

Entwicklung von Sensortechnik zur Erfassung diskreter Bauteil- und Belastungsinformationen in der Bauteilrandzone

Grzegorz MROZ, Melanie DIEBEL, Wilfried REIMCHE, Friedrich-Wilhelm BACH
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

Kurzfassung. Im Laufe eines Produktlebenszyklus von Bauteilen kommt es infolge unzureichender Produktinformationen zu Zuordnungsproblemen. Zudem führt unvorhergesehenes Bauteilversagen trotz regelmäßiger Produktwartung zu Einsatzausfällen und teilweise zur Gefährdung von Personen und Umwelt.

Diese Risiken lassen sich mit herkömmlichen Überwachungstechniken nur unter hohem Zeit- und Kostenaufwand begrenzen. Hier können moderne Verfahren zur inhärenten Markierung, zum Speichern und schnellen zerstörungsfreien Auslesen der Belastungshistorie von Bauteilen eine Perspektive zur Identifikation und Bewertung des Bauteilzustandes und damit zur Risikoabschätzung sowie zur Reduzierung von Ausfallkosten bieten.

Eine inhärente Bauteilmarkierung wird über eine lokale Änderung der Gefügeeigenschaften, durch eine lokale Wärmebehandlung bzw. Umschmelzlegieren der Bauteilrandzone sowie durch Dispergieren von Partikeln in der Bauteilrandzone realisiert. Dadurch können in der Bauteilrandzone Informationen über das Bauteil inhärent in codierter Form gespeichert werden.

Zur Erfassung und Speicherung der Belastungshistorie von Bauteilen unter statischer und dynamischer Beanspruchung sind so genannte Sensorwerkstoffe mit belastungsabhängiger Gefügeumwandlung, wie metastabile austenitische Manganstähle und Chrom-Nickel-Stähle, die unter Belastung spannungs- oder verformungsinduziert martensitisches Gefüge ausbilden, geeignet.

Vorgestellt wird hinsichtlich der Bauteilidentifizierung die Entwicklung einer hochauflösenden Sensortechnik basierend auf der Wirbelstromtechnik und der Harmonischen-Analyse zum Nachweis und zur Charakterisierung von lokal eingebrachten Gefügeveränderungen in der Bauteilrandzone.

Zur Erfassung und Bewertung der vom Bauteil unter Biegung, Torsion und mehrachsiger Belastung in Abhängigkeit der Beanspruchung und Lastwechselzahl ertragenen Belastungshistorie wurde eine Sensortechnik entwickelt mit der integral ein Bauteilbereich und lokal über einen Oberflächenscan der Bauteilzustand hinsichtlich der ertragenen Beanspruchung verfolgt und in Abhängigkeit der Sensorwerkstoffeigenschaften bewertet werden kann.

1. Einführung

Die mechanischen, wie auch die ferromagnetischen und elektrischen Eigenschaften der metastabilen austenitischen Stähle werden, aufgrund hoher Spannungszustände mit plastischer Verformung, durch die Phasenumwandlung von Austenit in Martensit stark verändert. Dieses Verhalten des Werkstoffs ist auf die Stabilität des Austenits in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung zurückzuführen. Durch die Entstehung und

Einlagerung von hartem und sprödem Martensit in den weichen und duktilen Austenit werden die mechanischen Eigenschaften stark eingeschränkt. D. h. die Zähigkeit und Duktilität nimmt ab, bei einem Anstieg der Festigkeit. Der aufgrund der dynamischen und statischen Belastungen mit plastischer Verformung steigende Martensitgehalt wirkt sich auf die magnetischen und elektrischen Eigenschaften aus und kann zur elektromagnetischen Bestimmung der Bauteilermüdung bzw. zum Auslesen von Informationen über erfahrene Bauteilbelastungen genutzt werden. Hoch belastete Bauteile des Maschinenbaus wie Zahnräder, Kurbelwellen, Antriebswellen oder Rohrleitungssysteme können im Einsatz zeitweise unplanmäßigen Betriebszuständen mit erhöhten statischen und dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sein (Bild 1). Diese ungeplanten hohen Bauteilbelastungen führen dann frühzeitig zu einer Werkstoffermüdung und Rissinitiierung bis hin zum Bauteilversagen [9, 10]. Die Belastungshistorie ist daher maßgebend hinsichtlich der zu erwartenden Lebensdauer des Bauteils.

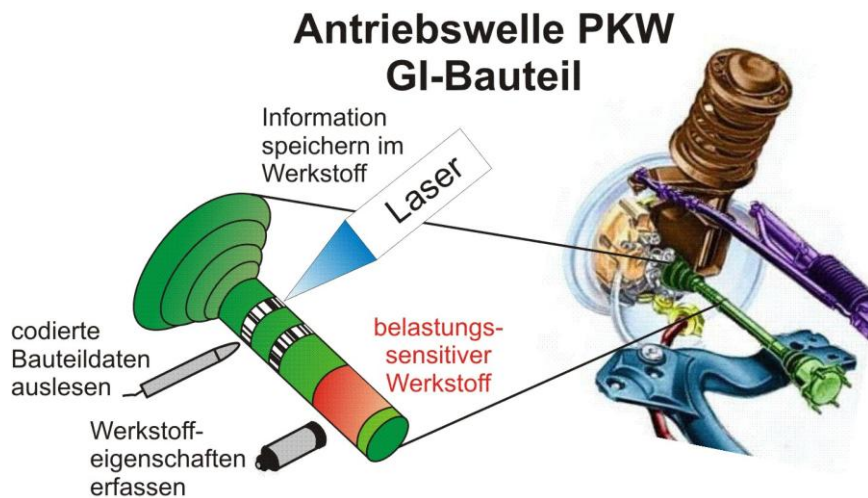


Bild 1. Charakterisierung signifikanter Werkstoffeigenschaften in der Bauteilrandzone

Hinsichtlich dieser Problematik werden im Sonderforschungsbereich 653 an der Leibniz Universität Hannover Sensorwerkstoffe und Konstruktionswerkstoffe kombiniert, um die Belastungshistorie des Bauteils zu erfassen und im Sensorwerkstoff zu speichern. Andererseits sollen auch geeignete Verfahren zur Generierung bauteilinhärenter Informationen in realen Bauteilen entwickelt und Sensoren zu ihrer Erfassung realisiert werden.

2. Inhärente Bauteilmarkierung

2.1 Dispergieren von Hartstoffpartikeln in der Bauteilrandzone

Auf dem Gebiet des Dispergierens von Partikeln in Bauteilrandzonen wurden am Laser-Zentrum Hannover (LZH) in Zusammenarbeit mit dem IW erfolgreich Versuche mit Hartstoffpartikeln durchgeführt (Bild 2). Die Partikel mit Nenndurchmessern von 70 ... 140 µm wurden in Pulverform auf das Substrat aufgebracht und unter Aufschmelzen der Substrat-Randzone mittels Laser in die Bauteilrandzonen dispergiert. Als Substratwerkstoffe kamen Stahl, Titan sowie thermoplastische Kunststoffe zur Anwendung [5].

**Dispergieren von Hartstoffpartikeln
in der Bauteilrandzone:**
Hochgeschwindigkeits-
Durchstrahlungsprüfung

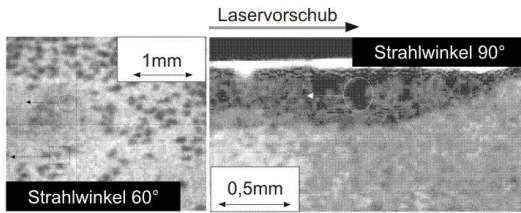
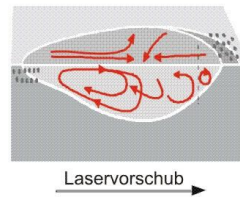


Bild 2. Laser-Dispergieren von Hartstoffpartikeln

3D-Partikeldynamik: In Vorbereitung:
Verifikation
existierender
Simulationsmodelle
Dispergieren von
Magnetwerkstoffen in
der Randzone (Pulver)



- Elektronenstrahl-Schweißanlage
- Laserstrahl-Schweißanlage

2.2 Bauteilmarkierung durch lokale Wärmebehandlung

Die Randzone von Bauteilen kann neben dem Dispergieren von Partikeln mit bestimmten, gewünschten Eigenschaften (z. B. Verschleißfestigkeit, Härte-, magnetische Eigenschaften) auch durch eine mechanische Kaltverformung bzw. durch eine lokale Wärmebehandlung, Härten oder Anlassen in ihren Eigenschaften verändert werden. Bringt man eine Wärmeenergie, z. B. mittels eines Lasers, fokussiert in eine durch Abschrecken gehärtete oder durch Kaltverformung verfestigte Bauteilrandzone ein, stellt sich dort lokal ein angelassenes oder rekristallisiertes Gefüge mit örtlich veränderten elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften ein. Diese deutlich veränderten physikalischen Eigenschaften des Werkstoffgefüges in der Bauteilrandzone lassen sich mit einem hoch auflösenden Wirbelstromsystem auslesen. Über eine Variation der Intensität und Zeitdauer der Energieeinbringung (Anlasstemperatur, Tiefenwirkung) lässt sich neben dem Grad der Gefügeänderung auch die Tiefenlage der Gefügeänderung gezielt verändern (Bild 3). Dies ermöglicht neben der bearbeiteten 2-dimensionalen Bauteiloberfläche als Informationsträger auch den Grad und die Tiefe der Gefügeänderung als zusätzliche Informationsdimension zu nutzen. Durchgeführte Versuche am IW haben die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens, das insbesondere für eine inhärente Bauteilmarkierung geeignet ist, bestätigt.

**Bauteilmarkierung durch lokale
Wärmebehandlung**
Mehrdimensionale Informationsspeicherung

- Fläche
- Tiefe

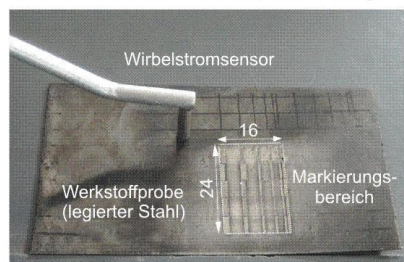
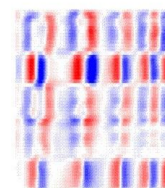
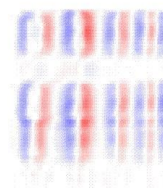


Bild 3. Bauteilmarkierung in der Bauteilrandzone

**Ergebnis
der Wirbelstrom-Flächenabtastung:**
Auswertung verschiedener Signalanteile
(Informationsebenen)



X-Komponente



Y-Komponente

3. Erfassung der Belastungshistorie mit Sensorwerkstoffen

Metastabile austenitische Werkstoffe neigen unter hoher Belastung mit plastischer Verformung zur Bildung von α' -Martensit mit hartmagnetischen, ferromagnetischen Eigenschaften. Hinsichtlich des Umklappvorgangs des austenitischen Gitters spielen Gitterverspannungen und Gitterverformungen im Zusammenhang mit der Proben- oder Bauteilverformung eine große Rolle. Diese deutlich veränderten physikalischen Eigenschaften des Werkstoffgefüges in der Bauteilrandzone lassen sich mit einem hoch

auflösenden Wirbelstromsystem unter Anwendung der Harmonischen-Analyse auslesen [6].

2.1 Induzierung von Martensit unter plastischer Verformung

Um den Einfluss des Umformgrades auf die Martensitbildung zu untersuchen, wurden Flachproben stufenweise mit 3, 6, 10, 15, 20, 25% Dehnung plastisch verformt. Die Proben aus den zwei untersuchten Werkstoffen 1.4301 und 1.4541 wurden im Zugversuch plastisch gedehnt und anschließend die Probenoberfläche mit der WS-C-Scanntechnik vermessen, Bild 4. In Bild 5 ist die Änderung der magnetischen und elektrischen Eigenschaften des Werkstoffs anhand der Messgrößen der Wirbelstromprüfung in unterschiedlichen Verformungsstadien dargestellt.

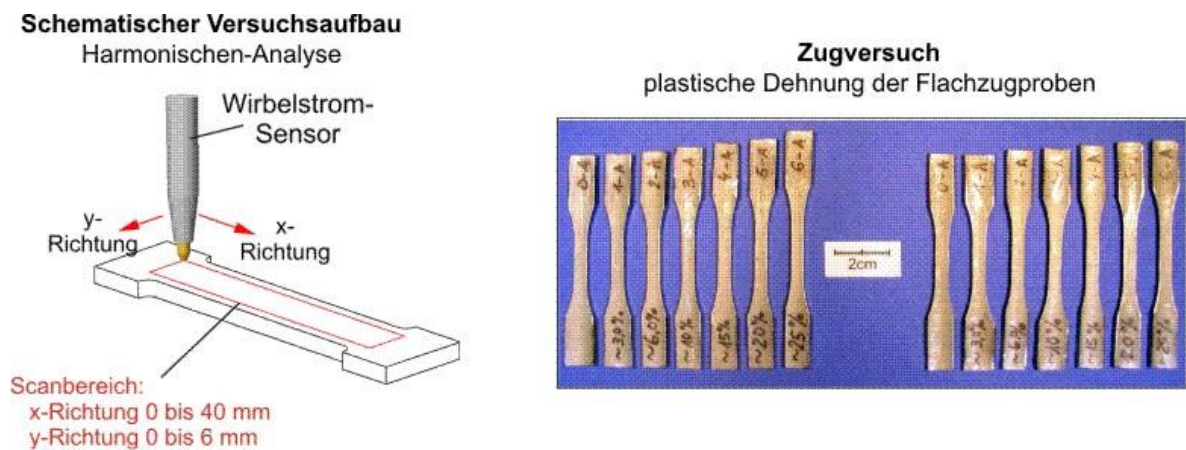


Bild 4. WS-Prüfung an statisch belasteten Zugproben (links) und plastisch gedehnten Flachzugproben (rechts)

Im verjüngten Bereich der Zugproben aus den metastabilen Stählen 1.4301 und 1.4541 erfolgt mit zunehmender plastischer Verformung eine Zunahme der Martensitbildung. Die Martensitbildung im verjüngten Bereich ist verbunden mit einer Änderung der magnetischen Eigenschaften, die mit einem Wirbelstrom-SCAN der Flachzugproben erfasst und in Bild 5 dargestellt ist. Dabei zeigt der Werkstoff 1.4541 aufgrund seiner metastabilen Eigenschaften eine höhere Neigung zur Martensitbildung bei zunehmender plastischer Verformung.

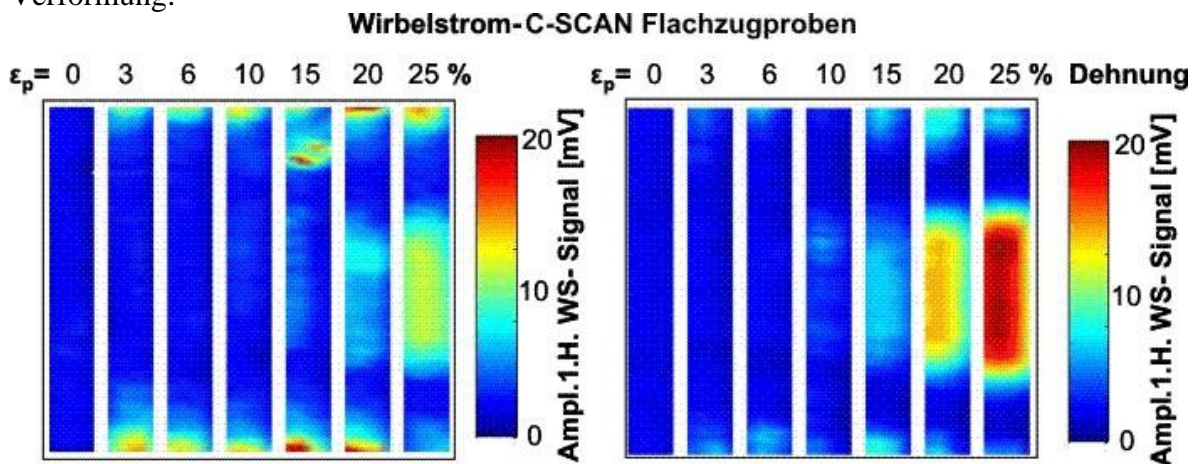


Bild 5. Wirbelstrom-Flächenscan der plastisch gedehnten Flachzugproben: 1.4301(links), 1.4541(rechts)

2.2 Induzierung von Martensit unter dynamischer Biege- und Torsions-Schwingbelastung

Um den Zusammenhang zwischen der Bauteilbelastung unter dynamischer Beanspruchung und der Martensitbildung für verschiedene metastabile austenitische Werkstoffe zu untersuchen, wurden dynamische Low-Cycle-Fatigue-Versuch mit belastungsgesteuerten Wechselbeanspruchungen in Abhängigkeit der Lastspielzahl durchgeführt. Zum Nachweis der Martensitbildung in Abhängigkeit der dynamischen Belastung wurden Rundproben integral im verjüngten Bereich mit einem umfassenden Wirbelstromsensor online während der Belastungsversuche überwacht und die Messsignale aufgezeichnet. Zum Nachweis der lokalen Martensitverteilung in den Proben in Abhängigkeit der Belastungsart wurden die Rundproben nach definierten Belastungsstufen aus dem Versuchsstand ausgebaut, in einem Spannfutter aufgenommen und im verjüngten Probenbereich mit einem Wirbelstrom-Tastensensor und einem Programmsystem zur Harmonischen-Analyse von Wirbelstrom Signalen gescannt, Bild 6.

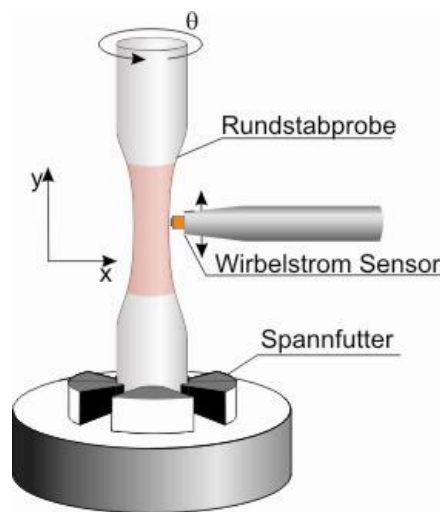


Bild 6. Messaufbau zum Wirbelstrom-SCAN von Rundproben

Hier wird zudem der Einfluss der Werkstoffanisotropie auf das Messsignal deutlich. Im Ausgangszustand der Proben ohne Belastung, der als Referenz für die Belastungsversuche aufgenommen wurde, sind in Längsrichtung der Probe leichte Schattierungen zu erkennen, die auf Werkstoffinhomogenitäten in Folge der Halbzeugfertigung zurückzuführen sind. Unter dynamischer Biegebeanspruchung mit hohen Biegemomenten und plastischer Verformung ist mit zunehmender Lastwechselzahl lokal eine Martensitbildung im Bereich der maximalen Biegebelastung unter 90° und 270° zu erkennen, Bild 7 links. Bei hohen Biegebelastungen kommt es lokal zu einer erhöhten Martensitbildung, die zur Versprödung und Ermüdung des Werkstoffs in diesem Bereich bis zum Anriss und Versagen der Probe führt. Im Gegensatz zur Biegebelastung erfolgt unter Torsionsbelastung eine relativ gleichmäßige Beanspruchung des Werkstoffs- in der Proben-Randzone. Abgesehen von den schon erwärmten Werkstoffinhomogenitäten erfolgt daher unter Torsionsbeanspruchung mit zunehmender Beanspruchung im plastischen Bereich eine relativ gleichmäßige Zunahme der Martensitbildung in der Proben-Randzone, Bild 7 rechts.

Die Belastungshistorie einer Rundprobe unter Biegebeanspruchung ist anhand der Signaländerung der 3. Harmonischen des WS in Abhängigkeit der Biegebelastung in Bild 8 dargestellt. Hierbei sind auch, ähnlich wie bei der statischen Belastung im Zugversuch, drei Bereiche der Martensitbildung erkennbar.

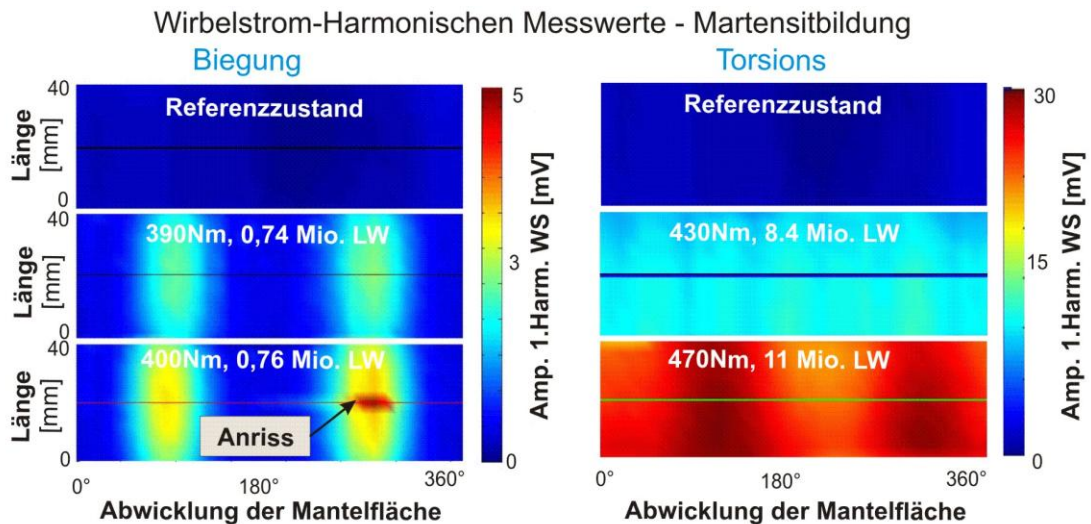


Bild 7. Zerstörungsfreie Bestimmung lokaler magnetischer Werkstoffeigenschaften

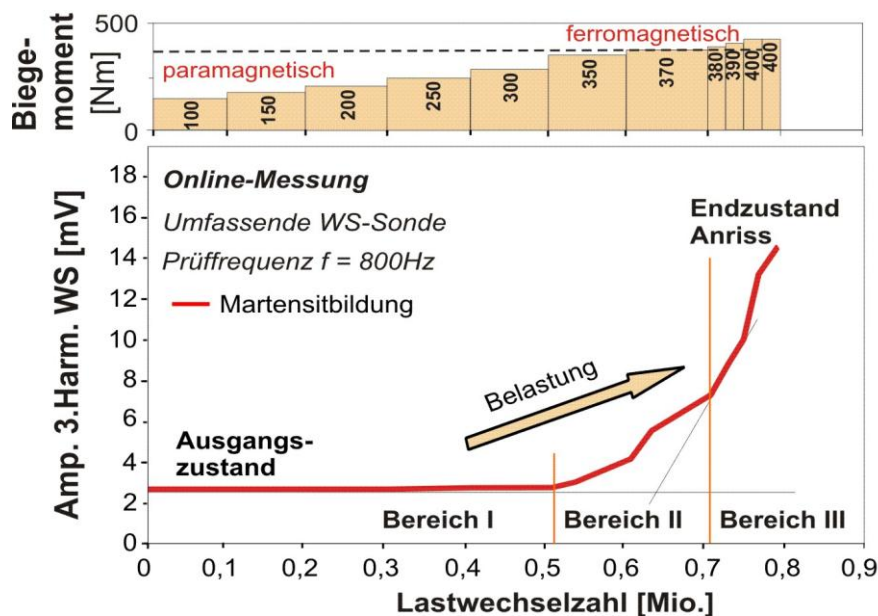


Bild 8. Martensitbildung in Rundstabproben unter dynamischer Belastung im Biege-Schwingprüfstand

Bei geringeren Biegebelastungen bis 300Nm sind die Formänderungen der Probe reversibel und die Belastungsspannungen liegen im elastischen Hooke'schen Bereich. Bei Biegemomenten von 350 bis 370Nm (Bereich II), erfolgt der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung. Es kommt lokal im Randbereich der Probe unter dynamischer Belastung zu plastischer Verformung und damit zur Martensitbildung. Bei hohen Belastungen oberhalb von 380Nm, kommt es verstärkt zu plastischer Verformung unter dynamischer Belastung und damit zu größeren Bildungsraten von Martensit. Der Werkstoff weist ferromagnetische Eigenschaften auf.

4. Zusammenfassung

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die lokale Ausbildung martensitischer Phasen im austenitischen Grundgefüge mit einer hoch auflösenden Wirbelstrom-C-Scan-Technik in

Kombination mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen örtlich oder integral nachweisbar ist. Bei der statischen Belastung der Flachzugproben mit plastischer Verformung bildet sich der α' -Martensit im verjüngten Probenvolumen. Die Gefügeänderung und damit die plastische Dehnung der Flachzugprobe lässt sich mit hochauflösenden WS-Tastsonden insbesondere bei einer Prüffrequenz von 3200Hz und mittels integraler umfassender WS-Sonden zur Harmonischen-Analyse bei allen Messfrequenzen beurteilen. Im Werkstoff Nr. 1.4541 wurde unter statischer Belastung mit bleibender Verformung ein relativ empfindlicher Nachweis der Martensitbildung in Abhängigkeit vom Verformungsgrad festgestellt. Dieses wurde sowohl durch die WS-C-Scan-Technik und die Harmonische-Analyse von Wirbelstromsignalen als auch durch die lokale bzw. homogene Steigerungen der Härte und des elektrischen Widerstands bei Rundproben bestätigt. Die Versuche mit dynamischen Biege- und Torsions-Schwingbeanspruchungen von Rundproben zeigen, dass die Verteilung und Bildungsgeschwindigkeit des α' -Martensits direkt von der Belastungsart und -höhe abhängig ist. In der biegebeanspruchten Rundprobe findet die α' -Martensitbildung lokal im Bereich der höchsten Biegebelastung in der Randzone der Rundprobe statt, während in der torsionsbeanspruchten Rundprobe die Martensitbildung relativ gleichmäßig erfolgt. Die lokalen Anteile von α' -Martensit in der torsionsbeanspruchten Rundprobe sind höher als die lokalen maximalen Anteile von α' -Martensit in der biegebeanspruchten Rundprobe. Damit besteht die Möglichkeit, Materialveränderungen entsprechend der Martensitbildung zu erfassen und den Ermüdungszustand austenitischer Bauteile zerstörungsfrei und orts aufgelöst zu bestimmen. Im Rahmen einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung austenitischer Bauteile sind anhand der messtechnisch nachgewiesenen Werkstoffveränderung Aussagen über den Ermüdungszustand möglich.

5. Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 653 „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus“ [12].

6. Referenzen

- [1] Vincenz, M.: Möglichkeiten und Grenzen heutiger Transpondertechnologien in der Logistik. Fördern und Heben, Bd. 53, Heft 9, S. 540-542, 2003
- [2] McMaster, R. C.: The present and future of eddy current testing. Materials Evaluation, Bd. 60, Heft 1, S. 27-28, ISSN 0025-5327, 2002
- [3] Kroos, J.; Reimche, W.: Entwicklung einer Prototypanlage zur zerstörungsfreien Bestimmung richtungsabhängiger, mechanisch-technologischer Feiblecheigenschaften. Report zum EGKS-Projekt EUR 20314, Brüssel, 2002
- [4] Weber, W.; Feiste, K.L.; Reimche, W.; Bach, F.-W.; Stegemann, D.: Fernfeld-Wirbelstromprüfsystem zur Fehlerprüfung von dickwandigen austenitischen Rohrleitungskomponenten. DGZfP-Jahrestagung, Berlin, 2001
- [5] Reichert, C.: Radioskopie an schmelzflüssigen Metallen zur Prozessoptimierung. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [6] Feiste, K. L.: Entwicklung der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zur Charakterisierung mechanischer Kugelgraphitgusseigenschaften. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 8, Nr.1006, ISBN 3-18-500608-9, 2003
- [7] Weber, W.: Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik. Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [8] Feiste, K.L.; Reimche, W.; Marques, P.; Reichert, Ch.; Rebello, A.J.M.; Krüger, E.S.; Stegemann, D.: Characterization of Nodular Cast Iron Properties by Harmonic Analysis of Eddy Current Signals. ECNDT Kopenhagen, Dänemark, Mai 1998

- [9] Weber, W.; Feiste, K. L.; Reimche, W.; Stegemann, D.: Characterization of material degradation and detection of imperfections inside of thick walled austenitic components with electromagnetic testing. 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, JSAEM-Tagung, Tokyo, Japan, 13.-16. Mai 2001
- [10] Feiste, K. L.; Komber, T.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Zerstörungsfreie elektromagnetische Bestimmung der Kaltverformung und Materialermüdung austenitischer Werkstoffe. Herausforderung durch den industriellen Fortschritt, Tagungsband, Bad Neuenahr, Werkstoffprüfung, Dezember 2003
- [11] Bernard, M.; van Well, M.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Härtung von Vergütungsstahl mit Sprühabschreckung – Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Abstand, Druck und Volumenstrom auf das Härteergebnis. HTM – Härtereitechnische Mitteilungen, Band 58, Seite 61-68, 2003
- [12] Denkena, B.; Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus, Sonderforschungsbereich 653, Leibniz Universität Hannover 2004