

Reproduzierbarkeit der Härtetiefenbestimmung CHD

Arnold Horsch, Arnold Horsch e.K., Berghauser Straße 62, 42859 Remscheid
www.arnold-horsch.de – info@arnold-horsch.de

Die Ergebnisse der Einsatzhärtung sind für die verwendeten Komponenten von grundlegender Bedeutung. Kaum eine andere Prüfung eines Wärmebehandlungsergebnisses weist so viele Inkonsistenzen und Diskussionen über die Prüfergebnisse auf wie bei der Bestimmung der Härtetiefe. Die Faktoren, die das Prüfergebnis beeinflussen, werden bei der Betrachtung der Ergebnisse häufig nicht berücksichtigt. Erste Ergebnisse eines Ringversuches wurden bereits 2016 vorgestellt, bereits hier wurde eine erhebliche Streuung dokumentiert.

Der 2016 durchgeführte Ringversuch wurde erweitert und unter besonderer Berücksichtigung automatischer Bildauswertungssysteme ausgewertet.

Die grundlegenden Fehlerquellen und Einflüsse auf das Prüfergebnis werden dargestellt.

The results of case hardening are of fundamental importance for the components used. Hardly any other test of a heat treatment result has as many inconsistencies and discussions about the test results as there are in the hardness depth determination. The factors influencing the test result are often not taken into account when considering the test result. First results were already presented in 2016 by means of an interlaboratory test, which documented considerable scatter of the results. The interlaboratory test already carried out in 2016 was expanded and considered with special consideration of automatic image evaluation systems.

The basic sources of error and influences on the test result are shown.

1. Einleitung

Die Bestimmung der Randhärtetiefe ist für die Qualitätsbestimmung des Wärmebehandlungsergebnisses des Einsatzhärtens von elementarer Bedeutung. Bei kaum einer anderen Prüfung eines Wärmebehandlungsergebnisses gibt es so viele Unstimmigkeiten und Diskussionen über die Prüfergebnisse, wie bei der Randhärtetiefenbestimmung.

Die Einflußgrößen auf das Prüfergebnis werden oftmals bei der Betrachtung des Prüfergebnisses, nicht berücksichtigt. Mittels eines Ringversuches sollten mögliche Streuungen an realen Proben ermittelt werden. Die Richtigkeit der Prüfergebnisse der Teilnehmer wurde nicht betrachtet. Ziel des Ringversuches war es, nur Streuungen darzustellen, wie sie bei täglichen Messungen in verschiedenen Laboren auftreten. Eine detaillierte Betrachtung der Einflußgrößen auf das Prüfergebnis wurde ebenfalls durchgeführt.

2. Normung

Zur Bestimmung der Randhärtetiefe sind folgende Normen bei der Prüfung zu beachten:

- DIN EN ISO 2639 [1] Stahl-Bestimmung der Einsatzhärtungstiefe
- DIN EN ISO 4885 [2] Eisenwerkstoffe – Wärmebehandlung - Begriffe
- DIN EN ISO 6507 T. 1-3 [3] Metallische Werkstoffe-Härteprüfung nach Vickers
- DIN EN ISO 15787 [4] Technische Produktdokumentation – Wärmebehandelte Teile aus Eisenwerkstoffen - Darstellung und Angaben

2.1. DIN EN ISO 2639 – Stahl-Bestimmung der Einsatzhärtungstiefe – CHD ^[1]

2.1.1. Anwendungsbereich Kapitel 1 ^[1]

Diese Internationale Norm definiert die Einsatzhärtungstiefe und legt Verfahren zur Bestimmung dieser Tiefe bei Stahl fest.

Sie gilt für-

- a. die Einsatzhärtung durch Aufkohlen und Karbonitrieren;
- b. Teile, die nach der endgültigen Wärmebehandlung in einem Abstand von der Oberfläche, der dem Dreifachen der Einsatzhärtungstiefe entspricht, eine Härte von weniger als 450 HV 1 aufweisen.

Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, wird die Einsatzhärtungstiefe durch besondere Vereinbarung festgelegt.

Bei Stählen, bei denen das Werkstück in einem Abstand von der Oberfläche gleich der dreifachen Einsatzhärtungstiefe eine Härte aufweist, die größer als 450 HV 1 ist, kann dieses Bewertungsmerkmal ebenfalls angewendet werden, sofern ein Härtegrenzwert für die Einsatzhärtungstiefe gewählt wird, der jeweils in Stufen von 25 Einheiten größer als 550 HV 1 ist [1] [2].

2.1.2. Härteverlauf Kapitel 5.3.3 [1]

Der Abstand zwischen zwei benachbarten Eindrücken (S) darf nicht weniger als das 2 1/2fache ihrer Diagonale betragen (siehe Bild 1 [1]). Die Differenz zwischen den aufeinander folgenden Abständen der einzelnen Eindrücke von der Oberfläche (z. B. a2 - a1) darf nicht mehr als 0,1 mm betragen und die kumulativen Abstände von der Oberfläche sind mit einer Genauigkeit von ± 25 µm zu messen. Die Diagonalen der Eindrücke sind mit einer Genauigkeit von ± 0,5 µm zu messen.

Sofern zwischen den beteiligten Parteien nicht anders vereinbart, sind die Eindrücke mit einer Vickers-Härte HV 0,1 (0,98 N) bis HV (9,8 N) oder mit einer Knoop-Härte unter den jeweiligen Bedingungen aufzubringen und die Messungen mit einem optischen Gerät (bildgebendes System) mit mindestens 400facher Vergrößerung durchzuführen.

2.2. DIN EN ISO 6507 Teil 2 [3]

In diesem Teil der Norm wird die zulässige Kalibrierabweichung und die Wiederholgenauigkeit der Härteprüfmaschine festgelegt, diese beträgt entsprechend der Prüflast, nach Tabelle 4+5[1]:

Tabelle 5 — Maximal zulässige prozentuale systematische Abweichung des HV

Mittlere Diagonallänge \bar{d} mm	Maximal zulässige prozentuale systematische Abweichung des HV b_{rel} der Prüfmaschine $\pm\%HV$
$0,02 \leq \bar{d} < 0,14$	$0,21/\bar{d} + 1,5$
$0,14 \leq \bar{d} \leq 1,4$	3

Tabelle 4 - Maximal zulässige relative Wiederholpräzision

Vickers-Härte der Härtevergleichsplatte	Maximal zulässige relative HV-Wiederholpräzision der Prüfmaschine r_{rel} % HV		
	HV 5 bis HV 100	HV 0,2 bis < HV5	< HV 0,2
HV ≤ 250	6,0	12,0	18,0
HV > 250	4,0	8,0	12,0
Anmerkung	Werkstoffe mit geringer Härte weisen bei der Wiederholpräzision häufiger höhere Werte auf als Werkstoffe mit höherer Härte		

Verfahren	Prüflast	Zulässige Grenzabweichung	Wiederholgenauigkeit
CHD	HV 1	bei 550 HV = ± 28HV	44 HV
Prüfung auf einer Härtevergleichsplatte nach Teil 3 der Norm, nicht am Bauteil.			

3. Einflüsse auf das Prüfergebniss

Es gibt eine Vielzahl von Einflussgrößen, die das Prüfergebniss der Härtetiefenmessung beeinflussen können. Dies sind im wesentlichen:

- zulässige Kalibrierabweichung der Härteprüfmaschine
- Probleme bei der Beleuchtung der Härteprüfmaschine
- Abweichungen aus dem Verfahrenweg des Kreuztisches, zulässiger Fehler bei der Härteverlaufsprüfung $\pm 0,025\text{mm}$, DIN EN ISO 2639
- falsche Startpunktsetzung des Härteverlaufes, unscharfe Kante im Mikroskopbild
- Schwingungen während der Messung des Härteverlaufes
- Streuungen aus der Wärmebehandlung im Bauteil oder in der Wärmebehandlungscharge
- Streuungen innerhalb des Bauteiles aus der Bearbeitung und den Werkstoffeinflüssen
- falsche metallographische Probenvorbereitung
- oftmals ist eine Kombination verschiedener Fehler vorhanden.

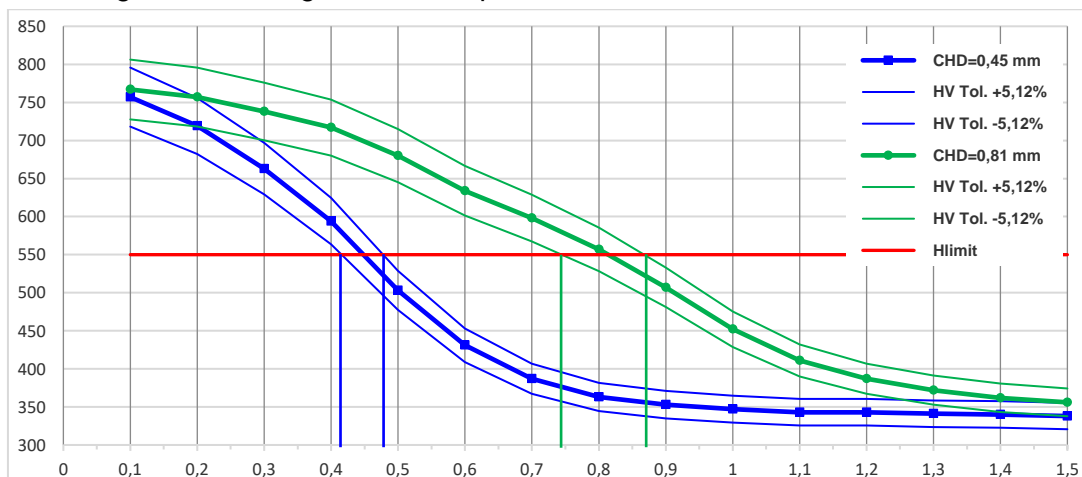
3.1. Kalibrierabweichung der Härteprüfmaschine

Wird die nach DIN EN ISO 6507 T.2 zulässige Kalibrierabweichung der Härteprüfmaschine in die Härteverlaufdiagramme der geprüften Proben eingetragen, ergeben sich zulässige Abweichungen aus der Härteprüfmaschine auf die CHD Mittelwertskurve von

Verfahren	Wert	Range ISO 6507		Range ISO 6507 $\pm 25\mu\text{m}$		Bild
CHD	0,45 mm	0,065 mm	$\approx 14\%$	0,115 mm	$\approx 26\%$	1
CHD	0,81 mm	0,130 mm	$\approx 16\%$	0,180 mm	$\approx 22\%$	1

nur aus den zulässigen Kalibrierabweichungen der Härteprüfmaschine.

Bild 1 - Zulässige Abweichungen der Härteprüfmaschine auf die CHD Mittelwertskurve

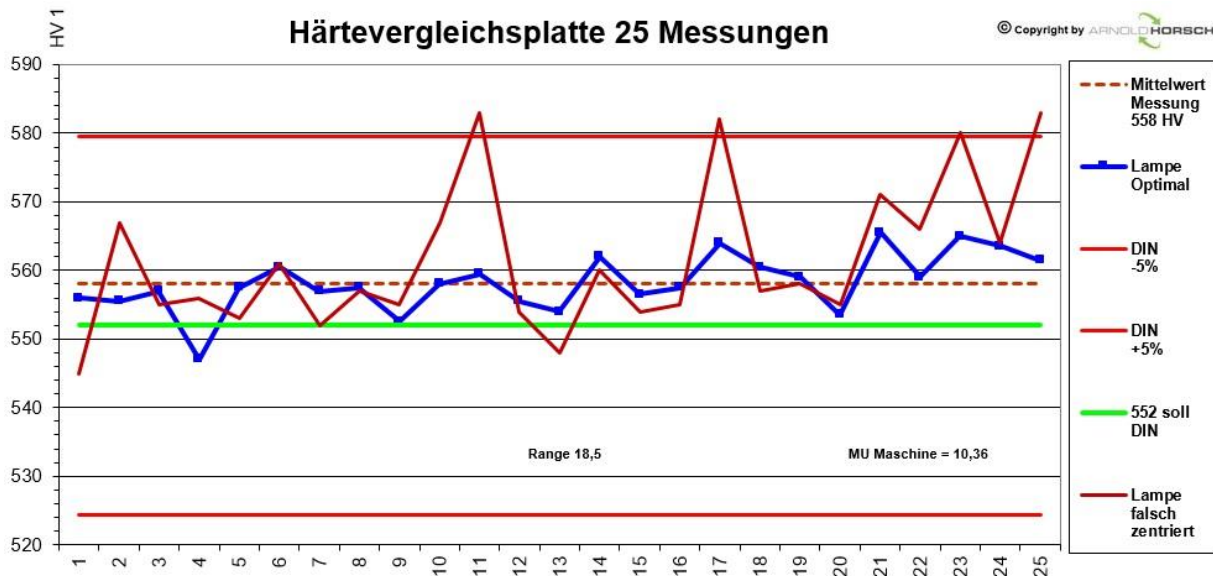


3.2. Beleuchtung der Härteprüfmaschine

Ist die Beleuchtung an einer Härteprüfmaschine nicht korrekt eingestellt, z.B. nach einem Glühlampenwechsel, kann es bei mit Bildanalysesystemen arbeitenden Härteprüfmaschinen zu deutlichen Abweichungen im Prüfergebniss kommen.

Im Bild 2 ist die automatische Auswertung an einer Härtevergleichsplatte wiedergegeben. Dieselben Härteeindrücke wurden einmal mit optimal zentrierter Beleuchtung und einmal mit dezentrierter Beleuchtung gemessen. Gut erkennbar bei der roten Linie sind die teilweise um 20HV abweichenden Härtewerte von den optimal ausgeleuchteten Härtewerten der blauen Linie.

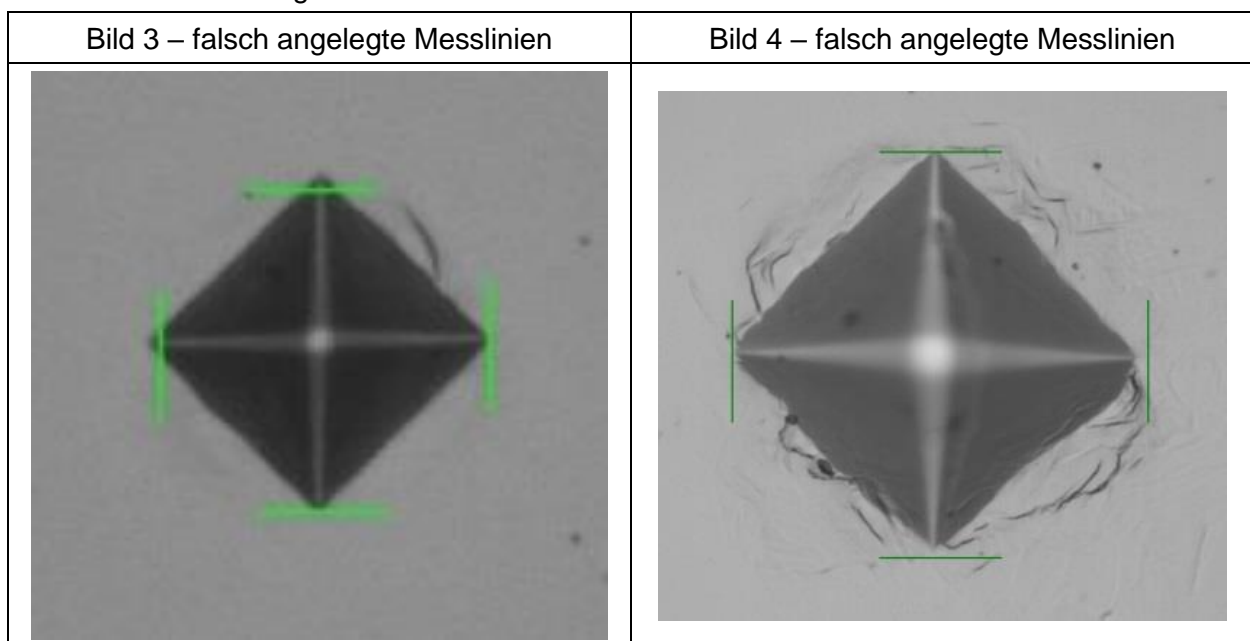
Bild 2 – Einfluss fehlerhafter Beleuchtung



Bei optimaler Beleuchtung - wie in diesem Beispiel - kann eine Härteprüfmaschine mit sehr kleinen Streuungen und Abweichungen vom Sollwert prüfen, wenn die Last usw. stimmen.

3.3. Auswertesysteme

Nicht alle Bildauswertesysteme, die eingesetzt werden, erfüllen die Ansprüche, die an solche Systeme zu stellen sind. Das Anlegen der Messlinien, auch bei optimal präparierten Proben, lässt teilweise deutlich Mängel erkennen. Bild 3+4 geben den Fehler von zwei eingesetzten Systemen wieder. Aufgrund der Vielzahl der Prüfungen in dem Überwachungslabor einer Härterei muss davon ausgegangen werden, dass nicht alle Messungen gegengeprüft werden können und somit fehlerhafte Auswertungen stattfinden.



3.4. Werkstoffeinfluss

Sehr oft wird unterschätzt, welchen Einfluss Ungängen im Werkstoff auf das Prüfergebnis haben können. Dabei ist eine starke Zeiligkeit - wie in Bild 4 wiedergegeben - ein Problem. Je nachdem, an welcher Stelle in einem bearbeiteten Bauteil hier die Randhärte bestimmt wird, kommt es aufgrund der Konzentrationsunterschiede in den Legierungselementen zu mehr oder weniger starken Streuungen im Ergebnis der Randhärtemessung, Werkstoffe sind nicht perfekt.

Bild 4^[5]

Seigerungs- und Schweißnahtbildung 1.7225, Längsschliff Rand-Kern-Rand

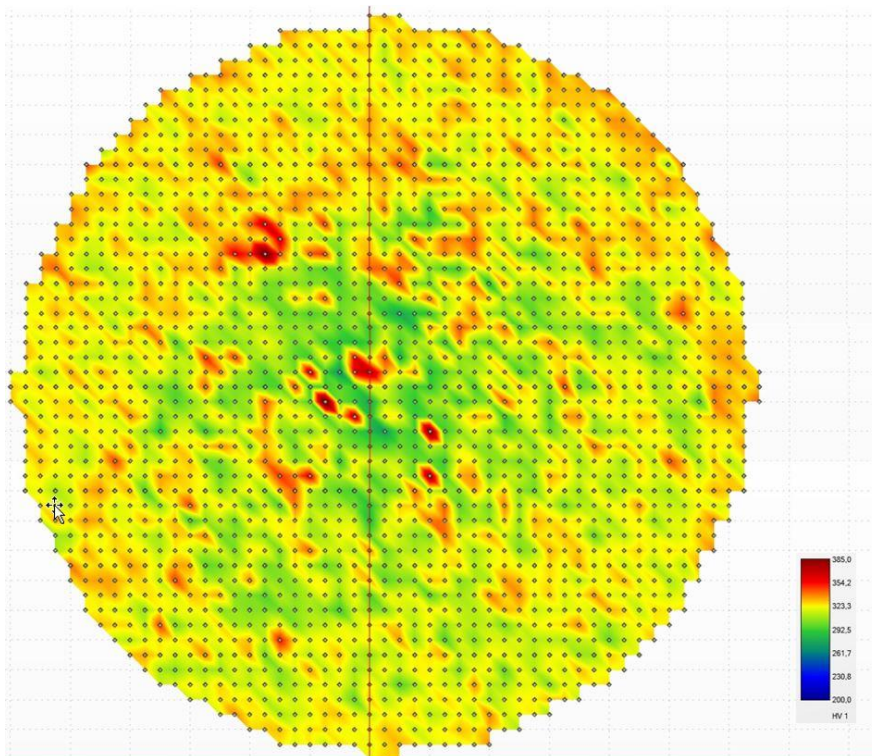


3.4.1. Härtestreuung an dem untersuchten Material

3.4.1.1. Mapping Grundwerkstoff gehärtet

An einer der untersuchten Proben wurde ein Härtemapping über den gesamten Kernbereich der Probe nach dem Härten durchgeführt. Bild 5 gibt wieder, wie diese Ergebnisse ausgefallen sind, es wurden Werte von 270-411 HV gemessen.

Bild 5 – Härtemapping des Kernbereiches der Probe CHD 0,45 mm



3.4.1.2. Mapping CHD Bereich

Um die Einflüsse des Werkstoffes auch im Bereich der Grenzhärte 550 HV1 darzustellen, wurde bei beiden untersuchten Härtetiefen ebenfalls ein Härtemapping in einem Teilsegment des Umfanges durchgeführt, Bild 6+7. Auch hier ist gut erkennbar, dass teils erhebliche Abweichungen der CHD vorhanden sind.

Bild 6– Härtemapping in einem Teilsegment des Umfanges CHD 0,45 mm

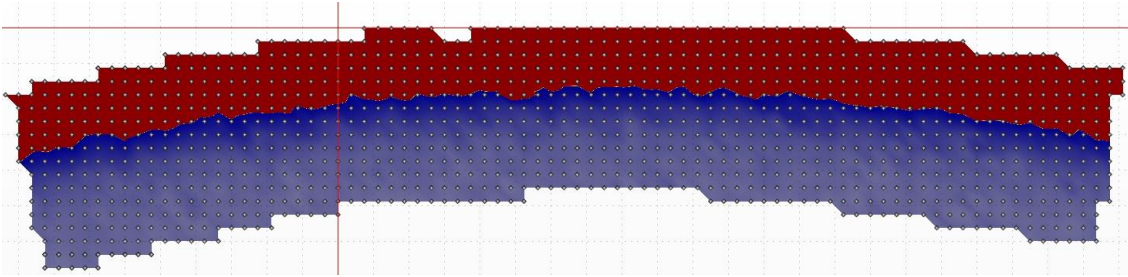
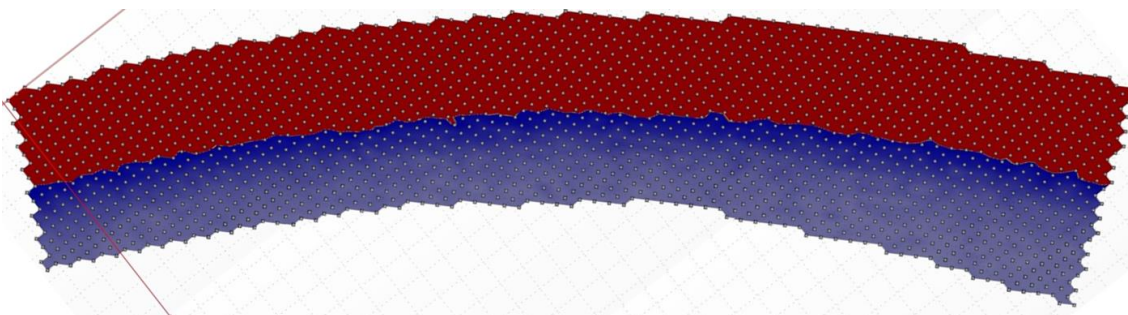


Bild 7– Härtemapping in einem Teilsegment des Umfanges CHD 0,81 mm



4. Ringversuch

4.1. Teilnehmer

7 Labore mit insgesamt 12 Härteprüfmaschinen von 5 Herstellern nahmen am Ringversuch teil. Alle Labore prüfen in der täglichen Praxis Härteverläufe zur Härtetiefenbestimmung von Einsatzhärtungen.

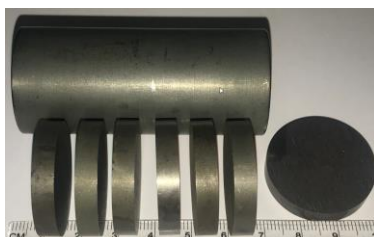
4.2. Probematerial

- Werkstoff 16MnCr5 +FP, 1.7131 +FP
- Bolzen, vor dem Härten gedreht und geschliffen auf $\varnothing 30$ mm x 70 mm
- 2 Wärmehandlungen
 - Einsatzgehärtet + angelassen, CHD=0,4-0,5 mm, 650^{+100} HV30
 - Einsatzgehärtet + angelassen, CHD=0,8-0,9 mm, 58^{+4} HRC

4.3. Probenpräparation

- Getrennt mittels Drahterodieren, nachfolgend 0,5 mm, von der Prüfseite abgeschliffen, Bild 8.
- Eingebettet und präpariert, alle 6 Proben einer Serie wurden im gleichen Probenhalter präpariert und während des gesamten Versuches nicht neupräpariert. Somit war der Einfluss der Präparation am besten ausgeschlossen.

Bild 8 – Prüfbolzen getrennt



4.4. Durchführung der Härteverlaufsprüfung

- Alle Teilnehmer habe die Proben mit der gleichen Präparation geprüft
- Jedes Labor machte 3 Härteverläufe an jeder Probe um 120° versetzt,
- Alle Messungen wurden mit Vollautomatischen Härteprüfmaschinen ermittelt
- Prüfung unter Produktionsbedingungen
- Prüfung sollte nach DIN EN ISO 2639 erfolgen
- Insgesamt wurden 252 Härteverläufe auf jeder Probe durchgeführt

4.5. Zum Einsatz gekommene Härteprüfmaschinen

Bild 8-12 Zum Einsatz gekommene Härteprüfmaschinen

				
Bild 8	Bild 9	Bild 10	Bild 11	Bild 12
Emcotest	ESI Prüftechnik	QNESS	Leco Instrumente	PRECIDUR

5. Prüfergebnisse

5.1. Allgemeines

Auffällig war, dass nur eines der teilnehmenden Labore die CHD normgerecht mit Kernhärte und normgerechten Abständen der Härteeindrücke durchgeführt hat.

- Nur ein Labor hat normgerecht ausgewertet
 - *Härteverlauf mit Ermittlung der Kernhärte*
- 2 Labore haben die Randabstände mehrmals nicht eingehalten, es wurden Abstände ausgelassen
- 1 Labor hat Proben verloren
- Alle Labore haben die Härteverläufe versetzt durchgeführt

5.2. Oberflächenhärte der Proben

Einsatzgehärtet + angelassen, CHD=0,4-0,5 mm, 650 ⁺¹⁰⁰ HV30	755 - 760 - 742 - 746 - 761
Einsatzgehärtet + angelassen, CHD=0,8-0,9 mm, 58 ⁺⁴ HRC	61,5 - 61,0 - 61,4 - 62,1 - 62,1

Alle Oberflächenhärtewerte lagen an der oberen Toleranzgrenze.

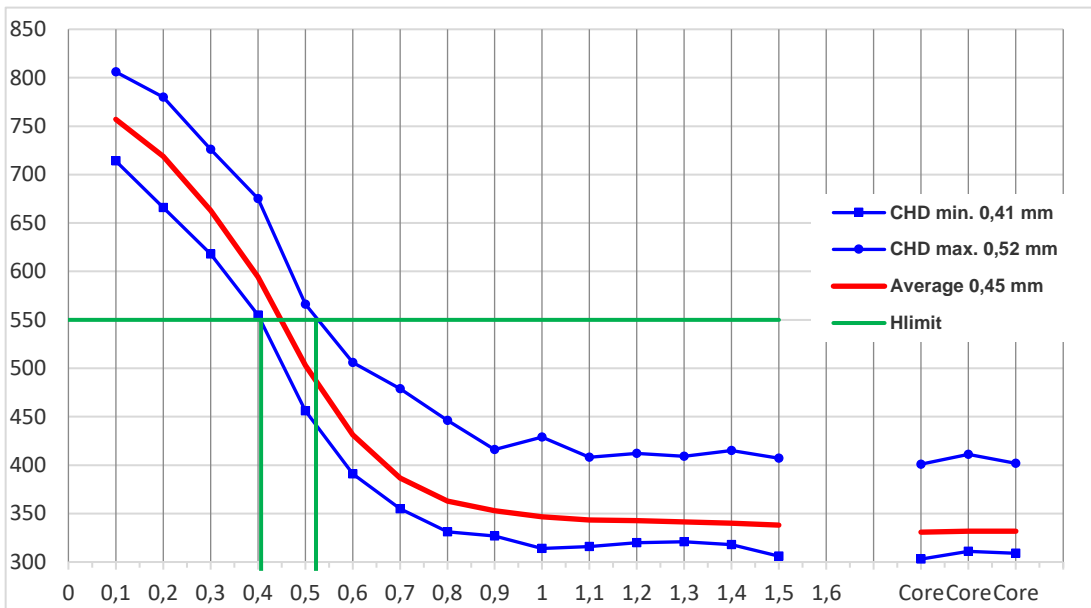
5.3. Prüfergebnisse einsatzgehärtete Proben

5.3.1. CHD 0,45 mm

Bild 13 gibt die Ergebnisse der CHD 0,45mm wieder.

Mittelwert alle Messungen CHD 0,45 mm - Range 0,11 mm ≈ 24 %

Bild 13 - CHD 0,45 mm

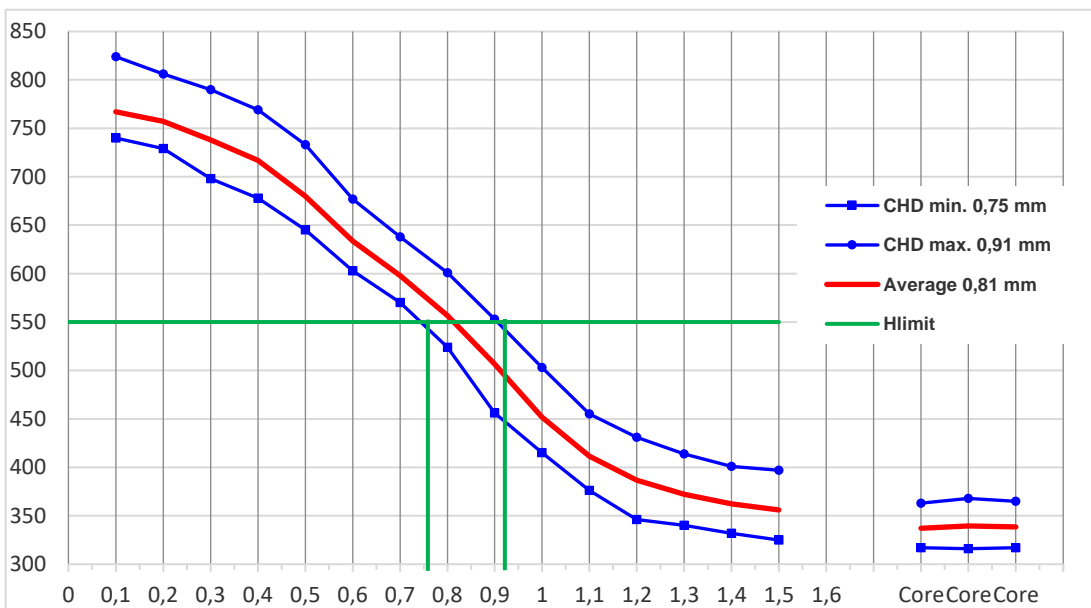


5.3.2. CHD 0,81 mm

Bild 14 gibt die Ergebnisse der CHD 0,81mm wieder.

Mittelwert alle Messungen CHD 0,81 mm - Range 0,16 mm \approx 20 %

Bild 14 - CHD 0,81 mm



5.4. Auswertung

5.4.1. Einflüsse auf das Prüfergebnis

Wie in Kap.3.1 dargestellt, können die Einflüsse auf das Prüfergebnis der Härtetiefenbestimmung aus den zulässigen Abweichungen der Prüfsysteme erheblich sein. Die zulässigen Summenfehler an den geprüften Proben betragen:

Verfahren	Wert	Range ISO 6507		Range ISO 6507 ± 25µm		Bild
CHD	0,45 mm	0,065 mm	14%	0,115 mm	≈ 26%	1
CHD	0,81 mm	0,130 mm	16%	0,180 mm	≈ 22%	1

5.4.2. Gemessene Proben

Die im Ringversuch geprüften Proben liegen mit ihren Ergebnissen besser als der zulässige Fehler der Prüfmaschinen. Jedoch zeigt sich, dass die Spannweite aller Labore zusammen erheblich ist.

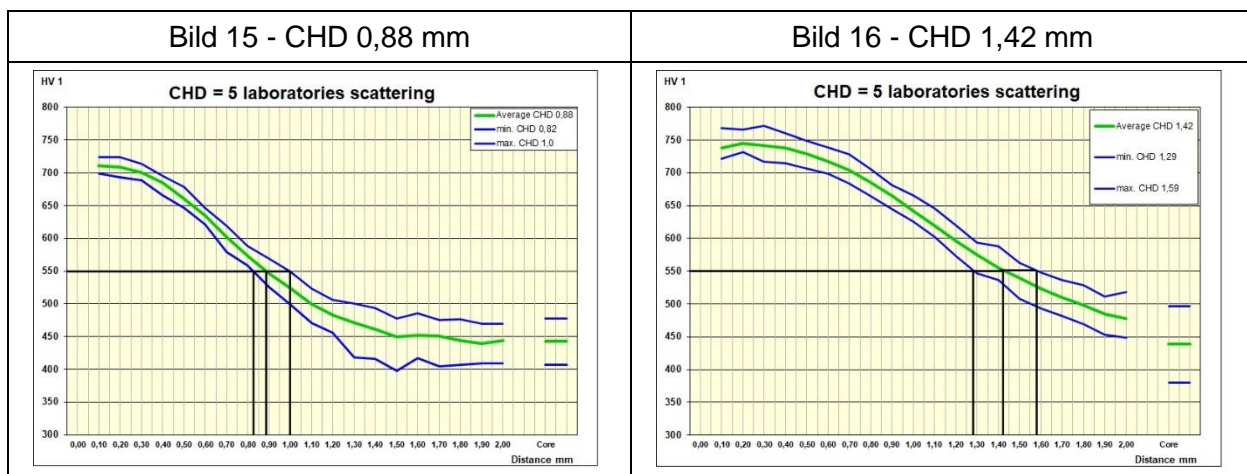
Verfahren	Mittelwert	Range		Bild
CHD	0,45 mm	0,11 mm	≈ 24%	13
CHD	0,81 mm	0,16 mm	≈ 20%	14

6. Ergebnisse aus anderen Versuchen

6.1. Ringversuch 2016

Bereits 2016^[6] wurde ein Ringversuch mit 5 Laboren und zwei verschiedenen Härtetiefen mit dem folgenden Ergebnis durchgeführt.

Verfahren	Mittelwert	Range		Bild
CHD	0,88 mm	0,18 mm	≈ 20%	15
CHD	1,42 mm	0,30 mm	≈ 21%	16

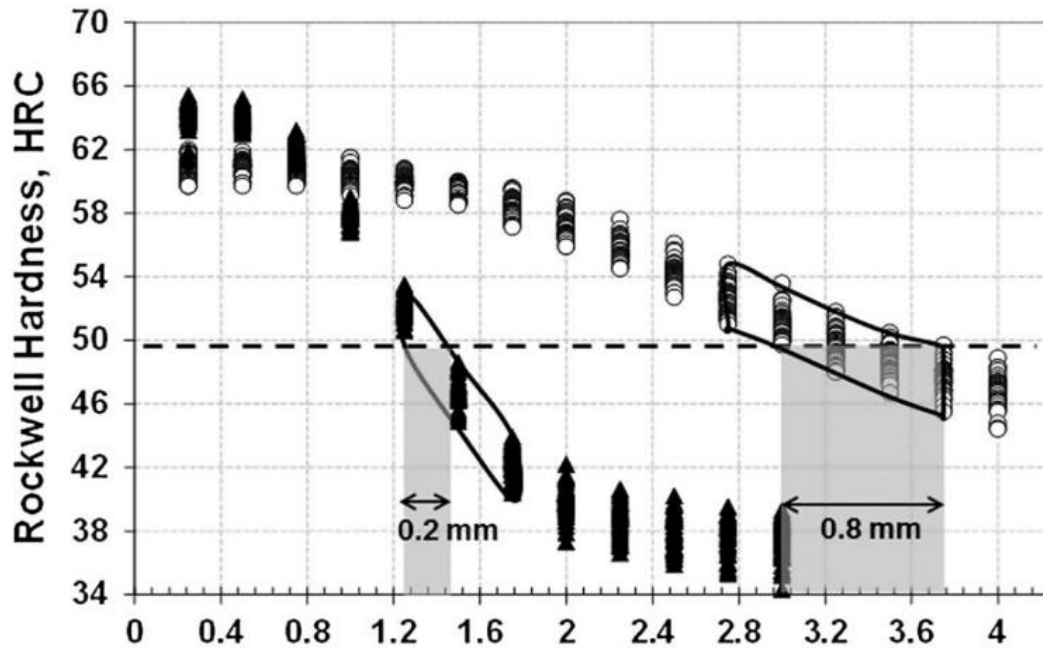


6.2. Ringversuch Caterpillar^[7]

2014 hat Caterpillar mit 3 internen Laboren (Bild 17) ebenfalls einen Ringversuch durchgeführt. Die Ergebnisse dort sind mit den von uns gefundenen Ergebnissen vergleichbar. Grundsätzlich ist zu beachten, dass je weniger Labore an einem Vergleich teilnehmen, umso kleiner die Streuung wird.

Verfahren	Mittelwert	Range		Bild
CHD	1,36 mm	0,2 mm	≈ 15%	17
CHD	3,38 mm	0,8 mm	≈ 23%	17

Bild 17



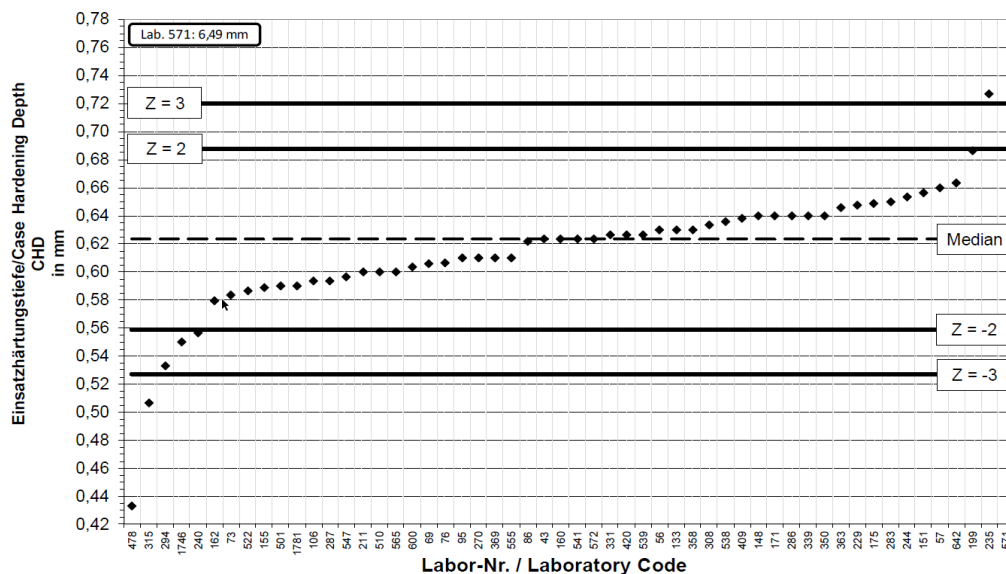
6.3. Eignungsprüfungen / Ringversuchen IfEP^[8]

Das Institut für Eignungsprüfung hat 2018 die Ergebnisse eines Ringversuches zur CHD Messung vorgestellt. An der Eignungsprüfung nahmen 54 Laboratorien aus 14 Nationen teil. 42 Teilnehmer gaben an, zum Zeitpunkt der Eignungsprüfung eine Akkreditierung nach (DIN) EN ISO/IEC 17025 zu besitzen. Bild 18 gibt die Ergebnisse dieses Ringversuches wieder. Auch hier ist deutlich zu sehen, dass der Range der Ergebnisse $\approx 30\%$ beträgt.

Verfahren	Mittelwert	Range		Bild
CHD	0,623 mm	0,193 mm	$\approx 30\%$	18

Ausreißer mit 0,73 mm, 0505 mm und 0,43 mm wurden nicht mit ausgewertet

Bild 18



7. Zusammenfassung

Die im Ringversuch geprüften Proben liegen mit Ihren Ergebnissen besser als der zulässige Fehler der Prüfmaschinen. Jedoch zeigt sich, dass die Spannweite aller Labore zusammen > 20% ist und somit eine Größe darstellt, die nicht zu vernachlässigen ist.

Ursachen können die zulässige Kalibrierabweichung der Härteprüfmaschine, der Einfluss des Probenmaterials sowie der Probenpräparation und der Auswertesoftware sein.

Anhand der Prüfergebnisse kann dargestellt werden, dass viele Diskussionen über die Prüfergebnisse nicht immer das Ergebnis der Wärmebehandlung sind, sondern Diskussionen über die Streuung der Prüfgeräte und Probenmaterialien.

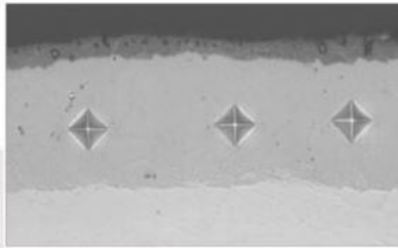
Bei kritischen Bauteilen ist immer eine sorgfältige Festlegung der Prüfparameter und der prüfbaaren Bauteiltoleranzen erforderlich. Im Streitfall ist eine genaue Betrachtung des Prüfsystems vorzunehmen. Eine Schiedsmessung in einem akkreditierten Labor ist hier, wie der Ringversuch des IfEP zeigt, im erwarteten Ergebnis nicht besser.

Die Teilnahme an Eignungsprüfungen / Ringversuchen wird empfohlen.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 2639:2003-04, Stahl- Bestimmung und Prüfung der Einsatzhärtungstiefe
- [2] DIN EN ISO 4885:2018-07, Eisenwerkstoffe – Wärmebehandlung - Begriffe
- [3] DIN EN ISO 6507:2018-07, Teil 1-3, Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers
- [4] DIN EN ISO 15787:2018-08, Technische Produktdokumentation – Wärmebehandelte Teile aus Eisenwerkstoffen – Darstellung und Angaben
- [5] <http://metallograph.de/>
- [6] *Arnold Horsch - Arnold Horsch e.K., Remscheid, Thomas Asam, TAZ GmbH, Eurasburg, Vortrag auf dem HK2016, Reproduzierbarkeit der Härtetiefenbestimmung CHD - SHD - NHD*
- [7] Olga K. Rowan, Gary D. Keil, and Tom E. Clements, Analysis of Hardened Depth Variability, Process Potential, and Measurement Error in Case Carburized Components, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, Dec. 2014
- [8] Eignungsprüfung, Einsatzhärtungstiefe CHD 1714-2, CHD-2017, Abschlussbericht 01. Juni 2018, Institut für Eignungsprüfung GmbH, Daimlerstraße 8, D-45770 Marl, ifep@online.de

In 2020 werden noch die folgenden Seminare veranstaltet:



Härteprüfung in Theorie und Praxis Remscheid

08. + 09. Dezember 2020

Härteprüfung in Theorie und Praxis

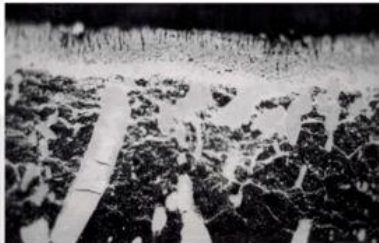
- Remscheid
- 08.+09. Dezember 2020

noch Plätze frei

Anmeldung unter

www.arnold-horsch.de/seminare

Wegen Corona max. 4 Teilnehmer



Metallographie in der Praxis Teil 1

Remscheid

23. + 24. November 2020

Metallographie in der Praxis Teil 1

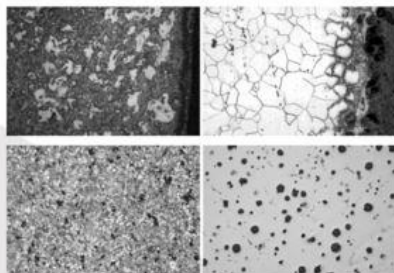
- Remscheid
- 23.+24. November 2020

noch Plätze frei

Anmeldung unter

www.arnold-horsch.de/seminare

Wegen Corona max. 4 Teilnehmer



Metallographie in der Praxis Teil 2

Remscheid

25. + 26. November 2020

Metallographie in der Praxis Teil 1

- Remscheid
- 25.+26. November 2020

noch Plätze frei

Anmeldung unter

www.arnold-horsch.de/seminare

Wegen Corona max. 4 Teilnehmer

Bei mehr Anmeldungen als Plätze werden wir weitere Termine einfügen.