

# Zerstörungsfreies Prüfverfahren zur schnellen, sicheren und wirtschaftlichen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften in Seriengussbauteilen

U. Maisl, L. v. Bernus, QNET Quality Management GmbH, Saarbrücken  
R. Frauendorfer, M. Kopp, I. Altpeter, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

---

## **Kurzfassung**

Zu den Produktionszielen der Gusshersteller gehören neben der Kostensenkung auch Maßnahmen wie Ausschußreduzierung und Steigerung der Qualität.

Um die gewünschte Gebrauchs- und Gussqualität der Produkte zu gewährleisten, ist es erforderlich die mechanischen Werkstoffeigenschaften des Bauteils genau zu kennen.

Mit dem hier vorgestellten elektromagnetischen Prüfverfahren können Werkstoffeigenschaften von Gussbauteilen zerstörungsfrei und schnell bestimmt werden.

Das Verfahren ermöglicht nach entsprechender Kalibrierung Gefügeuntersuchungen sowie Härte- und Eigenspannungsmessungen am Gussbauteil. Mit klassischen, zerstörenden Prüfverfahren - beispielsweise metallographischen Schliffbildanalysen, Ringkernverfahren, Härteprüfung nach Rockwell, usw. - wurden die zerstörungsfrei ermittelten Prüfergebnisse bestätigt.

## **Aufgabenstellung**

Der Konkurrenzdruck zwingt die Gusshersteller ihre Produkte schneller, qualitativ hochwertiger und zu Kosten herzustellen, die auf dem Markt akzeptiert werden.

Die Lieferung fehlerfreier Produkte, die gleichzeitig ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit erfüllen, erfordert jedoch eine ständige Kontrolle.

Die Qualitätssicherung der Gussbauteile erfolgte bislang stichprobenartig mit zerstörenden Methoden. Die Überwachung der Gefügestände wird mit Hilfe metallographischer Schliffbildanalysen und mechanischer Härtemessungen kosten- und zeitaufwendig durchgeführt. Die Bestimmung des Eigenspannungszustandes ist bislang aus wirtschaftlichen Gründen häufig nicht vertretbar.

Die sogenannte "Weißeinstrahlung" ist ein weit verbreitetes Problem bei der Herstellung von Gußeisen. Sie führt zu einer partiellen Versprödung des Werkstoffes und damit zu einer verringerten Belastbarkeit des Bauteils. Das Gefüge der "weiß" erstarrten Bereiche ist mehrfach härter als graphitisches Gefüge. Bei Gusseisen mit Kugelgraphit kann die Duktilität des Bauteils stark beeinträchtigt werden, was vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen zu Ausschuß führt. Bei Überschreitung festgelegter Mindesthäufigkeiten "weißer" Zonen bei der Stichprobennahme müssen aus Sicherheitsgründen mitunter ganze Bauteilchargen verworfen werden, obwohl sie überwiegend aus Gutteilen bestehen.

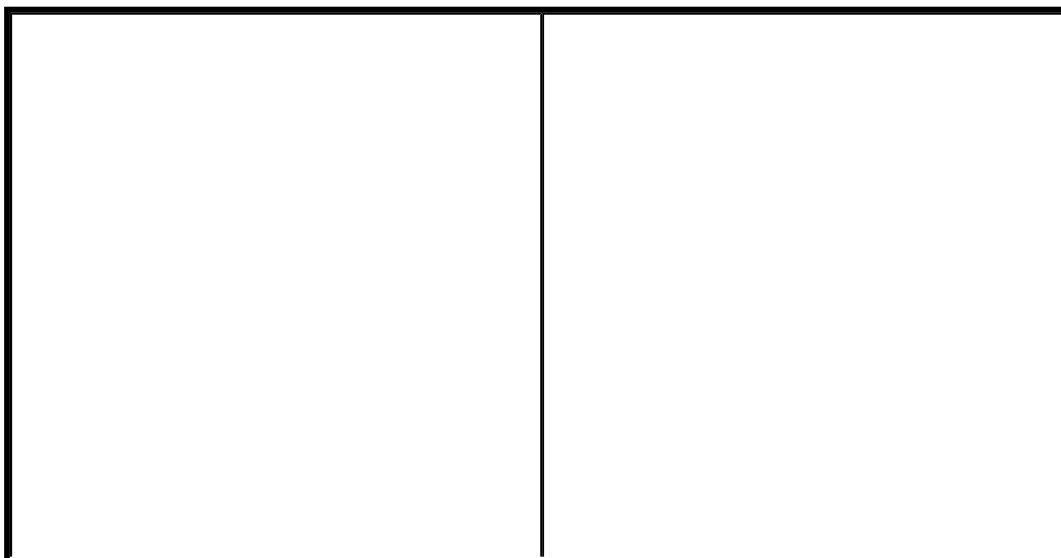
Neben der zerstörungsfreien Prüfung auf Weißeinstrahlung ist die Bestimmung von erhöhten Ferrit- und Perlitgefügebestandteilen in Korrelation zur mechanischen Härte, der Verformbarkeit und dem Festigkeitsverhalten von Gießereiprodukten von Bedeutung.

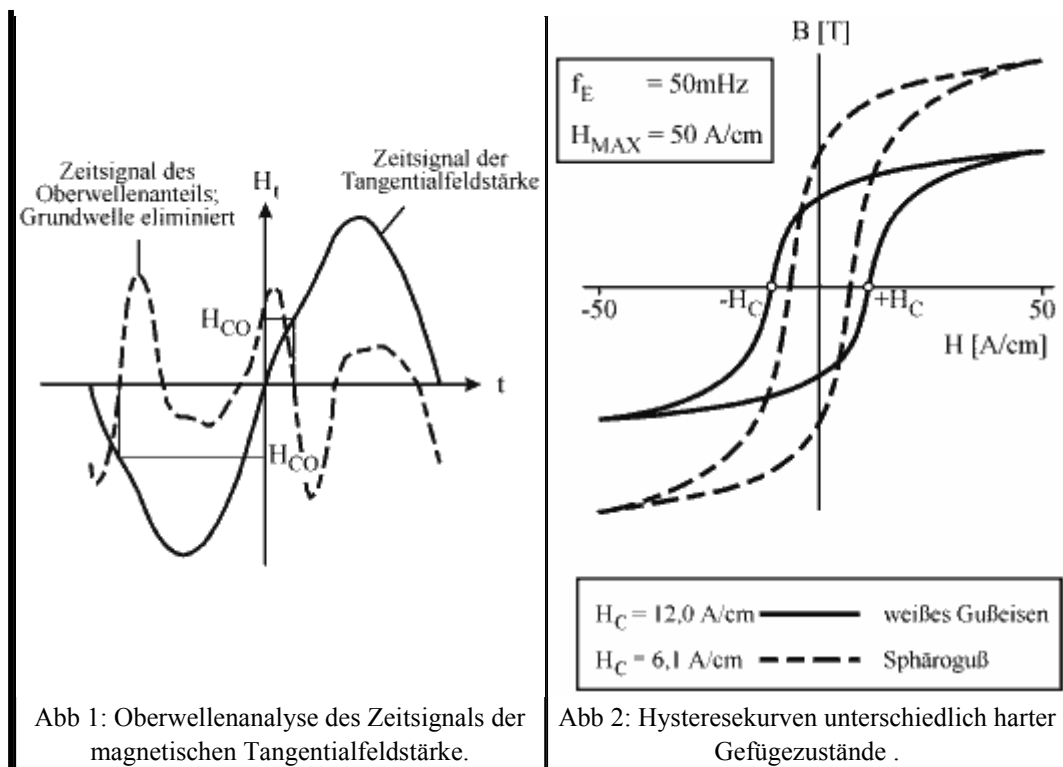
Für die moderne Fahrzeugentwicklung steht neben steigenden Sicherheitsansprüchen und sinkendem Kraftstoffverbrauch auch die ständige Verringerung der Fahrgeräusche und höheren Fahrkomfort im Mittelpunkt des Interesses. Das Phänomen des Bremsrubbels führt nicht nur zur Verminderung des Komforts, sondern kann auch zu weniger Sicherheit beim Fahren führen. Seit Jahren wird daher intensiv an der Ursache des Bremsrubbels geforscht.

Ein in diesem Zusammenhang diskutierter Ansatzpunkt ist auch der Eigenspannungszustand der Bremsscheibe. Man geht dabei davon aus, dass Eigenspannungen der Bremsscheibe für Dickenschwankungen während des Bremsens, und damit für ungleichmäßigen Verschleiß und die Anregung von Schwingungen, verantwortlich sind. Die unterschiedlichen Verfahren zur Eigenspannungsmessung sind entweder zu teuer, zu aufwendig oder kommen für Grauguss erst gar nicht in Frage. Um den Spannungseinfluss zu minimieren, werden Bremsscheiben derzeit in vielen Fällen vor der Endbearbeitung kostenintensiv spannungsarmgeglüht. Elektromagnetische Verfahren könnten hier eine Alternative zur konventionellen Messtechnik darstellen.

## **Grundlagen**

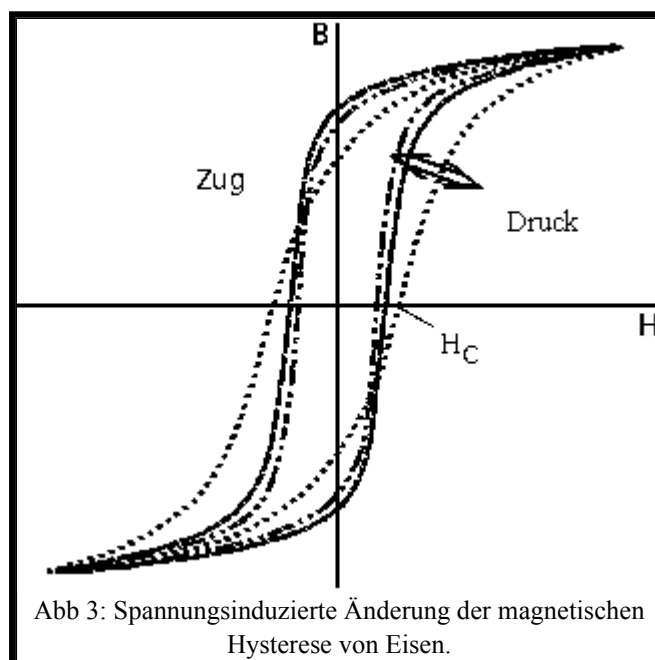
Bei dem hier vorgestellten Prüfverfahren handelt es sich um die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke. Dieses elektromagnetische Prüfverfahren erfordert das periodische Durchlaufen der ferromagnetischen Hysterese. Die magnetische Tangentialfeldstärke wird durch ein zwischen den Polschuhen des Elektromagneten angeordnetes Hallelement erfaßt. Die Nichtlinearität der ferromagnetischen Hysterese verursacht im Zeitsignal der Tangentialfeldstärke neben der Grundschwingung höhere Harmonische (Oberwellen), deren Spektrum stark von der -werkstoffabhängigen- Form der magnetischen Hysteresekurve, aber auch von der jeweiligen Auslegung der Magnetisierungsvorrichtung abhängt. Eine Analyse der während der Wechselfeldmagnetisierung auftretenden Oberwellenanteile läßt Rückschlüsse auf die ferromagnetischen Eigenschaften des zu prüfenden Werkstoffes zu. In mehreren Arbeiten wurde gezeigt, daß ein Zusammenhang zwischen mechanischen und ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften besteht [1-4]. In diesem Zusammenhang wird lediglich auf zwei Phänomene eingegangen. Bei unterschiedlich harten Gefügeständen weitet sich die Hysterese in charakteristischer Weise auf; Eigenspannungen hingegen führen zu einer Scherung der magnetischen Hysteresekurve (Bild 2 und 3)[4-8].





Aus der Oberwellenanalyse lassen sich mehrere Prüfgrößen bestimmen. Zum einen wird die Koerzitivfeldstärke  $H_{CO}$  bestimmt, die sich als der Feldstärkewert bei einer charakteristischen Nullstelle des Oberwellen-Zeitsignals ergibt (Bild 1), zum anderen der Klirrfaktor  $K$ , der den Oberwellengehalt quantitativ als unabhängige Prüfgröße erfaßt. Weitere Prüfgrößen sind Amplituden, Phasen und Phasenverschiebung des zeitlichen Tangentialfeldstärkesignals.

In mehreren Arbeiten [9-11] und im Rahmen eines AiF- Projektes [12] wurde die Eignung des elektromagnetischen Prüfverfahrens zur Überprüfung des Gefüge- und Eigenspannungszustandes an einfachen Probengeometrien mit gezielt eingestellter Gefügestruktur und Eigenspannungszustand nachgewiesen.



## Technische Realisierung

### ***Gefügeprüfer WE 21***

Im Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren wurde das Prüfgerät Gefügeprüfer WE21 entwickelt, das vom Aufbau und der Handhabung her den Anforderungen eines Einsatzes in Gießereien und Fertigungsbetrieben gewachsen ist (Bild 4).

Ein Prüfkopfsystem magnetisiert in Aufsatztechnik das Bauteil über die Polschuhe eines Elektromagneten. Eine im Prüfkopf integrierte Hallsonde misst die magnetische Tangentialfeldstärke (Bild 4). Mit einer Frequenzanalyse (FFT) werden die Amplituden und Phasen der dabei auftretenden Oberwellensignale ermittelt. Die daraus abgeleiteten Prüfgrößen werden mittels einer Software ausgewertet und geben Auskunft über die zu untersuchende Werkstoffeigenschaft.

Die Mess- und Auswertezeit liegt im Sekundenbereich. Um eine reproduzierbare Messung zu gewährleisten, ist in den meisten Anwendungsfällen eine Halterung von Prüfkopf und Prüfobjekt durch eine Einspannvorrichtung notwendig.

Das Prüfgerät ermöglicht durch die Verwendung unterschiedlicher Polschuhaufsätze am Prüfkopf eine leichte Sensoranpassung und kann für eine große Palette von Bauteilgeometrien in Gießereien eingesetzt werden (Bild 5).



Abb 4: Prüfgerät WE21 zur Oberwellenanalyse.

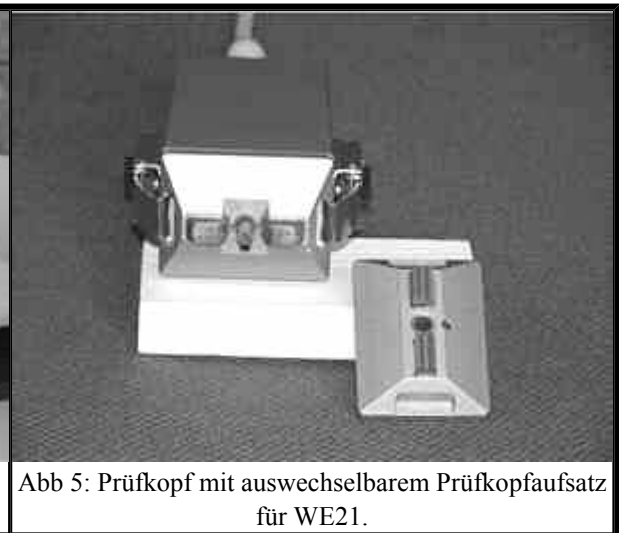


Abb 5: Prüfkopf mit auswechselbarem Prüfkopfaufsatz für WE21.

### ***Kalibriermodi***

Die Auswertung kann sowohl qualitativ als auch quantitativ erfolgen. Die qualitative Bewertung (**Gut- und Schlecht-Sortierung**) wird dann durchgeführt, wenn die Prüfaufgabe darin besteht, die Proben aufgrund einer vorgegebenen Klassifizierung bezüglich ihrer Materialeigenschaft (z.B. Härte, Weisseinstrahlung) zu sortieren. Die Klassifizierung durch eine Kalibrierung an Gut- und Schlecht-Teilen erfolgt hier über eine Schwellenwertbestimmung in einer der elektromagnetischen Prüfgrößen.

Die **quantitative Zielgrößenbestimmung** ermöglicht die zahlenmäßige Bestimmung von Eigenspannungen und mechanisch- technologischen Werkstoffkenngrößen (z.B. Weisseinstrahlungstiefe, Härte und Härtetiefe). Hierbei müssen zerstörend ermittelte Kennwerte als Referenzwerte zugrunde gelegt werden. Diese müssen am Ort der elektromagnetischen Prüfstelle ermittelt werden. Ziel der Kalibrierung ist es, mit Hilfe eines Leastsquare- Regressions-Ansatzes eine mathematische Funktion zu erstellen, die aus den magnetischen Prüfgrößen die Zielgröße berechnet. Die so ermittelte Zielgröße kann zusätzlich zu einer Klassifizierung verwendet werden.

## **Anwendungsfelder**

Das Prüfgerät ermöglicht Gefügeuntersuchungen (Weißeinstrahlung, Ferrit-/ Perlitgehalt) sowie Härte- und Eigenspannungsmessungen am Gussbauteil und kann unmittelbar nach Herstellung der Gussrohlinge oder nach der Bearbeitung Informationen über den Werkstoffzustand liefern.

Bei genauer Kenntnis des Eigenspannungszustandes kann man sowohl den Ausschuss durch Optimierung des Fertigungsprozesses reduzieren als auch Teile verminderter Gussqualität vor der Verarbeitung aussortieren sowie gegebenenfalls eine Wärmebehandlung einsparen.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Ausgangsprüfung sowie das Aussortieren von Gutteilen aus Schlecht-Produktionen, die ansonsten zu 100 % verschrottet werden müssten. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit und Messgeschwindigkeit läßt sich das Prüfgerät in eine automatisierte Prüfeinrichtung integrieren und ermöglicht eine schnelle, kostengünstige Prüfung großer Stückzahlen.

## Applikationsbeispiele

Das im IZFP entwickelte Prüfgerät WE21 wurde bereits mehrfach erfolgreich bei Vorortuntersuchungen in Gießereien eingesetzt. Hierbei wurden unterschiedliche Bauteiltypen aus der Serienproduktion, wie zum Beispiel Teile von Fahrzeugbremsen, Schaltungen, Antriebsaggregaten und Bremscheiben in großer Stückzahl untersucht. Als Beispiel für diese Untersuchungen sind nachfolgend die Meßergebnisse für einige Bauteiltypen dargestellt.

### *Weisseinstrahlung: (Gut- und Schlechtsortierung)*

Zur Optimierung des Fertigungsprozesses sollten 230 000 sicherheitsrelevante Sphärogußbauteile gleichen Typs vor Ort untersucht werden. Die Kalibrierung erfolgte an einem Probensatz, bestehend aus 10 Gutteilen (i.o.) und 21 Schlechteilen (n.i.o.). Die Messparameter (Erregerfrequenz und Magnetfeldaussteuerung) wurden so ermittelt, dass eine optimale Klassenunterteilung möglich war (Bild 6).

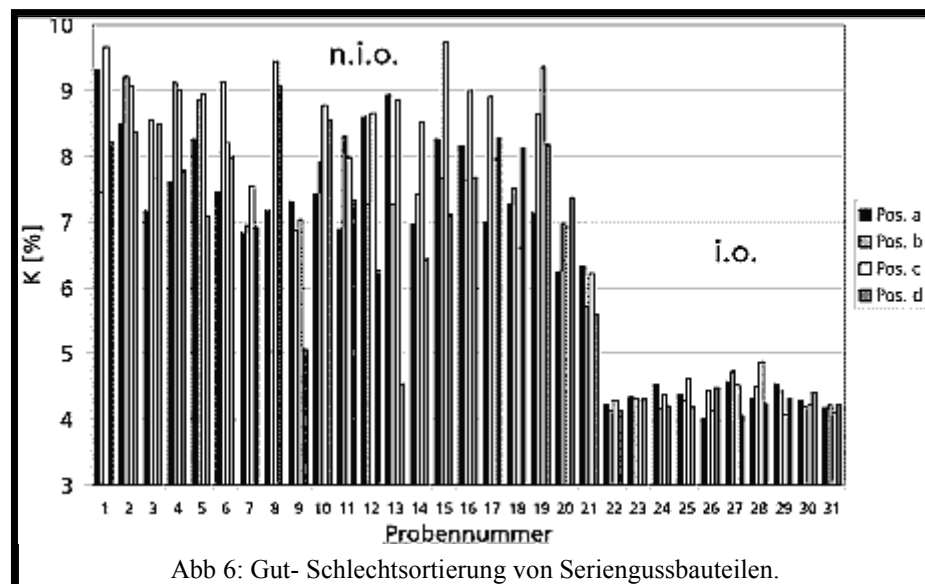


Abb 6: Gut- Schlechtsortierung von Seriengussbauteilen.

Die Prüfung erfolgte an jeweils vier Messpositionen (a-d), die aufgrund ihrer geringen Wandstärke besonders anfällig für Weißeinstrahlung sind.

In Bild 6 ist für jede Probe, die an den Messpositionen a-d gemessene Prüfgröße Klirrfaktor K aufgetragen. Anhand der Messwertverteilung wurde für die Prüfgröße Klirrfaktor ein Schwellenwert von  $K=5\%$  festgelegt. Man erkennt eine deutliche Klassentrennung zwischen Gut- und Schlechteilen.

Die anschließende Serienprüfung vor Ort ergab 5% Ausschuß, wobei nicht nur weißeingestrahelte Teile, sondern auch Teile mit zu hohem Ferritgehalt verschrottet wurden.

Metallographische Gegenprüfungen an Gut- und Schlechteilen bestätigten die elektromagnetischen Prüfergebnisse.

### ***Weisseinstrahlungstiefe (Quantitative Zielgrößenbestimmung)***

Neben der Weisseinstrahlung ermöglicht der Gefügeprüfer auch die quantitative Ermittlung der Weisseinstrahlungstiefe mit der Nachweisgrenze 10 %. Darunter versteht man die Tiefe bei der - ausgehend von der Probenoberfläche - 10 % des Gefüges weisseingestrahlt vorliegen.

Erste Untersuchungen zeigen eine gute Korrelation zwischen der zerstörungsfreien Prüfgröße Klirrfaktor K und der metallographisch ermittelten Weisseinstrahlungstiefe.

Diese Ergebnisse müssen an einem größeren Probensatz statistisch abgesichert werden.

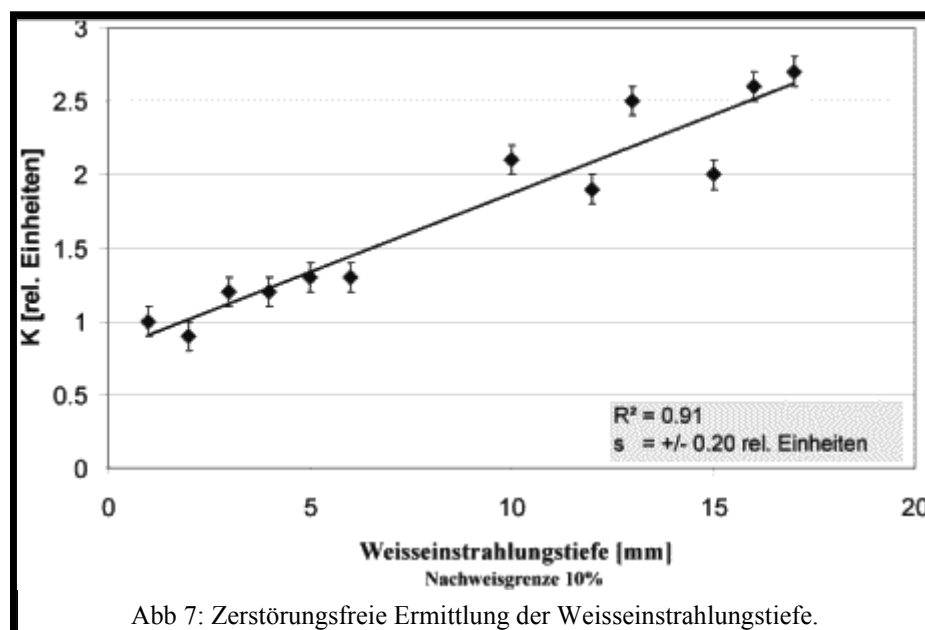
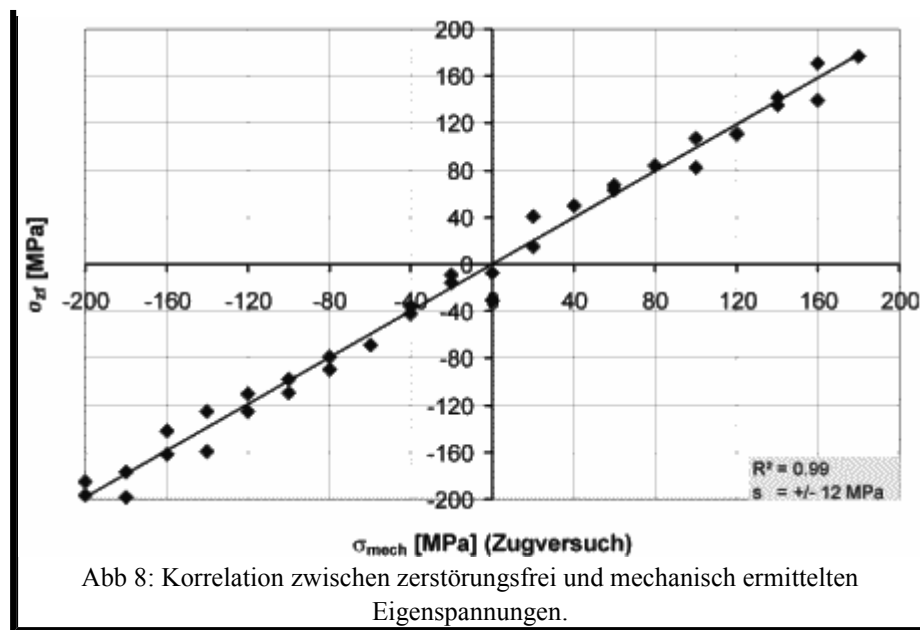


Abb 7: Zerstörungsfreie Ermittlung der Weisseinstrahlungstiefe.

### ***Voruntersuchungen zum Spannungseinfluss (Zug-/ Druckversuch)***

Um grundsätzlich die Spannungsempfindlichkeit des Oberwellenanalyseverfahrens aufzuzeigen, wurden zwei Rundproben aus Grauguß (GG30) im statischen Versuch definierten Zug- und Druckbelastungen ausgesetzt. Bei den jeweils aufgebrachten Lastspannungen im Bereich von (-)200 bis (+)180 MPa wurde die Änderung im magnetischen Verhalten der Proben gemessen, [13]. Der Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Prüfgrößen und den eingestellten Zug- und Drucklastspannungswerten wurde über einen Regressionsansatz ermittelt. In Bild 8 sind die mit diesem Regressionsansatz bestimmten Spannungswerte über die mechanisch aufgebrachten, bekannten Lastspannungen aufgetragen. An beiden untersuchten Proben zeigt der Ansatz eine sehr gute Korrelation zwischen zerstörungsfrei und im Zugversuch ermittelten Spannungswerten ( $r^2 = 0.99$ ;  $s = \pm 12$  MPa).

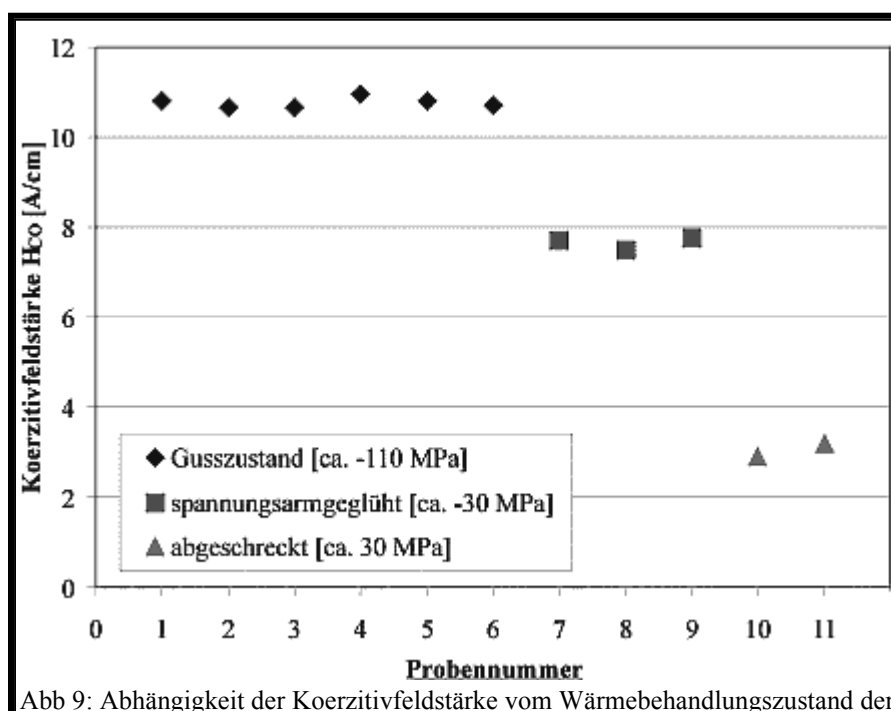




### ***Qualitative und quantitative Eigenspannungsmessungen an Bremscheiben***

In Untersuchungen an Bremscheiben aus der Serie sollte festgestellt werden, ob eine quantitative Bewertung des Eigenspannungszustandes auch am Bauteil möglich ist. Um ein möglichst breites Spektrum an Spannungszuständen zu erfassen wurden nicht nur Teile aus der Serie überprüft, sondern auch gezielt zwei verschiedene Wärmebehandlungszustände und somit verschiedene Spannungszustände eingestellt. Diese waren zum einen das in der Praxis übliche Spannungsarmglühen mit sehr niedrigen Restspannungen im Druckbereich und zum anderen eine extreme Abkühlung, um gezielt Zugeigenspannungen im Bauteil zu erzeugen.

Die Proben wurden an je vier um 90 Grad versetzten Messpositionen auf der hutangebundenen und der gegenüberliegenden Seite untersucht, (Bild 4). Erste qualitative Ergebnisse zeigt Bild 9. Hier ist die Abhängigkeit der Koerzitivfeldstärke  $H_{CO}$  vom Wärmebehandlungszustand der Proben gezeigt. Die Bremscheiben sind mit dieser Prüfgröße eindeutig dem jeweiligen Wärmebehandlungszustand zuzuordnen, der auch ein Maß für die vorliegenden Eigenspannungen ist, die mittels Ringkernverfahren ermittelt wurden [13].



### Bremsscheiben (Spannungswerte aus Ringkernverfahren).

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war es, zu einer Aussage zu gelangen, ob der Eigenspannungszustand vor und nach der Endbearbeitung Ursache für das Bremsrattern ist und inwiefern das Spannungsarmglühen Einfluss auf das Auftreten des Rubbelns hat.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Gegenüberstellung der elektromagnetisch und mechanisch ermittelten Eigenspannungsmesswerte beispielhaft an Bremsscheiben unterschiedlicher Wärmebehandlungs- und Bearbeitungszustände. Die mit dem Ringkernverfahren bestimmten Eigenspannungswerte sind Mittelwerte über die gesamte Messtiefe von 5 mm und beziehen sich auf die Hauptspannungswerte in tangentialer Richtung der Bremsscheiben. Die Messgenauigkeit des Ringkernverfahrens liegt bei  $\pm 20$  bis 30 MPa.

Wärmebehandlungszustand	Bearbeitungszustand	$\sigma$ Ringkern [MPa]	$\sigma$ magnetisch [MPa]
ungeglüht	Unbearbeitet	- 131	- 119
geglüht	Unbearbeitet	- 19	- 14
ungeglüht	Bearbeitet	- 2	- 6
geglüht	Bearbeitet	- 4	- 7

Tabelle 1.

Die elektromagnetisch ermittelten Eigenspannungswerte wurden über eine Regressionsanalyse unter Zugrundelegung der Ringkern- Referenzwerte erzielt (siehe Tabelle 1).

Vor der Bearbeitung unterscheiden sich die unterschiedlich wärmebehandelten Bremsscheiben deutlich in ihren Eigenspannungswerten. Nach der Bearbeitung ist der Eigenspannungszustand sowohl im geglühten als auch ungeglühten Zustand nahezu gleich. Somit hat das Spannungsarmglühen der Bremsscheiben vor der Bearbeitung keinen Einfluss auf den Eigenspannungszustand nach der Bearbeitung.

Im Rahmen der Messgenauigkeit beider Verfahren zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den elektromagnetisch und mittels Ringkernverfahren ermittelten Eigenspannungswerten. Magnetisch lassen sich Eigenspannungswerte mit einer Genauigkeit von  $\pm 20$  bis 30 MPa erfassen.

Zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Bremsrubbeln und Eigenspannungszustand sind weitere Untersuchungen notwendig [14].

## Zusammenfassung

Das vorgestellte elektromagnetische Prüfverfahren eignet sich zur schnellen, sicheren und wirtschaftlichen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften in Seriengussbauteilen Dies konnte durch zahlreiche Prüfeinsätze in Gießereien belegt werden.

Elektromagnetische Prüfverfahren ermöglichen eine Rückkopplung auf den Gießprozess und sind somit hilfreich bei der Optimierung von Verfahrensparametern.

Ziel weiterer Untersuchungen ist es das Prüfverfahren vollautomatisiert in den Prüfablauf zu integrieren.

## Literatur

1. G. Dobmann, H. Pitsch: Magnetic tangential field-strength-inspection, a further tool for 3MA, in: Nondestructive Characterization of Materials, Springer Verlag Berlin Heidelberg (1989), 636-643
2. I. Altpeter: Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Meßgrößen, Universität des Saarlandes, Dissertation 1990, IZFP-Bericht: 900111-TW
3. I. Altpeter: Nondestructive Evaluation of cementite content in steel and white cast iron using inductive Barkhausen noise, Journal of Nondestructive Evaluation, **15** 2 (1996), pp 45-59
4. E. Kneller: Ferromagnetismus, Springer Verlag (1962)
5. B.D. Cullity: Introduction to magnetic materials, Addison Wesley (1972)
6. D.C Jiles and D.L Atherton: Theory of magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect, J.Phys.D: Appl. Phys., **17** (1984) pp 1265-1281
7. D.J. Craik and M.J. Wood: Magnetization changes induced by stress in a constant applied field, J.Phys.D: Appl. Phys., **3** (1970) pp 1009-1016
8. D.L Atherton and D.C Jiles: Effects of stress on magnetization, NDT International, **19** 3 (1986) pp 15-19
9. U. Laub, I. Altpeter, N. Meyendorf: "Nachweis der Weißeinstrahlung an Gußbauteilen aus der Serienproduktion mittels mikromagnetischer Prüfverfahren", Proceedings DGZfP, 1994, Timmendorfer Strand (1995)
10. U. Laub: Grundlegende Untersuchungen zum Nachweis der Weißeinstrahlung an Gußbauteilen aus der Serienproduktion mittels mikromagnetischer Prüfverfahren, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit 1994, IZFP-Bericht: 940121-TW
11. U. Laub: Cast Iron Inspection by Means of Micromagnetic Procedures, European Conference of Non-Destructive Testing (7), **2**, Broendy, Denmark, 1998, pp 1094-1101
12. I. Altpeter, et. al: Entwicklung eines zerstörungsfreien Meßverfahrens zur Lokalisierung der Weißeinstrahlung sowie Bestimmung der Einstrahltiefe an Flachproben und Gußbauteilen aus der Serienproduktion, IZFP- Bericht: 950208-E (1995)
13. U. Maisl, R. Frauendorfer, M. Kopp, I. Altpeter: Zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Bestimmung von Werkstoffeigenschaften von Gusseisen, in: Gießerei-Praxis, Heft3/2000, S. 113-121
14. R. Frauendorfer: Elektromagnetische Detektion von Eigenspannungen in PKW-Bremsscheiben als mögliche Ursache für das Bremsrubbeln, Universität des Saarlandes, Diplomarbeit 2001

,CT\_MT,CT\_other\_methods,CT\_instrumentation,CT\_frequency\_analysis,CT\_castings

Herausgeber: DGfZP,  
Programmierung: NDT.net

