

# Hochtemperatur-Prüftechnik ermöglicht Einblick in die Werkstoffumwandlung und Phasenausbildung bei Hochleistungsbauteilen

Wilfried REIMCHE<sup>1</sup>, Stefan ZWOCH<sup>1</sup>, Oliver BRUCHWALD<sup>1</sup>, Fr.-Wilhelm BACH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2, D-30823 Garbsen

Tel.: +49 (0)511 762 9861, E-Mail: [reimche@iw.uni-hannover.de](mailto:reimche@iw.uni-hannover.de)

Heinrich KLÜMPER-WESTKAMP<sup>2</sup>, Jörn LÜTJENS<sup>2</sup>, Hans-Werner ZOCH<sup>2</sup>

<sup>2</sup>IWT Stiftung Institut für Werkstofftechnik

Badgasteiner Str. 3, D-28359 Bremen

Tel.: +49 (0)421 218 5315, E-Mail: [hkw@iwt-bremen.de](mailto:hkw@iwt-bremen.de)

**Kurzfassung.** Das Bainitisieren ist ein Wärmebehandlungsprozess für Hochleistungs-Stahlbauteile, der technisch in zunehmendem Maße vorteilhaft zur Steigerung der Festigkeit und Härte bei geringerem Verzug und verbesserter Zähigkeit alternativ zur martensitischen Härtung im Leichtbau eingesetzt wird.

Aufgrund verschiedener, teilweise schwer zugänglicher Parameter ist der zeitliche Ablauf der Umwandlung schwer vorhersagbar, da dieser abhängig von der genauen chemischen Zusammensetzung, von der Austenitisierung sowie dem Ausgangsgefügezustand ist. Die Umwandlung ist durch einen S-förmigen Verlauf gekennzeichnet, deren Sättigungswert exponentiell angenähert wird. Insbesondere für Präzisions- und Hochleistungsbauteile ist es von großer Bedeutung die Phasen- und Gefügeausbildung definiert einzustellen sowie das Bauteil möglichst verzugs- und eigenspannungsarm zu halten. Da der Prozessablauf insbesondere der Bainitumwandlung mit Umwandlungsbeginn und Umwandlungsende nur unzureichend bekannt ist werden konservativ erhöhte Behandlungszeiten angesetzt, um den Restaustenitgehalt gering zu halten. Durch die Entwicklung einer Hochtemperatur-Wirbelstromtechnik, basierend auf signifikanten mikromagnetischen Werkstoffänderungen, wurde eine Messtechnik für die Werkstoffumwandlung geschaffen, welche nicht nur Beginn und Ende der Umwandlung registriert, sondern auch die jeweilige Phasenentwicklung. Als signifikanter Messeffekt bietet sich dabei die deutliche Änderung der magnetischen Eigenschaften, d.h. der magnetischen Hysterese und ihrer Kennwerte, in Abhängigkeit der Werkstoffumwandlung an. Mit dieser Messtechnik ergeben sich erstmals Möglichkeiten den Prozessablauf der Wärmebehandlung von Bauteilen aus der Schmiedewärme während der Werkstoffumwandlung messtechnisch in-situ zu verfolgen, den aktuellen Gefügezustand zu erfassen und damit zu einer Prozessführung, Prozessoptimierung und Qualitätssicherung in der Wärmebehandlung von hochbeanspruchten Maschinenbauteilen zu kommen.

## Einführung

Als eine Alternative zur martensitischen Härtung wird zunehmend die bainitische Härtung zur Verbesserung der Bauteileigenschaften von hochfesten, gehärteten Bauteilen eingesetzt [1, 2, 15, 16, 18, 24, 20]. Diese Wärmebehandlung kommt bei Bauteilen aus Stahl- und

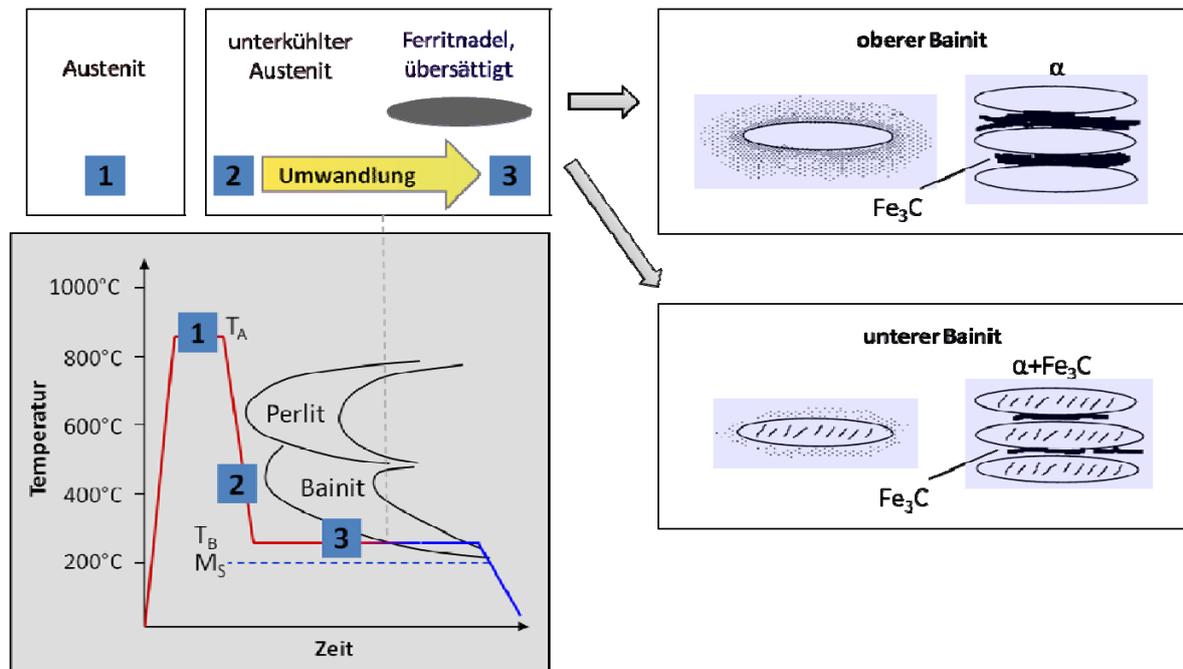


Gusseisenwerkstoffen zum Einsatz, um die mechanischen Eigenschaften bei geringem Bauteilverzug zu verbessern, hohe Zähigkeit zu erreichen und den Widerstand gegen Risswachstum zu verbessern.

Die Bainitumwandlung ist ein zeitintensiver Prozess, dessen Dauer vom Werkstoffgefüge, der Legierungszusammensetzung, sowie von den Temperaturen der Austenitisierung und der Bainitisierung abhängig ist. Daraus ergibt sich die Schwierigkeit, den Prozessablauf mit Anfang und Ende der Bainitisierung vorauszusagen [5, 11, 14, 17]. Wenn Bauteile ohne unerwünschten Restaustenit hergestellt werden sollen, führt dieses zu verlängerten und unwirtschaftlichen Behandlungszeiten. Auch ist es schwierig, unkontrolliert einen komplexen Prozesszyklus über eine spezielle Abkühlkurve im ZTU-Schaubild zu durchlaufen, wie dieses bei dem patentierten, zweistufigen Temperaturprozess der Fall ist [20]. Hinsichtlich dieser Problematik wurde ein Messsystem entwickelt, das es ermöglicht, basierend auf den physikalischen Werkstoffeigenschaften im Zusammenhang mit Phasenänderungen und Veränderungen in der Mikrostruktur unter den vorherrschenden Randbedingungen den Verlauf der Bainitumwandlung in-situ zu erfassen.

## 1. Bainitische Wärmebehandlung

Der Bainitumwandlungsprozess erfolgt in drei Stufen, **Bild 1, links**. In der ersten Stufe erfolgt das Austenitisieren durch Komplet- oder Teilumwandlung in die  $\alpha$ -Phase des Austenits bei der Austenitisierungstemperatur  $T_A$ . In der zweiten Stufe wird das Bauteil schnell auf die Bainitumwandlungstemperatur  $T_B$  abgekühlt, ohne dass dabei Ferrit oder Perlit entstehen kann. Während der dritten Stufe wird  $T_B$  konstant gehalten und es erfolgt eine Änderung des Gefüges vom kfz-Austenit (kfz: kubisch-flächenzentrierte Struktur) zum krz-Bainit (krz: kubisch-raumzentrierte Struktur). Im Gegensatz zum Perlit, der sich bei hohen Temperaturen bildet, wird Bainit als ein nicht-lamellares, nicht-kooperatives eutektoidisches Zweiphasen-Produkt definiert.



**Bild 1.** Werkstoffkundliche Vorgänge beim Bainitisieren (nach Bhadeshia)

Bhadeshia [3, 21] beschreibt die Umwandlung wie folgt: Ähnlich, wie die Martensitumwandlung des unterkühlten Austenit in übersättigte Ferritnadeln, fängt die

Umwandlung diffusionslos an, **Bild 1, rechts**. Durch Diffusion bewegt sich der Kohlenstoff in den umgebenden Austenit, was zur Karbidausscheidung führt. Demzufolge verringert sich der Kohlenstoffgehalt der angrenzenden Austenitbereiche, sodass mehr übersättigte Ferritnadeln gebildet werden. Im Falle des unteren Bainits ist die Kohlenstoffdiffusion im Ferrit sehr langsam, so dass die Kohlenstoffausscheidung sogar innerhalb der Bainit-Ferritnadel stattfindet.

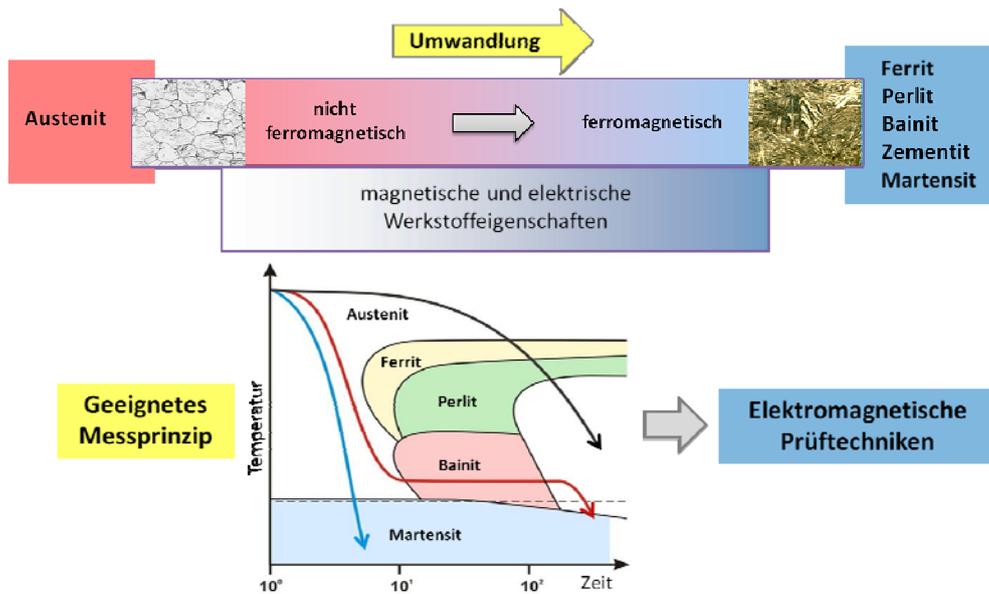
Aaronson [13] schlägt eine völlig diffusionsgesteuerte Umwandlung vor. Obwohl die Wachstumsraten für die Ferrit- und Karbidphasen während der Perlitumwandlung fast gleich sind, wächst die Ferritphase - im Falle der Bainitumwandlung - viel schneller als die Karbidphase. Daher hat Bainit ein faseriges Gefüge. Der untere Bainit bildet im Gegensatz dazu zunächst eine dünne Leiste von karbidlosem Gefüge aus, welche das Grundgerüst bildet. In diesem Grundgerüst scheiden sich dann weitere Karbide aus. Die Gemeinsamkeit der beiden Theorien liegt darin, dass die Bainitumwandlung in den Bereichen geringer Kohlenstoffkonzentrationen beginnt. Die Kohlenstoffkonzentration wird dabei innerhalb der Restaustenitphase erhöht, wobei die Umwandlung erschwert wird. Daher ist die Umwandlungsrate gegen Ende dieses Umwandlungsprozesses sehr niedrig.

Im Abhängigkeit der Umwandlungstemperatur  $T_B$  und der Diffusionsgeschwindigkeit unterscheidet man zwischen einem etwas gröber strukturierten **oberen Bainit** bei Umwandlungstemperaturen im oberen Bainitgebiet und einem sehr fein strukturierten **unterem Bainit** bei geringeren Umwandlungstemperaturen im unteren Bainitgebiet mit besseren mechanischen Werkstoffeigenschaften bei längeren Umwandlungsdauern.

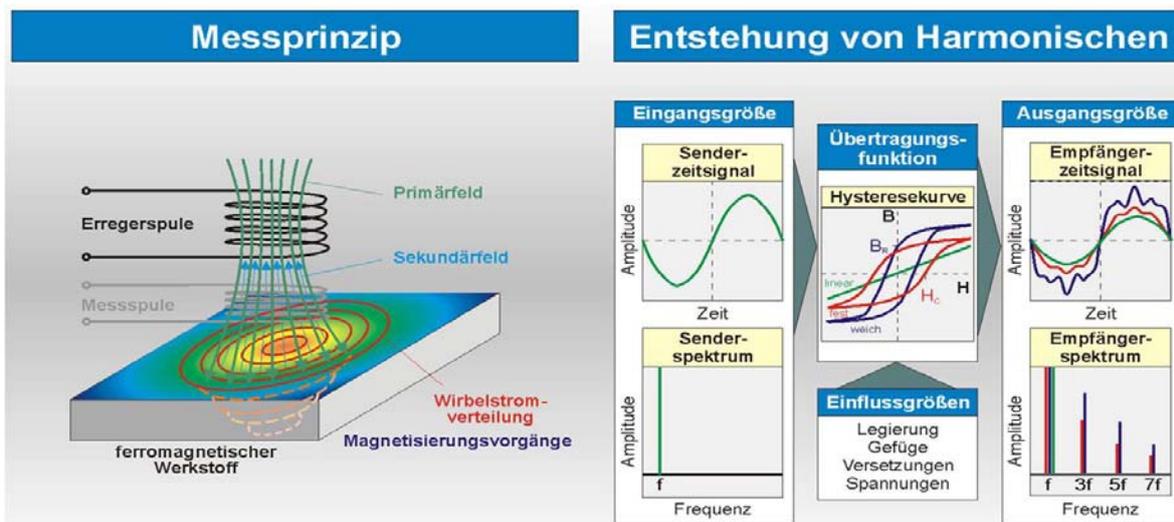
## 2. Messsystem und Bainitsensor

Um die Bainitumwandlung kontinuierlich zu kontrollieren, wurde ein auf der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen basierendes Messsystem entwickelt [4, 9, 10, 22, 23], mit dem die Veränderungen der magnetischen und elektrischen Eigenschaften während der Bainitumwandlung messtechnisch erfasst werden können [7, 8]. Aufgrund einer durch den Übergang vom nicht-ferromagnetischen Austenit zum ferromagnetischen Bainit erwarteten großen Veränderung der magnetischen Eigenschaften ist das Messsystem zur Erfassung der Bainitumwandlung qualifiziert, **Bild 2**.

Der Sensor besteht aus einer Erregerspule, die bei einer definierten Frequenz ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt, mit dem das Werkstück beaufschlagt wird. Durch dieses Wechselfeld werden Ummagnetisierungsvorgänge und Wirbelströme im Prüfkörper generiert, die ein gegenläufiges Sekundärfeld erzeugen, welches mit einem Messspulensystem im Sensor erfasst werden kann. Auf diese Weise können Informationen über die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Probe gewonnen werden. Das Messsignal wird mit Hilfe einer schnellen Fourier-Transformation hinsichtlich der harmonischen Signalanteile analysiert, wobei insbesondere die Höherharmonischen mit der Hysteresekurve im Zusammenhang stehen und Informationen über die ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften liefern, **Bild 3**.



**Bild 2.** Werkstoffumwandlung und Werkstoffeigenschaften



**Bild 3.** Messprinzip der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen

Bei der Korrelation der Harmonischen Wirbelstrom-Signalanteile mit dilatometrischen Messungen sowie mit metallografischen Analysen werden quantitative Informationen über den Anteil des während der Wärmebehandlung umgewandelten Bainits kontinuierlich gewonnen. Der Prozessablauf beim sensor kontrollierten Bainitisieren im Salzbad ist in **Bild 4** dargestellt. Nach dem Austenitisieren der Probe in einem Hochtemperatur-Salzbad erfolgt das Abschrecken in einem weiteren Niedertemperatur-Salzbad, in einer festen, definierten Position zum Wirbelstromsensor. Zur Erfassung des Umwandlungsvorgangs im Bauteil wurden verschiedene Wirbelstromsensoren über ihre Bauform an die Bauteilgeometrie angepasst und im Bainitisierungsbad im Temperaturbereich von 200 °C bis 400 °C erprobt. Dieses waren ein umfassender Sensor für zylindrische Proben, ein Tastsensor für Scheibenproben und ein Innensensor für Ringproben.

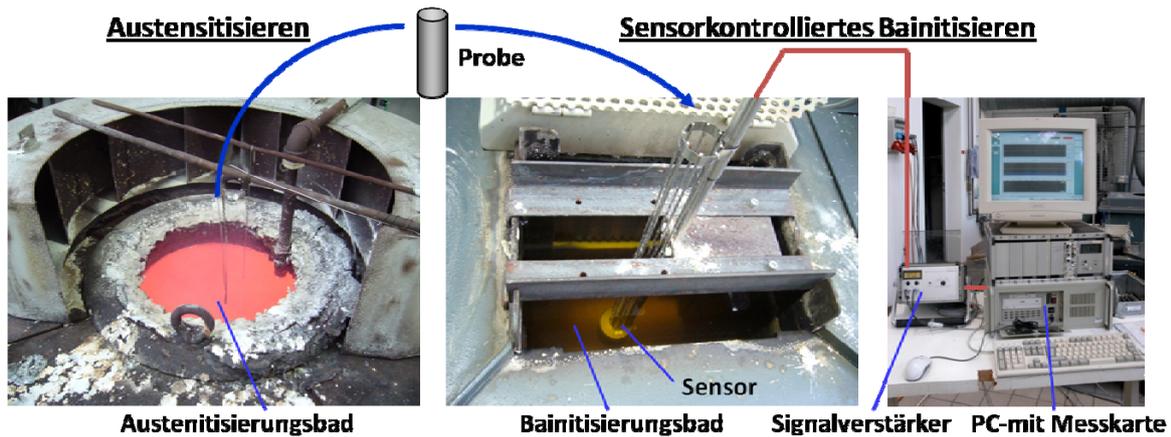


Bild 4. Versuchsaufbau – Sensorkontrolliertes Bainitisieren

### 3. Ergebnisse

Während der in-situ-Wirbelstrommessungen wird das Messsignal des Sensors kontinuierlich erfasst und mittels Fourier-Transformationen die Real- und Imaginärteile der 1., 3. und 5. Harmonischen zeitabhängig ermittelt. Dabei werden zwei unterschiedliche Erregerfrequenzen von 200 Hz und 1500 Hz verwendet, um verschiedene Prüfvolumen zu erfassen. Insgesamt werden 12 verschiedene Messwerte gleichzeitig aufgenommen [22, 25, 26, 27]. Beispielhaft ist das Messergebnis anhand verschiedener Harmonischen-Messwerte in einem Bainitisierungszyklus bei zwei Prüffrequenzen in **Bild 5** und **Bild 6** dargestellt.

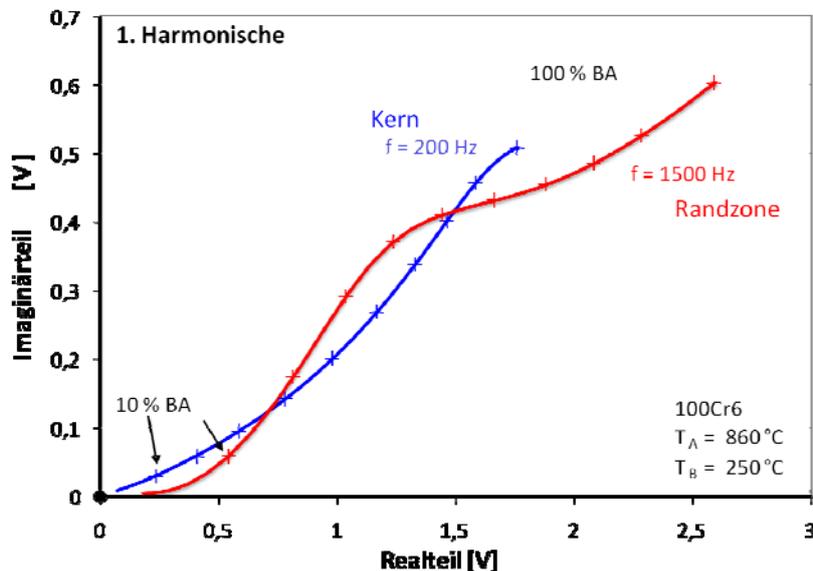


Bild 5. Sensorsignal in der Impedanzebene: 1. Harmonische

Ein charakteristischer Verlauf der Harmonischen-Messwerte für den Stahl 100Cr6 (SAE 52100) in der komplexen Ebene ist in **Bild 5** gezeigt. Die Probe wurde bei 860 °C 20 Minuten austenitisiert und bei 250 °C bainitisch gehärtet. Jede Markierung entlang des Graphen stellt den Fortschritt der Bainitisierung in 10 %-Schritten da. Die Kurven verlaufen von 0 bis 100 % Bainit. Dieses Kalibrier-Ergebnis wurde durch dilatometrische Messungen vergleichbarer Proben in demselben Salzbad gewonnen.

Das Messsignal der 1. Harmonischen zeigt in Abhängigkeit der Prüffrequenz und der überwiegend betrachteten Kern- oder Randzone einen unterschiedlichen Signalverlauf

in der Impedanzebene. In Abhängigkeit der Bainitumwandlung vom Beginn bis zum Ende, von 0 % bis 100 %, ergeben sich jedoch nahezu äquidistante Werte. Das zeigt, dass die Sensorempfindlichkeit hinsichtlich des Bainitgehaltes über dem gesamten Bereich nahezu konstant ist. Der Signalverlauf der 3. Harmonischen variiert mit der Frequenz und unterscheidet sich von dem annähernd linearen Verlauf der 1. Harmonischen in der Impedanzebene. Ebenfalls ausgehend vom Ursprung zu Beginn der Bainitisierung werden in Abhängigkeit der Prüffrequenz ein oder mehrere Schleifen durchlaufen mit deutlichen Amplituden- und Verlaufsänderungen bei mittleren Bainitisierungsgraden in Abhängigkeit der Phasenänderung. Erst bei hohen Bainitisierungsgraden von mehr als 80 % und geringen Umwandlungsraten geht der Signalverlauf in einen zum Ursprung ausgerichteten linearen Verlauf über.

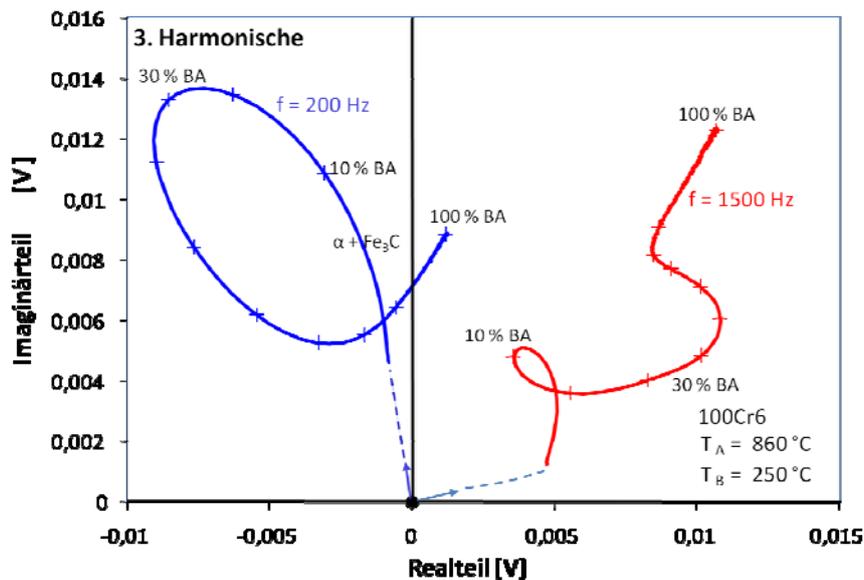
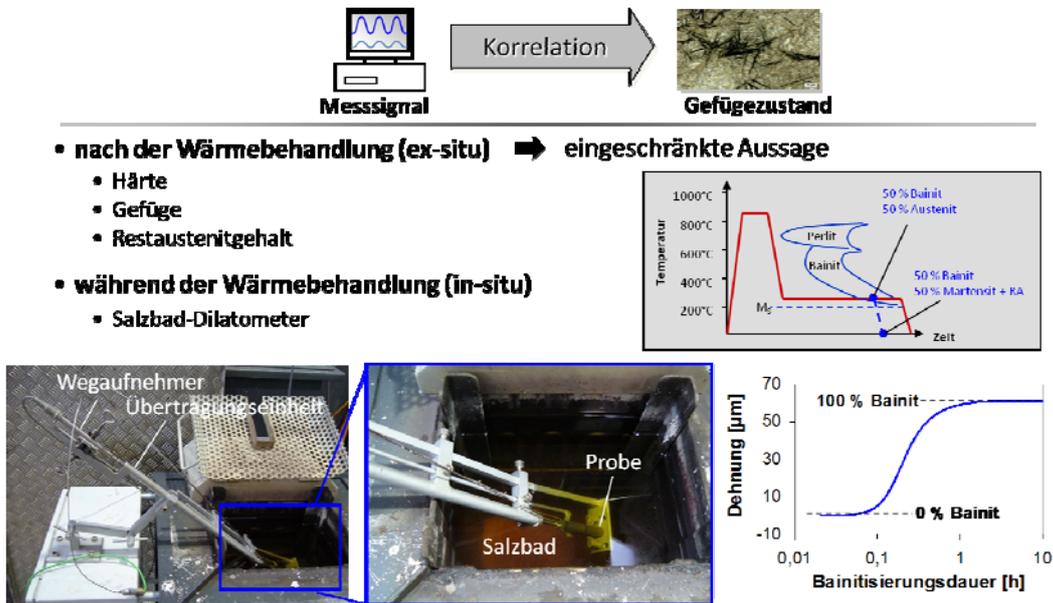


Bild 6. Sensorsignal in der Impedanzebene: 3. Harmonische

Die charakteristischen Signalverläufe der 1., 3., und 5. Harmonischen in der Impedanzebene resultieren mit zunehmender Prüffrequenz und Bainitisierung überwiegend aus der Bauteilrandzone und sind systematisch für die Phasenänderung und die Änderung der Mikrostruktur sowie der elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften in Folge der Bainitumwandlung. Der Messwert der 1. Harmonischen kann mit der dilatometrischen Messung der Bainitumwandlung unmittelbar korreliert werden, **Bild 7** und **Bild 8**. Dies bestätigt, dass sich dieses Messsystem sowohl als eine zerstörungsfreie online-Messeinheit zur Prozessüberwachung, wie auch zur Quantifizierung der Bainitumwandlung eignet ist.

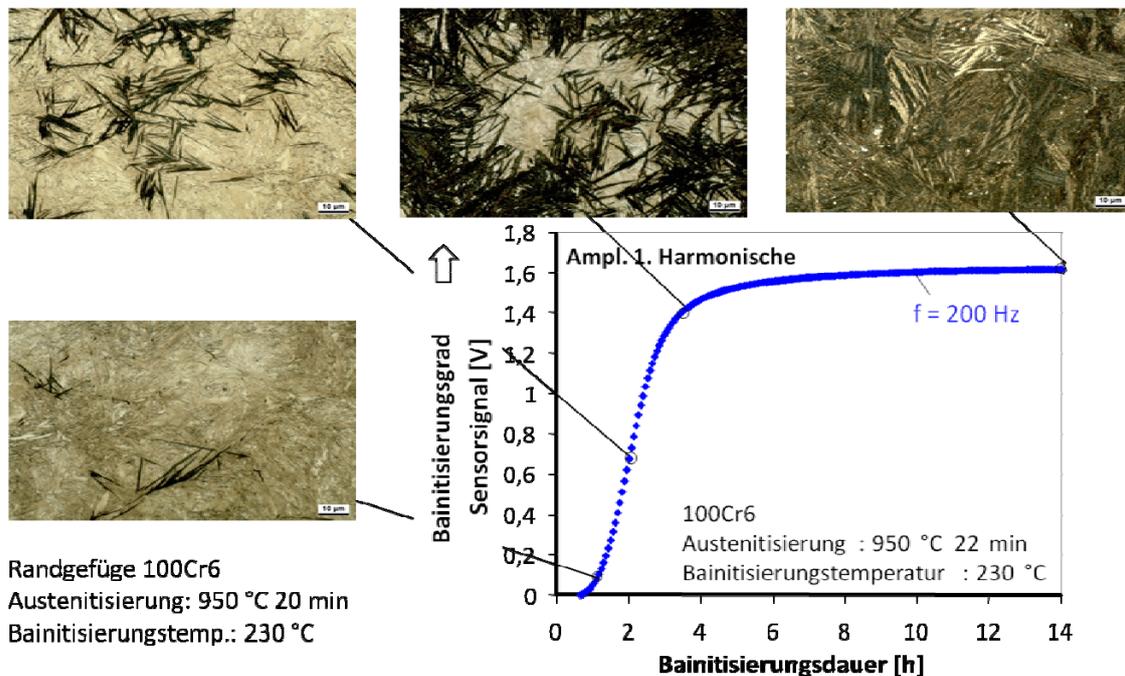
Die Informationen, die in der 3. und 5. Harmonischen enthalten sind, sind nicht einfach zu interpretieren. Um die Mechanismen zu verstehen, die diese komplexen Kurvenverläufe prägen, bedarf es weiterer, elektromagnetischer und metallografischer Untersuchungen. Es ist bekannt, dass Wirbelstrommessungen sehr empfindlich auf Kohlenstoffverteilungen, Kohlenstoffumverteilungen, Korngrenzen und Karbid-Ausscheidungen ansprechen, welche in den verschiedenen Stahlphasen während der Bainitumwandlung auftreten. Diese metallurgischen Phänomene können jeweils durch die Kurven der 3. und 5. Harmonischen identifiziert werden. Es ist allerdings schwierig, unter Anwendung von metallografischen Analysen den Umwandlungsvorgang an sich und die elektromagnetischen Messeffekte zu beschreiben. Die Informationen aus dem Bainitsensor werden bei hohen Umwandlungstemperaturen von  $\sim 200$  °C bis 450 °C gewonnen. In

diesem Temperaturbereich können metallografische Analysen mittels gleichwertiger in-situ-Messungen nicht realisiert werden. Demzufolge können die entsprechenden Ergebnisse nicht unmittelbar miteinander verglichen werden. Außerdem treten die erfassten Mechanismen in atomarer Größe auf, sodass eine hochauflösende Elektronenmikroskopie erforderlich ist, um die Information über den Nanoprozess zu erhalten, der die erfassten Charakteristika beeinflusst.



**Bild 7.** Korrelationsmessungen – Metallurgie – Dilatometer- Wirbelstrom Harmonischen Messung

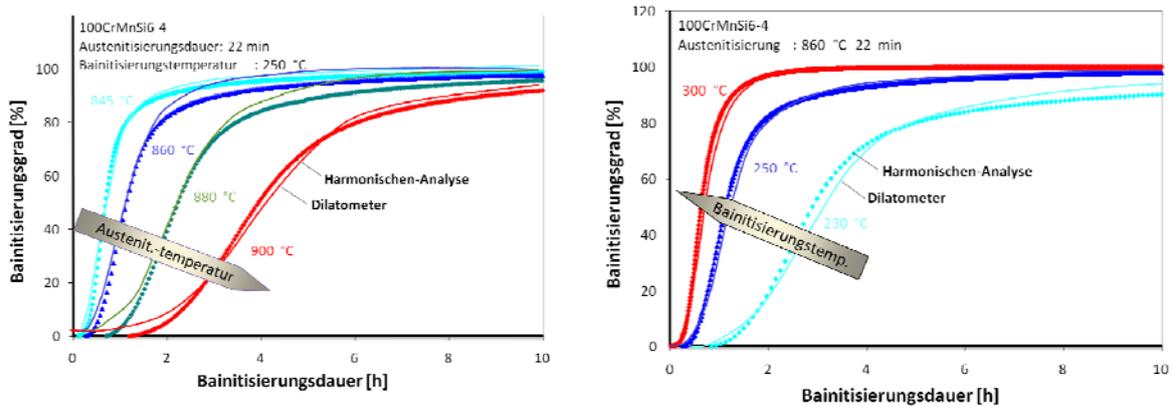
Mit dem Bainitsensor wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Bainitumwandlung online an verschiedenen Stählen sowie bei unterschiedlichen Umwandlungs- und Austenitierungstemperaturen zu überprüfen, zu qualifizieren und zu quantifizieren. **Bild 8** zeigt die Amplitude der 1. Harmonischen des Wirbelstromsignals in Abhängigkeit der Bainitisierungsdauer.



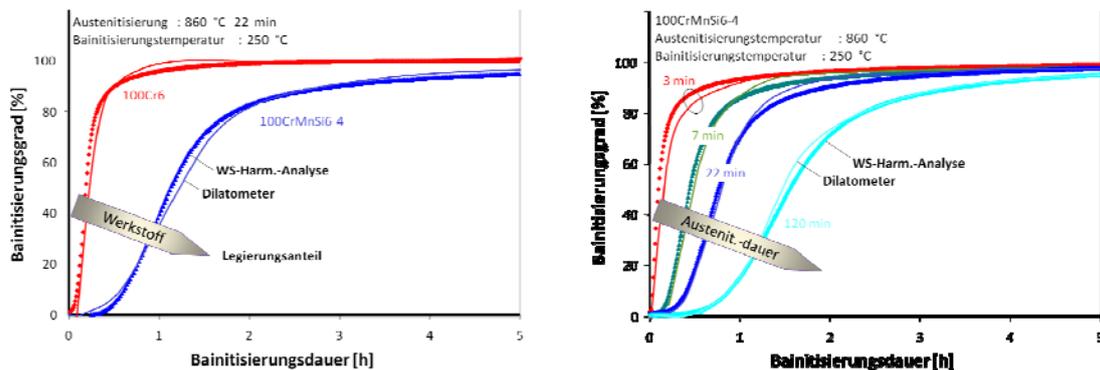
**Bild 8.** 1. Harmonische während der Umwandlung mit zugehörigen Gefügebildern

Diese Kurve stellt beispielhaft ein Wirbelstromsignal dar, das für die Kalibrierung verwendet wurde. Um die Entwicklung des Umwandlungsprozesses zu veranschaulichen, wurden mehrere Proben nacheinander abgeschreckt und metallografisch analysiert. Die Schlibfbilder korrelieren hierbei mit den Bainitsensor-Messungen. Erst nach einer Umwandlungszeit von einer Stunde sind die ersten Bainitstrukturen sichtbar, welche mittels Ätzens durch dunkle, nadelförmige Bündel charakterisiert sind. Bei weiterer Umwandlung nimmt die Anzahl der Bündel weiter zu, **Bild 8**. Nachdem die Proben aus dem Salzbad herausgezogen und abgeschreckt sind, wandelte sich der Restaustenit in Martensit um. Dieses Verfahren führt dazu, dass die in den Schlibfbildern leuchtenden und strukturierten Bereiche ausgebildet sind [18].

Dabei wurden die dilatometrischen Messungen mit dem Anteil der entsprechend umgewandelten Phase kalibriert. In den folgenden **Bildern 9-11** sind die Bainitsensor-Messungen in Abhängigkeit von der Bainitisierungsdauer aufgetragen. Während der Versuche wurden Parameter wie Bainitisierungstemperatur, Austenitierungstemperatur, Stahlorte und Austenitierungsdauer variiert. In allen Fällen ist das Signal des Bainitsensors vergleichbar mit den dilatometrischen Messungen, was eine sehr gute Näherung hinsichtlich der Bainitumwandlung ist.



**Bild 9.** Kalibrierter Bainitsensor und Dilatometermessung - Temperatureinfluss



**Bild 10.** Kalibrierter Bainitsensor und Dilatometermessung – Werkstoff- u. Zeiteinfluss

Mit dem Bainitsensor ergeben sich auch Möglichkeiten zu überwachen, ob die vorausgehende Austenitierung hinsichtlich der Bainitisierung ausreichend war, **Bild 11**. Nach einer Austenitierungsdauer von 3 und 5 Minuten ist die  $\alpha$ - $\gamma$  Umwandlung noch nicht vollständig abgeschlossen, und ein Anteil von Restferrit verbleibt. Der verbliebene Anteil des Ferrits wird zu Beginn der Bainitumwandlung durch einen Messwert der 1. Harmonischen von größer Null angezeigt.

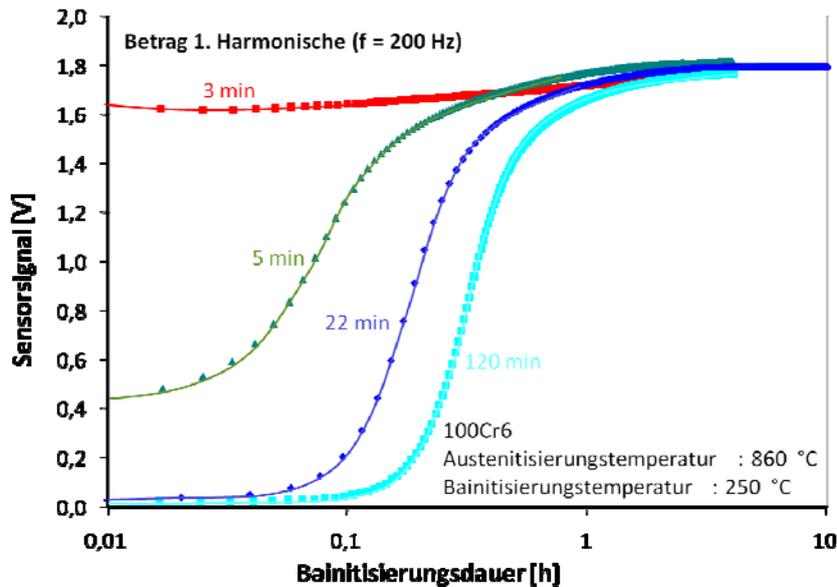


Bild 11. Kalibrierter Bainitsensor–unvollständige Umwandlung

#### 4. Diskussion

Online-in-situ-Messungen der Bainitumwandlung bei verschiedenen Temperaturen während isothermer Wärmebehandlungen können mittels Wirbelstromtechnik unter Anwendung der Harmonischen-Analyse realisiert werden. Der neu entwickelte und in verschiedenen Ausführungen gefertigte Bainitsensor wurde über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr bei Temperaturen von bis zu 450 °C eingesetzt und erprobt. Die Analyse verschiedener Sensorsignale bei isothermer Umwandlungen führt zu dem Ergebnis, dass die Amplitude der 1. Harmonischen bei einer Prüffrequenz von 200 Hz ein aussagekräftiges und zuverlässiges Signal liefert, mit dem das Stadium der Bainitumwandlung kalibriert und erfasst werden kann. Dieses Wirbelstromsignal ist sehr gut vergleichbar mit dilatometrischen Messungen und Schlibbild-Phasenanalysen. Auch ist die Wirbelstromtechnik wegen ihrer Robustheit und einfachen Handhabung für die industrielle Anwendung gut geeignet. Es muss aber immer beachtet werden, dass Wirbelstrommessungen in Abhängigkeit der Prüffrequenz und Werkstoffeigenschaften nur eine begrenzte Eindringtiefe haben. Daher stammt die Messinformation der Wirbelstromsignale bei höheren Prüffrequenzen und zunehmenden Umwandlungsgrad überwiegend aus der Bauteilrandzone. In den meisten Anwendungen ist der Oberflächenbereich jedoch maßgeblich für die Bauteileigenschaften. Eine Prüffrequenz von 200 Hz gewährleistet hier eine ausreichende Eindringtiefe und Informationen aus dem gesamten Prüfkörpervolumen.

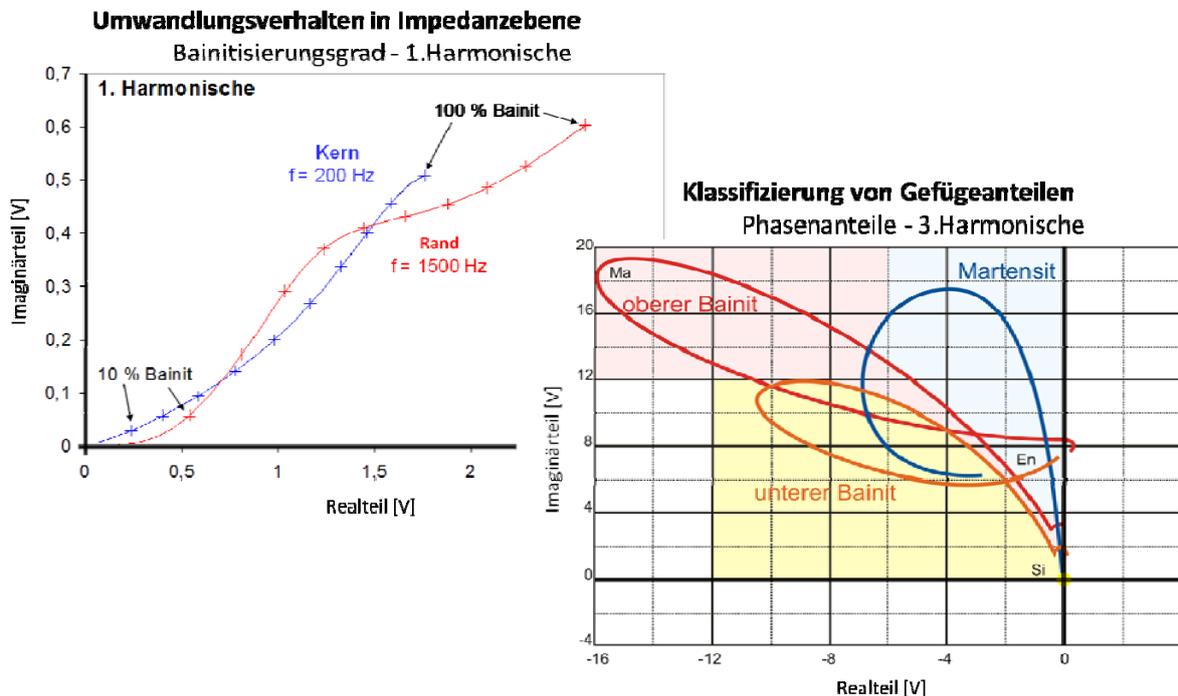
Die Untersuchungen zur Bainitumwandlung wurden an verschiedenen Probekörpern durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Bainitsensor zur Optimierung der Ankopplung an die Bauteilgeometrie anzupassen ist. In den Signalen des Wirbelstrom-Bainitsensor und insbesondere in den Höherharmonischen sind signifikante Informationen über die Phasenumwandlung und die ablaufenden Mechanismen in der Mikrostruktur enthalten. Insbesondere die 3. und 5. Harmonische zeigen sehr ausgeprägt im Zusammenhang mit dem Bainitierungsgrad charakteristische Signaländerungen in Abhängigkeit von mikrostrukturellen Veränderungen, die aufgrund der Kohlenstoffdiffusion, Ferritbildung, Martensitumwandlung, Karbidausscheidung sowie der Bildung neuer Korngrenzen und Restaustenitverteilung stattfinden. Diese Signalanteile sind bisher schwierig zu deuten, weil die begleitenden analytischen Methoden, die die notwendige hohe Auflösung haben, zur

Untersuchung der Mechanismen auf der Mikroskala nicht zur Verfügung stehen. Die Signalanteile spiegeln die Änderung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften wider, die während der Umwandlung ablaufen. Diese Signalvariationen müssen besser verstanden werden und mit den Gefügeänderungen des Werkstoffes korreliert werden. Zusätzliche Versuche sind erforderlich, um sich ein Bild von dem Informationsinhalt der Signale zu machen und um daraus weitere Erkenntnisse zu generieren.

Derzeit ist es ein großer Erfolg, dass die Amplitude der 1. Harmonischen der Prüffrequenz über eine Kalibrierung zum Bainitisierungsgrad eine recht genaue Ermittlung und Beschreibung ferromagnetischer Phasenanteile gegenüber dem verbleibenden Restaustenitanteil ermöglicht.

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Ein neues Wirbelstrom-Messsystem, basierend auf einem prozesstauglichen „Bainitsensor“, wurde zur zerstörungsfreien und berührungslosen Überwachung der isothermen Bainitumwandlungen entwickelt. Der Sensor basiert auf dem Wirbelstromverfahren unter Anwendung der Harmonischen-Analyse. Die Amplitude der 1. Harmonischen ist vergleichbar mit Dilatometermessungen und liefert über eine Kalibrierung quantitative Aussagen über den aktuellen Bainitisierungsgrad. Es konnte gezeigt werden, dass unter verschiedenen Austenitisierungs- und isothermen Umwandlungsbedingungen die Sensorsignale den dilatometrischen Messsignalen für unterschiedliche Stahlsorten entsprechen. Außerdem können so systematische Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf wie unvollständige Austenitisierung aufgezeigt werden.

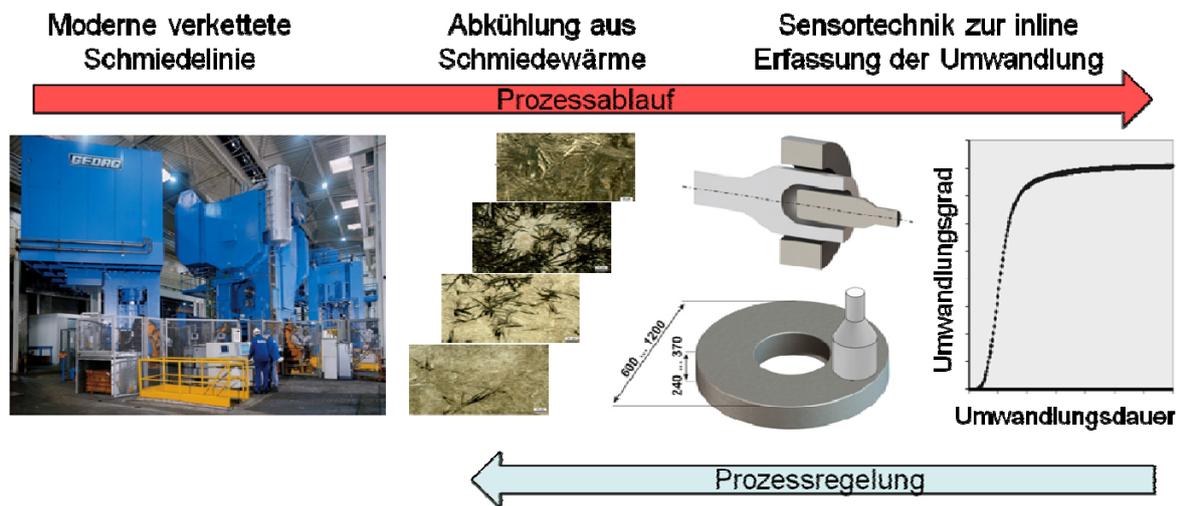


**Bild 12.** Umwandlungsverhalten und Gefügeausbildung

Änderungen der Stahlqualität und der Wärmebehandlungsabläufe beeinflussen die Umwandlungsdauer. Der Bainitsensor ermöglicht den Bainitisierungsgrad online im Prozessablauf zu verfolgen. Dieses ist von hohem Interesse im Hinblick auf eine zeitsparende Wärmebehandlung hochwertiger Bauteile um die Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz zu verbessern. Auch ermöglicht dies, den Umwandlungsprozess bei einer

zweistufigen Bainitumwandlung direkt zu verfolgen Gefügeanteile zu klassifizieren und über definierte Umwandlungsstufen im Prozessablauf zu steuern.

Mittels Messungen der Umwandlungsanteile ermöglicht der Bainitsensor, die Bereiche der zweistufigen Bainitumwandlung zu überwachen und vorausgewählte Fertigungsstufen zu kennzeichnen. Unter Anwendung dieses neu entwickelten Bainitsensors eröffnet die bainitische Härtung für hochwertige Bauteile neue Einsatzmöglichkeiten für die eine bestimmte Phasenzusammensetzung wie der Restaustenitgehalt reproduzierbar eingestellt werden kann. Der Bainitsensor ermöglicht einen direkten Einblick in den Umwandlungsprozess am aktuellen Bauteil und schafft damit weitere Möglichkeiten zur Einbeziehung neuer Werkstoffe und gezielten Einstellung von Mehrphasengefügen [9]. Hierbei kommen zwischenstufenvergütete Eisenwerkstoffe und Stähle für Schienen [12], Motoren-, Getriebe-, Lager-, Fahrwerk- und Gehäusebauteile sowie potentielle Werkstoffe für Hochleistungsbauteile in Frage. Die Anwendung dieses neu entwickelten Bainitsensors zeigt vielseitige Einsatzmöglichkeiten und verspricht hervorragende Ergebnisse hinsichtlich einer online Prozess-Steuerung zur Qualitätssicherung in der Fertigung und Wärmebehandlung.



**Bild 13.** Sensorgesteuerte Umwandlung in einer modernen Schmiedelinie für Hochleistungsbauteile

## 6. Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AIF 14241N) gefördert. Ferner danken die Autoren dem AWT Fachausschuss 20 "Sensorik in der Wärmebehandlung" für die konstruktive Diskussion, fachliche Betrachtung und Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

## Referenzen

- [1] Hengerer, F.; Lucas, G.; Nyberg, B.: Zwischenstufenumwandlung von Wälzlagerstählen. Härtereitechn. Mitt. 29, 1974, s. 71
- [2] Zoch, H.-W.: Wärmebehandlungsverfahren in der Wälzlagerfertigung. Härtereitechn. Mitt. 47 1992, s. 223
- [3] Bhadeshia, H. K. D. H.: The low bainite transformation and the significance of carbide precipitation. Acta metallurgica 28 1980, s. 1103
- [4] Klümper-Westkamp, H.; Hoffmann, F.; Mayr, P.: Neue werkstoffkundliche Qualitätssicherungsperspektiven durch in-situ Anlaßsensoren. FVA Forschungsreport, 1994

- [5] Schwendemann, H.: Die thermische Restaustenitstabilisierung bei den Stählen 100Cr6 und X210Cr12. Dissertation, Uni Karlsruhe, 1983
- [6] Klümper-Westkamp, H.: Entwicklung und Anwendung eines Nitriersensors zur in-situ-Erfassung des Nitrierprozesses. Dissertation, Uni Bremen, 1989; Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 5 Nr. 160, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989
- [7] Rodionova, S. S.; et. al, Interconnection between magnetic and mechanical properties and the structural state of steel for isothermal quenching. Russian Journal of Nondestructive Testing 33 1997 8, s. 521
- [8] Bida, G. V.; Nichipuruk A. P.; Tsarkova, T. P.: Magnetic properties of steels after quenching and tempering – In general carbon steels. Russian Journal of Nonde-structive Testing 37 2001 2, s. 79
- [9] Reimche, W.; Stegemann, D.; Feiste, K. L.; Reichert, Ch.; Heutling, B.: Non Linear Harmonic Analysis for the Determination of Steel Properties. Proc. 7th Annual Research Symposium of the ASNT, 23-27.5.98, Anaheim, California/USA, 1998
- [10] Stegemann, D.; Reimche, W.; Feiste, K.L.; Reichert, Ch.; Marques, P.: Determination of Hardness and Hardness Penetration Depth of Metal Components by Non Linear Harmonics Analysis. Proc. 9th Int. Symp. on Nondestructive Characterization of Materials, 28.6.-2.7.1999, Sydney/Australia, 1999
- [11] Hunkel, M.; Lübben, Th.; Hoffmann, F.; Mayr, P.: Modellierung der bainitischen und perlitischen Umwandlung bei Stählen. Härtereitechn. Mitt. 54 1999, s. 365
- [12] Sawley, K.; Kristan, J.: Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue. FFEMS 10 2003, s. 1019
- [13] Aaronson, H.-I.; Spanos, G.; Reynolds, W.-T.: A progress report on the definitions of bainite. Scripta Materialia 47 2002 3, s. 139
- [14] Quidort, D.; Brechet, Y.: The role of carbon on the kinetics of bainite transformation in steels. Scripta Materialia 47 2002 3, s. 151
- [15] Fang, H.-S.; Yang, J.-B.; Yang, Z.-G.; Bai, B.-Z.: The mechanism of bainite transformation in steels. Scripta Materialia 47 2002 3, s. 157
- [16] Hillert, M.: Paradigm shift for bainite. Scripta Materialia 47 2002, s. 175
- [17] Maier, H.-J.; Ahrens, U.: Isothermal bainitic transformation in low alloy steels: factors limiting prediction of the resulting material's properties. Z. Metallkd. 93 2002 7, s. 712
- [18] Vettters, H.; Bullerdiek, K.: Umwandlungsgefüge des Wälzlagerstahls 100 Cr 6. Sonderbände der Praktischen Metallographie 33 2002 41
- [19] Kaiser, P.: Bainitisch vergütetes Kaltband für Stanz-, Biege- und Formteile. Proc. EFB-Colloquium, „Prozessoptimierung in der Blechverarbeitung“, 13-14.03.01, Fellbach b. Stuttgart, Band T21, 2001, s. 4.1-4.9
- [20] Ölund, P.; Larsson, S.; Lund, T.: Properties of bainite hardened SAE52100 steel. Proc. 18th Conf. Heat Treating, 12-15.10.98, Rosemont/USA; ASM Int., Materials Park, 1999, s. 305
- [21] Bhadeshia, H. K. D. H.: Bainite in steels: transformations, microstructure and proper-ties. 2nd Ed., IOM Comm., London/GB, 2001
- [22] Feiste, K. L.: Entwicklung der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen zur Charakterisierung mechanischer Kugelgraphitgusseigenschaften. Dissertation Uni Hannover, 2003; Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Nr. 1006, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- [23] Reimche, W.; Feiste, K. L.; 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. Proc. 7th Conf. ECNDT, 26-29.5.98, Kopenhagen/Denmark, Vol. 3, No. 8, 1998
- [24] Vettters, H.: Wälzelemente aus 100Cr6, bainitisch umwandeln oder martensitisch härten. HTM Z. Werkst. Wärmebeh. Fertigung 57 2002 6, s. 403
- [25] Reimche, W.; Borsutzki, M.; Kroos, J.; Schneider, E.: Magnetische und akustische Verfahren zur Materialcharakterisierung von Stahlblechen Stahl und Eisen, Verein dt. Eisenhüttenleute (Hg.), ISSN 0340-479X, s.:115-121, 2000
- [26] Reimche, W.; Heutling, B.; Bach, Fr.-W.; Kroos, J.; Schulz, S.: Online-Materialcharakterisierung und Überwachung relevanter Bändeigenschaften von feuerverzinktem Stahlfeinblech im Produktionsfluss mit einem Harmonischen-Messsystem
- [27] Bernard, M.; Feiste, K. L.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.; Klümper-Westkamp, H.; Mayr, P.: Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes in Aufkohlungsfolien HK 2004, AWT, 58. Kolloquium für Wärmebehandlung, Wiesbaden, HTM-Härtereitechnische Mitteilungen, Band 57 (2002), Heft 5, Seite 364-371, 10. Oktober 2002