

DIN EN ISO 14577-1



ICS 77.040.10

Entwurf

Einsprüche bis 2024-09-26
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 14577-1:2015-11

**Metallische Werkstoffe –
Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und
anderer
Werkstoffparameter –
Teil 1: Prüfverfahren (ISO/DIS 14577-1:2024);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 14577-1:2024**

Metallic materials –
Instrumented indentation test for hardness and materials parameters –
Part 1: Test method (ISO/DIS 14577-1:2024);
German and English version prEN ISO 14577-1:2024

Matériaux métalliques –
Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des
matériaux –
Partie 1: Méthode d'essai (ISO/DIS 14577-1:2024);
Version allemande et anglaise prEN ISO 14577-1:2024

Anwendungswarnvermerk

Dieser Entwurf mit Erscheinungsdatum 2024-07-26 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil das beabsichtigte Dokument 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 oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 107 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Das Dokument prEN ISO 14577-1:2024 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164 „Mechanical testing of metals“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 459 „ECISS – Europäisches Komitee für Eisen- und Stahlnormung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von ANOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-41 AA „Härteprüfung 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 Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 14577-2	siehe	DIN EN ISO 14577-2
ISO 14577-3	siehe	DIN EN ISO 14577-3
ISO 14577-4	siehe	DIN EN ISO 14577-4

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

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 14577-1:2015-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) in Abschnitt 7 „Durchführung“ wurde der Prüfzyklus unter konstanter Dehnungsgeschwindigkeit aufgenommen;
- b) Anhang A „Werkstoffparameter, bestimmt aus den Kraft-Eindringtiefe Datensätzen“ überarbeitet;
- c) Anhang I „Berechnung der radialen Wegkorrektur“ überarbeitet;
- d) redaktionelle Überarbeitung der Norm.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 14577-2, *Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen*

DIN EN ISO 14577-3, *Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 3: Kalibrierung von Referenzproben*

DIN EN ISO 14577-4, *Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 4: Prüfverfahren für metallische und nichtmetallische Schichten*

– Leerseite –

August 2024

prEN ISO 14577-1

**Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter – Teil 1: Prüfverfahren
(ISO/DIS 14577-1:2024)**

Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method (ISO/DIS 14577-1:2024)

Matériaux métalliques – Essai de pénétration instrumenté pour la détermination de la dureté et de paramètres des matériaux – Partie 1: Méthode d'essai (ISO/DIS 14577-1:2024)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Symbole und Bezeichnungen	7
4 Kurzbeschreibung	9
5 Prüfmaschine	10
6 Probekörper	11
7 Durchführung	12
8 Unsicherheit der Ergebnisse	16
9 Prüfbericht	17
Anhang A (normativ) Werkstoffparameter, bestimmt aus dem Datensatz der Kraft/Eindringtiefe	19
A.1 Allgemeines	19
A.2 Eindringhärte	19
A.2.1 Bestimmung der Eindringhärte, H_{IT}	19
A.2.2 Bezeichnung der Eindringhärte, H_{IT}	22
A.3 Martenshärte	22
A.3.1 Bestimmung der Martenshärte, HM	22
A.3.2 Bezeichnung der Martenshärte	24
A.4 Martenshärte, bestimmt aus der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve	25
A.4.1 Bestimmung der Martenshärte aus der Steigung der ansteigenden Kraft-Eindringtiefe-Kurve, HM_S	25
A.4.2 Bezeichnung der Martenshärte, HM_S	25
A.4.3 Bestimmung der Martenshärte aus der ersten Ableitung der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve, HM_{diff}	25
A.5 Eindringmodul	26
A.5.1 Bestimmung des Eindringmoduls E_{IT}	26
A.5.2 Bezeichnung des zweiachsigen Dehnungsmoduls E^* und des Eindringmoduls E_{IT}	27
A.6 Eindringkriechen	28
A.6.1 Bestimmung des Eindringkriechens C_{IT}	28
A.6.2 Bezeichnung des Eindringkriechens C_{IT}	28
A.7 Eindringrelaxation	29
A.7.1 Bestimmung der Eindringrelaxation R_{IT}	29
A.7.2 Bezeichnung der Eindringrelaxation	30
A.8 Plastische und elastische Anteile der Eindringarbeit	30
A.8.1 Bestimmung der plastischen und elastischen Anteile der Eindringarbeit	30
A.8.2 Bezeichnung des elastischen Anteils der Eindringarbeit η_{IT}	31
Anhang B (informativ) Arten der Regelung des Eindringprozesses	32
Anhang C (normativ) Prüfmaschinennachgiebigkeit und Flächenfunktion des Eindringkörpers	33
C.1 Prüfmaschinennachgiebigkeit	33
C.2 Flächenfunktion des Eindringkörpers	33
Anhang D (informativ) Anmerkungen zu Diamant-Eindringkörpern	35
Anhang E (normativ) Einfluss der Oberflächenrauheit des Probekörpers auf die Genauigkeit der Ergebnisse	36
Anhang F (informativ) Zusammenhang zwischen der Eindringhärte H_{IT} und der Vickershärte	37
Anhang G (normativ) Bestimmung von Drift und Minimierung des Kriecheffekts	39
G.1 Gerätedrift	39
G.2 Minimierung des Kriecheffekts	39
Anhang H (informativ) Abschätzung der Unsicherheit der berechneten Härtewerte und der Werkstoffparameter	41

H.1	Allgemeine Bemerkungen	41
H.2	Verfahren	41
H.2.1	Allgemeines	41
H.2.2	Verfahren I	41
H.2.3	Verfahren 2	45
Anhang I	(normativ) Berechnung der radialen Wegkorrektur	50
I.1	Berechnung des elastischen radialen Wegs	50
I.2	Anwendung einer radialen Wegkorrektur auf die Kalibrierung der Flächenfunktion	51
I.3	Anwendung einer radialen Wegkorrektur auf die Messung von Werkstoffen	51
I.4	Anwendung der radialen Wegkorrektur auf die Korrelation zwischen Vickershärte und Eindringshärte	52
Literaturhinweise		53

Bilder

Bild 1	— Schematische Darstellung des Prüfvorgangs	9
Bild 2	— Schematische Darstellung des Querschnitts des Eindrucks im Falle des „Einsinkens“ des Werkstoffs	9
Bild 3	— Entscheidungsablauf zur Unterstützung bei der Abschätzung der thermischen Drift unter Verwendung einer Haltezeit mit konstanter Kraft	13
Bild A.1	— Form der Eindringkörper zur Bestimmung von HM	23
Bild A.2	— Zusammenhang zwischen Martenshärte, Eindringtiefe und Prüfkraft	24
Bild A.3	— Ausdruck für das Eindringkriechen	29
Bild A.4	— Darstellung der Eindringrelaxation	30
Bild A.5	— Plastische und elastische Anteile der Eindringarbeit	31
Bild B.1	— Schematische Darstellung des prüfkraftgeregelten Prüfverfahrens in Abhängigkeit von der Zeit	32
Bild B.2	— Schematische Darstellung des eindringtiefigeregelten Prüfverfahrens in Abhängigkeit von der Zeit	32
Bild H.1	— Flussdiagramm der Unsicherheiten für den Eindringmodul	47
Bild H.2	— Flussdiagramm der Unsicherheiten für die Härte	49

Tabellen

Tabelle 1	— Symbole und Bezeichnungen	8
Tabelle A.1	— Korrekturfaktor ε für verschiedene Eindringkörpergeometrien bei Verwendung einer linearen Anpassung	21
Tabelle E.1	— Beispiele für die maximal zulässige arithmetische Oberflächenrauheit R_a bei verschiedenen Prüfkraften F	36
Tabelle H.1	— Bestimmung der korrigierten erweiterten Unsicherheit z. B für die Martenshärte	43
Tabelle H.2	— Beispieltabelle zur Berechnung und Kombination von Unsicherheiten	48

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 14577-1:2024) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164 „Mechanical testing of metals“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 459 „ECISS — Europäisches Komitee für Eisen- und Stahlnormung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 14577-1:2015 ersetzen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 14577-1:2024 wurde von CEN als prEN ISO 14577-1:2024 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC Directives, Teil 1, beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC Directives, Teil 2, erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 164, *Mechanical testing of metals*, Subcommittee SC 3, *Hardness testing*.

Diese dritte Ausgabe ersetzt die zweite Ausgabe (ISO 14577-1:2015), die technisch überarbeitet wurde

ISO 14577 besteht unter dem allgemeinen Titel *Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters* aus den folgenden Teilen:

- *Part 1: Test method*
- *Part 2: Verification and calibration of testing machines*
- *Part 3: Calibration of reference blocks*
- *Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings*
- *Part 5: Linear elastic dynamic instrumented indentation testing (DIIT)*

Einleitung

Härte wird in der Regel als Widerstand eines Werkstoffs gegenüber dem permanenten Eindringen eines anderen, härteren Werkstoffs definiert. Die erhaltenen Ergebnisse bei der Durchführung von Härteprüfungen nach Rockwell, Vickers und Brinell werden nach der Rücknahme der Prüfkraft bestimmt. Daher wurde der Einfluss der elastischen Verformung unterhalb des Eindringköpers nicht berücksichtigt.

ISO 14577 (alle Teile) wurde erstellt, um dem Anwender die Bewertung des Eindringens von Werkstoffen zu ermöglichen, indem sowohl die Kraft als auch der Weg während der plastischen und elastischen Verformung berücksichtigt werden. Durch die Überwachung des vollständigen Zyklus der Zu- und Rücknahme der Prüfkraft können Härtewerte ermittelt werden, die den herkömmlichen Härtewerten entsprechen. Noch wichtiger ist, dass auch zusätzliche Eigenschaften des Werkstoffs, wie z. B. dessen Eindringmodul und elastisch-plastische Härte, bestimmt werden können. Alle diese Größen können berechnet werden, ohne dass der Eindruck optisch gemessen werden muss. Darüber hinaus ermöglicht die instrumentierte Eindringprüfung durch eine Vielzahl von Verfahren, Härte- und Modul-Tiefenprofile während eines wahrscheinlich komplexen Eindringzyklus aufzuzeichnen.

Obwohl der bei diesem Prüfverfahren ermittelte Wert des Eindringmoduls (E_{IT}) nicht direkt mit dem Elastizitätsmodul nach Young oder dem orientierungsspezifischen Elastizitätsmodul des eingedrückten Werkstoffs übereinstimmt, entspricht E_{IT} jedoch dem isotropen Hill-Durchschnitt des elastischen zweiachsigen Dehnungsmoduls des Werkstoffs, wenn kein Aufstau und keine Eigenspannungen vorhanden sind.

ISO 14577 (alle Teile) wurde erarbeitet, um die erhaltenen Messwerte in vielfältiger Weise analysieren zu können.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von ISO 14577 legt das Verfahren für die instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter für die drei folgenden Bereiche fest:

- Makrobereich: $2\text{ N} \leq F \leq 30\text{ kN}$;
- Mikrobereich: $2\text{ N} > F$; $h > 0,2\text{ }\mu\text{m}$;
- Nanobereich: $h \leq 0,2\text{ }\mu\text{m}$.

Im Nanobereich hängt die mechanische Verformung stark von der tatsächlichen Geometrie der Eindringkörperspitze ab, und die berechneten Werkstoffparameter werden wesentlich durch die Kontaktflächenfunktion des in der Prüfmaschine verwendeten Eindringkörpers beeinflusst. Daher ist eine sorgfältige Kalibrierung sowohl des Messgeräts als auch der Eindringkörpergeometrie erforderlich, um eine akzeptable Vergleichpräzision der mit verschiedenen Prüfmaschinen bestimmten Werkstoffparameter zu erhalten.

Der Makro- und Mikrobereich unterscheiden sich durch die Prüfkraft in Bezug auf die Eindringtiefe.

Es ist zu beachten, dass der Mikrobereich nach oben durch die Prüfkraft (2 N) und nach unten durch eine Eindringtiefe von $0,2\text{ }\mu\text{m}$ begrenzt ist.

Die Bestimmung der Härte und der anderen Werkstoffparameter ist in Anhang A enthalten.

Bei hohen Kontaktdrücken sind Beschädigungen des Eindringkörpers möglich. Bei Probekörpern mit sehr hoher Härte und sehr großem Elastizitätsmodul kann eine bleibende Verformung des Eindringkörpers auftreten, die mit geeigneten Referenzmaterialien nachgewiesen werden kann. Eindringprüfungen, die zu Schäden oder bleibenden Verformungen des Eindringkörpers führen, sind vom Anwendungsbereich dieses Prüfverfahrens ausgeschlossen.

Dieses Prüfverfahren kann auch für dünne metallische und nichtmetallische Überzüge und nichtmetallische Werkstoffe angewendet werden. In diesem Fall wird empfohlen, dass die in den entsprechenden Normen enthaltenen Festlegungen beachtet werden (siehe auch 6.3 und ISO 14577-4).

Die in dieser Norm verwendeten Analyseverfahren berücksichtigen nicht die Auswirkungen von Eigenspannungen und das Aufstauen oder Einsinken des Werkstoffs des Probekörpers, die jeweils eine Verschiebung des Eindringverhaltens verursachen und den berechneten Messwert verändern.

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).

ISO 14577-2, *Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 2: Verification and calibration of testing machines*

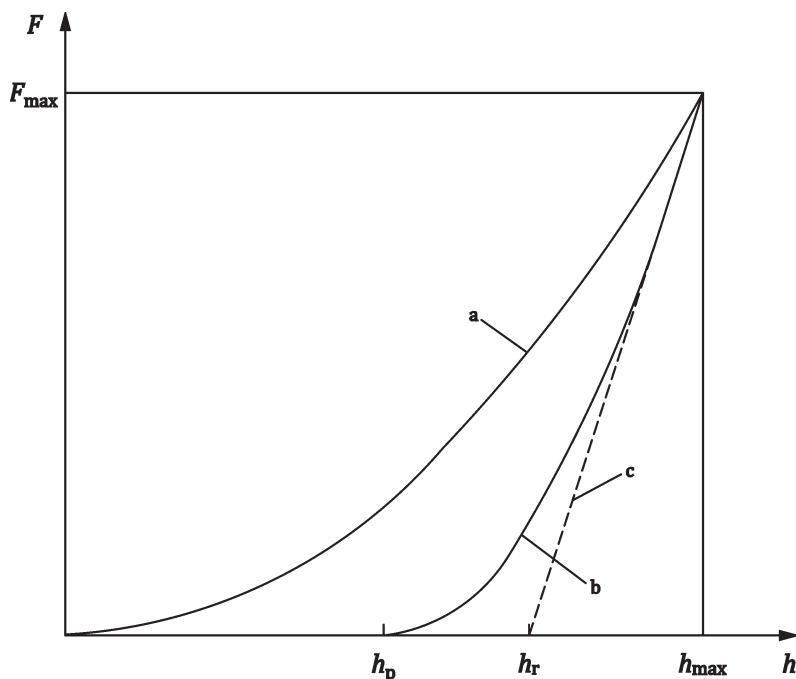
ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Symbole und Bezeichnungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Symbole und Bezeichnungen nach Tabelle 1 (siehe auch Bild 1 und Bild 2).

Tabelle 1 — Symbole und Bezeichnungen

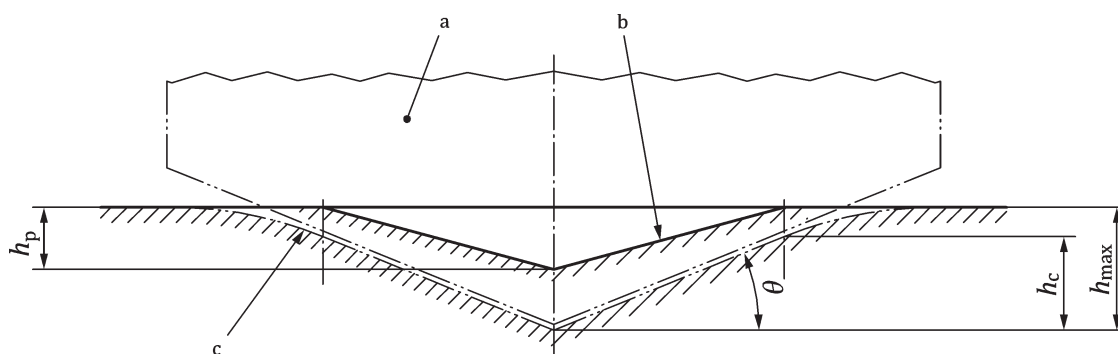
Symbol	Bezeichnung	Einheit
$A_p(h_c)$	Projizierte Kontaktfläche des Eindringkörpers beim Abstand h_c von der Spitze	mm ²
$A_s(h)$	Oberfläche des Eindringkörpers beim Abstand h von der Spitze	mm ²
C_{IT}	Eindringkriechen	%
C_T	Gesamte gemessene Kontaktnachgiebigkeit (dh/dF Tangente an die Krafrücknahmekurve bei maximaler Prüfkraft)	nm/mN
C_F	Prüfmaschinennachgiebigkeit	nm/mN
C_S	Kkontaktnachgiebigkeit nach der Korrektur mit der Prüfmaschinennachgiebigkeit	nm/mN
E_{IT}	Eindringmodul des Probekörpers	GPa
E_r	Reduzierter zweiachsiger Dehnungsmodul des Kontakts (Kombination der zweiachsigen Dehnungsmodule von Probekörper und Eindringkörper)	GPa
F	Prüfkraft	N
F_{max}	Maximale Prüfkraft	N
H	Eindringtiefe bei aufgebrachtter Prüfkraft	mm
h_c	Tiefe des Kontakts des Eindringkörpers mit dem Probekörper bei F_{max}	mm
h_{max}	Maximale Eindringtiefe bei F_{max}	mm
h_p	Bleibende Eindringtiefe nach Rücknahme der Prüfkraft	mm
h_r	Schnittpunkt der Tangente c an die Kurve b bei F_{max} mit der Achse der Eindringtiefe, wie in Bild 1 dargestellt	mm
H_{IT}	Eindringhärte	GPa
HM	Martenshärte	GPa
HM_s	Martenshärte, bestimmt aus der Steigung der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve	GPa
HM_{diff}	Martenshärte, bestimmt aus der ersten Ableitung von h nach $\sqrt{F}$	GPa
ν_s	Poisson-Zahl der Probe	
r	Radius des kugelförmigen Eindringkörpers	mm
R_{IT}	Eindringrelaxation	%
W_{elast}	Elastische Rückverformungsarbeit beim Eindringen	N · m
W_{total}	Gesamte mechanische Arbeit beim Eindringen	N · m
α	Halbkegelwinkel oder Facettenwinkel zur Eindringachse bei pyramidenförmigen Eindringkörpern	°
θ	Größter Winkel zwischen der Kontaktfläche und dem Eindringkörper zur Berechnung der radialen Wegverschiebung	°
η_{IT}	Verhältnis W_{elast} / W_{total}	%
ANMERKUNG 1 Um sehr lange Zahlen zu vermeiden, ist die Verwendung von Vielfachen oder Teilmengen der Einheiten zulässig.		
ANMERKUNG 2 Die weitere Nutzung der Einheit N/mm ² ist zulässig. 1 MPa = 1 N/mm ² .		



Legende

- a Aufbringen der Prüfkraft
- b Prüfkraftrücknahme
- c Tangente an die Kurve b bei $F_{\max}$

Bild 1 — Schematische Darstellung des Prüfvorgangs



Legende

- a Eindringkörper
- b Oberfläche des verbleibenden plastischen Eindrucks in einem Probekörper mit einem „perfekt plastischen“ Verhalten
- c Oberfläche des Probekörpers bei maximaler Eindringtiefe und Prüfkraft
- θ größter Winkel zwischen der Oberfläche des Probekörpers und dem Eindringkörper

Bild 2 — Schematische Darstellung des Querschnitts des Eindrucks im Falle des „Einsinkens“ des Werkstoffs

4 Kurzbeschreibung

Die kontinuierliche Aufzeichnung von Kraft und Eindringtiefe ermöglicht die Bestimmung von Härte und Werkstoffeigenschaften (siehe Bild 1 und Bild 2). Es muss ein Eindringkörper verwendet werden, der aus einem härteren Werkstoff als der zu prüfende Werkstoff besteht (d. h. der Eindringkörper darf sich nicht dauerhaft

E DIN EN ISO 14577-1:2024-09
prEN ISO 14577-1:2024 (D)

verformen und darf durch den Eindringvorgang nicht beschädigt werden). Die folgenden Formen und Werkstoffe können verwendet werden:

- a) Eindringkörper aus Diamant in Form einer orthogonalen Pyramide mit einer quadratischen Grundfläche und einem Winkel $\alpha = 68^\circ$ zwischen der Achse der Diamantpyramide und einer der Seitenflächen (Vickers-Pyramide, siehe Bild A.1);
- b) Diamantpyramide mit dreieckiger Grundfläche (z. B. modifizierte Berkovich-Pyramide mit einem Winkel $\alpha = 65,27^\circ$ zwischen der Achse der Diamantpyramide und einer der Seitenflächen, siehe Bild A.1);
- c) kugelförmiger Eindringkörper (insbesondere zur Bestimmung des elastischen Verhaltens von Werkstoffen);
- d) konischer Diamant-Eindringkörper mit kugelförmiger Spitze.

Dieser Teil von ISO 14577 schließt die Verwendung anderer Eindringkörpergeometrien nicht aus, dennoch sollten Ergebnisse, die mit solchen Eindringkörpern erhalten werden, sorgfältig interpretiert werden. Andere Werkstoffe, wie Saphir, können auch verwendet werden.

ANMERKUNG Durch die Kristallstruktur von Diamanten sind Eindringkörper, die kugelförmig sein sollen, üblicherweise Polyeder und haben keine ideale Kugelform.

Das Prüfverfahren kann entweder kraft- oder weggeregelt durchgeführt werden. Die Prüfkraft F , die entsprechende Eindringtiefe h und die Zeit werden während des gesamten Prüfverfahrens aufgezeichnet. Das Ergebnis der Prüfung ist der Datensatz aus Prüfkraft und den entsprechenden Eindringtiefen als Funktion der Zeit (siehe Bild 1 und Anhang B).

Für eine reproduzierbare Bestimmung der Kraft und der entsprechenden Eindringtiefe muss der Nullpunkt für die Kraft-/Eindringtiefe-Messung für jede Prüfung einzeln bestimmt werden (siehe 7.3).

Wenn zeitabhängige Effekte gemessen werden,

- wird beim kraftgeregelten Verfahren die Prüfkraft über eine festgelegte Zeitspanne konstant gehalten und die Änderung der Eindringtiefe als Funktion der Haltezeit der Prüfkraft gemessen (siehe Bild A.3 und Bild B.1), und
- wird beim eindringtieferegeltem Verfahren die Eindringtiefe über eine festgelegte Zeitspanne konstant gehalten und die Änderung der Prüfkraft als Funktion der Haltezeit der Eindringtiefe gemessen (siehe Bild A.4 und Bild B.2).

Die beiden vorgenannten Arten der Regelung führen im Kurvenbereich b in Bild B.1 a) und Bild B.2 b) oder in Bild B.1 b) und Bild B.2 a) zu grundlegend unterschiedlichen Ergebnissen.

5 Prüfmaschine

5.1 Die Prüfmaschine muss die Möglichkeit besitzen, vorgegebene Prüfkräfte oder Wege innerhalb des erforderlichen Anwendungsbereichs aufzubringen und muss die Anforderungen nach ISO 14577-2 erfüllen.

5.2 Die Prüfmaschine muss die Möglichkeit besitzen, die aufgebrachte Prüfkraft, den Eindringweg und die Zeit während des gesamten Prüfzyklus zu messen und aufzuzeichnen.

5.3 Die Prüfmaschine muss die Möglichkeit besitzen, die Maschinennachgiebigkeit zu kompensieren und die entsprechende Flächenfunktion des Eindringkörpers zu nutzen (siehe Anhang C und ISO 14577-2:2015, 4.5 und 4.6).

5.4 Eindringkörper für Prüfmaschinen können verschiedene Formen aufweisen, wie in ISO 14577-2 festgelegt (für weitere Informationen zu Diamanteindringkörpern, siehe Anhang D).

5.5 Die Prüfmaschine muss bei einer Temperatur innerhalb des in 7.1 festgelegten zulässigen Temperaturbereichs arbeiten und ihre Kalibrierung muss innerhalb der in ISO 14577-2:2015, Abschnitt 4, festgelegten Grenzen erhalten bleiben.

6 Probekörper

6.1 Die Prüfung ist in einem Bereich der Prüffläche durchzuführen, der die Bestimmung der Kraft-/Eindringtiefe-Kurve für den entsprechenden Eindringtiefenbereich mit der erforderlichen Messunsicherheit zulässt. Die Kontaktfläche muss frei von Flüssigkeiten oder Schmiermitteln sein, es sei denn, dies ist für die Durchführung der Prüfung unbedingt erforderlich; in diesem Fall muss das im Prüfbericht genau beschrieben werden. Es muss darauf geachtet werden, dass keine Fremdkörper (z. B. Staubteilchen) in die Kontaktfläche gelangen.

Grundsätzlich sollten Reinigungsprozesse vermieden werden, sofern die Oberfläche frei von offensichtlicher Oberflächenverschmutzung ist. Wenn eine Reinigung erforderlich ist, muss sie auf die folgenden Verfahren beschränkt werden, um Schädigungen zu minimieren:

- Anwendung eines trockenen, ölfreien und gefilterten Gasstroms;
- Anwendung eines Stroms sublimierter CO₂-Teilchen (wobei die Oberflächentemperatur über dem Taupunkt gehalten wird);
- Spülen mit einem Lösemittel (welches chemisch inert gegenüber dem Probekörper ist) und anschließendes Trocknen.

Wenn diese Verfahren versagen und die Oberfläche ausreichend robust ist, wird die Oberfläche mit einem fusselfreien, in Lösemittel getränkten Tuch abgewischt, um anhaftende Staubteilchen zu entfernen. Anschließend muss die Oberfläche wie oben beschrieben mit einem Lösemittel gespült werden.

Ultraschallverfahren sind dafür bekannt, dass sie Schäden an Oberflächen und Überzügen verursachen oder verstärken, und sollten daher nur mit Vorsicht eingesetzt werden.

Für eine Erläuterung zum Einfluss der Rauheit des Probekörpers auf die Messunsicherheit, siehe Anhang E. Die Oberflächenbearbeitung hat einen signifikanten Einfluss auf die Prüfergebnisse.

Die Oberflächen der Probekörper müssen senkrecht zur Richtung der Prüfkraft stehen. Es wird empfohlen, dass der Winkelunterschied zwischen der Normalen der Prüffläche und der Eindringkörperachse weniger als 1° beträgt. Die Auswirkungen der Oberflächenneigung sollten in die Unsicherheitsberechnung einbezogen werden.

6.2 Sofern erforderlich, muss die Vorbereitung der Prüffläche so erfolgen, dass jegliche Veränderung der Härte und/oder die Eigenspannungen an der Oberfläche (z. B. durch Erwärmung oder Kaltverformung) minimiert werden.

Aufgrund der geringen Eindringtiefen im Mikro- und Nanobereich müssen besondere Vorkehrungen bei der Vorbereitung der Probekörper getroffen werden. Wenn Polieren erforderlich ist, muss ein für die jeweiligen Werkstoffe geeignetes Polierverfahren angewendet werden.

6.3 Die Dicke des Probekörpers muss groß genug sein (oder die Eindringtiefe ausreichend klein), damit das Prüfergebnis nicht durch die Auflage des Probekörpers beeinflusst wird. Bei Härte- und Modulmessungen muss die Dicke des Probekörpers mindestens das Zehnfache der Eindringtiefe oder das Dreifache des Eindringdurchmessers (siehe 7.7) betragen, je nachdem, welcher Wert größer ist. Für Modulmessungen wird eine Dicke des Probekörpers empfohlen, die größer ist als das 30-fache der Eindringtiefe. Für Messungen dünnerer Probekörper wird empfohlen, die in ISO 14577-4 für Überzüge beschriebene Analyse zu verwenden.

Bei der Prüfung von Überzügen sollte die Dicke des Überzugs als Dicke des Probekörpers berücksichtigt werden. Für die Prüfung dünner Proben oder Überzüge siehe ISO 14577-4 für bessere Prüfverfahren.

ANMERKUNG Die oben genannten empirisch ermittelten Grenzwerte beruhen auf Härteprüfungen. Die Auswirkung der Dicke des Probekörpers auf das Ergebnis des Elastizitätsmoduls ist nicht dieselbe wie die Auswirkung auf das Härteergebnis. Die exakten Grenzwerte für den Einfluss der Auflage auf den Probekörper sind abhängig von der Geometrie des verwendeten Eindringkörpers und von den Werkstoffeigenschaften des Probekörpers und der Auflage.

7 Durchführung

7.1 Die Prüftemperatur muss aufgezeichnet werden. Die Prüfungen müssen innerhalb von ± 10 °C der Temperatur durchgeführt werden, bei der das Messgerät kalibriert wurde.

Die Stabilität der Temperatur während einer Prüfung ist wichtiger als die tatsächliche Prüftemperatur. Jede durchgeführte Kalibrierkorrektur muss gemeinsam mit der zusätzlichen Kalibrierunsicherheit aufgezeichnet werden. Es wird empfohlen, dass Prüfungen, insbesondere im Nano- und Mikrobereich, unter kontrollierten Bedingungen im Bereich von (23 ± 5) °C und bei (45 ± 10) % relativer Luftfeuchte durchgeführt werden.

Die einzelnen Prüfungen müssen jedoch bei stabilen Temperaturbedingungen durchgeführt werden, da eine hohe Messgenauigkeit erforderlich ist. Das bedeutet, dass:

- die Probekörper vor Beginn der Prüfung die Umgebungstemperatur erreicht haben muss,
- das Messgerät eine stabile Arbeitstemperatur erreicht haben muss (die Bedienungsanleitung sollte beachtet werden),
- die Umgebungs-, Messgeräte- und Prüftemperatur innerhalb des Bereichs, für den die Prüfmaschinenkalibrierung gültig ist, liegen muss, und
- andere äußere Einflüsse, die während einer einzelnen Prüfung Temperaturänderungen hervorrufen, kontrolliert werden müssen.

Um die thermisch induzierte Drift des Wegs so gering wie möglich zu halten, muss die Temperatur der Prüfmaschine über die Dauer eines Prüfzyklus angemessen aufrechterhalten werden oder die Drift des Wegs muss gemessen und korrigiert werden. In Bild 3 ist ein Entscheidungsablauf dargestellt, der bei der Abschätzung der Drift während der Prüfung Hilfestellung bietet. Wenn die Driftgeschwindigkeit signifikant ist, müssen die Wegdaten korrigiert werden, indem die Driftgeschwindigkeit unter Beibehalten einer aufgetragenen Kraft, die möglichst nahe am Nullpunkt der Kraft liegt, sofern praktikabel, oder unter Beibehalten einer Kraft an einer geeigneten Stelle in der Kraftrücknahmekurve (siehe ISO 14577-2, 4.3.3) gemessen wird. In allen Fällen, in denen die Driftgeschwindigkeit die maximale Eindringtiefe um mehr als 1 % innerhalb der gesamten Eindringzykluszeit beeinflussen würde, muss die Driftgeschwindigkeit korrigiert werden (siehe Toleranzen in ISO 14577-2 Tabelle 2 und 4.3.3). Wenn ein Kontakt im vollelastischen Bereich erreicht werden kann, ist ein Beibehalten der Kraft beim Anfangskontakt zu bevorzugen. Auf diese Art können Werkstoffeffekte (Kriechen, Viskoplastizität, Rissbildung) minimiert werden. Wenn die Messung deutlich länger ausfällt als die Haltezeit für die Messung der thermischen Drift, wird empfohlen, die thermische Drift vor und nach der Prüfung zu messen und die Wegverschiebung mit dem Durchschnitt der beiden Driftgeschwindigkeiten zu korrigieren. Die Differenz zwischen den beiden Driftraten ist eine Abschätzung der Unsicherheit der Driftrate. Die Unsicherheit aufgrund der Drift oder in der angewendeten Driftkorrektur muss berichtet werden.

Um die Drift von oberflächenbezogenen Messgeräten zu bestimmen, muss der Kontakt zwischen dem Referenzeindringkörper und der Probenoberfläche elastisch sein. Dies darf durch Berechnung ermittelt werden.

ANMERKUNG Die Bedeutung einer bestimmten Driftrate bei der Messung hängt vom Bereich des Eindrucks und der Anwendung ab.

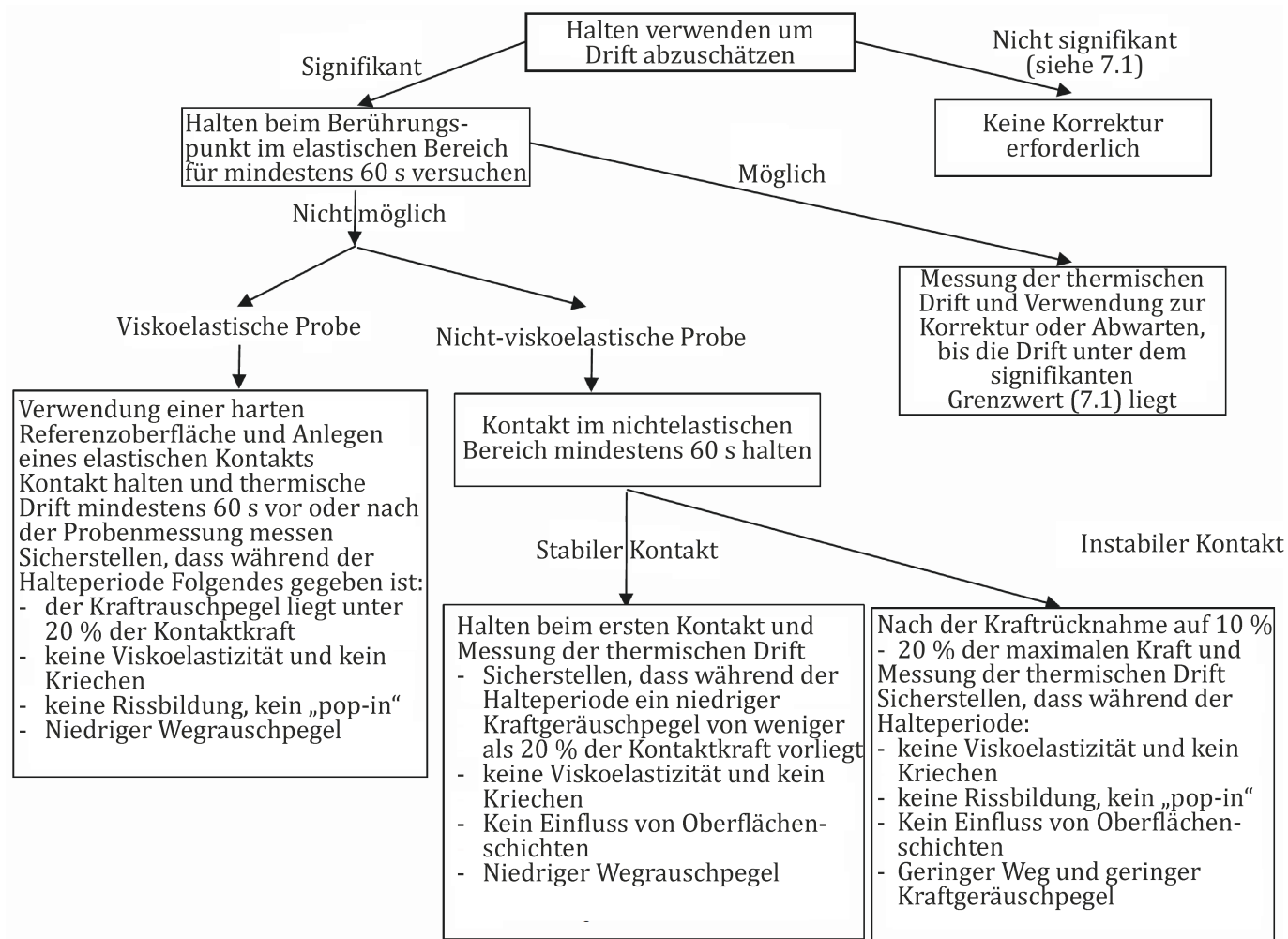


Bild 3 — Entscheidungsablauf zur Unterstützung bei der Abschätzung der thermischen Drift unter Verwendung einer Haltezeit mit konstanter Kraft

7.2 Der Probekörper muss so fest aufliegen, dass kein signifikanter Anstieg in der Prüfmaschinennachgiebigkeit auftritt. Der Probekörper muss entweder auf einer in Richtung des Eindrucks starren Aufnahmevorrichtung oder in einem geeigneten Probekörperhalter befestigt werden. Die Kontaktflächen zwischen Aufnahmevorrichtung für den Probekörper und Probekörperhalter müssen frei von Fremdstoffen sein, die die Nachgiebigkeit der Aufnahmevorrichtung für den Probekörper vergrößern (die Steifheit verringern) können.

ANMERKUNG Wenn die Probe von Werkstoffen oder mit Hilfe von Befestigungsverfahren gestützt wird, die sich von denen unterscheiden, die bei der Bestimmung der Prüfmaschinennachgiebigkeit verwendet wurden, können das unterschiedliche elastische Verhalten dieser Werkstoffe und die Befestigungsverfahren eine zusätzliche Nachgiebigkeit verursachen. Ein zertifizierter Referenzwerkstoff, der auf die gleiche Weise wie die Probe befestigt wird, kann verwendet werden, um zu überprüfen, ob das Befestigungsverfahren die Nachgiebigkeit des Prüfmaschinenrahmens beeinträchtigt. Ein Befestigungsproblem liegt vor, wenn der gemessene Modul von dem zertifizierten Wert abweicht und sich mit der aufgebrachten Kraft ändert.

7.3 Der Nullpunkt für die Messung der Kraft-/Eindringtiefe-Kurve muss jedem Prüfdatensatz individuell nach einem der folgenden Verfahren zugeordnet werden. Er repräsentiert die erste Berührung des Eindringkörpers mit der Oberfläche des Probekörpers. Die Messunsicherheit des Nullpunktes muss berichtet werden. Die Messunsicherheit des zugeordneten Nullpunktes sollte für den Makro- und Mikrobereich 1 % der maximalen Eindringtiefe nicht überschreiten. Die Messunsicherheit des Nullpunktes für den Nanobereich kann 1 % überschreiten, in diesen Fall muss der Wert abgeschätzt werden.

- a) Verfahren 1: Der Nullpunkt wird durch Extrapolation einer an die Kraftaufbringungskurve angepassten Ausgleichsfunktion (siehe Kurve a in Bild 1) berechnet; eine Anpassung nach dem Potenzgesetz mit dem Exponenten als Anpassungsparameter, der auf $1 \leq m \leq 2$ beschränkt ist, wird empfohlen. Die Anpassung muss für Werte im Bereich vom ersten aufgezeichneten Messpunkt bis zu maximal 5 % der maximalen Eindringtiefe durchgeführt werden. Die angepassten Werte dürfen keine Änderung im Eindringverhalten, wie das Eintreten von plastischer Verformung, aufweisen. Es wird empfohlen, die Daten bereits während der Annäherung (vor dem Kontakt) aufzuzeichnen, um sie bei der Nullpunktbestimmung berücksichtigen zu können. Die Unsicherheit des berechneten Nullpunkts ergibt sich aus den Anpassungsparametern, der Anpassungsfunktion und der Länge der Extrapolation. Die Unsicherheit wird als Standardfehler des Schnittpunkts der Anpassung mit den Achsen der Nullkraft berechnet.

ANMERKUNG 1 Der erste Teil der Eindringtiefe-Kurve kann durch Schwingungen oder andere Rauschanteile beeinflusst werden.

- b) Verfahren 2: Der Nullpunkt ist der Berührungspunkt, der durch den ersten Anstieg der Prüfkraft oder der Kontaktsteifheit ermittelt wird. Die Schrittweite der Kraft oder des Wegs muss an diesem Berührungspunkt gering genug sein, so dass die Unsicherheit des Nullpunkts unter dem erforderlichen Grenzwert liegt.

ANMERKUNG 2 Typische kleine Werte für Kraftschritte im Makrobereich sind $10^{-4} F_{\max}$ und im Nano- und Mikrobereich weniger als 5 μN .

7.4 Der Prüfzyklus kann entweder kraft- oder weggeregelt erfolgen. Die Regelparameter können entweder kontinuierlich oder schrittweise variieren. Im Prüfbericht muss eine vollständige Beschreibung aller Phasen des Prüfzyklus erfolgen, die Folgendes enthält:

- a) Art der Regelung (d. h. kraft- oder weggeregelt und ob eine schrittweise oder kontinuierliche Änderung der Regelparameter erfolgt);
- b) maximale Prüfkraft (oder Weg);
- c) Funktion der Kraftaufbringung (oder des Wegs);
- d) Dauer und Lage jeder Halteperiode;
- e) Datenerfassungsfrequenz (oder Anzahl der Datenpunkte).

ANMERKUNG Ein beispielhafter Zyklus für den Nano- und Mikrobereich ist der Folgende: Aufbringungszeit der Prüfkraft 30 s; Halten bei maximaler Prüfkraft $F_{\max}$ 30 s; Rücknahme der Prüfkraft 10 s. Zur Messung der thermischen Drift kann auch eine Haltezeit von 60 s erforderlich sein (siehe Anhang G).

Die für eine Prüfung benötigte Zeit kann die gewonnenen Ergebnisse beeinflussen. Um vergleichbare Prüfergebnisse zu erhalten, muss die Dauer der Prüfung berücksichtigt werden.

7.5 Die Prüfkraft muss ohne Stoß und Schwingungen, die die Prüfergebnisse signifikant beeinflussen können, aufgebracht werden, bis entweder die aufgebrachte Prüfkraft oder der Eindringweg den festgelegten Wert erreicht hat. Kraft und Weg müssen in den Zeitintervallen aufgezeichnet werden, die im Prüfbericht angegeben sind.

Während der Bestimmung des Berührungspunktes des Eindringkörpers mit dem Probekörper sollte die Annäherungsgeschwindigkeit des Eindringkörpers gering sein, um zu verhindern, dass die mechanischen Eigenschaften der Oberfläche durch den Stoß nicht verändert werden. Für Eindringprüfungen im Makrobereich sollte sie 2 µm/s nicht überschreiten. Die Annäherungsgeschwindigkeit unmittelbar vor dem Kontakt, geteilt durch die Erfassungsrate des Wegverschiebungssignals, darf im Nano-Bereich nicht größer als 1 nm und im Mikro-Bereich nicht größer als 5 nm sein.

ANMERKUNG Es wird empfohlen, dass Anwender die Annäherungsgeschwindigkeit berichten.

Datensätze der Kraft-/Eindringtiefe-Zeit sind nur dann direkt vergleichbar, wenn der gleiche Eindringkörper und der gleiche Prüfzyklus (Profil) verwendet werden. Das Prüfprofil muss entweder als zeitabhängige Funktion der aufgebrachten Prüfkraft oder des Eindringwegs festgelegt werden. Die drei am häufigsten verwendeten Einzelzyklen sind:

- a) konstante Geschwindigkeit der Zunahme der aufgebrachten Prüfkraft,
- b) konstante Geschwindigkeit der Zunahme des Eindringwegs,
- c) konstante Geschwindigkeit der Zunahme der Dehnungsrate.

Komplexere Multi-Zyklus-Verfahren wie Last-Teilentlastungszyklen können auch verwendet werden, um Informationen zu verschiedenen Prüfkraften in einer Messposition zu erhalten.

Durch die Anwendung komplexerer Multi-Zyklus-Verfahren, wie z. B. Last-Teilentlastungszyklen in einem Eindruck, bei dem die Kraft schrittweise erhöht wird, um viele Entlastungskurven zu erhalten, die auf denselben Nullpunkt bezogen sind, ist es möglich, Informationen über die Kontaktnachgiebigkeit bei verschiedenen Prüfkraften an einem einzigen Prüfpunkt zu erhalten.

Die Rücknahmegeschwindigkeit der aufgebrachten Prüfkraft unterliegt den Anforderungen, dass während der Rücknahme der aufgebrachten Prüfkraft eine ausreichende Anzahl von Datenpunkten für anschließende Analysen aufgezeichnet werden und dass das gesamte Kriechen und die restliche Kriechgeschwindigkeit innerhalb zulässiger Grenzen liegen (siehe Anhang G).

Wenn die Driftgeschwindigkeit signifikant ist (siehe 7.1 und Anhang G), muss eine Korrektur der Werte von Kraft und Eindringtiefe unter Verwendung der gemessenen Driftgeschwindigkeit durchgeführt werden.

7.6 Während der gesamten Prüfung muss die Prüfmaschine vor Stößen, Schwingungen, Luftbewegungen und Temperaturschwankungen, die das Prüfergebnis wesentlich beeinflussen können, geschützt sein.

7.7 Es ist wichtig, dass die Prüfergebnisse nicht durch vorhandene Grenzflächen, freie Oberflächen oder durch plastische Verformung, die bei einer Prüfreihe durch vorangegangene Eindrücke hervorgerufen wurde, beeinflusst werden. Diese Effekte sind abhängig von der Eindringkörpergeometrie und den Werkstoffeigenschaften des Probekörpers. Eindrücke müssen mindestens das Dreifache ihres Eindruckdurchmessers von Grenzflächen und freien Oberflächen entfernt sein und der Mindestabstand zwischen einzelnen Eindrücken muss mindestens das Fünffache des größten Eindruckdurchmessers betragen. Für Modulusmessungen wird

ein Abstand von der Probenkante empfohlen, der mindestens dem 20-fachen des Eindruckdurchmessers entspricht.

Der Eindruckdurchmesser ist der Durchmesser des kreisförmigen Abdrucks des Eindrucks, der durch einen kugeligen Eindringkörper in der gleichen Ebene mit der Oberfläche des Probekörpers erzeugt wird. Für Eindrücke, die nicht kreisförmig sind, ist der Eindruckdurchmesser der Durchmesser des kleinsten Kreises, der den Eindruck umschließen kann. An den Rändern des Eindrucks können gelegentlich Risse auftreten. Wenn diese auftreten, sollte der Eindruckdurchmesser die Risse umschließen.

Die festgelegten Mindestabstände sind am besten für keramische Werkstoffe und Metalle wie Eisen und Eisenlegierungen geeignet. Für andere Werkstoffe wird empfohlen, dass die Abstände mindestens das Zehnfache des Eindruckdurchmessers betragen.

Im Zweifel wird empfohlen, dass die Werte des ersten Eindrucks mit den folgenden Eindrücken einer Serie verglichen werden. Wenn es einen wesentlichen Unterschied gibt, könnten die Eindrücke zu dicht sein und die Abstände sollten vergrößert werden. Es wird vorgeschlagen, den Abstand zu verdoppeln.

Es kann bei dünnen Überzügen wünschenswert sein, sie im Querschnitt zu messen (z. B. um Probleme aufgrund der Oberflächenrauheit zu vermeiden). In diesem Fall reicht die Dicke des Überzugs möglicherweise nicht aus, um die oben festgelegten Anforderungen an die Mindestabstände zu erfüllen. Kleinere Abstände können verwendet werden, wenn experimentell nachgewiesen wurde, dass dadurch die Werte für Kraft-/Eindringtiefe-Zeit Datensätze im Hinblick auf Eindrücke mit korrektem Abstand auf ähnlichen Probekörpern mit dickeren Überzügen nicht signifikant beeinflusst werden.

8 Unsicherheit der Ergebnisse

Eine vollständige Beurteilung der Unsicherheit muss nach ISO/IEC Guide 98-3 durchgeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung zweier Verfahren zur Beurteilung der Unsicherheit ist in Anhang H enthalten.

Verfahren 1: Dieser Ansatz zur Bestimmung der Unsicherheit berücksichtigt nur die Unsicherheiten, die mit der Gesamtmessleistung der Prüfmaschine bezogen auf Referenzproben (nachfolgend mit CRM abgekürzt) verbunden sind. Diese Leistungsunsicherheiten reflektieren die kombinierte Wirkung aller einzelnen Unsicherheiten (indirekte Überprüfung). Bei Verwendung dieses Ansatzes ist es wichtig, dass die einzelnen Bauteile der Prüfmaschine während der Prüfung auf exakt die gleiche Weise und innerhalb der Grenzabweichungen der indirekten Überprüfung arbeiten, die zur Abschätzung der Unsicherheiten angewendet worden ist.

Verfahren 2: Dieser Ansatz berechnet eine kombinierte Unsicherheit aus einzelnen Beiträgen. Diese können zu zufälligen Unsicherheiten und systematischen Unsicherheiten zusammengefasst werden. Einzelne Parameter können einen oder beide Typen der Messunsicherheit zur Gesamtunsicherheit beitragen. Beispielsweise kann die Unsicherheit im gemessenen Weg eine zufällige Komponente aufgrund der Auflösung der verwendeten Skala und des Schwingungsrauschen usw. sowie eine systematische Komponente aufgrund der Unsicherheit bei der Kalibrierung des Wegsensors enthalten. Folgende Quellen für Unsicherheiten müssen berücksichtigt werden:

- Nullpunktbestimmung;
- Messung von Kraft und Weg (d. h. Grundrauschen, einschließlich der Wirkung von Umgebungsschwingungen und elektromagnetischen Feldveränderungen usw.);
- Anpassung der Kraftrücknahmekurve;
- thermische Driftgeschwindigkeit;
- Kontaktfläche infolge Oberflächenrauheit;
- Kraft, Weg;

- Prüfmaschinennachgiebigkeit;
- Kalibrierwerte der Flächenfunktion des Eindringkörpers;
- Drift der Kalibrierung infolge Temperaturunsicherheit der Prüfmaschine und Zeit seit der letzten Kalibrierung;
- Neigung der Prüffläche.

Es ist nicht immer möglich, alle identifizierten Beiträge zur zufälligen Unsicherheit einzeln zu quantifizieren. In diesem Fall kann eine Abschätzung der Standardunsicherheit aus der statistischen Analyse von wiederholten Eindrücken in den Prüfwerkstoff erhalten werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die systematischen Standardunsicherheiten, die zu den zufälligen Standardunsicherheiten beitragen können, nicht doppelt gezählt werden (siehe ISO/IEC 98-3:2008, Abschnitt 4).

Ein Leitfaden zur Beurteilung der Unsicherheit bei der Bestimmung der Härte und der Werkstoffparameter (Anhang A) ist in Anhang H enthalten.

9 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben enthalten:

- a) Verweisung auf diesen Teil von ISO 14577, d. h. ISO 14577-1;
- b) alle Einzelheiten, die für die Identifizierung der Probe erforderlich sind;
- c) Werkstoff und Form des Eindringkörpers und, sofern verwendet, die genaue Flächenfunktion des Eindringkörpers;
- d) Prüfzyklus (Art der Regelung und vollständige Beschreibung des Prüfprofils); das sollte enthalten:
 - 1) Sollwerte,
 - 2) Geschwindigkeiten und Zeiten von Kraft oder Weg,
 - 3) Lage und Länge von Haltepunkten, und
 - 4) Datenerfassungsfrequenz oder Anzahl der protokollierten Punkte für jeden Abschnitt des Zyklus;
- e) erhaltenes Messergebnis, die gesamte erweiterte Unsicherheit und die Anzahl der Prüfungen;
- f) Verfahren und Form der Funktion jeglicher verwendeter Ausgleichskurve, die zur Bestimmung des Nullpunkts angewendet wurden;
- g) alle Tätigkeiten, die nicht durch diesen Teil von ISO 14577 festgelegt sind oder als optional gelten;
- h) Einzelheiten zu jedem Ereignis, das die Ergebnisse beeinflusst haben kann;
- i) Prüftemperatur;
- j) Datum und Uhrzeit der Prüfung;
- k) Auswerteverfahren;
- l) falls gefordert, alle vereinbarten zusätzlichen Angaben, einschließlich der aus der gemessenen Kraft-/Eindringtiefe-Kurve bestimmten Werte und genaue Angaben über das Unsicherheitsbudget.

E DIN EN ISO 14577-1:2024-09
prEN ISO 14577-1:2024 (D)

ANMERKUNG Es ist häufig erwünscht, im Prüfbericht die Position der Eindrücke auf dem Probekörper und die eindeutige Identifikation der Prüfmaschine oder die zur Durchführung der Prüfung eingesetzten spezifischen Gerätekonfigurationen anzugeben.

Anhang A (normativ)

Werkstoffparameter, bestimmt aus dem Datensatz der Kraft/Eindringtiefe

A.1 Allgemeines

Datensätze der Kraft/Eindringtiefe aus der instrumentierten Eindringprüfung können verwendet werden, um eine Vielzahl von Werkstoffparametern abzuleiten.

A.2 Eindringhärte

A.2.1 Bestimmung der Eindringhärte, H_{IT}

Die Eindringhärte H_{IT} ist ein Maß für den Widerstand gegenüber einer bleibenden Verformung oder Schädigung und wird in Gleichung (A.1) angegeben:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p(h_c)} \quad (A.1)$$

Dabei ist

F_{max} die maximal aufgebrachte Prüfkraft;

$A_p(h_c)$ die projizierte Kontaktfläche (Querschnittsfläche) zwischen dem Eindringkörper und der Probe.

ANMERKUNG Diese Definition stimmt mit der erstmals von Meyer [3] vorgeschlagenen Definition überein.

Die Kontakttiefe h_c wird aus der Krafrücknahmekurve unter Verwendung der Tangententiefe h_r und der maximalen Eindringtiefe h_{max} abgeleitet und für die elastische Verformung der Oberfläche nach Sneddon's Analyse [5] korrigiert, die in der Gleichung (A.8) enthalten ist, wobei $\varepsilon(m)$ eine Variable im Bereich $0,72 < \varepsilon < 0,8$ ist, deren Wert von der Eindringkörpergeometrie und dem Ausmaß der plastischen Verformung im Kontakt abhängig ist. Für weitere Informationen siehe Verweisung [13].

$$h_c = h_{max} - \varepsilon(m) \times (h_{max} - h_r) \quad (A.2)$$

Dabei ist

$\varepsilon(m)$ eine Variable im Bereich $0,72 < \varepsilon < 0,8$; der genaue Wert hängt von der Eindringkörpergeometrie und dem Ausmaß der plastischen Verformung im Kontakt ab und wird nach Gleichung (A.11) berechnet. Für weitere Informationen siehe Verweisung [13];

h_r der Schnittpunkt der Tangente an die Krafrücknahmekurve bei F_{max} mit der Wegachse.

Zur Bestimmung von h_r wurden verschiedene Verfahren angewendet und können im Wesentlichen durch zwei Ansätze beschrieben werden:

- Lineare Extrapolationsmethode* (siehe Verweisung [10]): Hierbei wird davon ausgegangen, dass der erste Teil der Krafrücknahmekurve linear verläuft und einfach zum Schnitt mit der Wegachse extrapoliert werden kann. Der Schnittpunkt dieser Tangente mit der Wegachse ergibt h_r .

E DIN EN ISO 14577-1:2024-09
prEN ISO 14577-1:2024 (D)

Die Anwendung dieser Methode wird nur für hochplastische Werkstoffe empfohlen, bei denen die Tiefe der elastischen Rückverformung weniger als 10 % von $h_{\max}$ beträgt.

ANMERKUNG 3 Häufig wird der Bereich zwischen 98 % $F_{\max}$ und 80 % $F_{\max}$ für das Verfahren der kleinsten Quadrate verwendet.

- b) Wenn eine lineare Anpassung an die Krafrücknahmekurve angewendet wird, dann sind für Epsilon die Werte nach Tabelle A.1 zu verwenden.
- c) *Potenzgesetz-Methode* (siehe Literaturhinweis [4]): Diese berücksichtigt den Fakt, dass der erste Teil der Krafrücknahmekurve der Prüfkurve im Allgemeinen nicht linear ist, aber durch eine einfache Beziehung nach dem Potenzgesetz wie in Gleichung (A.3) beschrieben werden kann:

$$F = B \times (h - h_p)^m \quad (\text{A.3})$$

Dabei ist

B eine Konstante;

m ein Exponent, der von der Eindringkörpergeometrie und der Plastizität des Kontakts abhängig ist.

B , h_p und m werden aus der Anpassung der Krafrücknahmekurve nach dem Potenzgesetz bestimmt.

Häufig wird der Bereich zwischen 98 % $F_{\max}$ und 20 % $F_{\max}$ für die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendet, wobei dieser Bereich in Abhängigkeit von der „Qualität“ der Krafrücknahmekurve variiert werden kann. Wenn es erforderlich ist, die Daten für die Ausgleichsrechnung auf weniger als die oberen 50 % der Krafrücknahmekurve zu reduzieren, muss der Eindruckversuch als von der Norm abweichend angesehen werden und er sollte mit besonderer Sorgfalt interpretiert werden. Die Tangente wird durch Differentiation der angepassten Potenzbeziehung und Auswertung bei $F_{\max}$ bestimmt. Der Schnittpunkt dieser Tangente mit der Wegachse ergibt h_r .

Wenn der Exponent m bestimmte Werte überschreitet, dann sollte h_r sehr sorgfältig interpretiert werden. (Zum Beispiel: $m > 1,5$ ist ein Zeichen dafür, dass die Ergebnisse eine Zeitabhängigkeit haben können. Werte von $m > 2$ bedeuten, dass die Kontaktfläche schärfer als der Eindringkörper sein müsste, was physikalisch unmöglich ist, siehe Verweisung [16].)

Der erhaltene Wert von m wird dann zur Berechnung von $\varepsilon(m)$ verwendet. Das kann durch direkte Berechnung unter Verwendung der Gammafunktionen Γ [Gleichung (A.4)] oder durch Anwendung einer geeigneten Näherung erfolgen. Eine mögliche Näherung (siehe Verweisung [13]) ist Gleichung (A.5). Der unter Verwendung dieser Näherung eingeführte Fehler beträgt weniger als 0,5 % für den Bereich $1,05 \leq m \leq 5$.

$$\varepsilon(m) = m \cdot \frac{(h_{\max} - h_c)}{h_{\max}} = m \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{m}{2m-2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2m-1}{2m-2}\right)} \right] \quad (\text{A.4})$$

$$\varepsilon(m) = \frac{0,081\,58}{\sqrt{m - 0,94}} - \frac{0,616\,79}{(m - 0,94)^{0,02}} + \frac{1,263\,86}{(m - 0,94)^{0,001}} \quad (\text{A.5})$$

Andere Näherungen sind zulässig, wie z. B. die Verwendung einer Funktionswertetabelle (siehe z. B. Verweisung [22]).

Tabelle A.1 — Korrekturfaktor ε für verschiedene Eindringkörpergeometrien bei Verwendung einer linearen Anpassung

Eindringkörpergeometrie	ε
Flacher Stempel	1
Konisch	$2(\pi - 2)/\pi = 0,73$
Rotationssymmetrischer Paraboloid (einschließlich kugelig)	$3/4$
Berkovich, Vickers	$3/4$

Bei einer Kontakttiefe $> 6 \mu\text{m}$ ist eine erste Annäherung an die projizierte Fläche A_p durch die theoretische Form des Eindringkörpers gegeben [Gleichung (A.6) und Gleichung (A.7)].

a) Vickers-Eindringkörper

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p(h_c)} = \frac{F_{\max}}{4h_c^2 \tan^2 \alpha} \quad (\text{A.6})$$

b) Berkovich-Eindringkörper

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p(h_c)} = \frac{F_{\max}}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot h_c^2 \tan^2 \alpha} \quad (\text{A.7})$$

Dabei ist

h_c die Kontakttiefe des Eindringkörpers im Probekörper und nach Gleichung (A.8) berechnet.

In Bild A.1 ist die Bezeichnung des Winkels α für Eindringkörper mit Vickers- und Berkovichgeometrie dargestellt.

ANMERKUNG 6 $A_p(h_c) = 24,50 \times h_c^2$ für Vickers-Eindringkörper ($2\alpha = 136^\circ$), $A_p(h_c) = 23,97 \times h_c^2$ für originale Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,03^\circ$) und $A_p(h_c) = 24,49 \times h_c^2$ für modifizierte Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,27^\circ$).

ANMERKUNG 7 Die meisten verwendeten Berkovich-Eindringkörper haben tatsächlich eine modifizierte Berkovich-Geometrie

ANMERKUNG 8 Die maximale Eindringtiefe $h_{\max}$ ist die Tiefe bei maximaler Prüfkraft und gemessen zu Beginn der Krafrücknahme. Sie enthält alle zusätzlichen Wegverschiebungen durch Kriechen, die während der Halteperioden bis zur Krafrücknahme aufgetreten sind.

Bei einer Kontakttiefe $< 6 \mu\text{m}$ kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Flächenfunktion des Eindringkörpers der perfekten theoretischen Form entspricht, da alle spitz zulaufenden Eindringkörper an der Spitze eine gewisse Abrundung aufweisen und kugelige Eindringkörper (kugelförmig und konisch) wahrscheinlich keinen einheitlichen Radius aufweisen. Die Bestimmung der exakten Flächenfunktion für einen vorgegebenen Eindringkörper ist bei Kontakttiefen $< 6 \mu\text{m}$ erforderlich, ist aber auch bei größeren Eindringtiefen hilfreich (siehe ISO 14577-2, 4.5.1 und 4.6).

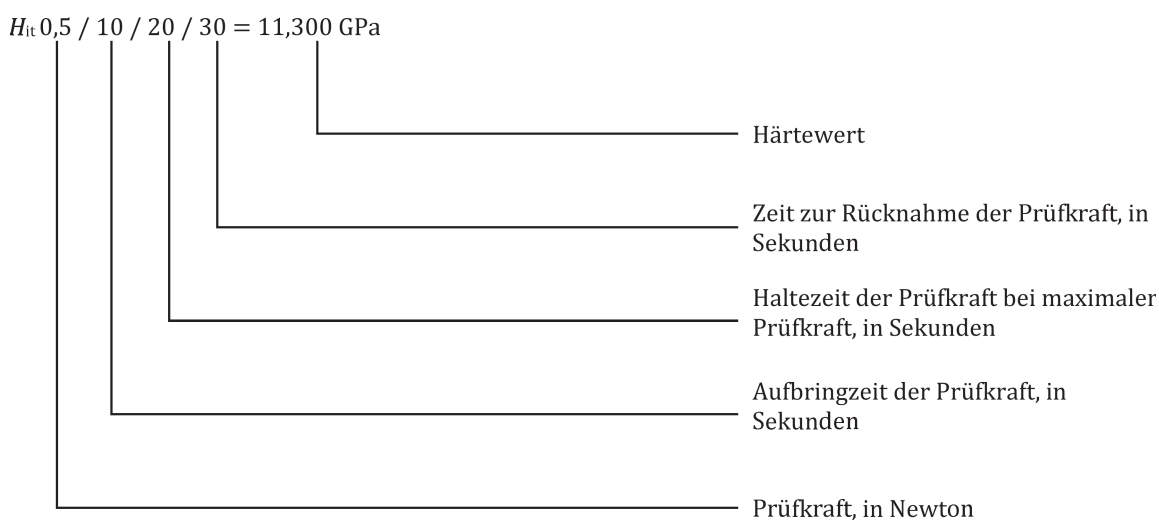
ANMERKUNG 9 Die Flächenfunktion $A_p(h_c)$ ist üblicherweise als eine mathematische Funktion der projizierten Kontaktfläche in Abhängigkeit vom Abstand der Eindringkörperspitze angegeben. Wenn die Flächenfunktion nicht durch eine relativ einfache (kubische oder polynomiale) mathematische Funktion beschrieben werden kann, dann kann eine Abschätzung entweder grafisch oder mithilfe einer Funktionswertetabelle erfolgen. Alternativ kann eine andere mathematische Funktion verwendet werden, um verschiedene Bereiche des Eindringkörpers zu beschreiben, oder es kann eine angepasste Spline-Funktion verwendet werden [21].

In allen Fällen müssen die abgeschätzten Härtewerte unter Verwendung der in Anhang I angegebenen Verfahren für die radiale Wegverschiebung der Oberfläche korrigiert werden, um den Wert $H_{IT,n}$ (dabei ist n die Anzahl der für die Korrektur durchgeführten Iterationen) unter Verwendung des abgeschätzten H_{IT} -Werts als Anfangsschätzwert $H_{IT,0}$ zu erhalten. Für weitere Informationen siehe Verweisung [13]. Bei den meisten Metallen ist die radiale Korrektur klein ($< 0,5 \%$), steigt jedoch auf 5% bei hochelastischen Werkstoffen, wie z. B. Quarzglas.

Informationen zur Korrelation von H_{IT} mit anderen Härteskalen sind in Anhang F enthalten.

A.2.2 Bezeichnung der Eindringhärte, H_{IT}

BEISPIEL



A.3 Martenshärte¹

A.3.1 Bestimmung der Martenshärte, HM

Die Martenshärte, HM, wird unter aufgebrachter Prüfkraft bestimmt. Die Martenshärte wird aus den Werten der Kraft-/Eindringtiefe-Kurve während der Erhöhung der Prüfkraft bestimmt, bevorzugt nach dem Erreichen der festgelegten Prüfkraft. Die Martenshärte enthält die plastische und elastische Verformung und daher kann dieser Härtewert für alle Werkstoffe berechnet werden.

Die Martenshärte ist definiert für die pyramidenförmigen Vickers- und Berkovich-Eindringkörper, die in Bild A.1 dargestellt sind. Sie ist nicht definiert für den Knoop-Eindringkörper oder für Kugeleindringkörper.

Die Martenshärte ist definiert als die Prüfkraft F , geteilt durch $A_s(h)$, die Oberfläche des Eindringkörpers, der über den Nullpunkt des Kontakts hinaus eindringt, und wird in MPa ausgedrückt, wie in Gleichung (A.8) angegeben.

$$HM = \frac{F}{A_s(h)} \quad (A.8)$$

Die Werte der Martenshärte sind nur vergleichbar, wenn sie bei der gleichen Tiefe bestimmt wurden.

In Bild A.1 ist die Bezeichnung des Winkels α für Vickers- und Berkovich-Eindringkörper dargestellt.

¹ Frühere Bezeichnung Universalhärte HU, siehe Verweisung [1].

Die Oberfläche $A_s(h)$ für den Vickers-Eindringkörper ist in Gleichung (A.9) und für den Berkovich-Eindringkörper in Gleichung (A.10) angegeben:

a) Vickers-Eindringkörper

$$A_s(h) = \frac{4 \times \sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \times h^2 \quad (\text{A.9})$$

b) Berkovich-Eindringkörper

$$A_s(h) = \frac{3 \times \sqrt{3} \times \tan \alpha}{\cos \alpha} \times h^2 \quad (\text{A.10})$$

ANMERKUNG 1 $A_s(h) = 26,43 \times h^2$ für den Vickers-Eindringkörper ($2\alpha = 136^\circ$), $A_s(h) = 26,43 \times h^2$ für den originalen Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,03^\circ$) und $A_s(h) = 26,98 \times h^2$ für den modifizierten Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,27^\circ$).

ANMERKUNG 2 Die meisten verwendeten Berkovich-Eindringkörper haben tatsächlich eine modifizierte Berkovich-Geometrie

Bei einer Eindringtiefe $h < 6 \mu\text{m}$ kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Flächenfunktion des Eindringkörpers der perfekten theoretischen Form entspricht, da alle spitz zulaufenden Eindringkörper an der Spitze eine gewisse Abrundung aufweisen und kugelige Eindringkörper (kugelförmig und konisch) wahrscheinlich keinen einheitlichen Radius aufweisen. Die Bestimmung der exakten Flächenfunktion für einen vorgegebenen Eindringkörper ist besonders wichtig für diese Eindringtiefen, aber auch für alle anderen Eindringtiefen hilfreich (siehe ISO 14577-2, 4.5.1 und 4.6).

Bei einer Eindringtiefe $h < 6 \mu\text{m}$ muss die tatsächliche Oberfläche $A_s(h)$ für die Berechnung verwendet werden; siehe Anhang C und Verweisung [2].

ANMERKUNG 3 Die Flächenfunktion $A_s(h)$ ist üblicherweise als eine mathematische Funktion der Oberfläche in Abhängigkeit vom Abstand der Eindringkörperspitze angegeben. Wenn die Flächenfunktion nicht durch eine relativ einfache (kubische oder polynomiale) mathematische Funktion beschrieben werden kann, dann kann eine Abschätzung entweder grafisch oder mithilfe einer Funktionswertetabelle erfolgen. Alternativ kann eine andere mathematische Funktion verwendet werden, um verschiedene Bereiche des Eindringkörpers zu beschreiben, oder es kann eine angepasste Spline-Funktion verwendet werden [21].

Bei bestimmten Anwendungen kann es hilfreich sein, die festgelegte Prüfkraft über einen festgelegten Zeitraum zu halten. Die Dauer der Haltezeit der Prüfkraft sollte mit einer Genauigkeit von 0,5 s dokumentiert werden. Der Anwendungsbereich der Martenshärte ist in Bild A.2 enthalten.

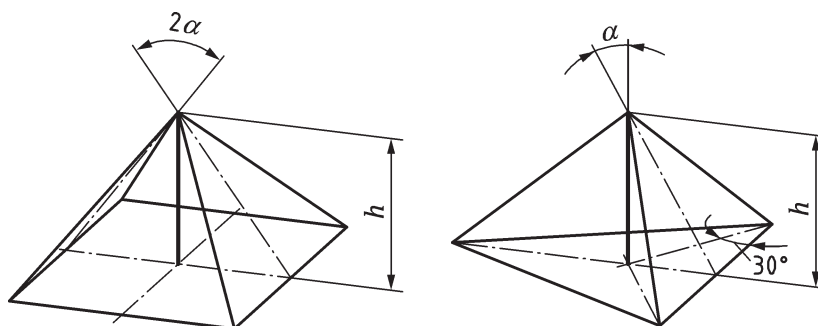
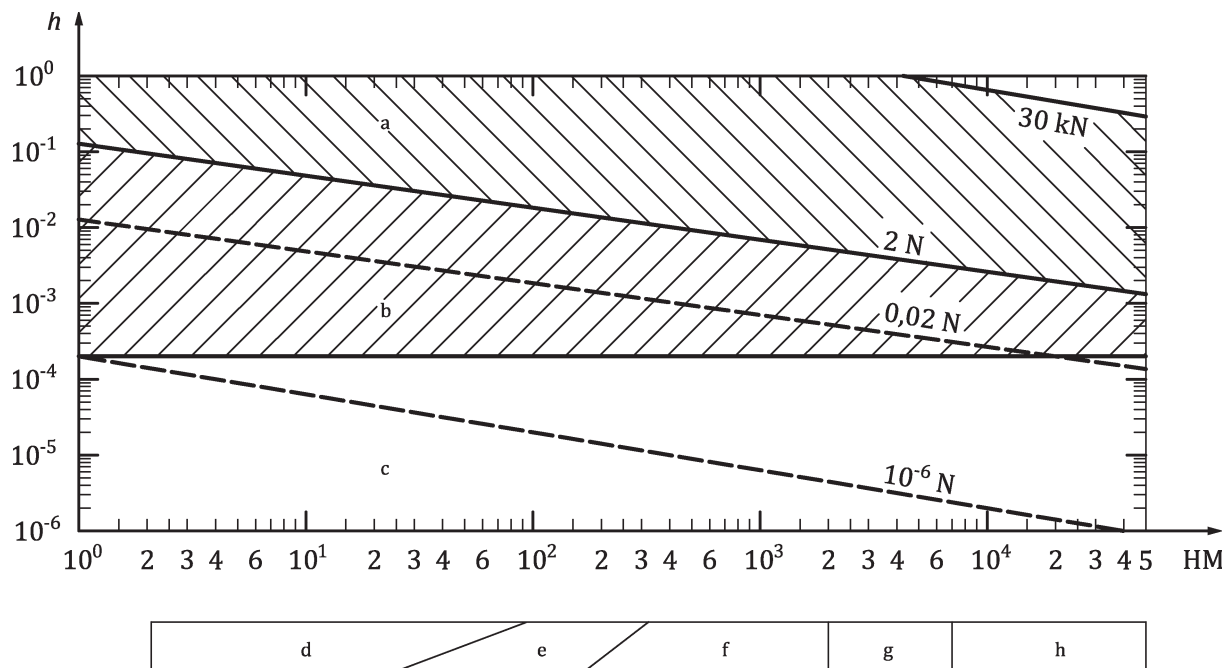


Bild A.1 — Form der Eindringkörper zur Bestimmung von HM



Legende

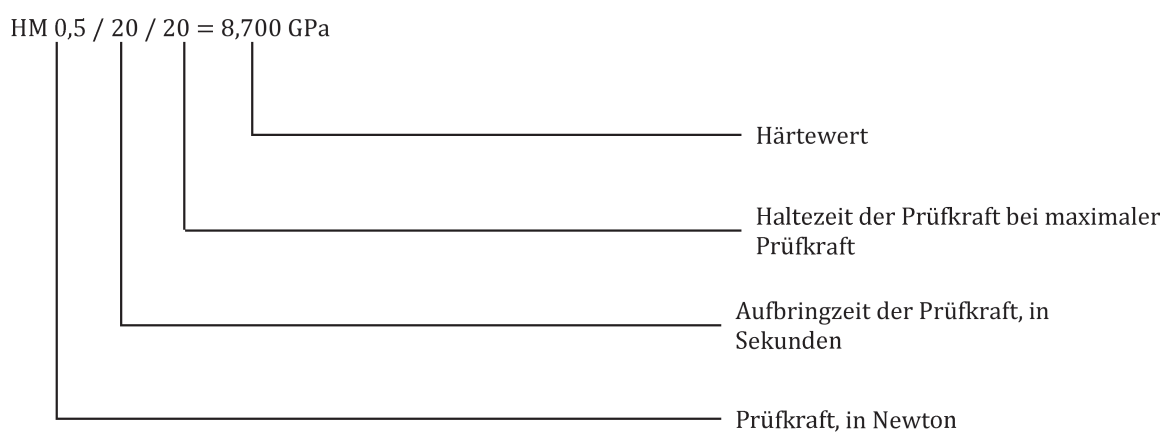
- | | |
|------------------|--------------------------|
| a Makrobereich | e Kunststoffe |
| b Mikrobereich | f Nichteisenmetalle |
| c Nanobereich | g Stahl |
| d Gummi | h Hartmetalle, Keramik |

ANMERKUNG HM ist in Bild A.2 in Megapascal angegeben.

Bild A.2 — Zusammenhang zwischen Martenshärte, Eindringtiefe und Prüfkraft

A.3.2 Bezeichnung der Martenshärte

BEISPIEL



A.4 Martenshärte, bestimmt aus der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve

A.4.1 Bestimmung der Martenshärte aus der Steigung der ansteigenden Kraft-Eindringtiefe-Kurve, HM_s

Bei homogenen Werkstoffen (für die die Maße der Inhomogenitäten im Bereich der Oberfläche klein sind im Verhältnis zur Eindringtiefe) stellt Gleichung (A.4) eine sinnvolle Näherung für die Kraft-/Eindringtiefe-Kurve für die Kraft-Weg-Daten zwischen 50 % $F_{\max}$ und 90 % $F_{\max}$ dar:

$$h = m_s \times \sqrt{F} \quad (A.11)$$

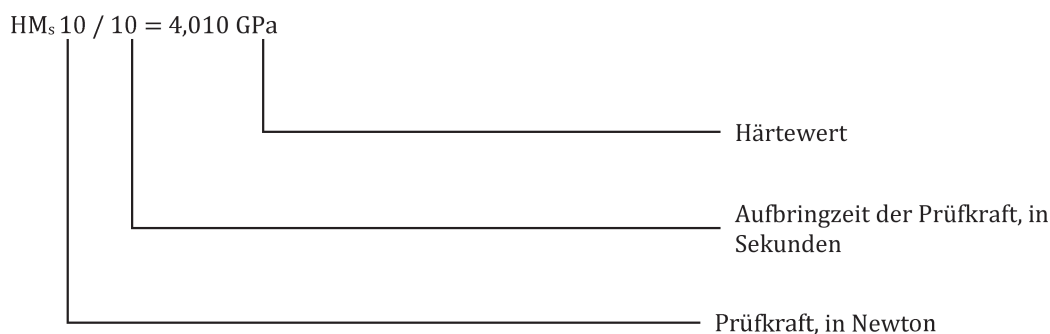
Die Steigung m_s kann durch eine lineare Regression der Gleichung (A.4) im Bereich von 50 % $F_{\max} < F < 90 \% F_{\max}$ bestimmt werden. In diesem Fall ist es möglich, die Härte nach dem modifizierten Verfahren entsprechend Gleichung (A.5) aus der Kraft-/Eindringtiefe-Kurve zu bestimmen:

$$HM_s = \frac{1}{m_s^2 A_s(h) / h^2} \quad (A.12)$$

ANMERKUNG $A_s(h) = 26,43 \times h^2$ für den Vickers-Eindringkörper ($2\alpha = 136^\circ$), $A_s(h) = 26,43 \times h^2$ für den originalen Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,03^\circ$) und $A_s(h) = 26,98 \times h^2$ für den modifizierten Berkovich-Eindringkörper ($\alpha = 65,27^\circ$). $A_s(h)/h^2$ ist daher eine Konstante, wenn eine ideale Spitzenform angenommen werden kann.

A.4.2 Bezeichnung der Martenshärte, HM_s

BEISPIEL



ANMERKUNG Das Verfahren zur Bestimmung der Martenshärte aus der Steigung der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve besitzt den Vorteil, unabhängig von der Unsicherheit der Nullpunktbestimmung und der Rauheit des Probekörpers zu sein. Auch die Schwingungen am Aufstellort der Prüfmaschine haben einen geringeren Einfluss auf die Prüfergebnisse. Bei Probekörpern, die eine Änderung der Härte als Funktion der Eindringtiefe aufweisen, weichen die bestimmten Härtewerte HM_s von den nach A.2.1 bestimmten HM-Werten ab. In diesem Fall kann das Konzept der differentiellen Martenshärte HM_{diff} , wie in A.3.3 beschrieben, angewendet werden.

A.4.3 Bestimmung der Martenshärte aus der ersten Ableitung der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve, HM_{diff}

Das Konzept zur Bestimmung der Martenshärte aus der Steigung der ansteigenden Kraft-/Eindringtiefe-Kurve kann auf Werkstoffe erweitert werden, die eine Änderung der Härte als Funktion der Eindringtiefe zeigen. Ein Werkstoff mit $HM(h) = \text{konstant}$ kann mit einer linearen Regression von h gegen $F^{1/2}$ über einen weiten Bereich der Kraft-/Eindringtiefe-Kurve analysiert werden, um einen einzelnen HM_s -Wert zu erhalten (siehe A.3.1). Wenn sich HM mit h ändert, kann eine schrittweise lineare Regression über kleine Kurvenabschnitte durchgeführt werden. Innerhalb der Grenzen für infinitesimale Schrittweiten wird die erste Ableitung von h gegen $F^{1/2}$ berechnet (lokale Steigung). Gleichung (A.5) kann dann umgeformt werden zu Gleichung (A.6):

$$HM_{\text{diff}} = \frac{1}{\left(\frac{\partial h}{\partial \sqrt{F}}\right)^2 \frac{A_s}{h^2}} \quad (\text{A.13})$$

Dabei ist

A_s/h^2 gleich 26,43 bei Vickers- und originalen Berkovich-Eindringkörpern (siehe Anmerkung 1 in A.2.1)

Es ist bekannt, dass die (numerische) Differentiation das experimentelle Rauschen der Kurven erhöht, und dies muss bei der Berechnung der Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Bei Härteprofilen ist eine Notation wie für HM oder HMs nicht möglich, daher sollte die differenzielle Martenshärte als Diagramm von HM_{diff} gegen h oder HM_{diff} gegen F angegeben werden. Jede Variation von HM_{diff} mit der Tiefe muss im Hinblick auf ein vollständiges Verständnis des Einflusses der Eindruckgröße ausgewertet werden.

A.5 Eindringmodul

A.5.1 Bestimmung des Eindringmoduls E_{IT}

Die Kraftrücknahmekurve wird angepasst und die Kontakttiefe auf die gleiche Weise wie in A.4.1 abgeleitet. Eine erste Abschätzung für den reduzierten Modul wird nach Gleichung (A.14) berechnet. Dieser Wert muss dann bezüglich der radialen Wegverschiebung der Oberfläche nach dem in Anhang I angegebenen Verfahren korrigiert werden, um den Wert von $E_{r,n}$ (dabei ist n die Anzahl der für die Korrektur durchgeführten Iterationen) unter Verwendung des abgeschätzten Werts E_r als anfängliche Abschätzung $E_{r,0}$ zu erhalten. Für weitere Informationen siehe Verweisung [13]. Mit Gleichung (A.15) kann ein Wert für den zweiachsigen Dehnungsmodul E^* berechnet werden. Mit der Poissonzahl des Probekörpers (bekannt oder abgeschätzt) kann der Eindringmodul nach Gleichung (A.16) berechnet werden und ist mit dem Elastizitätsmodul des Werkstoffs vergleichbar. Es können jedoch erhebliche Unterschiede zwischen dem Eindringmodul, dem E_{IT} und dem Elastizitätsmodul auftreten, wenn Aufstau, Einsinken, Verdichtung oder Phasenänderungen während der plastischen Verformung oder Rissbildung vorliegen oder wenn erhebliche anisotrope mechanische Eigenschaften vorliegen.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C_s \sqrt{A_p(h_c)}} \quad (\text{A.14})$$

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_{r,n}} - \frac{1-(\nu_i^2)}{E_i}} = \frac{E_{IT}}{1 - 1 - (\nu_s^2)} \quad (\text{A.15})$$

$$E_{IT} = \frac{1 - (\nu_s)^2}{\frac{1}{E_{r,n}} - \frac{1-(\nu_i)^2}{E_i}} \quad (\text{A.16})$$

Dabei ist

ν_s die Poissonzahl des Probekörpers;

ν_i die Poissonzahl des Eindringkörpers (bei Diamant 0,07) (z. B. in Verweisung [6]);

E_r der reduzierte Modul bei Eindringkontakt;

E_i der Modul des Eindringkörpers (bei Diamant 1 140 GPa) (z. B. in Verweisung [6]);

C_S die Kontaktnachgiebigkeit, d. h. dh/dF der Rücknahmekurve der Prüfkraft (bezüglich der Prüfmaschinennachgiebigkeit korrigiert) ausgewertet bei maximaler Prüfkraft (reziproker Wert der Kontaktsteifheit);

A_p die projizierte Kontaktfläche, der Wert für die Flächenfunktion des Eindringkörpers bei der Kontakttiefe h_c , festgelegt nach ISO 14577-2, 4.6.

Bei $h_c > 6 \mu\text{m}$ gilt Folgendes:

$$\sqrt{A_p} = 4,950 \times h_c \text{ für den Vickers- und den modifizierten Berkovich-Eindringkörper;}$$

$$\sqrt{A_p} = 4,895 \times h_c \text{ für den Berkovich-Eindringkörper.}$$

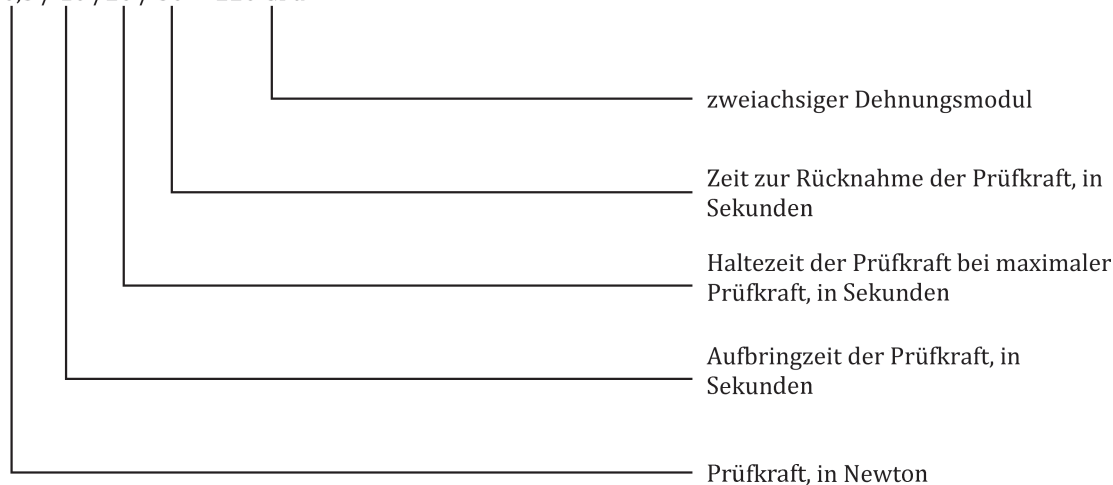
ANMERKUNG Gleichung (A.14) basiert auf der Annahme einer achsensymmetrischen Kontaktfläche. Korrekturen für pyramidale Eindringkörper werden in Verweisung [14] vorgeschlagen.

Es ist ein variables Epsilon ($\varepsilon = 0,72$ bis $0,8$) zu verwenden und eine Korrektur der radialen Wegverschiebung durchzuführen, siehe A.4.1. Das Verfahren zur Abschätzung der radialen Wegkorrektur ist in Anhang I enthalten. Die radiale Wegkorrektur ist für die meisten Metalle sehr gering ($< 0,5 \%$), erreicht jedoch bei hochelastischen Werkstoffen wie z. B. Quarzglas bis zu 5% .

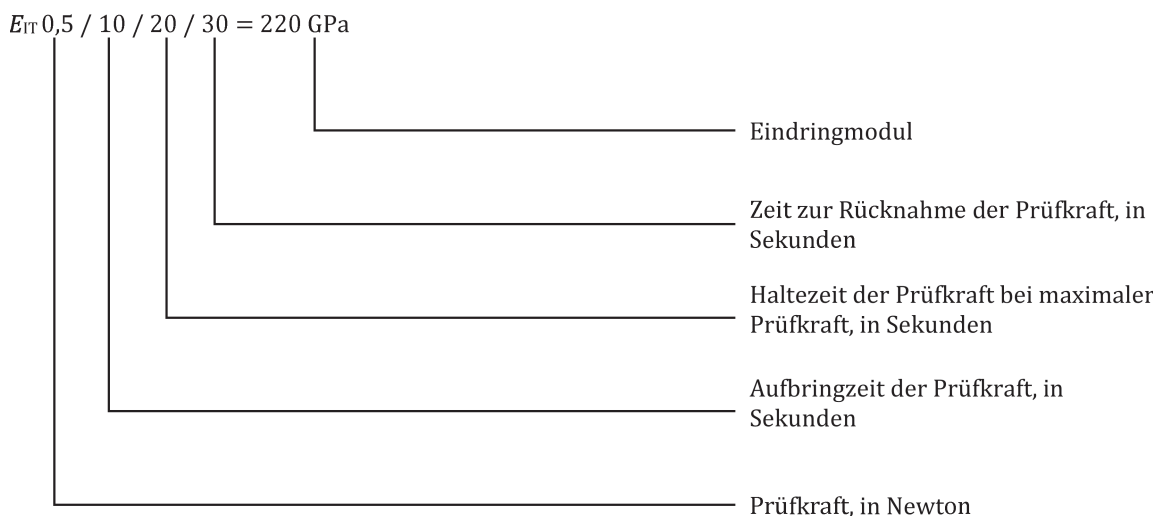
A.5.2 Bezeichnung des zweiachsigen Dehnungsmoduls E^* und des Eindringmoduls E_{IT}

BEISPIEL 1

$$E^* 0,5 / 10 / 20 / 30 = 220 \text{ GPa}$$



BEISPIEL 2



Wenn der Eindringmodul angegeben ist, dann muss der bei der Berechnung verwendete Wert der Poissonzahl angegeben werden.

ANMERKUNG Für einige Werkstoffe wurde ein Zusammenhang zwischen E_{IT} und den tabellierten Werten für den Elastizitätsmodul von Metallen und Metalllegierungen nachgewiesen (siehe Verweisungen [7] und [8])

A.6 Eindringkriechen

A.6.1 Bestimmung des Eindringkriechens C_{IT}

Wenn die Änderung der Eindringtiefe bei konstanter Prüfkraft gemessen wird, kann eine relative Änderung der Eindringtiefe nach Gleichung (A.17) berechnet werden. Dies ist ein Wert für das Kriechen des Werkstoffs [(siehe Bild B.1 a), Bild B.1 b) und Bild A.3)].

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \quad (\text{A.17})$$

Dabei ist

h_1 die Eindringtiefe zum Zeitpunkt (t_1) des Erreichens der Prüfkraft, die konstant gehalten wird;

h_2 die Eindringtiefe zum Zeitpunkt (t_2), an dem die konstante Prüfkraft gehalten wird.

Da Kriechdaten durch thermische Drift wesentlich beeinflusst werden können, sollte die thermische Drift berücksichtigt und korrigiert werden.

ANMERKUNG 1 Bei der Anwendung von Gleichung (A.17) wird C_{IT} als Prozentanteil angegeben.

ANMERKUNG 2 Die C_{IT} -Ergebnisse können nur für dasselbe Lastprofil verglichen werden, da sie lastpfadabhängig sind.

A.6.2 Bezeichnung des Eindringkriechens C_{IT}

Die relative Änderung der Eindringtiefe (Kriechen) wird mit dem Symbol C_{IT} bezeichnet.

BEISPIEL

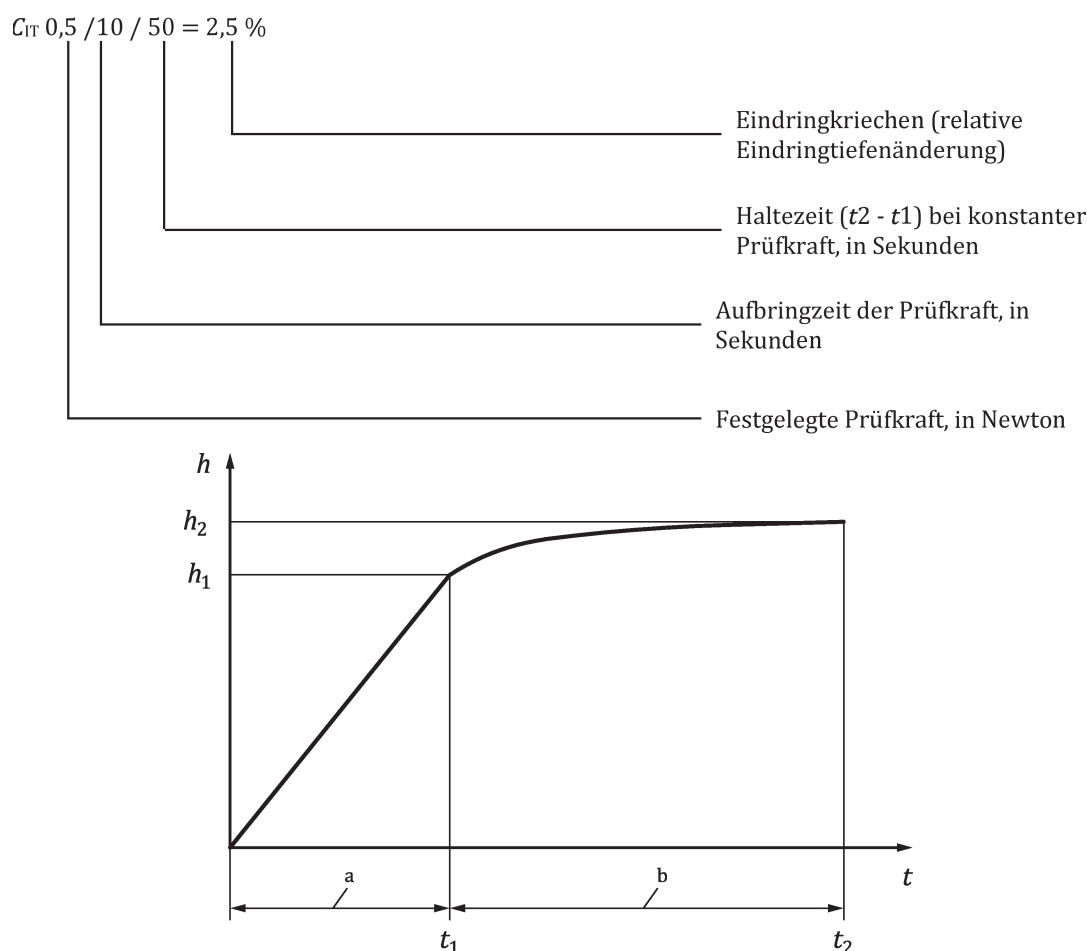


Bild A.3 — Ausdruck für das Eindringkriechen

A.7 Eindringrelaxation

A.7.1 Bestimmung der Eindringrelaxation R_{IT}

Wenn die Änderung der Prüfkraft bei einer konstanten Eindringtiefe gemessen wird, kann eine relative Änderung der Prüfkraft nach Gleichung (A.18) berechnet werden. Dies ist ein Wert für die Relaxation des Werkstoffs [(siehe Bild B.2 a), Bild B.2 b) und Bild A.4)].

$$R_{IT} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \times 100 \quad (A.18)$$

Dabei ist

F_1 die Kraft beim Erreichen der Eindringtiefe, die konstant gehalten wurde;

F_2 die Kraft nach der Zeit, in der die Eindringtiefe konstant gehalten wurde.

ANMERKUNG 1 Nach Gleichung (A.18) ist R_{IT} als Prozentanteil angegeben.