

Gero GmbH		
Schüro		

WB-Aktuell

Fachreferat: Vortrag am 07.03.2001 zum 19. Seminar in Bad Kissingen

(Die Bilder wurden zugunsten schnellerer Downloadzeiten entfernt)

Einleitung

Sehr geehrte Damen und Herren,

Die Firmen Gero und Schüro beschäftigen sich ausschließlich mit der Induktivhärtung. Wir härten im Wesentlichen kleinere Massenteile für die Autoindustrie, darunter auch dokumentationspflichtige Sicherheitsteile. Wir härten bis zu 280.000 Teile täglich. Beide Bedingungen - Sicherheitsteile und hohe Stückzahlen - setzen voraus, dass der Maschinenpark so ausgerüstet ist, dass maschinenbedingte Abweichungen von den Sollwerten, schleichende Veränderungen der Parameter, sowie Streuung der Parameter in ihren Auswirkungen auf die gehärteten Teile so niedrig werden, dass alle gehärteten Werkstücke mit den Eigenschaften Oberflächenhärte, Einhärtetiefe, Härteverlauf, Härtezonenlänge, Auslauf der Härtezonen und Gefüge innerhalb der Toleranzgrenzen liegen und auch im Verlauf der Fertigung einer Charge innerhalb der Toleranz bleiben. Diese tatsächliche Güte in Vergleich zur Spezifikation des Teiles nennt man Prozessfähigkeit. Sie beinhaltet das Zusammenwirken von Personal, Maschinen und Einrichtungen, Rohmaterial, Methoden und Arbeitsumwelt, die Maschinenfähigkeit untersucht dagegen nur die Maschinenparameter wie Wegmessung, Heizzeiten, Leistung, besser Energiemenge, Abschreckmittelmenge und Temperatur im Vergleich zur Spezifikation der Parameter.

Ich spreche deswegen solange über Prozess- und Maschinenfähigkeit, weil die beste Prüfmethode nicht wirkt, wenn der Prozess nicht gesichert ist.

Gero GmbH		
Schüro		

Härteprüfung

Bevor wir uns über Maschinenfähigkeiten unterhalten, müssen wir über die Prüfverfahren mit ihren Fehlermöglichkeiten sprechen. Für die klassischen Härteprüfverfahren gelten folgende Normen:

Brinell	DIN EN ISO 6506 Teil 1 ... 3 Ausgabe Jan. 1998
Vickers	DIN EN ISO 6507 Teil 1 ... 3 Ausgabe Okt. 1999
Rockwell	DIN EN ISO 6508 Teil 1 ... 3 Ausgabe Okt. 1999

Diese Normen sind immer unterteilt in:

Teil 1	Prüfverfahren
Teil 2	Prüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen
Teil 3	Kalibrierung von Härtevergleichsplatten

Wichtige Änderungen/Ergänzungen in den Normen:

Brinell	es sind nur noch Hartmetallkugeln zugelassen, Kennzeichnung der Härte: HBW
Vickers	die Mikrohärtel HV0,01 ... HV0,02 wurde neu aufgenommen
Rockwell	die Dicke von Härtevergleichsplatten wird mit mind. 12 mm empfohlen

Die Härtevergleichsplatten werden beispielsweise beim Materialprüfungsamt NRW in Dortmund kalibriert und mit DKD-Kalibrierzeichen ausgeliefert.

Gero GmbH		
Schüro		

Überprüfung von Härteprüfmaschinen

Die Normen empfehlen eine **jährliche** direkte Überprüfung der Härteprüfmaschinen.

Unter „**direkter Überprüfung**“ versteht man:

Prüfung der Prüfkraft auf zuverlässige Abweichung $\pm 1\%$

Prüfung des Eindringkörpers auf maßliche Abweichungen

Prüfung der Messeinrichtung auf gefordertes Auflösungsvermögen

Prüfung des Prüfzyklus auf zulässige Abweichung der Belastungsdauer: $\pm 0,5 \dots \pm 1s$.

Diese Prüfungen können durch den Service des Härteprüfmaschinen-Herstellers oder durch DKD-akkreditierte Service-Unternehmen durchgeführt werden.

In der Praxis treten bei der Härteprüfung, auch an Härtevergleichsplatten Streuungen auf. Das muss bedacht werden, wenn über Maschinen- oder Prozessfähigkeit diskutiert oder bestimmte Werte (C_{mk} bzw. C_{pk} -Werte) vorgegeben werden.

Bei der Vickersprüfung gibt die Norm DIN EN ISO 65 07-2 in Tabelle 5 die maximal zulässigen Abweichungen der Härteprüfmaschinen in % an.

Bei der Messung mit HV10 und einer üblichen Toleranz von 700 - 800 HV10 beträgt die zulässige Abweichung 3 %. Man kann also auf einem Härteprüfgerät 700 HV 10 messen, auf einem Zweiten jedoch nur 679 HV10.

Gero GmbH		
Schüro		

Diese Abweichungen bedeuten jedoch nur eine Verschiebung des arithmetischen Mittelwertes, kann also im Einzelfall durch Vergleichsmessungen zwischen den Geräten eliminiert werden. Zusätzlich zu diesen zulässigen Abweichungen treten Streuungen auf. Wir haben dies mit einem handelsüblichen überwachten Prüfgerät (Wolpert-V-Testor) und unserem Prüfpersonal nachvollzogen. Es ergibt sich mit einer Härteprüfplatte 831 HV und 30 Eindrücken folgendes:

arithmetischer Mittelwert \bar{x} 849 HV 10

Stichprobenstandardabweichung s 18,4 HV 10

Bevor mit der Standardabweichung weitergearbeitet wird, muss überprüft werden, ob die gesammelten Werte normalverteilt sind. Dies geschieht am einfachsten auf Wahrscheinlichkeitspapier mit dem Ergebnis einer Geraden bei normal verteilten Ereignissen.

Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung. Wenn die 4-fache Standardabweichung jeweils vom Mittelwert aus addiert bzw. subtrahiert wird, keine der Spezifikationsgrenzen über- bzw. unterschreitet, kann die Maschine als fähig betrachtet werden, d. h. mindestens 99,994 % aller Messergebnisse werden innerhalb der Spezifikation liegen. Ungünstiger in Bezug auf die Streuung ist die häufig angewendete Rockwell C-Prüfung. Hier beträgt der zulässige Gesamtfehler $\pm 1,5$ HR_c. Wir können also bei uns 60,1 HR_c messen (entsprechend aus der Vickersmessung 700 HV) unser Kunde misst 58,6 HR_c (entsprechend aus der Vickersmessung 666 HV). Noch mal gegenübergestellt

	Rockwell C	Vickers HV 10
Gero	60,1 (700 HV)	700 HV
Kunde	58,6 (666 HV)	679 HV

Gero GmbH		
Schüro		

Auch hier kann natürlich durch Messgeräteabgleich Übereinstimmung zwischen Kunde und Lieferant hergestellt werden.

Bei der Streuung ergeben sich beim Messen mit einem überwachten Gerät Wolpert Testor HT 2000 mit automatisierter Lastaufbringung und Entlastung auf einer Härteprüfplatte 65,07 HR_c folgende Werte.

Mittelwert	\bar{x}	64,4 HR _c
Standardabweichung	s	0,35 HR _c

Bei der Nachprüfung auf einem Vickers-Härteprüfer Wolpert V-Testor mit 10 kg Belastung und manueller Auswertung ergeben sich folgende Werte

Mittelwert	\bar{x}	848,7 HV 10 (65,6 HR _c)
Standardabweichung	s	14,8 HV 10 (0,45 HR _c)

Bemerkenswert, dass die Streuung der Rockwellprüfung niedriger ist, als die der Vickersprüfung, obwohl das Verfahren HR_c an sich etwas ungenauer ist. Ich darf noch einmal wiederholen. Diese Ergebnisse müssen bedacht werden, wenn über Maschinen- und Prozessfähigkeit debattiert wird, da diese Prüfmaschinenstreuung die Streuung der Maschine bzw. der Prozesse überlagern.

Dies möchte ich mit Hilfe folgender Tabelle vertiefen

± 4 Stichproben-	zulässiger
standardabweichungen	Fehler nach DIN
± 4 s	± 4 mal

Härteprüfplatte
65.07 HR_c mit
Wolpert-V-Testor
HT 2000 mit
150 kg

± 46 HV (umgewertet)	± 45 HV
----------------------	---------

Gero GmbH		
Schüro		

Härteprüfplatte
65.07 HR_c mit
Wolpert-V-Testor
mit
10 kg

± 59,2 HV 10

± 24 HV 10

Nach allgemeiner Übereinkunft soll die Maschinenfähigkeit (auch ein Härteprüfgerät ist eine Maschine) mindestens ± 4 Standardabweichungen betragen.

Hier bedeutet es, dass das HV-Messgerät nicht fähig ist, obwohl die Abnahme dies nicht bestätigt.

Wenden wir uns von den mehr oder weniger theoretischen Überlegungen ab und wenden uns der Praxis zu, nämlich der Frage, welche Streuungen der Oberflächenhärte Treten bei der Induktivhärtung von Teilen konkret auf.

1 Bolzen 25^Ø aus C45 normalgeglüht 3 Bahnen angeschliffen Körnung 180

$$\bar{x} = 61,5 \text{ HR}_c$$

$$s = 0,46 \text{ HR}_c$$

30 Bolzen gleiche Anlieferung wie vor 1 Bahn angeschliffen Körnung 600

$$\bar{x} = 60,3 \text{ HR}_c$$

$$s = 0,50 \text{ HR}_c$$

30 Bolzen wie vor, jedoch nur gedreht, R_a = 3,2

$$\bar{x} = 60,4 \text{ HR}_c$$

$$s = 1,44 \text{ HR}_c$$

Da der Mittelwert der feiner geschliffenen Bolzen niedriger liegt, als die groberen, dürfte der Unterschied in der Vorbereitung zu sehen sein. Die geringfügig größere Streuung über die 30 Bolzen jedoch, ist die Streuung des Prozesses.

Gero GmbH		
Schüro		

Daneben haben wir den Einfluss der Schleifbandkörnung auf die Messergebnisse untersucht.

1 Bolzen 25^Ø aus C45N wie vor

3 Bahnen angeschliffen Körnung 180

$$\bar{x} = 742 \text{ HV } 10 \text{ (61,8 HR}_c\text{)}$$

1. Prüfer

$$s = 18,5 \text{ HV } 10 \text{ (0,5 HR}_c\text{)}$$

1 Bolzen wie vor

3 Bahnen angeschliffen Körnung 600

$$\bar{x} = 793 \text{ HV } 10$$

2. Prüfer

$$s = 7 \text{ HV } 10$$

Dass die Werte aus der HR_c-Prüfung Körnung 180 mit denen der HV-Prüfung Körnung 180 nahezu gleich sind, lässt 2 Schlussfolgerungen zu

1. Umwertungen von HR_c in HV 10 sind in diesem Fall möglich.
2. Der Einfluss des Prüfers ist erkennbar durch Mittelwertunterschiede. Der Einfluss der Vorbereitung überwiegt aber, da die Streuung bei Vorbereitung mit Körnung 600 sehr viel geringer ausfällt.

Weitere Fehler können durch unangepasste Härteprüfverfahren und/oder durch unangemessene Probenvorbereitung auftreten.

Gero GmbH		
Schüro		

Beispiel 1

Es werden Schrauben, die das Innengewinde selbst formen, an den ersten 5 - 7 Gewindegängen gehärtet. Die Vorschrift des Kunden lautet Oberflächenhärte 550 - 750 HV1. Absprachegemäß wird die Oberfläche der Gewindespitze mit 1000er Schleifpapier poliert. Bei der alle 4 Stunden erfolgten Fertigungskontrolle, stellten wir stark streuende Härtewerte fest, die wir zunächst nicht erklären konnten. Vorabkühlung durch Schwallwasser der sehr feinen Gewindespitzen war unsere erste Vermutung.

Eine metallografische Untersuchung zeigte jedoch einwandfreie martensitische Struktur.

Aufgrund dieses Ergebnisses vereinbarten wir, Messung der Oberflächenhärtung im Querschliff in 0,05 mm Tiefe. Bei der Auswertung von über 200 Chargen entsprechend etwa 8 Millionen Teilen zeigte sich, dass wir von einer gesicherten Prozessfähigkeit im Sinne von $\bar{x} \pm 3$ Standardabweichungen (Mindestforderung) nicht sprechen können. Daraufhin hatten wir von einer Herstellungscharge, gleichzeitig auch eine Schmelzcharge, 50 aufeinanderfolgende Teil gehärtet und im Querschliff den 4. Zahn von der Einschraubseite aus gesehen in 0,05 mm Randabstand geprüft.

Ergebnis:

$$\bar{x} = 681 \text{ HV } 1$$

$$S = 28,3 \text{ HV } 1$$

Die Prozessfähigkeit ergibt sich aus der Mindestforderung von ± 3 Standardabweichung, also hier $\pm 84,9$ HV1, also deutlich unter Toleranz von ± 100 HV1, also ein fähiger Prozess. Mitnichten. Wenn man die Lage des Mittelwertes zu den Spezifikationsgrenzen unter Berücksichtigung der Streuung betrachtet, ergibt sich folgendes Bild:

Gero GmbH		
Schüro		

$$C_{pk} = \frac{Z_{krit}}{3}$$

$$Z_{kr} = \frac{OSG - \bar{X}}{s} = \frac{750 \text{ HV} - 681 \text{ HV}}{28,3} = 2,44$$

$$C_{pk} = \frac{2,44}{3} = 0,81 \text{ also unter Soll von } 1,0, \text{ also kein fähiger Prozess}$$

Also immer noch erhebliche Streuungen. Anschließend haben wir die drei Schrauben deren 0,05 mm Härtewerte am weitesten auseinander liegen, mittels Härteverlauf überprüft.

Ergebnis:

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
0,05 mm	668 HV 0,5	766 HV 0,5	745 HV 0,5
0,2 mm	655	682	745
0,5 mm	638	626	659
1,0 mm	630	638	625

Also erst im Abstand von 1 mm vom Rand sind die Härtewerte so gleichmäßig wie man es erwarten durfte.

Das ließ nur einen Schluss zu. Der Draht, aus dem die Schrauben gefertigt werden, ist in der Randschicht abgekühlt. Nach der Herstellung werden die Schrauben unter Schutzgas auf 10.9 vergütet. Bei dieser Behandlung soll auch der Kohlenstoff in der Randschicht auf den Kohlenstoffgehalt des Grundmaterials gebracht werden.

Ob nun die Ofenzeiten zu kurz, das Schutzgas das Schüttgut Schrauben ungleichmäßig erfasst oder die Randabkühlung des Vormaterials ungleichmäßig ist, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Diese Randabkühlung tritt auch sehr häufig beim Härten von gezogenem Material auf.

Gero GmbH		
Schüro		

Prozessfähigkeit kann man natürlich auch dadurch verhindern, dass man die Toleranz zu klein wählt.

Bei einer üblichen Standardabweichung (siehe auch Versuch HR_c -Prüfung an 30 Teilen) von $\pm 0,5 HR_c$ könnten die Toleranzgrenzen bei $\pm 1,5 HR_c$ liegen. Zu bedenken ist allerdings, dass auch der Kohlenstoffgehalt von Vergütungsstählen und damit der Oberflächenhärte bei jeder Stahlart eine relativ große Toleranz aufweist, bei C 45 beispielsweise von 0,42 - 0,50 % C. Stellt man den Zusammenhang zwischen Kohlenstoffgehalt und erzielter Härte her, ergibt sich eine Härtespannweite von 58 - 61 HR_c .

Also muss die untere Toleranzgrenze bei $58 - 1,5 HR_c = 56,5 HR_c$, die obere bei $61 + 1,5 HR_c = 62,5 HR_c$ liegen, um eine prozessfähige Fertigung im Sinne von $x \pm 3 s$ zu erzielen. Andererseits kann man das Toleranzfeld verkleinern, indem man vom untersten Kohlenstoffgehalt und der damit verbundenen Härte ausgeht, also $58 - 2 HR_c = 56 HR_c$ und die obere $56 + 4 HR_c = 60 HR_c$ und alle aufgrund höheren Kohlenstoffgehaltes höheren Härtewerte durch Anlassen verringert. Allerdings verbietet sich dies häufig aus Kostengründen.

Die zunehmende Produktion von Kaltfließpressteilen führt beim Induktivhärten durch die zeit- oder temperaturabhängige Auflösung des Zementits zu Problemen.

Bei Erwärmungszeiten unter 2 Sekunden treten dann Probleme auf, wenn die Einformung des Perlits 100 % beträgt. Die Härtung wird dann unmöglich, wenn dazu noch Inhomogenitäten auftreten.

Bei der Härteprüfung ist es nicht selten erforderlich, einen vorgegebenen Härtewert durch eine Härteprüfung nach einem anderen Verfahren zu überprüfen. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn entweder die Dicke der Probe oder der Schicht, die Größe des Prüfobjektes, die Oberflächenqualität oder die zur Verfügung stehende Härteprüfmaschine nur ein bestimmtes Härteprüfverfahren zulassen.

Gero GmbH		
Schüro		

Ich verweise in diesem Zusammenhang auf die DIN 50150 Ausgabe Oktober 2000 und warne gleichzeitig vor Umwertungen. Besser ist es Übereinstimmung beim Prüfverfahren zwischen Kunden und Lieferanten herzustellen.

Zusammenfassung zur Härteprüfung

Eine prozessfähige Serienhärtung ist nur dann möglich, wenn die äußeren Einflüsse durch Menschen, Rohmaterial und Arbeitsumwelt gering sind. Da hierbei im Wesentlichen unsere Kunden gefordert sind, haben wir eine Arbeitsanweisung Kunde erstellt, aus der die Voraussetzungen für prozessfähige Härtungen hervorgeht. Zu bedenken ist dabei auch, angemessene Toleranzen zu wählen.

Prüfung der Einhärtungstiefe

Die Ermittlung der Einhärtungstiefe nach dem Randschichthärten erfolgt nach DIN 50190 Teil 2. Diese Norm ist in allen Belangen gut anzuwenden.

Also wieder die Frage, welche Einflüsse bewirken Änderungen der Einhärtungstiefe? Dies können sein Härtebarkeit des Werkstoffes, Veränderungen der Leistung, des Abschreckmittels (mit Temperatur, Menge, Druck und Konzentrationen des Zusatzes) und der Oberfläche (mit Zunder, Öl, Ziehhilfsmitteln, Waschmittelrückständen, Rost).

Die Einflüsse der Härtebarkeit auf das Härteergebnis zeigen am Besten die Streubänder der Rockwell-C-Härte bei der Prüfung auf Härtebarkeit im Stirnabschreckversuch. Die Grenzhärte von 50 HR_c kann bei CK 45 zwischen 2 und 6 mm liegen. Dies ist natürlich beim Einrichten zum Härten auszugleichen. Deshalb führen wir immer eine Erstteilprüfung durch und geben die Härtung erst frei, wenn die Istwerte innerhalb der Toleranz sind. Das setzt aber auch voraus, dass - wie wir in unserer Arbeitsanweisung Kunde beschrieben haben - unser Kunde schmelzchargenweise verarbeitet und diese abgeschlossen zur Verfügung stellt.

Gero GmbH		
Schüro		

Bevor wir über Einflüsse der Leistung auf die Einhärtungstiefe sprechen, kurz zum Begriff Leistung. Dieser muss bei extrem kritischen Härteaufgaben - außerordentlich enge Toleranzen der Oberflächenhärte, Einhärtungstiefe dünnwandige Teile etc. - durch den Begriff Energieinhalt ersetzt und auch messtechnisch durchgeführt werden. Zur Frage des Einflusses von Leistungsänderungen auf die Einhärtungstiefe haben wir folgenden Versuch durchgeführt:

Bolzen C 45 N, 25,5 Ø Induktor innen Ø = 29 mm

Versuch 1	v = 500 mm/min	Leistung	75 % der max. Leistung
Versuch 2	"		77 %
Versuch 3	"		79 %
Versuch 4	"		81 %

Das Ergebnis:

Rht Versuch 1	0,99 mm	Grenzhärte - 550 HV
2	1,05 mm	
4	1,3 mm	

In diesem Fall gibt unser Kunde eine Toleranz von 1,0 - 2,0 mm vor, also auch bei um 6 % Punkte differierender Leistung liegen die Einhärtungstiefen innerhalb der Toleranz.

Da unsere Anlagen Änderung der Spannung - Leistung = Spannung x Strom - der Netzseite von bis zu 15 % auf ± 1 % der Leistung am Induktor ausregelt, besteht hier Prozessfähigkeit.

Frequenzänderungen bewirken ebenfalls Änderungen der Einhärtungstiefe.

Gero GmbH		
Schüro		

**Bei einer hohen Frequenz ist das Eindringmaß gering.
Bei einer niedrigen Frequenz ist das Eindringmaß groß.**

Diese theoretischen Unterschiede sind verhältnismäßig groß. In der Praxis führt die Wärmeleitfähigkeit zu einer Vergleichmäßigung. Außerdem arbeiten wir bei Röhrengeneratoren mit einer „festen Frequenz“. Bei den bei uns auch üblichen transistorisierten Umrichtern in Serienschwingkreistechnik ist allerdings mit in weiteren Grenzen variabler Frequenz zu rechnen, da die Frequenz am Induktor auf einen Wert geregelt wird, um die maximale Leistung der Anlage zu erhalten.

Zusammenfassung zu Einhärtungstiefenprüfung

Eine prozessfähige Serienhärtung ist bei den üblichen großen Toleranzen eigentlich immer möglich.