

Verfahrensfusion zur Charakterisierung hochfester Stähle unter Einsatz elektromagnetischer Multifunktions- Prüfköpfe

Klaus SZIELASKO, Sargon YOUSSEF, Frank NIESE, Miriam WEIKERT,
Ralf TSCHUNCKY, Bernd WOLTER

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)
Campus E3.1, 66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Der Einsatz hochfester Stähle im Automobil erlaubt eine erhebliche Gewichtsersparnis und somit letztendlich eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes. Die vorteilhaften Eigenschaften dieser sog. Advanced High Strength Steels (AHSS) sind jedoch nur unter Einhaltung sehr schmaler Prozessfenster bei der Wärmebehandlung und mechanischen Verarbeitung zu erzielen. Hieraus ergeben sich auch erhöhte Anforderungen an die prozessbegleitende und prozessintegrierte zerstörungsfreie Prüfung. Mikromagnetische Verfahren werden bereits in der Bandstahlproduktion eingesetzt, um Näherungswerte der mechanisch-technologischen Kenngrößen indirekt on-line zu bestimmen. Durch steigende Bandgeschwindigkeiten und die komplexeren Werkstoffe werden jedoch inzwischen höhere Anforderungen an die prozessintegrierte zFP gestellt, z.B. um ein definiertes Werkstoffverhalten beim Tiefziehen und Schweißen sicherzustellen. Im Rahmen eines laufenden Forschungsvorhabens werden die theoretischen Grundlagen erarbeitet und messtechnische Lösungen entwickelt, um die Verteilung von Zugfestigkeit, Streckgrenze, Korngröße, Textur und Sekundärphasengehalt zerstörungsfrei und im Prozess bestimmen zu können. Es wurde ein Multifunktionsprüfkopf entwickelt, dessen Komponenten sowohl die mikromagnetische Werkstoffcharakterisierung als auch die elektromagnetische Ultraschallwandlung gestatten. Verfahren und Prüftechnik sind für hohe Bandgeschwindigkeiten und schwierige Umgebungsbedingungen ausgelegt. Zur Verfahrensfusion wurde ein modulares Prüfgerätekonzept erstellt, welches den Betrieb mehrerer derartiger Prüfköpfe gestattet, so dass die Werkstoffeigenschaften an unterschiedlichen Positionen über die gesamte Breite des Bandes hinweg bestimmt werden können. Darüber hinaus wurde eine Lösung zur berührungslosen Durchführung der Messung erarbeitet.

Einführung

Durch den Einsatz hochfester Stähle (Advanced High Strength Steels, AHSS) im Automobil werden die Produktionsprozesse vereinfacht, die Stabilität und Crashesicherheit erhöht und gleichzeitig der CO₂-Ausstoß vermindert. Die Worldsteel Association schätzt, dass durch eine vollständige Umstellung der Karosseriekomponenten aller Fahrzeuge weltweit auf AHSS eine Einsparung von 156 Mio. t CO₂ erzielt werden kann [1]. Darüber hinaus



wurde durch die Verwendung moderner Stähle beispielsweise das Gewicht der Stahltürme von Windenergieanlagen innerhalb der vergangenen 10 Jahre um 50% reduziert.

Die vorteilhaften Eigenschaften der AHSS setzen jedoch schmale Prozessfenster voraus und stellen erhöhte Anforderungen an die Prozessüberwachung und Qualitätssicherung. Ähnliches gilt auch für andere fortschrittliche Stahlgüten, die sich durch komplexe Mikrostrukturen auszeichnen und hohe Anforderungen an die Wärmebehandlung und mechanische Bearbeitung stellen. Beispiele hierfür sind thermomechanisch bearbeitetes Grobblech oder mikrolegierte einsatzgehärtete Stähle für Getriebekomponenten.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich für die zFP besondere Herausforderungen. Neben der Ermittlung von Zugfestigkeit, Streckgrenze und Härte sind weitere wichtige Kenngrößen in der Textur, dem Sekundärphasengehalt und der Korngröße zu sehen. Insbesondere im Falle der Bandstahlproduktion ist eine frühzeitige Erkennung von Abweichungen wünschenswert, da diese zu erheblichen Ausfallzeiten bei der Weiterverarbeitung führen können. Daher sollte das einzusetzende Prüfverfahren möglichst in automatisierter Weise in den Herstellungsprozess der Bandstahlindustrie integrierbar sein und eine hohe Messgeschwindigkeit erreichen, um eine hohe Flächenabdeckung zu erzielen. Im Sinne der Prozessbeherrschung ist es darüber hinaus wünschenswert, die Qualitätsmerkmale an verschiedenen Positionen über die Bandbreite hinweg sowie nach unterschiedlichen Bearbeitungsschritten durchführen zu können. Insofern sollte die Prüftechnik die synchronisierte Nutzung mehrerer Prüfkopfeinheiten auf kostengünstige Weise unterstützen.

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

Im Umfeld der Bandstahlproduktion ist die Bestimmung mechanisch-technologischer Kenngrößen mittels prozessintegrierter mikromagnetischer Prüfverfahren verbreitet. Neben dem am IZFP entwickelten Verfahren der Mikromagnetischen Multiparameter-Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) [2] sind die Verfahren EMG IMPOC [3] und HACOM [4] bekannt. Allen genannten Verfahren gemeinsam ist die Ausnutzung von Korrelationen zwischen den ermittelten magnetischen Prüfgrößen und mechanisch-technologischen Kenngrößen des Werkstoffs. Diese Korrelation ist auf die Wechselwirkung der Mikrostruktur mit Blochwänden und Versetzungen über jeweils ähnliche Mechanismen zurückzuführen [5]. Beim 3MA-Verfahren werden Oberwellenanalyse der magnetischen Tangentialfeldstärke, magnetische Barkhausenrausch-, Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse miteinander kombiniert, um Störeinflüsse beherrschen zu können und ein möglichst vollständiges Bild der magnetischen Werkstoffeigenschaften zu erhalten.

Darüber hinaus ist aus früheren Arbeiten bekannt, dass unter Einsatz von Ultraschallverfahren Prüfgrößen bestimmt werden können, welche mit den für das Tiefziehverhalten charakteristischen Eigenschaften der mittleren senkrechten Anisotropie r_m sowie der ebenen Anisotropie Δr korreliert sind [6, 7, 8]. Vorwiegend wurden horizontal polarisierte Scherwellen (SH-Wellen) angeregt, wobei für Erzeugung und Empfang elektromagnetische Ultraschallwandler (EMUS-Wandler) eingesetzt wurden, die kein Koppelmedium benötigen. Darüber hinaus wurden in diesen Arbeiten bereits die sensorseitigen Synergien zwischen EMUS und 3MA aufgezeigt und demonstriert, dass eine Erweiterung des Multiparameteransatzes von 3MA durch die Prüfgrößen des Ultraschallverfahrens die Genauigkeit der Zielgrößenbestimmung signifikant verbessert.

Von dieser Erkenntnis getrieben, erfolgt derzeit die Entwicklung der zur praktischen Umsetzung nötigen Geräte- und Sensortechnik, begleitet von einer Weiterentwicklung der Prüfverfahren im Hinblick auf eine effiziente Verfahrensfusion.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Aufbau eines Steuergerätes für EMUS/3MA-Kombisysteme

Mit dem Ziel, die Vielseitigkeit der im Labor verbreiteten Multifunktions-Datenerfassungskarten mit einer Echtzeit-Signalverarbeitung und einer sehr hohen Abtastrate zu verbinden, wurde die Geräteplattform MODIMAG (MODulare Digitale MAGnetik) konzipiert und ein Demonstrator aufgebaut (Abbildung 1). Die Entwicklung beruht auf einem FPGA-basierten System-on-Chip (SoC), welches einen 8-Kanal-A/D-Wandler mit 40 MSamples/s und einer Auflösung von 14 Bit ansteuert und darüber hinaus über mehrere Vielzweck-Modulsteckplätze (AMS, Arbitrary Module Slots) besitzt. Die AMS können u.a. mit Eingangsverstärkern oder D/A-Wandlern bestückt werden. Zur Ansteuerung von Ultraschall-Sendekarten und zur Synchronisation mit weiteren MODIMAG-Karten oder externen Signalquellen sind spezielle Schnittstellen vorgesehen. Das im Kontext dieser Veröffentlichung genutzte MODIMAG-Prototypengerät besaß neben den 8 Eingängen einen 16-Bit-D/A-Wandler mit 2 MSamples/s zur Steuerung der Magnetisierungsendstufe sowie einen 14-Bit-D/A-Wandler mit 40 MSamples/s zur Erzeugung von Arbiträrsignalen für die Wirbelstromprüfung.

Aufgrund der Kanalanzahl und der enthaltenen Komponenten ist MODIMAG eine vorteilhafte Geräteplattform für den Aufbau von kombinierten 3MA-/Ultraschallprüfsystemen, insbesondere wenn die Ultraschallwandlung unter Einsatz der EMUS-Technik erfolgt oder mehr als ein Prüfkopf anzusteuern ist.

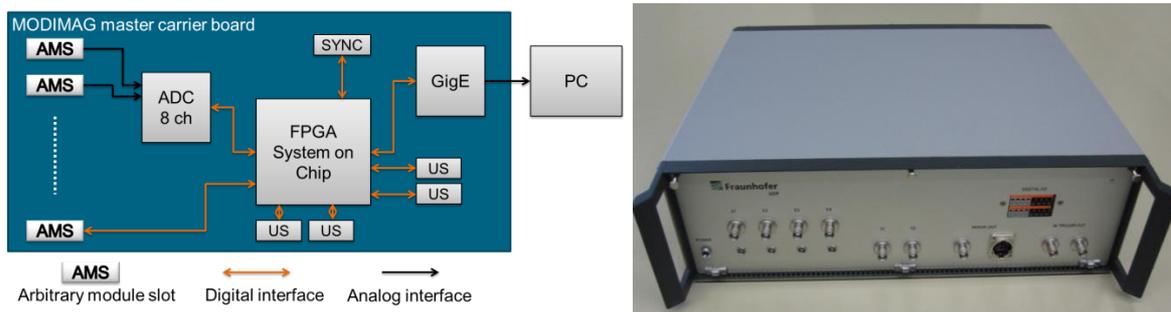


Abbildung 1. MODIMAG-Trägerboard (links, schematisch);
MODIMAG-basiertes Labormuster eines Prüfsystems (rechts)

2.2 Aufbau und Test eines 3MA-/EMUS-Kombisensors auf Basis gedruckter Spulen

Der prinzipielle Aufbau eines elektromagnetischen Ultraschallwandlers und eines 3MA-Sensors ist sehr ähnlich, da beide Techniken auf elektromagnetischen Wechselwirkungen beruhen. Die Hauptbestandteile sind jeweils ein Elektromagnet als Magnetisierungseinrichtung, die im Untersuchungsobjekt ein statisches oder quasistatisches, parallel zur Oberfläche orientiertes Magnetfeld induziert, und ein Hochfrequenz- (HF-) Spulensystem.

Das HF-Spulensystem ist als gedruckte Platine (Printspule) realisiert, um für den späteren kommerziellen Einsatz eine kostengünstige und reproduzierbare Fertigung gewährleisten zu können (Abbildung 2). Es beinhaltet eine Sende- bzw. Empfangsspule für die elektromagnetische Ultraschallwandlung und eine separate Spule für die Wirbelstrom- und Überlagerungspermeabilitätsmessung als Teil des 3MA-Verfahrens. Darüber hinaus ist eine Aussparung zur Befestigung einer Hallsonde vorgesehen, welche zur Messung der magnetischen Tangentialfeldstärke im 3MA-Verfahren erforderlich ist.

Um den Verschleiß an der Sensorik zu minimieren, das Blech vor Beschädigungen zu schützen und damit die Zuverlässigkeit des gesamten Messsystems zu erhöhen, sind in der Prüfkopfsohle Luftauslässe vorgesehen, die, wenn sie mit Druckluft gespeist werden,

den Prüfkopf auf einem Luftkissen schweben lassen. Ein direkter Kontakt zwischen Sensorik und Untersuchungsobjekt wird somit verhindert, obwohl der Elektromagnet eine starke anziehende Kraft erzeugt.

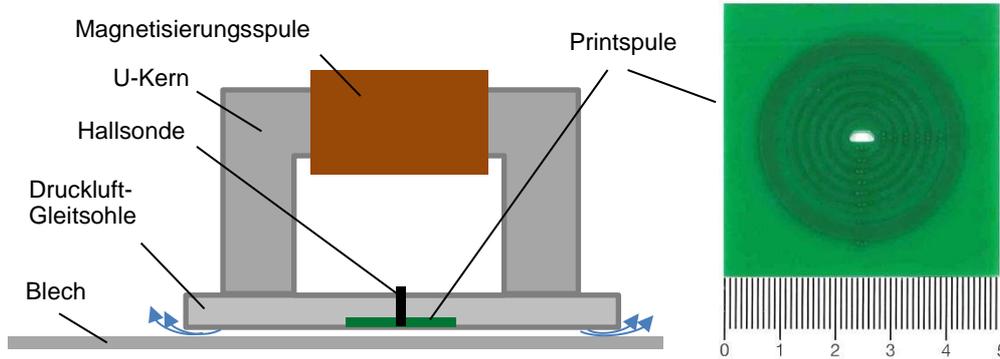


Abbildung 2. Prüfkopf (schematisch), Printspleule im Format 5x5 cm² (innere Ringe: EMUS-Wandler, äußerer breiter Ring: Wirbelstrom-Prüfspleule; innen eine Aussparung für die Hallsonde)

Durch die spezielle Ausgestaltung der HF-Spulen ist man in der Lage, im Stahlblech geführte Ultraschallwellen anregen und abgreifen zu können. Je nach Orientierung des Magnetfeldes zur Senderspleule kann wahlweise mit unterschiedlichen Moden geführter SH- oder Lambwellen gearbeitet werden (siehe Abbildung 3).

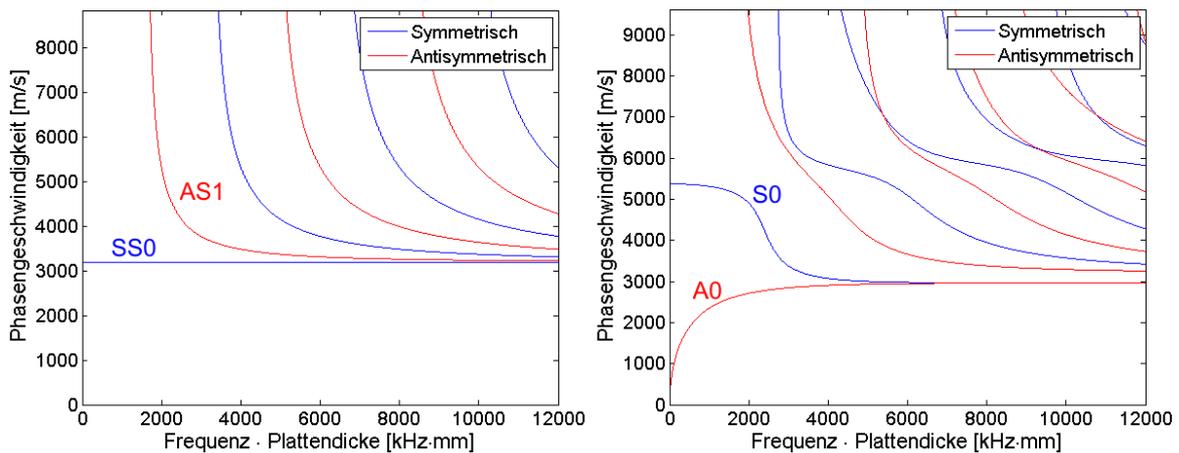


Abbildung 3. Dispersionsdiagramm der SH-Welle (links) und der Lambwelle (rechts)

Senkrecht zum Magnetfeld mit Feldstärke B werden bevorzugt geführte SH-Wellen und parallel dazu Lambwellen angeregt (siehe Abbildung 4).

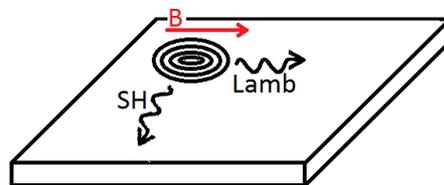


Abbildung 4. Schema der Wellenausbreitung

Mit A-Priori-Information über die Blechdicke können die Modenfrequenzen berechnet werden und für die Untersuchungen eingestellt werden (siehe Tabelle 1). In Abbildung 5 sind exemplarisch die Ultraschall-Transmissionssignale für die niedrigsten Plattenwellenmoden dargestellt, die im Versuchsaufbau gemäß Abbildung 6 erhalten wurden.

Tabelle 1. Berechnete Frequenzen für Plattenwellenmoden in Stahlblech bei einer Spurwellenlänge von 4 mm

Blechdicke	geführte SH-Welle		Lambwelle	
	SS0	AS1	A0	S0
1.0 mm	800 kHz	1790 kHz	460 kHz	1320 kHz
1.5 mm	800 kHz	1330 kHz	560 kHz	1260 kHz

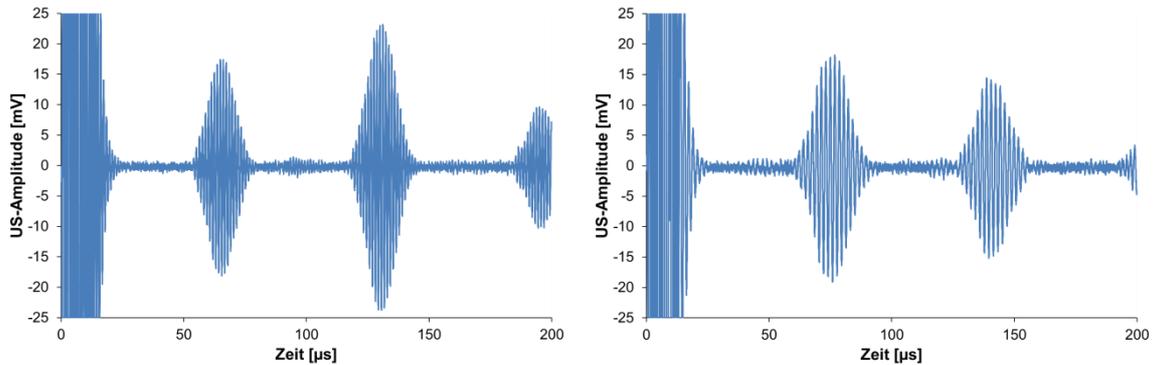


Abbildung 5. Ultraschall-A-Bilder der Transmissionssignale bei 200 mm Sender-Empfängerabstand für geführte SH-Welle SS0 (links) und Lambwelle A0 (rechts) an einem Stahlblech der Dicke 1.5 mm

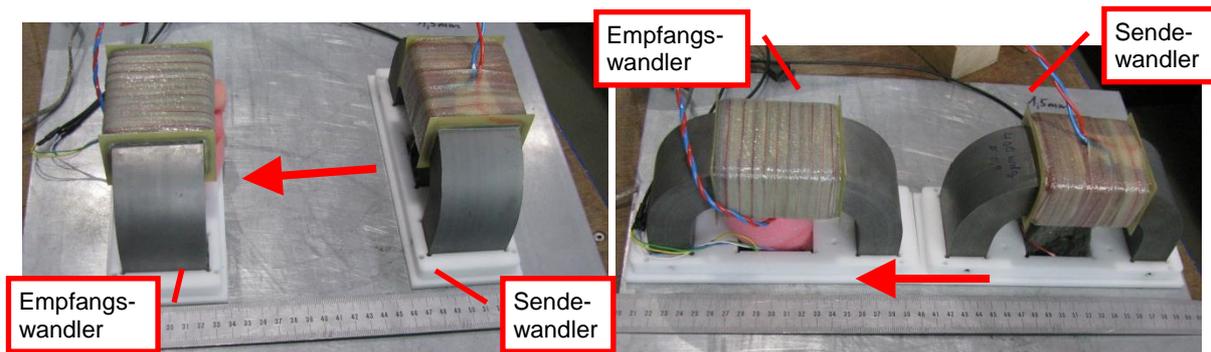


Abbildung 6. Experimenteller Aufbau für Ultraschalluntersuchungen in Transmissionstechnik für geführte SH-Wellen (links) und Lambwellen (rechts)

2.3 Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse

Im Hinblick auf die Fusion von Ultraschall- und 3MA-Verfahren waren technisch beherrschbare und kostengünstig umsetzbare Lösungen gefragt, die mit der in Abbildung 2 dargestellten Prüfkopfkonstruktion vereinbar sind. In früheren Arbeiten [7, 8] wurde bereits betont, dass EMUS-Wandler auch als induktive Aufnehmer für das magnetische Barkhausenrauschen eingesetzt werden können. Insofern war hierin keine neue Herausforderung zu sehen. Die Oberwellenanalyse im Zeitsignal der magnetischen Tangentialfeldstärke als weiteres 3MA-Teilverfahren erfordert lediglich die unter 2.2 erwähnte Hallsonde. Zur Nutzung als vollwertiger 3MA-Prüfkopf war nunmehr eine möglichst unkomplizierte Lösung zur Integration der Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse erforderlich.

Da die Blechprüfung in Aufsatztechnik erfolgt, d.h. der Sensor den Werkstoff nicht umschließt und somit der magnetische Fluss, der den Werkstoff durchsetzt, nicht messbar ist, kann eine Messung der Überlagerungspermeabilität μ_{Δ} in diesem Kontext nicht exakt so erfolgen, wie es in der DIN 1324 Teil 2 [9] beschrieben ist. Im gegenwärtigen 3MA-Prüfsystem wird anstelle der Auswertung kleiner rückläufiger Hystereseschleifen die Veränderung der Wirbelstromimpedanz während der niederfrequenten Ummagnetisierung des

Werkstoffs gemessen. Aufgrund des im Falle der üblichen Stähle vernachlässigbar kleinen magnetoresistiven Effekts ist es zulässig, die elektrische Leitfähigkeit während der Umagnetisierung als konstant anzusehen und die auftretende Impedanzänderung ausschließlich auf Permeabilitätseinflüsse zurückzuführen. Insofern bietet die im 3MA-Prüfsystem realisierte Kombination aus Wirbelstromimpedanzanalyse und niederfrequenter Magnetisierung eine Möglichkeit zur qualitativen Überlagerungspermeabilitätsanalyse.

Die Umrechnung der Prüfgrößen aus Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse in physikalisch einfach interpretierbare, in den korrekten SI-Einheiten wiedergegebene Größen wie z.B. Spulenimpedanz und (daraus errechnete) Werkstoffpermeabilität war bisher nicht möglich. Für den Einsatz von 3MA in der Praxis mag dies unmittelbar irrelevant sein, aber die Weiterentwicklung des Verfahrens bezüglich Reduzierung des Kalibrieraufwandes durch Werkstoffdatenbanken, die werkstoffphysikalische Interpretation und der Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen werden erheblich erschwert.

Das Hindernis liegt dabei in den Details der Prüftechnik, die zwar sehr empfindlich aber auch komplex ist: Von der Transferimpedanz eines Sende-/Empfangsspulenpaares im werkstoffnahen Sensorelement wird die Transferimpedanz eines Referenz-Sende-/Empfangsspulenpaares, das an einer werkstoffabgewandten Stelle im Prüfkopf positioniert ist, bereits schaltungsseitig subtrahiert. Dies bewirkt eine weitreichende Temperaturkompensation der Messwerte, da sich beide Spulenordnungen im Prüfkopf befinden und ähnliche Temperaturen besitzen. Darüber hinaus ist durch eine bereits analogseitige Bestimmung der Impedanzdifferenz eine hohe Verstärkung des Differenzsignals möglich und insofern eine hohe Messempfindlichkeit erzielbar.

Da gemäß der obigen Beschreibung bisher vier Spulen erforderlich sind, ist die Reproduzierbarkeit der Sensoreigenschaften im Falle von Ersatz, Reparatur oder Serienfertigung eine große Herausforderung. Der Abstand von Sende- und Empfangsspule sowie deren Positionierung im Sensor nehmen Einfluss auf die Messwerte. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die hohe Messempfindlichkeit des Verfahrens in der Regel nicht erforderlich ist, da die Handhabungseinflüsse weitaus größer als das elektrische Rauschen der Messwerte sind.

Mit der Weiterentwicklung dieses kombinierten Verfahrens der Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse soll die Basis dafür geschaffen werden, die Sensoreigenschaften zukünftig einfacher reproduzieren zu können und physikalisch interpretierbare Messwerte in absoluten SI-Einheiten zu erhalten. In fernerer Zukunft sollen, hierauf basierend, vereinfachte Kalibrierverfahren unter Einbindung von Werkstoffdatenbanken entwickelt werden.

In diesem Sinne wurde zunächst der Beweis angetreten, dass dieses Messverfahren unter Nutzung heutiger Signalverarbeitungsmöglichkeiten mit einer einzelnen Spule (anstelle von vier) realisierbar ist und eine hinreichende Messgenauigkeit erzielt. Nach grundlegenden Untersuchungen mit gewickelten Spulen wurde die Spule als mehrlagige, gedruckte Leiterschleife in die Sensorplatte integriert.

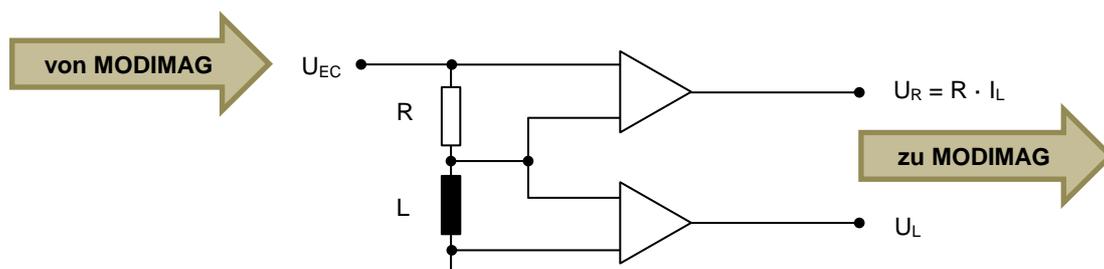


Abbildung 7. Vereinfachtes Prinzipschaltbild zur Absolutimpedanzmessung
(R = Messwiderstand, L = Wirbelstromprüfspule; die Dreiecke stellen Differenzverstärker dar)

Unter Verwendung einer Schaltung ähnlich Abbildung 7 und der unter Abschnitt 2.1 beschriebenen MODIMAG-Elektronik wurde hierzu im Rahmen einer Master-Arbeit [10] gezeigt, dass nach Digitalisierung und numerischer Demodulation der Spulenspannung U_L und des Spulenstroms I_L (gemessen als Spannung U_R am präzisen Messwiderstand R) die absolute Impedanz der Messspule mit einem Rauschen im $m\Omega$ -Bereich bestimmbar ist. Darüber hinaus wurde die Erwartung bestätigt, dass sich die Spulentemperatur (zumindest im untersuchten Intervall von $25\text{ }^\circ\text{C}$ bis $121\text{ }^\circ\text{C}$) nahezu ausschließlich im Realteil der Impedanz äußert (Abbildung 8 links). Da die MODIMAG-Elektronik die Spannung U_{EC} als Arbiträrsignal erzeugen kann, wurde zur Temperaturkompensation softwareseitig ein ständiger Wechsel zwischen der Einspeisung einer HF-Wechselspannung und einer Gleichspannung implementiert. Hierdurch wurde die Messung des Gleichstromwiderstands R_L der Spule im Multiplex mit der Wirbelstrommessung möglich. Es konnte gezeigt werden, dass der Temperatureinfluss auf den Realteil $Re Z$ sich nahezu vollständig eliminieren lässt, indem man die Differenz zwischen R_L und dem nominellen Spulenwiderstand $R_{L,0}$ subtrahiert. Der Wert $R_{L,0}$ kann beispielsweise in einer Klimakammer bei definierter Temperatur (z.B. $20\text{ }^\circ\text{C}$) mit einem genauen Widerstandsmessgerät bestimmt werden. Für die temperaturkompensierte Spulenimpedanz Z' gilt folgender Zusammenhang:

$$Z' = Re Z - (R_L - R_{L,0}) + j Im Z \quad (\text{Gl. 1})$$

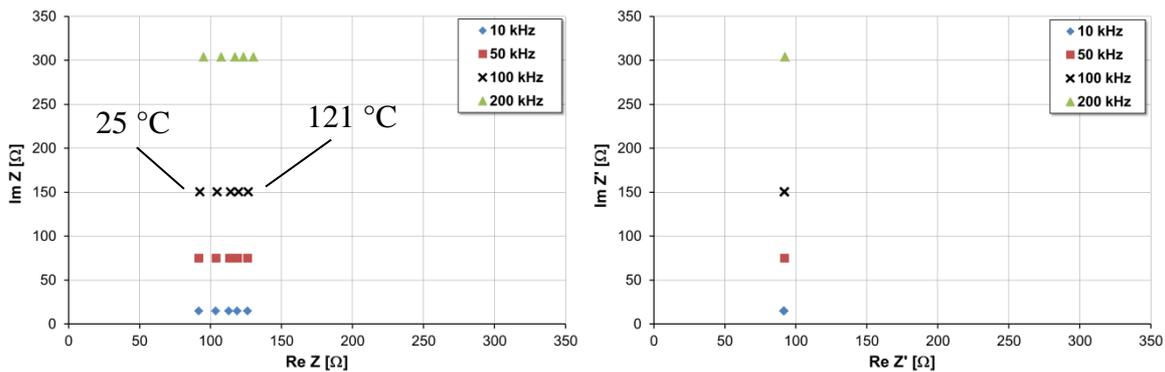


Abbildung 8. Temperatureinfluss in den Messwerten der Spulenimpedanz in Luft bei Frequenzen von 10, 50, 100 und 200 kHz (links); Darstellung der Messwerte Z' nach Temperaturkompensation (rechts)

Wie in obiger Abbildung 8 rechts dargestellt, ist die Größe Z' im betrachteten großen Temperaturbereich hinreichend temperaturstabil. In Abbildung 9 links sind Messwerte an verschiedenen Werkstoffen bei einer Prüffrequenz von $f_{EC} = 100\text{ kHz}$ dargestellt, um die Größenordnung der Effekte aufzuzeigen.

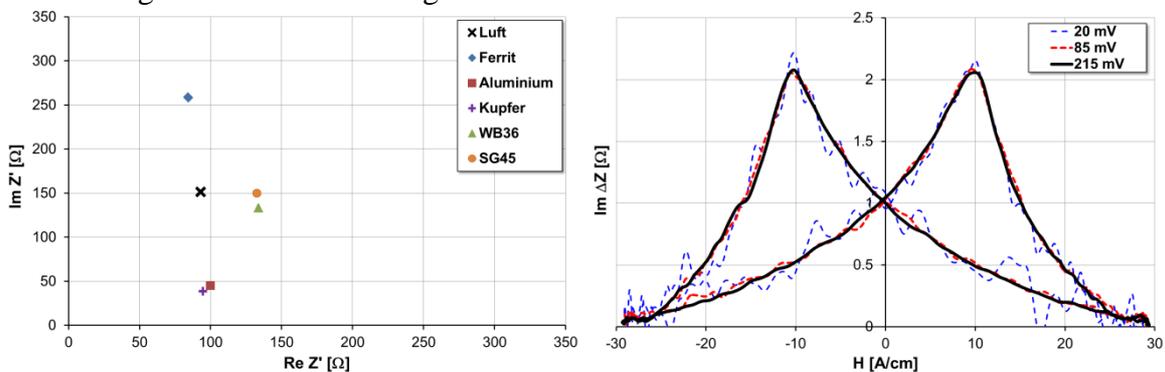


Abbildung 9. Typische Wirbelstromimpedanz-Messwerte für verschiedene Werkstoffe bei $f_{EC} = 100\text{ kHz}$ (links); Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilitätskurven auf einem typischen Feinblech bei jeweils drei Amplituden (20 mV, 85 mV, 215 mV) der Wirbelstrom-Prüfspannung U_{EC} ($f_{mag} = 100\text{ Hz}$, $f_{EC} = 100\text{ kHz}$)

Abschließend wurden Messungen der Wirbelstrom-Überlagerungspermeabilität im gegebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Hierzu wurde der Imaginärteil der Impedanzänderung ($Im \Delta Z$) über eine Periode des niederfrequenten Feldes hinweg als Funktion der gemessenen Magnetfeldstärke aufgetragen. Die Messung erfolgte bei einer Magnetisierungsfrequenz von $f_{mag} = 100 \text{ Hz}$ und einer Wirbelstromprüffrequenz von $f_{EC} = 100 \text{ kHz}$. Wie in Abbildung 9 rechts unter absichtlich sehr geringer Kurvenglättung dargestellt, sind die Merkmale des Kurvenverlaufs unabhängig von der Amplitude der Prüfspannung \hat{U}_{EC} . Der sehr kleine Prüfstrom führt nur zu reversiblen Magnetisierungsprozessen im Werkstoff.

3. Zusammenfassung

Mit dem Ziel des späteren Einsatzes bei der Produktionsüberwachung hochfester Stahlbleche wurde ein Prüfkopf entwickelt und erprobt, welcher unter multivalenter Nutzung seiner sensorischen Komponenten die Durchführung mikromagnetischer (3MA-) Messungen und Ultraschallmessungen gestattet. Die Ultraschallwandlung erfolgte unter Einsatz der EMUS-Methode. Der Einsatz einer gedruckten Spulenplatine als EMUS-Wandler sowie alleinige Messspule für Barkhausenrausch-, Wirbelstromimpedanz- und Überlagerungspermeabilitätsanalyse im Absolutimpedanzverfahren ist ein wesentliches Merkmal der Sensor- und Verfahrensfusion. Messungen zur Absicherung der Leistungsmerkmale wurden unter Einsatz der neuen Geräteplattform MODIMAG durchgeführt.

Referenzen

- [1] Coleman, N.; Breadbent, C.; Coates, G.: *Using Steel to Reduce Greenhouse Gas Emissions*. Worldsteel Association, URL: <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-poster/document/LCA%20poster.pdf>, Stand April 2013.
- [2] Wolter, B.; Dobmann, G.; Kern, R.: „Kontinuierliche Inline-Prüfung von Qualitätsmerkmalen in Feinblech“; Tagungsband Werkstoffprüfung 2005. DVM Report 641, 2005, 137-146.
- [3] EMG Automation GmbH: IMPOC Pro-Werbebrochure, URL: www.emg-automation.com; Datei: Im-pocPro_Prospekt_EN_01.pdf, Stand Juni 2011.
- [4] Reimche, W.; Heutling, B.; Bach, F. W.; Groß, J.; Schulz, S.: „Online-Materialcharakterisierung und Überwachung relevanter Bandeigenschaften von feuerverzinktem Stahlfeinblech im Produktionsfluss mit einem Harmonischen-Messsystem“, DACH-Tagung der DGZfP 2004.
- [5] Altpeter, I.: *Spannungsmessung und Zementitgehaltsbestimmung in Eisenwerkstoffen mittels dynamischer magnetischer und magnetoelastischer Messgrößen*. Dissertation. Univ. d. Saarl., Saarbr. 1990.
- [6] Doege; Behrens: *Handbuch Umformtechnik*. Springer-Verlag, 2010.
- [7] Borsutzki, M.; Dobmann, G.; Theiner, W.A.: „Online ND-characterization and mechanical property determination of cold rolled steel strips. Advanced Sensors for Metals Processing“, Proceedings of the International Symposium, 38th Annual Conference of Metallurgists of CIM, 1999.
- [8] Altpeter, I.; Dobmann, G.; Meyendorf, N.; Schneider, E.: „Erfassung von Eigenspannungen und Textur in Walzprodukten mit zerstörungsfreien Prüfverfahren“. VDI Berichte Nr. 1142, 1994.
- [9] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *Elektromagnetisches Feld – Materialgrößen*. DIN 1324 Teil 2. Berlin: Beuth, 1988.
- [10] Youssef, S.: *Entwicklung und Erprobung einer Vorrichtung zur Wirbelstrom-Absolutimpedanzmessung für die mikromagnetische Werkstoffcharakterisierung*. Masterarbeit, HTW des Saarlandes, Saarbrücken, 2012.

Danksagung

Das zugrundeliegende Vorhaben wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.