

DIN EN ISO 4545-1



ICS 77.040.10

Einsprüche bis 2022-09-08
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 4545-1:2019-09

Entwurf

**Metallische Werkstoffe –
Härteprüfung nach Knoop –
Teil 1: Prüfverfahren (ISO/DIS 4545-1:2022);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 4545-1:2022**

Metallic materials –
Knoop hardness test –
Part 1: Test method (ISO/DIS 4545-1:2022);
German and English version prEN ISO 4545-1:2022

Matériaux métalliques –
Essai de dureté Knoop –
Partie 1: Méthode d'essai (ISO/DIS 4545-1:2022);
Version allemande et anglaise prEN ISO 4545-1:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-07-08 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

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

Gesamtumfang 68 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 4545-1:2022) 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 (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.

DIN EN ISO 4545 besteht unter dem allgemeinen Titel *Metallische Werkstoffe — Härteprüfung nach Knoop* aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Prüfverfahren
- Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen
- Teil 3: Kalibrierung von Härtevergleichsplatten
- Teil 4: Tabelle zur Bestimmung der Härtewerte

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

ISO 1463	siehe	DIN EN ISO 1463
ISO 4545-2:2017	siehe	DIN ISO 4545-2:2018
ISO 4545-3:2017	siehe	DIN ISO 4545-3:2018
ISO 4545-4:2017	siehe	DIN ISO 4545-4:2018
ISO 14577-1	siehe	DIN EN ISO 14577-1
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
ISO 18265	siehe	DIN EN ISO 18265

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 4545-1:2019-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Anwendungsbereich wurde überarbeitet und umfasst nun die Prüfung von metallischen und anderen anorganischen Schichten;
- b) 7.5, Metallische und andere anorganische Schichten, wurde hinzugefügt;
- c) Anhang F wurde hinzugefügt, um die spezifischen Anforderungen an Schichten abzudecken und ISO 4516 zu ersetzen;
- d) Aktualisierung der Verweisungen im gesamten Dokument.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 1463, *Metall- und Oxidschichten — Schichtdickenmessung — Mikroskopisches Verfahren*

DIN EN ISO 14577-1, *Metallische Werkstoffe — Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter — Teil 1: Prüfverfahren*

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*

DIN EN ISO 18265, *Metallische Werkstoffe — Umwertung von Härtewerten*

DIN ISO 4545-2:2018, *Metallische Werkstoffe — Härteprüfung nach Knoop — Teil 2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen (ISO 4545-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 4545-2:2018*

DIN ISO 4545-3:2018, *Metallische Werkstoffe — Härteprüfung nach Knoop — Teil 3: Kalibrierung von Härtevergleichsplatten (ISO 4545-3:2017); Deutsche Fassung EN ISO 4545-3:2018*

DIN ISO 4545-4:2018, *Metallische Werkstoffe — Härteprüfung nach Knoop — Teil 4: Tabelle zur Bestimmung der Härtewerte (ISO 4545-4:2017); Deutsche Fassung EN ISO 4545-4:2018*

– *Entwurf* –

E DIN EN ISO 4545-1:2022-08

– Leerseite –

**Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Knoop – Teil 1: Prüfverfahren
(ISO/DIS 4545-1:2022)**

Metallic materials – Knoop hardness test – Part 1: Test method (ISO/DIS 4545-1:2022)

Matériaux métalliques – Essai de dureté Knoop – Partie 1: Méthode d'essai (ISO/DIS 4545-1:2022)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Kurzbeschreibung	6
5 Symbole und Bezeichnungen	7
5.1 Symbole und Bezeichnungen, die in diesem Dokument verwendet werden	7
5.2 Bezeichnung des Härtewerts	8
6 Prüfmaschine	8
6.1 Prüfmaschine	8
6.2 Eindringkörper	8
6.3 Diagonalenmesssystem	8
7 Probe	9
7.1 Prüffläche	9
7.2 Vorbereitung	9
7.3 Dicke	9
7.4 Aufnahmevorrichtung von instabilen Prüfstücken	9
7.5 Metallische und andere anorganische Schichten	10
8 Durchführung	10
8.1 Prüftemperatur	10
8.2 Prüfkraft	10
8.3 Regelmäßige Überprüfung	10
8.4 Probenaufnahme	11
8.5 Fokus auf die Prüfoberfläche	11
8.6 Aufbringung der Prüfkraft	11
8.7 Verhinderung von Stößen und Erschütterungen	11
8.8 Mindestabstand zwischen nebeneinanderliegenden Prüfeindrücken	11
8.9 Messung der Diagonalenlänge	12
8.10 Berechnung der Härtewerte	12
9 Unsicherheit der Ergebnisse	12
10 Prüfbericht	13
Anhang A (normativ) Verfahren für die periodische Prüfung der Prüfmaschine, des Diagonalenmesssystems und des Eindruckkörpers durch den Anwender	14
A.1 Regelmäßige Überprüfung	14
A.2 Inspektion des Eindringkörpers	15
Anhang B (informativ) Unsicherheit der gemessenen Härtewerte	16
B.1 Allgemeine Anforderungen	16
B.2 Allgemeines Verfahren	16
B.3 Verfahren zur Berechnung der Unsicherheit — Härtemesswerte	17
B.3.1 Verfahren mit systematischer Messabweichung (Methode M1)	17
B.3.2 Verfahren ohne systematische Abweichung (Methode M2)	18
B.4 Angabe des Messergebnisses	19
Anhang C (informativ) Rückführbarkeit der Messung der Knoop-Härte	23
C.1 Rückführbarkeitsdefinition	23
C.2 Kette von Kalibrierungen	23
C.3 Bezugsgröße für die Knoop-Härte	24
C.4 Praktische Gesichtspunkte	24
C.5 Rückführbarkeit der Messung der Knoop-Härte	25
C.5.1 Allgemeines	25
C.5.2 Rückführbarkeit der Kalibrierstufe	25

C.5.3	Rückführbarkeit der Anwenderstufe	25
Anhang D	(informativ) CCM-Arbeitsgruppe zur Härte	27
Anhang E	(informativ) Einstellung des Köhler'schen Beleuchtungssystems	28
E.1	Allgemeines	28
E.2	Köhler'sche Beleuchtung	28
Anhang F	(normativ) Bestimmung der Knoop-Härte von metallischen und anderen anorganischen Überzügen	29
F.1	Allgemeines	29
F.2	Probe	29
F.2.1	Oberflächenrauheit	29
F.2.2	Messung der Schichtdicke	29
F.2.3	Probe für Messungen an Querschnitten	30
F.2.4	Vergleichsproben	30
F.3	Durchführung	30
F.3.1	Prüftemperatur	30
F.3.2	Ausrichtung der Prüffläche	30
F.3.3	Lage des Eindrucks	30
F.3.4	Ausrichtung und Abstand des Eindrucks bei der Messung eines Schichtquerschnitts	30
F.3.5	Vermeidung von Erschütterungen	31
F.3.6	Auswahl der Prüfkraft	31
F.3.7	Vergleichsmessungen	32
F.3.8	Berechnung der Härte	32
F.3.9	Spröde Werkstoffe	32
F.4	Prüfbericht	32
Literaturhinweise		34

Bilder

Bild 1	— Prüfprinzip und Eindringkörpergeometrie	7
Bild 2	— Knoop-Eindruck	7
Bild 3	— Mindestabstand für Knoop-Eindrücke	12
Bild C.1	— Kalibrierketten	24
Bild F.1	— Beziehung zwischen Mindestschichtdicke, Prüfkraft und Härte bei Prüfung senkrecht zur Schichtoberfläche	31

Tabellen

Tabelle 1	— Symbole und Abkürzungen	7
Tabelle 2	— Auflösung des Messsystems	9
Tabelle 3	— Typische Prüfkraften	10
Tabelle A.1	— Maximal zulässige prozentuale Abweichung	14
Tabelle B.1	— Bestimmung der erweiterten Unsicherheit nach den Methoden M1 und M2	21

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 4545-1:2022) 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 4545-1:2018 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 4545-1:2022 wurde von CEN als prEN ISO 4545-1:2022 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

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.

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-Direktiven, 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-Direktiven, 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.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 164, *Mechanical testing of metals*, Unterkomitee SC 3, *Hardness testing* erarbeitet.

Diese dritte Ausgabe ersetzt die zweite Ausgabe (ISO 4545-1:2017), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

- der Anwendungsbereich wurde überarbeitet und umfasst nun die Prüfung von metallischen und anderen anorganischen Schichten;
- 7.5, Metallische und andere anorganische Schichten, wurde hinzugefügt;
- Anhang F wurde hinzugefügt, um die spezifischen Anforderungen an Schichten abzudecken und ISO 4516 zu ersetzen;
- Aktualisierung der Verweisungen im gesamten Dokument.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 4545 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt das Verfahren für die Härteprüfung nach Knoop an metallischen Werkstoffen für Prüfkraften von 0,009 807 N bis 19,613 N fest.

In diesem Dokument ist die Härteprüfung nach Knoop festgelegt für die lange Diagonale $\geq 0,020$ mm. Die Verwendung dieses Verfahrens zur Bestimmung der Knoop-Härte für kleinere Eindrücke gehört nicht zum Anwendungsbereich dieses Dokuments, weil die Resultate aufgrund von Grenzen der optischen Messung und Unvollkommenheiten der Geometrie der Spitze mit großer Unsicherheit behaftet wären. Die in diesem Dokument festgelegte Härteprüfung nach Knoop ist auch für metallische und andere anorganische Schichten anwendbar. ISO 14577-1 erlaubt die Härte-Bestimmung von kleineren Eindrücken.

Ein Verfahren zur regelmäßigen Überprüfung ist angegeben zur laufenden Kontrolle der Prüfmaschine in Betrieb durch den Anwender.

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 4545-2:2017, *Metallic materials — Knoop hardness test — Part 2: Verification and calibration of testing machines*

ISO 4545-3:2017, *Metallic materials — Knoop hardness test — Part 3: Calibration of reference blocks*

ISO 4545-4:2017, *Metallic materials — Knoop hardness test — Part 4: Table of hardness values*

3 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

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

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

4 Kurzbeschreibung

Ein Diamant-Eindringkörper in Form einer Pyramide mit rhombischer Grundfläche mit festgelegten Winkeln α ($172,5^\circ$) und β (130°) zwischen einander gegenüberliegenden Kanten wird in die Oberfläche einer Probe eingedrückt, und die lange Diagonale d des Eindruckes, der nach Rücknahme der Prüfkraft F auf der Prüffläche verbleibt, wird gemessen (siehe Bild 1 und Bild 2).

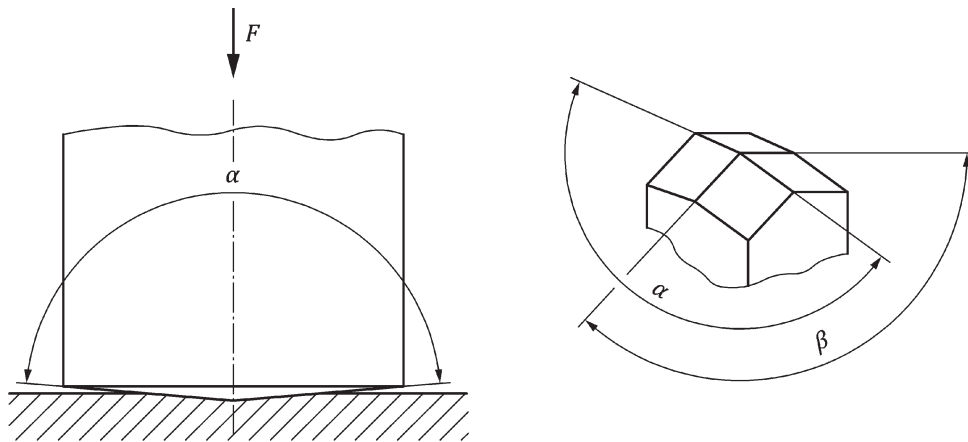


Bild 1 — Prüfprinzip und Eindringkörpergeometrie

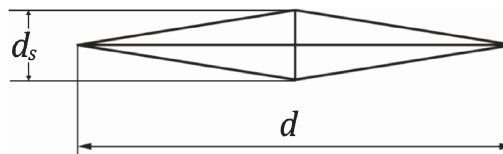


Bild 2 — Knoop-Eindruck

Die Knoop-Härte ist proportional zum Quotienten aus der Prüfkraft und der Projektionsfläche des Eindrucks, der als Pyramide mit rhombischer Grundfläche und gleichen Winkeln wie beim Eindringkörper angenommen wird.

ANMERKUNG Dieses Prüfdokument hat alle benutzten Härteprüfungsparameter, wie jeweils anwendbar, so übernommen, wie sie von der CCM-Arbeitsgruppe zur Härte (CCM-WGH, en: Consultative Committee for Mass and Related Quantities – Working Group on Hardness) unter dem Rahmenwerk des Internationalen Komitees für Gewichte und Maße (CIPM, fr: Comité international des poids et mesures), Beratungsausschuss für Masse und verwandte Größen (CCM) (siehe Anhang D) definiert wurden.

5 Symbole und Bezeichnungen

5.1 Symbole und Bezeichnungen, die in diesem Dokument verwendet werden

Siehe Tabelle 1 und Bild 1 und Bild 2.

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen

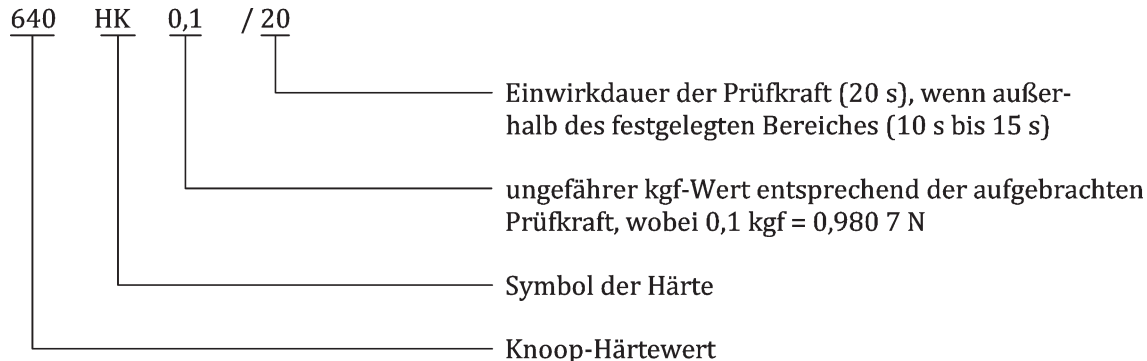
Symbol	Bezeichnung
F	Prüfkraft, in Newton (N)
d	Länge der langen Diagonale, in Millimeter
d_s	Länge der kurzen Diagonale, in Millimeter
α	Winkel zwischen den gegenüberliegenden Kanten der langen Diagonale der Diamantpyramide (nominal 172,5°) (siehe Bild 1)
β	Winkel zwischen den gegenüberliegenden Kanten der kurzen Diagonale der Diamantpyramide (nominal 130°) (siehe Bild 1)
V	Vergrößerung des Messsystems

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bezeichnung
c	Eindringkörper-Konstante, die die projizierte Fläche des Eindrucks zum Quadrat der langen Diagonalenlänge ins Verhältnis setzt Eindringkörper-Konstante $c = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}$ für die nominalen Winkel α und β ist c etwa 0,070 28
HK	Knoop-Härte $= \frac{\text{Pr üfkraft (kgf)}}{\text{projizierte Fläche des Eindrucks (mm}^2\text{)}}$ $= \frac{1}{g_n} \times \frac{\text{Pr üfkraft (N)}}{\text{projizierte Fläche des Eindrucks (mm}^2\text{)}}$ $= \frac{1}{g_n} \times \frac{F}{cd^2}$ Für die nominale Indenterkonstante $c \approx 0,070\ 28$ ist die Knoop-Härte $\approx 1,451 \times \frac{F}{d^2}$
ANMERKUNG Normalbeschleunigung aufgrund der Schwerkraft $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$, was der Umrechnungsfaktor von kgf in Newton ist. Zur Verminderung der Unsicherheit kann die Knoop-Härte mit den nominalen Eindruckswinkeln α und β berechnet werden.	

5.2 Bezeichnung des Härtewerts

Im Folgenden ist ein Beispiel für die Bezeichnung für die Knoop-Härte HK angegeben.



6 Prüfmaschine

6.1 Prüfmaschine

Die Prüfmaschine muss in der Lage sein, eine vorgegebene Prüfkraft, oder vorgegebene Prüfkraften innerhalb des gewünschten Prüfkraftbereichs nach ISO 4545-2 aufzubringen.

6.2 Eindringkörper

Der Eindringkörper muss ein Diamant in Form einer Pyramide mit rhombischer Grundfläche nach ISO 4545-2 sein.

6.3 Diagonalenmesssystem

Das Diagonalenmesssystem muss die in ISO 4545-2 getroffenen Festlegungen erfüllen.

Vergrößerungen sollten zur Verfügung stehen, so dass die Diagonale auf mehr als 25 %, jedoch weniger als 75 % des größtmöglichen optischen Sichtfeldes vergrößert werden kann. Viele Objektivlinsen sind zum Rand des Sichtfeldes hin nichtlinear.

ANMERKUNG Ein Diagonalenmesssystem, bei dem zur Messung eine Kamera eingesetzt wird, kann 100 % des Sichtfeldes der Kamera nutzen, sofern es dazu ausgelegt ist, die Sichtfeldbeschränkungen des optischen Systems zu berücksichtigen.

Die für das Diagonalenmesssystem erforderliche Auflösung hängt von der Größe des kleinsten zu messenden Eindrucks ab und muss Tabelle 2 entsprechen. Bei der Festlegung der Auflösung des Messsystems sollten die Auflösung des Mikroskops, die digitale Auflösung der Messskala und der Spielraum des Objektisches, falls anwendbar, mit einbezogen werden.

Tabelle 2 — Auflösung des Messsystems

Diagonalenlänge d mm	Auflösung des Messsystems
$0,020 \leq d < 0,080$	0,000 4 mm
$0,080 \leq d$	0,5 % von d

7 Probe

7.1 Prüffläche

Die Prüfung ist an einer polierten, glatten und ebenen Oberfläche vorzunehmen, die frei von Zunder und Fremdkörpern sowie insbesondere frei von Schmierstoffen sein muss, wenn in Produktnormen nicht anders festgelegt. Die Probe muss eine Oberflächenbearbeitung aufweisen, die eine exakte Längenbestimmung der Eindruckdiagonalen gestattet.

7.2 Vorbereitung

Die Oberflächenvorbereitung muss so durchgeführt werden, dass eine Oberflächenbeschädigung oder eine Änderung der Oberflächenhärte durch starke Erwärmung oder Kaltverformung verhindert wird.

Wegen der geringen Eindringtiefen der Eindrücke bei der Knoop-Härteprüfung ist es äußerst wichtig, bei der Probenpräparation besondere Vorkehrungen zu treffen. Es wird empfohlen, ein Polier-/Elektropolierverfahren anzuwenden, das für die Werkstoffeigenschaften des zu prüfenden Werkstoffes angepasst ist.

7.3 Dicke

Die Dicke der Probe oder der zu prüfenden Schicht muss mindestens 1/3 der Länge der langen Diagonallänge des Eindrucks betragen. Nach der Prüfung dürfen auf der Auflagefläche der Probe keine Verformungen sichtbar sein.

ANMERKUNG Die Tiefe des Eindrucks beträgt etwa 1/30 der langen Diagonallänge ($0,033 d$).

7.4 Aufnahmevorrichtung von instabilen Prüfstücken

Bei Proben mit kleinem Querschnitt oder von unregelmäßiger Form sollte entweder ein spezieller Träger verwendet werden oder sie sollten in ähnlicher Weise wie ein metallographischer Mikroabschnitt in einem geeigneten Material montiert werden, so dass er angemessen unterstützt ist und sich nicht durch Kraftaufbringung verschieben kann.

7.5 Metallische und andere anorganische Schichten

Anhang F legt zusätzliche Verfahren und Anforderungen für die Bestimmung der Knoop-Härte von metallischen und anderen anorganischen Schichten fest.

8 Durchführung

8.1 Prüftemperatur

Die Prüfung wird üblicherweise bei einer Umgebungstemperatur innerhalb eines Bereiches von 10 °C bis 35 °C durchgeführt. Wird die Prüfung bei einer außerhalb dieses Bereiches liegenden Temperatur durchgeführt, muss dies im Prüfbericht angegeben werden. Prüfungen, die unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden, müssen bei einer Temperatur von (23 ± 5) °C durchgeführt werden.

8.2 Prüfkraft

Die in Tabelle 3 angegebenen Prüfkraften sind üblich. Andere Prüfkraften dürfen ebenfalls angewendet werden. Prüfkraften müssen so gewählt werden, dass die Länge der längeren Diagonale der Eindrücke mindestens 0,020 mm beträgt.

Tabelle 3 — Typische Prüfkraften

Härteskala	Nennwert der Prüfkraft F	
	N	Entsprechender annähernder kgf^a-Wert
HK 0,001	0,009 807	0,001
HK 0,002	0,019 61	0,002
HK 0,005	0,049 03	0,005
HK 0,01	0,098 07	0,010
HK 0,02	0,196 1	0,020
HK 0,025	0,245 2	0,025
HK 0,05	0,490 3	0,050
HK 0,1	0,980 7	0,100
HK 0,2	1,961	0,200
HK 0,3	2,942	0,300
HK 0,5	4,903	0,500
HK 1	9,807	1,000
HK 2	19,613	2,000
^a Keine SI-Einheit.		

8.3 Regelmäßige Überprüfung

Die in Anhang A definierte regelmäßige Überprüfung muss innerhalb einer Woche vor der Benutzung für jede angewendete Prüfkraft durchgeführt werden, wird jedoch am Tag der Benutzung empfohlen. Bei jedem Wechsel der Prüfkraft wird eine regelmäßige Überprüfung empfohlen. Die regelmäßige Überprüfung muss immer dann durchgeführt werden, wenn der Eindringkörper ausgetauscht wird.

8.4 Probenaufnahme

Die Probe muss auf einer starren Aufnahmevorrichtung liegen. Die Auflageoberflächen dieser Vorrichtung müssen sauber und frei von Fremdkörpern (Zunder, Öl, Schmutz usw.) sein. Es ist wichtig, dass die Probe fest auf der Aufnahmevorrichtung liegt, so dass jegliche Verschiebung, die das Prüfergebnis beeinflusst, während des Prüfvorgangs nicht auftreten kann.

8.5 Fokus auf die Prüfoberfläche

Das Mikroskop des Diagonalenmesssystems muss so eingestellt werden, dass die Oberfläche der Probe und der gewünschte Prüfstandort betrachtet werden können.

ANMERKUNG Bei einigen Prüfgeräten ist es nicht erforderlich, dass der Fokus des Mikroskops auf die Probenoberfläche eingestellt ist.

8.6 Aufbringung der Prüfkraft

Der Eindringkörper muss auf die Prüffläche aufgesetzt werden, und die Prüfkraft muss stoß- und erschütterungsfrei bzw. ohne Überlastung senkrecht zur Oberfläche aufgebracht werden, bis die aufgebrachte Kraft den festgelegten Wert erreicht hat. Die Zeit vom Beginn der Kraftaufbringung bis zum Erreichen der vollen Prüfkraft muss 7_{-5}^{+1} s betragen.

ANMERKUNG 1 Die Anforderungen an die Zeitdauer sind mit asymmetrischen Grenzwerten angegeben. Zum Beispiel bedeutet 7_{-5}^{+1} s, dass 7 s die Nennaufbringdauer ist, deren annehmbarer Bereich nicht weniger als 2 s (berechnet als $7\text{ s} - 5\text{ s}$) bis nicht mehr als 8 s (berechnet als $7\text{ s} + 1\text{ s}$) ist.

Der Eindringkörper muss mit einer Geschwindigkeit $\leq 0,070\text{ mm/s}$ auf die Probe aufsetzen.

Die Einwirkdauer der Prüfkraft muss 14_{-4}^{+1} s betragen, ausgenommen davon sind jedoch Prüfungen auf Werkstoffen, bei denen dieser Bereich aufgrund der zeitabhängigen Eigenschaften der Werkstoffe ungeeignet ist. Bei diesen Prüfungen muss die Einwirkdauer als Teil der Härtebezeichnung (siehe 5.2) angegeben werden.

ANMERKUNG 2 Es ist bewiesen, dass einige Materialien empfindlich auf die Rate der Beanspruchung reagieren, woraus eine Änderung der Streckgrenze resultiert. Bezogen auf die Eindruckbildung kann dieses Werkstoffverhalten zu Änderungen des Härtewertes führen.

8.7 Verhinderung von Stößen und Erschütterungen

Während der gesamten Prüfung muss die Prüfeinrichtung vor Stößen und Erschütterungen geschützt sein [1].

8.8 Mindestabstand zwischen nebeneinanderliegenden Prüfeindrücken

Der Mindestabstand zwischen nebeneinanderliegenden Eindrücken und der Mindestabstand zwischen einem Eindruck und der Kante der Probe werden in Bild 3 gezeigt.

Der Mindestabstand zwischen der Kante der Probe und dem Zentrum von jedem parallel zur Kante der Probe liegenden Eindruck muss mindestens das 3,5-Fache der kurzen Diagonalenlänge des Eindrucks betragen. Der Mindestabstand zwischen der Kante der Probe und dem Zentrum von jedem senkrecht zur Kante der Probe liegenden Eindruck muss mindestens gleich der langen Diagonalenlänge des Eindrucks sein.

Der Mindestabstand zwischen den Zentren zweier benachbarter, nebeneinanderliegender Prüfeindrücke muss mindestens das 3,5-Fache der kurzen Diagonalenlänge betragen. Für hintereinanderliegende Prüfeindrücke muss der Mindestabstand zwischen den Zentren zweier nebeneinanderliegender Eindrücke mindestens das 2-Fache der langen Diagonalenlänge betragen. Wenn zwei Prüfeindrücke sich in ihrer Größe unterscheiden, muss sich der Mindestabstand auf die Diagonalenlänge des größeren Prüfeindrucks beziehen.

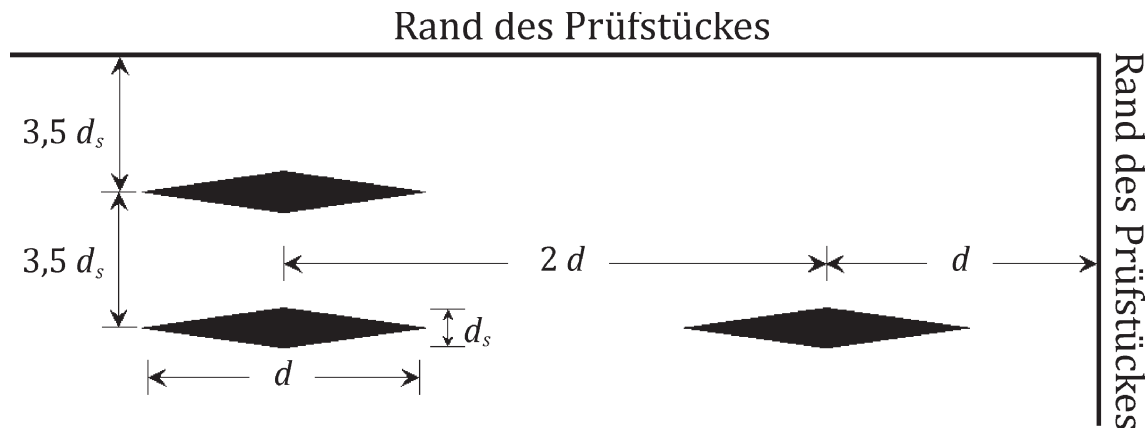


Bild 3 — Mindestabstand für Knoop-Eindrücke

8.9 Messung der Diagonalenlänge

Die Länge der langen Diagonale muss gemessen werden und muss für die Berechnung der Knoop-Härte verwendet werden. Für sämtliche Prüfungen muss der Umfang des Eindrucks im Sichtfeld des Mikroskops deutlich erkennbar sein.

Vergrößerungen sollten so gewählt werden, dass die Diagonale auf mehr als 25 %, aber auf weniger als 75 % des größtmöglichen optischen Sichtfeldes vergrößert werden kann (siehe 6.3).

ANMERKUNG 1 Eine Verringerung der Prüfkraft führt im Allgemeinen zu einer erhöhten Streuung bei den Messergebnissen. Die Messunsicherheit für die lange Diagonale ist wahrscheinlich nicht kleiner als $\pm 0,001$ mm.

ANMERKUNG 2 Ein hilfreiches Verfahren zum Justieren von optischen Systemen mit Köhlerscher Beleuchtung wird in Anhang E gegeben.

Wenn die Form der Einbuchtung unsymmetrisch erscheint, wird die lange Diagonale in zwei Segmente am Schnittpunkt mit der kurzen Diagonale geteilt und die Länge jedes Segments gemessen. Wenn die Differenz der Längen der beiden Segmente um mehr als 5 % von der Länge der langen Diagonalen abweicht, ist die Parallelität zwischen der Probenauflagefläche und der Messfläche und letztendlich die Ausrichtung des Eindringkörpers gegenüber der Probe zu prüfen. Prüfergebnisse mit Abweichungen größer 5 % sollten verworfen werden.

Diese Norm ist nicht anwendbar für Eindrücke mit Diagonallängen $\leq 0,020$ mm. Härtemessungen, die kleinere Eindrücke erfordern, können nach ISO 14577-1, ISO 14577-2 und ISO 14577-3 durchgeführt werden (siehe Verweisungen [2] bis [4]).

8.10 Berechnung der Härtewerte

Die Werte für die Knoop-Härte werden nach der in Tabelle 1 angegebenen Gleichung berechnet. Der Knoop-Härtewert kann auch mit den Berechnungstabellen nach ISO 4545-4 ermittelt werden.

9 Unsicherheit der Ergebnisse

Es sollte eine vollständige Bewertung der Unsicherheit nach JCGM 100:2008 [5] durchgeführt werden.

Unabhängig vom Typ der Quellen bestehen bei der Härtemessung zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Unsicherheit:

- Die eine Möglichkeit beruht auf der Bewertung aller relevanten Quellen, die bei einer direkten Kalibrierung auftreten. Hierzu steht eine EA-Richtlinie (Euramet-Richtlinie) [6] zur Verfügung.

- Die andere Möglichkeit beruht auf der indirekten Kalibrierung mit einer Härtevergleichsplatte (en: certified reference material, CRM) (siehe Literaturhinweise [6] bis [9]). Eine Anleitung zur Bestimmung ist in Anhang B angegeben.

Es ist nicht immer möglich, alle festgestellten Aspekte zu quantifizieren, die zur Unsicherheit beitragen. In diesem Fall kann sich aus der statistischen Analyse wiederholter Eindrücke an der Probe ein Schätzwert für eine Standardunsicherheit vom Typ A ergeben. Bei der Addition der Standardunsicherheiten vom Typ A und Typ B sollte darauf geachtet werden, dass die Beiträge nicht zweifach berücksichtigt werden (siehe JCGM 100:2008, Abschnitt 4).

10 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Informationen beinhalten, sofern nicht von den Parteien anders vereinbart:

- a) Verweisung auf dieses Dokument, d. h. ISO 4545-1;
- b) alle Angaben, die für die Identifizierung der Probe erforderlich sind;
- c) das Datum der Prüfung;
- d) das in HK erhaltende Härteergebnis, in dem in 5.2 definierten Format;
- e) alle Arbeitsgänge, die nicht in diesem Dokument festgelegt sind oder die als optional anwendbar betrachtet werden;
- f) Einzelheiten zu allen Umständen, die die Messergebnisse beeinflusst haben;
- g) die Prüftemperatur, wenn sie außerhalb des in 8.1 festgelegten Bereiches der Umgebungstemperatur liegt;
- h) wenn eine Umwertung in eine andere Härteskala durchgeführt wurde, die Grundlage und die Methode dieser Umwandlung.

Es gibt kein allgemein gültiges Verfahren für die genaue Umwertung der Knoop-Härte in Härtewerte anderer Härteprüfverfahren oder in die Zugfestigkeit. Umwertungen sollten daher vermieden werden, wenn keine verlässliche Grundlage für die Umwertung durch Vergleichsprüfungen vorhanden ist (siehe auch ISO 18265).

ANMERKUNG Ein exakter Vergleich von Härtewerten ist nur möglich, wenn gleiche Prüfkkräfte angewendet werden.

Anhang A (normativ)

Verfahren für die periodische Prüfung der Prüfmaschine, des Diagonalenmesssystems und des Eindruckkörpers durch den Anwender

A.1 Regelmäßige Überprüfung

Der für die regelmäßige Überprüfung zu verwendende Eindringkörper muss derselbe Eindringkörper sein, der auch für die Prüfung verwendet wird. Für die Prüfung ist eine Härtevergleichsplatte zu wählen, die nach ISO 4545-3 in der Größenordnung und für einen ungefähren Härtegrad, bei dem die Maschine verwendet wird, kalibriert ist.

Vor der regelmäßigen Überprüfung muss das Diagonalenmesssystem indirekt unter Nutzung eines Referenzeindrucks auf der Härtevergleichsplatte überprüft werden. Die Messwerte müssen mit dem zertifizierten Wert auf 0,001 mm oder 1,25 % der Eindrucklänge, übereinstimmen, wobei der größere Wert gilt. Wenn das Diagonalenmesssystem diese Prüfung nicht besteht, darf ein zweiter Referenzeindruck gemessen werden. Besteht das Diagonalenmesssystem diese Prüfung zum zweiten Mal nicht, muss es eingestellt oder instand gesetzt und einer direkten oder indirekten Überprüfung nach ISO 4545-2 unterzogen werden.

Mindestens zwei Härtemessungen sind auf der kalibrierten Oberfläche der Härtevergleichsplatte vorzunehmen. Die Eindrücke müssen gleichmäßig über die Oberfläche der Härtevergleichsplatte verteilt sein. Die Maschine gilt als zufriedenstellend, wenn die maximale positive oder negative systematische Abweichung b_{rel} , in Prozent, für jeden abgelesenen Wert die in Tabelle A.1 angegebenen Grenzen nicht überschreitet.

Die systematische Abweichung b_{rel} wird durch Gleichung (A.1) berechnet:

$$b_{\text{rel}} = 100 \times \frac{H - H_{\text{CRM}}}{H_{\text{CRM}}} \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist

H der dem abgelesenen Härtewert entsprechende Härtewert;

H_{CRM} die zertifizierte Härte der verwendeten Härtevergleichsplatte.

Wenn die Prüfmaschine diese Prüfung nicht besteht, ist zu überprüfen, ob der Eindringkörper und die Maschine in betriebsstüchtigem Zustand sind, und die regelmäßige Überprüfung ist zu wiederholen. Besteht die Maschine die regelmäßige Überprüfung weiterhin nicht, muss eine indirekte Überprüfung nach ISO 4545-2 durchgeführt werden. Ein Protokoll der Ergebnisse der regelmäßigen Überprüfung sollte über einen längeren Zeitabschnitt aufbewahrt werden, um die Vergleichspräzision zu bestimmen und den Drift der Prüfmaschine überwachen zu können.

Tabelle A.1 — Maximal zulässige prozentuale Abweichung

Mittlere Diagonalenlänge $\bar{d}$ mm	Maximal zulässige prozentuale Abweichung b_{rel} der Prüfmaschine $\pm\% \text{ HK}$
$0,02 \leq \bar{d} < 0,06$	$0,24/\bar{d}$
$0,06 \leq \bar{d}$	4

ANMERKUNG Die spezifischen Kriterien dieses Dokuments für die Leistung des Prüfgeräts wurden über einen erheblichen Zeitraum entwickelt und verfeinert. Wenn eine von der Maschine zu erfüllende spezifische Toleranz bestimmt wird, ist die Unsicherheit verbunden mit dem Gebrauch der Messausrüstung und/oder Referenznormen innerhalb dieser Toleranz enthalten, und es würde daher unangemessen sein, weitere Berücksichtigung für diese Unsicherheit zu machen, wie beispielsweise die Toleranz der Messunsicherheit, zu verringern. Dies gilt für alle gemachten Messungen, wenn eine regelmäßige Prüfung der Maschine verrichtet wird.

A.2 Inspektion des Eindringkörpers

Die Erfahrung hat gezeigt, dass einige anfänglich zufriedenstellende Eindringkörper nach relativ kurzer Gebrauchszeit defekt werden können. Dies kommt von kleinen Rissen, Löchern oder anderen Fehlern auf der Oberfläche. Viele Eindringkörper können durch Nachschleifen repariert werden, wenn solche Fehler rechtzeitig entdeckt werden. Falls nicht, verschlimmern sich kleine Fehler auf der Oberfläche rasch und machen den Eindringkörper unbrauchbar. Deshalb

- sollte der Zustand des Eindringkörpers jeden Tag, an dem die Prüfmaschine in Gebrauch ist, durch visuelle Prüfung des Eindrucks auf der Härtevergleichsplatte überwacht werden,
- ist die Überprüfung des Eindringkörpers nicht bestanden, wenn der Eindruckkörper Defekte aufweist,
- müssen nachgeschliffene oder anders reparierte Eindringkörper alle Anforderungen von ISO 4545-2 erfüllen.

Anhang B (informativ)

Unsicherheit der gemessenen Härtewerte

B.1 Allgemeine Anforderungen

Die Messunsicherheitsanalyse ist ein nützliches Werkzeug, das dabei hilft, Fehlerquellen zu ermitteln und Unterschiede in den Prüfergebnissen zu verstehen. Dieser Anhang liefert einen Leitfaden zur Abschätzung der Unsicherheit, die enthaltenen Verfahren dienen jedoch nur zur Information, sofern nicht ausdrücklich vom Kunden anders vorgegeben.

Die meisten Produktspezifikationen geben zulässige Abweichungen an, die hauptsächlich basierend auf den Anforderungen des Produkts, aber auch teilweise aufgrund der Leistungsfähigkeit der bei der Bestimmung der Härte verwendeten Prüfmaschinen, in den letzten Jahren entwickelt wurden. Diese zulässigen Abweichungen enthalten daher einen Beitrag durch die Unsicherheit der Härtemessung, und es wäre unangebracht, dieser Unsicherheit eine weitere Komponente hinzuzufügen, z. B. durch Verringerung der festgelegten zulässigen Abweichung um die geschätzte Unsicherheit der Härtemessung. Mit anderen Worten, wenn eine Produktspezifikation festlegt, dass die Härte eines Gegenstandes größer oder kleiner als ein bestimmter Wert sein muss, sollte das einfach als Festlegung interpretiert werden, dass der (die) berechnete(n) Härtewert(e) diese Anforderung erfüllen muss (müssen), außer, in der Produktnorm ist etwas anderes ausdrücklich angegeben. Es kann jedoch besondere Umstände geben, unter denen eine Verringerung der zulässigen Abweichung um die Messunsicherheit angemessen ist. Dies sollte nur nach Vereinbarung durch die beteiligten Parteien erfolgen.

Der in diesem Anhang beschriebene Ansatz für die Bestimmung der Unsicherheit berücksichtigt nur jene Unsicherheiten, die mit der messtechnischen Gesamtfunktion der Härteprüfmaschine im Zusammenhang mit Härtevergleichsplatten verbunden sind (im Folgenden abgekürzt als CRM). Diese Unsicherheiten der Gesamtfunktion spiegeln die kombinierte Wirkung aller Einzelunsicherheiten wider (indirekte Überprüfung). Aufgrund dieses Ansatzes ist es wichtig, dass die individuellen Maschinenkomponenten innerhalb der Toleranzen arbeiten. Es wird nachdrücklich empfohlen, dass dieses Verfahren nach dem erfolgreichen Bestehen der direkten Überprüfung für eine Dauer von höchstens einem Jahr angewendet werden sollte.

Anhang C zeigt die Struktur der metrologischen Kette mit vier Stufen, die notwendig sind, um die Härteskalen zu definieren und weiterzugeben. Die Kette beginnt auf der internationalen Stufe, wo die internationalen Definitionen der verschiedenen Härteskalen festgelegt werden, um internationale Vergleiche durchzuführen. Eine Anzahl von primären Härtenormalmesseinrichtungen auf der nationalen Stufe „erzeugen“ primäre Härtevergleichsplatten für die Stufe der Kalibrierlaboratorien. Naturgemäß sollten die direkte Kalibrierung und Überprüfung dieser Maschinen mit höchstmöglicher Genauigkeit erfolgen.

B.2 Allgemeines Verfahren

Mit dem Verfahren wird nach der Methode der Wurzel aus der Quadratsumme (en: Root-Squared-Sum-Method, RSS) eine kombinierte Unsicherheit u aus den verschiedenen in Tabelle B.1 angegebenen Quellen berechnet. Die erweiterte Unsicherheit U wird aus u abgeleitet, indem sie mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ multipliziert wird. Tabelle B.1 enthält alle Symbole und deren Bezeichnungen.

Die systematische Messabweichung b einer Härteprüfmaschine (auch als „Fehler“ bezeichnet) wird abgeleitet aus der Differenz zwischen

- dem zertifizierten Kalibrierwert der verwendeten Härtevergleichsplatte und
- dem Mittelwert der Härte der fünf während der Kalibrierung der Härteprüfmaschine auf dieser Härtevergleichsplatten erzeugten Eindrücke

und kann auf verschiedene Weise in die Bestimmung der Unsicherheit einbezogen werden (siehe ISO 4545-2).

Für die Bestimmung der Unsicherheit der Härtemessung sind zwei Methoden angegeben:

- Methode 1 (M1): berücksichtigt die systematische Messabweichung der Härteprüfmaschine auf zwei unterschiedliche Arten. In einem Ansatz wird der Unsicherheitsbeitrag aus der systematischen Messabweichung arithmetisch zu diesem Wert addiert. Bei dem anderen Ansatz wird eine Korrektur des Messergebnisses vorgenommen, um die systematische Messabweichung zu kompensieren;
- Methode 2 (M2): ermöglicht die Bestimmung der Unsicherheit ohne Berücksichtigung der Größe der systematischen Messabweichung.

Weitere Informationen zur Berechnung der Unsicherheit von Härtemessungen können der Literatur entnommen werden (siehe Literaturhinweise [7] und [8]).

ANMERKUNG 1 Diese Herangehensweise an die Unsicherheitsbestimmung berücksichtigt keinen möglichen Drift der Maschinenfunktion nach der letzten Kalibrierung, da davon ausgegangen wird, dass derartige Veränderungen nur in unwesentlichem Umfang auftreten. Daher könnte der Großteil dieser Analyse unmittelbar nach der Maschinenkalibrierung erfolgen, und die Ergebnisse könnten in den Kalibrierschein der Maschine aufgenommen werden.

ANMERKUNG 2 In diesem Anhang steht die Abkürzung „CRM“ für „Certified Reference Material“ (zertifiziertes Referenzmaterial). In Normen zur Härteprüfung entspricht das zertifizierte Referenzmaterial der Härtevergleichsplatte, d. h. einem Materialstück mit einem zertifizierten Wert und einer entsprechenden Unsicherheit.

B.3 Verfahren zur Berechnung der Unsicherheit — Härtemesswerte

B.3.1 Verfahren mit systematischer Messabweichung (Methode M1)

Die Methode M1 als Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit ist in Tabelle B.1 erläutert. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der systematischen Messabweichung b der Härteprüfmaschine um einen systematischen Effekt handelt. In JCGM 100:2008 wird empfohlen, zur Kompensation für systematische Effekte eine Korrektur anzuwenden, und dies ist die Grundlage für die Methode M1. Das Ergebnis der Anwendung dieser Methode ist, dass entweder b von allen ermittelten Härtewerten x subtrahiert oder die Unsicherheit U um b erhöht werden muss. Das Verfahren zur Bestimmung von U_{M1} ist in Tabelle B.1 erläutert.

Die kombinierte erweiterte Messunsicherheit für eine einzelne Härtemessung x wird mit Gleichung (B.1) berechnet:

$$U_{M1} = k \times \sqrt{u_H^2 + 2 \times u_{ms}^2 + u_{HTM}^2} \quad (B.1)$$

Dabei ist

- u_H ein Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der fehlenden Wiederholpräzision der Härteprüfmaschine resultiert;
- u_{ms} ein Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der Auflösung der Härteprüfmaschine resultiert. Sowohl die Auflösung des Längenmessanzeigers als auch die optische Auflösung des Messmikroskops sind zu berücksichtigen. In den meisten Fällen sollte die Gesamtauflösung des Messsystems zweimal in die Berechnung von u_H aufgenommen werden, da die Positionen beider Enden der langen Diagonalen unabhängig voneinander gelöst werden;
- u_{HTM} ein Beitrag zur Messunsicherheit, der aus der Standardunsicherheit der durch die Härteprüfmaschine erzeugten systematischen Messabweichung b resultiert (dieser Wert wird als Ergebnis der in ISO 4545-2 definierten indirekten Überprüfung angegeben) und nach Gleichung (B.2) berechnet wird:

$$u_{HTM} = \sqrt{u_{CRM}^2 + u_{HCRM}^2 + 2 \times u_{ms}^2} \quad (B.2)$$