

# Prüfsicherheit und PMFP

## Einleitung

Hier soll die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Wirbelstrom (magnetinduktive Prüfung) im Bezug zur Prüfsicherheit betrachtet werden.

Wie allgemein bekannt, ist die Wirbelstromprüfung ein vergleichendes Verfahren, mit dessen Hilfe man zerstörungsfrei, schnell und zuweilen auch recht einfach werkstoffabhängige Parameter (Legierung, Härte, Zugfestigkeit, Randhärte, Randentkohlung etc.) überprüfen kann.

## Prüfsicherheit

Jeder Betrieb sichert heute die Qualität seiner Produkte durch Stichproben während der Produktion ab.

## Stichprobe und prozeßabhängige Parameter

Vom Prozeß abhängige Eigenschaften der produzierten Teile, wie z.B. die Zugfestigkeit die über einen Wärmebehandlungsprozeß eingestellt wird, unterliegen einer Streuung. Die Verteilung dieser Streuung wird im allgemeinen statistischen Regeln folgen und kann vorhergesagt oder angenommen werden. Zur Sicherstellung einer solchen Eigenschaft genügt es daher, eine bestimmte Anzahl von Stichproben zu untersuchen und aus deren Eigenschaften auf das Gesamtlos zu schließen.

## Stichprobe und prozeßunabhängige Parameter

Anders sieht die Sache dann aus, wenn innerhalb des Fertigungsprozesses zufällige Dinge passieren können, die sich den Gesetzen der statistischen Verteilung entziehen. Ich denke da besonders an ein einzelnes falsches Schmiedeteil (Materialverwechslung), einen vielleicht höchst selten vorkommenden Ofenhänger, eine verkehrte Stange in einem Los, ein falsches Coil, etc.  
.....

Wenn also durch die Stichprobenprüfung nicht 100% sichergestellt werden kann, daß alle Fehlteile gefunden werden, muß man wohl oder übel andere Verfahren heranziehen → eine 100% Prüfung mit Wirbelstrom.

## Prozeßdrift

Bei kontinuierlich laufenden Prozessen, wie z.B. dem induktiven Härten, ist es erforderlich, möglichst frühzeitig über langsame Änderungen eine Information zu bekommen. Es reicht also nicht aus, am Ende der Fertigung festzustellen, daß z.B. ein bestimmter Prozentsatz des Fertigungsloses durch langsames Wegdriften des Induktors falsch gehärtet wurde.

Nur die 100%-Prüfung bietet sich hier als Ausweg an. In diesem Fall nach dem Härten.

Selbstverständlich muß diese Prüfung einfach durchzuführen, schnell und sicher sein. Das altbekannte Verfahren der Wirbelstromprüfung wäre da schon richtig, wenn da nicht so ein gewisses Unbehagen wäre, weil doch damals die Verwechslung so und so nicht entdeckt worden ist und außerdem, ich habe gehört, ....., wer kennt nicht diese oder ähnliche Einwände.

Nun, an alle jene Zweifler richtet sich dieser Beitrag. Neue genauere Untersuchungen über die Permeabilität verschiedener Gefügestände, intelligentere Anwendung der Rechner-technik sowie eine ausgeklügelte Anordnung der Sensoren bewirken eine Prüfsicherheit, die noch nie zuvor erreicht worden ist.

## **Warum Mehrfrequenzprüfung (MFP) ?**

Zunächst einmal ein paar Worte über das eigentliche Prüfverfahren. Da ist einmal die Spule. Sie besteht im wesentlichen wie ein Transformator auch aus einer primären Wicklung und einer sekundären Wicklung. Die beiden Wicklungen sind so angeordnet, daß sie eine nur lose Kopplung aufweisen. In der noch leeren Spule wird bereits über das entstehende Magnetfeld aus der Primärwicklung in der Sekundärwicklung eine Spannung induziert (eine geringe).

Steckt man nun einen Prüfling in das Spulensystem, ändert sich der Koppelfaktor von der Primärwicklung zur Sekundärwicklung. Die Änderung dieses Koppelfaktors wird in erster Linie durch die elektrische Leitfähigkeit und die magnetische Leitfähigkeit (die Permeabilität) des Prüflings bestimmt. Diese beiden elektromagnetischen Eigenschaften korrelieren in starkem Maße mit dem Gefügestand des Prüflings. Ist er hart, hat er eine andere Permeabilität als im geglähten Zustand.

## Leitfähigkeit verschiedener Werkstoffe

Leiter	Elektrischer Widerstand $\rho$ $\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	Elektrische Leitfähigkeit $\kappa$ $\text{S} \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$	Temperaturbeiwert $\alpha$ $\text{K}^{-1}$ bzw. $1/^\circ\text{C}$
Aluminium, 99,5% Al, weich	0,0278	36	$4 \cdot 10^{-3}$
Al-Mg-Si	0,03...0,033	33...30	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Al-Bronze, 90% Cu, 10% Al	0,13	7,7	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Bismut (Wismut)	1,2	0,83	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Blei	0,208	4,8	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Bronze, 88% Cu, 12% Sn	0,18	5,56	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Cadmium	0,077	13	$4,2 \cdot 10^{-3}$
CrAl20 5 <sup>2)</sup>	1,37	0,73	$0,05 \cdot 10^{-3}$
CrAl30 5 <sup>2)</sup>	1,44	0,69	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Chromnickel, Cekas	s.NiCr8020		-
Dynamoblech	0,13	7,7	$4,5 \cdot 10^{-3}$
Dynamoblech legiert (1...5% Si)	0,27...0,67	3,7...1,5	-
Gold	0,022	45	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Grauguß	0,60...1,60	1,67...0,625	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Graphit	3	0,077	$0,2...0,7 \cdot 10^{-3}$
Kohle	50...100	0,02...0,01	$-0,2...-4 \cdot 10^{-3}$
Konstantan	0,49...0,51	2,04...1,96	$0,01...0,03 \cdot 10^{-3}$
Kupfer, Leitungs-, weich	0,01754	57	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Kupfer, Leitungs-, hart	0,01786	56	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Magnesium	0,046	21,6	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Manganin	0,43	2,33	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Messing	0,07	14,3	$1,3...4 \cdot 10^{-3}$
Molybdän	0,054	18,5	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Monelmetall	0,42	2,8	$0,19 \cdot 10^{-3}$
Neusilber	0,15...0,4	6,67...2,5	$3...3,5 \cdot 10^{-3}$
NiCr3020 <sup>2)</sup>	1,04	0,96	$0,24 \cdot 10^{-3}$
NiCr6015 <sup>2)</sup>	1,11	0,90	$0,13 \cdot 10^{-3}$
NiCr8020 <sup>2)</sup>	1,09	0,92	$0,04 \cdot 10^{-3}$
Nickel	0,09	11,1	$4 \cdot 10^{-3}$
Nickelin	0,4	2,5	$0,18...0,21 \cdot 10^{-3}$
Platin	0,1	10	$3,8...2,5 \cdot 10^{-3}$
Quecksilber	0,958	1,04	$0,90 \cdot 10^{-3}$
Silber	0,0165	60,5	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Stahl, 0,1% C, 0,5% Mn	0,13...0,15	7,7...6,7	$4...5 \cdot 10^{-3}$
Stahl, 0,25% C, 0,3% Si	0,18	5,5	$4...5 \cdot 10^{-3}$
Wolfram	0,055	18,2	$4,6 \cdot 10^{-3}$
Zink	0,063	15,9	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Zinn	0,12	8,33	$4,4 \cdot 10^{-3}$

- 1) Der spezifische Widerstand entspricht dem Widerstand eines Drahtes von 1m Länge und  $1\text{mm}^2$  Querschnitt.

## Permeabilität verschiedener Werkstoffe

Bezeichnung	Zusammensetzung	Anfangspermeabilität $\frac{V_s}{A_m} \cdot 10^{-6}$	Maximalpermeabilität $\frac{V_s}{A_m} \cdot 10^{-6}$	Hystereseverluste in W/kg bei		Magnetische Induktion in T bei	
				1,0 T	1,5 T	H = 25 A/cm	Sättigung
Dynamo-blech I	99,5 % Eisen 0,23 % Kohlenstoff 0,04 % Silizium 0,23 % Mangan Phosphor u. Schwefel	190	2500 bis 6300	3,6	8,6	1,53	2,1
Dynamo-blech II	98,6 % Eisen 0,25 % Kohlenstoff 1,03 % Silizium 0,12 % Mangan Phosphor u. Schwefel	230	2500 bis 6300	3,0	7,2	1,5	2,0
Dynamo-blech III	95,3 % Eisen 0,21 % Kohlenstoff 2,4 % Silizium 2,09 % Mangan Phosphor u. Schwefel	300	3800 bis 7500	2,6 ... 2,0	6,3 ... 4,9	1,48 ... 1,45	1,95
Dynamo-blech IV	95,7 % Eisen 0,7 % Kohlenstoff 4,1 % Silizium 0,13 % Mangan Phosphor u. Schwefel	500 bis 750	5000 bis 7500	1,7 ... 1,0	4,0 ... 2,0	1,43	1,90
Permalloy A	21,5 % Eisen 78,5 % Nickel	12000	95000				
Permalloy B	50 % Eisen 50 % Nickel	2800	75000				
Permalloy C	18 % Eisen 78,5 % Nickel 3 % Molybdän 0,5 % Mangan	20000	120000	0,04 ... 0,09 bei 0,5T			0,8 ... 0,9
Super-Permalloy	18,5 % Eisen 78,5 % Nickel 3 % Chrom	70000	120000		0,018		0,68 ... 0,8
Perme-norm	52 % Eisen 48 % Nickel	3700	50000		0,8		1,5
Mu-Metall	50 bis 76 % Nickel 5 bis 10 % Kupfer 0 bis 10 % Chrom 0 bis 0,8 % Mangan Rest Eisen	bis 25000	bis 100000	0,055			0,8

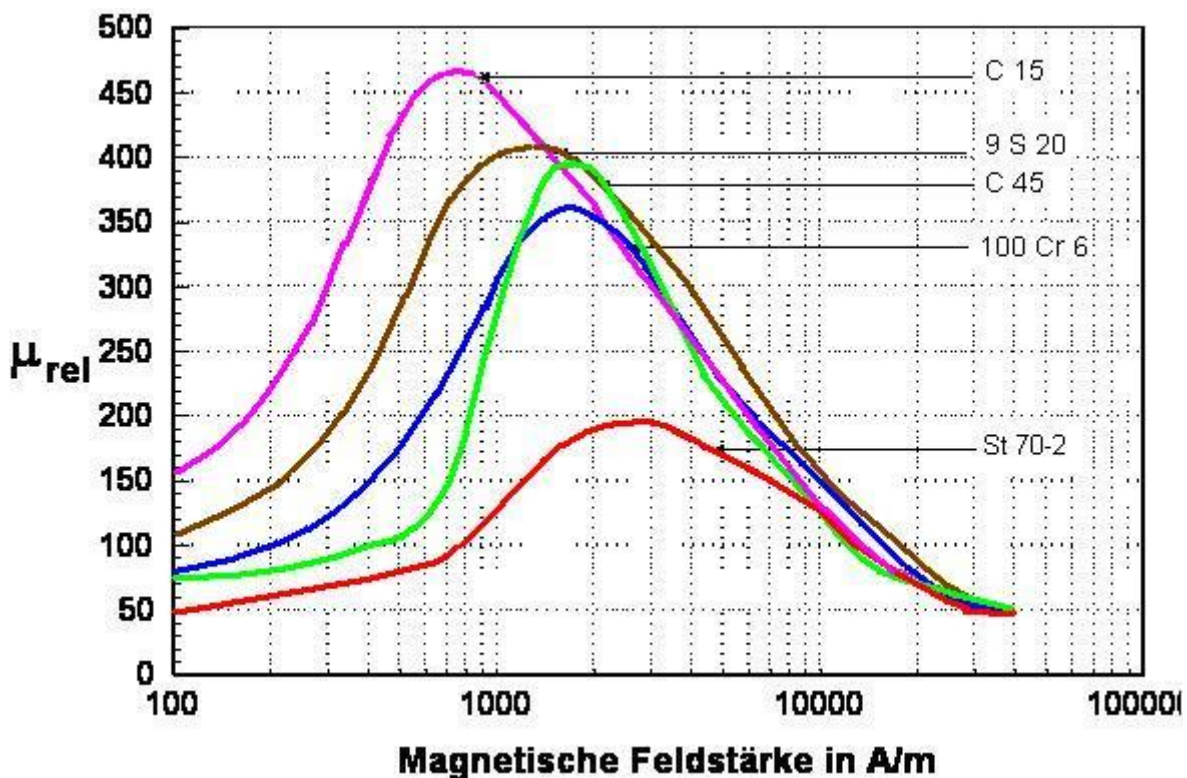
## Was ist Permeabilität?

Wenn wir von Permeabilität sprechen, so ist damit immer die relative Permeabilität gemeint. Sie ist eine dimensionslose Zahl die angibt, um wievielfach ein bestimmter Werkstoff magnetische Feldlinien besser leitet als Luft. Luft hat den Wert 1. Bei magnetisierbarem Stahl beträgt der Wert einige 10 bis zu einigen 1.000.

## Permeabilität und Feldstärke

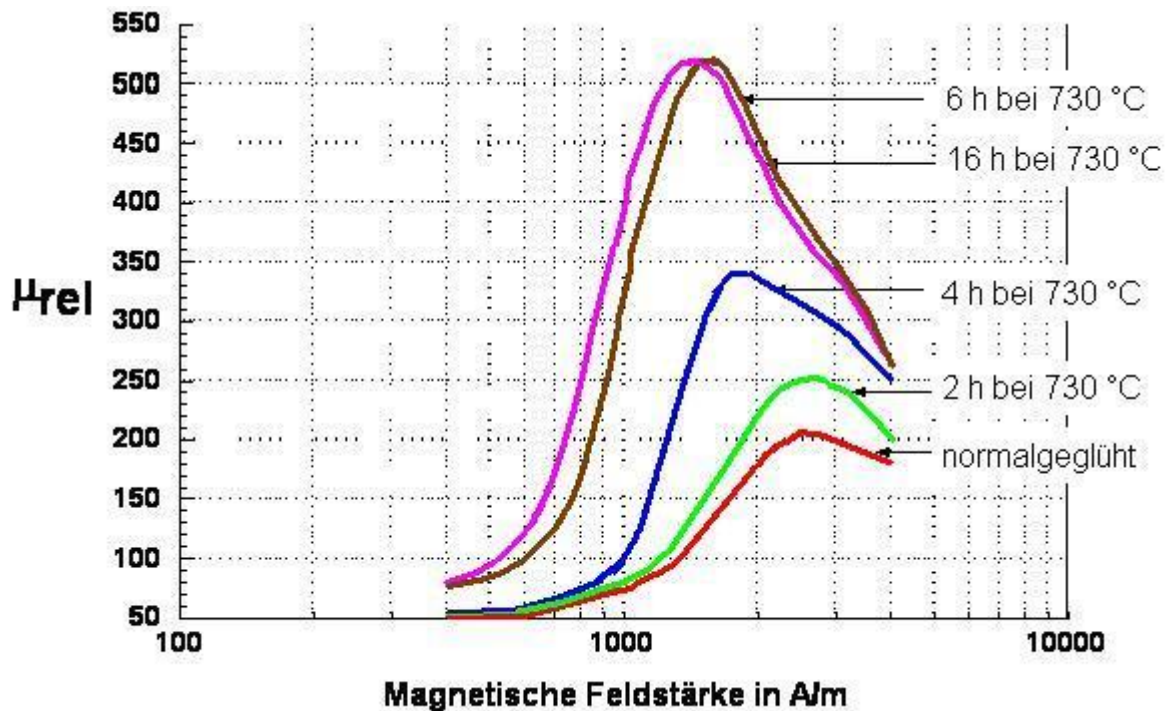
Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und Feldstärke ist stark nichtlinear. Bei sehr kleinen Feldstärken ist auch die Permeabilität niedrig (Anfangspermeabilität). Mit zunehmender Feldstärke steigt die Permeabilität auf den maximalen Wert an, um dann wieder auf kleinere Werte abzusinken. Die Ursache hierfür liegt in der Verschiebung der Blochwände sowie der Ausrichtung der Weiß'schen Magnetbezirke.

Untenstehendes Bild zeigt die verschiedenen Permeabilitätskurven unterschiedlicher Legierungen. [ 1 ]



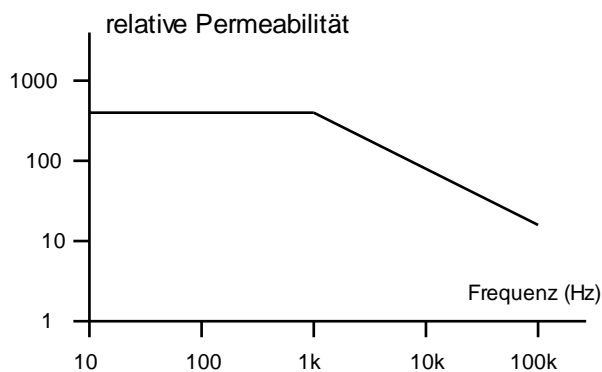
Ganz sicher kann man also davon ausgehen, daß unterschiedliche Gefügeausbildungen auch unterschiedliche Permeabilitätskurven aufweisen.

Hier sind nun verschiedene Weichglühzustände von 100Cr 6 und deren Permeabilitätsverhalten in Abhängigkeit von der Feldstärke dargestellt. [ 1 ]



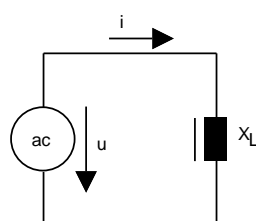
### Permeabilität und Frequenz

Zunächst haben wir die Wirkung der Permeabilität anhand eines sich in der Stärke ändernden Magnetfeldes betrachtet. Kehrt man jedoch die Polarität des Magnetfeldes um und tut dies periodisch, dann hat man es mit einer Frequenz zu tun. Je öfter man diese Umkehrung pro Zeiteinheit vornimmt, um so höher ist die Frequenz.



Man kann nun beobachten, daß die relative Permeabilität mit Zunahme der Frequenz geringer wird. Dies hat verschiedene Ursachen. Eine davon ist der im Material fließende Wirbelstrom.

### Spule und Strom



Der durch die Spule fließende Strom hängt von deren Widerstand gegen den Fluß dieses Stromes ab

$$i = \frac{u}{X_L}$$

## Widerstand der Spule

$$X_L = R + j2\pi f L$$

Der komplexe Widerstand der Spule zerlegt sich in zwei Größen. Zum einen in den Ohmschen Widerstand, zum anderen in den induktiven Widerstand. Während der Ohmsche Widerstand nur vom Kupferwiderstand der Spule bestimmt wird, richtet sich der induktive Widerstand nach der Induktivität der Spule und der Frequenz mit der der Strom durch die Spule geschickt wird. Zunehmende Frequenz erhöht den induktiven Widerstand, verringert damit den Strom.

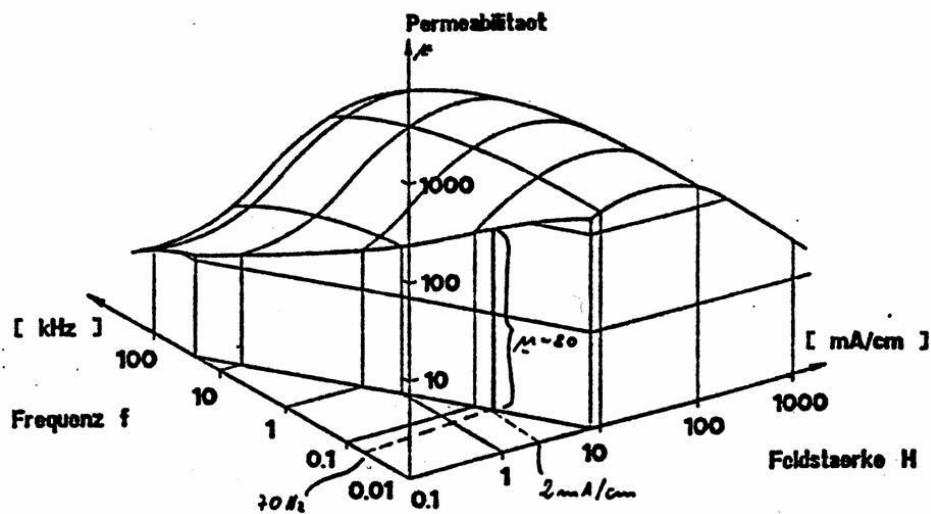
Direkt zu Strom proportional ist die in der Spule wirkende Feldstärke. Das bedeutet, daß höhere Ströme in der Spule eine höhere Feldstärke bewirken, niedrigere Ströme eine geringere.

$$F = k_L i$$

## Permeabilitätshügel

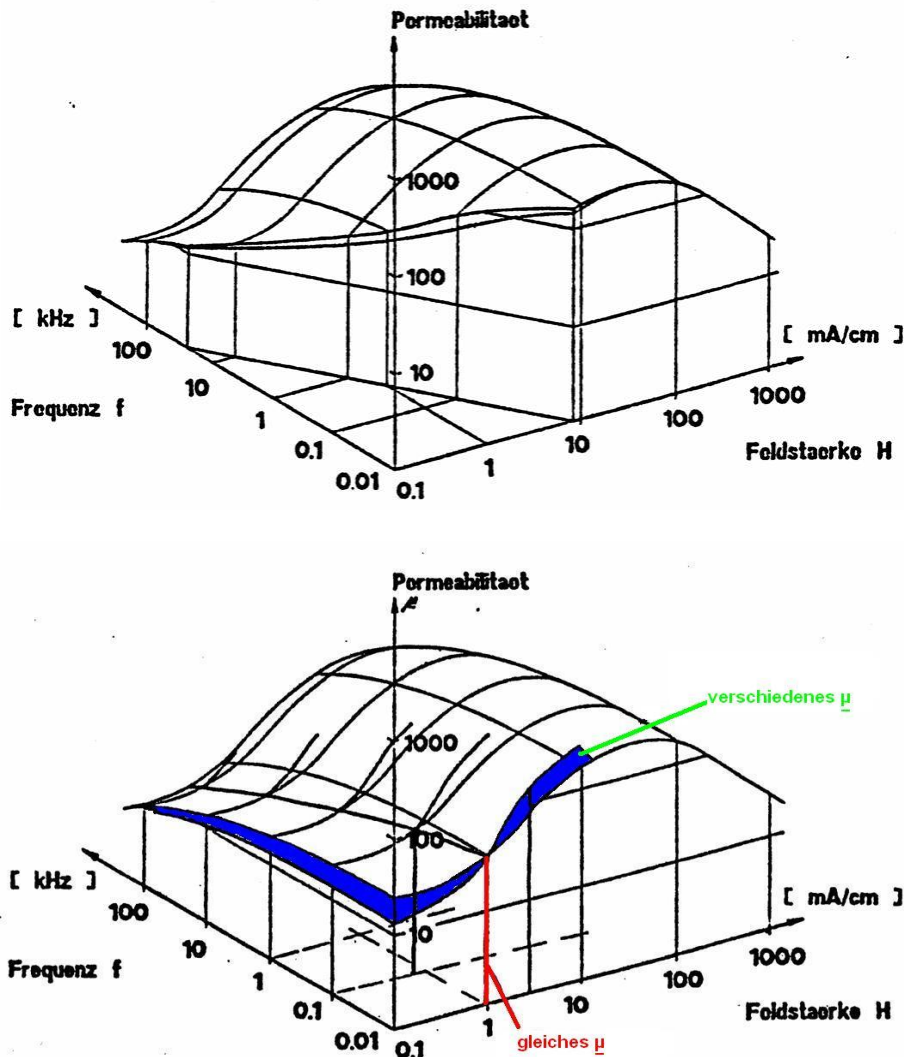
Zurück zum Prüfling. Ordnet man das Diagramm der relativen Permeabilität in Abhängigkeit von der Feldstärke und das Diagramm in Abhängigkeit zur Frequenz dreidimensional an, erhält man den sogenannten Permeabilitätshügel.

Dieser Permeabilitätshügel enthält die Information für jeden Arbeitspunkt, der durch die Feldstärke und die Frequenz eingestellt wird. Die Höhe oberhalb dieses Arbeitspunktes entspricht der relativen Permeabilität.



Mit dem Multifrequenzverfahren wird nun quasi eine Schnittebene quer durch den Permeabilitätshügel gelegt. Bei niedrigen Frequenzen haben wir es mit hohen Feldstärken zu tun, mit zunehmender Frequenz wird die Feldstärke immer geringer. Daher liegt diese Schnittebene schräg zu den aufgespannten Achsen.

## Gefüge und deren Permeabilitätshügel im Vergleich



Wie bereits bekannt, ergibt jedes Gefüge einen anderen Permeabilitätsverlauf. In dem dreidimensionalen Schaubild dargestellt kann man erkennen, daß an manchen Arbeitspunkten der Schnittebene ein großer Permeabilitätsunterschied besteht, an anderen Stellen hingegen ein kleiner. Da wo die Permeabilitätshügel ineinander übergehen oder sich durchdringen, kann erfahrungsgemäß mit Wirbelstrom keine Trennung erzielt werden, wie die die nebenstehenden Beispielbilder zeigen.

### Konsequenz daraus, die MFP (Mehrfrequenzprüfung)

Aus den oben gezeigten Schaubildern der Permeabilität kann sehr rasch gefolgert werden, daß nur die Prüfung mit mehreren Frequenzen auch tatsächlich alle Unterschiede zeigen kann. Wichtig ist dabei aber nicht die reine Anzahl der Frequenzen die auch sehr eng beieinander liegen könnte (wie z.B. Bei der CS-Technik), sondern ein sehr großer Abstand der einzelnen Frequenzen voneinander.



# Warum PMFP (Präventive Mehrfrequenzprüfung)?

## Unsicherheit der Stichprobe

Fehler, die durch prozessunabhängige Parameter auftreten, können mit einer Stichprobenprüfung nicht zuverlässig erkannt werden. Dürfen sich in einem Fertigungslos keine Schlechteile befinden (auch nicht ein einziges), führt kein Weg um eine 100%-Prüfung.

## Was alles könnte denn passieren?

Diese Frage wird sicherlich von jedem Betrieb anders beantwortet werden. So werden in einem Betrieb Materialverwechslungen kein Thema sein, in einem anderen hingegen können keine Fehler in der Wärmebehandlung auftreten. So vielfältig die Produktionen, so vielfältig sind natürlich auch Fehlermöglichkeiten. Tatsache ist jedenfalls, daß man meist nicht an alle möglichen Fehler von vornherein denken kann und sie daher nicht erhindern kann.

## Prüfsicherheit gegen unbekannte Fehler

Wenn man also nicht in die Zukunft blicken kann um Fehler zu vermeiden, dann wäre es zumindest schön, ein Verfahren zu haben, das alle Fehler die vorkommen aufzeigt, **das also eine Prüfsicherheit gegen unbekannte Fehler** aufweist.

Das wäre allzuschön, wird jetzt mancher von Ihnen denken. Doch Sie können ein solches Verfahren anwenden, Sie können es bei AHOTEC® E.K. kaufen.

## PMFP von AHOTEC® e.K.

Es ist sicherlich nicht so, daß man die präventive Mehrfrequenzprüfung nicht schon seit einigen Jahren kennt. Hinweise darauf gab es schon an verschiedenen Stellen immer wieder. Die alten Geräte jedoch hatten den doch eminenten Nachteil, daß die Prüfgeschwindigkeit mit der Anzahl der Frequenzen in starkem Maße abgenommen hat. So war es einfach nicht zumutbar, innerhalb eines Fertigungsprozesses einige Sekunden auf das Prüfergebnis zu warten.

Moderne Bauelemente der Elektronik einerseits und neue Schaltungskonzepte andererseits ermöglichen nun eine extrem kurze Meßzeit pro Prüffrequenz und damit eine extrem kurze Prüfzeit insgesamt. Damit ist die PMFP von AHOTEC® E.K. erst hoffähig geworden.

## Gegenwärtige Verfahren

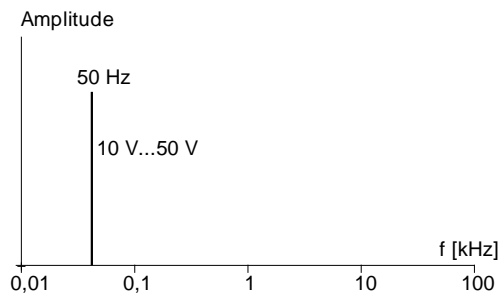
In diesem Punkt sollen nun alle gängigen Verfahren der Materialprüfung mittels Wirbelstrom dargestellt und gegeneinander verglichen werden.

### Einfrequenzverfahren

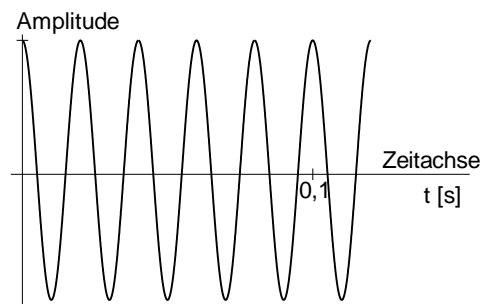
Die Prüfgeräte dieser Bauart, meist älteren Datums, verwenden zur Erregung der Wirbelströme meist 50Hz. Einige von ihnen sind in ihrer Frequenz umschaltbar, benutzen doch jeweils immer nur eine einzelne Frequenz.

Die Auswertung kann bei diesen Geräten auf verschiedene Art und Weise erfolgen, doch ist es meist bloß eine eindimensionale, d.h., nur in eine Richtung gehende, Auswertung.

### Einfrequenz-Technik



Ansicht im Frequenzbereich



Ansicht im Zeitbereich

Die Prüfgeschwindigkeit ist meist nicht sehr hoch, da die verwendeten Auswerteelektroniken noch recht langsam sind.

### Multiparameterprüfung

Prüfgeräte dieser Bauart können für die Prüfung sowohl Frequenz als auch den Spulenstrom verstellen. Manchmal bieten sie die Möglichkeit der Oberwellenauswertung.

Der Vergleich der Meßvektoren erfolgt bereits in der Impedanzebene zweidimensional, meist mit einem oder mehreren Toleranzfeldern.

Der nutzbare Frequenzbereich geht nur bis zu 1kHz, was, wie neuere Untersuchungen zeigen, als unzureichend anzusehen ist.

Die Prüfgeschwindigkeit liegt bei den bekannten Geräten im Bereich einer Sekunde.

## CS-Impuls

Um dieses Verfahren beurteilen zu können, muß man sich zunächst einmal etwas damit auseinandersetzen.

Der Gedanke hinter dieser Art der Wirbelstromprüfung liegt darin, mit nur einem Impuls, in dem eine große Anzahl von Frequenzen enthalten ist, dem Prüfling möglichst alle Geheimnisse zu entreißen.

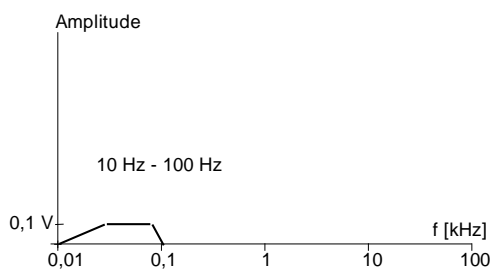
Wie wir nun mittlerweile alle wissen, kommt es aber **nicht auf eine möglichst hohe Anzahl unterschiedlicher Frequenzen an, sondern auf ein möglichst großes Frequenzband**, d.h. auf einen großen Unterschied zwischen der kleinsten und der höchsten Prüffrequenz (dieser Unterschied sollte **1 zu 1.000** oder **1 zu 5.000** betragen).

Die Prüfgeräte der CS-Impulstechnik überstreichen nun mit ihrem Impuls einen Frequenzbereich von z.B. 10Hz bis 100Hz oder 100Hz bis 1kHz, also einen Bereich von 1 zu 10. Hinzu kommt, daß die in dem Impuls enthaltenen Frequenzen zum Rand hin stark abgeschwächt sind. Dies führt dazu, daß der CS-Impuls nurmehr ein sehr schmales Spektrum an Frequenzen enthält und damit in seiner Aussagekraft den Einfrequenzverfahren sehr nahe kommt.

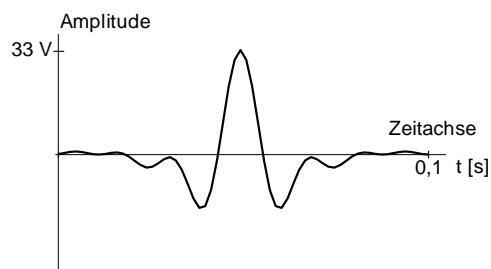
Darüber hinaus ist jede Frequenz nur mit einer minimalen Amplitude (ca. 0,1V !) an der Prüfung beteiligt. In Summe gibt das einen stattlichen Impuls, der den Prüfling aufmagnetisiert und damit in seinem Wirbelstromverhalten stark ändert. Eine Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse wird damit wirkungsvoll verhindert.

Die Möglichkeiten, die die Wirbelstromprüfung enthält werden mit diesem Verfahren bei weitem nicht ausgeschöpft.

## CS-Impulstechnik



Ansicht im Frequenzbereich



Ansicht im Zeitbereich

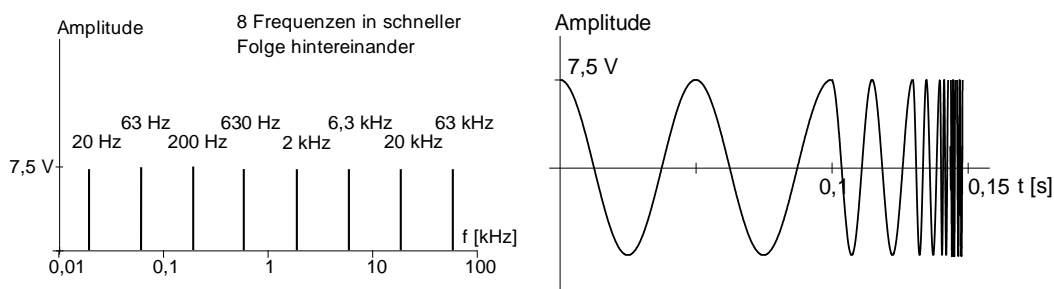
Hinzu kommt, daß das gewonnene Signal vom Prüfling mit nur einem einzigen Toleranzfeld verglichen wird und damit eine Vermischung von trennenden und nicht-trennenden Frequenzen stattfindet.

## Präventive Mehrfrequenzprüfung

Gegenüber all den o.g. Verfahren hat die präventive Mehrfrequenzprüfung den Vorteil, daß ein sehr breites Frequenzband benutzt wird, man für jede Frequenz ein Toleranzfeld zur Verfügung hat und die Prüfgeschwindigkeit in msek (tausendstel Sekunden) gemessen wird. Sie stellt gegenwärtig das Modernste dar, das man in der Werkstoffprüfung anwenden kann.

Da es durch die Verwendung neuester elektronischer Bauelemente gelungen ist, die Prüfzeit derart zu reduzieren, daß es völlig gleichgültig geworden ist, ob man mit einer, zwei oder acht Frequenzen prüft, (weil es eben in kürzester Zeit geschieht) kann man nun wirklich präventiv prüfen. Das heißt, einfach alle Informationen aus dem Werkstoff herauslesen, die in ihm drinstecken. Die sehr guten Erfahrungen der letzten Jahre mit dem damals noch etwas langsameren **INSITE-HT®** und der Option 01 haben oftmals gezeigt, daß es gerade die überraschend auftretenden Fehler waren, die zum einen mit der Präventiven-Mehrfrequenzprüfung entdeckt wurden, aber andererseits auch zu hohen Kosten geführt hätten, wenn sie nicht entdeckt worden wären.

### PMFP von AHOTEC® E.K.



Ansicht im Frequenzbereich

Ansicht im Zeitbereich

Die schnelle PMFP in Verbindung mit unserem **INSITE-HT** kann sogar bei der Prüfung von bewegten Prüflingen eingesetzt werden. Hierzu sind aber einige Randbedingungen zu beachten, die in dem **Aufsatz HOCHGESCHWINDIGKEITSPRÜFUNG MIT PMFP** dargelegt sind. Hierbei ist es möglich, bis zu 10 Teile pro Sekunde (das sind 36.000 Teile pro Stunde) unter Anwendung der PMFP mit 4 - 6 Frequenzen zu prüfen. Bei dieser Anwendung kommt man nun bereits in Bedrängnis, die Mechanik so auszuführen, daß sie das Prüfergebnis in eine Sortierung umsetzt. Bei Kugeln ist das Problem von AHOTEC® E.K. gelöst worden. Das heißt, die Anwendung der PMFP bei hoher Geschwindigkeit, als auch die mechanische Zuführung, Vereinzelung und Sortierung der Kugeln, wurde ermöglicht.

### Frequenzbereich der PMFP

Hinsichtlich des Frequenzbereiches unterscheidet sich die Reihe der **INSITE-HT®** - Geräte ganz wesentlich von seinen Wettbewerbern. So weist der **INSITE-HT®P** einen Frequenzbereich von 5Hz - 300kHz auf und überstreicht damit alle denkbaren Anwendungsbereiche der Materialprüfung mit Wirbelstrom.

Die niedrigen Frequenzen, besonders die Frequenzen unter 50Hz, werden zur Erzielung hoher Eindringtiefen benutzt. Hier kommt noch als besonderer Vorteil hinzu, daß AHOTEC® E.K. in der Lage ist, mit besonders niedrigen Erreger-Feldstärken arbeiten zu können (zur Erinnerung: niedrige Feldstärken haben niedrige Permeabilitäten zur Folge, niedrige Permeabilitäten begünstigen die Eindringtiefe des Wirbelstroms). Man kann also hier Randschichten prüfen, z.B. Randhärteiefen bis zu 6mm Härteiefe.

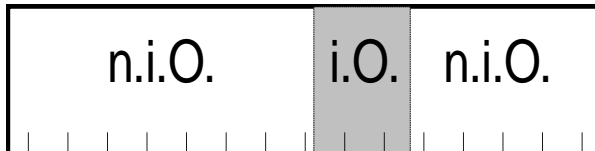
Der obere Bereich wird besonders bei Werkstoffen verwendet, die eine niedrige oder keine Permeabilität aufweisen. Man hat hier nur sehr geringe Eindringtiefen und bekommt oberflächennahe Effekte besonders deutlich angezeigt. (z.B. Randentkohlung)

Bei der Anwendung des großen Frequenzbereiches ist natürlich darauf zu achten, daß die verwendeten Spulen auch für diesen Frequenzbereich ausgelegt sind.

## Auswertelgorithmen und Toleranzfelder

Die vergleichende Überprüfung der Teile mit einem oder mehreren Schwellwerten erfolgt immer nach der Konvertierung der Materialinformation in ein elektrisches Signal.

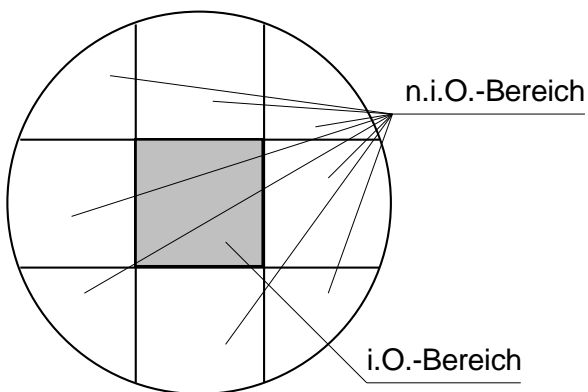
### Eindimensionale Auswertung



Die einfachste Form wird wohl bei den älteren, einfrequenten Geräten benutzt, bei der die erhaltene Spannung einen bestimmten Wert erreichen muß, einen zweiten Wert aber nicht überschreiten darf. Diese eindimensionalen Auswertungen erlauben nur eine sehr grobe

Informationsauswertung des erhaltenen Wirbelstromsignals.

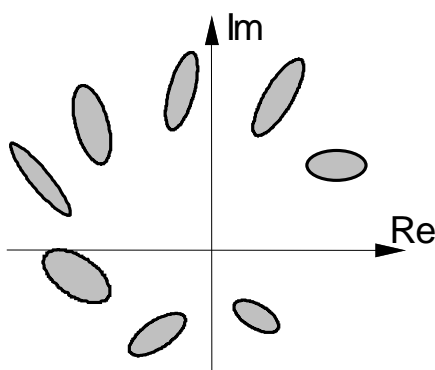
### Zweidimensionale Auswertung



Besser ist da schon die zweidimensionale Auswertung (auch wenn sie nur bei einer Frequenz gemacht wird), die eine bestimmte Fläche als Gut-Bereich definiert, in die der Spannungsvektor treffen soll. Diese Fläche, meist rechteckig oder quadratisch, kann mit Hilfe von Einstellpotentiometern verändert werden.

Hierzu ist es nötig, daß der Nutzer über die Streuung der Gut-Teile und das Wirbelstromverhalten viel Erfahrung besitzt, um seine Grenzwerte richtig legen zu können.

### PMFP nach AHOTEC® e.K.

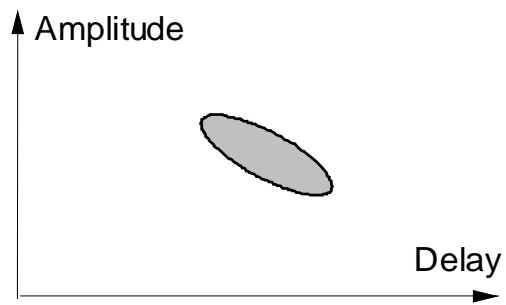


Einen großen Fortschritt zur Findung von gültigen Toleranzfeldern wurde durch den Mikroprozessor ermöglicht. Hier können dem Gerät viele i.O.-Teile gezeigt werden, deren charakteristisches Wirbelstromverhalten gespeichert wird und mit Hilfe des gespeicherten Wertes können die Toleranzfelder automatisch gebildet werden. In der Praxis hat sich gezeigt, daß die Ellipse, gebildet aus der kleinstmöglichen alle Punkte umschließenden Fläche, einen sehr gute Lösung darstellt.

Nur wenn alle

Toleranzfelder getroffen werden, kann man davon ausgehen, daß das Teil i.O. ist. Bereits ein einzelnes, nicht getroffenes Toleranzfeld klassifiziert das Teil als n.i.O.. Jede Änderung im tiefen, im mittleren oder oberen Frequenzbereich wird sofort signifikant angezeigt.









### CS-Impulstechnik



Verfahren, die nur ein einziges Toleranzfeld benutzen, können niemals die Trennschärfe erreichen, die mit der diskreten Beurteilung der diskreten Frequenzen einhergeht. Vielmehr wird hier die gesamte Information ausgemittelt und damit das ohnehin schmale Frequenzband in seiner Aussagekraft weiter geschmälert.











### 9S Mn Pb 28 K gegen Ck15 K, n.i.O-Anzeige

Fkt	Freq	Ø	1	2	Dist
A	4.0 12.5 Hz				0.24
B	4.0 40.0 Hz				0.36
C	4.0 125 Hz				0.39
D	4.0 400 Hz				0.71
E	4.0 1.25kHz				1.89
F	4.0 4.00kHz				0.84
G	4.0 12.5kHz				1.36
H	4.0 40.0kHz				3.23

Noch deutlicher wird der Vorteil der PMFP in diesem Fall. Nur die Frequenz 40 kHz bringt einen Vektorabstand > 2.0, nämlich 3,23.

Mit niederfrequenten Geräten wäre diese Verwechslung überhaupt nicht aufzufinden.









### X20 Cr 13 gegen Ck15 K, n.i.O-Anzeige

Fkt	Freq	Ø	1	2	Dist
A	4.0 12.5 Hz				1.56
B	4.0 40.0 Hz				0.61
C	4.0 125 Hz				0.73
D	4.0 400 Hz				0.91
E	4.0 1.25kHz				4.16
F	4.0 4.00kHz				15.71
G	4.0 12.5kHz				24.15
H	4.0 40.0kHz				23.81

Interessanterweise wird hier eine schwache Trennung auch bei der niedrigen Frequenz von 12,5 Hz angezeigt.

Deutlich wird die Trennung aber auch hier erst bei hohen Frequenzen.

### Ck45 K gegen Ck15 K, n.i.O-Anzeige

Fkt	Freq	Ø	1	2	Dist
A	4.0 12.5 Hz				1.01
B	4.0 40.0 Hz				2.51
C	4.0 125 Hz				15.70
D	4.0 400 Hz				10.92
E	4.0 1.25kHz				14.25
F	4.0 4.00kHz				13.51
G	4.0 12.5kHz				7.50
H	4.0 40.0kHz				0.90

In diesem Beispiel liegt die beste Trennung bei den mittleren Frequenzen.

Bei 40 kHz ist keine Trennung möglich.

Die Bilder der restlichen, obengenannten Werkstoffe zeigen eine sehr deutliche Trennung.

## Zusammenfassung

In dem vorstehenden Aufsatz konnte detailliert gezeigt werden, daß die PMFP von AHOTEC® eine sehr brauchbare Methode darstellt, um kostengünstig 100% - Prüfungen durchführen zu können. Die Anforderungen an das Prüfpersonal halten sich in Grenzen, die Einstellung des Gerätes kann in kürzester Zeit erfolgen. Die Prüfsicherheit ist gegenüber den bekannten Verfahren durch die Wahl des weiten Frequenzbandes ganz enorm gestiegen. Die Prüfzeit ist selbst bei Verwendung von 8 Frequenzen kein Nachteil mehr.



- Quellen:
- [ 1 ] Dissertation Dr.Ralf Natzke, TH Zwickau
  - [ 2 ] Werkstoffverwechselungs- und Härteprüfung mit Wirbelstrom; praktischer Einsatz der präventiven Mehrfrequenzprüfung – PMFP -, Arnold Horsch, 3. Kolloquium Qualitätssicherung durch Werkstoffprüfung, 1993, Zwickau
  - [ 3 ] Gefügeprüfung –Prüfsicherheit durch Mehrfrequenzprüfung, Herbert Baumgartner, 1995, Bochum
  - [ 4 ] Kontrollaufwand drastisch reduziert, Arnold Horsch 03/1993, Kontrolle, Konradin Verlag
  - [ 5 ] Vollautomatische Wirbelstromprüfung, Arnold Horsch 05/1994, Kontrolle, Konradin Verlag
  - [ 6 ] Automatic verification of induction hardening using eddy current and Preventive Multi Frequency Testing – PMFT-, Arnold Horsch, 6<sup>th</sup> international Induction Heating Seminar, 1995, Nashville, TN
  - [ 7 ] Non Destructive Hardening and Structure Testing using Multi Frequent Eddy Current Test Methods – PMFT – for 100% Inspection, Arnold Horsch ASM, Heat Treat Show and Conference, 1996, Chicago

**Der Autor:**

Arnold Horsch

**arnold horsch e.K.**

Berghäuser Straße 62

42859 Remscheid

Tel. +49 (0) 2191 7912021

Fax +49 (0) 2191 7912023

E-Mail [info@arnold-horsch.de](mailto:info@arnold-horsch.de)

Web [www.arnold-horsch.de](http://www.arnold-horsch.de)