

Dynamische Belastungsmessung in Spannbetonkonstruktionen mittels schneller Abtastung von Wirbelstromsensoren

Werner RICKEN, Holger Christian SCHOENEKES, Wolf-Jürgen BECKER,
Alexander WELZ, Fachbereich Elektrotechnik / Informatik, Fachgebiet Messtechnik,
Universität Kassel
Ekkehard FEHLING, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Massivbau,
Universität Kassel

Kurzfassung: In diesem Beitrag wird ein Messsystem vorgestellt, welches nach dem Prinzip der Wirbelstrommessung dynamische Lasten der Frequenzen $f < 20$ Hz in zugbelasteten Spannstählen erfasst. Die Sensorik zeichnet sich durch die hohe Messgeschwindigkeit sowie eine geringe Leistungsaufnahme aus. Das entwickelte Sensor-Array kann durch seine „Clamp-On“ Technik im Baustelleneinsatz einfach montiert werden. Ungenauigkeiten bei der Anbringung werden durch die Anwendung des Prinzips der Sensor-Datenfusion minimiert. Die Arbeitspunktstabilisierung und Kalibrierung des Messobjektes erfolgt durch die Justierung eines radial zur Messstelle ausgerichteten Magnetfeldes. Verifiziert wird das Sensorkonzept durch eine theoretische Vorbetrachtung und die Modellbildung des Wirbelstrom-Sensors zur Bestimmung der mechanischen Spannung mit der finiten Elemente Methode.

1. Einleitung

Die schrecklichen Ereignisse bis zum Bauwerksversagen infolge von Überbeanspruchung durch Schneemassen in Deutschland, Österreich, Polen, und Russland haben noch einmal mehr deutlich gemacht, wie wichtig eine stetige und andauernde Zustandsüberwachung von Baukonstruktionen ist. Ein Langzeit-Monitoring mit den verschiedensten Messtechniken existiert derzeit nur bei besonders kritischen Bauwerken, wie beim Staudamm-, Hochhaus-, Tunnel- oder Brückenbau. Als ein erstrebenswertes Ziel gilt daher der kostengünstige und flächendeckende Einsatz einer leicht zu montierenden und robusten Messtechnik zur dauerhaften Überwachung der Spannungsbelastung in Stahlbetonelementen.

Es gibt bereits einige Überwachungstechniken am Markt, die Aussagen über die Bauwerksbelastung treffen. Hierzu gehören optische Verfahren, welche durch Dehnung von Glasfaserlichtleitern die Anregung von Licht-Moden ausnutzt. Der Einsatz von Dehnungsmessstreifen ist wegen der Kurzlebigkeit ihrer Klebung in dieser Arbeitsumgebung nicht empfehlenswert.

Zu nennen sind jedoch induktive und transformatorisch wirkende Verfahren, welche die Änderungen magnetischer Größen im zugbelasteten Spannstahl auswerten, um auf vorherrschende Spannungszustände schließen zu können. Bei dem Verfahren, das beispielsweise die Universität Braunschweig einsetzt, wird ein unter mechanischer Spannung stehender ferromagnetischer Stahl zyklisch magnetisiert um über die Gestalt und Form des Ummagnetisierungsverlaufs (BH-Kurve) auf die aktuelle Belastung zu schließen. Diese Messtechnik benötigt sowohl eine hohe Magnetisierungsleistung als auch eine

längere Zeit zur Erfassung der einzelnen Messzyklen. Daher kam die Fragestellung nach einer robusten, schnellen und kostengünstigen Messtechnik zur Bestimmung von Spannungen in Stahlelementen auf [3,4,5].

2. Messprinzip und Sensorik

Die Kopplung zwischen mechanischer Dehnung und der Änderung der magnetischen Eigenschaften ferromagnetischer Materialien, wie z.B. Stahl, wird durch den Villari-Effekt beschrieben [8]. Makroskopisch messbar ist die Änderung der Permeabilität des Materials über die Auswertung der Induktivität einer gekoppelten Spule.

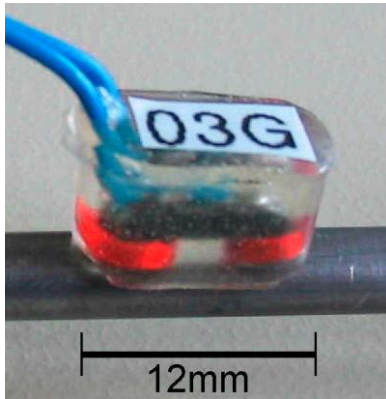


Abb.1 Wirbelstromsensor mit Ferritkern auf 5 mm Spannstahl

Die Messung erfolgt bei 1000 Hz, wobei sich eine optimale Erregung des Stahls durch die Spule bei gewählter Geometrie und vorgegebenen Windungszahl bei etwa 65 mA einstellt. Verwendet wurden hierbei Ferritkerne vom Typ E8.8 mm der Firma EPCOS mit der Materialkennung N30, bei welchen auf den äußeren Schenkeln je eine Spule mit ca. 100 bis 125 Windungen aufgebracht wurde. Das Prinzip der Zugspannungsmessung zeigt Abbildung 1 [9,10,11,12].

Die Aufgabenstellung bestand darin, einen Wirbelstromsensor so auf dem Prüfsteel zu applizieren, dass er dauerhaft einbettbar in einer Beton-Stahllumgebung ist. Da die zu untersuchende Stahllitzen sechs einzelne Außendrähte aufweisen, die sich innerhalb einer bestimmten Schlaglänge um den Herzdraht winden, wurde als einfaches Grundkonzept ein Wirbelstromsensor, bestehend aus sechs seriell verschalteten Ferritkernspulen vorgesehen. Die Ferrite wurden dabei an die Kontur der Stahloberfläche angepasst um den Luftspalt zu minimieren. Dieser Ansatz birgt gleich mehrere Vorteile: Montagebedingte Induktivitätsschwankungen durch Unebenheiten an der Litzenoberfläche können durch die Mittelung der Messergebnisse aller sechs Einzelsensoren ausglich werden [13,14,15,16]. Durch den Ansatz der Sensor-Datenfusion kann außerdem eine Einzelauswertung der sechs Spulen erfolgen und somit mit statistischen Methoden systematische Messabweichungen korrigiert werden. Der Bruch eines Außendrahtes würde durch Messung der entsprechenden Spule sofort angezeigt. Zudem begünstigt ein symmetrischer Aufbau des Sensors eine optimale Ummantelung der Gesamtkonstruktion. Die Leistungsaufnahme

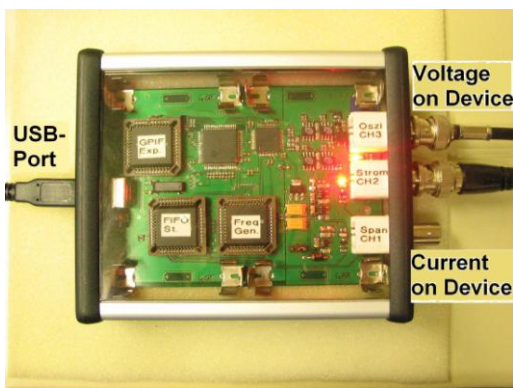


Abb.2 Dimlab128-USB Impedanz Messgerät mit USB-Interface

eines Sensor-Arrays von 6 Ferritspulen beträgt maximal 250 mW, was deutlich geringer ist als bei vergleichbaren Prüftechniken. Um eine schnelle und komfortable Induktivitätsmessung netzunabhängig durchführen zu können, wurde der Impedanzanalysator DIMLAB128-USB entwickelt, mit dem eine Messung der Induktivität bei variabler Frequenz zwischen 1 Hz und 10 MHz und einer einstellbaren Stromstärke zwischen 0.1-100 mA möglich ist. Durch eine Samplingrate von 125 MS/s sind Induktivitätsmessungen bei oszillierenden Zugspannungen noch weit über den geforderten 20 Hz möglich.

3. FEM-Simulation

Bei der Simulation wurden zunächst zwei mögliche Messanordnungen untersucht. Zuerst wurde der mit Spulen bewickelte Ferritkern auf der Stahloberfläche platziert und magnetisch erregt. Danach ist die magnetische Kopplung zweier Ringmagnete mit der gleichen Wirbelstromspulenanordnung in einem zweiten Modell eingeführt worden, welche zu einer magnetischen Stabilisierung des Arbeitspunktes bei der Induktivitätsmessung führen soll. Hierzu wurden alle Geometrie- und Materialgrößen, sowie die Erregung und die Frequenz berücksichtigt. Während bei der Anordnung ohne Magnete die eindringende Stromdichte weiter in das Material eintritt, kann über die Richtung der Vormagnetisierung im Stahl unter dem Ferritkern keine Aussage getroffen werden (siehe Abbildung 3). In Abbildung 4, unter Einbeziehung der Magnetringe, ist jedoch zu erkennen, dass die Magnetisierung unter dem Ferritkern in Ruhelage immer senkrecht steht, es sei denn, der Stahl steht unter Zugbelastung. Die Eindringtiefe fällt in Abhängigkeit vom Abstand der Magnete zum Ferrit hingegen geringer aus. Dadurch werden höhere Wirbelstromdichten in einem kleineren Stahlvolumen erreicht. Die erregende Ferritspule moduliert nun den Arbeitspunkt der differentiellen Magnetisierung des Stahls an der Messstelle und dies geschieht in Abhängigkeit der eingebrachten mechanischen Zugspannung.

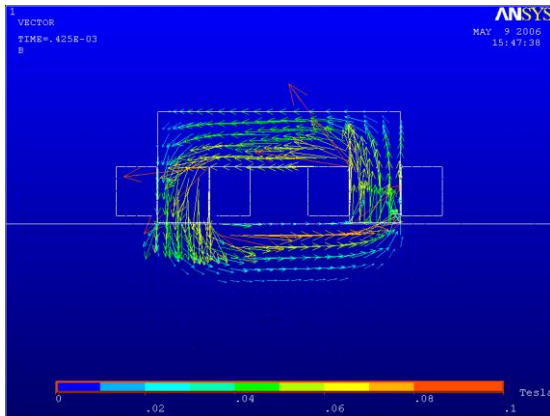


Abb.3 Flussdichte in Ferritspulen auf Stahl ohne Magnete

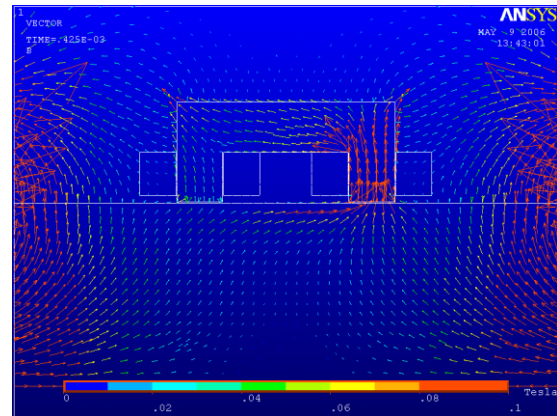


Abb.4 Ferrit mit Spulen auf Stahl mit NdFeB Magneten

Da bei FEM-Programmen generell kein Zusammenhang zwischen mechanischer Zugspannung und den daraus resultierenden Änderungen der magnetischen Größen hergestellt werden kann, sind diese Simulationen als statische Berechnung für die Arbeitspunkteinstellung zu verstehen.

4. Stabilisierung des Arbeitspunktes der Zugspannungsmessung

Der optimale Frequenzbereich des Sensors reduziert sich mit steigender Windungszahl, da die Kapazitäten der Wicklungslagen und die steigende Streuinduktivität der gegenüberliegenden Wicklungen die Spulengüte reduzieren. Ein weiterer Grund für die Wahl eines niedrigen Frequenzbereiches liegt in der starken Reduktion der Eindringtiefe des magnetischen Feldes. Bei einer Frequenzwahl weit unter 1 kHz kam es zu einer ausgeprägten Hysterese der Induktivität zwischen den Be- und Entlastungszuständen des Stahls. Die besten Ergebnisse wurden bei Frequenzen weit oberhalb dieses Frequenzbereiches erreicht. Hinsichtlich der Problematik der Eindringtiefe ist daher eine Arbeitsfrequenz von 1 kHz ein guter Kompromiss. Für den eingesetzten Ferritkerntyp sollte

die Wicklungszahl bei Stromstärken von 35 mA nicht größer als 250 und nicht kleiner als 80 sein um eine angemessene Erregung des Stahls zu erreichen, da sonst die Messempfindlichkeit bzw. die zugbedingten Änderung von L_s and R_s zu gering wäre [9,10,11,12]. Der oben beschriebene Hystereseeffekt tritt während der Induktivitätsmessung auf, da sich der Magnetisierungszustand des Stahls während der Zugbelastung ändert.

$$\left. \frac{dB}{d\sigma} \right|_H = \left. \frac{d\lambda}{dH} \right|_\sigma \quad \text{mit} \quad B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (1)$$

Die Umwandlung von mechanischer in magnetische Energie erfolgt nach der o.g. Relation (1) bei kleinen Amplituden ohne irreversiblen Speicherprozess. Der magnetostruktive Koeffizient λ stellt somit die magnetomechanische Empfindlichkeit dar, wobei $(d\lambda/dH)_\sigma$ die Änderung der Magnetostruktion bei Variation des magnetischen Feldes und konstanter Spannung ist. $(dB/d\sigma)_H$ sei die Änderung der magnetischen Flussdichte bei Variation der mechanischen Spannung und konstantem magnetischen Feld. Dies bedeutet, dass gerade Werkstoffe mit großen magnetostruktiven Koeffizienten eine hohe Messempfindlichkeit der magnetomechanischen Spannungsmessung erreichen. Stähle der Sorte St1860 tendieren jedoch zu magnetischer Härte mit steigender Remanenz, hoher Koerzitivfeldstärke und schwacher negativer Magnetostruktion.

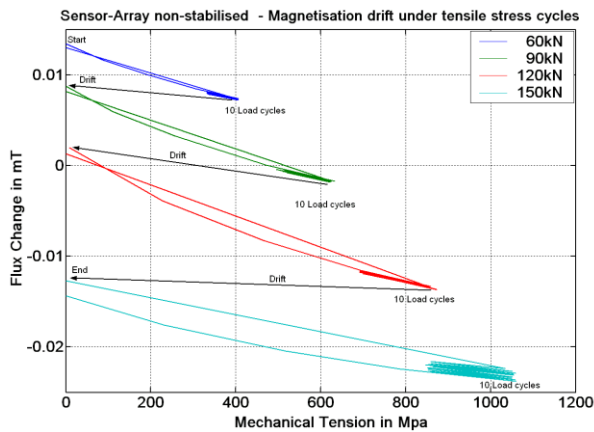


Abb.5 Flussdichteänderung nach mehreren Lastzyklen ohne Ringmagnet Stabilisierung

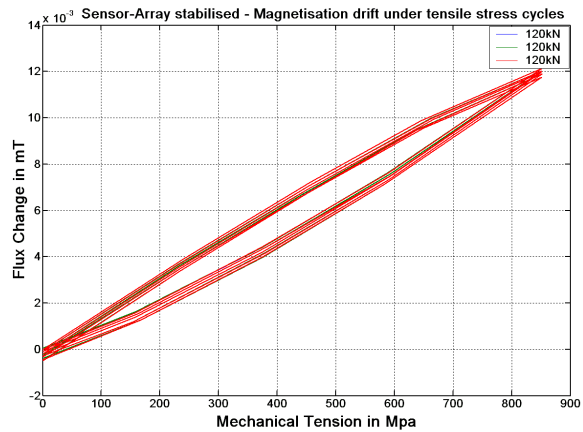


Abb.6 Flussdichteänderung nach mehreren Lastzyklen mit Ringmagnet Stabilisierung

Abbildung 5 zeigt eine starke Verschiebung der Messkurve aufgrund der Remanenz im Stahl während mehrerer Lastzyklen. Dabei ist die Richtung des Versatzes abhängig von der magnetischen Vorgeschichte des Stahls. Die Messung der Flussdichte im Stahl während mehrerer Lastzyklen hat gezeigt, dass dieser eine Aufmagnetisierung durch die Zugbelastung erfährt. Im Fall der Arbeitspunkteinstellung mit Ringmagneten stabilisiert sich der magnetische Zustand im Stahl deutlich. Abbildung 6 veranschaulicht die Wiederholgenauigkeit der Flussmessung von drei Lastintervallen zu je 10 Zyklen.

Der Offset, als Folge der Remanenz bzw. Magnetisierung im zyklisch zugbelasteten Stahl, wie in Abbildung 5 gezeigt, wirkt sich zwangsläufig auf die Messung der Induktivität aus:

$$dL = \frac{d\hat{B}(t) \cdot A \cdot N}{H \cdot l} \quad \text{mit} \quad L = \text{Induktivität}; B = \text{Flussdichte}; A = \text{Fläche}; \quad (2)$$

N = Windungszahl; l = Kreislänge; H = m. Feldstärke

Falls ein Material nun eine positive Magnetostruktion (siehe Abbildung 7c) aufweist, zeigt die unter Zugbelastung gemessene Induktivität, wie in Abbildung 7a gezeigt, ebenfalls positive Änderungen. Wenn aber ein Material, wie St1860 durch seine Eigenspannung bedingt, eine negative Magnetostruktion (siehe Abbildung 7d) besitzt, so wird die unter Zug-

belastung gemessene Induktivitätsänderung, wie in Abbildung 7a gezeigt, negativ ausfallen. Bei beiden Messungen war eine Hysterese zwischen dem Startpunkt und dem Endpunkt der Last aufgrund der belastungsbedingten Remanenzänderung in den Stählen zu verzeichnen.

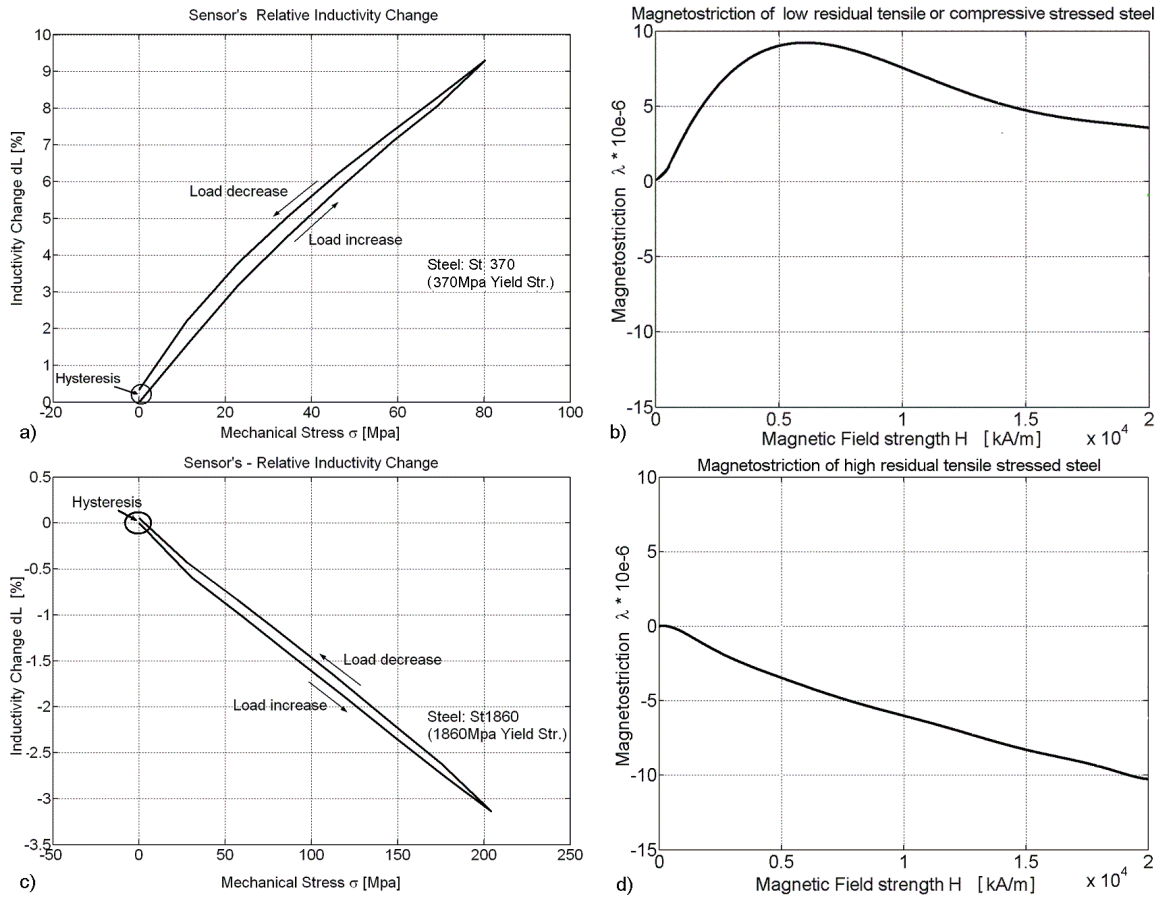


Abb.7 Gegenüberstellung von Induktivitätsmessungen an negativ- und positiv-magnetostruktivem Stahlproben.

Die Simulationen und messtechnische Untersuchungen haben ergeben, dass ein statisches Magnetfeld eine Stabilisierung des magnetischen Arbeitspunktes ermöglicht. Die magnetische Anordnung der Pole ist dabei wie in Abb. 9 zu wählen. Aufgrund der hierdurch erzielten radialen Magnetisierung des Stahl im Bereich der Messspule, ergibt eine Verstärkung des magnetischen Flusses in den Schenkeln der Ferritkerne.

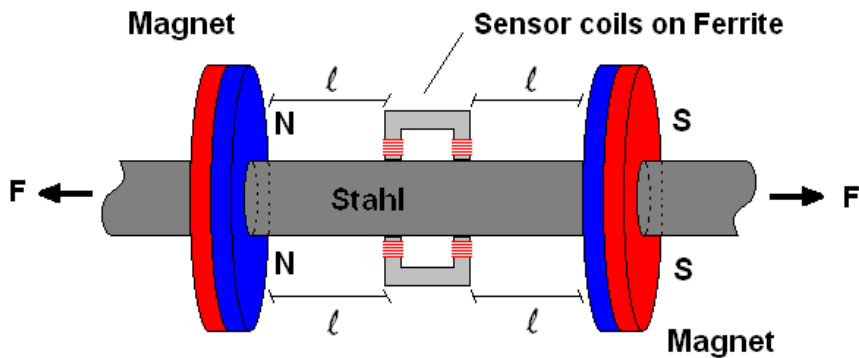


Abb. 9 Ferrispulen von Neodym-Magnetringe eingeschlossen auf Spannstahlmitze.

Über den Abstand der Magnete zum Ferritkern und die Magnetfeldstärke ist die Empfindlichkeit der Sensoren einstellbar. Hierbei kann außerdem der Anfangswert der Sensorinduktivität festgelegt werden. Durch das eingebrachte radiale Feld im Stahl am Ort der Wirbelstrommessung entsteht nun eine starke Verringerung der Remanenz infolge des magnetoelastischen Effekts. Durch das magnetische Gleichfeld kann der Offset der Sensorkennlinie infolge magnetischer Remanenz deutlich verringert werden. Ohne den Einsatz der Ringmagnete muss hier mit einer von der Spannungsanisotropie verursachten Remanenz bis zu 10 mT/100 MPa nach einem Lastzyklus gerechnet werden.

5. Messergebnisse

Eine Prüfstahlhitze der Güte St1860 wurde in eine 250 kN Zuganlage eingespannt und wie in Abbildung 10 zyklisch belastet. Die Dynamik wurde hierbei im Sekundenbereich gewählt um einen sichtbareren Vergleich zu den Messergebnissen der Wirbelstromsensor-Arrays zu haben. Die Sensor-Arrays wurden im Abstand von etwa 250 mm platziert, wobei nur zwei Arrays mit Magnetringen stabilisiert wurden. Danach folgten mehrere Lastzyklen von 0-1000 MPa um die Empfindlichkeit der Sensoren bestimmen zu können. Die Empfindlichkeit der Sensorapplikation lag dabei zwischen

0.025% / MPa und 0.03% / MPa

nach gegebener Rechenvorschrift

$$\frac{L_{\sigma 1} - L_{\sigma 0}}{100 \text{ Mpa} \cdot L_0} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Nach der Kalibrierung wurde ein Tag gewartet um mit den zyklischen Messungen zu beginnen. Der Stahl wurde dabei unter 50 MPa Spannung belassen. Der Messaufbau ist in Abbildung 10 illustriert.

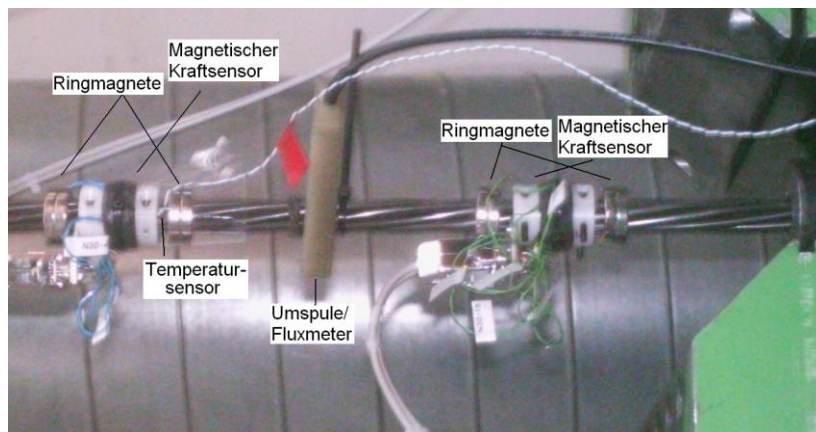


Abb. 10 Spannstahl St1860 in Zuganlage mit den Sensorarrays 1 und 2 mit Ringmagneten Flusssonde und Temperatursensor

Der Spannstahl wurde innerhalb eines Kraftfensters von 5 und 120 kN belastet. Auf die Fläche des Stahls ($A_{st}=140 \text{ mm}^2$) bezogen lag die maximale Belastung hier bei ca. 860 MPa (siehe dazu den Kraftverlauf in Abbildung 11).

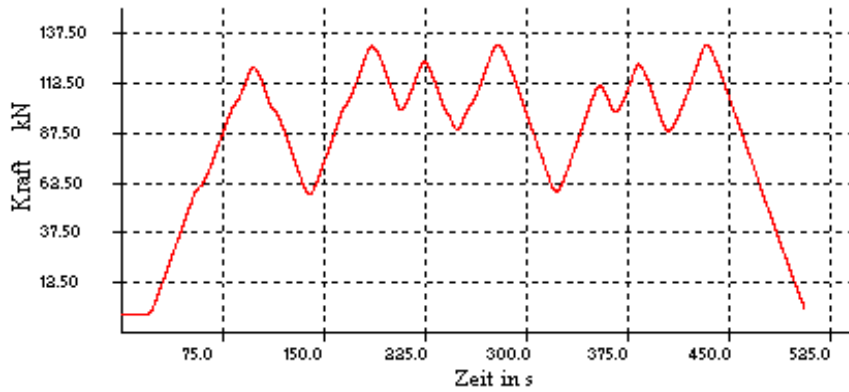


Abb. 11 Mechanische Zugspannungsanregung der Spannstahtlitze

Alle drei verwendeten Sensor-Arrays gaben den gleichen Spannungsverlauf wieder, den die Zuanlage vorgab. Da mit drei Arrays gleichzeitig gemessen wurde, musste eine Multiplexung durchgeführt werden. Für einen optimalen Schaltvorgang wurden Relais mit Goldkontakten eingesetzt. Während die unter magnetischem Einfluss stehenden Arrays 1 und 2 auch nach längerer Belastungspause keine nennenswerte Drift des Arbeitspunktes erfuhren, ist dieser Effekt bei Sensor 3 infolge der Aufmagnetisierung der Stahtlitze deutlich erkennbar, (siehe Abbildung 7). Hier kam es zu einer Drift von 150 MPa bei einer maximalen Spannung von 850 MPa, was bei der Anfangsinduktivität zu Änderungen bis zu 17% führte [16].

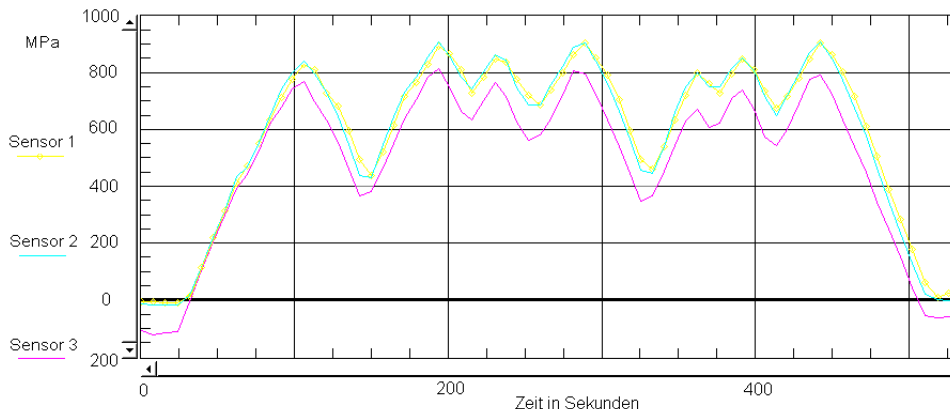


Abb. 12 Messergebnisse von drei im Abstand von 250mm platzierten Wirbelstromarrays auf der Spannstahtlitze.

Die beiden stabilisierten Sensoren wiesen Schwankungen der Induktivität von unter 3% auf. Dies kann jedoch unter Umständen an Temperaturänderungen, Fehlern bei der Zuanlage oder an der Krümmung des Stahts liegen und muss weiter untersucht werden. Vorallem ist eine Temperaturkompensation des gesamten Systems im weiteren erforderlich.

6. Zusammenfassung/Ausblick

Mit dem Messsystem DIMLAB128-USB ist es möglich, nach Bestimmung der Empfindlichkeit der Wirbelstromsensorik mechanische Spannungen in Spannstahten zu erfassen. Die Messtechnik kann mit Hilfe des DIMLAB128-USB mobil zum Einsatz am Bauwerk gebracht werden. Die Leistungsaufnahme ist mit etwa 250 mW pro Array deutlich geringer als bei vergleichbaren Messsystemen [6,7]. Die Geschwindigkeit der Messtechnik ist angepasst an die dynamischen Lastwechsel, die auf Brücken vorherrschen können. Die

Energieaufnahme der Sensorik kann über Batteriebetrieb bzw. über den USB-Port eines Notebooks erfolgen. Die zur Speicherung und Auswertung notwendige Software kann universell angepasst werden und verfeinert werden. Eine Temperaturkompensation des gesamten Messsystems ermöglicht in Zukunft eine weitere Genauigkeitssteigerung.

Literatur

- [1] Geier, R.; Petz, J.: Kraftbestimmung in Schrägseilen durch dynamische Messungen, Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 12 2004.
- [2] Laube, M.; Wichmann, H.J.: Vorspannungsmessungen mit einem magnetoelastischen Messverfahren, GESA-Syposium, Tagung Braunschweig, 12. und 13. Juni 2003, VDI-Berichte 1757.
- [3] Wiese, S.; Kowalski, W.; Jannsen, B.; Jacob, A.; Wichern, J.; Grahn, W.; Hariri, K.; Budelmann, H., "Innovative Sensors for the Assessment of Durability and Load-Capacity of Concrete Structures" in Jávör, T. (Ed.) Proceedings of the "RILEM-ACI-OECD International Conference on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures", 1999, Bratislava, Slovakia.
- [4] Hariri, K.; Budelmann, H., "Assessment of the Load-Capacity of Prestressed Concrete Structures by Means of Innovative Measurement Techniques" in: "Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring", September 8-10 1999, Stanford, USA, 474.
- [5] Budelmann, H.; Hariri, k.; Schmidt-Döhl, f.; Rostásy, F.S., Monitoring of reinforced and prestressed concrete structures, in "International Workshop on the present and future in health monitoring", Weimar, September 2000.
- [6] Jarosevic, Magnetoelastic method of stress measurement in steel, Faculty of Mathematics and Physics, Comenius University, Mlynska dolina F2, 842 15 Bratislava, Slovakia, e-mail: jarosevic@fmph.uniba.sk.
- [7] Dobmann, G.: Messung der Vorspannung mit mikromagnetischen Methoden, Internationales Symposium „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“, DGZfP, 27.Febr.-1.März 1991, Berlin.
- [8] Hartmann, E.: An Introduction to Crystal Physics. University College Cardiff Press, Cardiff, Wales, 1984.
- [9] Liu, J.-G.; Becker, W.-J.: Force and stress measurements with eddy-current sensors. SENSOR 2001, 8-10 May 2001, Nuremberg, Proceedings II, p. 23-28.
- [10] Schoenekess, H. C.; Ricken, W.; Liu, J.-G.; Becker, W.-J.: Eddy-Current Sensors and their Applications to Force and Stress Measurement in Steel Reinforced Concrete. IMEKO Celle, 24.-26. September 2002, pp. 129-134.
- [11] Schoenekess, H. C.; Ricken, W.; Liu, J.-G.; Becker, W.-J.: Special constructed and optimised eddy-current sensors for measuring force and strain in steel reinforced concrete. Sensors and Actuators A: Physical 106 (2003), pp.159-163.
- [12] Schoenekess, H. C.; Ricken, W.; Becker, W.-J.: Influences of Magnetostriction and Magnetisation State on Strain and Force Measurement with Eddy-Current Sensors Applied to Steel Reinforced Concrete. International Symposium NDT-CE, DGZfP, 16.-19. Sep. 2003, Berlin. www.ndt.net
- [13] Schoenekess, H. C.; Ricken, W.; Becker, W.-J.: Improved Multi-Sensor for Force Measurement on pre-stressed Steel Cables by means of Eddy Current Technique, IEEE SENSORS 2004, Vienna, Austria 2004, pp.260-263
- [14] Ricken, W.; Becker W.-J., Schönekeß, H. C.: Mechanical Stress Measurement with Magnetic Sensors, Sensor 2003. Conference, Nürnberg, 13.-15. Mai 2003, pp.59-63.
- [15] Ricken, W.; Becker, W.-J.; Fehling, E.; Schönekeß, H.C., Improved multi-sensor for force measurement of pre-stressed steel cables by means of the eddy current technique, European Magnetic Sensors and Actuators Conference, EMSA 2004, July, 2004, Cardiff, UK.
- [16] Ricken, W.; Becker, W.-J.; Schönekeß, H.C.; Fehling, E.: Messung der mechanischen Zugbelastung in Spannstahlilitzen mittels Wirbelstrom-Sensoren, VDI-Berichte 1899, 2005, p. 295-307.
- [17] Jiles, D. and Atherton D.L.: Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect. Appl. Phys., 17 (1984) 1265-1281. Printed in Great Britain.
- [18] Jiles, D.: Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Chapman and Hall, London, 1991.
- [19] Jiles, D.: Theory of the magnetomechanical effect. Iowa State University, Ames, USA Appl. Phys. 28, pp.1537-1546, 1995