

Zerstörungsfreie Prüfung von ADI-Guss

Gerhard MOOK, Fritz MICHEL, Jouri SIMONIN
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, PF 4120, 39016 Magdeburg
eMail: mook@ovgu.de

Kurzfassung. ADI(Austempered Ductile Iron)-Guss ist ein hochfester und zäher Sphärogusswerkstoff, der darüber hinaus eine hohe Dauerfestigkeit, Verschleißbeständigkeit und eine im Vergleich zu Stahl höhere Schwingungsdämpfung besitzt. Wegen der hohen Anforderungen an das Ausgangsmaterial und der komplexen Wärmebehandlung sollen zerstörungsfreie Verfahren entwickelt werden, mit denen das Behandlungsergebnis direkt am Bauteilen prüfbar ist.

Dazu stellt der Beitrag Ergebnisse aus Ultraschall- und mikromagnetischen Untersuchungen vor und stellt sie einigen mechanischen Größen gegenüber.

1. Einführung

ADI-Guss besitzt neben einer hohen Festigkeit und Zähigkeit auch eine hohe Dauerfestigkeit und Verschleißbeständigkeit, die mit einer im Vergleich zu Stahl höheren Schwingungsdämpfung einhergehen [1, 2]. Damit diese Eigenschaften tatsächlich erreicht werden, sind ein qualitativ hochwertiger Kugelgraphitguss als Ausgangswerkstoff und die strenge Einhaltung einer in einem engen Prozessfenster ablaufenden Wärmebehandlung unabdingbare Voraussetzungen. Neben der chemischen Zusammensetzung werden das sich einstellende Gefüge und damit die Eigenschaften in nicht unerheblichem Maße durch die Bauteilgeometrie, insbesondere die Dicke beeinflusst. Die im Gießereiwesen übliche Praxis, die Eigenschaften des Bauteils mittels parallel abgegossener oder angegossener Probekörper zu bestimmen, ist deshalb mit hoher Unsicherheit behaftet. Eine Fertigung von Parallelteilen ausschließlich für den Eigenschaftsnachweis ist unökonomisch, da sie zerstört werden, und bietet auch keine 100 %ige Sicherheit. Zerstörungsfreie Prüfverfahren stellen den entscheidenden Ausweg dar, die Eigenschaftskontrolle direkt an ausgewählten Stellen des Bauteils selbst vorzunehmen. Vorbedingung für ihren Einsatz ist die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Gefügebau, mechanischen Kennwerten und der zerstörungsfreien Prüfung zugrunde liegenden physikalischen Kennwerten. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es, die strategische Vorgehensweise bei der Entwicklung zerstörungsfreier Prüftechnologien für ADI-Guss zu erörtern sowie punktuell Ergebnisse vorzustellen.

2. Zerstörungsfreie Prüfung von ADI-Guss und die Norm DIN EN 1564

Die Rahmenbedingungen für die Herstellung und den Vertrieb von ausferritischem Gusseisen (ADI) gehen aus der DIN EN 1564 [2] bzw. dem Präzisierungsentwurf [3] hervor. Die zerstörungsfreie Prüfung muss deshalb folgende Randbedingungen berücksichtigen.

- Die Einteilung der Werkstoffsorte von bainitischem (ausferritischem) Gusseisen erfolgt nach den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes, vorzugsweise nach Zugfestig-

keit, 0,2 %-Dehngrenze und Dehnung, nach [3] an einer Probe mit einer Mindestdicke von 25 mm.

- Ausgangswerkstoff ist ein Gusswerkstoff auf der Basis Eisen-Kohlenstoff, in welchem der Kohlenstoff überwiegend in Form von kugeligen Partikeln vorliegt. Die chemische Zusammensetzung und die Impfbehandlung erfolgen nach dem Ermessen des Herstellers [2].
- Die Wärmebehandlung erfolgt im Ermessen des Herstellers.
- Falls bei gültiger Prüfung die festgelegten Eigenschaften nicht erreicht werden, ist es erlaubt, Guss- und Probestücke einer nochmaligen Wärmebehandlung zu unterziehen.

Im Normentwurf DIN EN 1564:2009 [3] werden diese Vorgaben folgendermaßen präzisiert.

- Einführung einer „maßgeblichen Wanddicke“, für die die vereinbarten mechanischen Eigenschaften gelten,
- Einführung zweier Werkstoffsorten auf Basis der erreichten Brinell-Härte und
- Beurteilung der Graphit- und Matrixstruktur anhand metallografischer Untersuchungen.

3. Fehlergruppen bei der Herstellung von ADI-Guss

Die Überwachung des Herstellungsprozesses von ADI-Guss mittels zerstörungsfreier Prüfung zielt auf drei Prozessfehlergruppen [4]. Zur ersten Gruppe gehören die so genannten Gussfehler wie schlechte Kugelgraphitbildung (Nodularität), Einschlüsse, Poren und Mikrolunker. Die zweite Gruppe besteht aus Fehlern bei der Wärmebehandlung, wie z.B. unzureichender Kohlenstoffgehalt im Austenit durch nicht optimale Austenitisierungstemperatur bzw. Austenitisierungszeit, oder Perlitbildung durch zu langsame Abkühlung von der Austenitisierungstemperatur, Umwandlung von Austenit in Martensit durch zu frühe Abkühlung von der Umwandlungstemperatur auf Raumtemperatur, Karbidbildung durch zu lange Haltedauer. Die dritte Gruppe umfasst Fehler, deren Ursache in einer mangelhaften Abstimmung von Legierung und Gefüge des Sphärogusses auf die ADI-Wärmebehandlung liegt.

4. Randbedingungen für die zerstörungsfreie Prüfung

Bild 1 verdeutlicht die Komplexität, die sich hinter der Aufgabe einer zerstörungsfreien Prüfung von ADI-Guss verbirgt. Einzige Fixgrößen sind die Kundenanforderungen. Ausgehend von diesen müssen GussHersteller und Wärmebehandler ihre Technologie abstimmen. Dabei werden ihnen durch die Norm DIN EN 1564 sehr breite gestalterische Möglichkeiten eingeräumt. Mit der Maßgabe, den Guss möglichst effektiv zu fertigen, muss der Hersteller in Abhängigkeit vom vorliegenden Kugelgraphitgusseisen die Wärmebehandlung optimieren. Insbesondere gilt das für den Fall, dass nach der Wärmebehandlung die mechanischen Zielp Parameter nicht erreicht werden. Hier besteht sogar die Option, eine Wärmebehandlung komplett zu wiederholen.

Aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen, Schwankungen von Werkstoff- und Anlagenparametern sowie des Faktors Mensch können im Prozess eine Reihe Einflussfaktoren systematisch oder unsystematisch schwanken. Diese Schwankungen werden als Störgrößen (Bild 1) bezeichnet. Sie verursachen mehr oder weniger starke Abweichungen der angestrebten Produkteigenschaften. Dabei gilt, je komplizierter der Herstellungsprozess ist, desto mehr Einflussfaktoren und Störgrößen sind möglich.



Bild 1: Einflussfaktoren bei der Herstellung von ADI-Guss

Das Charakteristische der zerstörungsfreien Prüfung besteht nun darin, dass nicht die eigentlich gesuchten mechanischen Eigenschaften bestimmt werden können, sondern eine oder mehrere physikalische Eigenschaften gefunden werden müssen, die mit den gesuchten mechanischen Eigenschaften oder Gefügeausbildungen korrelieren. Zur Untersuchung dieser Korrelation werden Kalibrierprobenreihen benötigt, wobei jede Kalibrierreihe in der Regel einen Einflussfaktor und damit auch eine Störgröße abbildet.

Komplizierter wird die Sachlage, wenn sich mehrere Störgrößen überlagern, da sie die gemessenen physikalischen Eigenschaften in unterschiedlicher Weise verändern. Im ungünstigsten Falle können sich die Auswirkungen sogar aufheben. Es gibt aber auch Störgrößen, die zwar nicht die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts wohl aber die zerstörungsfrei bestimmbar physikalischen Eigenschaften beeinflussen.

Eine weitere Besonderheit besteht im Wechselwirkungsvolumen, das bei der zerstörungsfreien Prüfung in der Regel größer ist als bei mechanischen oder metallografischen Untersuchungen. Dazu kommen Einschränkungen bei der Wahl des Messortes mechanischer Prüfungen, was insbesondere bei Werkstücken mit Eigenschaftsgradienten ins Gewicht fällt. Bedingt durch die Vorgabe bestimmter Probengeometrien kann nicht jeder beliebige Bauteilbereich geprüft werden. So wurden z. B. im Rahmen der zerstörungsfreien Untersuchungen an Kerbschlagproben (10x10x55 mm) auf den 4 Umfangsflächen so große Abweichungen der Messwerte gefunden, dass eine Zuordnung zur Schlagrichtung angeraten erscheint.

Außer den zufälligen Schwankungen der Fertigungsparameter passen die Gusshersteller diese auch systematisch dem jeweils vorliegenden Gefügestand (insbesondere der Graphitausbildung) an. Obwohl sich diese Anpassung erfahrungsgemäß auf die mechanischen Kennwerte anders als auf die physikalischen Kennwerte auswirkt, soll die zerstörungsfreie Prüfung robuste Ergebnisse liefern. Dazu muss untersucht werden, ob die vor der Anpassung erstellten Kalibrierreihen gültig bleiben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass wegen der großen zulässigen Schwankungsbreite der Fertigungsparameter und der großen Zahl potenzieller Störgrößen im komplizierten Herstellungsprozess von ADI-Guss eine serientaugliche zerstörungsfreie Prüfung von ADI-Guss nur nach umfangreichen und detaillierten Voruntersuchungen etabliert werden kann. Die dazu erforderlichen eng abgestuften Probenreihen müssen mit erheblichem Aufwand unter den Bedingungen einer stabilen Fertigung erstellt werden.

5. Stand der zerstörungsfreien Prüfung von ADI-Guss

Inhalt der weiteren Ausführungen ist die zerstörungsfreie Charakterisierung von Gefügeausbildung und mechanischen Eigenschaften. Dazu soll zunächst die Kugelgraphitusbildung näher betrachtet werden, da von ihr sowohl die mechanischen Eigenschaften des Gusstes als auch die Kohlenstoffdiffusion während der Austenitisierung abhängen. Danach werden Verfahren zur Prüfung der Matrixeigenschaften erörtert. Auf die Betrachtung von Verfahren zur Prüfung auf andere Fehler, wie die Risse und Poren, wird verzichtet, da sie allgemein bekannt sind.

5.1 Ultraschallprüfung zur Überwachung der Graphitusbildung

Das einzige bekannte und etablierte zerstörungsfreie Verfahren für die Bestimmung der Graphitusbildung an Guss ist die Ultraschallgeschwindigkeitsmessung [5]. Bild 2 zeigt ihren Zusammenhang zur Kugelgraphitusbildung. Man geht davon aus, dass die US-Geschwindigkeit primär durch Form und Anzahl der Graphitkugeln bestimmt wird und die Matrix eine untergeordnete Rolle spielt. Über die Anwendung an ADI-Guss wird in [10] berichtet.

Nach heutigem Kenntnisstand hängt die Schallgeschwindigkeit zwar dominant aber nicht ausschließlich von der Graphitusbildung (Nodularität) ab. Als weitere Einflussfaktoren gelten der Sättigungsgrad des Kohlenstoffs [5, 6], die Art der Erschmelzung (Elektroofen, Kupolofen) [5, 6], der Gehalt an Ferrit und Perlit (wobei eine ferritische Matrix theoretisch eine niedrigere Schallgeschwindigkeit aufweist als eine perlitische [7], in der Praxis wurde aber auch der umgekehrte Fall beobachtet [8]), eine nachträgliche Wärmebehandlung der Gussteile (führt tendenziell zu niedrigeren Schallgeschwindigkeiten [6, 7]), die Porosität [7] und Karbide [7].

Für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit werden Proben mit zwei planparallelen fein bearbeiteten Flächen empfohlen, die im Transmissionsverfahren mit getrennten Sende- und Empfangsprüfköpfen im Frequenzbereich 1-5 MHz in Immersionstechnik (Wasserbad unter Beachtung der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit des Wassers) mit einem Ultraschallgerät Laufzeitauflösung in A-Bild-Darstellung geprüft werden [7-10]. Es finden sich aber auch Beispiele für automatisierte Systeme, die direkt am unbearbeiteten Gussteil messen [9, 10].

In [6] wird auf wichtige Randbedingungen hingewiesen. So ist für die Prüfung immer ein Kalibrierprobensatz notwendig, der unter den gleichen Bedingungen hergestellt worden ist wie die zu prüfenden Gussteile. Das setzt jedoch die Kenntnis der möglichen Abweichungen der Wärmebehandlungstechnologie voraus. Wenn die Schwankungsbreite der möglichen anderen Einflussfaktoren nicht eingegrenzt werden kann, ist das Verfahren unter Umständen nicht einsetzbar. Der Kalibrierprobensatz kann auch nicht verwendet werden, wenn die Gussteile unter anderen metallurgischen Bedingungen hergestellt wurden (anderer Hersteller, Schmelzverfahren, Temperatur, Gusszusammensetzung, Sättigungsgrad des Kohlenstoffs). Die zerstörungsfreie Prüfung sollte immer nach dem Abguss und vor einer etwaigen Wärmebehandlung erfolgen.

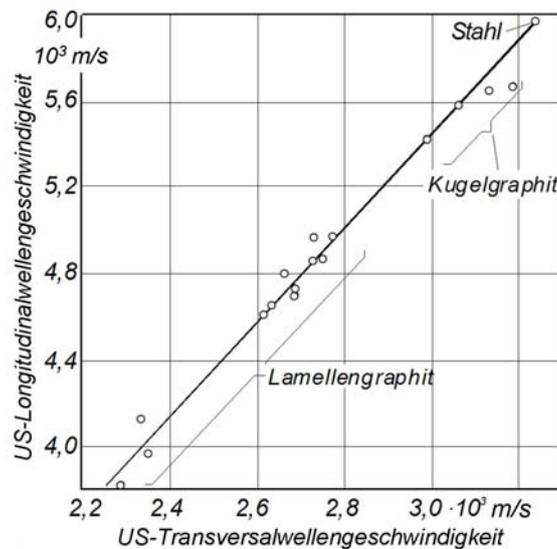


Bild 2: Ultraschall-Longitudinal- und -Transversalwellengeschwindigkeit in Grauguss verschiedener Graphitmengen und -formen nach Patterson und Bodmer (nach [5])

5.2 Magnetische Verfahren zur Prüfung der Wärmebehandlung

Für die Prüfung der Wärmebehandlung (vgl. Abschnitt 3, Fehlergruppen 2 und 3) und damit die Beurteilung der Matrix werden Verfahren unter Nutzung der magnetischen Eigenschaften vorgeschlagen.

In [11] werden Barkhausen-Rauschmessungen für die Charakterisierung von ADI-Guss eingesetzt. Dabei setzt man darauf, dass die Rauschsignale direkt von den ferromagnetischen Phasen im Werkstoff generiert werden, mehr noch, dass das Barkhausen-Rauschen eng mit der Mikrostruktur dieser ferromagnetischen Phasen verknüpft ist und Informationen über den Herstellungsprozess liefert. Verwendet werden maschinell bearbeitete Rundproben mit 20 mm Durchmesser in drei unterschiedlichen Legierungen (unlegiert, mittel- und hochlegiert) aus jeweils einer Charge. Die Wärmebehandlung erfolgte so, dass die Kugelgraphitguss-Proben eine Matrix aus Ferrit, Perlit, Martensit sowie oberem und unterem Bainit aufwiesen. Bei der Wärmebehandlung wurden die Austenitisierungstemperatur sowie die Haltetemperatur und -zeit während des Austempens variiert. Registriert wurde die Hüllkurve der Barkhausen-Rauschspannung in Abhängigkeit von der Erregerfeldstärke, bewertet werden Peak-Amplitude und Feldstärke bei Peak-Maximum (Peak-Position).

Die Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass sich Bestandteile von Ferrit und Perlit im ADI sehr gut feststellen lassen, weil sie sich stark vom Bainit unterscheiden. Barkhausen-Rauschmessungen reagieren sehr empfindlich auf geringe Änderungen im metallurgischen Zustand von ADI-Guss. Die Peak-Position der Rauschkurve reagiert sehr stark auf die Austemperungszeit, während die Austemperungszeit, die Austenitisierungstemperatur und die Legierungszusammensetzung nur geringen Einfluss haben. Oberer und unterer Bainit kann durch Messung der Peak-Position bestimmt werden. Die Peak-Amplitude wiederum reagiert sehr empfindlich auf die Austemperungszeit, auf die anderen Wärmebehandlungsbedingungen weniger. Zusammenfassend wird das Barkhausen-Rauschen als starkes Instrument für die Charakterisierung von ADI-Guss eingeschätzt.

Wickins und Harding [12] setzen Multi-Frequenz-Wirbelstrommessungen für die zerstörungsfreie Prüfung von ADI-Guss ein. Verwendet wird ein Magnatest S (Institut Dr. Förster) mit 35 mm Durchlaufspule bzw. Rundkopf-Tastsonde. Passstücke dienen zur reproduzierbaren Probenpositionierung. Die Messfrequenzen waren 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, und 1000 Hz als Grundfrequenz sowie die dritten Harmonischen der ersten

8 Frequenzen. Die Vektordarstellung in der Impedanzebene liefert 18 Wertepaare (X- und Y-Komponente). Zusätzlich werden Ultraschallgeschwindigkeit und Resonanzfrequenz der Proben bestimmt. Mittels schrittweiser linearer Mehrfachregressionsanalyse (Softwarepaket „Statistica“) werden mittels eines Laborprobensatzes Algorithmen zur Ermittlung der 0,2 %-Dehngrenze, der Zugfestigkeit, der Dehnung und des Austenitgehaltes berechnet und dann an kommerziellen Teilen verschiedener Hersteller eingesetzt. Die mechanischen Kennwerte können mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$ und der Austenitgehalt auf $\pm 3\%$ bestimmt werden. Für die Austenitbestimmung werden ausschließlich die Wirbelstromergebnisse genutzt. Ein Vergleich der mit umfassender Spule und Aufsatztaster gewonnenen Ergebnisse zeigt, dass die Spule eine kleinere Streuung der Werte aufweist. Mit dem Taster beträgt die erreichbare Genauigkeit für die mechanischen Werte $\pm 12\%$ und für den Austenitgehalt $\pm 4\%$ des röntgenografisch bestimmten Wertes.

6. Eigene Untersuchungen

Wie die bisherigen Ausführungen belegen, ist bis zum heutigen Zeitpunkt kein zerstörungsfreies Verfahren allein in der Lage, eine solch komplizierte Struktur wie ADI-Guss zu charakterisieren. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, mehrere Verfahren zu kombinieren. Für die Prüfung auf Geometrie und Verteilung der Graphitkugeln ist die Ultraschallgeschwindigkeitsmessung geeignet, zur Charakterisierung der Matrix sind magnetische und magnetinduktive Verfahren praktikabel.

Auch eine zweite Randbedingung muss Beachtung finden: Eine zerstörungsfreie Prüfung an ADI-Guss wird letztlich nur dann in der Industrie auf Akzeptanz stoßen, wenn sie am Serienbauteil erfolgen kann, ohne dass dieses speziell vorbereitet (z. B. mechanisch bearbeitet) werden muss. Eine Ausnahme ist bestenfalls dann gegeben, wenn die Messung an Proben erfolgen kann, die ohnehin für bestimmte Abnahmeprüfungen erforderlich sind.

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des BMBF-Projektes, in dessen Mittelpunkt die Optimierung von Werkstoffen und Wärmebehandlungsparametern von ADI-Guss standen. Eine darüber hinausgehende Simulation von speziellen Fehlern in der Werkstoffzusammensetzung bzw. der Wärmebehandlung, wie es zur Aufstellung von Kalibrierkurven erforderlich wäre, war aus Kapazitätsgründen nicht möglich.

6.1 Probenmaterial

Für die Simulation von Kompaktbauteilen im unbearbeiteten Zustand wurden die in Bild 3 gezeigten Stufenkeile bereitgestellt. Als Werkstoff wurden sowohl unlegierte als auch legierte Varianten verwendet (Zusammensetzung siehe [13]). Die Höhe der einzelnen Stufen betrug 5 mm, 8 mm, 15 mm, 30 mm und 60 mm. Im Bezug auf die Wärmebehandlung wurden die Austenitisierungstemperatur, die Haltetemperatur und Haltezeit variiert (genaue Angaben siehe [13]). Die magnetischen Messungen erfolgten von der Oberseite und der Unterseite jeweils in der Mitte der Stufe in Abständen von 25 mm, 95 mm und 135 mm vom Seitenrand.

In Anbetracht der Tatsache, dass der Werkstoff zum Teil tiefenabhängig Eigenschaftsänderungen zeigte und dass die verwendete magnetische Prüfeinrichtung Mikro-Mach (vgl. 6.3.3) nur eine begrenzte Wirtiefe aufweist, erfolgten weitere magnetische Messungen an prismatischen Proben der Abmessung 10x10x55 mm. Hierdurch kann der Einfluss der rauen Gussoberfläche vermieden werden und die Messorte für mechanische Werte und physikalische Werte rücken näher zusammen. Die Probenlage im Stufenkeil zeigt Bild 4. Die Oberfläche der prismatischen Proben war fein gefräst.



Bild 3: Stufenkeil (Abmessungen: 260 x 190 mm) mit Messstellen

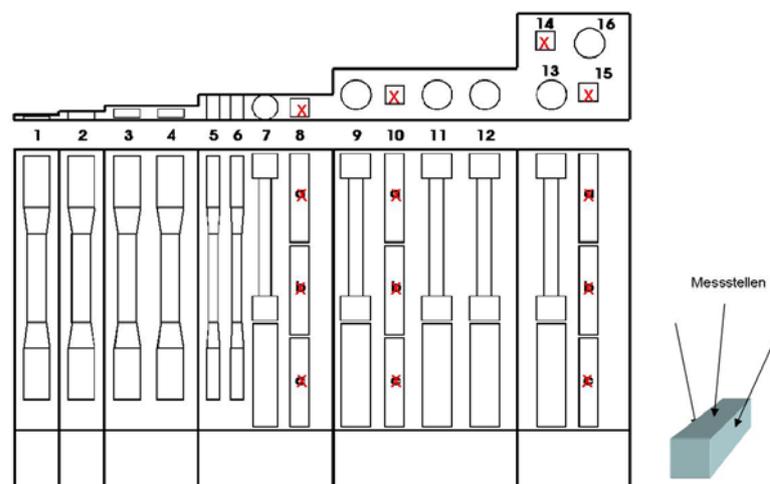


Bild 4: Lage der prismatischen Proben im Stufenkeil (X), rechts: Lage der Messstellen auf der Probe

6.2. Ultraschall-Messungen an ADI-Stufenkeilen

Untersuchungen an den Stufenkeilen mit Longitudinalwellen bei 2 MHz zeigen, dass sich auch die Stufen mit 60 mm Höhe durch die Gusshaut hindurch problemlos durchschallen lassen. Dabei wurden für den Ausgangszustand (EN-GJS-600-3) Schallgeschwindigkeiten von 5495 bis 5695 m/s gemessen und für den ADI-Zustand 5337 bis 5611 m/s. Präzisere Messungen lassen sich an den vorgestellten prismatischen Proben erzielen.

Auf Grund der Probenabmessungen wurde ein 10-MHz-Prüfkopf mit 5 mm Schwingerdurchmesser gewählt. Da im Impuls-Echo-Verfahren gearbeitet wurde, ist die Echozuordnung anhand des A-Bildes zwingend notwendig.

Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten liegen über 5500 m/s, was mit den in der Literatur angegebenen Werten für Kugelgraphit-Gusseisen übereinstimmt. Bild 7 zeigt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Nodularität, die anhand metallografischer Schlitze bestimmt wurde.

Das Diagramm zeigt mit steigender Schallgeschwindigkeit eine tendenzielle Abnahme der Nodularität, was den Erwartungen widerspricht (vgl. Gundlach [7]). wegen des eingeschränkten verfügbaren Nodularitätsspektrums der Proben wurde diesem Effekt aber nicht weiter nachgegangen.



Bild 5: Ultraschall-Geschwindigkeitsmessung an prismatischen Proben mit USD 15 und dem Longitudinalwellen-PK CLF 5 bei 10 MHz in Impuls-Echo-Technik unter Auswertung des HF-Signals bei Triggerung auf die Signalspitze. Probenabmessungen 10x10x55 mm, Messung der Probendicke mit Digimicro MFC-101.

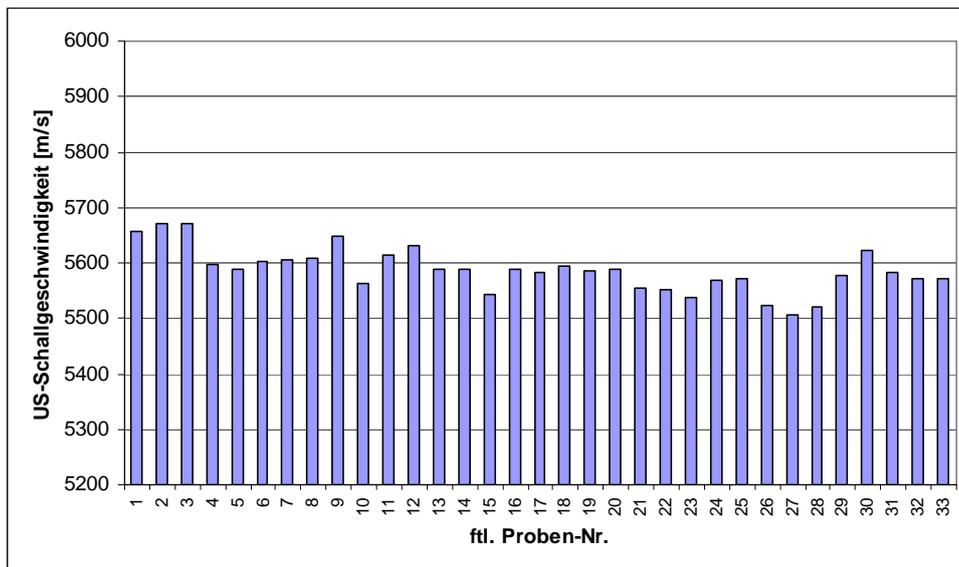


Bild 6: Ultraschall-Geschwindigkeit an prismatischen Proben, Serie V2, Stufenhöhe 15 mm

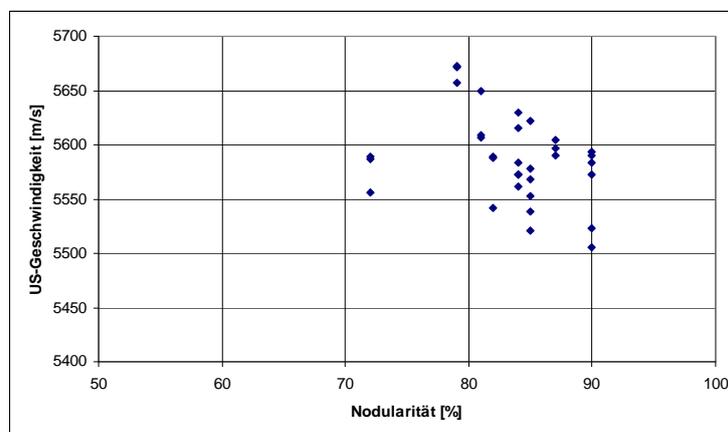


Bild 7: Ultraschallgeschwindigkeit prismatische Proben 10x10x55 mm in Abhängigkeit von der Nodularität, Serie V2 Stufenhöhe 15 mm

6.3 Magnetische und elektromagnetische Verfahren

6.3.1 Aufzeichnung der statischen Magnetisierungskurven von ADI-Guss

Ausgangswerkstoff für die ADI-Herstellung ist Kugelgraphitguss, dessen Matrix ferritisch, ferritisch-perlitisch oder perlitisch sein kann, wobei in diese Matrix kugelförmige Graphitausscheidungen eingebettet sind. Durch den Prozess des Austemperns wird ein völlig neues Gefüge erzeugt, das hauptsächlich aus Ferrit und Austenit mit sehr hohem Kohlenstoffgehalt sowie der schon im Ausgangswerkstoff enthaltenen Graphitkugelstruktur besteht. Bekannt ist, dass Ferrit und Perlit ferromagnetisch sind, Austenit im Allgemeinen paramagnetisch, wie auch der Graphit.

Um auszuloten, wie sich der beim Austempern vollziehende Umwandlungsprozess auf die magnetischen Werkstoffeigenschaften auswirkt, wurden an Zylinderproben einer typischen Legierung mit unterschiedlichen Wärmebehandlungen die statischen Hystereseschleifen aufgenommen. Bild 8 zeigt die Ergebnisse. Die entsprechenden Mikroschliffe sind in Bild 9 zusammengestellt.

Die perlitische Matrix (Bild 9 oben links) des Ausgangszustandes zeichnet sich durch eine hohe Sättigungsmagnetisierung und Permeabilität aus, die Koerzitivfeldstärke ist sehr niedrig. Durch die Wärmebehandlung entstehen Austenit (paramagnetisch) und Ferrit (ferromagnetisch), mit der Folge, dass die Sättigungsmagnetisierung entsprechend stark abnimmt, ebenso vermindert sich die Permeabilität, während sich die Koerzitivfeldstärke beträchtlich vergrößert. Höherfeste ADI-Sorten zeichnen sich durch eine Zunahme der Sättigungsmagnetisierung aus, da der Anteil des stabilisierten Austenits gegenüber dem Ferrit geringer wird. Auch die Permeabilität und die Koerzitivfeldstärke erhöhen sich weiter. Das Gefüge weist das für ADI typische feinkörnige Gemisch aus Ferrit und stabilisiertem Austenit und Graphitkugeln auf.

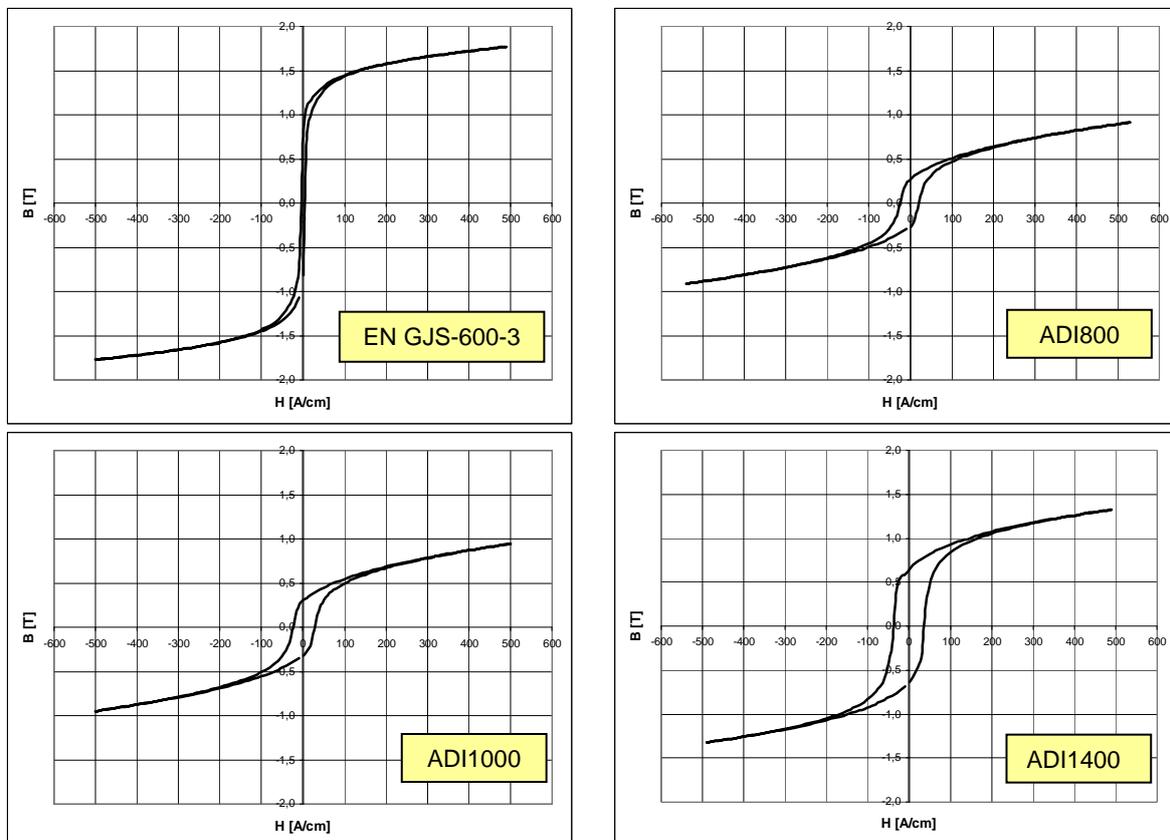


Bild 8: Statische Hystereseschleife zylindrischer Proben (\varnothing 6 mm, l = 55 mm) des Ausgangswerkstoffes (links oben) und dreier ADI-Gefüge unterschiedlicher Festigkeit

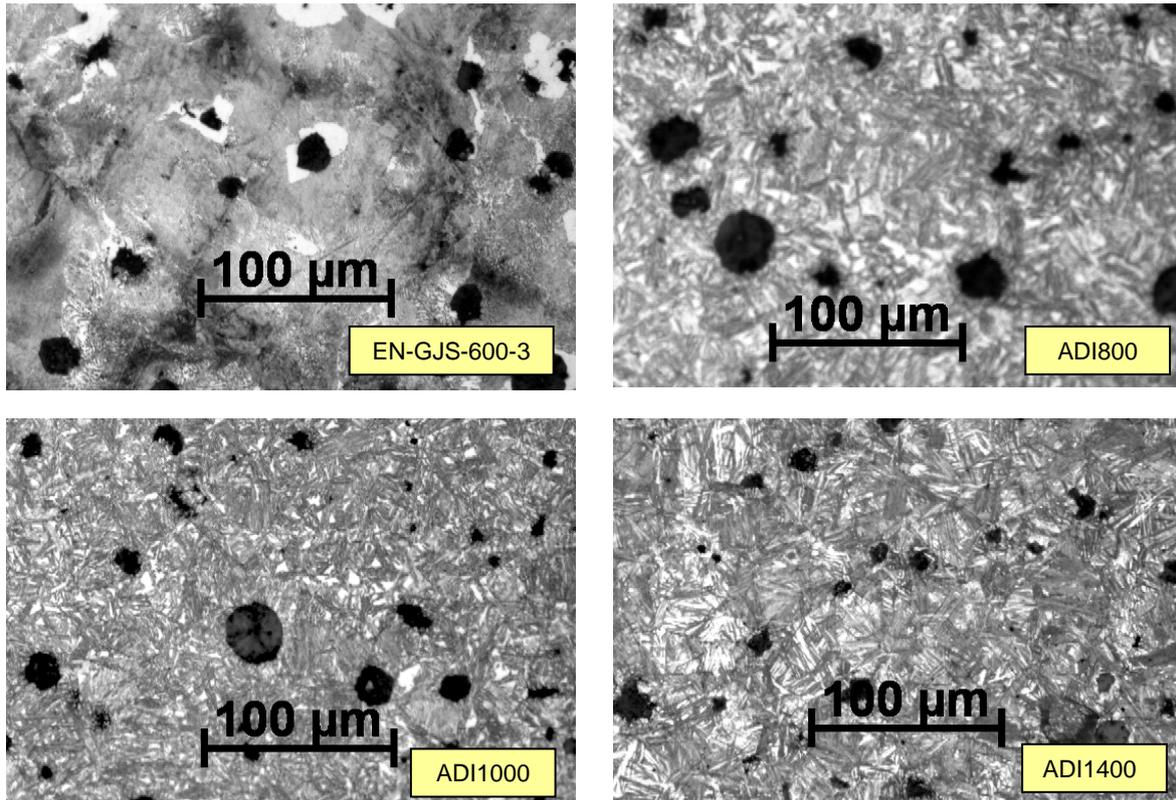


Bild 9: Gefügeaufnahmen für die Proben nach Bild 8: Ausgangswerkstoff und drei ADI-Gefüge unterschiedlicher Festigkeit

Damit ist sichergestellt, dass sich die Wärmebehandlung von ADI bei der vorliegenden Legierung magnetisch verfolgen lässt. Des Weiteren sollte die Entstehung von Perlit als einem Hauptfehler bei zu langsamer Abkühlung oder bei mangelhafter Durchhärtung mittels magnetischer Messungen detektierbar sein.

Als Nebeneffekt können aus den Hystereseschleifen Permeabilitätswerte bestimmt werden, die wiederum notwendig sind, um abzuschätzen, bis zu welcher Bauteiltiefe zerstörungsfrei Aussagen über die Werkstoffeigenschaften gemacht werden können. Die ermittelten Werte für ADI-Guss betragen: $\mu_r = 40 \dots 60$ (relative Amplitudenpermeabilität bei einer Feldstärke von 100 A/cm).

6.3.2 Abschätzung der Eindringtiefe elektromagnetischer Wechselfelder

Elektromagnetische Wechselfeldverfahren, wie z. B. die Wirbelstromprüfung besitzen auf Grund des Skin-Effektes eine begrenzte Wechselwirkungstiefe. Die Gefügeausbildung bei ADI wird jedoch sehr stark durch die Werkstoffdicke beeinflusst, z.B. treten bei zu langsamer Abkühlung perlitische Bereiche im Kern auf. Deshalb ist die Kenntnis, bis zu welcher Tiefe zerstörungsfrei geprüft werden kann, von entscheidender Bedeutung. Zur Abschätzung dient die so genannte Standardeindringtiefe der Wirbelströme [14]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f_p \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (1)$$

Die Standardeindringtiefe δ entspricht der Tiefe im Prüfobjekt, bei der die Wirbelstromdichte auf $1/e$ (ca. 36,8 %) gegenüber dem Wert an der Oberfläche abgefallen ist. Neben der relativen magnetischen Permeabilität μ_r muss die elektrische Leitfähigkeit σ bekannt sein. Diese wurde nach der Vier-Spitzen-Methode bestimmt [15]. Die gemessenen

Werte für die eingesetzte ADI-Legierung betragen: $\sigma = 1,4 \dots 1,6 \text{ Sm/mm}^2$. Damit ergibt sich die Standardeindringtiefe bei ADI-Guss bei einer Prüffrequenz f_p von 25 Hz zu 10...12 mm, bei einer Frequenz von 500 Hz entsprechend zu 2,2...2,7 mm.

6.3.3 Gerätetechnik für die elektromagnetische Prüfung

Im Hinblick darauf, dass die magnetischen Messungen sowohl an speziellen Proben wie auch am Originalbauteil erfolgen sollen, wurde das elektromagnetische Gefügeprüfgerät MikroMach (QNET Saarbrücken) eingesetzt. Für dieses System liegen bereits Ergebnisse bei der Gefügebewertung von Kugelgraphitgusseisen bezüglich Weißeinstrahlung, Ferrit-Perlitgehalt und innere Spannungen [16] sowie von Gusseisen mit variablem Anteil an Lamellengraphit und Vermiculargraphit [17] vor. Bild 10 zeigt die technische Realisierung, die aus einem Magnetisierungsjoch mit zwei Magnetisierungswicklungen auf dem Jochsteg sowie zwei Sensoren zwischen den Enden der beiden Jochschenkel, die möglichst spaltfrei auf die Prüflingsoberfläche aufgedrückt werden, besteht. Durch Kombination der Einzelkomponenten lassen sich folgende Prüfverfahren realisieren [18]: Oberwellenanalyse, Barkhausen-Rauschanalyse, Überlagerungspermeabilitätsanalyse bei mehreren Prüffrequenzen, Wirbelstromanalyse bei mehreren Prüffrequenzen.

Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Messungen wurde für den Messkopf eine spezielle Halterung hergestellt, die dafür sorgt, dass beide Jochschenkel immer senkrecht mit gleicher Kraft auf die Prüflingsoberfläche aufgedrückt werden. Durch einen X-Y-Tisch kann die gewünschte Prüfposition angefahren werden. Bild 11 zeigt den Messaufbau.

Neben dem Vorteil, dass mit einer Messung eine Vielzahl magnetischer Kennwerte ermittelt werden kann, weist das System noch eine weitere positive Besonderheiten auf: Durch direkte Messung und Regelung der Feldstärke auf der Prüfteiloberfläche zwischen den Jochschenkeln sollte der Einfluss des Luftspaltes zwischen Jochschenkeln und Werkstückoberfläche geringer als bei anderen Systemen ausfallen, was insbesondere bei rauen Oberflächen wie Guss von Vorteil ist.

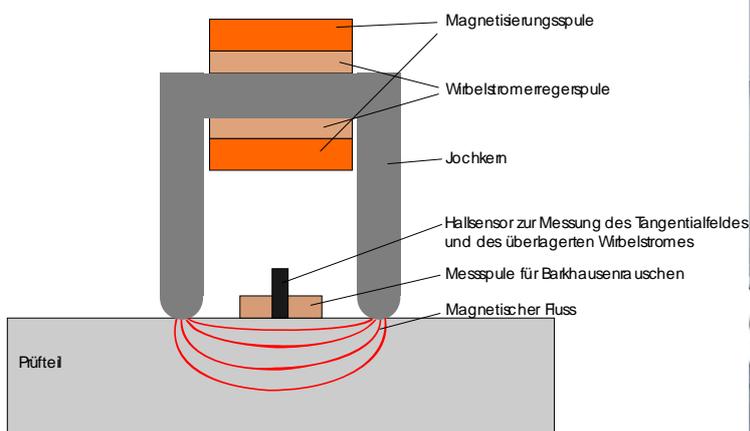


Bild 10: Aufbau des Sensorkopfes des MikroMach [18]



Bild 11: Sensorkopf in federnder Aufnahme

Für die Prüfung kompakter Teile ist die Kenntnis der effektiven Eindringtiefe (Materialtiefe bis zu der das Messsignal noch beeinflusst wird) wichtig. Diese hängt außer von der Standardeindringtiefe elektromagnetischer Felder (vgl. 6.3.2) auch von der Geometrie des Sensors und des Prüflings ab. Da entsprechende Herstellerangaben fehlen, wird für weitere Betrachtungen auf die Standardeindringtiefe Bezug genommen.

6.3.4 Magnetische Messungen an Stufenkeilen aus ADI-Guss

Gussteile weisen typischerweise eine Randschicht auf, deren Eigenschaften vom restlichen Werkstoff sehr stark abweichen, für die Gussbewertung aber von untergeordnetem Interesse sind. Da die Gefügeumwandlung bei der ADI-Herstellung von der Abkühlgeschwindigkeit und der Werkstoffdicke abhängt, besteht besonders für die Probenmitte die Gefahr, dass anstelle des angestrebten austenitisch-ferritischen Gefüges Perlit entsteht. Um dieses mit der zerstörungsfreien Prüfung zu erfassen, muss die Wechselwirkungstiefe des Magnetfeldes hinreichend groß sein. Das MikroMach-System wurde deshalb mit folgenden Einstellparametern betrieben: Magnetisierungsgrundfrequenz 25 Hz, erste Überlagerungsfrequenz 500 Hz, zweite Überlagerungsfrequenz 2 kHz, Magnetisierungsfeldstärke 100 A/cm.

Aus der Vielzahl der vom Gerätesystem MikroMach angebotenen Messgrößen sind für den vorliegenden Anwendungsfall nur diejenigen sinnvoll, die auf der Magnetisierungsgrundfrequenz (25 Hz) beruhen. Die Ergebnisse des Barkhausen-Rauschens scheiden aufgrund der geringen Wechselwirkungstiefe von nur wenigen 100 µm aus, da sie im Wesentlichen die Eigenschaft der Gussrandschicht abbilden. Die Wirbelstrommessungen basieren auf der Überlagerungsfrequenz 1 bzw. 2. Daraus resultiert gleichfalls eine nur geringe Wechselwirkungstiefe (vgl. 6.1.2) mit der Konsequenz, dass der Guss nur im randnahen Bereich beurteilt werden kann.

Neben der Eindringtiefe sind Kontinuität im Kurvenverlauf, hohe Nachweisempfindlichkeit (steiler Kurvenanstieg) und geringe Streubreite Auswahlkriterien für die magnetischen Kennwerte im Hinblick auf die zerstörungsfreie Prüfung. Am besten geeignet erscheinen hierbei die aus der Oberwellenanalyse und dem Verlauf der Überlagerungspermeabilität bestimmten Koerzitivfeldstärkewerte H_{CO} und $H_{C\mu}$. Tabelle 1 zeigt die mit dem Gerätesystem MikroMach aufgenommenen Koerzitivfeldstärkewerte H_{CO} für 13 unterschiedliche Stufenkeile für die vier Stufenhöhen 8 mm, 15 mm, 30 mm und 60 mm. Bild 12 fasst die Ergebnisse grafisch zusammen.

Tabelle 1: Wärmebehandlungsparameter für Stufenkeil-Proben im Bild 12, vgl. [13]

Proben-Nr.	Austenitierungs-Temperatur in °C	Austenitierungs-dauer in Minuten	Haltetemperatur in °C	Haltedauer in Minuten
1	870	180	400	15
2	870	180	400	30
3	870	180	400	60
4	900	180	370	30
5	900	180	330	30
6	900	180	330	90
7	900	180	330	180
8	900	180	290	60
9	900	180	250	60
10	900	180	250	90
11	900	180	250	180

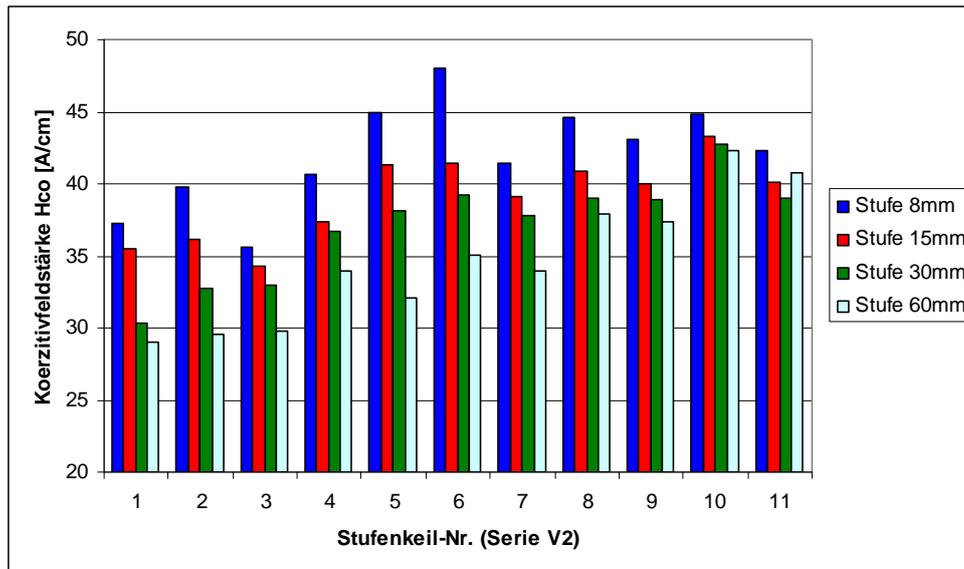


Bild 12: Koerzitivfeldstärke H_{CO} , gemessen auf den Stufen 8 mm, 15 mm, 30 mm und 60 mm, ADI-Probenserie V2

Aus dem Diagramm lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen. Im Vergleich mit den anderen Stufenhöhen weist die 8 mm-Stufe jeweils die höchsten Werte der Koerzitivfeldstärke auf. Physikalisch lässt sich das daraus erklären, dass bei dieser Stufe die Abkühlgeschwindigkeit beim Absetzen in das Wärmebehandlungsbad am größten ist. Bei den Stufen 30 mm und 60 mm ist die Abkühlgeschwindigkeit so gering, dass keine ausreichende Durchhärtung erfolgt, was durch nachfolgende Gefügeanalysen bestätigt wurde. Bei Probe 3 trifft dieser Sachverhalt auch auf die 15 mm Stufe zu, erkennbar am niedrigen Koerzitivfeldstärkewert.

Erhöht man die Austenitisierungstemperatur, nimmt die Kohlenstoffdiffusion zu (Proben 4 bis 11). Wird zusätzlich die Haltetemperatur gesenkt, führt das zu einer erhöhten Abkühlgeschwindigkeit, verbunden mit einer Zunahme des Ferrit-Bestandteils im Gefüge, was sich wiederum in einer Zunahme der Koerzitivfeldstärke niederschlägt.

Der scheinbare Widerspruch, dass die Messwerte für die 30 mm/60 mm-Stufen der Proben 6 bis 11 über den Werten der 8 mm/15 mm-Stufen der Proben 1 und 2 liegen, ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass das Messsystem integral misst und überproportional vom randnahen, korrekt umgewandelten Gefüge beeinflusst wird. Hier war die Abkühlgeschwindigkeit noch ausreichend hoch, wohingegen die fehlerhaften perlitischen Gefügezonen erst im Probeninneren zu finden sind.

6.3.5 Magnetische Messungen an prismatischen Proben aus ADI

Wie in Abschnitt 6.1 angekündigt, erfolgten weitere Untersuchungen an prismatischen Proben, die aus tieferen Probenschichten entnommen wurden und für die Bestimmung der Kerbschlagarbeit vorgesehen waren (siehe auch Bild 4). Auf drei der vier Seiten wurden jeweils 5 Einzelwerte gemessen und gemittelt. Die mittels MikroMach ermittelten magnetischen Kennwerte wurden mit den mechanischen Kennwerten verglichen und bezüglich Empfindlichkeit und Streuung bewertet.

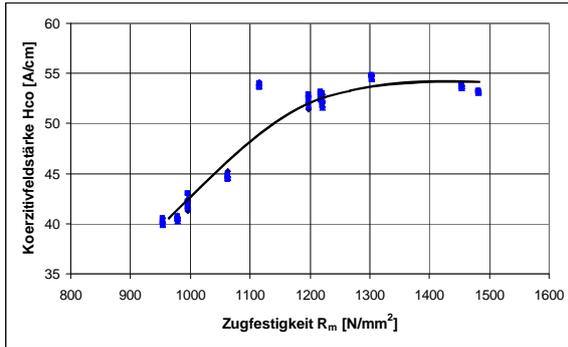


Bild 13: Zusammenhang Koerzitivfeldstärke H_{CO} und Zugfestigkeit R_m (Serie V2)

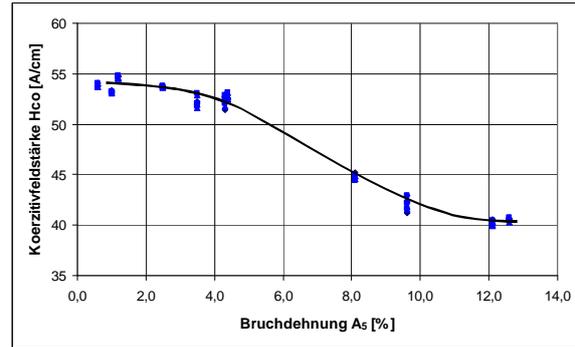


Bild 14: Zusammenhang Koerzitivfeldstärke H_{CO} und Bruchdehnung A_5 (Serie V2)

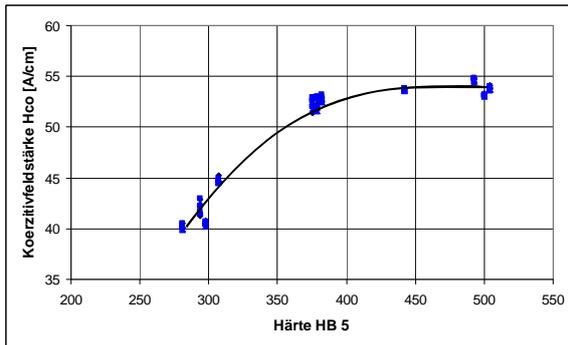


Bild 15: Zusammenhang Koerzitivfeldstärke H_{CO} und Härte HB5 (Serie V2)

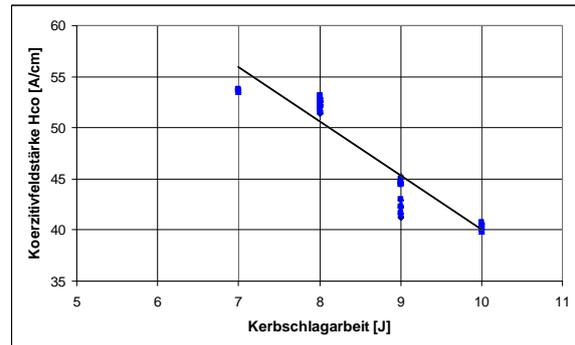


Bild 16: Zusammenhang Koerzitivfeldstärke H_{CO} und Kerbschlagarbeit (Serie V2)

Die Bilder 13 bis 16 zeigen den Zusammenhang zwischen ausgewählten mechanischen Werten und magnetischen Kennwerten, in diesem Fall die Koerzitivfeldstärke H_{CO} . Mit zunehmender Festigkeit des ADI-Gusses steigt zunächst auch die Koerzitivfeldstärke an. Ab $1200 N/mm^2$ flacht der Verlauf dann zunehmend ab (Bild 13). Bild 14 stellt den Zusammenhang zur Bruchdehnung dar. Niedrige Bruchdehnungswerte sind verknüpft mit hohen Koerzitivfeldstärken, umgekehrt führt zäher Guss mit großen Dehnungswerten zu einer massiven Abnahme derselben. Der Kurvenverlauf in Bild 15 ähnelt sehr stark Bild 13. Niedrige Härtewerte gehen mit kleinen Feldstärkewerten konform, steigt die Härte, nimmt die Koerzitivfeldstärke zu. Ab 400 HB5 ist nur noch ein marginaler Kurvenanstieg zu verzeichnen. Wenden wir uns Bild 16 zu. Die Analyse zeigt, dass höhere Kerbschlagarbeiten tendenziell mit höheren Koerzitivfeldstärkewerten einhergehen.

7. Zusammenfassung und Ausblick für eine zerstörungsfreie Prüfung von ADI-Guss

ADI besteht aus der Sicht magnetischer Prüfverfahren aus einer Matrix aus ferromagnetischem Ferrit und paramagnetischem Austenit, in der mehr oder weniger viele und mehr oder weniger große nicht ferromagnetische Graphitkugeln verteilt sind. Andere Bestandteile, z. B. Martensit, Bainit, Karbide, sollten nur minimiert auftreten. Perlitanteile sind nur zulässig, wenn sie mit dem Käufer vereinbart sind [3]. Treten diese Phasen verstärkt auf, ist in der Regel die Wärmebehandlung nicht korrekt abgelaufen.

Für die Beurteilung der Kugelausbildung eignet sich die Bestimmung der Geschwindigkeit von Ultraschallwellen. Das Material ist in ausreichendem Maße durchschallbar, und die Messungen haben die für Kugelgraphitgusseisen üblichen Werte für die Schallgeschwindigkeit erbracht. Eine Messung ist auch nach der Wärmebehandlung (ADI-Zustand) möglich, die Schallgeschwindigkeitswerte werden primär durch die Kugelgraphitausbildung bestimmt, und dienen dann quasi als Teil einer Endabnahmeprüfung. Da die

Matrix die Schallgeschwindigkeit ebenfalls beeinflusst, sind Abweichungen der Graphitbildung aber nur in Bezug auf die Form (kugelig oder eher lamellar) feststellbar. Eine direkte Gegenüberstellung von Nodularität und Ultraschallgeschwindigkeit wurde versucht, konnte aber aufgrund des unzureichenden Probenspektrums nicht zu Ende geführt werden.

Für die Bestimmung des Verhältnisses Ferrit zu Austenit müssen auf magnetischen Eigenschaften basierende Verfahren eingesetzt werden. Theoretisch wäre hierfür eine magnetische Sättigungsmessung das Verfahren der Wahl. Allerdings ist das nur bei speziellen Probekörpern praktikierbar.

Das magnetische Prüfsystem MikroMach ist gut geeignet, wenn es darum geht, möglichst schnell viele magnetische Parameter zu erfassen. Es liefert sowohl an speziellen Proben als auch auf der rauen Gussoberfläche in der Regel zuverlässige Daten. Zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit empfiehlt sich die Verwendung einer speziellen Probenhalterung. Verfahren, die auf der Oberwellenanalyse beruhen, erreichen bei Verwendung der niedrigsten einstellbaren Frequenz eine Standardeindringtiefe von etwa 12 mm. Für die Gussprüfung wäre eine größere Einwirkungstiefe vorteilhafter, insbesondere wenn die Prüfung durch die Gushaut hindurch erfolgen soll.

Besonders dringlich erscheint dies dann, wenn z. B. infolge ungenügender Abkühlgeschwindigkeit der typische Fehlerfall auftritt, dass die Randzonen zwar ausferritisches Gefüge aufweisen, der Kern aber bereits perlitisch ist, das Messsystem also durch „Gut-Gefüge“ hindurch messen muss.

Das Barkhausen-Rauschen scheidet wegen der geringen Wirttiefe von einigen 100 μm aus, da an Fertigteilen mit Gushaut geprüft werden soll. Die bei den durchgeführten Messungen festgestellten großen Streuungen belegen dies. Die besten Korrelationen zu mechanischen Größen zeigen die Koerzitivfeldstärke H_{CO} und die Koerzitivfeldstärke $H_{C\mu}$. Zu berücksichtigen ist, dass bei einer zerstörungsfreien Prüfung der Festigkeit die Kurvenverläufe bei höherfesten ADI immer mehr abflachen, so dass hier keine Trennung mehr möglich ist. Günstig wirkt sich dagegen aus, dass Perlit sehr niedrige Koerzitivfeldstärkewerte aufweist. Das Auftreten dieser unerwünschten Phase ist deshalb sehr empfindlich nachweisbar. Der Nachweis von Martensit und Karbiden bleibt zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, da hierfür separate Probenreihen notwendig sind.

Generell muss festgestellt werden, dass die Prüftechnologie nur bauteilspezifisch aufgestellt werden kann. Die Zielgröße, die kontrolliert werden soll, muss eindeutig festliegen. Darüber hinaus müssen mögliche Störgrößen ebenfalls genau bekannt sein. Nur so wird es möglich sein, die für die Prüfung unverzichtbaren Vergleichsmuster bereitzustellen.

Für die zerstörungsfreie Prüfung sind 3 Schwierigkeitsgrade denkbar. Die einfachste Form ist, ein Prüfstück an mehreren Stellen zu prüfen und über die Anzeigeänderung Aussagen über die Gleichmäßigkeit z. B. der Gefügeausbildung abzuleiten. Das ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn bestimmte belastungssensible Bauteilbereiche gegen ungewollte örtliche Gefügeänderungen (z. B. Seigerungen, Graphitentartung u. ä.) abgesichert werden sollen. Ähnlich ist die Situation bei einer Serienfertigung, wenn eine 100%-Prüfung gefordert wird. Setzt man üblicherweise eine Gauß-Verteilung des Gesamtensembles voraus, können Teile des oberen und unteren Grenzbereiches der Verteilungskurven separiert und danach konventionell untersucht werden. Wenn diese qualitativ in Ordnung sind, ist es der Rest auch. Am anspruchvollsten stellt sich die Situation dar, wenn durch die zerstörungsfreie Prüfung eine oder mehrere bisher zerstörend bestimmte Kennwerte ermittelt werden sollen. Das funktioniert nur, wenn lediglich eine Störgröße auftritt, die Proportionalität zwischen mechanischem Wert und zerstörungsfreien Wert gegeben ist und hinsichtlich der Genauigkeit der Bestimmung Abstriche hingenommen werden können.

Danksagung

Die Arbeit entstand mit Unterstützung des BMBF im Rahmen des Regionalen Innovativen Wachstumskerns Precision Cast an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Besonderer Dank gilt den Firmen ACTech GmbH Freiberg, HQM GmbH Chemnitz und Keßler & Co GmbH Leipzig für die Bereitstellung der Proben und der mechanischen Kennwerte und Gefügebewertung sowie dem Laboratorium für magnetische Messungen der Technischen Hochschule Brno für die Aufnahme der Hystereseschleifen.

Referenzen

- [1] Schock, D.: Bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit – Ein Werkstoff mit großem Eigenschaftspotential. *Konstruieren + Gießen* 25 (2000) Nr. 4, S. 9-13
- [2] DIN EN 1564: Gießereiwesen – Bainitisches Gusseisen; Deutsche Fassung EN 1564:1997 + A1:2006
- [3] DIN EN 1564: Gießereiwesen - Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit; Deutsche Fassung prEN 1564:2009
- [4] Röhrig, K.: Fehlermöglichkeiten bei der Erzeugung von ADI. *Gießerei-Praxis* 4/01, S. 153-162
- [5] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer-Verlag, 1961, S. 407-413
- [6] Willcox, M.: *Ultrasonic Velocity Measurement used to Assess the Quality of Iron Castings*. Firmenschrift Insight NDT Equipment Ltd, 21 St Owen Street, Hereford, Herefordshire
- [7] Gundlach, R. B.: Nodularity, its Measurement, and its Correlation with Mechanical Properties of Ductile Iron. DIS Research Project No. 37, 2006, Stork Climax Research Services, 51229 Century Court, Wixom, Michigan 48393
- [8] Li, H.; Griffin, R. D.; Bates, C.E.: Gray Iron Property Measurements Using Ultrasonic Techniques. Paper 05-122(05), AFS Transactions 2005, American Foundry Society, Schaumburg, IL.
- [9] Volkmann, K.; Schulz, S.: Automatisierte Gefügebeurteilung an sphärolitischem Gusseisen durch Ultraschall. DACH-Tagung 2000, Innsbruck 2000, *Berichtsband* S. 475-482
- [10] Husarek, V.; Castel, J.-G.; Charrier, Th.: SONDEX – Anlage zur automatischen Überwachung von Automobilteilen mit kombinierten ZfP-Verfahren (Wirbelstrom, Magnetische Streuflussprüfung, Ultraschall) an Querträgern aus Kugelgraphitguß. DGZfP-Jahrestagung 2003, Mainz, *Berichtsband* 83-CD
- [11] D'Amato, C.; Verdu, C.; Kleber, X.; Regheere, G.; Vincent, A.: Characterization of Austempered Ductile Iron through Barkhausen Noise Measurement. *J. Nondestr. Eval.* Vol. 22, No. 4, Dec. 2003, S. 127-139
- [12] Wickins, M.; Harding, R. A.: Prediction the mechanical properties and retained austenite content of ADI castings using non-destructive testing techniques. *Int. J. of Cast Metals Research*, 2003, Vol. 16, Nos.1-3, S. 197-202
- [13] Getzlaff, U.: *Schlussbericht 03WKBC 1A, Wachstumskern Precision Cast – Verbundprojekt: Entwicklung einer virtuellen, integrierten Technologieplattform für Guss-Konstruktion und – Fertigung(viTeG) – Teilprojekt: Precision Cast – Entwicklungsprozess für Gießereinetzwerk*. ACTech Freiberg, Jan. 2010
- [14] DIN 54140 Teil 1, *Zerstörungsfreie Prüfung, Induktive Verfahren (Wirbelstromverfahren)*, April 1976
- [15] Rietveld, G.; Koijmans, Ch. V.; Henderson, L. C. A.; Hall, M. J.; Harmon, S.; Warnecke, P.; Schumacher, B.: DC Conductivity Measurements in the Van Der Pauw Geometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 52, No. 2, S. 449-453, April 2003
- [16] Maisl, U.; v. Bernus, L.; Frauendorfer, R.; Kopp, M.; Altpeter, I.: *Zerstörungsfreies Prüfverfahren zur schnellen, sicheren und wirtschaftlichen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften in Seriengussbauteilen*. DGZfP-Jahrestagung 2001, Berlin, *DGZfP-Berichtsband* BB 75 – CD, Vortrag 60
- [17] Abuhamad, M.; Maisl, U.; Altpeter, I.; Dobmann, G.; Kopp, M.; Junk, H.; Radebach, D.: *Zerstörungsfreie Charakterisierung von Gusseisen-Gradienten-Zylinderkurbelgehäusen (ZKG) mittels elektromagnetischer Prüfverfahren*. DGZfP-Jahrestagung 2007, Fürth, *DGZfP-Berichtsband* 104 – CD, Vortrag 95
- [18] NN: *Mikromagnetischer Werkstoffprüfer „MikroMach“*. Benutzerhandbuch V. 1.1, 2007, Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken