

High-Speed-3MA zur mikromagnetischen Werkstoffcharakterisierung in schnellen Produktionsprozessen

Klaus SZIELASKO *, Sargon YOUSSEF *, Bernd WOLTER *,
Martin SCHUPPMANN *, Christoph WEINGARD *, Christoph RODNER *,
Harald KOPP *, Mohammed ELZATMA *,
Ivan MIRONENKO **, Ifrit KISELMANN ***

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

** Mironenko Soft- und Hardwareentwicklung, Saarbrücken

*** Exect Kiselmann Hardware & Software, Blieskastel-Altheim

Kurzfassung. Die Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungsanalyse (3MA) findet in der Qualitätssicherung ferromagnetischer Erzeugnisse auf vielen Gebieten Einsatz. In den meisten Fällen sind hierbei quantitative Prüfergebnisse gefragt. Zunehmende Produktionsgeschwindigkeiten und kürzere Taktzeiten, beispielsweise im Falle von Bandstahl oder gehärteten Automobil-Bauteilen, verlangen nach Echtzeit-Prüfverfahren, die unter diesen Bedingungen eine 100%-Prüfung bzw. möglichst hohe Flächenabdeckung der Prüfobjekte erreichen. Gleichzeitig ist das Verständnis der Zusammenhänge zwischen mikromagnetischen Prüfgrößen und mechanisch-technologischen Kenngrößen eine ständige Herausforderung dieses Bereiches der zerstörungsfreien Prüfung.

Durch neue FPGA-basierte Gerätehardware, Vereinfachung der Sensorbauweise und Weiterentwicklung der Verfahrensansätze konnte die Messgeschwindigkeit um ein Vielfaches erhöht werden. Ein deterministischer Messablauf gewährleistet Echtzeitfähigkeit des Verfahrens und Lokalisierbarkeit der gewonnenen Messwerte. Darüber hinaus wurde betrachtet, welche Auswirkung ein größerer, variabler Luftspalt zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt auf die Messergebnisse besitzt und Lösungsansätze zur rechnerischen Kompensation vorgeschlagen.

1. Einführung

1.1 3MA-Verfahren

Die Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) ist eine Kombination aus den folgenden vier magnetischen Prüfverfahren, aus deren Messinformation Näherungswerte mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften und Eigenspannungen ferromagnetischer Werkstoffe bestimmt werden:

- Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke: Nichtlinearität und Hysterese der Magnetisierungskennlinie des Werkstoffs schlagen sich in einer Variation der Induktivität des anregenden Elektromagneten nieder. Dies führt bei sinusförmiger Spannungseinprägung zu Oberwellen im Zeitsignal von Strom und



Tangentialfeldstärke. Eine Auswertung der Oberwellensignale erlaubt Rückschlüsse auf Hysteresemerkmale wie z.B. die Koerzitivfeldstärke und den Permeabilitätsverlauf [1].

- Analyse des magnetischen Barkhausenrauschens: Das Barkhausenrauschen entsteht durch die Sprünge der Bloch-Wände während des Ummagnetisierungsprozesses. Die Bloch-Wände werden durch immer vorhandene Fehler der Mikrostruktur (Ausscheidungen, Korngrenzen, Versetzungen) und Mikroeigenspannungen in ihrer Bewegung behindert. Im Barkhausenrauschen (sowie im gesamten magnetischen Werkstoffverhalten) bilden sich daher indirekt auch die von der Mikrostruktur beeinflussten mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften und Spannungszustände ab [2].
- Analyse der Wirbelstromimpedanz: Leitfähigkeit und Permeabilität des Prüfobjekts beeinflussen die Impedanz einer in seine Umgebung gebrachten Messspule infolge von Wirbelstromeffekten und magnetischer Polarisierbarkeit. Das häufig zur zerstörungsfreien Fehlerprüfung eingesetzte Wirbelstromverfahren [3] ist als Methode zur Werkstoffcharakterisierung ebenfalls ein Bestandteil von 3MA.
- Analyse der Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität: Vergleichsweise hochfrequente Wirbelstrommessungen während vergleichsweise niederfrequenter Ummagnetisierung des Prüfobjekts erlauben es, die Veränderung der differentiellen Permeabilität als Funktion der Feldstärke qualitativ darzustellen. Die Messinformation ist dabei analog zur Überlagerungspermeabilität gemäß Norm [4], die auf Hysteresemessungen in umfassender Spulentechnik basiert und somit in der zfP-Praxis nicht 1:1 umsetzbar ist.

Aus den vier Verfahren werden ca. 40 Kenngrößen ermittelt, die den Werkstoffzustand mikromagnetisch charakterisieren. Die für die Praxis relevante Ermittlung von Näherungswerten mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Härte, u.v.m.) und Eigenspannungen anhand der gemessenen Kenngrößen wird mittels multivariater Regressionsanalyse und Mustererkennung gelöst.

Die am Fraunhofer IZFP entwickelten Prüfsysteme „3MA-II“ und „MikroMach“ realisieren die Kombination der vier Teilverfahren mit einem gemeinsamen Prüfkopf, der einen Elektromagneten zur Erregung der magnetischen Hysterese sowie Spulen und eine Hallsonde als Sensoren enthält. Abb. 1 zeigt die wesentlichen Komponenten eines solchen Prüfkopfs.

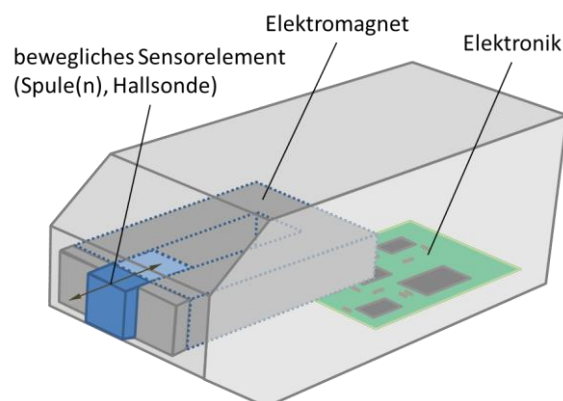


Abb. 1. Mikromagnetischer Prüfkopf (hier: MikroMach-Gerät), Foto und Schema

Die mechanisch-technologische Charakterisierung von Zugproben ist ein fester Bestandteil der Qualitätssicherung in der Bandstahlproduktion. Die zerstörende Prüfung kann dabei selbstverständlich nur im Anfangs- und Endbereich der Bänder durchgeführt werden. Um die Werkstoffqualität auf der restlichen Strecke zu überwachen, werden zerstörungsfreie Verfahren eingesetzt, darunter auch Mikromagnetik. Hohe Bandgeschwindigkeiten und

immer engere Prozessfenster schaffen dabei einen Bedarf für schnelle Echtzeit-Prüftechnik mit Multi-Sensor-Unterstützung zur Prüfung an mehreren Orten der Walzstraße oder über die Breite des Bandes hinweg.

1.2 Herausforderungen

Bei der fertigungsintegrierten Prüfung kaltgewalzter Bleche unter Einsatz mikromagnetischer Prüftechnik herrschen besondere Anforderungen. Hohe Bandgeschwindigkeiten von durchaus einigen hundert m/min und mehr setzen eine berührungslose Messung mit schneller, möglichst konstanter und deterministischer Wiederholrate voraus. Die Umgebungstemperatur kann über eine Spanne einiger 10 °C variieren. Aufgrund der harten Umgebungsbedingungen sind mechanisch robuste Prüfköpfe erforderlich. Der Abstand zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt unterliegt bei automatisierter Handhabung meist großen Schwankungen. Es ist bekannt, dass mikromagnetische Prüfverfahren bei einseitigem Zugang der Prüfobjekte eine generell hohe Abhebeempfindlichkeit besitzen.

Das Verhalten der 3MA-Kenngrößen bei Sensorabhebung ist bisher in Veröffentlichungen wenig betrachtet worden. Insbesondere wurde bisher wenig diskutiert, wie groß die Sensorabhebung bei der Prüfung von Feinblech sein darf.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Verfahrensanpassung für Multi-Sensor- und High-Speed-Anwendungen

Die Weiterentwicklung mikromagnetischer Prüftechnik am Fraunhofer IZFP folgt einem minimalistischen Ansatz, d.h. sie zielt auf die Nutzung einer möglichst geringen Anzahl einfach zu reproduzierender Sensorkomponenten, die in jeweils unterschiedlicher Ansteuerung die Durchführung der 3MA-Teilverfahren gestatten [6]. Es wurde bereits veröffentlicht, wie unter Einsatz einer Hallsonde und nur einer einzigen Hochfrequenz- (HF-) Empfängerspule Barkhausenrausch-, HF-Wirbelstromimpedanz- und HF-Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitäts-Analysen durchführbar sind [7]. In diesem Kontext wurde auch erläutert, wie durch Messung des HF-Spulenwiderstands eine Temperaturkompensation der Wirbelstromimpedanz-Messwerte erzielt werden kann.

Im Zuge der Weiterarbeit wurde die Wirbelstromimpedanz- und Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätsanalyse als Kombinationsverfahren auch im Niederfrequenzbereich umgesetzt. Dies ist technisch besonders vorteilhaft, da die Messung der Impedanzeffekte über die Magnetisierungsspule des Elektromagneten erfolgen kann. Außer der auch für die Oberwellenanalyse nötigen Hallsonde werden keine weiteren Sensorelemente benötigt, d.h. es entstehen keine zusätzlichen Freiheitsgrade, die eine Reproduktion der Prüfkopfeigenschaften erschweren. In der Hardware ist die Messung der Zeitsignale von Spannung und Strom am Elektromagneten neben der bisher bereits stets erfassten magnetischen Tangentialfeldstärke nötig. Das Verfahren der Überlagerungspermeabilitäts-Analyse setzt bei dieser Umsetzungsvariante die Speisung des Elektromagneten mit einem Summensignal aus Magnetisierungsfrequenz (z.B. 50 Hz Sinus) und Wirbelstrom-Prüffrequenz (z.B. 1 kHz Sinus) voraus. Mittels Filterung und kohärenter Demodulation der Spannungs- und Stromsignale wurde die zeitliche Änderung der Spulenimpedanz ermittelt und, analog zur Vorgehensweise im HF-Bereich [7], als Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätskurve $Im \Delta Z(H)$ aufgetragen. Ergebnisse hierzu werden weiter hinten im Text diskutiert. Der für High-Speed-Anwendungen wichtige Zeitvorteil ergibt sich daraus, dass die Messdaten jeder Magnetfeldperiode alle zur Durchführung von dreien der vier 3MA-Teilverfahren nötigen Informationen enthalten: Oberwellenanalyse anhand des Feldstärkesignals (tiefpassge-

filtert zum Entfernen der Überlagerungsfrequenz), Wirbelstromimpedanz-Analyse anhand des Mittelwerts der Spulenimpedanz über die Magnetfeldperiode hinweg und Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitäts-Analyse wie zuvor beschrieben. Damit sind bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz – unter Verzicht auf die Barkhausenrausch-Analyse – 50 3MA-Messungen pro Sekunde durchführbar.

Abb. 2 zeigt ein Foto des aufgebauten Prüfsystems mit zwei Prüfköpfen, die als individuelle 3MA-Wandler genutzt werden und darüber hinaus eine Messanordnung zur Ultraschall-Laufzeitmessung im EMUS-Verfahren darstellen (letzteres wird in diesem Beitrag nicht näher diskutiert).

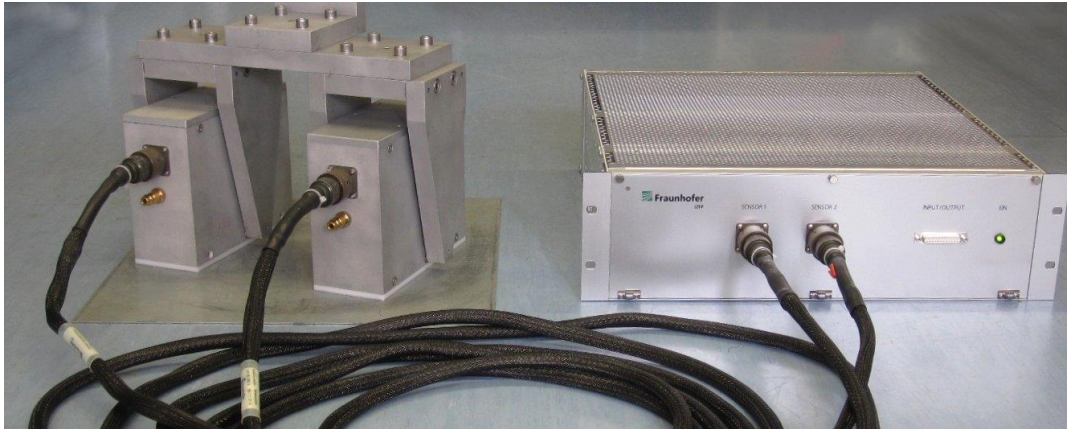


Abb. 2. MAGNUS-Prüfsystem (19-Zoll-Einschub) mit zwei Prüfköpfen

In Abb. 3 links ist die Sohle der Prüfköpfe dargestellt. Man erkennt die Pole des Elektromagneten und die dazwischen zentrierte Sensoranordnung (Details rechts in der gleichen Abbildung). Die Köpfe besitzen Druckluftanschlüsse zur Erzeugung eines dünnen Luftpolsters $< 1\text{ mm}$ für das EMUS-Verfahren. Wird nur das 3MA-Verfahren genutzt, sind größere Luftspalte zulässig, wie im weiteren Text diskutiert.

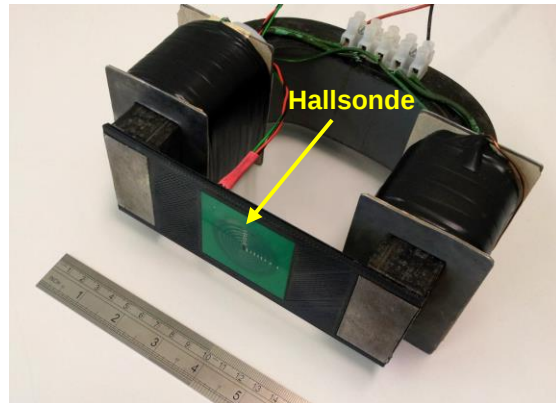


Abb. 3. MAGNUS-Prüfköpfe (links), darin enthaltener Elektromagnet mit Hallsonde (rechts; die im Foto gezeigten HF-Printspulen im Bereich der Hallsonde werden in diesem Beitrag nicht diskutiert)

2.2 3MA-Messungen mit variablem Luftspalt

Die Praxiserfahrung mit 3MA belegt, dass viele Störeinflüsse beherrschbar sind, wenn sie bereits in den Kalibrierdaten vorliegen. Regressionsanalyse und Mustererkennung erhalten hierdurch die nötige Information, um mehrere Kenngrößen aus dem Multiparameter-Raum so miteinander verknüpfen zu können, dass trotz der Störung das korrekte Ergebnis ermittelt wird [5]. Damit steigt jedoch zwangsläufig die Anzahl der Freiheitsgrade der Lösung, was ihre Inter- und Extrapolierbarkeit verringert und die Möglichkeit zur Bewältigung weiterer Störeinflüsse einschränkt. Es ist daher anzustreben, die Kenngrößen so zu definieren, dass sie weitgehend unabhängig von bekannten Störeinflüssen sind.

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Sensor-Liftoffs als Störeinfluss in 3MA-Kenngrößen beschrieben und ein Lösungsansatz zur Liftoff-Kompensation vorgeschlagen. Alle Messungen erfolgten am Beispiel zweier Bleche mit einer Dicke von 1 mm und unterschiedlicher Härte (35 HRC, 54 HRC).

In Abb. 4 ist zunächst links erläutert, wie die Oberwellenanalyse anhand des Zeitsignals der magnetischen Tangentialfeldstärke (schwarz) und den Signalen der Grund- und Oberwellen (rot, blau) die zur Koerzitivfeldstärke proportionale Kenngröße H_{CO} und den Klirrfaktor K bestimmt. Rechts sind die Verläufe von K und H_{CO} bei Variation des Liftoffs gegeneinander aufgetragen.

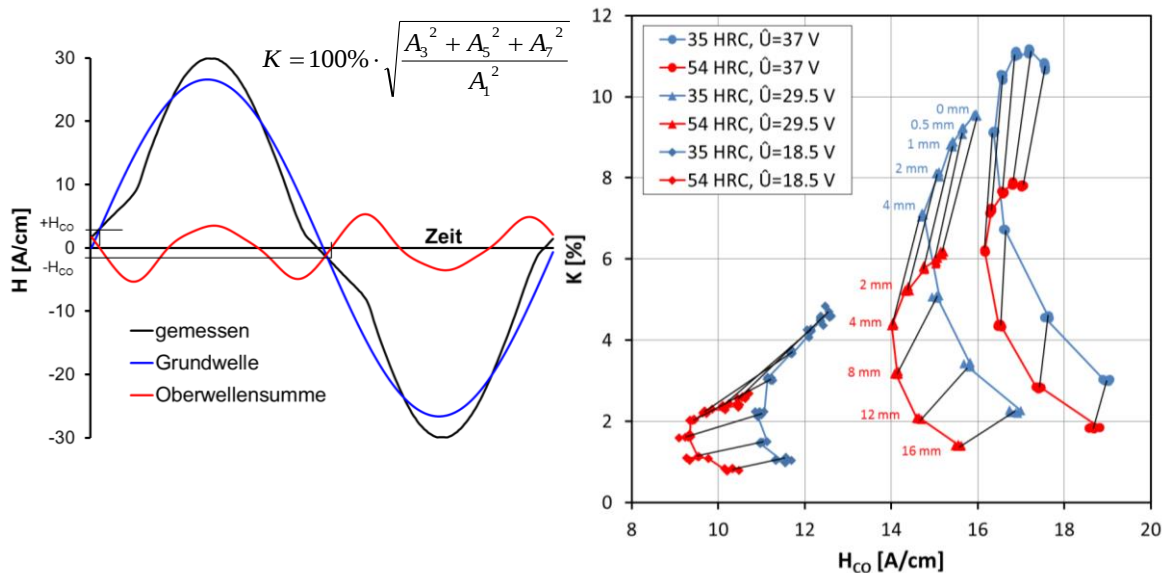


Abb. 4. Links: Erläuterung zur Bestimmung der Kenngrößen K und H_{CO} aus dem Oberwellensignal der magnetischen Tangentialfeldstärke H . Rechts: Darstellung des Kennwertpaares Klirrfaktor/Koerzitivfeldstärke (K/H_{CO}) zweier Testbleche unterschiedlicher Härte bei drei Amplituden $\hat{U}$ der Magnetisierungsspannung und Liftoff-Variation von 0-16 mm.

Es entstehen Abhebekennlinien, wie man sie von der Wirbelstromprüfung kennt. Die Abhebekennlinien wurden für beide Bleche bei drei verschiedenen Amplituden $\hat{U}$ der Magnetisierungsspannung dargestellt. In allen drei Fällen ist eine deutliche Unterscheidung der Werkstoffzustände trotz Liftoff bis 16 mm (vermutlich sogar noch weiter) gegeben – allerdings existieren bei unbekanntem Liftoff Mehrdeutigkeiten, d.h. die roten und blauen Kurven überschneiden sich.

Es wurde daher zunächst untersucht, ob man durch Änderung der Anregungsparameter, z.B. durch Nachregelung der Feldstärke, dem störenden Liftoff-Effekt entgegenwirken kann. Bereits in Abb. 4 erkennt man, dass dies nicht möglich ist, denn mit steigendem Liftoff sinkt beispielsweise der Klirrfaktor erheblich stärker als man ihn durch Erhöhung der Amplitude $\hat{U}$ wieder anheben könnte (abgesehen von der Änderung in H_{CO} , die sich daraus ergeben würde). Die physikalische Herausforderung bei der Magnetfeldregelung besteht darin, dass sowohl die Hallsonde als auch der Elektromagnet dem Liftoff unterliegen und die wahre Feldstärke in der Probe unbekannt ist.

Das linke Diagramm in Abb. 5 erläutert, dass bei kleinem Liftoff fast keine Änderung der gemessenen Feldstärkeamplitude feststellbar war, d.h. die Bedingungen „konstante Spannungsamplitude $\hat{U}$ “ und „konstante Feldstärkeamplitude $\hat{H}$ “ sind bei kleinem Liftoff äquivalent. Mit größerem Liftoff, ca. ab 3-4 mm, stieg die gemessene Feldstärkeamplitude sogar an, d.h. eine Regelung der Magnetfeldstärke hätte die Spannung reduziert und dadurch den Klirrfaktor noch weiter gesenkt. Zusammenfassend lässt sich also hierzu feststellen, dass das Konstanthalten von $\hat{U}$ – zumindest im Falle der Blechprüfung und bei solch großen Prüfköpfen wie den hier verwendeten – eindeutig Vorteile gegenüber der Magnetfeldregelung besitzt. Der mit dem Liftoff infolge der Impedanzänderung ansteigen-

de Strom gleicht automatisch einen Teil der Nachteile aus. Darüber hinaus ist dies technisch einfach umsetzbar, und durch den Wegfall der Magnetfeldregelung wird das System echtzeitfähig, da in jeder Signalperiode zwangsläufig die gleichen Anregungsbedingungen ($\hat{U}=\text{const}$) vorliegen.

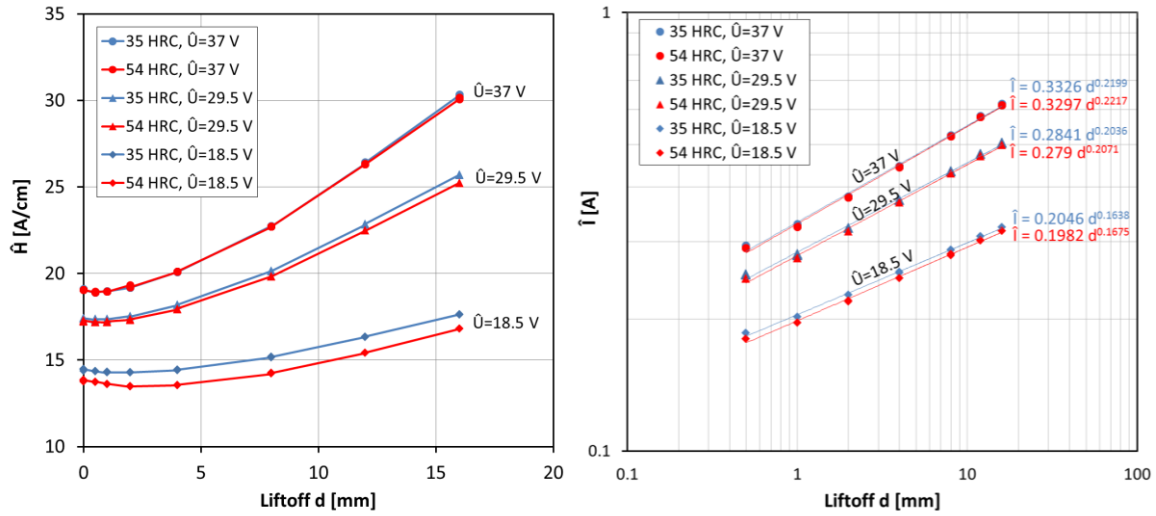


Abb. 5. Verlauf der Amplitude $\hat{H}$ der magnetischen Feldstärke (links) sowie der Amplitude $\hat{I}$ des Stroms (rechts) bei drei verschiedenen Amplituden $\hat{U}$ der Spannung an der Erregerwicklung ($f=50$ Hz).

Darüber hinaus wurde erkannt, dass unter dieser Anregungsbedingung ($\hat{U}=\text{const}$) der Zusammenhang zwischen Stromamplitude $\hat{I}$ und Liftoff d einem Potenzgesetz folgt, d.h. die Auftragung $\hat{I}=f(d)$ war in doppelt logarithmischer Darstellung bei jeder der betrachteten Spannungsamplituden $\hat{U}$ eine Gerade, die zudem fast nicht vom Werkstoffzustand abhing (Abb. 5 rechts). Der Messwert bei $d=0$ wurde wegen der logarithmischen Skalierung ausgelassen. Aufgrund der Werkstoffunabhängigkeit ist es naheliegend, dass der vorliegende Liftoff-Wert d aus der Stromamplitude $\hat{I}$ berechnet werden kann. Für $\hat{U}=29.5$ V ergibt sich beispielsweise durch Inversion der im Diagramm eingetragenen Zusammenhänge:

$$d \approx \left(\frac{\hat{I}/A}{0.28} \right)^5 \text{ mm} \quad (1)$$

Mit nunmehr bekanntem Liftoff sind die Mehrdeutigkeiten in vielen Kennwerten auflösbar. Dies kann am Beispiel des Klirrfaktors K demonstriert werden. K zeigt für beide betrachteten Werkstoffproben einen mit hohem Bestimmtheitsmaß exponentiellen Abfall über steigendem Liftoff (Abb. 6 links). Dabei besaßen beide Kurven die gleiche Dämpfungskonstante. Durch Normierung von K auf eine Exponentialfunktion mit dieser Dämpfungskonstante konnte eine effektive Liftoff-Korrektur erzielt werden, wie in Abb. 6 rechts anhand des Verlaufs der wie folgt definierten Kenngröße K_{CORR} dargestellt:

$$K_{\text{CORR}} = \frac{K}{e^{-0.09d/\text{mm}}} \quad (2)$$

Weiterhin zeigt Abb. 7, dass eine implizite Unterdrückung des Liftoffs als Störeinfluss in den Kalibrierdaten bereits bei diesem einfachen Fall mit nur zwei Proben nicht mittels Regressionsanalyse über K und H_{CO} alleine möglich ist (Diagramm ganz links). Lässt man die Einbeziehung des Stroms $\hat{I}$ ins Polynom zu, verbessert sich die Trennung deutlich (mittleres Diagramm). Mit Abstand bessere Ergebnisse wurden allerdings erzielt, indem die Kalibrierung alleine auf der Basis des korrigierten Klirrfaktors K_{CORR} durchgeführt wurde (Diagramm ganz rechts). Zusätzlich besitzt diese Lösung einen geringeren Freiheitsgrad von 2 ($\hat{I}$ und K). Es ist davon auszugehen, dass eine vergleichbare Liftoff-Korrektur auch für weitere Kenngrößen möglich ist und somit weitaus kompliziertere Aufgabenstellungen als diese beispielhafte Kalibrierung mit nur zwei Proben lösbar sind.

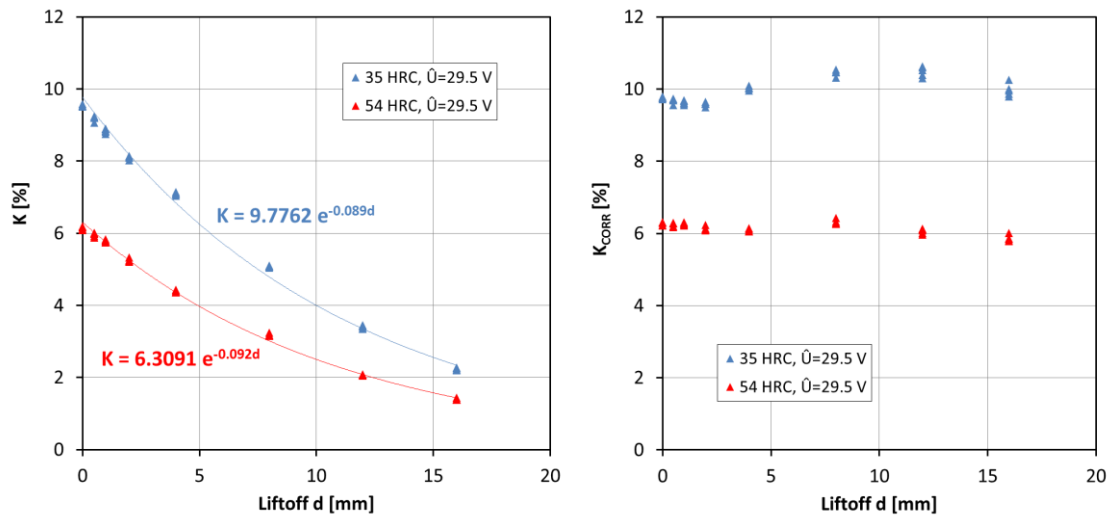


Abb. 6. Verlauf des Klirrfaktors K (links) sowie der Größe K_{CORR} (rechts) als Funktion des Liftoffs d

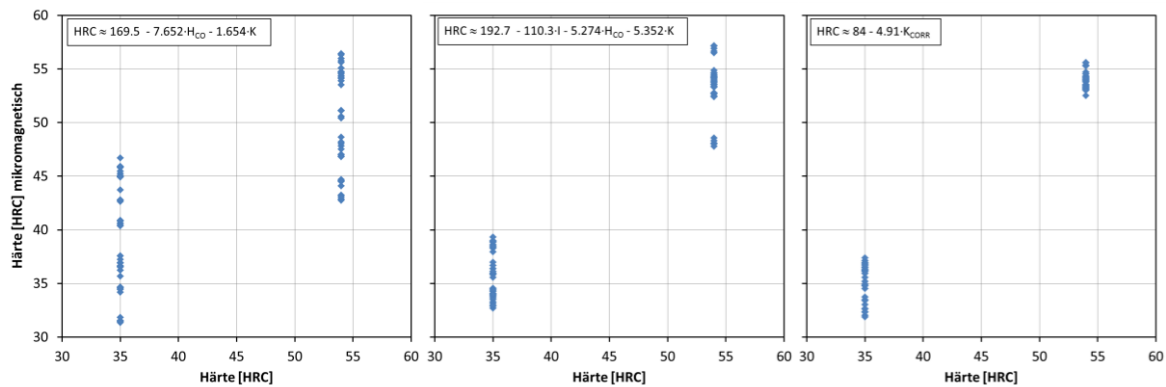


Abb. 7. Trennung der Werkstoffzustände durch Regressionsanalyse mit Lift-off von 0-16 mm als Störeinfluss: links nur auf Basis der Kenngrößen K und H_{CO} , in der Mitte unter zusätzlicher Einbeziehung der Stromamplitude $\hat{I}$, rechts nur anhand des lift-off-kompensierten Klirrfaktors K_{CORR} .

2.3 NF-Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitäts-Analyse mit variablem Luftspalt

In weiteren Schritten wurde die Bestimmung der Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität anhand von Spulenstrom und -spannung an der Erregerwicklung betrachtet. Hierzu wurde dem Anregungssignal, das in diesem Fall eine Frequenz von $f_{MAG}=25$ Hz besaß, ein weiterer Sinus der Frequenz $f_{EC}=1000$ Hz bei geringerer Amplitude überlagert. Durch Filterung und kohärente Demodulation der Signale wurde der zeitliche Verlauf der Spulenimpedanz $Z(t)$ ermittelt. Aufgrund der hohen Induktivität und des gleichzeitig geringen Gleichstromwiderstands der Spule ist der Einfluss der Temperatur dabei so gering, dass er sich über eine Spanne von -20 °C bis $+60$ °C nur marginal in den Messwerten äußerte. Das in [7] für den HF-Wirbelstrom-Modus beschriebene Verfahren zur Temperaturkompensation ist im hier betrachteten NF-Fall in den meisten Anwendungsfällen entbehrlich.

Abb. 8 zeigt die sog. ECIP-Loops (ECIP = Eddy Current Incremental Permeability, Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität), eine Auftragung von Imaginär- gegen Realteil der Wirbelstromimpedanz, für die zuvor bereits erwähnten Bleche mit einer Härte von 35 bzw. 54 HRC. In jedem Diagramm sind die Kurven für verschiedene Lift-off-Werte abgebildet. Man erkennt deutlich, dass Werkstoffunterschied und Lift-off sich in verschiedenen Richtungen abbilden. Besonders auffällig ist ein deutlicher Unterschied der Werkstoffe im Bereich der magnetischen Sättigung (unteres Ende der ECIP-Loops). An den gestrichelt eingezeichneten Ortskurven der Maxima und Minima der 35-HRC-Probe ist bereits mit bloßem Auge eine Lift-off-unabhängige Werkstoffunterscheidung möglich. Rechnerisch kann dies z.B. durch eine Entzerrung der Impedanzebene anhand der Ortskurven unterstützt

werden, wodurch insbesondere die Imaginärteile des Minimums und Maximums der Kurven korrigierbar sein sollten.

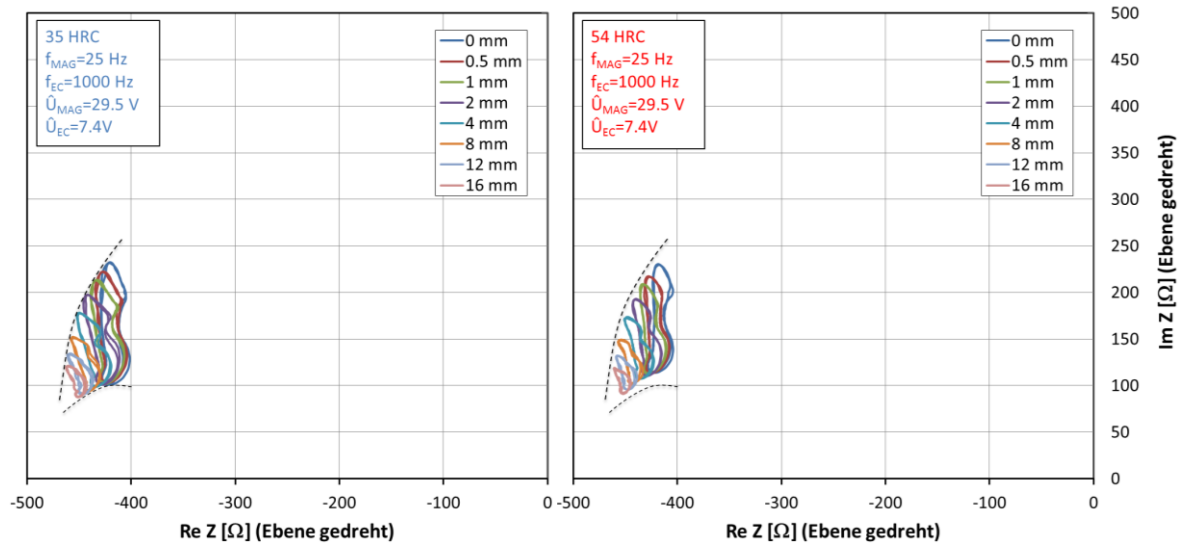


Abb. 8. ECIP-Loops zweier Bleche mit einer Härte von 35 HRC bzw. 54 HRC bei verschiedenen Liftoffs von 0-16 mm ($f_{\text{MAG}}=25$ Hz, $f_{\text{EC}}=1000$ Hz, $\dot{U}_{\text{MAG}}=29.5$ V, $\dot{U}_{\text{EC}}=7.4$ V)

In Abb. 9 sind die den ECIP-Loops entsprechenden Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätskurven abgebildet, d.h. Auftragungen der Veränderung des Imaginärteils der Impedanzen aus Abb. 8 über der zu jedem Zeitpunkt herrschenden magnetischen Tangentialfeldstärke H . Es ist davon auszugehen, dass die vollständige Kurvenform des liftoff-freien Falls nicht für beliebige Liftoff-Werte rekonstruierbar ist, da durch den Liftoff auch eine Änderung der Geometrie und des Zeitverlaufs der magnetischen Flussdichteverteilung im Werkstoff erfolgt, was der Liftoff-Korrektur physikalische Grenzen setzt. Zur Korrektur von Kenngrößen wie Maximum und Koerzitivfeldstärke (Feldstärke im Maximum) bietet sich hingegen die unter 2.2 diskutierte Vorgehensweise an. Dies soll im Zuge der weiteren Arbeiten überprüft und die bisherigen Erkenntnisse statistisch abgesichert werden.

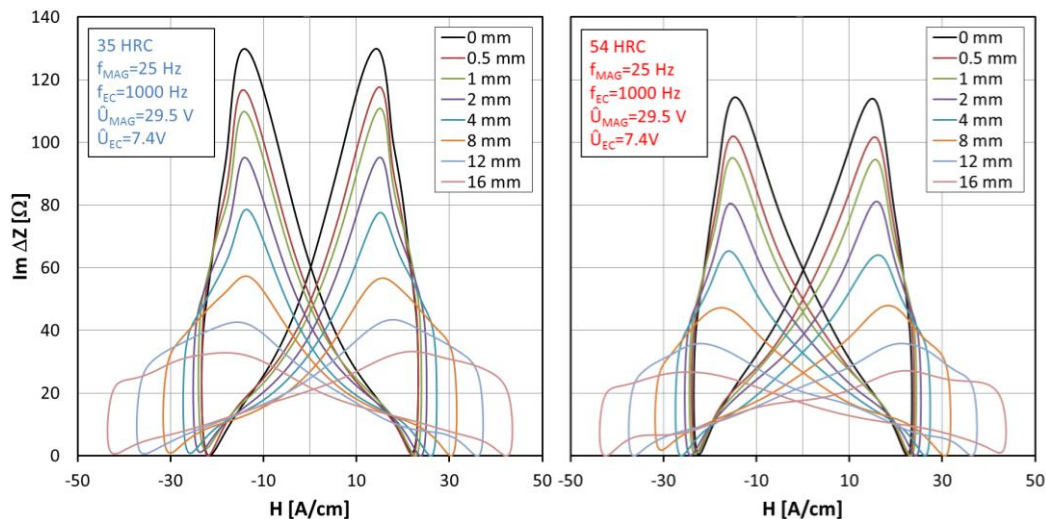


Abb. 9. Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätskurven zweier Bleche mit einer Härte von 35 HRC bzw. 54 HRC bei verschiedenen Liftoffs von 0-16 mm ($f_{\text{MAG}}=25$ Hz, $f_{\text{EC}}=1000$ Hz, $\dot{U}_{\text{MAG}}=29.5$ V, $\dot{U}_{\text{EC}}=7.4$ V)

3. Zusammenfassung und Ausblick

Im Hinblick auf einen High-Speed-Einsatz des 3MA-Verfahrens zur Werkstoffcharakterisierung in Walzstraßen wurden Gerätetechnik und Analyseverfahren weiterentwickelt. Es

wurde aufgezeigt, dass mit einem stark vereinfachten Prüfkopfkonzept, welches nur die Erregerwicklung und eine Hallsonde als Sensorelemente nutzt, drei von vier 3MA-Teilverfahren umsetzbar sind (Oberwellenanalyse, Wirbelstromimpedanz- und Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitäts-Analyse). Zudem wurde erläutert, dass diese Verfahren zeitgleich durchführbar sind, d.h. auf Basis derselben Messdaten aus jeweils nur einer einzigen Periode des magnetischen Wechselfeldes. Es wird hierdurch eine besonders hohe Messgeschwindigkeit erzielt.

Weitere Fortschritte wurden bezüglich der Kompensation von Einflüssen der Sensordistanz (Liftoff) bei der Blechprüfung erzielt. Es wurde aufgezeigt, wie Kenngrößen der Oberwellenanalyse liftoff-korrigiert werden können, so dass aus Abständen von bis zu mindestens 16 mm gleichbleibende Messwerte erhalten werden. Ansätze einer hierzu analoge Vorgehensweise wurden für die NF-Überlagerungspermeabilitätsanalyse aufgezeigt. Am Rande wurde festgestellt, dass die Messung mit konstanter Spannungsamplitude bei der Prüfung von Blechen signifikante Vorteile in der Prüfzeit und Messwertinterpretation gegenüber der bei 3MA bisher vorausgesetzten Nachregelung der Amplitude der Magnetfeldstärke besitzt. In weiteren Schritten sollen die Erkenntnisse statistisch abgesichert und die Verfahren in einem Werk erprobt werden.

Danksagung

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben *MAGNUS* wird im Rahmen des Fraunhofer-Carnot-Programms gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des Projektes.



Referenzen

- [1] Pitsch, H.: „Die Entwicklung und Erprobung der Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als neues Modul des 3MA-Ansatzes (Mikromagnetische Multiparameter- Mikrostruktur- und Spannungsanalyse)“. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken. 1990.
- [2] Stierstadt, K.: „Der magnetische Barkhausen-Effekt“, Springer Tracts in Modern Physics Vol. 40 (1966) 2-106.
- [3] Hayward, G.: „Introduction to Nondestructive Testing“. Milwaukee: American Society for Quality Control, 1978.
- [4] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): Elektromagnetisches Feld – Materialgrößen. DIN 1324 Teil 2. Berlin: Beuth, 1988.
- [5] Szielasko, K.; Kopp, M.; Tschuncky, R.; Herrmann, H.-G.: „Zerstörungsfreie Bestimmung von Werkstoffigenschaften mit mikromagnetischen Multiparameter-Prüfverfahren“. Werkstoffe in der Fertigung Nr. 1 (2014) 45-47.
- [6] Szielasko, K.; Mironenko, I.; Altpeter, I.; Herrmann, H.-G.; Boller, C.: „Minimalistic Devices and Sensors for Micromagnetic Materials Characterization“. IEEE Trans. Magn. Vol. 49, No. 1 (2013) 101-104.
- [7] Szielasko, K.; Youssef, S.; Niese, F.; Weikert, M.; Tschuncky, R.; Wolter, B.: „Verfahrensfusion zur Charakterisierung hochfester Stähle unter Einsatz elektromagnetischer Multifunktions-Prüfköpfe“. DGZfP-Jahrestagung 2013, Di.3.C.3, Berichtsband der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), 2013.