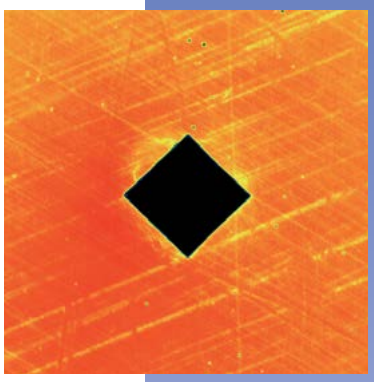
Härteprüfung und Probenpräparation

Struers

Application Notes

1. Einleitung

Die Härteprüfung ist eine wichtige Prüfmethode, um Materialien zu bewerten, Qualitätskontrollen in der Produktion oder Analysen in der Forschung und Entwicklung durchzuführen. Mittels der Härteprüfung können Rückschlüsse auf Materialeigenschaften wie Festigkeit, Duktilität oder Verschleißfestigkeit gezogen werden.
In dieser Application Note wird die Härte wie folgt definiert:
Unter der Härte wird der Materialwiderstand bis hin zur Verformung verstanden, wenn ein härterer Eindringkörper in ein weicheres Material eindringt. Das Ergebnis ist abhängig von der Prüfmethode, z. B. von der Prüfkraft und -dauer, vom Eindringkörper (Geometrie/Material), sowie der Anwendung der Prüfmethode. Die anzuwendende Prüfmethode ist abhängig vom Material, der Werkstücksgröße und dem Behandlungszustand. Daher sollte das Ergebnis immer in Verbindung mit der angewendeten Prüfmethode angegeben werden.
Es gibt verschiedene standardisierte Prüfmethoden, die zuverlässige Ergebnisse liefern. Abweichungen von Standardbedingungen, wie beispielsweise die Prüfdauer, sollten im Prüfprotokoll vermerkt werden. Während der Härteprüfung ist es wichtig, die Parameter unter Kontrolle zu halten, die Einfluss auf den Messwert haben, um Präzision und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.
Bei Metallen wird die Härte meist durch sogenannte Härteeindruck-Prüfverfahren ermittelt. Zu den bekanntesten Prüfmethoden in diesem Bereich zählen Rockwell, Vickers, Brinell und Knoop. Bei der Rockwell Prüfung wird die Eindrucktiefe für die Messung der Härte zu Grunde gelegt, während bei Vickers, Brinell und Knoop eine optische Vermessung der Eindruckgröße vorgenommen wird. Es sind verschiedene Normen für alle Prüfmethoden definiert, welche die Abläufe/ Anforderungen der Härteprüfungen genau beschreiben.



Die Messung der Härte kann Informationen über das Material liefern und als Qualitätskontrolle nach der Bearbeitung oder der Wärmebehandlung eingesetzt werden. Härteprüfungen werden durchgeführt, um die Härtbarkeit eines Stahls mittels der Jominy Prüfungen zu ermitteln, die Einhärtetiefe von oberflächengehärteten Bauteilen zu definieren und zur Prüfung von Schweißverbindungen.
Ebenfalls gibt es einen Zusammenhang zwischen der Härte und der Zugfestigkeit wodurch eine Abschätzung der mechanischen Eigenschaften möglich ist [1, 2]. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit besteht bei Keramik/ keramischen Verbundwerkstoffen / gesinterten Karbiden, etc., wobei der Bruchzähigkeit durch die Vickers Härteprüfungen, basierend auf Palmqvist's Methode bestimmt werden kann [3].

Weitere Anwendungen der Härteprüfung:
- Die Skleroskop-Härteprüfung ist ein dynamischer Test, bei dem die Härte über die Rückprallhöhe eines Fallhammers bestimmt wird.
- Für Mineralien der Ritzhärteversuch, bei dem ein härteres Mineral auf ein weicheres kratzt.

Automatisches Härteprüfgerät Duramin-40

- Instrumentierte Eindruckhärteprüfung (Martenshärte) zur Bestimmung der Härte und des Elastizitätsmoduls. Währen der Belastungs- und Endlastungsphase wird kontinuierlich die Kraft- Eindringtiefenkurve erfasst, wodurch das E-Modul bestimmt werden kann.
- Verschiedene Eindruckhärteprüfungen können ebenfalls für die Kunststoffhärte prüfungen angewendet werden, z. B. Shore (Durometer), Rockwell, Kugelein druck-Härteprüfungen und Barcol.

Diese Application Note bezieht sich schwerpunktmäßig auf die Härteprüfung von Metallen, die mechanische Probenpräparation und die Einflussfaktoren, die sich auf das Härteprüfergebnis auswirken können.

2. Präparation

Problem: 1
Bei der Probenpräparation kann es schwierig sein, plan-parallele Probenoberflächen zu erreichen, siehe Abbildung 1. Beispielsweise bei Vickers (Beschreibung siehe Seite 5), dürfen die zwei gemessenen Diagonalen nicht mehr als 5% voneinander abweichen. Der Eindringkörper sollte senkrecht zur Probenoberfläche eindringen und darf nicht mehr als 2° davon abweichen, um ein zuverlässiges Ergebnis zu erzielen.

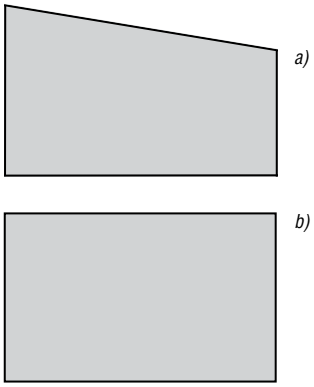


Abbildung 1: *Zeichnung einer a) unebenen Probe, b) planparallelen Probe*

Lösung: 1
Zur Fixierung der Proben empfiehlt sich eine Spannvorrichtung, die den Eindringkörper senkrecht auf die Probenoberfläche eindringen lässt, siehe Abbildung 2. Falls keine Spannvorrichtung verfügbar ist, muss die mechanische Probenpräparation zu einem plan-parallelen Ergebnis führen, siehe Abbildung 1b. Es ist möglich die Spannvorrichtung Abbildung 3A mit planer Oberfläche zu verwenden, siehe Abbildung 3, bei der die Proben mit doppelseitigem Klebeband befestigt werden. Bei der Verwendung von Abbildung 3A ist es wichtig, dass die Proben etwa die gleiche Höhe haben. Wird der Probenhalter Abbildung 3B genutzt, siehe Abbildung 3, hängt die Planität stark davon ab, wie der Anwender die Proben in den Probenhalter eingespannt hat.

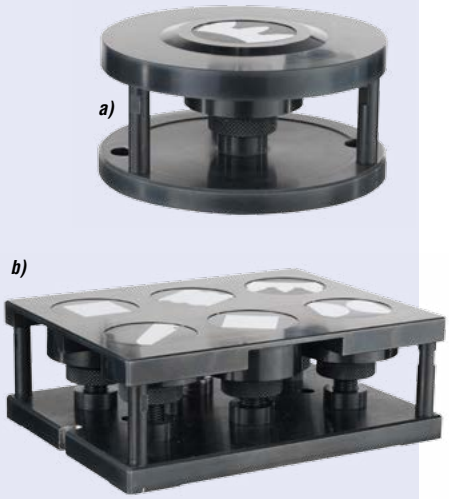


Abbildung 2: *Spannvorrichtungen um Proben während der Härteprüfung zu fixieren, a) 1 x 40 mm Ø, b) 6 x 30 mm Ø.*

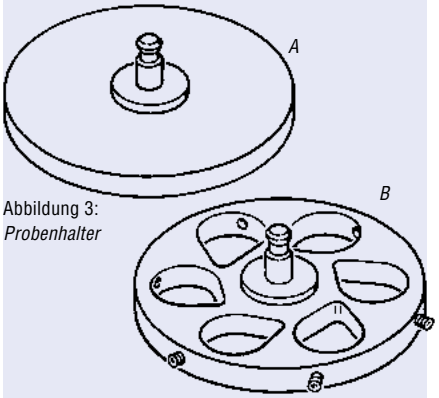


Abbildung 3: *Probenhalter*

Problem: 2
Wenn die Probenoberfläche nicht plan genug ist, kann die Auswertung des Eindrucks schwierig werden, besonders bei automatischer Auswertung. Eine saubere, reflektierende Probenoberfläche wird benötigt. Ebenso ist es wichtig, dass die Probenpräparation keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat. Die erforderliche Oberflächenpräparation ist abhängig von der Prüfmethode und der anzuwendenden Prüfkraft. Mikro- und Kleinlasthärteprüfungen (unter 1 kgf) benötigen eine präziser präparierte Probenoberfläche. Bei Rockwell Härteprüfungen ist die Oberflächenbeschaffenheit nicht so entscheidend, da die Eindrucktiefe und nicht die Geometrie gemessen wird. Aus diesem Grund ist eine geschliffene Oberfläche ausreichend.

Ist die Probenoberfläche nicht ausreichend präpariert, können Ungenauigkeiten bei der automatischen Vermessung der Eindruckgröße entstehen. Weichere Materialien sind anfälliger für Präparationsartefakte, da Schleifkörner gleicher Größe bei weichen

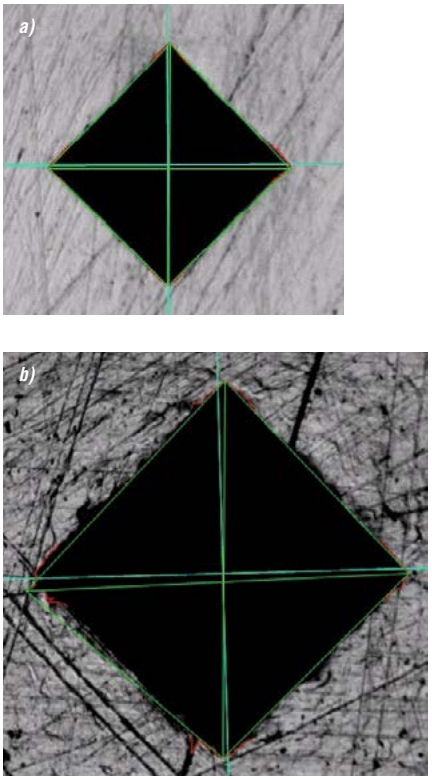


Abbildung 4: *Vickers Eindrücke auf identisch rauer Probenoberfläche (9µm) für a) gehärteter Stahl 715 HV 10 und b) 0.5% Kohlenstoffstahl 180 HV 10. 17% des Kohlenstoffstahl-Eindrucks kann aufgrund der rauen Oberfläche nicht verwendet werden, während beim gehärteten Stahl keine Probleme auftreten.*

Materialien tiefere Kratzer bzw. größere Deformationen an der Probenoberfläche verursachen, als bei härteren Materialien, siehe Abbildung 4.

Lösung: 2
Die Probenoberfläche muss poliert sein. Abbildung 5 zeigt die Oberfläche nach der

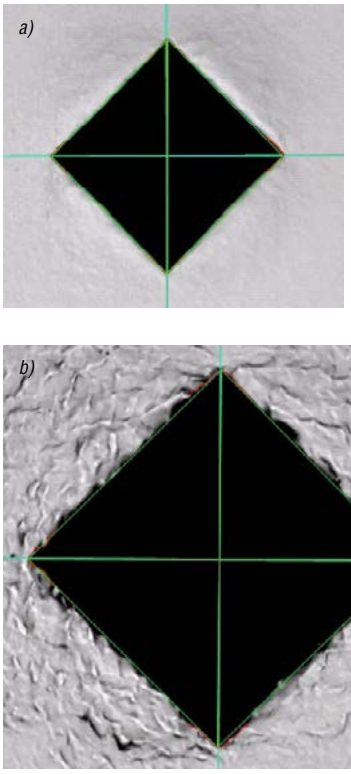


Abbildung 5: *Vickers Eindruck auf einer polierten Oberfläche, MD-Plus/DiaPro Plus, 3µm.*

a) gehärteter Werkzeugstahl, 715 HV 10.

b) 0.5% Kohlenstoffstahl, 180 HV 10.

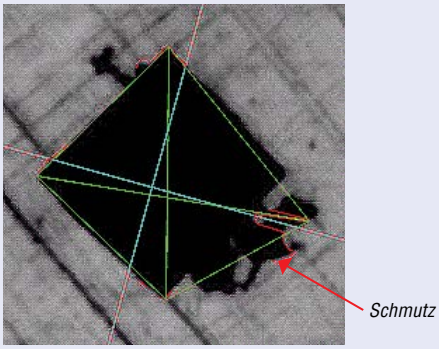


Abbildung 6: *Schmutz stört die optische Auslesung. Bei dem Material handelt es sich um gehärteten Werkzeugstahl. Vickers Härteprüfung. Prüfkraft 0.5 kgf. Feinschliff der Probenoberfläche mit MD-Largo und der Diamantsuspension DiaPro Allegro/Largo (9 µm).*

Endpolitur mit einem MD-Plus Poliertuch und der Diamantsuspension DiaPro Plus (3 µm).

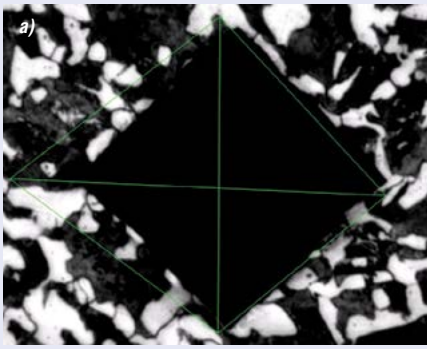
Problem: 3
Wenn die Probe nach der mechanischen Präparation nicht sorgfältig gereinigt wurde, können Fehler bei der automatischen Auswertung auftreten, siehe Abbildung 6.

Lösung: 3
Stellen Sie immer sicher, dass die Proben gründlich gereinigt werden, sonst können ggf. Schmutz oder Fasern der Poliertücher die Auswertung erschweren.

Problem: 4
Bei stark geätzten Proben kann es schwierig sein, die Eindruckkanten und somit einen präzisen Härtewert zu ermitteln.

Lösung: 4
Das Ätzen von Proben sollte, sofern möglich, verhindert werden, da die Oberfläche sonst weniger reflektiert. Ist das Ätzen notwendig, sollte nur leicht angeätzt werden, damit die Eindruckgrenzen weiterhin auswertbar bleiben. Manchmal ist es jedoch notwendig zu ätzen, beispielsweise bei der Überprüfung von Schweißverbindungen, siehe Abbildung 20.

1) In dieser Application Note sind die Prüfkräfte in kgf (Kilogramm Force) angegeben, einer Einheit die verwendet wurde, bevor das SI-System eingeführt wurde. (1kgf=9.81N)



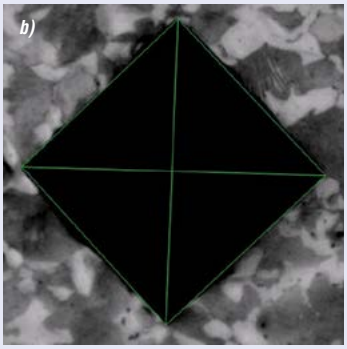


Abbildung 7: *Vickers Eindrücke, Prüfkraft 1 kgf. Material 0.5%-iger Kohlenstoffstahl. Letzte Präparationsstufe ist MD-Plus mit der Diamantsuspension DiaPro Plus (3µm). Geätzt mit 3% Nital a) stark geätzt b) leicht geätzt.*

Einfache Halterung mit Duramin-40

3. Grundlagen

Bei Eindruckhärteprüfungen, wie bei Vickers, Brinell und Knoop wird die Größe des Eindrucks optisch vermessen. Die Prüfkraft dividiert durch die Kontaktfläche (bei Knoop die Projektionsfläche) ergibt den Härtewert. Die Prüfung kann manuell durchgeführt werden, wobei mit Hilfe von Tabellen der Mittelwert der Diagonalen/ Durchmesser in einen Härtewert umgerechnet wird. Andernfalls kann der Härtewert über eine Formel berechnet werden oder durch eine automatische Auswertung ermittelt werden.

Abhängig von der Prüfkraft, wird die Härteprüfung nach Vickers in Makro-, Kleinlast- und Mikrohärteprüfung gegliedert. Bei der Makrohärteprüfung beträgt die Prüfkraft ≥5 kgf (≥49,03 N), bei der Kleinlasthärteprüfung zwischen 0,2 kgf (1,961N) und 3 kgf (29.42N), und für die Mikrohärteprüfung zwischen 0,1 kgf (0,9807N) und 0,01 kgf (0,09807N).

Die benötigte Probenoberfläche ist abhängig vom Prüfverfahren und der Prüfkraft. Bei Makrohärteprüfungen ist meist eine gefräste oder geschliffene Oberfläche ausreichend, manchmal ist auch keine Präparation notwendig. Bei Mikro- und Kleinlasthärteprüfungen ist eine polierte Oberfläche notwendig, für sehr geringe Prüfkräfte kann eine Oxidpolitur oder eine elektrolytische Politur notwendig werden.

Tabelle 1: *Oberflächenanforderungen für verschiedene Härteeindruckprüfungen.*

Prüfverfahren	Oberflächenpräparation
Rockwell HR	**Makro Härteprüfung:** - keine Oberflächenpräparation oder - angeschliffen
Brinell HBW	**Makro Härteprüfung:** - gefräst, - angeschliffen oder - poliert
Vickers HV	**Makro Härteprüfung:** - angeschliffen **Mikro Härteprüfung:** - poliert - elektrolytisch poliert
Knoop HK	**Mikro Härteprüfung:** - hochglanzpoliert

Revolverkopf von Duramin-40

Die Oberflächenrauigkeit hat nur einen geringen Einfluss auf die Größe des Eindrucks, solange der Eindruck im Verhältnis zu den Unebenheiten groß ist [1]. Es ist wichtig, dass die Oberflächenpräparation die Materialeigenschaften nicht verändert, d.h. die Oberfläche sollte nur ein Minimum an Deformation nach der Präparation aufzeigen.

Konvertierungen zwischen den Härteskalen sollten mit Vorsicht vorgenommen werden. Nach Möglichkeit sollten Umrechnungen vermieden und Härteprüfungen nach der vorgeschriebenen Prüfmethode durchgeführt werden. Das gleiche gilt für Umrechnungen von Härtewerten auf die Materialfestigkeit, sofern diese nicht experimentell belegt wurden.

Rockwell Härteprüfgerät Duramin-160

Härteprüfgerät Duramin-40

Rockwell (HR)
Rockwell ist eine schnelle Prüfmethode mit direkter Datenauslese, die speziell für die Produktionskontrolle entwickelt wurde.
Die Rockwell Härte (HR) wird durch die Eindrucktiefe bestimmt, die entsteht, nach dem ein Eindringkörper mit einer bestimmten Prüfkraft auf ein Material gebracht wurde. Der Eindringkörper ist, abhängig von der Messskala, ein kegelförmiger Diamant oder eine Hartmetallkugel mit unterschiedlichen Durchmessern. Um Oberflächeneinflüsse zu vermeiden, wird vor der Hauptlast eine Vorlast aufgebracht.
Nach Zurücknahme der Hauptlast wird der Härtewert durch die zurückbleibende Eindringtiefe ermittelt, siehe Abbildung 8.

Es gibt zwei Arten der Härteprüfung nach Rockwell: Die reguläre Rockwell Prüfmethode mit einer Vorlast von 10 kgf und einer Hauptlast von 60, 100 oder 150 kgf und die Superficial Rockwell Prüfung, die für dünnere Proben mit einer Vorlast von 3 kgf und einer Hauptlast von 15, 30 oder 45 kgf verwendet wird. Generell sollte das zu prüfende Bauteil nicht eingebettet werden, da die Rockwell Prüfung die Eindringtiefe des Eindringkörpers zur Ermittlung des Härtewerts auswertet und nicht die Eindruckdiagonalen. Die Einflüsse hierbei sind abhängig von dem verwendeten Prüfgerät.

Brinell (HBW)
Die Härteprüfung nach Brinell erzeugt durch die Verwendung einer Wolframkarbidkugel mit verschiedenen Durchmessern einen großen Eindruck. Die Bezeichnung ist HBW (W ist das chemische Zeichen für Wolfram). Die Größe des Eindrucks wird zur Ermittlung des Härtewerts optisch vermessen. Typische Materialien sind Schmiedestücke und Gusseisen, bei denen die Gefügestrukturen zu grob und inhomogen für andere Prüfmethoden (Rockwell/ Vickers) sind.
Prüfkraftbereich: 1-3000 kgf
Eindringkörper: 1 / 2.5 / 5 / 10 mm Kugeldurchmesser

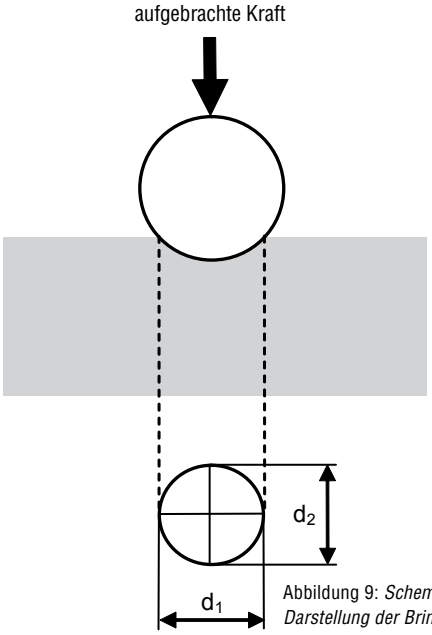


Abbildung 9: *Schematische Darstellung der Brinell Härteprüfung.*

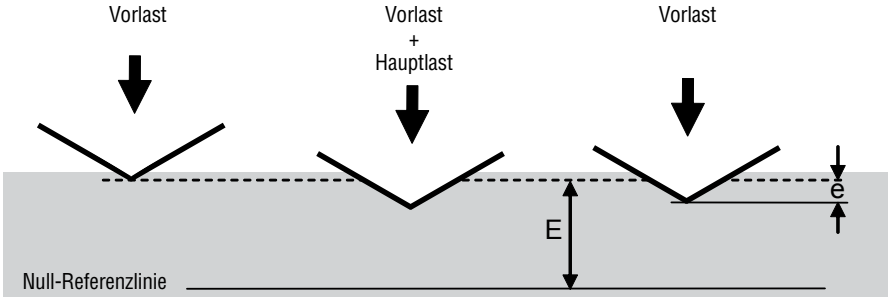
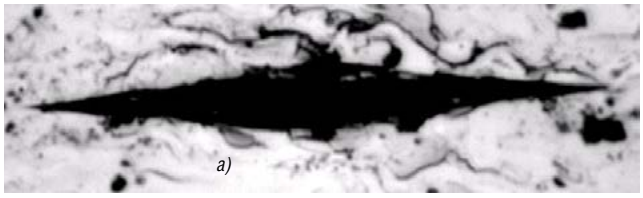
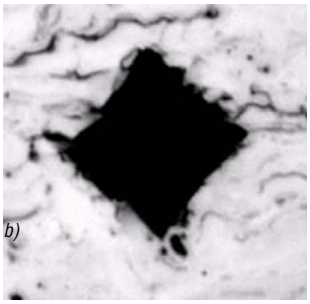


Abbildung 8: *Schematische Darstellung der Rockwell Härteprüfung. Rockwell Formel: Rockwell Härte HR = E – e. "E" ist eine Konstante von 100 (Diamant) oder 130 (Kugel) Einheiten. "e" ist die Eindrucktiefe in Einheiten von 0.002 mm*

Abbildung 13: *Vergleich der Eindruckgrößen zwischen a) Knoop und b) Vickers Eindruck in einer Plasmaspritzschicht. Prüfkraft 0.5 kgf. Die Feinpolitur wurde mit einem Nap Tuch und der Diamantsuspension DiaPro Nap B (1µm) durchgeführt.*





Vickers (HV)
Die Vickers Härte (HV) wird anhand der diagonalen Eindrucklänge berechnet, die durch die Einwirkung eines Diamanteindringkörpers mit einer bestimmten Prüfkraft auf ein Material entsteht, siehe Abbildung 10. Die Größe des Eindrucks wird zur Ermittlung des Härtewerts optisch vermessen. Der Härtewert kann mittels Tabelle oder Formel umgerechnet werden, nachdem der Mittelwert beider Diagonalen bestimmt wurde oder durch ein automatisches Härteprüfgerät ausgewertet werden. Der Skalenbereich bei Vickers reicht von 10 gf bis 100 kgf. Bei der Vickers Härteprüfungen ist der berechnete Härtewert relativ unabhängig von der verwendeten Prüfkraft. Die Mindestabstände zwischen den Vickers Eindrücken sind in Abbildung 23 dargestellt.

Knoop (HK)
Diese Prüfmethode wurde als Alternative zum Vickers Verfahren entwickelt, um die Rissbildung bei zerbrechlichen Materialien (wie Keramik) zu unterbinden aber auch um in dünnen Schichten messen zu können. Der Eindringkörper ist ein asymmetrischer, pyramidenförmiger Diamant, siehe Abbildung 11. Die Größe des Eindrucks ist abhängig von der langen Diagonalen, die für die Berechnung des Härtewertes optisch ausgelesen wird. Der Prüfkraftbereich bei Knoop variiert von 10 gf bis 1 kgf. Knoop ist hinsichtlich der Oberflächenpräparation empfindlicher als Vickers, da die lange Diagonale eine sehr flache Eindruckspitze ausbildet.
Die Abstände zwischen den Eindrücken sind abhängig vom Material, siehe Abbildung 12. Bei der Verwendung von sehr geringen Prüfkräften, steigt der Härtewert mit sinkender Prüfkraft. Ein Vergleich der Eindruckgrößen zwischen Knoop und Vickers bei gleichen Prüfkräften ist in Abbildung 13 zu sehen.

Bei Brinell, Vickers und Knoop ist zu beachten, dass die Diagonale mindestens 20 µm beträgt, da die Messunsicherheit sonst zu hoch wird.

Mikro- und Kleinlasthärteprüfung ≤1kgf
Da bei der Mikro- Kleinlasthärteprüfung Prüfkräfte ≤ 1 kgf Verwendung finden, entstehen nur sehr kleine Eindrücke. Die Mikrohärteprüfung ermöglicht Härteprüfungen an Bauteilen und Phasen die zu dünn oder zu klein für die Makrohärteprüfung sind. Der Prüfkraftbereich von 10 gf – 1000 gf ermöglicht die Bestimmung der Härte von

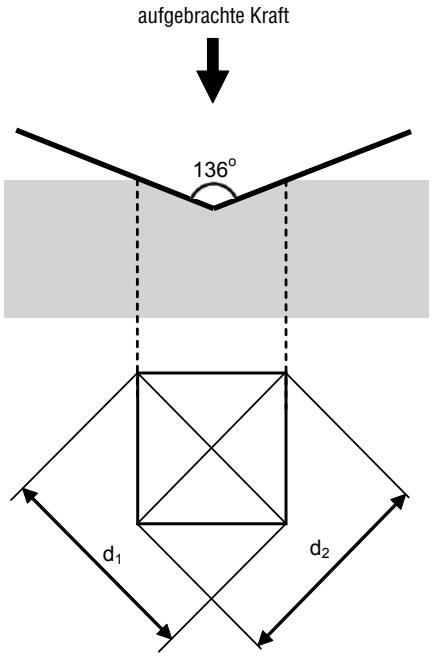


Abbildung 10:
Schematische Darstellung der Vickers Härteprüfung.

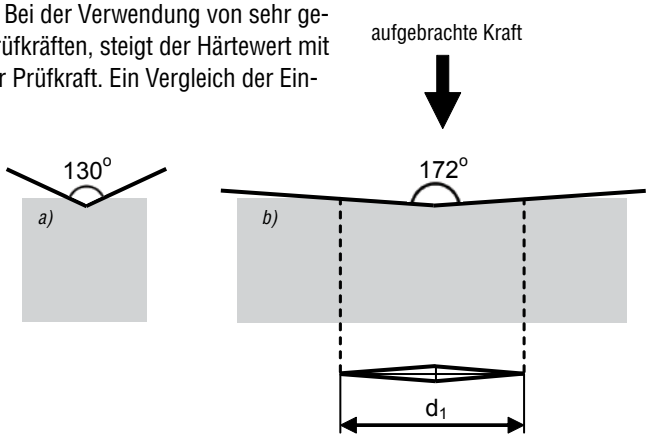


Abbildung 11:
Schematische Darstellung der Knoop Härteprüfung a) Seitenansicht b) Frontansicht

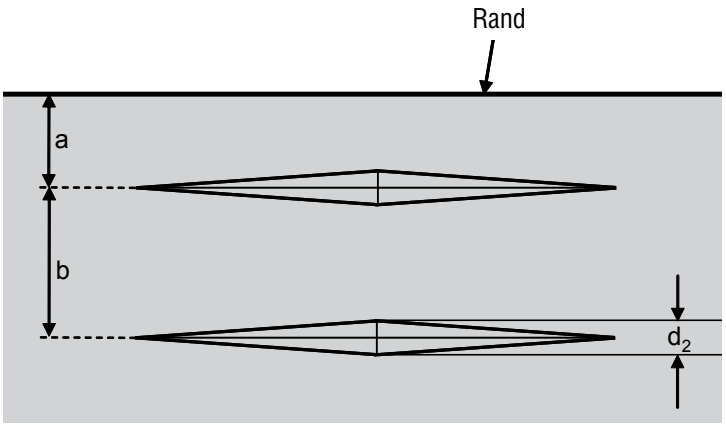


Abbildung 12: *Die Eindruck Abstände bei Knoop sind abhängig von der kurzen Diagonalen d2. a und b sind in untenstehender Tabelle beschrieben (ISO 4545).*

	a	b
Stahl, Kupfer und Kupferlegierungen	$3 \cdot d_2$	$4 \cdot d_2$
Leichtmetalle, Pb, Sn und ihre Legierungen	$3.5 \cdot d_2$	$7 \cdot d_2$

kleinsten Phasen oder Bestandteilen, aber auch Härteverläufe können damit bestimmt werden. Beispiele dafür sind dünne Schichten, kleine Komponenten, Beschichtungen, Mikro-Schweißverbindungen, Pulvermetall-Partikel, individuelle Strukturen oder Körner.

Wenn möglich, sollte keine Ätzung vor der Härteprüfung durchgeführt werden, da die Oberfläche sonst weniger reflektiert und die Eindruckdiagonalen schlechter zu bestimmen sind. Allerdings hilft eine leichte Ätzung unterschiedliche Phasen/ Strukturen zu erkennen, wenn die Härteprüfungen in verschiedenen Phasen durchgeführt werden soll.

Je geringer die Prüfkräfte bei der Härteprüfung, desto höher sind die Anforderungen an die mechanische, chemische oder elektrochemische Oberflächenpräparation. Es ist wichtig, dass keine Veränderung der Oberflächeneigenschaften während der Präparation stattfindet. Verformungen, die durch das Trennen und Schleifen entstanden sind, müssen durch das Polieren bis auf 6, 3 oder 1 µm, je nach Prüfkraft, beseitigt werden. Für Prüfkräfte bis zu 300 gf [4], muss die Probenoberfläche verformungs- und schadenfrei sowie oxid- oder elektrolytisch poliert sein. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass weichere/ duktilere Materialien (z. B. HV kleiner 120-150) empfindlicher gegenüber Präparationsartefakten sind.

Eine plane Probenoberfläche ist wichtig, um zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten. Durch die Nutzung einer Spannvorrichtung wird sichergestellt, dass der Eindringkörper senkrecht auf die Oberfläche trifft.

4. Empfehlungen für die Präparation

Trennen
Beim Trennen sollten so wenige Verformungen wie möglich bei der Probe entstehen. Daher ist die Kombination von Trennscheibe und Vorschubgeschwindigkeit wichtig, um Schleifbrand zu verhindern und dadurch kurze Präparationszeiten bei den nachfolgenden Schritten zu ermöglichen.

Einbetten
Tests[1] haben ergeben, dass Einbettmittel keine signifikanten Auswirkungen auf Härteprüfungen über 30 kgf (Vickers) haben, siehe Abbildung 14. (Die Tests wurden mit den Warmeinbettmitteln DuroFast (Epoxideinbettmittel mit mineralischem Füllstoff) und MultiFast (Phenoleinbettmittel mit Füllstoff) und dem Kalteinbettmittel ClaroCit (Akryl-Kalteinbettmittel) durchgeführt).
Wenn eine gute Randschärfe, wie bei dünnen Beschichtungen oder oberflächengehärtetem Stahl erforderlich ist, sollte ein Einbettmittel mit Füllstoff verwendet werden. Bei gehärtetem Stahl sollte DuroFast verwendet werden. Für weichere Materialien/ Beschichtungen (kleiner 400 HV) ist LevoFast (Melamineinbettmittel mit Mineral- und Glasfaserfüllstoff) die richtige Wahl.

[1]Die Tests wurden mit 0.5%-igem Kohlenstoffstahl und gehärtetem Werkzeugstahl durchgeführt. Die Durchmesser der Stahlproben betrugen 25 bzw. 32 mm. Alle Stahlproben wurden als 40 mm Durchmesser Proben eingebettet. Jede Spalte in Abbildung 14 repräsentiert 3 Serien á 12 Eindrücke, bis auf ClaroCit, bei dem nur eine Testserie durchgeführt wurde.

Schleifen und Polieren
Die Schleif- und Poliermethoden sind vom zu prüfendem Material abhängig. Eine übliche Methode für Eisenmetalle wird in Tabelle 2 vorgestellt. Diese Methode ist für die meisten Behandlungszustände / Wärmebehandlungen, wie z. B. einsatzgehärteter Stahl, anwendbar. Die Endpolitur wird mit einer 3 µm Diamantsuspension durchgeführt. Dies ist eine schnelle Methode und ergibt eine perfekt reflektierende Oberfläche für die Härteprüfung.

Für weicheres Aluminium wird die in Tabelle 3 vorgestellte Methode empfohlen. Abbildung 15 zeigt eine automatische Auswertung von 99,95%-igem Aluminium, nach dem Trennen sowie verschiedener mechanischer Präparationsstufen. Weitere Präparationsmethoden für verschiedene Materialien, finden Sie unseren e-Metalog auf www.struers.de. Die Daten in Tabelle 2 und 3 gelten für 6 eingebettete Proben von 30 mm Durchmesser, eingespannt in einem Probenhalter.

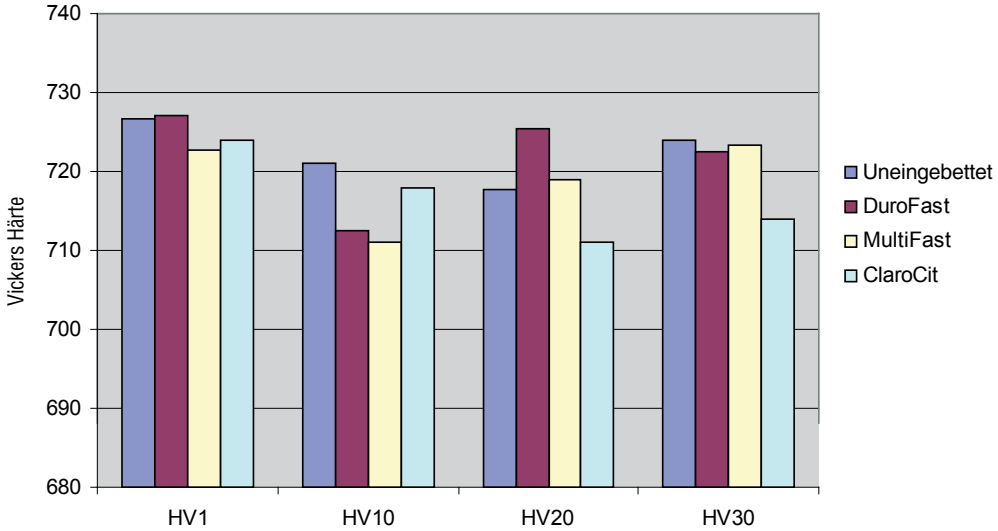


Abbildung 14: *Ergebnisse der Untersuchung, inwiefern Einbettmittel Auswirkungen auf die Härteprüfung haben. Die Proben wurden direkt auf dem Prüftisch platziert. Bei dem Material handelte es sich um gehärteten Werkzeugstahl. Die Feinpolitur wurde mit einem MD-Plus Tuch und der Diamantsuspension DiaPro Plus (3µm) ausgeführt.*

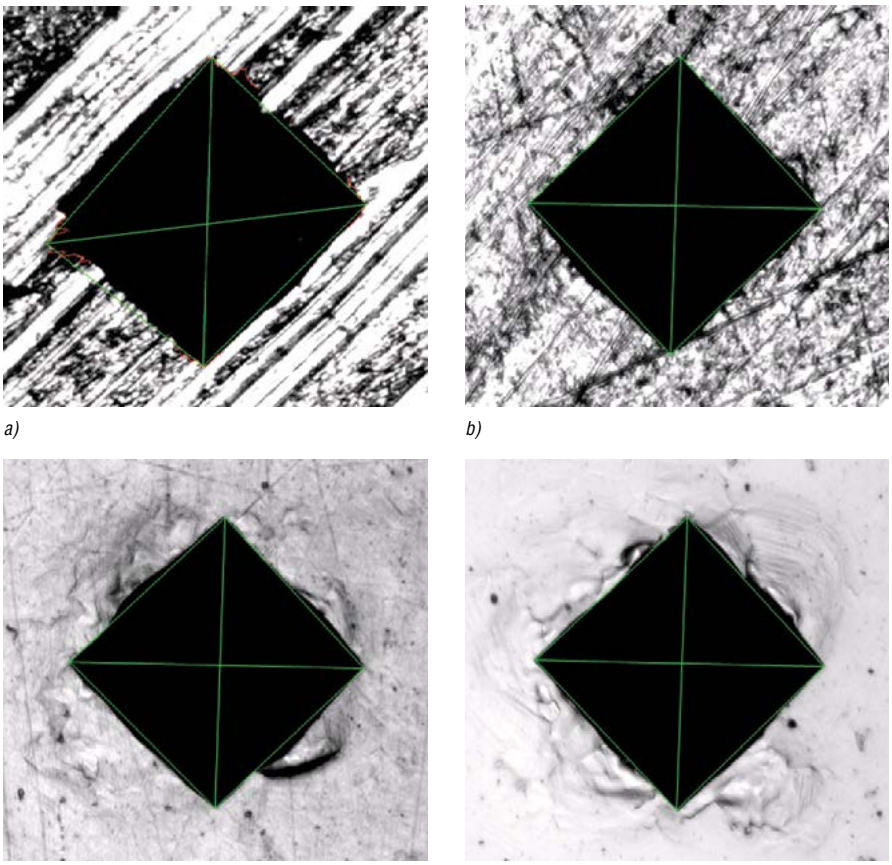
Stufe	Planschleifen	Feinschleifen 1	Polieren 1
Oberfläche	MD-Piano 220	MD-Allegro	MD-Plus
Schleifmittel		DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Plus
Schmiermittel	Wasser		
Geschwindigkeit [U/min]	300	150	150
Druck [N]	240	240	180
Drehrichtung	>>	>>	>>
Zeit [Min]	1	3	3

Tabelle 2: *Präparationsmethoden für Stahl. Bezogen auf 6 eingebettete Proben mit 30 mm Ø. Stahl, Kupfer, Kupferlegierungen Leichtmetalle, Pb, Sn und ihre Legierungen*

Stufe	Planschleifen	Feinschleifen 1	Polieren 1	Oxidpolitur
Oberfläche	SiC-Papier #320	MD-Largo	MD-Mol	MD-Chem
Schleifmittel		DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Mol	OP-U 0.04 µm
Schmiermittel	Wasser			
Geschwindigkeit [U/min]	300	150	150	150
Druck [N]	120	180	150	90
Drehrichtung	>>	>>	>>	><
Zeit [Min]	1	4	3	2

Tabelle 3: *Präparationsmethode für weiches Aluminium. Bezogen auf 6 eingebettete Proben mit 30 mm Ø.*

Bei der Verwendung feinpolierter Oberflächen, z. B. nach der Oxidpolitur sollte beachtet werden, dass OP-U weniger Relief als OP-S ergibt.



a) *b)* *c)* *d)*

Abbildung 15: *Vickers Härteprüfung, HV1 von 99.95% Aluminium a) direkt nach dem Trennen b) nach dem Feinschleifen mit MD-Largo und der Diamantsuspension DiaPro Allegro/Largo (9 µm) c) nach dem Polieren mit MD-Mol und DiaPro Mol (3 µm) d) nach dem Oxid-Polieren mit MD-Chem und OP-U (Kolloid-Kieselerde 0.04 µm)*

5. Anwendungen

Einsatzhärtetiefe

Um die Verschleißfestigkeit von Stählen zu erhöhen, werden diese oberflächengehärtet, besonders bei Stählen, die in bewegenden oder rotierenden Bereichen wie Getrieben, Düsen, Maschinenteilen, etc. verwendet werden.
Der Abfall der Härte vom Rand in Richtung Kern des Prüfstücks kann mittels eines Härteverlaufes Bestimmt werden.
Die Messung der Einsatzhärte (CHD) wird vorgenommen, um die Einsatzhärtetiefe von oberflächengehärteten Werkstücken zu ermitteln. Die Prüfung ist standardisiert und abhängig von dem Oberflächenhärteverfahren, d. h. ob Induktionsgehärtet, Aufgekohlt, Nitriert, etc.
In den meisten Fällen werden Vickers Härteprüfungen im Mikro-, Kleinlastbereich durchgeführt (in manchen Fällen wird auch Knoop genutzt).

Eine gute Randschärfe wird benötigt, wenn dünne Beschichtungen oder oberflächengehärtete Werkstücke geprüft werden.

Abbildung 16: *Messung der Einsatzhärtetiefe. Die größer werdenden Eindrücke zur Probenmitte hin, deuten auf eine geringer werdende Härte des Materials.*

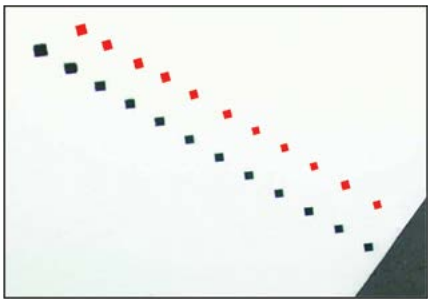
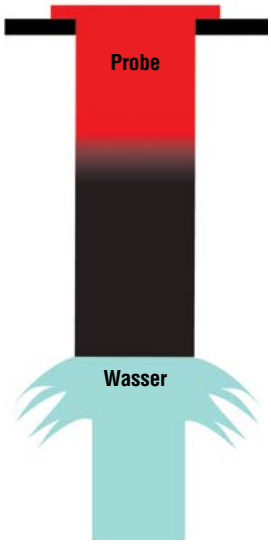
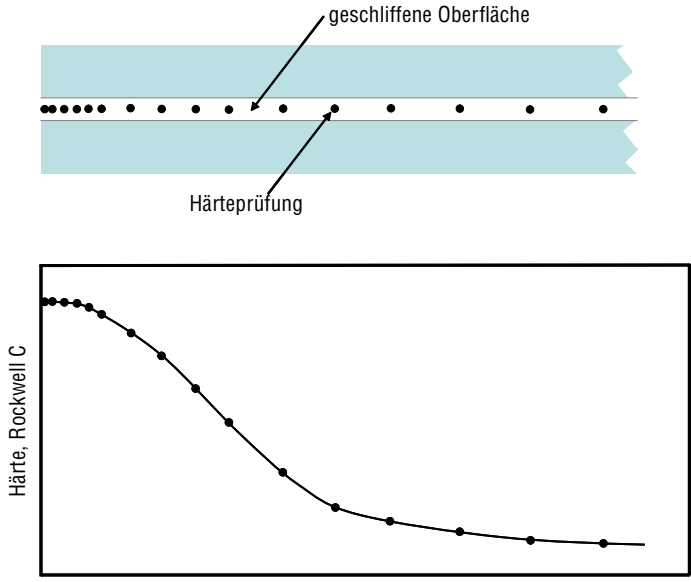


Abbildung 17: *Eindrücke formieren ein Zick-Zack Muster.*

Abbildung 18: *Schematische Darstellung der Jominy Prüfung*

(Zum Beispiel: die Jominy Nummer: J15 = 35 HRC bedeutet, dass die Härte 35 HRC mit einem Abstand von 15 mm zur abgeschreckten Stirnseite gemessen wurde)





Bei CHD-Messungen nimmt die Größe der Eindrücke zu, während die Härte des Materials abnimmt, siehe Abbildung 16. Um die normgerechte Positionierung der Eindrücke zu gewährleisten (Abstände bei Stahl 3 x Diagonale), können die Abstände automatisch festgelegt werden. Werden die Eindrücke größer, müssen die Abstände zwischen den Eindrücken größer werden.

Üblicherweise wird eine größere Anzahl an Eindrücken benötigt, um die Einhärtetiefe zu ermitteln. Die modernen, automatischen Härteprüfsysteme stoppen jedoch automatisch, wenn die definierte Grenzhärte erreicht ist ungeachtet der Anzahl an Prüfpunkten. Da die Eindrücke sich nicht gegenseitig beeinflussen dürfen, muss ein Mindestabstand zwischen den Eindrücken eingehalten werden. Um die Anzahl der Prüfeindrücke und damit auch die Genauigkeit der Messreihe zu erhöhen können die Eindrücke versetzt zueinander, in einem Zick-Zack Muster gesetzt werden, siehe Abbildung 17.

Jominy Prüfungen

Mit der Jominy Prüfung wird die Härtbarkeit von Stählen getestet. Ein Prüfstab mit spezieller Geometrie wird auf Austenit-Temperatur erhitzt und dann mittels eines Wasserstrahls an einer Stirnseite abgekühlt, siehe Abbildung 18. Nach dem Abkühlen wird die Härte in Abständen ermittelt, beginnend von der abgeschreckten Stirnseite, siehe Abbildung 19. Hierbei werden vor allem die Prüfmethoden HRC und HV 30 genutzt. Abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit (Entfernung zur Stirnseite) ergeben sich die unterschiedlichen Härtewerte.

Schweißverbindungen

Bei der Härteprüfung von Schweißverbindungen wird eine Serie von Eindrücken entlang der Probenkante gesetzt. Mittels einer Übersichtskamera kann die gesamte Probenoberfläche betrachtet und die Eindrücke entsprechend leicht positioniert werden. Bei der Prüfung von Schweißverbindung ist die Nutzung von HV5 oder HV10 vorgeschrieben.

Ein Beispiel für Härteprüfeindrücke bei einer Schweißverbindungen zeigt Abbildung 20. Vor der Härteprüfung wurde die Probenoberfläche bis auf 3 µm poliert leicht geätzt.

Für die Präparation von Schweißverbindungen ist eine Application Note mit entsprechendem Titel erhältlich.

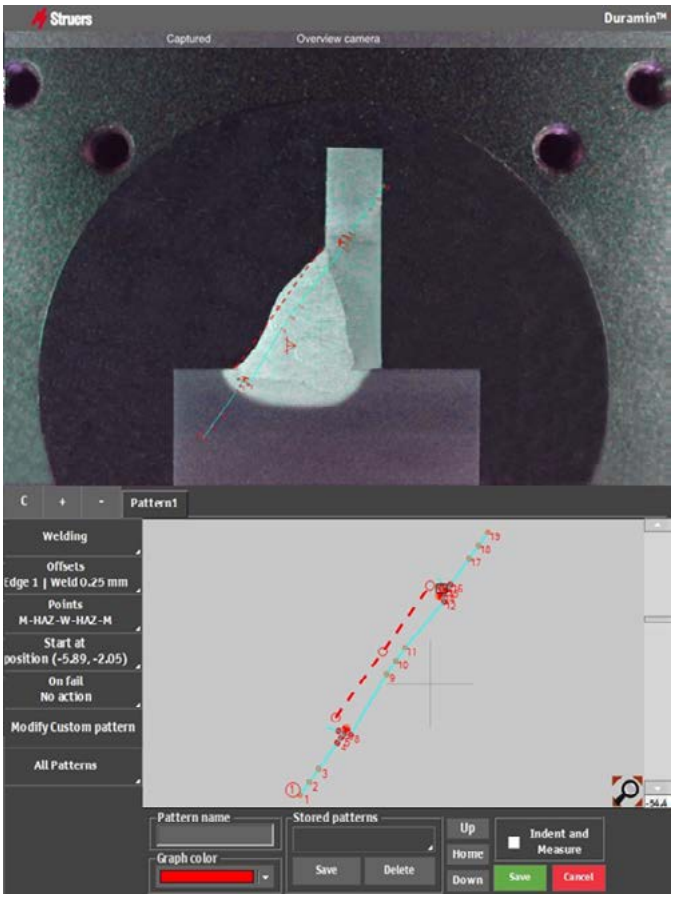


Abb. 20: Setzen von Prüfpunkten auf einer Schweißnaht mit Hilfe der Übersichtskamera

Bedingungen	Eindruck	Eindringkörper	Sonstiges
Präzision	Geschwindigkeit	Seitwärtsbewegung	Prüftisch, Probenhalter
Reproduzierbarkeit	Masse	Formabweichung	Spindel
	Winkel	Schaden	Verrutschen der Probe
	Zeit	Material	Nivellierung der Maschine
	Platz		

Tabelle 5: *Gerätefaktoren*

6. Prüfparameter

Härteprüfungen sind einfach durchzuführen, sofern alle Prüfparameter beachtet werden. Aus diesem Grund sollte ein Basiswissen über die Härteprüfung vorhanden sein. Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussparameter der Härteprüfung beschrieben.
Die verschiedenen Parameter können zu den fünf Hauptfaktoren Gerät, Messung, Material, Anwender und Umfeld zusammengefasst werden, siehe Abbildung 21. Es ist wichtig, dass die im Folgenden beschriebenen Einflussfaktoren kontinuierlich eliminiert, minimiert oder zumindest beachtet werden:

Anwenderfaktoren
Der Anwender sollte ein Grundverständnis über das Härteprüfequipment, die Oberflächeneigenschaften und die Verspanntechniken haben, um die Prüfungen so effektiv wie möglich durchzuführen.

Umfeldfaktoren
Die Härteprüfung sollte auf einer glatten, sauberen und reflektierenden Oberfläche (zulässig für Vickers, Brinell und Knoop) durchgeführt werden. Es ist wichtig, dass die Prüfungen bei gleichbleibenden Bedingungen, wie z. B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt werden. Bei Eindringkörpern mit optischer Auslesung muss beachtet werden, dass die Beleuchtung Einfluss auf die Eindruckvermessung haben kann. Daher sollte das Härteprüfsystem in einer dunklen Umgebung stehen, um die Beleuchtung konstant zu halten. Vibrationen nehmen Einfluss auf die Härteprüfung und sollten deshalb verhindert werden. Geringere Prüfkräfte reagieren empfindlicher auf Vibrationen. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, Härteprüfgeräte auf spezielle Sockel (wie z. B. auf einer Granitplatte) zu platzieren.
Die Oberfläche sollte frei von jeglichen Verunreinigungen wie Graten, Schmutz, Öl und Fett sein. Eine dünne Schmierschicht verringert den Reibungswert, wodurch geringfügig größere Eindrücke bei gleicher Prüfkraft resultieren. Dabei sollte beachtet werden, dass die gleichen Konditionen für alle Oberflächen gegeben sind, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Gerätefaktoren
Bei den Gerätefaktoren werden die Prüfkraft, der Eindruck und der Eindruckkörper berücksichtigt. Um höchstmögliche Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, sollten Geräte mit der Technologie der Kraftmessdose verwendet werden. Diese sind präziser als Geräte mit mechanischen Gewichten und sie sind frei von Reibungseinflüssen und Massenträgheit. Um die Präzision und Reproduzierbarkeit dauerhaft zu gewährleisten, sind regelmäßige Kalibrierungen notwendig. Bei der täglichen Arbeit werden meist indirekte Verifizierungen mit Härtevergleichsplatten in verschiedener Härtebereichen durchgeführt, um die Kalibrierung im verwendeten Härtebereich zu überprüfen. Die Parameter, die Einfluss auf den Eindruck haben können, sind in Tabelle 5 dargestellt. Der Eindruckwinkel sollte nicht mehr als 2 Grad (Maximum) von der senkrechten Linie abweichen, da sonst Fehler entstehen können. Ebenso sollte kein seitliches Spiel zwischen Eindringkörper und Probe bestehen. Nach Möglichkeit sollte die Probe auf einem gratfreien Tisch festgeklemmt werden.

Der Abstand zwischen den Eindrücken sollte so groß sein, dass die Eindrücke sich nicht gegenseitig beeinflussen. Die plastische Verformung rund um den Eindruck verursacht bei den meisten Materialien eine Aufhärtung durch Kaltverformung. Daher müssen die Abstände zwischen den Eindrücken eingehalten werden.
Die Entwicklung der plastischen Verformung (blauer Bereich) durch Druckaufbringung (gelb) ist in Abbildung 22 dargestellt.

Aus diesem Grund beinhalten die Normen der verschiedenen Prüfmethoden Spezifikationen über die Abstände zwischen den Eindrücken und zum Rand. Die Spezifikationen für die Härteprüfungen nach Vickers sind durch die ISO festgelegt und in Abbildung 23 dargestellt.

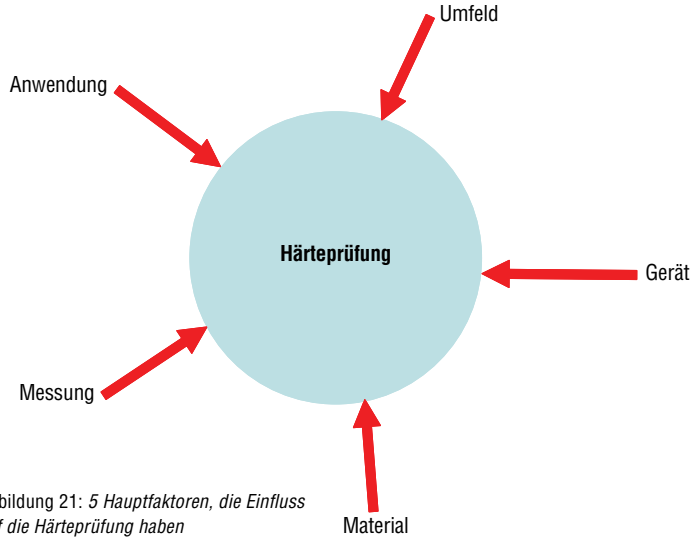


Abbildung 21: *5 Hauptfaktoren, die Einfluss auf die Härteprüfung haben*

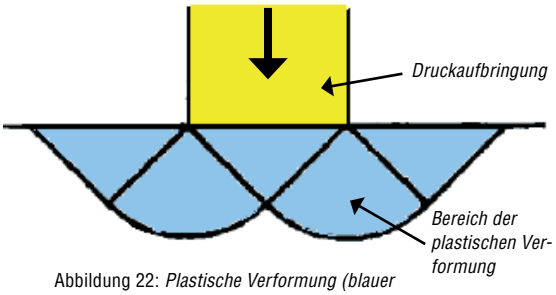
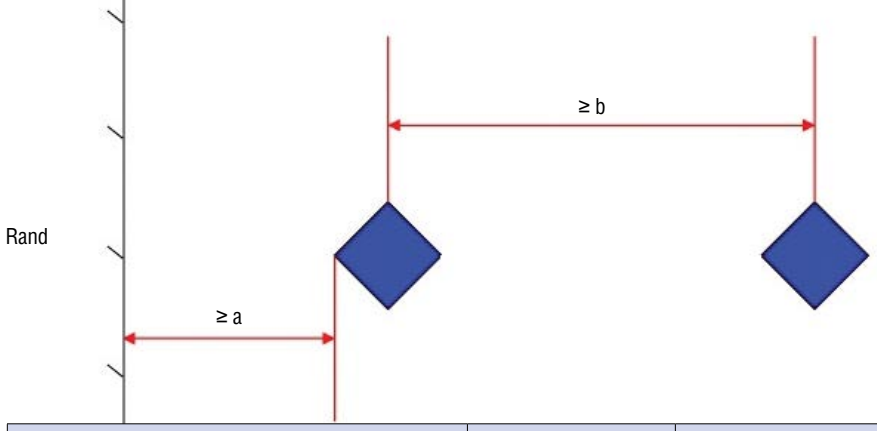


Abbildung 22: *Plastische Verformung (blauer Bereich) durch Druckaufbringung beim Eindruck (gelber Bereich) gemäß Prandtl*



	a	b
Stahl, Kupfer und Kupferlegierungen	$2.5 \cdot d_m$	$3 \cdot d_m$
Leichtmetalle, Pb, Sn und ihre Legierungen	$3 \cdot d_m$	$6 \cdot d_m$

Abbildung 23: *Abstände zwischen den Vickers Eindrücken gemäß ISO 6507, a und b sind in folgender Tabelle beschrieben, dm ist die Hauptdiagonale des Eindrucks.*

Materialfaktoren

Die Einflussfaktoren des Materials sind:

- Heterogenität von Mikrostrukturen
- Qualität der Probenpräparation
- Reflektion der Probenoberfläche
- Materialtyp
- Materialbearbeitung
- Materialform
- Einbettmittel

Methode	Vertifiziertes System	Sonstiges
Verwendete Methode (HV, HB, HR, HK)	Kalibrierung des Ladesystems	Vibrationen
Realisierbarkeit der Methode	Vergrößerung der Objektive	Schmutz, Staub, Ablagerungen
Einzuhaltende Norm (ASTM,ISO, JIS)	Auflösung der Objektive	
	Unzureichende Bildqualität	
	Konstante Beleuchtung	

Tabelle 6: *Messfaktoren*

Eine bestimmte Probendicke ist notwendig, da der Eindringkörper nicht durch die gesamte Probe drücken soll. Es ist wichtig, dass nach der Härteprüfung keine visuellen Verformungen auf der Probenrückseite zu erkennen sind. Daher sollte die Probendicke mindestens das 10-fache der Eindrucktiefe (Rockwell) betragen. Bei Vickers Prüfungen sollte die diagonale Länge mindestens das 1,5-fache des Eindrucks betragen.

Korrekturen müssen durchgeführt werden, wenn kugelförmige oder zylindrische Oberflächen gemessen werden. Der Korrekturfaktor ist abhängig davon, ob die Probenoberfläche konkav oder konvex ist. Der entsprechende Korrekturfaktor ist Tabellen zu entnehmen oder ist im Härteprüfgerät hinterlegt. Bei runden Proben sollten spezielle Prüftische verwendet werden (siehe Abbildung 24) und Korrekturfaktoren für konvexe Oberflächen.

Bei der Auswahl des geeigneten Härteprüfverfahrens muss darauf geachtet werden, dass der Eindruckbereich die gesamte Struktur des Materials abdeckt, um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen. Bei einem Gussgefüge wird beispielsweise bevorzugt Brinell angewendet, da mit dem größeren Eindruck die verschiedenen Elemente der inhomogenen Struktur besser aufgenommen werden.

Messfaktoren

Die Messfaktoren sind in Tabelle 6 dargestellt. Sofern ein Härteprüfgerät verschiedene Härteprüfverfahren abdeckt, ist es notwendig jedes Verfahren separat zu verifizieren. Zuvor muss überprüft werden, dass die Beleuchtung keinen Einfluss auf die Auswertung hat.

Bei Härteprüfgeräten mit optischer Auslesung sollten höchstmögliche Prüfkräfte zur Minimierung von Fehlern genutzt werden. Die diagonale Länge des Eindrucks sollte größer als 20 µm sein. Bei Vickers sollte die Differenz der beiden Diagonalen desselben Eindrucks nicht größer als ±5% sein. Für optimale Ergebnisse sollte die Diagonale nach Möglichkeit 25-75% des sichtbaren Objektivfeldes sein. Bei der Bestimmung großer Härteverläufe, wie z. B. bei Einsatzhärtungen, kann es schwierig werden diese Anforderung zu erfüllen.

Der Eindringkörper muss frei von Oberflächenschäden sein, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Eine tägliche visuelle Prüfung eines Eindrucks im Testblock ist empfehlenswert, um Fehler, Risse, etc. auf der Eindringkörperoberfläche (Vickers ISO 6507) zu entdecken. Sobald ein Defekt auf dem Eindringkörper besteht, können keine verlässlichen Ergebnisse mehr garantiert werden.

Rockwell Härteprüfgerät Duramin-160

7. Welche Prüfmethode ist die Richtige?

Durch die Verwendung von nur einem Eindringkörper und vielen Prüfkräften (Mikro/Makro Härteprüfbereich) ist Vickers die vielseitigste Prüfmethode. Die Prüfmethode kann für viele Materialien und Anwendungen (Einsatzhärtetiefe, Jominy Prüfungen, Schweißverbindungen, Keramiken und Beschichtungen) genutzt werden, benötigt aber eine relativ gute Probenoberfläche.

Knoop hat im Vergleich zu Vickers weniger Prüfkräfte (Mikro Härteprüfung) und ist besonders für Keramiken und dünne Beschichtungen mit einer guten Probenoberfläche geeignet.

Brinell ist für inhomogene Metalle oder Metalle mit groben Strukturelementen, wie z. B. Guss und Schmiedeteile geeignet. Durch die Größe der Proben, der hohen Prüfkräfte und der Eindringkörper kann mit Brinell besonders Gusseisen, Stahl und Aluminium geprüft werden.

Rockwell kann für viele Materialien verwendet werden. Aufgrund der hohen Prüfkräfte und der Eindringkörper besonders für große Proben geeignet.

Weitere Details über die Härteprüfung finden Sie auf der Struers Webseite:
http://www.struers.com/de-DE/Knowledge/Hardness-testing

8. Zusammenfassung

Härteprüfungen werden zur Bewertung von Materialien durchgeführt, zur Qualitätskontrolle in Herstellungsprozessen und in der Forschung und Entwicklung. Die zu verwendende Härteprüftechnik ist abhängig von der Anwendung. Der erforderliche Präparationsaufwand wird entsprechend der Materialeigenschaften und der Prüfkraft bestimmt.

Untersuchungen haben ergeben, dass Einbettmittel bei Vickers Härteprüfungen bis zu 30 kgf keinen signifikanten Einfluss nehmen, unabhängig davon, ob die Probe auf dem Prüftisch oder in einer Spannvorrichtung platziert wurde. Je geringer die Prüfkräfte, desto besser muss die Oberflächenpräparation sein. Es sollte berücksichtigt werden, dass weichere Materialien (kleiner als etwa 120 HV) anfälliger für Präparationsartefakte sind.

Application Note

Härteprüfung und Probenpräparation

Maria Lindegren, Struers ApS

Danksagung

Beispiel Schweißverbindung, Abbildung 20 und Tabelle 4:
freundlicherweise zur Verfügung gestellt vom Institut de Soudure, Frankreich

Peter Bucan, Struers ApS
Jean-Marie Boccalini, Struers S.A.S., Frankreich

Literaturverzeichnis

1. Tabor, D; “The Hardness of Metals”, Oxford University Press, 2007
2. Vander Voort, Georg F., “Metallography Principles and Practice”, ASM International, 1999
3. Palmqvist, S: ”Method for determining the toughness of brittle materials, particularly sintered carbides”, Jernkontorets annaler, Ausgabe 141, 1957
4. ASMinternational, Ausgabe 8
5. Rockwell: Maßgebliche Normen: ASTM E18 / ISO 6508 / JIS Z 2245
6. Brinell: Maßgebliche Normen: ASTM E10 / ISO 6506 / JIS Z 2243
7. Vickers: Maßgebliche Normen: ASTM E384 – Mikro Prüfkraftbereich – 10 g bis 1kg ASTM E92 – Makro Prüfkraftbereich - 1 kg bis 100 kg ISO 6507 – Mikro und Makro Prüfkraftbereiche JIS Z 2244
8. Knoop: Maßgebliche Normen: ASTM E384 / ISO 4545 / JIS Z 2251
9. Kay Geels, “Metallographic and Materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis and hardness testing”, ASTM International, 2006

Glossar

Ältere Bezeichnungen für Vickers Härteprüfungen sind VHN (Vickers Hardness Number) und DPN (Diamond-Pyramide hardness Number).

Knoop; eine ältere Bezeichnung ist KHN (Knoop Hardness Number).

Struers
Ensuring Certainty

Struers ApS
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

AUSTRALIA & NEW ZEALAND
Struers Australia
27 Mayneview Street
Milton QLD 4064
Australia
Phone +61 7 3512 9600
Fax +61 7 3369 8200
info.au@struers.dk

BELGIQUE (Wallonie)
Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

BELGIUM (Flanders)
Struers GmbH Nederland
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Telefoon +31 (10) 599 7209
Fax +31 (10) 5997201
netherlands@struers.de

CANADA
Struers Ltd.
7275 West Credit Avenue
Mississauga, Ontario L5N 5M9
Phone +1 905-814-8855
Fax +1 905-814-1440
info@struers.com

CHINA
Struers Ltd.
No. 1696 Zhang Heng Road
Zhang Jiang Hi-Tech Park
Shanghai 201203, P.R. China
Phone +86 (21) 6035 3900
Fax +86 (21) 6035 3999
struers@struers.cn

CZECH REPUBLIC & SLOVAKIA
Struers GmbH Organizační složka
vědeckotechnický park
Přílepská 1920,
CZ-252 63 Roztoky u Prahy
Phone +420 233 312 625
Fax +420 233 312 640
czechrepublic@struers.de
slovakia@struers.de

DEUTSCHLAND
Struers GmbH
Carl-Friedrich-Benz-Straße 5
D-47877 Willich
Telefon +49 (0) 2154 486-0
Fax +49 (0) 2154 486-222
verkauf@struers.de

FRANCE
Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F-94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

HUNGARY
Struers GmbH
Magyarországi Fióktelep
Tatai ut 53
2821 Gyermely
Phone +36 (34) 880546
Fax +36 (34) 880547
hungary@struers.de

IRELAND
Struers Ltd.
Unit 11 Evolution@ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel. +44 0845 604 6664
Fax +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

ITALY
Struers Italia
Via Monte Grappa 80/4
20020 Arese (MI)
Tel. +39-02/38236281
Fax +39-02/38236274
struers.it@struers.it

JAPAN
Marumoto Struers K.K.
Takara 3rd Building
18-6, Higashi Ueno 1-chome
Taito-ku, Tokyo 110-0015
Phone +81 3 5688 2914
Fax +81 3 5688 2927
struers@struers.co.jp

NETHERLANDS
Struers GmbH Nederland
Zomerdijk 34 A
3143 CT Maassluis
Telefoon +31 (10) 599 7209
Fax +31 (10) 5997201
netherlands@struers.de

NORWAY
Struers ApS, Norge
Sjøskogenveien 44C
1407 Vinterbro
Telefon +47 970 94 285
info@struers.no

ÖSTERREICH
Struers GmbH
Zweigniederlassung Österreich
Betriebsgebiet Puch Nord 8
5412 Puch
Telefon +43 6245 70567
Fax +43 6245 70567-78
austria@struers.de

POLAND
Struers Sp. z o.o.
Oddział w Polsce
ul. Jasnogórska 44
31-358 Kraków
Phone +48 12 661 20 60
Fax +48 12 626 01 46
poland@struers.de

ROMANIA
Struers GmbH, Sucursala Bucuresti
Str. Preciziei nr. 6R
062203 sector 6, Bucuresti
Phone +40 (31) 101 9548
Fax +40 (31) 101 9549
romania@struers.de

SCHWEIZ
Struers GmbH
Zweigniederlassung Schweiz
Weissenbrunnenstraße 41
CH-8903 Birmensdorf
Telefon +41 44 777 63 07
Fax +41 44 777 63 09
switzerland@struers.de

SINGAPORE
Struers Singapore
627A Aljunied Road,
#07-08 BizTech Centre
Singapore 389842
Phone +65 6299 2268
Fax +65 6299 2661
struers.sg@struers.dk

SPAIN
Struers España
Camino Cerro de los Gamos 1
Building 1 - Pozuelo de Alarcón
CP 28224 Madrid
Teléfono +34 917 901 204
Fax +34 917 901 112
struers.es@struers.es

SUOMI
Struers ApS, Suomi
Hietalahdenranta 13
00180 Helsinki
Puhelin +358 (0)207 919 430
Faksi +358 (0)207 919 431
finland@struers.fi

SWEDEN
Struers Sverige
Box 20038
161 02 Bromma
Telefon +46 (0)8 447 53 90
Telefax +46 (0)8 447 53 99
info@struers.se

UNITED KINGDOM
Struers Ltd.
Unit 11 Evolution @ AMP
Whittle Way, Catcliffe
Rotherham S60 5BL
Tel. +44 0845 604 6664
Fax +44 0845 604 6651
info@struers.co.uk

USA
Struers Inc.
24766 Detroit Road
Westlake, OH 44145-1598
Phone +1 440 871 0071
Fax +1 440 871 8188
info@struers.com

09.2017 / 62240510. Printed in Denmark