

# Frühzeitige Erfassung erhöhter Bauteilbeanspruchung mit lokalen Dehngrenzwertsensoren

Grzegorz MROZ\*, Wilfried REIMCHE\*, Friedrich-Wilhelm BACH\*

\*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

**Kurzfassung.** In dem vorliegenden Beitrag wird ein neu entwickeltes Sensorkonzept zur frühzeitigen Erfassung und Bewertung erhöhter Bauteilbelastungen und Belastungsfälle vorgestellt. Bei dem Verfahren werden neuartige Sensorwerkstoffe mit lokalen Dehngrenzwertsensoren eingesetzt, die durch eine örtliche Wärmebehandlung auf die zu erwartenden Belastungen abgestimmt werden und der eingestellte Martensitgehalt im Lebenszyklus des Bauteils sich in Abhängigkeit der ertragenen Belastung verändert, sodass eine Überbelastung frühzeitig erkannt und ein Bauteilversagen infolge Überbeanspruchung vermieden werden kann.

Zur schnellen messtechnischen Erfassung derartiger Gefügeausbildungen mit veränderten physikalischen Werkstoffeigenschaften ist die Niederfrequenz-Wirbelstromtechnik unter Anwendung der Harmonischen-Analyse besonders geeignet. Einen weiteren Ansatz zum berührungslosen Nachweis von plastischen Verformungen bieten Veränderungen in der Oberflächentopographie in Folge von Versetzungen und das Einsetzen von Gleitvorgängen im Werkstoff. Diese topographischen Veränderungen in der Bauteiloberfläche werden optisch mit einem mobilen Digital-Mikroskop sehr schnell erfasst und hinsichtlich plastischer Verformung ausgewertet. Zur Bewertung bleibender Verformung sind neben einem Bildvergleich der Oberflächenstruktur auch Rauheitskennwerte  $R_a$  und  $R_z$  geeignet, sowie eine Änderung der elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften nachweisbar über Wirbelstrom-Messwerte der 1. und 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals.

## Einführung

Zustandsüberwachung von hoch belasteten Bauteilen wird heutzutage in periodischen Wartungsintervallen durchgeführt, was mit hohen Ausfallzeiten und unnötigen Kosten verbunden ist. Neue Entwicklungen gehen in die Richtung einer kontinuierlichen sensorischen Überwachung der Belastungshistorie sowie der Bestimmung des Werkstoffzustands während des Betriebs. Dies erfordert die Integration von Belastungssensoren in das Bauteil um die Bauteilbeanspruchung zu erfassen und eine Kommunikation zwischen Bauteil und Überwachungssystem zu ermöglichen. Eine Zustandsüberwachung von Bauteilen und Anlagen bietet Möglichkeiten zur beanspruchungsorientierten Planung von Wartungsintervallen und bessern Inanspruchnahme des Nutzungspotentials im Lebenszyklus. Durch neuartige Überwachungssysteme können insbesondere bei sicherheitsrelevanten Bauteilen ein Bauteilversagen frühzeitig erkannt oder auch erhebliche Gewichtseinsparungen im

Leichtbau erreicht werden. Die Idee einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung mittels Sensorik ist nicht neu und wurde bereits in den zurückliegenden Jahrzehnten beispielsweise bei sicherheitsrelevanten Komponenten in Kerntechnischen Anlagen erprobt. Im Zusammenhang mit dem Leichtbau sind nach [1] die Anwendung von komplizierten Überwachungstechniken in Fahrzeugen und im Leichtbau aufgrund von Größe und Gewicht, ungeeignet.

## 1. Sensorkonzept

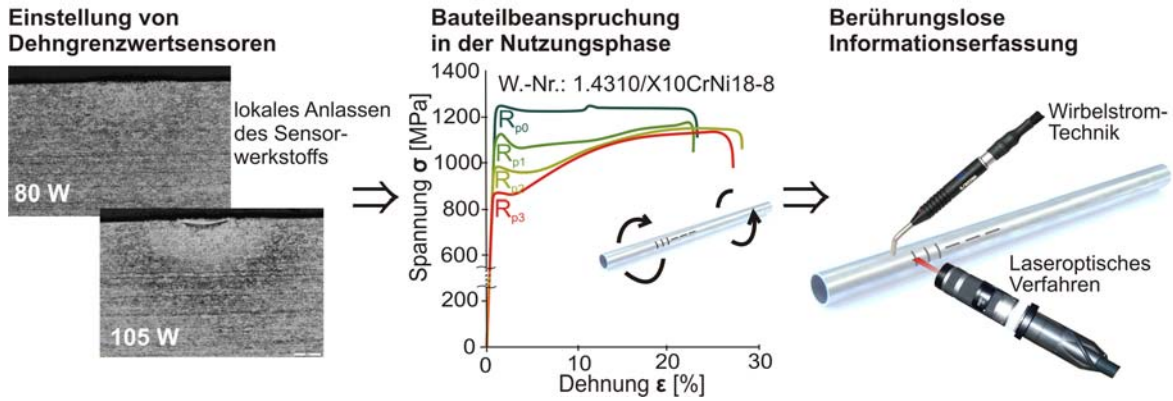
Die heutige Instandhaltung mit herkömmlichen Überwachungstechniken von komplexen hochbeanspruchten Bauteilen weist immer noch viele Unzulänglichkeiten auf. Das Ausfallverhalten von Bauteilen wird derzeit auf Basis von Zuverlässigkeitsmodellen beschrieben. Aktuelle Daten hinsichtlich eines möglichen Ausfalls in der Zukunft werden jedoch nicht kontinuierlich aufgenommen und sind häufig nicht eindeutig interpretierbar. Diese Defizite führen zu Engpässen oder zu Unterauslastung von Kapazitäten, da Ausfallzeitpunkte nicht exakt vorhergesagt werden können. Hierbei dienen gentelligente Bauteile zur Erfassung instandhaltungsrelevanter Prozessgrößen und zur Nutzung von vererbten Belastungshistorien für die Vorhersage möglicher Schadensfälle, Bild 1.



**Bild 1.** Belastungsempfindliche Gentelligente Fahrwerkskomponente: Gleichlaufgelenk, Spurstange

Die Bauteile sollen Informationen über ihre Belastung aus der Nutzungsphase in sich tragen und diese für die spätere Nutzung und eine Vererbung an die nächste Bauteilgeneration zur Verfügung stellen. Um das Sensorkonzept zu verifizieren wird eine Spurstange des Formula Student Rennwagen als Gentelligentes Bauteil genutzt. Der Begriff *gentelligent* wurde speziell für diese Bauteile geprägt und setzt sich aus den Begriffen „genetisch“ und „intelligent“ zusammen [2, 3, 4, 5]. In der Bauteilrandzone werden lokale Dehngrenzwertsensoren durch eine örtliche Wärmebehandlung auf die zu erwarteten Belastungen eingestellt. Eine Überbelastung wird zur Gefügeumwandlung mit der Änderung der physikalischen und optischen Eigenschaften des Sensorwerkstoffes führen und wird mit magnetinduktiven Prüfverfahren der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen und mit einem mobilen Digital-Mikroskop überwacht, Bild 2.

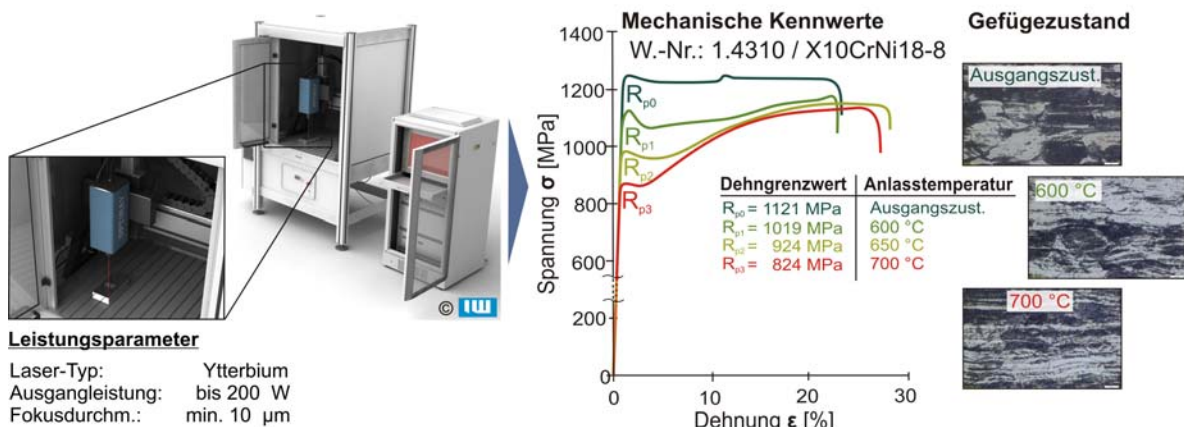
Die Realisierung von GI-Bauteilen mit einer inhärenten Datenspeicherung in der Bauteilrandzone und einer Erfassung der Belastungshistorie hinsichtlich der Restnutzungsdauer mit im Bauteil integrierten Sensorwerkstoffen ist die Zielsetzung im Teilprojekt S3 des Sonderforschungsbereichs **SFB 653 – „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus“**.



**Bild 2.** Konzept zur Erfassung der Belastungshistorie im Lebenszyklus

## 2. Belastungssensibilisierte Sensorwerkstoffe

Das neu entwickelte Konzept zur Realisierung von lokalen Belastungssensoren basiert auf der globalen Kaltverfestigung metastabiler austenitischer Werkstoffe und der lokalen Wärmebehandlung des gebildeten Martensit zur gezielten Einstellung definierter Dehngrenzwerte in begrenzten Werkstoffbereichen. Die Autoren haben in Vorarbeiten die Eignung zur Speicherung statisch-zyklischer Überbeanspruchungen von CrNi-Stählen untersucht [6, 7, 8, 9]. Dabei zeigte ein hochlegierter Titan-stabilisierter Werkstoff Nr.: 1.4571 eine nur geringe Neigung zur Martensitbildung. Im Gegensatz dazu hat der Werkstoff Nr.: 1.4310 mit geringeren Ni-, Cr- und Mn-Gehalten einen stark metastabilen Werkstoffzustand mit einer ausgeprägten Neigung zur Martensitbildung. Unter der genannten Zielsetzung wurde der Werkstoff Nr.: 1.4310 auf sein Verhalten unter verschiedenen Belastungsprofilen untersucht. Die Anpassung der Sensorfestigkeiten an die Bauteil-Belastungsspannungen und der Zusammenhang zwischen den mechanischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften für den Werkstoff Nr.: 1.4310 ist in Bild 3 dargestellt. Eine lokale Wärmebehandlung mit gestufter Energieeinbringung führt zum Anlassen des Martensit im austenitischen Grundgefüge in Stufen und zur Reduzierung von Festigkeits- und Dehngrenzwerten. Bei der Belastung wird ein Teil des Austenits im Sensorwerkstoff aufgrund des Überschreitens der Dehngrenze in Martensit umgewandelt. Der Mechanismus beeinflusst den Oberflächenzustand sowie die elektrischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften.

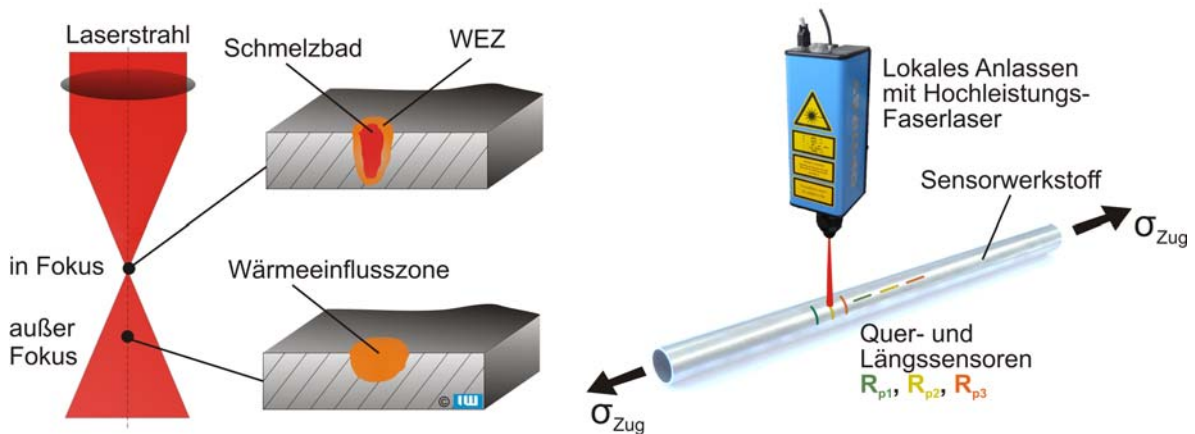


**Bild 3.** Einstellung von Bauteileigenschaften durch lokale Wärmebehandlung kaltverfestigter Proben

In der vorliegenden Arbeit wird der Zusammenhang zwischen der plastischen Verformung und Amplitude der 1. und 3. Harmonischen des Wirbelstromsignals, sowie den Rauheitskennwerten  $R_a$  und  $R_z$  der Oberflächentopographie beim Überschreiten der Dehngrenze in dem Sensorbereich aufgezeigt.

### 3. Einbringung von richtungsempfindlichen Dehngrenzwertsensoren

Zur lokalen Wärmebehandlung der Bauteiloberfläche wurde ein Hochleistungs-Faserlaser mit einem fokussierten Laserstrahl hoher Energieleistung eingesetzt, Bild 3 links. Es ist ein Ytterbium Faser-Laser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1075$  nm, einer Ausgangsleistung von bis zu 200 W, bei einem Fokussdurchmesser von 10...50  $\mu\text{m}$ . Der Laser ist in ein automatisiertes 4-Achsen-Handhabungssystem integriert. Die Fokussierung und Defokussierung bei verschiedenen Arbeitsgeschwindigkeiten, im Dauer- oder Pulsbetrieb bietet damit vielfältige Möglichkeiten zur lokalen Einbringung spezifischer Strahlenergien in die Bauteilrandzone.



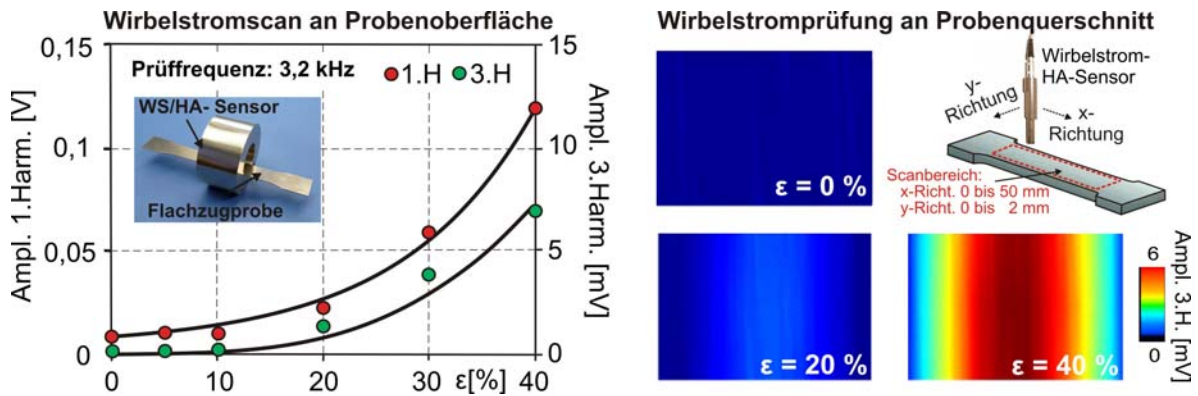
**Bild 4.** Fokussierung des Laserstrahls und Erzeugung von richtungsempfindlichen Dehngrenzwertsensoren

Zur Bewertung der Belastung und des Belastungsfalls wurden Belastungssensoren mit einer lokal definiert eingestellten Dehngrenze und einer über die Sensorgeometrie ausgeprägten Empfindlichkeit in einer Vorzugsrichtung entwickelt. Aufgrund der starken Fokussierung des Lasers wird schon bei geringen Laserleistungen und Streckenenergien eine Werkstoffumwandlung in einer schmalen und dünnen Randzone erreicht. Mit zunehmender Laserleistung variiert die Umwandlungszone in der Breite von 0,2 bis 0,6 mm und in der Tiefe von 0,1 bis 0,4 mm. Eine Kombination von mehreren Belastungssensoren mit verschiedenen Schwellwertspannungen, angepasst an den relevanten Belastungsbereich, führt zu einer feingestufteten Überwachung der Belastungsspannungen im Lebenszyklus, Bild 4.

### 4. Nachweis von Gefüge- und Phasenänderungen mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstrom-Signalen

Zur Ermittlung der bleibenden Dehnung plastisch verformter Bauteile, wurden Untersuchungen an Flachzugproben mit hochauflösender Wirbelstrom-C-Scan-Technik durchgeführt. Hierzu wurden die Proben des Werkstoffes 1.4310 in einer Zugmaschine stufenweise im Bereich von  $\epsilon = 5$  % bis  $\epsilon = 40$  % plastisch gedehnt und die Probenflächen mit einem durch ein Handhabungssystem geführten Wirbelstromsensor gescannt. Die

Informationsinhalte der ortsabhängig erfassten Wirbelstromsignale wurden aufbereitet und in Form von C-Bildern dargestellt. Hieraus resultiert die Möglichkeit, die geometrische Ausdehnung und Orientierung von Wirbelstromindikationen auf der Bauteiloberfläche anschaulich nachweisen. Die in Bild 5 rechts ortsabhängig dargestellten Wirbelstrom-Messwerte zeigen einen eindeutigen Zusammenhang mit zunehmender, plastischer Dehnung der Flachzugproben auf.



**Bild 5.** Ermittlung von lokalen und integralen Werkstoffeigenschaften mit Harmonischen-Analyse

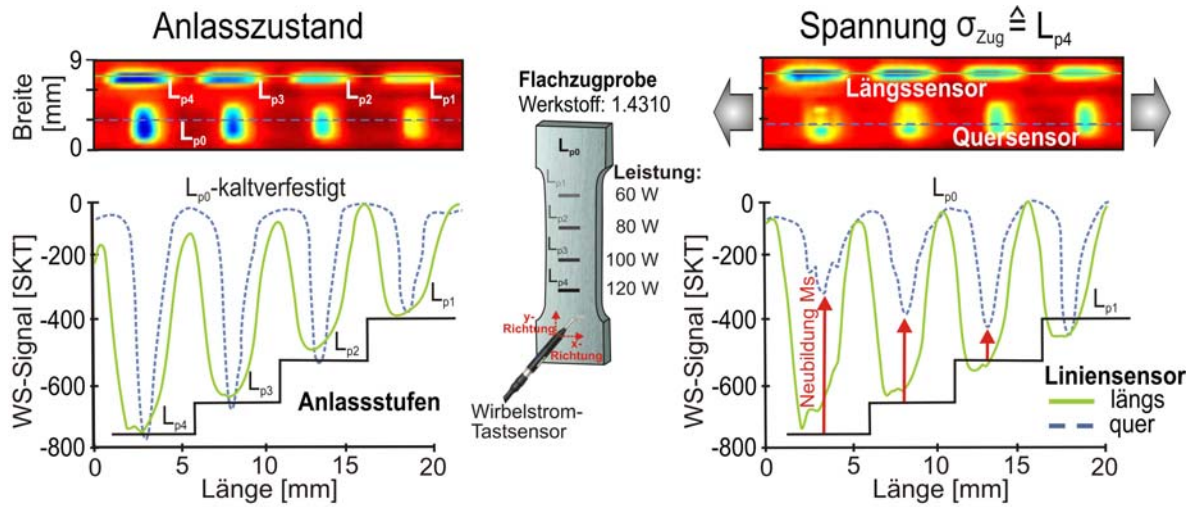
Die plastisch ungedehnten Kopfbereiche und Übergangsbereiche im Radienbereich der Proben heben sich deutlich von den gleichmäßig gedehnten Probenbereichen ab. In diesen kann mit zunehmender Dehnung bis  $\epsilon = 20\%$  ein kontinuierlicher Anstieg der Wirbelstrommesswerte beobachtet werden. Bei  $\sim 35\%$  plastischer Dehnung beginnt sich die Probe einzuschnüren, Bild 5 links. Eine weitere Dehnung der Flachzugprobe führt an dieser Stelle zur verstärkten Einschnürung, was aufgrund der starken Verformung in diesem Probenbereich auch mit einer starken Zunahme des Martensitgehaltes verbunden ist.

## 5. Erfassung der Bauteilbelastung mit diskreten Dehngrenzwertsensoren

Um das neuentwickelte Sensorkonzept zu verifizieren wurden Proben aus dem austenitischen Werkstoff Nr. 1.4310 kaltverfestigt und jeweils 2 Linienmuster in Längs- und Querrichtung mit verschiedenen Laserleistungen in 4 Stufen angelassen. Der Anlasszustand der Linienmuster kann mit einer speziell entwickelten Wirbelstromtechnik ausgemessen werden und zeigt eine gleichmäßig gestufte Ausbildung in beiden Richtungen entsprechend dem Anlasszustand, Bild 6 links.

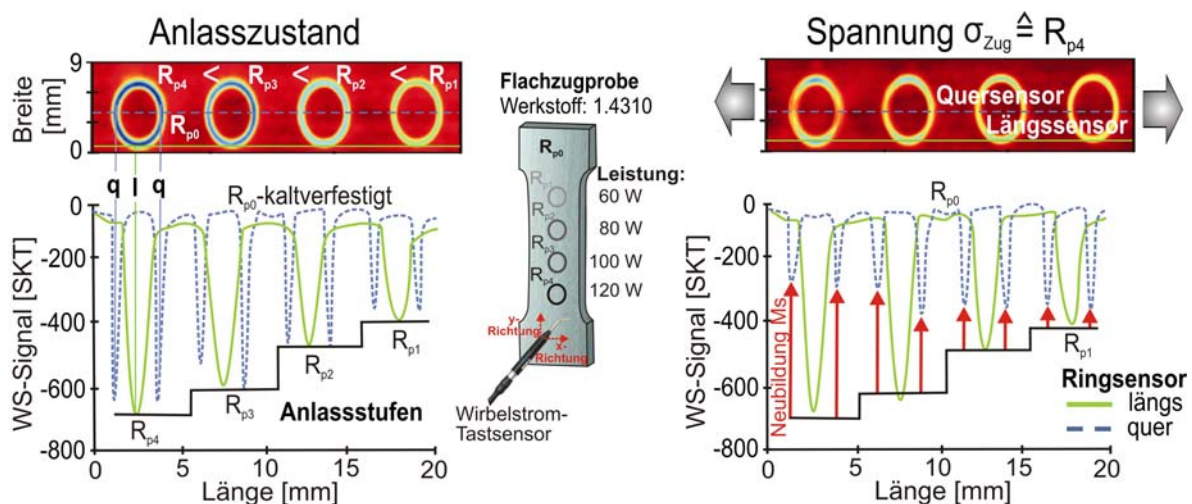
Durch den Zugversuch mit 1 % bleibender Dehnung werden die zuvor angestellten Überlegungen bestätigt: Linienmuster in Längsausrichtung der Proben werden durch die Zugbeanspruchung kaum beeinflusst, die Linienmuster in Querausrichtung dagegen bilden erneut Martensit unter plastischer Verformung und dies zunehmend, je stärker der Anlasszustand und geringer die lokalen Dehngrenzwerte im Sensorbereich sind, Bild 5 rechts. Bei einer Ausführung in Linienform zeigen die Belastungssensoren unterschiedliche Empfindlichkeiten bei ausgeprägten Normalspannungen in Längs- und Querrichtung hinsichtlich plastischer Verformung und Martensitbildung. Unter Belastung in Längsrichtung liegt der Liniensensor in paralleler Ausrichtung im Kraftverlauf und es erfolgt die Lastübertragung im Wesentlichen durch den angrenzenden höherfesten Sensorwerkstoff. Bei einer Belastung des Liniensensors in Querrichtung erfolgt der Kraftfluss in der Breite über den Belastungssensor und es kommt bei Belastungsspannungen oberhalb der Dehngrenze zu plastischer Verformung und erneuter

Martensitbildung im Linienbereich. Das Verhalten von Linien-Belastungssensoren durch aufgeprägte Normalspannungen im Zugversuch wurde bestätigt, wie in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6.** Nachweis von Zugbeanspruchung in Längsrichtung bei Überschreitung der lokalen Liniensensor-Dehngrenzwerte. Werkstoff Nr.: 1.4310, Laserleistung: 60, 80, 100, 120 W

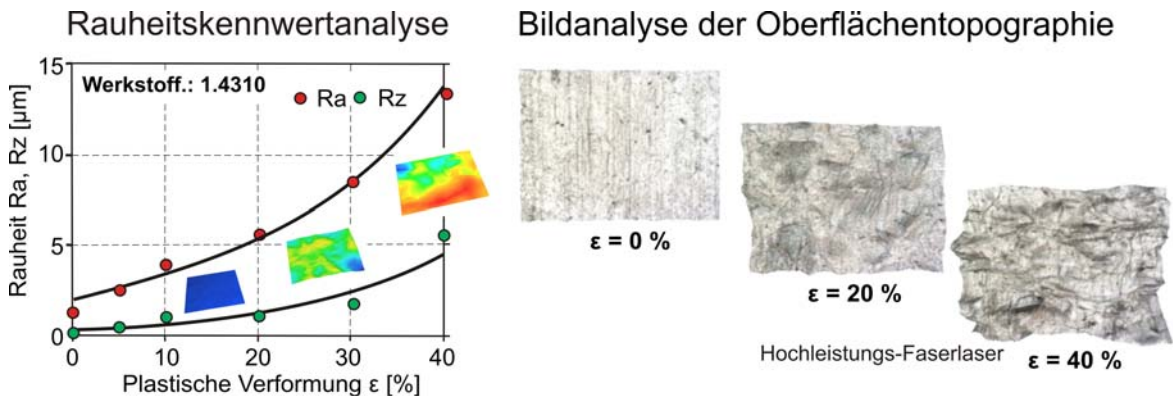
In Erweiterung des Liniensensors mit einer richtungsabhängigen Belastungsempfindlichkeit bieten Belastungssensoren in einer ausgeführten geometrischen Form als Kreis neue Möglichkeiten zur Erfassung von Belastungsspannungen unter mehreren Winkellagen und damit verschiedenen Sensorempfindlichkeiten zur Belastungsrichtung, Bild 7. Der Belastungssensor in Kreisform zeigt bei einer starken Wärmebehandlung und geringen Dehngrenzwerten ein frühzeitiges Ansprechen durch Martensitbildung bei Überschreitung der Dehngrenzwerte durch die aufgeprägte Belastungsspannung. Bezüglich der Belastungsrichtung zeigen Sensorbereiche in Querausrichtung zur Hauptspannungsrichtung eine starke Verformung und Martensitbildung, während Sensorbereiche in Längsrichtung nahezu unverändert bleiben.



**Bild 7.** Nachweis von Zugbeanspruchung in Längsrichtung bei Überschreitung der lokalen Kreissensor-Dehngrenzwerte. Werkstoff Nr.: 1.4310, Laserleistung: 60, 80, 100, 120 W

Die Überwachung der Oberflächentopographie bietet eine weitere Möglichkeit zum Nachweis plastischer Verformungen im Sensorbereich und damit der Sensorfunktion. Beim Einsetzen plastischer Verformungen kommt es aufgrund der Zunahme von Versetzungen und von Gleitvorgängen im Werkstoff zu Veränderungen in der Oberflächentopographie.

Diese topographischen Veränderungen in der Bauteiloberfläche werden optisch mit einem Digital-Mikroskop schnell erfasst und hinsichtlich plastischer Verformungen ausgewertet, Bild 8.



**Bild 8.** Einfluss plastischer Verformung auf die Oberflächentopographie

Auch die Vermessung der Oberflächentopographie von Sensorbereichen ermöglicht eine Erfassung und Aussagen über die Belastungshistorie. Da die als Sensor fungierenden Bereiche untrennbar mit dem Bauteil verbunden sind, ist eine Manipulation weitgehen ausgeschlossen.

## 6. Zusammenfassung

Vorgestellt wurde ein Sensorkonzept zur dauerhaften Erfassung der Belastungshistorie von hochbelasteten Bauteilen. Dabei war die Zielsetzung neben dem Nachweis der Bauteil-Belastungsspannung auch Aussagen über die Belastungsart zu machen. Diesbezüglich wurden Zugproben aus dem austenitischen Werkstoff Nr. 1.4310 hinsichtlich einer spannungs- bzw. dehnungsinduzierten Phasenumwandlung von Austenit in Martensit untersucht.

Die durchgeführten statischen Belastungsuntersuchungen haben aufgezeigt, dass es bei Überschreitung der lokalen Dehngrenze von richtungsempfindlichen Linien- und Kreisformsensoren durch die Belastungsspannungen unter plastischer Verformung zur Martensitbildung kommt. Damit bieten lokale Dehngrenzwertsensoren in verschiedenen geometrischen Ausrichtungen und Formen als kaskadierte, richtungsempfindliche Schwellwertsensoren in einem Sensorfeld neue Möglichkeiten zur Erfassung der Belastungshistorie hinsichtlich der aufgetretenen Belastungsspannungen und dem Belastungsfall über eine Martensit-Neubildung in entsprechenden Dehngrenzwert-Sensorbereichen. Die lokale Martensit-Neubildung ist entsprechend dem lokal eingestellten Dehngrenzwert ein Maß für die ertragene Bauteilbelastung und ist mit einer geeigneten hochauflösenden Wirbelstrom-Sensortechnik unter Anwendung der Harmonischen-Analyse nachweisbar.

Eine abschließende Erprobung und Qualifizierung der Belastungs-Sensorelemente auf einem Demonstratorbauteil wird unter realer Beanspruchung in einem Formula Student Rennwagen der Leibniz Universität Hannover erfolgen. Anhand gentelliger Bauteile wird der Integritätszustand ständig überprüft. So kann ein GI-Bauteil bei Bedarf aktiv eine Inspektion anfordern, oder ein Instandhaltungsplanungssystem greift auf die Daten des Bauteils zurück und kann so einen geeigneten Instandhaltungstermin sowie die erforderlichen Maßnahmen zeitnah festlegen. Dies wird die Effizienz des Instandhaltungsprozesses deutlich erhöhen.

## 7. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 653 (SFB 653) „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus- Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik“. Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

## Referenzen

- [1] Meyendorf, N.: Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik- speziell in Bahn und Flugzeug. ISSN 1864-6972, 2007
- [2] <http://www.sfb653.uni-hannover.de>, Stand 2011
- [3] Reimche, W.; Mroz, G.; Bach, Fr.-W.: Bauteil, Verfahren zum Einbringen von Informationen in ein Bauteil und Verfahren zum Ermitteln einer Belastungshistorie eines Bauteils, Patent DE102009056584 A1, 2009
- [4] Reimche, W.; Mroz, G.; Bach, Fr.-W.: Bauteil, Verfahren zum Einbringen von Informationen in ein Bauteil und Verfahren zum Ermitteln einer Belastungshistorie eines Bauteils, Patent WO201166816 A1, 2011
- [5] Denkena, B., Henning, H., Lorenzen, L.-E.: Genetics and intelligence: new approaches in production engineering, Production Engineering, Vol. 4, No. 1, 2010
- [6] Komber, T.; Feiste, K. L.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Zerstörungsfreie elektromagnetische Bestimmung der Kaltverformung und Materialermüdung austenitischer Werkstoffe, Werkstoffprüfung 2003, Bad Neuenahr-Ahrweiler, ISBN 3-514-00703-9, 2003
- [7] Reimche, W.; Mroz, G.; Bach, Fr.-W.: Acquisition of Discrete Component and Loading Information in the Component's Edge Region Using Innovative Sensor Technology in 4th I\*PROMS 2008 Virtual International Conference on Innovative Production Machines and Systems, 1.-14. July 2008, special session: Gentelligent Components in their Lifecycle, 2008
- [8] Reimche, W.; Mroz, G.; Bruchwald, O.; Bach, Fr.-W.: Bauteilinhärente Belastungssensoren und Informationsspeicherung in der Randzone, Tagung Werkstoffprüfung 2009, ISBN 978-3-514-00769-7, Bad Neuenahr, 2009, S. 383-390
- [9] Bormann, D.; Bach, Fr.-W.; Klose, C.; Rodman, M.; Reimche, W.; Mroz, G. et al.: Werkstoffe mit sensorischen Eigenschaften für optimierte Wartungsintervalle, 10. Luft- und Raumfahrtseminar Garbsen, Hannover, 2010