeit aus dem Eindruckverfahren R_m^I ;
- Verfestigungsverhalten;
- qualitative Bestimmung der Duktilität für bestimmte Werkstoffe.

Gegenüber der Integration eines Systems zur Zugprüfung in den Produktionsprozess ist die Integration eines Härteprüfverfahrens in vielen Fällen einfacher und kostengünstiger. Konventionelle Härteprüfung liefert keine oder nur eingeschränkt Werte, welche mit den Ergebnissen von Zugversuchen vergleichbar sind.

Es ist somit möglich, Vergleichskennwerte zu den Werkstoffkennwerten des Zugversuchs schnell und prozessnah zu bestimmen. Eine Integrierbarkeit nach „Industrie 4.0“ ist möglich, was wiederum einen höheren Grad der Qualitätssicherung, sowie schnellere und flexiblere Produktentwicklung bedeutet. Dadurch können auch 100 %-Prüfungen durchgeführt werden. Durch die Verwendung des Eindruckverfahrens können, je nach Anwendung und Produkt, Zeit und Kosten gespart werden. Das Eindruckverfahren ist im Falle von Bauteilprüfungen flexibel einsetzbar, da es sich zerstörungsarm anwenden lässt. Ebenfalls lässt es sich an sehr großen bis sehr kleinen Proben anwenden, so dass sich Bauteilprüfungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen anwenderfreundlich gestalten lassen.

Insgesamt ist zu beachten, dass die Übertragung der Prüfergebnisse auf den Zugversuch Kenntnisse über den Werkstoff und das Prüfverfahren benötigt. Zu erwartende Unterschiede der Messergebnisse beider Verfahren und weitere Details sind im Anhang B aufgeführt. Informationen zur Messunsicherheit des Verfahrens werden in Anhang C dargestellt.

DIN weist darauf hin, dass die Übereinstimmung mit diesem Dokument die Verwendung eines Patents (DE102011115519A1) bezüglich des in diesem Dokument beschriebenen Prüfverfahrens bedeuten kann.

DIN nimmt keine Stellung zur Rechtmäßigkeit, zur Gültigkeit und zum Anwendungsbereich dieser Patentrechte.

Der Halter dieser Patentrechte hat DIN zugesichert, dass er bereit ist, über Lizenzen entweder kostenfrei oder zu vernünftigen und nicht diskriminierenden Geschäftsbedingungen mit Antragstellern in der ganzen Welt zu verhandeln. In diesem Zusammenhang ist die Erklärung des Halters dieser Patentrechte bei DIN registriert.

— Für DE102011115519A1 sind Informationen erhältlich bei:

Imprintec GmbH – Material Testing Solutions
Technologiezentrum Ruhr (TZR)
Universitätsstr. 142 | 44799 Bochum
DEUTSCHLAND

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können, ohne dass diese vorstehend identifiziert wurden. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt ein Prüferfahren zur Bestimmung von Fließkurven von metallischen Werkstoffen mittels zerstörungsarmem Prüfeindruck, 3D-Vermessung und Finite-Elemente Werkstoffmodell (FEM) fest. Die Fließkurven dienen zur Ermittlung von Vergleichskennwerten zu Kennwerten aus dem Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1.

Dieses Verfahren gilt für metallische Werkstoffe:

- die sich plastisch verformen;
- die beim Eindringen des Eindringkörpers einen Aufwurf im Randbereich des Prüfeindrucks erzeugen;
- deren Korngröße maximal 1/3 des Eindruckdurchmessers beträgt;
- welche kein Lamellengraphit/Kugelgraphit/hohe Porosität oder Gefügebestandteile enthalten, die einen Festigkeitsunterschied in Zug und Druck bewirken.

Das Verfahren kann durch eine werkstoff- und probenspezifische Anpassung (Kalibrierung) ergänzt werden.

Das Verfahren liefert quantitative richtungsunabhängige Ergebnisse.

Bei geringer Eindringtiefe kann das Verfahren qualitativ zur Beurteilung von richtungsabhängigen Fließkurven und Vergleichskennwerten genutzt werden.

Bei Werkstoffen mit Gradienten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften (z. B. über die Produktdicke) darf aus einer punktuellen Messung, die nach diesem Verfahren durchgeführt wird, nicht auf die (integralen) mechanischen Eigenschaften des Produktes geschlossen werden.

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).

DIN 8589 (alle Teile), *Fertigungsverfahren Spanen*

DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*

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

DIN ISO 2768-2, *Allgemeintoleranzen — Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung*

DIN EN ISO 376, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung der Kraftmessgeräte für die Prüfung von Prüfmaschinen mit einachsiger Beanspruchung*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

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

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Prüfeindruck

bleibende Verformung der Oberfläche eines Probenkörpers nach dem Einwirken eines Eindringkörpers

3.2

sphärokonisch

geometrische Form des Eindringkörpers, welche aus einem sphärischen und einem konischen Teil besteht

3.3

Konvergenz

Erreichen eines Zielkriteriums eines mathematischen Lösungsverfahrens

Anmerkung 1 zum Begriff: Zum Beispiel Erreichen eines Zielkriteriums eines Optimierungsalgorithmus.

3.4

inverses Verfahren

gezielte Variation von Eingangsparametern zur Minimierung einer Zielfunktion

3.5

Materialaufwurf

Erhöhung der Probenoberfläche, welche sich aufgrund der Materialverdrängung durch Krafteinwirkung des Eindringkörpers außerhalb der Kontaktzone von Eindringkörper und Probe bildet

3.6

Optimierungsalgorithmus

Rechenvorschrift, welche eine Zielfunktion minimiert

3.7

elastoplastisches Materialmodell

Materialmodell, einer FEM-Simulation, welches die Simulation von elastischer und plastischer Verformung ermöglicht

3.8

von-Mises Fließbedingung

durch Umrechnung mehrdimensionaler Spannungszustände erzielte skalare Vergleichsspannung

3.9

Topographiemessung

optische oder taktile Messung der Geometrie einer Oberfläche

3.10

Probe

Prüfling oder Bauteil, an dem die Prüfung ausgeführt wird

3.11

Eindringkörper

diamantene Prüfspitze, die mit einer in diesem Dokument definierten Geometrie in die Probe eindringt

3.12

Druckstempel

bewegliches Teil der Prüfmaschine, das die axiale Bewegung beim Prüfvorgang und die Einleitung der Kraft auf den Eindringstempel überträgt

3.13

Eindringstempel

Träger des Eindringkörpers mit in diesem Dokument definierter Geometrie, der mithilfe einer form-schlüssigen Verbindung zum Druckstempel die Kraft auf den Eindringkörper und die Probe ausübt

4 Symbole

Die Symbole und ihre Bedeutungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 — Symbole und ihre Bedeutungen

Symbole	Einheit	Bedeutung
A_t	—	Duktilität
b	MPa	systematische Messabweichung der Prüfmaschine
b_{rel}	%	relative systematische Messabweichung der Prüfmaschine
E	GPa	Elastizitätsmodul
E_{IT}	GPa	Eindringmodul
e	—	technische Dehnung
F	N	Prüfkraft
$\bar{F}$	N	Mittelwert der Kraftmesswerte
F_{RS}	N	Kalibrierwert des Kraftaufnehmers (zu messende Kraft)
f	—	Funktionswert (Höhe) der Simulation
K_L	—	werkstoffabhängige Konstante
n_L	—	Verfestigungsexponent
R	MPa	technische Spannung
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
R_t	MPa	technische Spannung ohne Schädigung
R_m^I	MPa	Vergleichszugfestigkeit
$\overline{R_m^I}$	MPa	Mittelwert der Messwerte der Vergleichszugfestigkeit
$R_{m,CRM}$	MPa	Nennwert der Referenzprobe der Vergleichszugfestigkeit
$R_{p0,2}^I$	MPa	Vergleichsdehngrenze
S	—	Standardabweichung
S_a	µm	Mittenrauwert
S_F	—	Standardabweichung der Kraftmesswerte
$S_{a,max}$	µm	maximaler Mittenrauwert
S_m	—	Streuung der Messwerte

Symbole	Einheit	Bedeutung
$S_{m,rel}$	%	relative Streuung der Messwerte
U_F	%	kombinierte relative Unsicherheit
U_{PM}	%	Messunsicherheit der Prüfmaschine bei der indirekten Kalibrierung
u_{FRS}	%	relative Messunsicherheit des Kraftaufnehmers
$u_{F,PM,rel}$	%	relative Standardmessunsicherheit der Prüfkraft
u_{CRM}	%	Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der Kalibrierunsicherheit des zertifizierten Wertes der Referenzprobe (CRM) resultiert
$u_{PM,CRM}$	%	die Standardunsicherheit der Prüfmaschine bei der Messung der Referenzprobe (CRM)
$U_{PM,rel}$	%	relative Messunsicherheit der Prüfmaschine
x_i	—	Koordinaten der Simulation
y_i	—	Funktionswerte (Höhe) des Experiments
σ	MPa	wahre Spannung
σ_0	MPa	Fließgrenze
σ_s	MPa	Spannung ab Entfestigung durch Schädigung
$\dot{\sigma}_{threshold}$	MPa/s	Grenzspannungsrate bei Entfestigung
ε	—	wahre Dehnung
ν	—	Poissonzahl
$\Delta\sigma_s$	MPa	Spannungsinkrement ab Entfestigung durch Schädigung
θ	—	Materialparameter zur Beschreibung der Entfestigung
ACHTUNG — Technische Dehnung und Duktilität werden üblicherweise als dimensionslose Zahl angegeben. Bei Verwendung von Werten in Prozent ist der Faktor 100 erforderlich.		

5 Kurzbeschreibung

Ein Eindringkörper wird orthogonal zur Probenoberfläche gegen die zu untersuchende Probe bewegt und dringt kraftgesteuert bis zum Erreichen der Prüfkraft in die Probe ein. Die Prüfkraft wird nach einer definierten Haltezeit zurückgenommen und der Eindringkörper wird im Anschluss aus der Probe herausbewegt. Ein Messgerät bestimmt die resultierende dreidimensionale Verformung des Probenkörpers (realer Materialeindruck). Es wird ein Simulationsmodell erstellt, welches eine realitätsnahe Abbildung der Härteprüfung (konstitutives Materialverhalten, mechanische Randbedingungen, Reibung) darstellt. Ein Softwareprogramm startet unter Zuhilfenahme von Materialparametern zur Beschreibung des plastischen Materialverhaltens Finite Element Simulationen und vergleicht die bleibende Verformung in der Simulation (simulierter Materialeindruck) mit dem realen Materialeindruck. Das Softwareprogramm ist unter Zuhilfenahme eines Optimierungsalgorithmus in der Lage die mechanischen Eigenschaften, und somit den simulierten Materialeindruck zu variieren. Diese Variation wird abgeschlossen, wenn eine ausreichende Übereinstimmung zwischen realem und simuliertem Materialeindruck erreicht ist (inverses Verfahren). Die mechanischen Eigenschaften werden der Simulation mit der besten Übereinstimmung entnommen (Konvergenz des Optimierungsalgorithmus).

Das Verfahren liefert Fließkurven und Vergleichskennwerte zum Zugversuch von metallischen Werkstoffen.

6 Prüfsystem

Das Prüfsystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Härteprüfmaschine oder vergleichbare Maschine zur Erzeugung einer kraftgesteuerten Relativbewegung zwischen Probe und Eindringkörper; Die Prüfmaschine muss in der Lage sein, die Prüfkräfte in der beschriebenen Art und Weise aufzubringen und alle Anforderungen dieser DIN SPEC zu erfüllen;
- Probenaufnahme, z. B. Tisch;
- Eindringkörper;
- Messgerät zur flächenhaften Vermessung der dreidimensionalen Geometrie des Prüfeindrucks;
- Computersoftware, welches die Materialeigenschaften mithilfe eines inversen Verfahrens unter Nutzung von Ergebnissen einer FEM-Software und eines Optimierungsalgorithmus löst;
- Computerhardware.

Der Prüfraum der Prüfmaschine muss derart gestaltet sein, dass sowohl die in der Prüfpraxis auftretenden Probenkörper (Bauteile) als auch die zur Überprüfung der Prüfmaschine erforderlichen Kalibrierwerkzeuge (z. B. Kraftmessgeräte) eingebracht werden können.

Der Aufstellort der Maschine ist insofern frei von Vibrationen und Erschütterungen zu wählen, dass die Topographiemessung nach den Genauigkeitsanforderungen nach Anhang A möglich ist.

7 Probenkörper

Die Vorbereitung der Prüffläche muss so durchgeführt werden, dass Änderungen der Härte bzw. Zugfestigkeit an der Oberfläche, z. B. durch starkes Erwärmen oder Kaltverformen, zu vermeiden sind. Dies muss besonders bei kleinen Eindringtiefen beachtet werden.

Die Prüfung ist an einer glatten und ebenen Oberfläche durchzuführen, die frei von Zunder und Fremdkörpern und vor allem vollständig frei von Schmierstoffen sein muss, sofern nicht in Produkt- oder Werkstoffnormen anders festgelegt. Eine Ausnahme stellen reaktive Metalle, wie Titan, dar, die am Eindringkörper haften können. In diesem Fall darf ein geeignetes Schmiermittel, wie z. B. Kerosin, verwendet werden. Die Anwendung eines Schmiermittels muss im Prüfbericht angegeben werden.

Der zu untersuchende Probenkörper muss die folgenden weiteren Kriterien erfüllen:

- die Dicke des Probekörpers muss mindestens dem Zehnfachen der bleibenden Eindringtiefe entsprechen, es sei denn, es lässt sich nachweisen, dass die Verwendung dünnerer Probekörper keinen Einfluss auf den gemessenen Kennwert hat;
- grundsätzlich sollte nach der Prüfung keine Verformung auf der der Prüffläche gegenüberliegenden Seite sichtbar sein, obgleich eine solche Verformung nicht in jedem Fall ein Anzeichen für ein Nichtbestehen der Prüfung ist;
- die Kraftaufbringung muss orthogonal zur Probenoberfläche erfolgen, die Abweichung von der Senkrechten darf nicht mehr als 2° betragen. Hilfsmittel hierzu sind in DIN 51200 [2] dargestellt;
- die Oberseite der Probe im Bereich des Messpunkts, sowie der aufliegende Teil der Probe müssen Geradheit und Ebenheit nach Allgemeintoleranz ISO 2768-L aufweisen;
- das Prüfvolumen muss ausreichend groß sein, so dass sich ein Härteprüfeindruck plastisch komplett ausbilden kann;

- Wird keines der empfohlenen Verfahren zur Probenpräparation nach Tabelle 2 gewählt, ist der arithmetische Mittenrauwert durch mindestens zwei Messungen über die Messfläche sicherzustellen. Der arithmetische Mittenrauwert wird nach DIN EN ISO 4287 ermittelt. In Tabelle 2 sind maximale Mittenrauwerte $S_{a,max}$ in μm in Abhängigkeit des Kraftbereichs (bzw. der Prüfkraft) angegeben. Der Mittenrauwert S_a wird nach DIN EN ISO 4287 bestimmt und berechnet.

Die Planparallelität und Ebenheit sind durch spanende Bearbeitung oder durch ein Trennverfahren sicherzustellen.

Tabelle 2 — Mittenrauwert S_a der Oberfläche nach verwendetem Kraftbereich

Kraftbereich	Prüfkraft in N	Maximaler Mittenrauwert $S_{a,max}$ in μm	Empfohlene Probenvorbereitung zur Reduzierung der Rauheit
1 – Klein	10 bis < 300	0,2	Feinschleifen, ggf. Polieren (für sehr kleine Eindringtiefen von $\leq 40 \mu\text{m}$)
2 – Mittel	300 bis < 1 000	0,5	Vorschleifen, Fräsen, Drehen, Drahterodieren (fein)
3 – Groß	1 000 bis 2 500	1	Trennverfahren nach DIN 8589, Grobschleifen, Fräsen (grob), Drehen (grob), Drahterodieren

Eine Veränderung der Werkstoffeigenschaften (z. B. durch Erwärmung oder Kaltverfestigung) durch die Probenvorbereitung ist zu vermeiden. Eine Probenpräparation ist nicht erforderlich, wenn der Probenkörper die Anforderungen dieses Abschnitts erfüllt.

8 Eindringkörper

Der Eindringkörper muss sphärisch oder sphärokonisch sein. Bevorzugte Varianten sind Eindringkörper A und Eindringkörper B.

Eindringkörper Typ A besitzt einen Kugelradius von $350 \mu\text{m}$ (siehe Bild 1). Der Winkel zu den Flanken des konischen Teils beträgt jeweils 45° . Der Kugelradius geht tangential in den konischen Teil über. Der Eindringkörper ist rotationssymmetrisch.

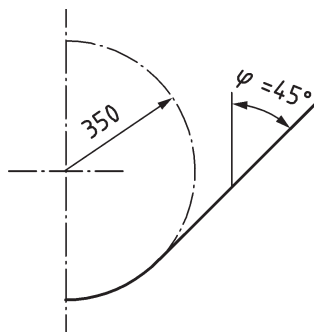
Eindringkörper Typ B besitzt einen Kugelradius von $100 \mu\text{m}$ (siehe Bild 1). Der Winkel zu den Flanken des konischen Teils beträgt jeweils 45° . Der Kugelradius geht tangential in den konischen Teil über. Der Eindringkörper ist rotationssymmetrisch.

Die tiefste zu erwartenden Eindringtiefe bei Eindringkörper A und B beträgt $300 \mu\text{m}$, wodurch sich die Länge des Eindringkörpers ergibt. Zusammen mit dem bevorzugten Öffnungswinkel von 45° ergibt sich die Länge des bearbeiteten Kegels.

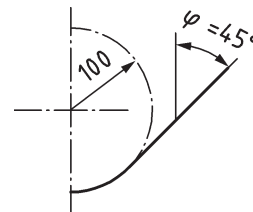
Alle Diamanteindringkörper sind mit einer Kennnummer zu versehen (bevorzugt am Schaft des Eindringstempels).

Bild 2 zeigt die empfohlene Ausführung des Eindringkörpers einschließlich der Form-, Maß- und Lage-toleranzen.

Maße in Mikrometer



a) Eindringskörper Typ A

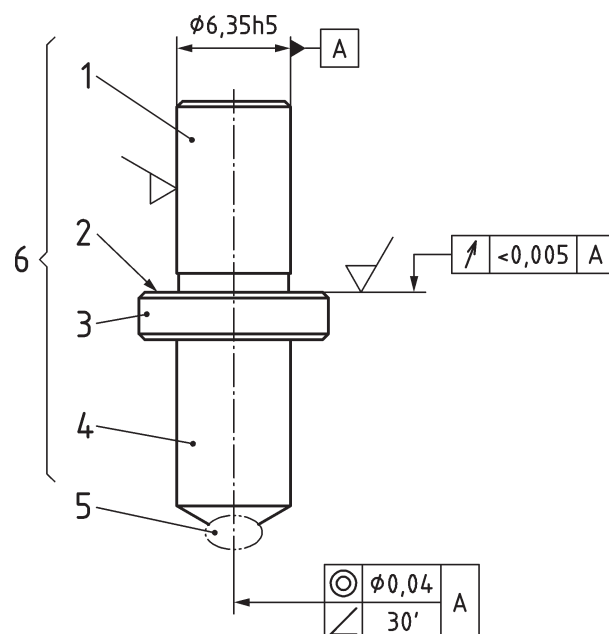


b) Eindringskörper Typ B

**Bild 1 — Bevorzugte sphärokonische Eindringskörper mit 45° Öffnungswinkel im konischen Bereich:
Eindringskörper Typ A (Radius: 350 μm) und Eindringskörper Typ B (Radius: 100 μm)**

Maße in Millimeter

$$\sqrt{\text{Ra } 0,8} \text{ bzw. } \sqrt{\text{Rz } 6,3}$$



Legende

- | | |
|------------------|--|
| 1 Zapfen | 4 Schaft |
| 2 Schulterfläche | 5 Eindringskörper (schematisch) siehe Bild 1 |
| 3 Schulter | 6 Halter |

Bild 2 — Empfohlene Ausführung des Eindringskörpers und des Eindringsstempels

9 Prüfverfahren

9.1 Allgemeines

Sofern nicht anders festgelegt, wird der Versuch bei Raumtemperatur zwischen 10 °C und 35 °C durchgeführt. Versuche unter kontrollierten Bedingungen müssen bei einer Temperatur von (23 ± 5) °C durchgeführt werden.

In Umgebungen, in denen diese Anforderung nicht eingehalten werden kann, trägt das Prüflabor die Verantwortung für die Bewertung des Einflusses, den der Betrieb der Prüfmaschinen unter den jeweils gegebenen Umgebungsbedingungen auf die erhaltenen Prüfdaten hat. Wird die Prüfung außerhalb des empfohlenen kontrollierten Temperaturbereichs von (23 ± 5) °C durchgeführt, so muss die Temperatur aufgezeichnet und im Prüfbericht angegeben werden.

Falls während der Prüfung und/oder Kalibrierung erhebliche zeitliche Temperaturgradienten auftreten, kann die Messunsicherheit steigen.

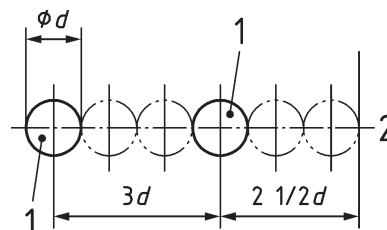
Für jede zu verwendende Prüfkraftstufe muss vor jeweils der ersten Prüfung des Tages die in Anhang A festgelegte tägliche Überprüfung durchgeführt werden. Der Zustand der Diamanteindringkörper sollte nach Anhang A überprüft werden.

Nach jeder Veränderung oder jeder Entfernung und jedem Austausch des Eindringkörpers oder der Probenaufnahmevorrichtung sind mindestens zwei Prüfungen durchzuführen, deren Ergebnisse zu verwerfen sind. Anschließend ist mittels des in Anhang A festgelegten täglichen Überprüfungsprozesses festzustellen, ob der Eindringkörper und die Probenaufnahmevorrichtung vorschriftsmäßig in die Maschine eingesetzt sind.

Der Eindringkörper muss der bei der letzten indirekten Überprüfung (siehe A.2.4) verwendete Eindringkörper sein. Falls der Eindringkörper nicht bei der indirekten Überprüfung verwendet wurde und damit erstmalig eingesetzt wird, muss er nach dem in Anhang A angegebenen Verfahren für die tägliche Überprüfung unter Verwendung von mindestens zwei Referenzmaterialien überprüft werden (von denen die eine den hohen und die andere den niedrigen Bereiche der Zugfestigkeit repräsentieren muss) für jede der üblicherweise verwendeten Prüfkraftstufen.

Der Probekörper ist auf eine starre Aufnahmevorrichtung aufzulegen und so auszurichten, dass sich die Prüffläche senkrecht zur Achse des Eindringkörpers und zur Wirkungsrichtung der Prüfkraft befindet und dass eine Verschiebung des Probekörpers aus dieser Position verhindert wird.

Der Abstand der Mittelpunkte zweier nebeneinander liegender Prüfeindrücke muss mindestens das Dreifache des Eindruckdurchmessers betragen. Der Abstand des Mittelpunktes jedes Prüfeindrucks vom Rand des Probekörpers muss mindestens das Zweieinhalbfache des Eindruckdurchmessers betragen (siehe Bild 3).



Legende

1 Prüfeindrücke

2 Rand des Probekörpers

Bild 3 — Mindestabstände von Prüfeindrücken zueinander und zum Rand

Das Prüfverfahren besteht aus den aufeinanderfolgenden Schritten:

- Erzeugen des Prüfeindrucks durch das kraftgesteuerte orthogonale Eindringen des Eindringkörpers in die Probenoberfläche (siehe 9.2);
- Dreidimensionale Vermessung des Prüfeindrucks (siehe 9.3);
- Berechnung der Fließkurvenparameter durch inverses Verfahren (siehe 9.4);
- Berechnung der technischen Spannung-Dehnung Kurve mithilfe der ermittelten Fließkurven und Berechnung der Vergleichskennwerte (siehe 9.5);

9.2 Prüfzyklus

Der Prüfzyklus besteht aus den in der Tabelle 3 dargestellten Prüfschritten. Mindest- und Höchstdauer sind für die Prüfschritte 2 bis 4 angegeben, wobei für die Prüfschritte 1 und 5 keine Zeiten vorgegeben sind.

Tabelle 4 enthält die empfohlenen Prüfzyklen 1 und 2. Zyklus 1 ist generell zu bevorzugen. Zyklus 2 dient zur schnellen Inline (bzw. In Prozess) -Messung.

Tabelle 3 — Minimale und maximale Zeiten der Prüfschritte des Prüfzyklus

Schritt	Prüfschritt	Beschreibung	Dauer in s (minimal)	Dauer in s (nominell)	Dauer in s (maximal)
1	Annäherung	Annäherung des Eindringkörpers an den Probenkörper	—	—	—
2	Aufbringung	Kraftgesteuertes Aufbringen der Prüfkraft F	1	6	8
3	Halten	Halten des Prüfkraft (Haltedauer)	1	3	14
4	Entlastung	Entlastung des Eindringkörpers	1	2	5
5	Zurückziehen	Zurückziehen des Eindringkörpers in die Ausgangsstellung	—	—	—

Tabelle 4 — Empfohlene Prüfzyklen 1 und 2

Schritt	Prüfschritt	Beschreibung	Prüfzyklus 1 (normal): Dauer in s	Prüfzyklus 2 (schnell): Dauer in s
1	Annäherung	Annäherung des Eindringkörpers an den Probenkörper	—	—
2	Aufbringung	Kraftgesteuertes Aufbringen der Prüfkraft F	6	2
3	Halten	Halten des Prüfkraft (Haltedauer)	3	1
4	Entlastung	Entlastung des Eindringkörpers	2	1
5	Zurückziehen	Zurückziehen des Eindringkörpers in die Ausgangsstellung	—	—

Es wird empfohlen, denselben Prüfzyklus durchzuführen, der auch bei der indirekten Überprüfung (siehe A.2.4) zur Anwendung kam. Bei kriechenden Werkstoffen sind angemessene Haltezeiten von bis zur maximal angegebenen Dauer zu wählen, um den Abschluss der Kriechvorgänge während der Prüfung zu ermöglichen.

Die Absenkung des Eindringkörpers bis zum Erreichen der Probenoberfläche sollte bevorzugt mit einer Annäherungsgeschwindigkeit von maximal 0,2 mm/s erfolgen, um Abweichungen des Prüfergebnisses aufgrund dynamischer Vorgänge durch eine zu hohe Annäherungsgeschwindigkeit zu minimieren.

Die Prüfkraft F ist stoß-, erschütterungs- und vibrationsfrei und ohne Überspringen oder Überlastung aufzubringen. Bei der Prüfung ist die Prüfkraft F innerhalb der in Tabelle 3 aufgeführten Zeiten aufzubringen, zu halten und wieder entlasten.

Die Prüfkraft F ist so zurückzunehmen, dass der bleibende Prüfeindruck keine weiteren Veränderungen durch die Prüfkraftrücknahme erfährt, wie sie z. B. durch Stöße, Erschütterungen oder Verlagerungen des Probenkörpers oder des Eindringkörpers aus der Wirkungslinie der Prüfkraft hervorgerufen werden könnten.

Vorzugsweise sollten die in Tabelle 5 angegebenen Prüfkraft in Newton verwendet werden:

Tabelle 5 — Empfohlene Prüfkraft in N

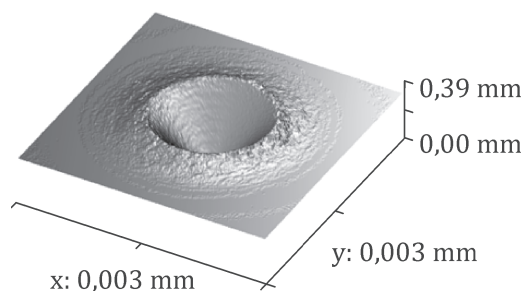
49,03
98,07
147,10
294,20
588,40
1 471,00

Die konkrete Wahl der Prüfkraft obliegt dem Nutzer und richtet sich nach verfügbarer Probendicke, gewünschtem Eindruckdurchmesser und Festigkeit des Werkstoffs.

Zur Reduzierung der Standardabweichung innerhalb von Messreihen kann der Prüfzyklus ein zweites Mal direkt im Anschluss wiederholt werden.

9.3 3D-Vermessung des Prüfeindrucks

Der Prüfeindruck wird dreidimensional vermessen (siehe Bild 4). Es sind sowohl optische als auch taktile Prüfverfahren möglich. Optische Verfahren sind aufgrund der geringeren Messzeiten zu bevorzugen.



ANMERKUNG Zur besseren Anschaulichkeit sind die Kantenlängen des Bildabschnitts in x- und y-Richtung sowie die Höhe von der höchsten zur tiefsten Stelle des Prüfeindrucks angegeben.

Bild 4 — exemplarische Darstellung einer dreidimensionalen Messung eines Prüfeindrucks