

Zerstörungsfreie Charakterisierung von Gusseisen-Gradienten- Zylinderkurbelgehäusen (ZKG) mittels elektromagnetischer Prüfverfahren

Mohammed ABUHAMAD, Iris ALTPETER, Gerd DOBMANN, Melanie KOPP,
Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
Herbert JUNK, Dirk RADEBACH, Halberg Guss, Saarbrücken
Ute MAISL, Q-NET Engineering, Saarbrücken

Kurzfassung. Zur Gewichtsreduzierung beim Antriebsaggregat von PKW-Verbrennungsmotoren werden Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) aus Gusseisen mit Vermikulargraphit hergestellt, weil dieser Werkstoff eine höhere Festigkeit als Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) aufweist. Da die Werkzeugstandzeiten bei der Bearbeitung von GJV geringer als beim GJL sind, ist es das Ziel von Gussherstellern diesen wirtschaftlichen Nachteil der höheren Bearbeitungskosten durch ein besser bearbeitbares aber dennoch hochfestes, also innovatives ZKG zu ersetzen. An den bearbeitungsintensiven Stellen, den Zylinderläufen, soll das ZKG partiell einen Gefügestufen in radialer Richtung von GJL nach GJV aufweisen. Ein Teilziel des Forschungsprojektes war die zerstörungsfreie Charakterisierung des Gradientenwerkstoffes mittels mikromagnetischer Prüfverfahren. Hierzu kam ein speziell an die Geometrie des Zylinders angepasster elektromagnetischer Prüfkopf zum Einsatz.

Da elektromagnetische Prüfverfahren gefügesensitiv sind und Strukturmerkmale tiefenabhängig erkennen können, besitzen sie hohes Potential zur Charakterisierung von Gradientenverläufen in Gusswerkstoffen. Insbesondere durch das magnetische Barkhausenrauschen werden tiefenabhängige Prüfinformationen zum einen durch Variation der Barkhausenanalysierfrequenz, zum anderen durch Variation der Magnetfeldstärke erhalten, wenn sich die einzelnen Gefügestufen in ihren Koerzitivfeldstärken unterscheiden.

Die elektromagnetischen Prüfgrößen wurden mit Hilfe metallographischer Kennwerte kalibriert. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den elektromagnetisch und metallographisch ermittelten GJL-Schichtdicken erzielt werden. Diese Kalibrierung wurde erfolgreich validiert.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Gradientenwerkstoffe zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit und Tribologie von Komponenten im Motorenbau“ durchgeführt.

Ausgangssituation

Zylinderkurbelgehäuse für PKW-Verbrennungsmotoren werden in der Serienproduktion hauptsächlich in einer der drei Werkstoffe ausgeführt: Gusseisen mit Vermikulargraphit (GJV), Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) oder einem Aluminiumgusswerkstoff. Bei motortechnischen Lösungen zur Gewichtseinsparung und Abgasreduzierung beim Verbrennungsmotor ist vielfach eine Erhöhung des Zünddrucks notwendig. Dies überträgt sich in kontinuierlich steigenden Festigkeitsanforderungen an die Werkstoffe. Unter den

Serienwerkstoffen für Zylinderkurbelgehäuse weist GJV die höchste Festigkeit auf. Ein Anwendungsbeispiel für ein Zylinderkurbelgehäuse aus GJV ist der Audi V8 TDI 4,2 Liter Motor. Allerdings sind die Werkzeugstandzeiten bei der Bearbeitung eines ZKG aus GJV wesentlich geringer als bei einem ZKG aus Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL). Dieser Nachteil soll durch ein innovatives ZKG beseitigt werden, das an den wichtigsten Bearbeitungsstellen, den Zylinderläufen, partiell einen Gefügegradienten in radialer Richtung von Lamellengraphit nach Vermikulargraphit aufweist (Abb. 1).

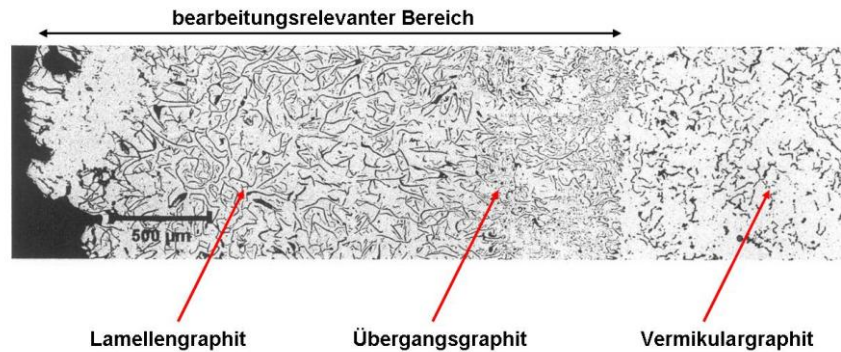


Abb. 1: Lichtmikroskopisches Bild des angestrebten Gradientengefüges (Quelle: Halberg Guss)

Aufgabe

Um den Fertigungsprozess der Zylinderkurbelgehäuse kontrollieren zu können, ist die Entwicklung eines zerstörungsfreien elektromagnetischen Prüfverfahrens notwendig. Diese Aufgabenstellung wurde im Rahmen des BMBF Verbundprojektes „Gradientenwerkstoffe zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit und Tribologie von Komponenten im Motorenbau“ erarbeitet.

1. Verfahrensbeschreibung zur Gradientenherstellung

Für die Erzielung eines Gradientengefüges in radialer Richtung der Zylinderbohrung wird der formgebende Bereich der Zylinderbohrung (Zylindersandkern) mit einem speziellen Additiv versehen (Abb. 2). Durch die Wärmeabgabe der Schmelze geben diese besonderen Additive schwefelhaltige Gase ab. Über diese Gasphase, durch das poröse Feuerfestmaterial (Zylindersandkern), gelangt Schwefel an die Grenzfläche zwischen Zylindersandkern (Negativform) und Schmelze. Die Schmelze nimmt Schwefel auf und dieser kann im flüssigen Metall wirksam werden. Wenn Schwefel sich mit Mg zu MgS verbindet, dann wird der Gehalt des nach Formfüllen vorhandenen ungebundenen Mg reduziert. Wenn der Gehalt an ungebundenem Mg stark genug reduziert wird, dann bildet sich hier GJL anstelle von GJV. In den Schmelzebereichen in denen keine Abbindung von Mg durch Schwefel stattfindet, liegt der freie Mg-Gehalt wie nach Formfüllung unbeeinflusst vor. Dadurch wird in diesem Bereich nach der Erstarrung der Werkstoff GJV vorliegen. Der Einsatz derzeit angewandter Kernsandadditive ist zwar grundsätzlich dazu geeignet, einen Gradienten mit einer kontinuierlichen Abfolge aus Lamellen- und schließlich Vermikulargraphit zu erzeugen, dennoch sind einige Anstrengungen von Seiten der Gießer erforderlich, um eine gleichmäßige radiale Ausrichtung des Gradienten über den Zylinderbohrungsdurchmesser zu gewährleisten.

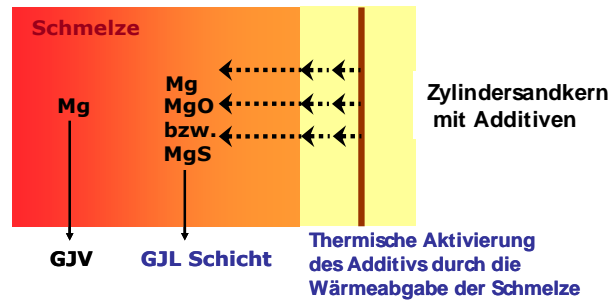


Abb. 2: Schematische Darstellung des Reaktionsverlaufs bei der Gradientenherstellung

2. Elektromagnetisches Prüfverfahren zur Gusseisengradienten-Charakterisierung

Da elektromagnetische Prüfverfahren gefügesensitiv sind und Strukturmerkmale tiefenabhängig erkennen können, besitzen sie hohes Potential zur Charakterisierung von Gradientenverläufen in Gusseisenwerkstoffen. Unter dem Oberbegriff der elektromagnetischen Verfahren lassen sich die Wirbelstromprüfung, das magnetische Barkhausenrauschen sowie die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke zusammenfassen. Die Wirbelstromprüfung nutzt den Einfluss eines leitfähigen und /oder ferromagnetischen Werkstoffes auf das magnetische Wechselfeld eines magnetinduktiven Sensors. Änderungen des Probenmaterials im Bereich des Wechselfeldes bewirken eine messbare Impedanzänderung. Beim magnetischen Barkhausenrauschen handelt es sich um die beim Durchsteuern der Hysteresekurve eines ferromagnetischen Werkstoffes in einem magnetinduktiven Aufnehmer induzierten elektrischen Spannungsimpulse. Besonders rauschaktiv sind die Hystereseseabschnitte in der Umgebung der Koerzitivfeldstärke H_{co} . Der Einfluss von Zug / Drucklastspannungen auf die Barkhausenrauschamplitude ist auf Teilordnungsprozesse der magnetischen Struktur zurückzuführen.

Eine Analyse der während der Wechselfeldmagnetisierung auftretenden Oberwellenanteile im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke lässt ebenfalls Rückschlüsse auf die ferromagnetischen Eigenschaften des zu prüfenden Werkstoffes zu. Quantitative Aussagen lassen sich gewinnen, wenn die elektromagnetischen Prüfgrößen mit mechanisch ermittelten Härtewerten oder röntgenographisch ermittelten Spannungswerten kalibriert werden [1, 2, 3]. Schon seit Jahren werden diese Prüfverfahren bei der zerstörungsfreien Härte- und Eigenspannungsmessung von Komponenten erfolgreich eingesetzt.

Die elektromagnetischen Prüfverfahren besitzen auch Potential zur Charakterisierung von Randschichtzuständen lasergehärteter, induktiv- oder einatzgehärteter Bauteile. Über die Ausnutzung der Wirbelstromdämpfung (Skinneffekt) kann die Wechselwirkungstiefe im Bereich einiger μm bis einiger mm variiert werden und damit die Schichtdicke bestimmt werden. Die Wirbelstromprüfung liefert für jede feste Arbeitsfrequenz einen Messwert, der in komplizierter mathematischer Weise beschreibbar vom Schichtaufbau abhängig ist, d.h. von den einzelnen Schichtdicken, den elektrischen Leitfähigkeiten und den Permeabilitätswerten der jeweiligen Schicht. Durch das magnetische Barkhausenrauschen werden gefügeabhängige Prüfinformationen zum einen durch Variation der Barkhausenanalyserfrequenz, zum anderen durch Variation der magnetisierenden Feldstärke erhalten, wenn sich die einzelnen Schichten in ihren Koerzitivfeldstärken unterscheiden. Dieser gegenüber der Wirbelstromprüfung zusätzlich nutzbare

Kontrastmechanismus soll auch im vorliegenden Vorhaben zur Charakterisierung von Gradientenwerkstoffen zur Anwendung kommen.

Zur Untersuchung von Zylinderkurbelgehäusen wurde im Rahmen des BMBF Verbundprojektes am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) ein speziell an die Geometrie des Zylinders angepasster elektromagnetischer Prüfkopf entwickelt (Abb. 3). Der Prüfkopf besteht aus einem Sensorgehäuse und einem Führungsstab für die Verschiebung des Sensorgehäuses in der axialen Tiefe des Zylinders, sowie einem Tiefenanschlagsring für die Einstellung des Sensorgehäuses auf die gewünschte Tiefe. Des Weiteren existiert eine Zentrierhilfe zur einfacheren Zentrierung des Sensors im Zylinder. Der Sensor besteht im Wesentlichen aus einem elektromagnetischen Erreger- und Aufnehmersystem und einem mechanischen Gegenlager, durch dessen Federmechanismus eine gute Kopplung des u-förmigen Elektromagneten unabhängig von Oberflächen- und Geometrieschwankungen an der Zylinderinnenwand gewährleistet wird. Das rotationssymmetrische Sensorgehäusesystem mit Zentrierhilfe und Führungsstab ermöglicht ein Drehen in Umfangsrichtung und ein lineares Verschieben in axialer Richtung des Sensors innerhalb des Zylinders. Somit können bis auf Randbezirke alle Messpositionen erreicht werden.

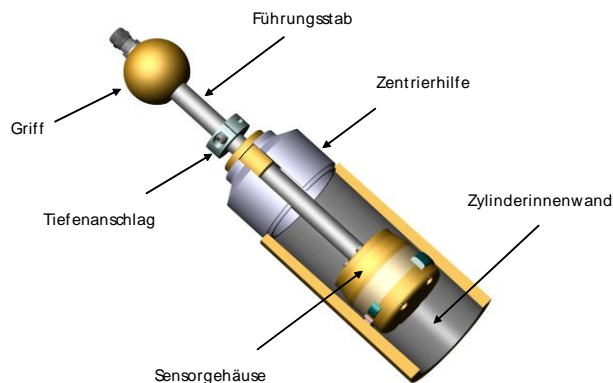


Abb. 3: Elektromagnetischer Prüfkopf für die Innenzylinderprüfung

3. Probenbeschreibung und Metallographie

Bei den untersuchten Komponenten handelt es sich um zwei Zylinderkurbelgehäuse (ZKGs) (siehe Abb. 4). Eines der Zylinderkurbelgehäuse das sog. Referenz-ZKG besteht aus perlitischem Grundgefüge mit Vermikulargraphit-Ausscheidungen. Das zweite Zylinderkurbelgehäuse (Gradienten-ZKG) hat in den Zylinderinnenbereichen ein Gradientengefüge. Bei jedem der zu untersuchenden Zylinderkurbelgehäuse wurde aus Zylinder 4 eine Probe entlang der axialen Richtung entnommen (Abb. 4, rechts) und von Halberg Guss sowie vom Institut für Funktionswerkstoffe metallographisch untersucht [4]. Zielgröße war die Tiefenausdehnung der GJL-Schicht. Die Dicke der Lamellengraphitschicht (GJL) beträgt beim Gradienten-ZKG ca. 0.6 mm im oberen Bereich und maximal 2.6 mm im unteren Bereich der Zylinderinnenwand. Nach der GJL-Schicht schließt sich das Grundgefüge mit Vermikulargraphit (GJV- Schicht) an. Die gewünschte GJL-Schichtdicke von 4 bis 5 mm wurde bei allen zur Verfügung gestellten Proben nicht erreicht. Ebenfalls war die Homogenität in axialer Richtung bei allen untersuchten Gradienten-ZKGs unzureichend. In Abbildung 5 ist exemplarisch für Zylinder 4 des Gradienten-ZKGs die Umwandlungstiefe (Schichtdicke) der GJL-Schicht in Abhängigkeit der axialen Tiefe dargestellt.

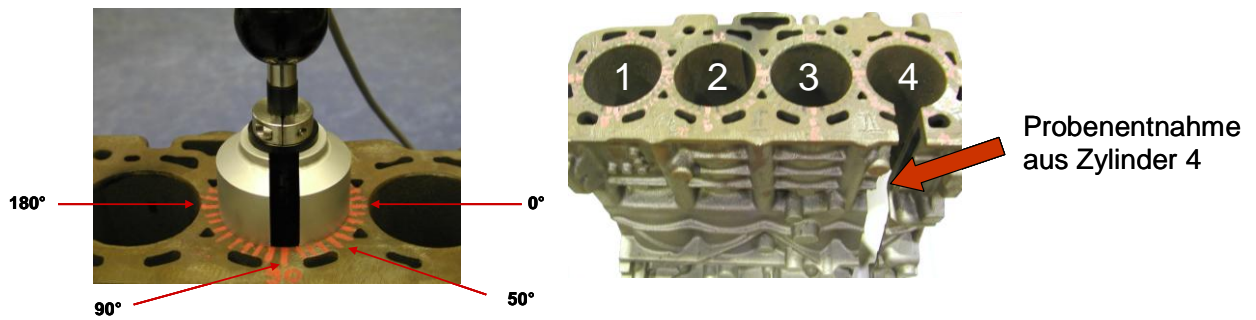


Abb. 4: Der elektromagnetische Sensor im Zylinderkurbelgehäuse (links), Probenentnahme für die metallographische Untersuchung (rechts)

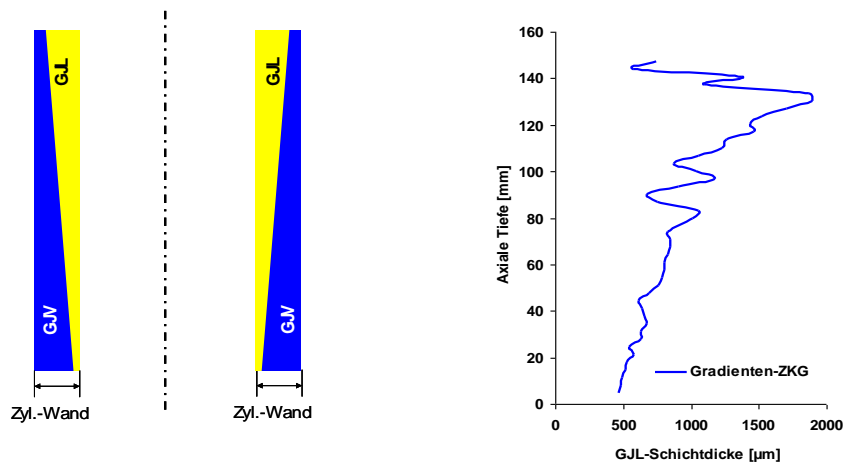


Abb. 5: Schematische Schnitt-Darstellung des Schnittbereichs (links), metallographisch ermittelte GJL-Schichtdickenverlauf (rechts)

4. Experimentelle Ergebnisse

Zur Bestimmung der Gradientenverläufe (GJL-Schichtdicke) in axialer sowie in Umfangsrichtung wurde im ersten Schritt eine Reihe von Messparameteroptimierungen durchgeführt. Anschließend wurden mit den optimierten Messparametern Flächenscans an den Innenmantelflächen des Zylinders durchgeführt. Zur Aufnahme von diesen Flächenscans wurde der Umfang des Zylinders in 10°-Schritten (Abb. 4, links) und die axiale Tiefe des Zylinders in 23 Schritten von je 5 mm abgescannet, wobei die Geometrie des Sensors einen Messbereich von 13 mm vom oberen Rand bis in 128 mm Tiefe zulässt. Zum Scannen wurde der Führungsstab mit Hilfe des Tiefenanschlaggrings (siehe Abb. 3) auf die gewünschte Tiefe eingestellt. Somit kann man die Messwerte mittels einer Farbkodierung in einem zweidimensionalen Flächenbild, das der abgewickelten Innenmanteloberfläche des Zylinders entspricht, darstellen. Beim Flächenscan ergibt sich jeder Messwert aus der Mittelung über 5 Einzelmessungen, wobei für jede Einzelmessung die Hysteresekurve zehnmals durchlaufen wurde.

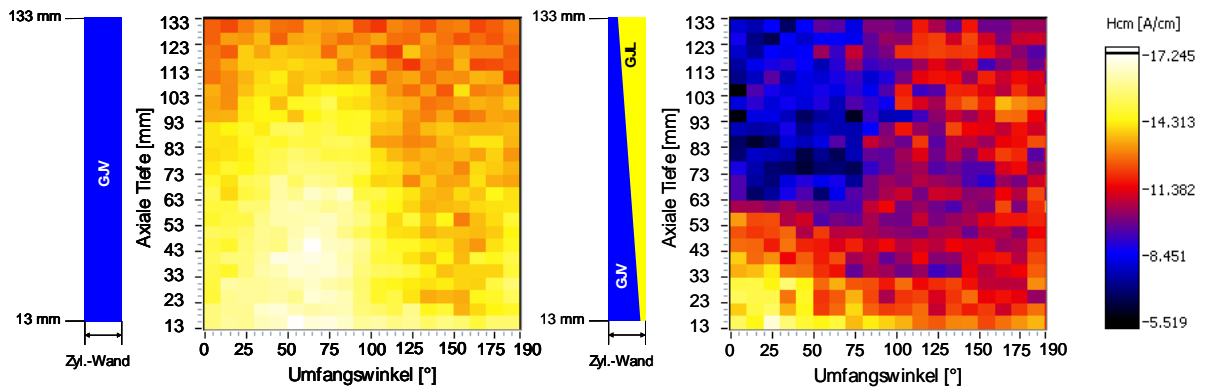


Abb. 6: 2-D Flächenscan der Prüfgröße Koerzitivfeldstärke (H_{CM}) des Zylinderinnenbereichs eines Referenz-ZKG (links) und eines Gradienten-ZKGs (rechts) vor dem Spannungsarmglühen im Umfangsbereich von 0° bis 190°

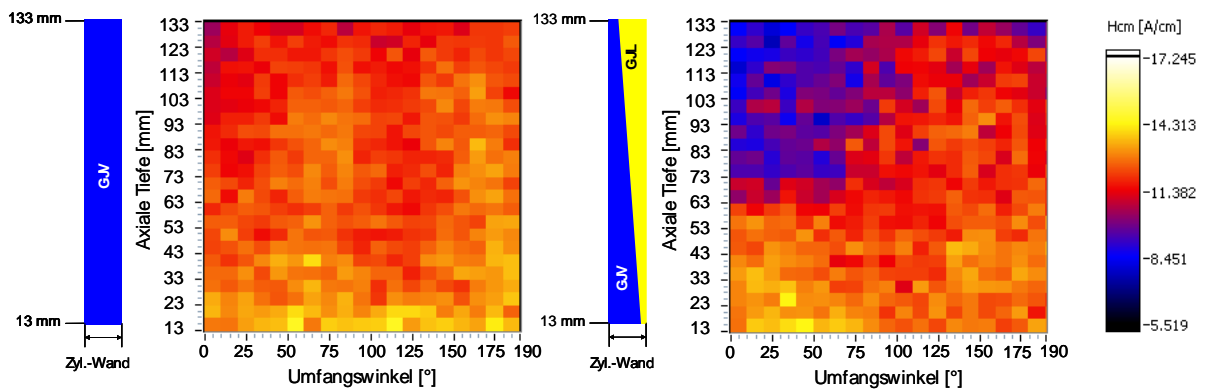


Abb. 7: 2-D Flächenscan der Prüfgröße Koerzitivfeldstärke (H_{CM}) des Zylinderinnenbereichs eines Referenz-ZKG (links) und eines Gradienten-ZKGs (rechts) nach dem Spannungsarmglühen im Umfangsbereich von 0° bis 190°

Elektromagnetisch aufgenommene Flächenscans im Zylinderinnenbereich zeigen gute Korrelationen zu den metallographisch ermittelten Gradientenverläufen. In Abbildung 8 sind beispielhaft für die Prüfgröße Koerzitivfeldstärke (H_{CM}) (farbcodiert), die gut mit der mechanischen Härte und somit dem Gefügestand korreliert, die Zylinderinnenflächen eines Referenz-ZKG (GJV) und eines Gradienten-ZKG abgewickelt in einem 2D-Bild dargestellt. Neben einem deutlichen Unterschied zwischen gezielt eingestelltem Gradientengefüge und dem Referenzgefüge konnten auch unterschiedliche Dickenbereiche der GJL-Schicht in axialer Tiefe elektromagnetisch abgebildet werden. Die inhomogenen Prüfgrößenverläufe der Flächenscans deuten auf einen zusätzlichen Einfluss von beispielsweise Eigenspannungen, die dem Gefügestand überlagert sind, hin. Um die beiden Effekte, zum einem den Einfluss der GJL-Schicht und zum anderen den Einfluss von Eigenspannung, auf die magnetischen Eigenschaften bzw. auf die magnetischen Prüfgrößen separat betrachten zu können, musste man die Zylinderkurbelgehäuse spannungsarm glühen und anschließend die elektromagnetischen Flächenscans erneut im spannungsarmgeglühten Zustand aufnehmen. Zu diesem Zweck wurden das Referenz- und das Gradienten-Zylinderkurbelgehäuse von Halberg Guss spannungsarmgeglüht. Abbildung 9 verdeutlicht, dass auch nach dem Spannungsarmglühen der Gradientenverlauf in den Flächenscans erhalten geblieben ist.

5. Kalibrierung und Validierung des elektromagnetischen Prüfverfahrens

Bei der Kalibrierung werden die elektromagnetischen Prüfgrößen den zu messenden Qualitätsmerkmalen (Zielgrößen) zugeordnet. In unserem Fall sind dies metallographische Kennwerte der elektromagnetisch untersuchten Bereiche, die bei der Kalibrierung als Sollwerte verwendet werden. Alle aus den elektromagnetischen Prüfverfahren abgeleiteten Prüfgrößen werden der ausgewählten Zielgröße (GJL-Schichtdicke) zugeordnet. Hierzu wurde im Anschluss an die elektromagnetischen Messungen der Zylinder 1 des Gradienten-ZKG bei einem Umfangswinkel von 90° metallographisch untersucht und die GJL-Schichtdicke in Abhängigkeit der axialen Tiefe bestimmt. Zur Bestimmung von Korrelationen zwischen den elektromagnetischen Prüfgrößen und der GJL-Schichtdicke wurde das Verfahren der Regressionsanalyse eingesetzt und ein Polynom erstellt, das die elektromagnetischen Prüfgrößen einer GJL-Schichtdicke zuordnet.

Es konnte sowohl im spannungsarmgeglühten als auch im spannungsbehafteten Zustand eine gute Übereinstimmung zwischen den elektromagnetisch und metallographisch ermittelten GJL-Schichtdicken erzielt werden (Abbildung 8, schwarze Rauten).

Vor dem Spannungsarmglühen beträgt der Korrelationskoeffizient $R^2 = 0.90$, und die Standardabweichung $\sigma = 0.1$ mm.

Nach dem Spannungsarmglühen beträgt der Korrelationskoeffizient $R^2 = 0.93$, und die Standardabweichung $\sigma = 0.06$ mm.

Diese Kalibrierung konnte erfolgreich an weiteren Messpositionen (rote Punkte) in axialer Tiefe des Zylinders, die nicht Bestandteil des Kalibrierprobensatzes waren, validiert werden.

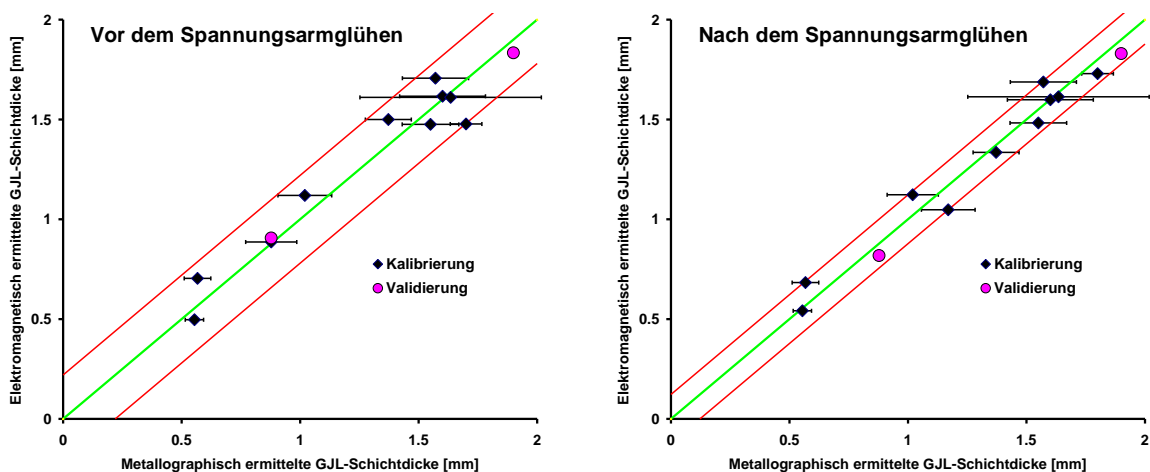


Abb. 8: Korrelation zwischen der metallographisch ermittelten GJL-Schichtdicke und der elektromagnetisch ermittelten GJL-Schichtdicke vor (links) und nach dem Spannungsarmglühen (rechts)

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des BMBF Verbundprojektes „Gradientenwerkstoffe zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit und Tribologie von Komponenten im Motorenbau“ wurden zerstörungsfreie elektromagnetische Untersuchungen an Zylinderkurbelgehäusen mit und ohne Gefügegradienten durchgeführt. Diese Gradienten verlaufen in radialer Richtung und bestehen im Innenbereich der Zylinderlaufflächen aus konventionellem Gusseisen mit Lamellengraphitausscheidungen (GJL), an die sich hochfestes Gusseisen mit

Vermikulargraphitausscheidungen (GJV) anschließt. Um eine deutliche Trennung zwischen Tiefenbereichen mit hohem und geringem Lamellengraphitanteil zu erhalten, wurden im ersten Schritt die Messparameter des elektromagnetischen Prüfverfahrens optimiert. Zur Charakterisierung des Gradientengefüges wurden Flächenscans im Zylinderinnenbereich durchgeführt. Diese Flächenscans zeigten in mehreren Prüfgrößen Korrelationen zu den metallographisch ermittelten Gradientenverläufen. Neben einem deutlichen Unterschied zwischen gezielt eingestelltem Gradientengefüge und dem Referenzgefüge konnten auch unterschiedliche Dickenbereiche der GJL-Schicht erfasst werden. Da die inhomogenen Prüfgrößenverläufe der Flächenscans auf einen zusätzlichen Einfluss von beispielsweise Eigenspannungen, die dem Gefügestand überlagert sein können, hindeuten, wurden die ZKGs spannungsarm gegläht. Die magnetischen Prüfgrößen haben nach dem Spannungsarmglühen verglichen mit dem spannungsbehafteten Zustand ortsabhängige Zu- bzw. Abnahmen gezeigt. Dies lässt sich durch Druck- bzw. Zug-Spannungsabbau erklären. Trotz des Eigenspannungsabbaus durch das Spannungsarmglühen bleibt der Gefügegradientenverlauf in den Prüfgrößen erhalten. Somit können die Gefügegradientenverläufe sowohl im spannungsfreien Zustand als auch im spannungsbehafteten Zustand elektromagnetisch erfasst werden. Im nächsten Schritt wurden dem Gradienten- Zylinderkurbelgehäuse Proben entnommen und metallographisch ausgewertet. Basierend auf der metallographischen Auswertung erfolgte mit Hilfe der Regressionsanalyse eine Kalibrierung der elektromagnetischen Prüfgrößen auf die metallographisch ermittelte GJL-Schichtdicke. Es hat sich eine gute Übereinstimmung zwischen den elektromagnetisch und metallographisch ermittelten GJL-Schichtdicken ergeben. Die Kalibrierung wurde erfolgreich validiert. Diese Ergebnisse bestätigen das große Potential des elektromagnetischen Prüfverfahrens für eine zerstörungsfreie Charakterisierung von Gusseisen- Gradienten- Zylinderkurbelgehäusen. In einem weiteren Schritt wird eine Automatisierung des Prüfverfahrens mit dem Ziel einer Online-Prozessüberwachung der Herstellung der Gradienten-Zylinderkurbelgehäuse angestrebt. Die Arbeiten wurden im Forschungsprogramm "MaTech - Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts" zum Thema Gradientenwerkstoffe gefördert und durch den BMBF-Projektträger Jülich betreut.

Referenzen

- [1] Altpeter, I.; Becker, R.; Dobmann, G.; Kern, R.; Theiner, W.; Yashan, A.; Robust Solutions of Inverse Problems in Elektromagnetic Non-Destructive Evaluation; Inverse Problems 18 (2002), S. 1907-1921
- [2] Maisl, U.; Kopp, M.; Altpeter, I.; Elektromagnetisches Prüfverfahren zur Detektion der Weißeinstrahlung; Giesserei 86 (1999), 5, S.106-108
- [3] Altpeter, I.; Maisl, U.; Dobmann G.; Kopp M., Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt, Entwicklungswerkzeuge zum ökologischen und ökonomischen Gestalten von Gussteilen, IZFP-Bericht 050134-TW, Saarbrücken, (2005)
- [4] Velichko, A.; Holzapfel, C.; Mücklich, F., „3D Characterization of Graphite Morphologies in Cast Iron“, Advanced Engineering Materials, Vol. 9, (2007), S. 39-45