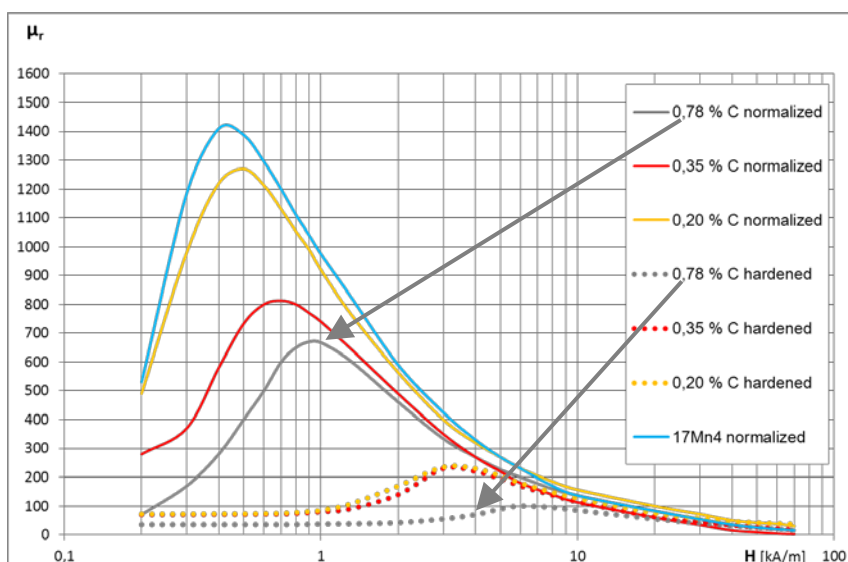


Wie bei der Induktionserwärmung wird auch bei der Wirbelstrom-Prüfung mit Spulen, Generatoren, AC-Strömen und AC-Spannungen, Frequenzen, Feldstärken und Induktionsgesetzen gearbeitet. Im Gegensatz zur Erwärmung der Bauteile wollen wir aber bei der Wirbelstromprüfung die Prüflinge keinesfalls erwärmen, sondern mittels der Prüfanordnung auf ihre Struktur und damit mechanischen Eigenschaften wie Härte, Härtetiefe oder Legierung untersuchen. Dabei liefert uns der Wirbelstromtest keine absoluten Werte (wie z.B. "56 HRC" oder "2,6 mm Randschichthärte"), sondern zeigt uns mit hoher Empfindlichkeit kleinste Unterschiede in der Gefügeausbildung. Und das innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde. Damit kann eine schnelle und zerstörungsfreie 100%-Prüfung in der Fertigungslinie auf z.B.:

- Härte
- Randschichthärte
- Härteauslauf
- Festigkeit
- Kohlenstoffgehalt
- Weichfleckigkeit
- Randentkohlung

realisiert werden und damit ein schnelles Reagieren auf Abweichungen von der gewünschten Sollstruktur ermöglicht. Bei geeigneter mechanischer Anordnung vergehen während des Transportes von der Härtestation zur Prüfstation nur wenige Sekunden. Es werden fehlerhafte Teile, verschuldet durch einen beschädigten Induktor, eine verstopfte Abschreckbrause oder auch durch nicht bekannte Ursachen sofort deutlich angezeigt,ein riesiger Zeit- und Kostenvorteil!

Anders als bei der Induktionserwärmung werden für diese Wirbelstromprüfungen meist sehr kleine Energien im mW-Bereich aufgewendet. Die Feldstärken sind niedrig, die Permeabilitäten bleiben im Bereich der Anfangspermeabilitäten. Die Prüffrequenzen reichen von einigen Hz bis zu einigen hundert kHz und geben über das Frequenzverhalten der Eindringtiefe des Wirbelstroms und der Ausbildung der Permeabilität zusätzliche Informationen über unerwünschte Gefügeabweichungen. Die sehr kleinen elektrischen Signale erfordern eine sehr präzise Auswertung, um von den Umgebungsstörungen sicher unterschieden zu werden. Eine geringe Drift bei Temperaturänderungen sowie eine hohe Langzeitstabilität sind unbedingt erforderlich. Eine Digitalisierung des Eingangssignals bereits am 'front end' der elektronischen Auswertung ist dabei von enormem Vorteil.



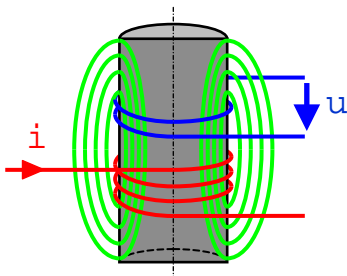
Die relative Permeabilität $[\mu_r]$ wird durch eine Wärmebehandlung sehr stark beeinflusst. Auch die Höhe des Kohlenstoffgehalts sowie weitere Legierungselemente beeinflussen die Größe und den Verlauf der Permeabilitätskurve signifikant. Generell weisen gehärtete (also verspannte) Gefüge eine geringere Permeabilität auf als

weiche Gefüge (siehe z.B.: die Graphen von C78).

Die elektrische Leitfähigkeit $[\sigma]$ hingegen wird durch Gefügeänderungen und durch Legierungsunterschiede nur in einem kleinen Maß beeinflusst. So liegt die Leitfähigkeit von Kohlenstoffstahl bei $< 10 \text{ MS/m}$, die von hochlegiertem Chrom-Nickelstahl bei etwa $1,3 \text{ MS/m}$. Der Temperaturkoeffizient liegt allerdings bei rund $4 \text{ bis } 5 \text{ } \%/10^\circ\text{C}$. Die Temperatur des Prüflings hat also Einfluß auf die Prüfergebnisse und sollte daher nur unwesentlich ($\pm 5^\circ\text{C}$) variieren.

Wie kann man nun diese mit den mechanischen Eigenschaften korrelierenden magnetischen und elektrischen Veränderungen schnell, zuverlässig und zerstörungsfrei prüfen?

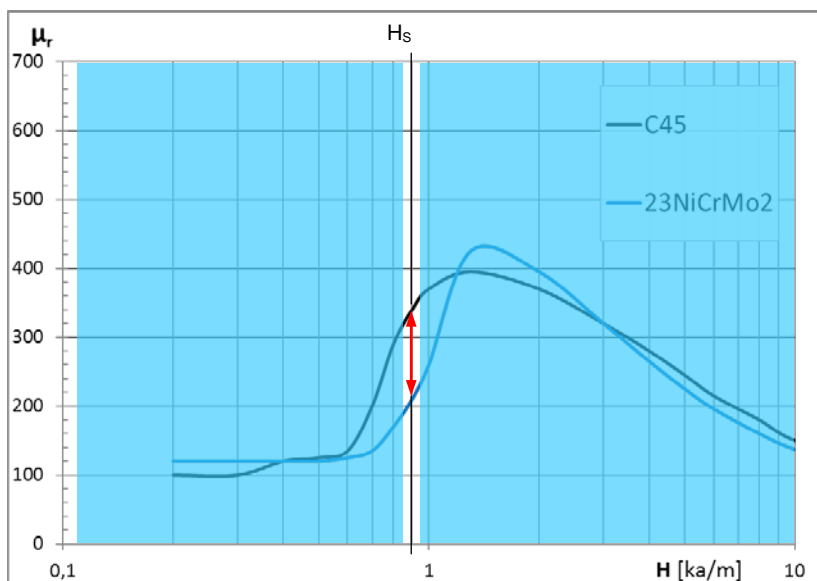
Hier bietet sich die Wirbelstromprüfung an. Sie ist eine "vergleichende Prüfung". *Werte* von i.O.-Teilen (Referenzteile), die zuvor dem Prüfgerät gezeigt und von diesem gespeichert wurden, werden dann mit den *Werten* des aktuellen Prüflings verglichen.



Wie erhält man nun *Werte*?

Der durch die rote Spule fließende Wechselstrom i erzeugt einen magnetischen Fluß $[B]$ durch den (hier grau dargestellten) Prüfling. Die Größe des magnetischen Flusses und damit auch die Größe der in der blauen Spule induzierten Spannung U hängt nun im direkten Maß von der elektrischen Leitfähigkeit $[\sigma]$ und der magnetischen "Leitfähigkeit", der Permeabilität $[\mu_r]$ ab.

Der Prüfling beeinflusst mit σ und μ_r die Kopplung zwischen der Sendespule und der Empfängerspule. Über diesen Zusammenhang können wir auf den Gefügestand schließen, also die Ausbildung der richtigen Härte, Randhärte, Kernhärte sowie die Legierung überprüfen. Diese komplexe Spannung wird nach Realteil und Imaginärteil zweidimensional als Vektor dargestellt.

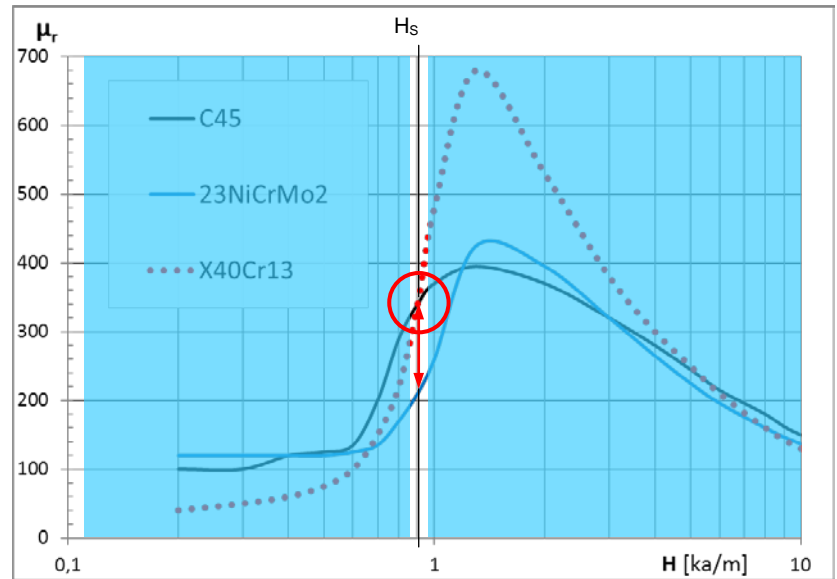


Aber Achtung: Überprüft man die Permeabilität bei nur einer magnetischen Feldstärke H_s , kann das Ergebnis zweideutig sein, sobald auch andere Verwechslungs-"Partner" hinzukommen könnten. Nehmen wir z.B. eine typische Verwechslungsprüfung zweier Stahlsorten: C45 und 23NiCrMo2. Der größte Permeabilitätsunterschied liegt bei H_s . Man wird die Prüfung mit einem einrequenten Prüfgerät wohl mit dieser Feldstärke durchführen, läßt diese Einstellung

doch den größten Unterschied der beiden deutlich hervortreten. Aber verdeckt diese Prüfung nicht die Aussicht auf benachbarte Bereiche der Permeabilität?

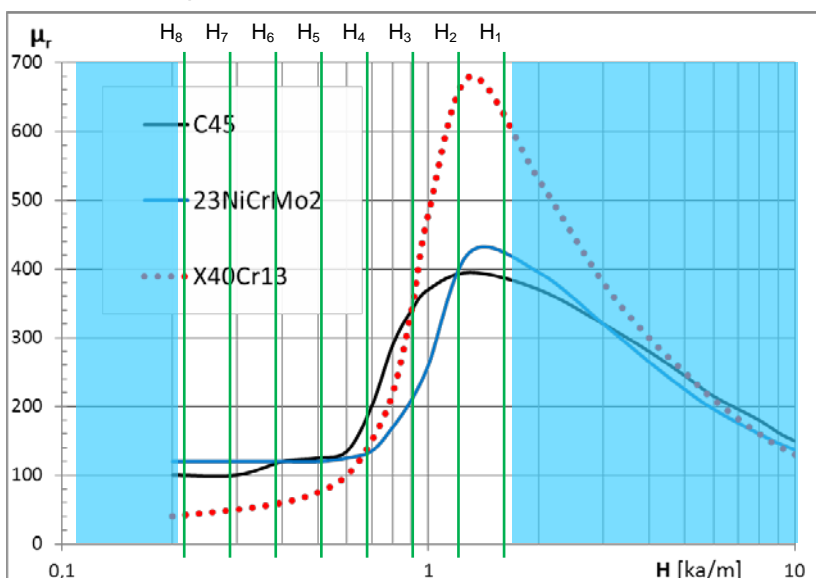
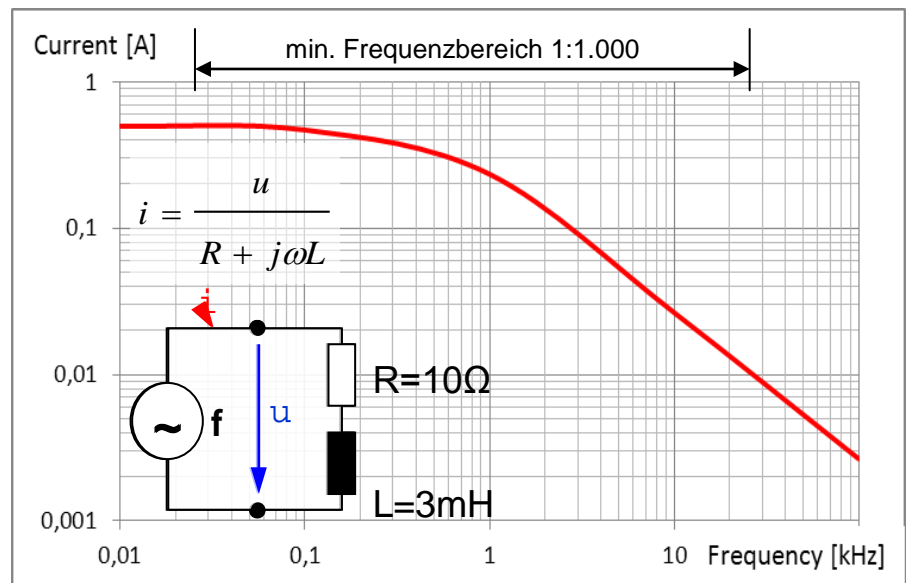
Was geschieht, falls noch ein Material, z.B. X40Cr13 völlig unerwartet vermischt ist und zur Prüfung kommt? Im Beispiel rechts wird nun genau bei H_s die Permeabilitätskurve des C45 mit der des X40Cr13 geschnitten (roter Kreis).

Eine Unterscheidung ist hier mit nur einer Feldstärke (Frequenz) nicht möglich. Die beiden bleiben trotz Wirbelstromtest vermischt. Könnte man die "Vorhänge" nicht beiseite schieben, um den Blick frei zu machen, oder bei unterschiedlichen Feldstärken prüfen, sozusagen präventiv? Über einen größeren Bereich?



Das ist dann die von ibg erfundene "Präventive Mehr-Frequenz Prüfung" (PMFP), die durch den Einsatz von acht Prüffrequenzen einen großen Bereich des Spulenstroms und damit der Feldstärke abdeckt.

Der Frequenzbereich von niedrigster zu höchster Frequenz sollte mindestens 1:1.000 überstreichen, um über die Induktivität der Sendespule den Erregerstrom und damit die Feldstärke in der Spule ausreichend zu variieren. Erst durch die Verwendung mehrerer

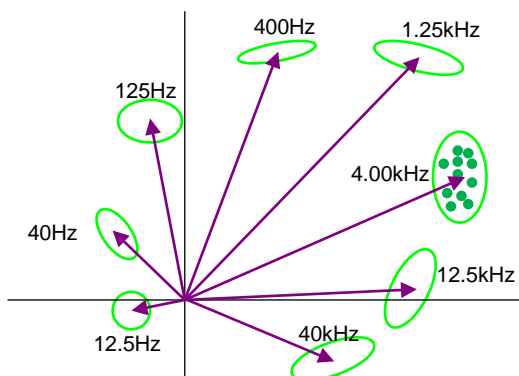


Prüffrequenzen, die in der Spule verschieden große Feldstärken (H_{1-8}) hervorrufen, werden alle diese Unterschiede aufgedeckt. Die unterschiedlichen Gefüge durch verschiedene Wärmebehandlungen (und durch eventuelle Fehler) geben unterscheidbare Permeabilitätskurven, die mit Hilfe der PMFP aufgespürt werden. Das erst gibt die benötigte Sicherheit der Prüfung.

Benutzt man also mehrere Frequenzen des Wechselstroms, erhält man für jede Frequenz einen Spannungsvektor in der Impedanzebene, eine Ortskurve.

Natürlich beeinflussen auch andere Größen die induzierte Spannung. So werden die Lage des Prüfteils in der Spule, aber auch geometrische Änderungen wie Länge oder Dicke des Prüflings die empfangene Spannung verändern. Diese Größen wird man also besonders konstant halten.

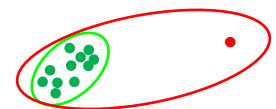
Trotzdem werden die empfangenen Spannungswerte von mehreren i.O.-Prüfteilen leicht variieren, sie werden einer Streuung unterliegen. Die Vektorspitzen der Spannungen bilden eine Wolke



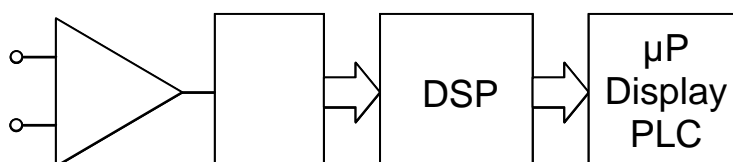
(siehe beispielhaft grüne Punkte bei 4 kHz). Umschließt man nun die Vektorspitzen mit einem elliptischen Toleranzfeld, so kann man dann die Prüfung auf den Vergleich des Vektors auf innerhalb (i.O.) oder außerhalb (n.i.O.) des Toleranzfeldes reduzieren.

Die Prüfung mit einem solchen Frequenzband (8 Frequenzen, min. 1:1.000) und dem Vergleich mit den zuvor mit Gutteilen geschaffenen Toleranzfeldern ist unter dem Namen PMFP (Präventive Mehr-Frequenz Prüfung) in der Fachwelt bekannt geworden. Es wird ein möglichst großes Frequenzband benutzt, um auch möglichst alle abweichenden Strukturen als fehlerhaft zu erkennen und auszusortieren. Zur Einstellung des Gerätes werden lediglich 10 bis 20 i.O.-Teile eingelesen, um die Toleranzfelder zu bilden (Kalibrierung). Eine Gegenprüfung mit n.i.O.-Teilen (z.B.: ungehärtet, nicht richtig abgeschreckt, Austenitisierungstemperatur nicht erreicht oder zu kurz, zu lang erwärmt, Anlaßtemperatur zu hoch oder zu niedrig, usw.) kann natürlich erfolgen, muß aber nicht. Das Prüfsystem wird alle Fehlteile mit bekannten und unbekanntem Fehlern zuverlässig erkennen. Die Methode PMFP funktioniert äußerst zuverlässig für alle Arten von Fehlern, die bei der Wärmebehandlung von Stahl auftreten können.

Voraussetzung ist dabei die sorgfältige Wahl der i.O.-Teile. Sind bei der Kalibrierung des Gerätes versehentlich auch ein oder mehrere n.i.O.-Teile (roter Punkt) eingelesen worden, werden die automatischen Toleranzfelder aufgebläht, und das Gerät verliert seine Trennschärfe. Diese Vektoren von Schlechteilen müssen vor der eigentlichen Prüfung entfernt werden.

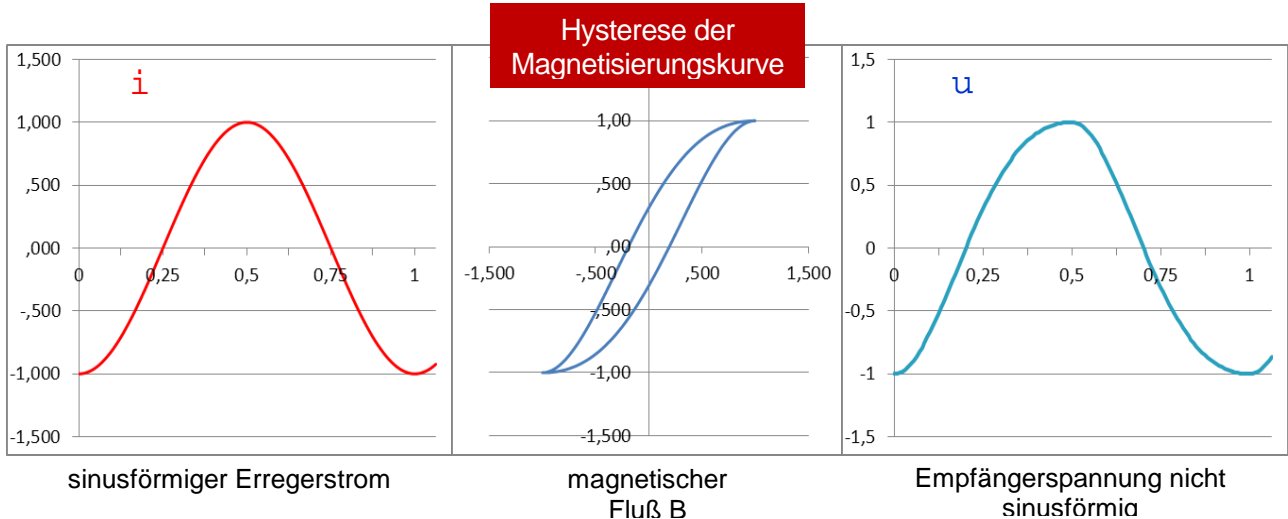


Für diese zerstörungsfreie Prüfung werden sehr kleine Spannungsunterschiede im μV -Bereich sichtbar gemacht. Man benötigt also hoch empfindliche und sehr stabile Meßvorrichtungen, um diese kleinen Spannungen zuverlässig und frei von Störungen zu messen. Der aussichtsreichste Weg dorthin ist die Digitalisierung der Meßwerte bereits unmittelbar am Eingang des Meßgerätes. Die gewonnenen Samples (20.000.000/sec.) mit 18 bit Auflösung werden in einen Digitalen Signal Prozessor (DSP) eingegeben und in kürzester Zeit (2 ms) in ein 2×32 bit Datenwort gewandelt.

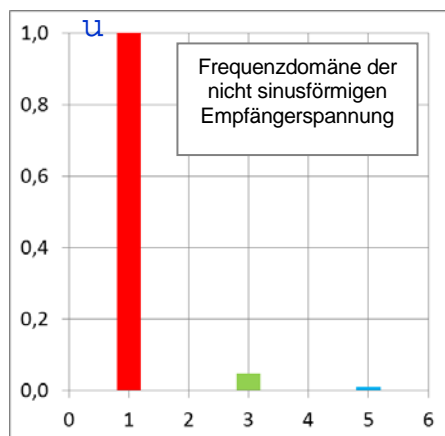


Dieses wird dann mit dem gespeicherten Toleranzfeld verglichen und eine Prüfentscheidung getroffen. Neu ist darüber hinaus die Berechnung der Vektoren von Oberwellen ohne

zusätzlichen Zeitbedarf bis zur 7. Oberwelle, ebenfalls präventiv möglich (iSHA = ibg's Simultaneous Harmonic Analysis). Diese Oberwellen entstehen durch eine Hysterese der Magnetisierungskurve des Prüflings in der Spulenordnung. Der sinusförmige Strom i in der Erregerspule führt zu einer sinusförmigen Feldstärke H , die einen magnetischen Fluß B in dem Prüfling auslöst. Dessen zeitlicher Verlauf ist jedoch (je nach Ausbildung der Permeabilität) nicht mehr sinusförmig. Daher induziert der zeitliche Verlauf des magnetischen Flusses B in der Empfängerspule eine vom reinen Sinus abweichende Spannung.



Nach der Fourieranalyse dieser Spannung u zeigen sich neben der **Grundwelle** Anteile höherer



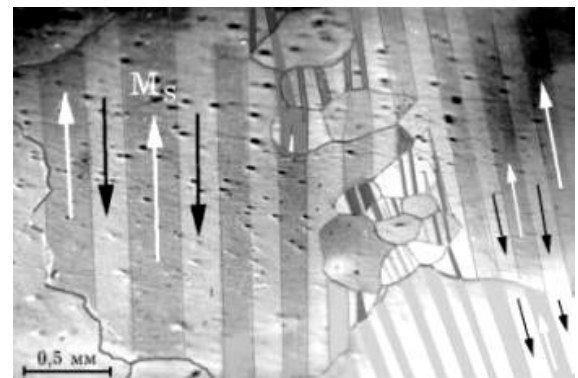
Frequenzen, nämlich Oberwellen der **3** und **5**-fachen Frequenz. Die Auswertung der Oberwellen bringt uns also ein noch genaueres Bild der magnetischen Eigenschaften des Prüflings und damit genauere Informationen über die Ausbildung der Struktur. Die Signale der Oberwellen sind aber sehr klein, und es bedarf großer elektronischer Anstrengung, um diese kleinen Signale aus dem Rauschen hervorzuheben und darstellen zu können.

iSHA leistet dies in hervorragender Weise.

Warum entsteht denn nun eine Hysteresekurve ?

Dies hat mit dem Ferromagnetismus der verwendeten Werkstoffe und deren Gefügestruktur zu tun. Eine kleine Einführung, wie denn Magnetismus entsteht, ist für das Verständnis der Wirbelstromprüfung sehr hilfreich.

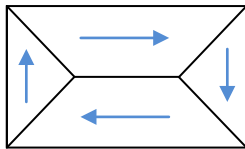
Ausgehend von den kleinsten magnetischen Teilchen, den Elektronen mit ihrem Spin und den Atomkernen mit ihrem magnetischen Moment, bilden sich unter Minimierung der freien Energie in dem Werkstoff magnetische Domänen aus, deren Größe und Richtung (Nord-Süd) derart gestaltet ist, daß



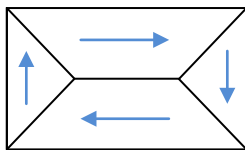
Domänenstruktur von Fe-3%Si Polykristallen mit Kristalliten

nach außen hin (zunächst) kein magnetisches Feld auftritt. Diese Domänen sind durch Blochwände getrennt.

Mit dem Strom in unserer Wirbelstrom-Spule bringen wir nun ein äußeres magnetisches Feld H ins Spiel, das auf die Domänen seine Wirkung ausübt. Betrachten wir ein vereinfachtes Schaubild über den Einfluß des äußeren Magnetfeldes auf die Domänen und deren Grenzen, die Blochwände:

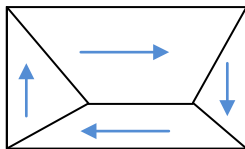


Zunächst die Ausbildung der Domänen und Blochwände ohne äußeres Feld H . Der magnetisch Kreis ist innerhalb des Materials geschlossen.



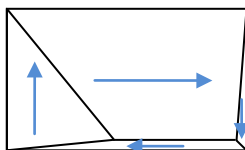
H

Ein sehr kleines Feld H (roter Pfeil) verändert die Blochwände noch nicht irreversibel. Die magnetische Leitfähigkeit ändert sich nur wenig.



\Rightarrow

Das Anwachsen des äußeren Feldes verschiebt nun die Blochwände. Die Domänen in ähnlicher Richtung des äußeren Feldes werden größer, die entgegengesetzten werden kleiner. Die magnetische Leitfähigkeit wird größer.



\Rightarrow

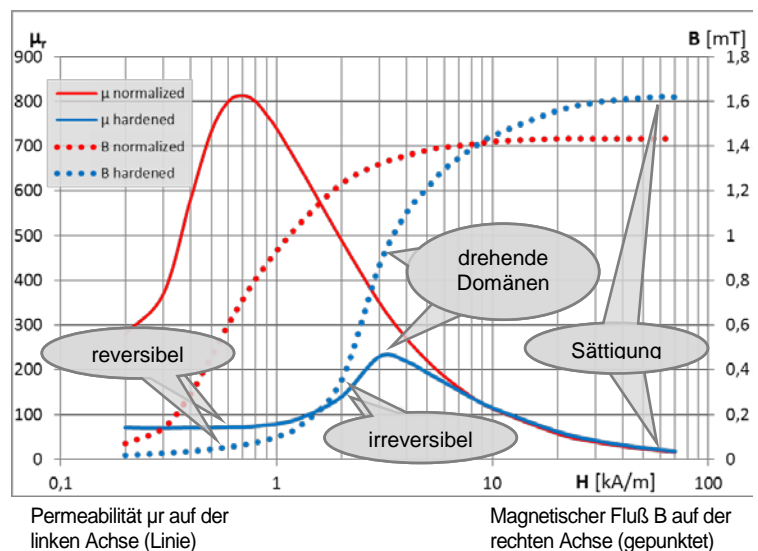
Bei noch größerer Feldstärke H existiert dann praktisch nur noch eine Domäne in der Vorzugsrichtung.



\Rightarrow

Diese Vorzugsrichtung der Domäne wird bei sehr hoher Feldstärke in die Richtung der Feldstärke gedreht, das Material kommt in den Bereich seiner magnetischen Sättigung.

Das Verschieben der Blochwände ist kein kontinuierlicher Vorgang. Vielmehr hängen diese Blochwände an Störstellen im Kristallgitter mehr oder weniger fest. Um sie von da zu lösen, ist etwas mehr magnetische Energie nötig, und sie springen dann bis zur nächsten Störstelle. (Das Springen führt zu Barkhausenrauschen.) Würde man jetzt das äußere Magnetfeld wieder abschalten, blieben die Blochwände teilweise an ihren neuen Stellen hängen, und das ursprünglich nach außen hin im magnetischen Gleichgewicht stehende Teil behielte einen äußeren magnetischen Fluß (Remanenz), der erst nach Anlegen einer negativen Feldstärke auf null gebracht werden könnte (Koerzitivfeldstärke). Die magnetische Hysterese ist geboren.



Je flacher der Anstieg der μ_r Kurve (graue Linie), desto ausgeprägter der lineare Bereich der Magnetisierungskurve (graue Punktlinie). Aus diesem linearen Bereich sind keine Oberwellen zu erwarten. Das gehärtete C35 Gefüge (graue Linien) wird also erst bei höheren Feldstärken Oberwellen zeigen. Das ungehärtete Gefüge (rote Linien) zeigt aber schon bei zehnmal kleineren Feldstärken einen starken Anstieg der Permeabilität, kommt also schon sehr bald in den irreversiblen Bereich der Magnetisierungskurve. Es weist damit schon bei kleinen Feldstärken eine Verzerrung der induzierten Spannung auf und generiert Oberwellen.

Dies kann bei der Wirbelstromprüfung hervorragend zur Detektion von ungehärteten Teilen oder zur Erkennung von weichen Flecken auf der Oberfläche genutzt werden. Auch die Randhärtetiefe sowie die Einsatzhärtetiefe geben bei Unterschreitung der gewünschten Schichtdicke hervorragend auswertbare Signale bei den Oberwellen.

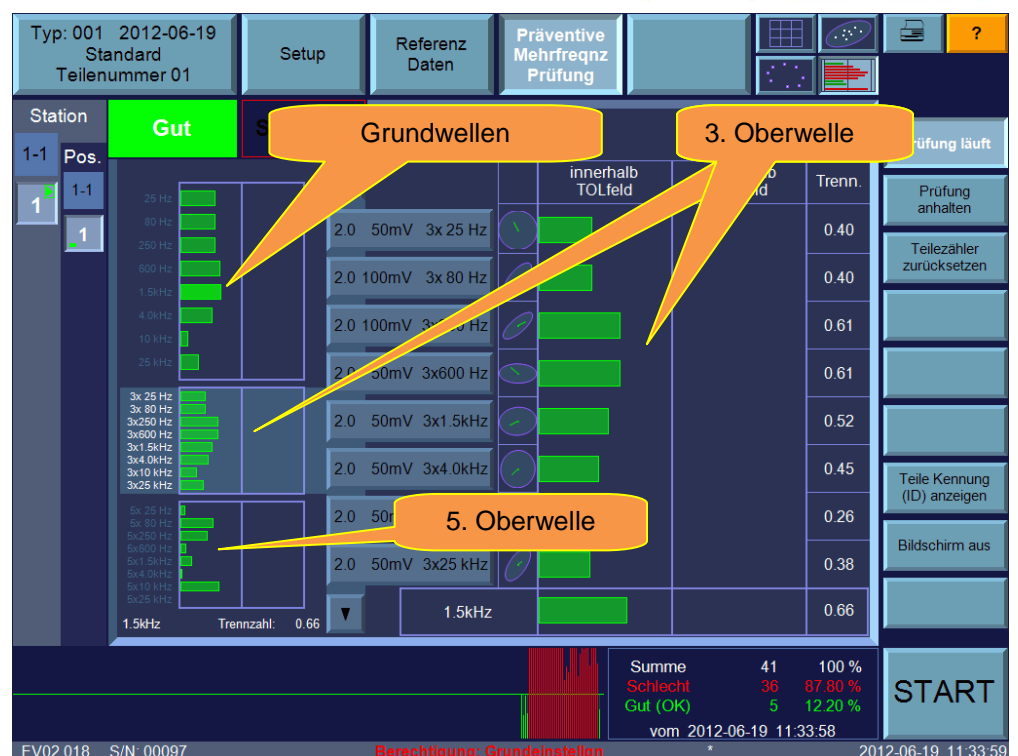
Mittels iSHA hat man die Oberwellenauswertung ohne Zeitverlust sowieso gleich mit in ibgs "Präventiver Mehr-Frequenz Prüfung".

Anwendungen:

Induktiv (Randschicht) gehärtete Kugelhafen



Härteprofil eines geschnittenen und geätzten i.O.-Teils

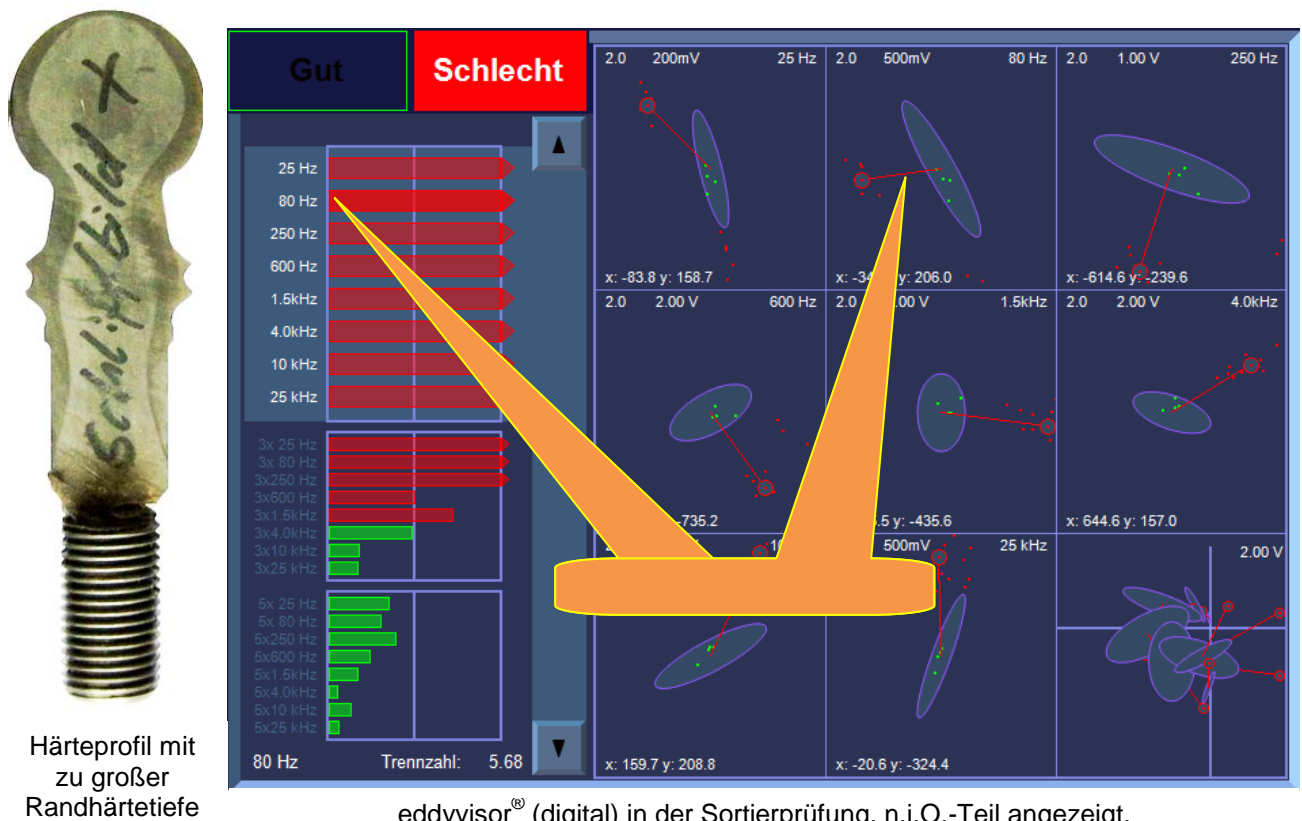


eddyvisor® (digital) Bildschirm in der Sortierprüfung, i.O.-Teil angezeigt

Diese i.O.-Teile werden zunächst als Referenzteile dem Prüfgerät bei allen Prüffrequenzen eingelesen. Unter Berücksichtigung der Teilstreuung werden dann automatisch Toleranzfelder

der Grund- und Oberwellen berechnet (PFMP + iSHA). Mit diesen Toleranzfeldern werden die Spannungsvektoren der Prüfteile verglichen und eine Sortierentscheidung getroffen.

Der Bildschirm oben zeigt sowohl bei den Frequenzen der Grundwellen als auch bei den Frequenzen der Oberwellen grüne Balken. Alle in der Prüfspule induzierten Spannungsvektoren



Härteprofil mit zu großer Randhärte

eddyvisor[®] (digital) in der Sortierprüfung, n.i.O.-Teil angezeigt, beste Trennung bei 80Hz Grundwelle

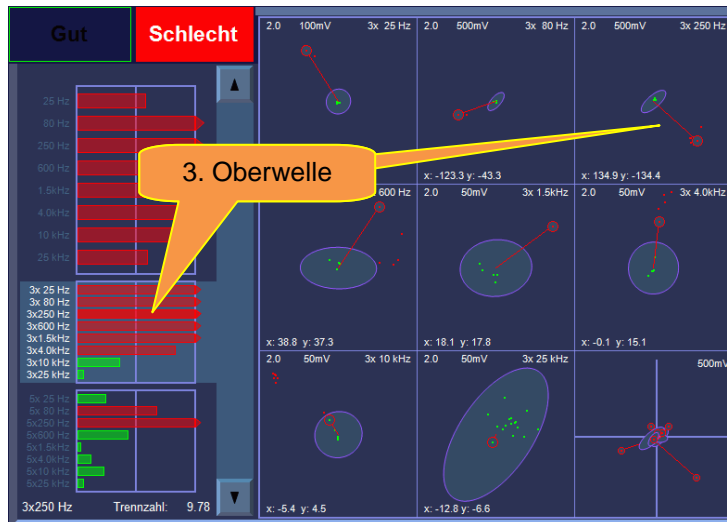
treffen die Toleranzfelder, das geprüfte Teil ist somit i.O.

Daß die beste Trennzahl für zu tief gehärtete Teile bei einer relativ niedrigen Frequenz der Grundwelle (80 Hz) erreicht wird, überrascht eigentlich nicht. Auch daß die Trennzahlen bei der 3. und 5. Oberwelle kleiner sind als bei der Grundwelle paßt in dieses Bild. Ist doch einerseits die Eindringtiefe des Wirbelstromsignals bei niedrigen Frequenzen und niedrigen Permeabilitätszahlen tiefer, sowie auch der reversible Bereich der Magnetisierungskurve zu höheren Feldstärken hin ausgedehnt. Es werden also nur wenige von i.O.-Teilen unterscheidbare Oberwellen generiert.



zu geringe
Randhärte tiefe

Bei den zu wenig eingehärteten Teilen zeigt sich nun interessanterweise eine ausgezeichnete Trennzahl von 9.78 bei der 3. Oberwelle. Die dünne, gehärtete Randschicht mit kleinem μ_r läßt die magnetische Feldstärke erheblich in das weiche Grundgefüge mit hohem μ_r und nicht reversibler Magnetisierungskurve eindringen. Die Folge sind massive Oberwellen, die sich besonders deutlich von dem Gefüge der i.O.-Teile unterscheiden.

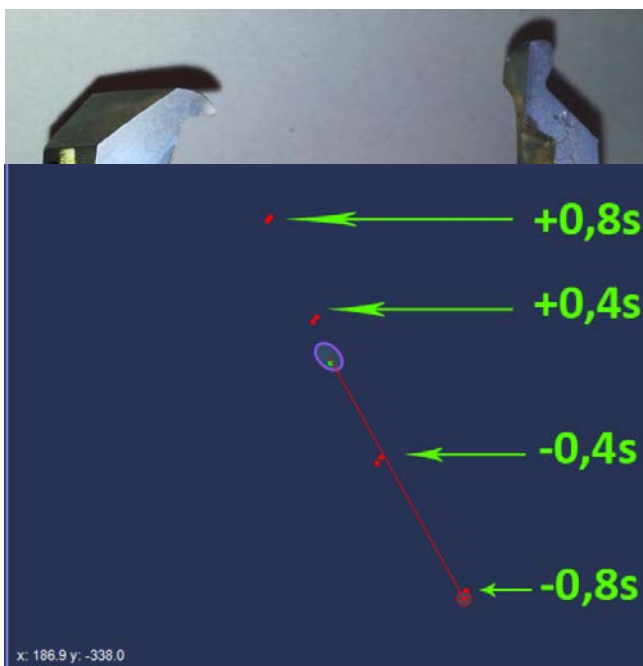


eddyvisor® (digital), n.i.O.-Teil angezeigt, beste Trennung bei 3x250Hz Oberwelle

Grundgefüge mit hohem μ_r und nicht reversibler Magnetisierungskurve eindringen. Die Folge sind massive Oberwellen, die sich besonders deutlich von dem Gefüge der i.O.-Teile unterscheiden. Die Überlegenheit von iSHA zeigt sich gerade bei der Erkennung von fehlerhaft (unrichtig) weichen Strukturen.

Randhärte tiefe der Kugellaufbahnen von Gleichlaufgelenken

Die induktive Härtung der Laufbahn innerhalb der Glocke sowie die anschließende Wirbelstromprüfung auf richtige Lage der gehärteten Schicht, auf richtige Tiefe sowie auf die richtige Härte stellen eine große Herausforderung sowohl für den Induktionshärter als auch für den Hersteller der Prüfausrüstung sowie den Spulendesigner dar.



Die Darstellung der 3.Oberwelle von 1.2 kHz liefert eine signifikante Aufspaltung der Wirbelstromsignale.

Die richtige Eintauchtiefe h der Prüfspule sowie das Spulendesign sind für eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dem gewünschten Härteauslauf entscheidend.

Darüber hinaus ist es die Möglichkeit der simultanen Oberwellenauswertung, die einen äußerst empfindlichen Nachweis der richtigen Härtezeit und der damit verbundenen Über- oder Unterhärtung liefert.

Zusammenfassung:

Neben der hohen Anzeigeempfindlichkeit für die Härte, den Härteauslauf und die Härtetiefe (iSHA) kommt durch die PMFP auch noch eine sehr hohe Prüfsicherheit in Bezug auf Materialverwechslung hinzu. Damit eignet sich dieses Wirbelstromverfahren hervorragend zur 100 %-Prüfung bei mittleren und hohen Stückzahlen zur Absicherung der Fertigungsqualität.

Mit dem gleichen Prüfgerät (**eddyvisor**[®], **eddyliner**[®] und **eddyguard**[®]) werden unter Verwendung höherer Prüffrequenzen und speziellen Prüfsonden sehr zuverlässig auch Oberflächenfehler wie Risse, Poren und Schleifbrand detektiert.