

FilameNDT: bedarfsorientierte Inspektion von Spannkabeln, Spannseilen und Erdankern

Jochen H. KURZ *, Klaus SZIELASKO *, Frank NIESE *, Ralf TSCHUNCKY *,
Sergey PUSHKAREV **

* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3 1, 66123
Saarbrücken, Tel. 0681 9302 3880, Fax 0681 9302 11 3880,
E-Mail jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de

** Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und
Qualitätssicherung

Kurzfassung. Die Infrastruktur der wirtschaftlich führenden Nationen in Europa unterliegt einem signifikanten Alterungsprozess. Insbesondere Frankreich und Deutschland sind auf eine hochentwickelte Infrastruktur angewiesen. Im Rahmen des Projekts FilameNDT, das gemeinsam vom Fraunhofer IZFP und dem Carnot Institut VITRES-IFFSTAR durchgeführt wurde, war es das Ziel, bedarfsorientierte ZfP-Verfahren zur Inspektion von Spannkabeln, Spannseilen und Erdankern für Infrastrukturbauwerke zu entwickeln. Spannseile und Drahtseile aus Stahl werden schon seit mehr als 100 Jahren für Bauwerke und in der Industrie eingesetzt. Aus Sicht der Zustandserfassung und Fehlerprüfung stellen sie trotz zahlreicher technischer Entwicklungen immer noch eine Herausforderung dar. Dabei stehen bei den im Vorhaben untersuchten seilartigen Konstruktionen die verdeckten Bereiche im Vordergrund, die, wenn Schäden auftreten, meist von Korrosion bzw. Spannungsrisskorrosion betroffen sind. Bei einigen Konfigurationen ist auch noch eine Ermüdungsbelastung überlagert. Da Infrastrukturbauwerke nicht einfach ersetzt werden können, ist eine zuverlässige Kenntnis des Zustands insbesondere der „Hot Spots“ erforderlich. Im Rahmen von FilameNDT wurden existierende zerstörungsfreie Prüfverfahren (elektromagnetisch angeregter Ultraschall EMUS, magnetischer Streufluss, mikromagnetische Werkstoffcharakterisierung) für die Prüfung von seilartigen Konstruktionen angepasst und weiterentwickelt. Für ein Monitoring wurden mikromagnetische Verfahren erstmals eingesetzt. Bei den beschriebenen lokalen und globalen methodischen Ansätzen stehen eine einfache Anwendbarkeit sowie langreichweitige Ansätze bei FilameNDT im Vordergrund. In dem Beitrag werden die Ergebnisse der Weiterentwicklungen der Verfahren und Untersuchungen mit den genannten Verfahren an 7-adrigen Spannseilen, vollverschlossenen Spiralseilen sowie Beispiele für Ergebnisse des Monitorings einer Brücke vorgestellt.

1. Einführung

1.1 Ausgangssituation

Infrastrukturbauwerke unterliegen kontinuierlichen Alterungsprozessen, beschleunigt durch zunehmende Verkehrslasten, die bei der Auslegung der Bauwerke noch nicht bekannt



waren und daher nicht berücksichtigt wurden. Dies führt zwangsläufig zu stetig steigenden Erhaltungskosten. In vielen dieser Bauwerke sind Brückenseile, Spannseile und andere vorgespannte Elemente die kritischen Stellen des Bauwerks und bedürfen daher im Laufe der Nutzungsdauer eines Bauwerks einer besonderen Aufmerksamkeit. Die Alterungsprozesse sind hierbei meist Korrosion und Ermüdungsvorgänge, wobei erstere oftmals zu einer Reduktion des lasttragenden Querschnitts führen. Die Lebensdauer dieser Strukturelemente und damit die Bauwerkssicherheit hängen auch von der prinzipiellen Prüfbarkeit und von Möglichkeiten einer Zustandsüberwachung ab. Für den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) ist zwischen gut und schwer zugänglichen Bereichen zu unterscheiden. Auf der Untersuchung letzterer lag der Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen des Projekts FilameNDT, das gemeinsam vom Fraunhofer IZFP und dem Carnot Institut VITRES-IFFSTAR durchgeführt wurde.

Für die gut zugänglichen Bereiche, in der Regel sind dies frei Seile, Kabel etc. werden neben der visuellen Inspektion [1] die magnetische Streuflussprüfung [2-5] und Schallemissionsmonitoring [6-7] standardmäßig eingesetzt. Für die nicht zugänglichen Bereiche bestand jedoch ein Mangel an einsetzbaren Verfahren, da eine Reihe von Einflussfaktoren hier Untersuchungen erschweren:

- Die verschiedenen Materialschichten und eine Reihe von Grenzflächen insbesondere der Korrosionsschutzsysteme (Beton, Hüllrohr, PVC Ummantelung, Verpressmörtel) bei eingebetteten Konfigurationen
- Die Verankerungsbereiche von Brückenbauwerken
- Die durch die Hänger verdeckten Bereiche der Seile von Hängebrücken

Inspektion und Überwachung dieser Bereiche ist oftmals von besonderer Bedeutung, da es sich hier auch um die sicherheitskritischen Stellen handelt, an denen Korrosion (Feuchtigkeitszutritt, -ansammlung) und Ermüdung auftreten. Für die Untersuchung dieser Bereiche kommen insbesondere folgende ZfP-Verfahren in Betracht: geführte Ultraschallwellen (GW) [8-9], magnetischer Streufluss (MFL), mikromagnetische Verfahren (MM) und Schallemissionsanalyse (SEA) [10-11].

MFL ist eines der Standardverfahren für die Inspektion von Spannkabeln, Brückenseilen etc. [12], das sowohl für freiliegende als auch eingebettete Konstruktionen eingesetzt werden kann. Mittels MFL können Litzenbrüche, Rostfraß, lokale Querschnittsminderungen [13, 14] detektiert werden, jedoch ist es mit dem Verfahren schwierig innenliegende Defekte nachzuweisen.

Mittels geführter Wellen können mit einer Messung längere Strecken geprüft werden. Daher ist diese Technik auch dazu geeignet verdeckte Bereiche zu untersuchen. Im Rahmen von FilameNDT wurden insbesondere zylinderförmige Bauformen (Seile, Kabel) mittels Puls-Echo-Technik oder in Transmission untersucht. Hierfür können sowohl piezoelektrische als auch magnetostriktive Sensoren (elektromagnetisch angeregter Ultraschall EMUS) eingesetzt werden [15-17]. Die Technik wird kontinuierlich wissenschaftlich weiterentwickelt und wird für Rohleitungen, Druckgefäße aber auch Platten eingesetzt [18-19].

MM Verfahren basieren auf der Interaktion von Mikrostruktur des ferromagnetischen Werkstoffs und Bloch Wänden auf der einen sowie unter anderem Versetzungen auf der anderen Seite. Die magnetischen und mechanischen Eigenschaften ferromagnetischer Materialien korrelieren stark [20]. Es existieren verschiedene Prüfgeräte, die eine indirekte zerstörungsfreie Bestimmung der mechanischen Härte, Härtetiefe und weiteren Werkstoffparametern erlauben. Darüber hinaus können mikromagnetische Parameter auch zur Charakterisierung von Eigenspannungen herangezogen werden.

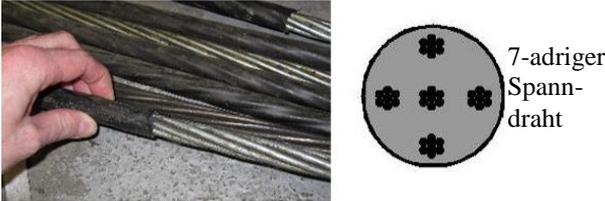
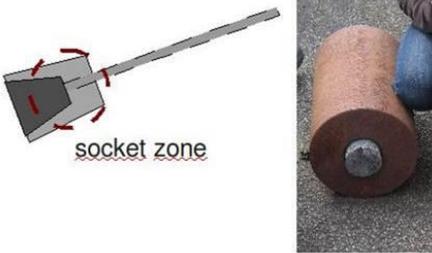
Die SEA basiert auf der Freisetzung elastischer Energie bei Bruchprozessen oder Mikrostrukturveränderungen in einem Festkörper. Dieses Phänomen kann auf verschiedenen Skalen beobachtet werden, die von Erdbeben bis zu Mikrorissen reichen. In der ZfP findet das Verfahren in verschiedenen Branchen Anwendung, die von der petrochemischen Industrie bis zur Kerntechnik reichen. Mittels SEA können generell aktive Schädigungsbereiche detektiert und lokalisiert werden [21-22], bei der Überwachung von Brückenseilen und Spanngliedern kann das Verfahren zum Nachweis akuter Litzenbrüche eingesetzt werden [23-26]

Im Rahmen dieses Artikels wird nur auf einen Teil der Ergebnisse des Projekts FilameNDT eingegangen. Die hier vorgestellten Untersuchungen und Entwicklungen wurden am Fraunhofer IZFP durchgeführt.

1.2 Untersuchte Fallbeispiele

Einige der im Rahmen des Projekts FilameNDT untersuchten Konstruktionsformen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Ergebnisse zu Untersuchungen an diesen Fallbeispielen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Tabelle 1. Einige der untersuchten und hier beispielhaft vorgestellten Konstruktionsformen.

Konstruktionsform	Eingesetzte ZfP-Methoden
<p>1. 7-adrige Spanndrähte, verschiedene Testfehler</p> 	<p>Ultraschall GW (EMUS; torsionale und longitudinale Stabmoden)</p>
<p>3. Ankersockel, vollverschlossene Spiralseile, innere natürliche Fehler</p> 	<p>Ultraschall GW (EMUS; torsionale und longitudinale Stabmoden)</p>
<p>4. Hängebrücke für Monitoring und Inspektionen (Brücker über die Saar, Mettlach)</p> 	<p>Ultraschall GW (EMUS; torsionale und longitudinale Stabmoden), Mikromagnetisches Monitoring</p>

Zunächst wurden Testkörper für Laboruntersuchungen genutzt. Darauffolgand kamen realistische Testkörper oder aus abgebrochenen Brücken ausgebaute Elemente zum

Einsatz. Weiterhin stand während des Projekts eine Hängebrücke für die Installation eines Monitoring Systems und für Inspektionen zur Verfügung (Tab. 1).

2. Ergebnisse

2.1 Ultraschalluntersuchungen an 7-adrigen Spannseilen

Spannglieder bestehen oftmals aus 7-adrigen Spannseilen, die dann in verschiedenen Konfigurationen angeordnet sein können. Für die Untersuchung wurden EMUS Sensoren für longitudinale und torsionale Stabmoden aufgebaut. In Tabelle 2 sind die Prüfkopfparameter zusammengefasst. Für die Laboruntersuchungen standen Testkörper mit verschiedenen vorgespannte Spannglieder zur Verfügung, die mit Testfehlern (Sägeschnitte, Querschnittsminderungen) versehen waren und in verschiedenen Ausführungsformen vorhanden waren (beschichtet mit Fett verpresst, mit Verpressmörtel, frei).

Die Ergebnisse zeigten, dass die Effektivität der Signalerzeugung der longitudinalen Moden deutlich höher ist als die der torsionalen Moden. Daher wurde schwerpunktmäßig mit longitudinalen Moden gearbeitet. Die in den Testkörpern eingebrachten Testfehler können bei den freien Spanngliedern über mehrere Meter Entfernung detektiert werden. Bei mit Fett oder mit Zementleim verpressten Spanngliedern sinkt die die Detektionsreichweite signifikant auf etwa einen Meter.

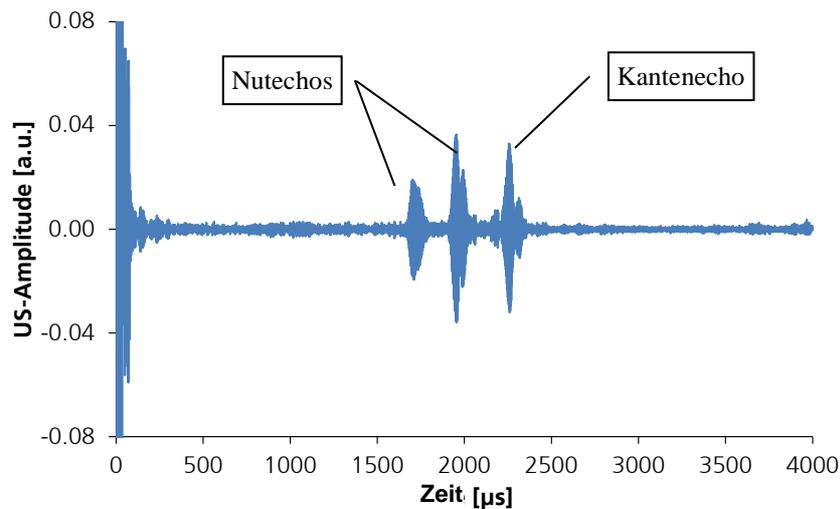


Abb. 1. Ultraschall A-Scan eines 7-adrigen Spannseils mit Ersatzfehler, das partiell mit Zementleim verpresst wurde. Die Gesamtlänge der Messstrecke beträgt 5 m.

Tabelle 2. EMUS Sensor- und Prüfparameter

Wellenmode	Spurwellenlänge Prüfkopf	Frequenz
Torsional	14 mm	~240 kHz
Longitudinal	12 mm	~410 kHz

2.2 Ultraschalluntersuchungen an vollverschlossenen Spiralseilen – Ankersockel und Verankerungsbereiche

Ankersockel sind in Verankerungsbereichen von Brücken verbaut und stellen einen sicherheitsrelevanten Bereich eines Bauwerks dar. Bislang gab es kaum Erfahrungen zur Möglichkeit der Prüfung dieser Konstruktionselemente, zudem existieren weltweit kaum

Testkörper. Im Rahmen des Projekts konnten vom Projektpartner IFSTTAR 4 Ankersockel von einer abgebrochenen Brücke in Frankreich erworben werden. Es gab zudem Hinweise, dass mehrere der Ankersockel innere Schädigungen aufweisen könnten.

Das Brückenseil bestand hier aus runden Litzen (Abb. 2). Aufgrund des Korrosionsschutzes im Ankersockel werden auch hier die Ultraschallsignale stark gedämpft. Daher wurde mit einer Frequenz von 100 kHz gearbeitet (bei einer Spurwellenlänge von 34 mm, Tabelle 3). Die Messungen wurden in Pulse-Echo Anordnung entlang des Umfangs des Seils durchgeführt. Mittels des Echos vom freien Seilende auf der anderen Seite des Ankersockels konnte die Modengeschwindigkeit der verwendeten torsionalen Stabmoden für die äußeren Litzen ermittelt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei 3.0 mm/μs. Abbildung 2 (rechts) zeigt den Ultraschall B-Scan einer Puls-Echo-Messung in Umfangsrichtung, um das Spiralseil. Die Achse der Ergebnisse in Umfangsrichtung ist dabei in keinen physikalischen Einheiten dargestellt, die null Grad Position ist am unteren Ende, die 360 Grad Position am oberen Ende der Achse. Die Sensoren hatten einen Abstand vom Ankersockel von 18 cm (Amplitude in dB).

Im Ultraschall B-Bild sind im Bereich zwischen den Umfangspositionen 6 bis 14 (85° : 195°) zwei Zonen mit erhöhten Amplitudenwerten erkennbar. Die erste liegt im Zeitintervall [200 μs : 350 μs], die zweite zwischen [650 μs : 800 μs]. Die mit der ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeit umgerechneten Zeitintervalle sind das Echo des freien Seilendes (zweite Reflektion) bei 45 cm Entfernung (gemessen von der Mitte zwischen Sende und Empfangsprüfkopf) und eine Reflektion bei etwa 27 cm. Diese liegt im Ankersockel und kann ein Hinweis auf eine innere Schädigung sein. Eine Verifikation dieses Ergebnisses wird mittels zerstörender Untersuchung des Ankersockels im Laufe des Jahres 2014 vom Projektpartner IFSTTAR durchgeführt werden.

Tabelle 3. EMUS Sensorparameter und untersuchte Seiltypen

Wellenmode	Spurwellenlänge	Frequenz	Seiltyp
Torsional (SH)	34 mm	~100 kHz	Seil mit runden Litzen

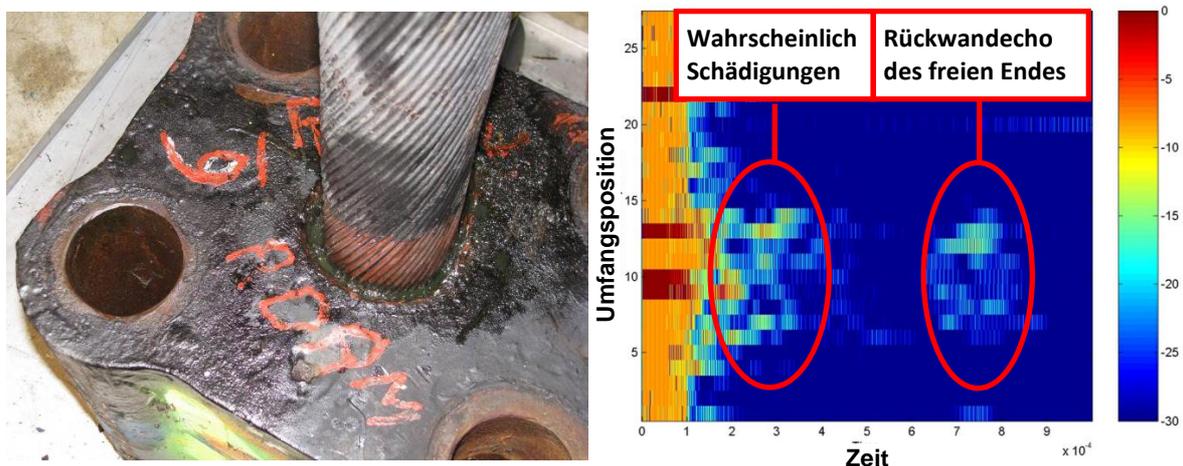


Abb 2. Links: Ankersockel von einer abgebrochenen Brücke aus Frankreich. Rechts: Ultraschall B-Scan einer Puls-Echo-Messung in Umfangsrichtung, um das Spiralseil. Die Achse der Ergebnisse in Umfangsrichtung ist dabei in keinen physikalischen Einheiten dargestellt, die null Grad Position ist am unteren Ende, die 360 Grad Position am oberen Ende der Achse. Die Sensoren hatten einen Abstand vom Ankersockel von 18 cm (Amplitude in dB).

An der in Tabelle 1 dargestellten Brücke in Mettlach, Ausgangslage und Renovierung des Bauwerks werden in Abschnitt 2.3 genauer beschrieben, wurden an vollverschlossenen Spiralseilen ebenfalls Inspektionsuntersuchungen durchgeführt. Abb. 3

zeigt das Seilbündel, bestehend aus 8 vollverschlossenen Spiralseilen, und einen bei der Renovierung des Bauwerks entdeckten Korrosionsschaden. Die Detektierbarkeit eines solchen Schadens wurde mittels EMUS mit getrenntem Sender und Empfänger in Impuls-Echo Anordnung untersucht. Die Sensoren wurden im Rahmen von Laboruntersuchungen für diesen Geometriefall optimiert (SH-Wellen, Spurwellenlänge 14 mm, Frequenz 200 kHz). Es zeigte sich, dass solche Schäden in den äußeren Schichten eines vollverschlossenen Spiralseils am Bauwerk in bis zu 25 cm Entfernung detektierbar sind (Abb. 4).

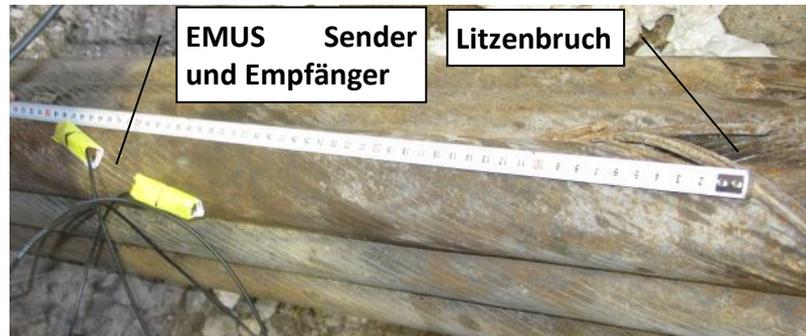


Abb 3. Vollverschlossenen Spiralseil mit Korrosionsschaden und EMUS Sensoranordnung

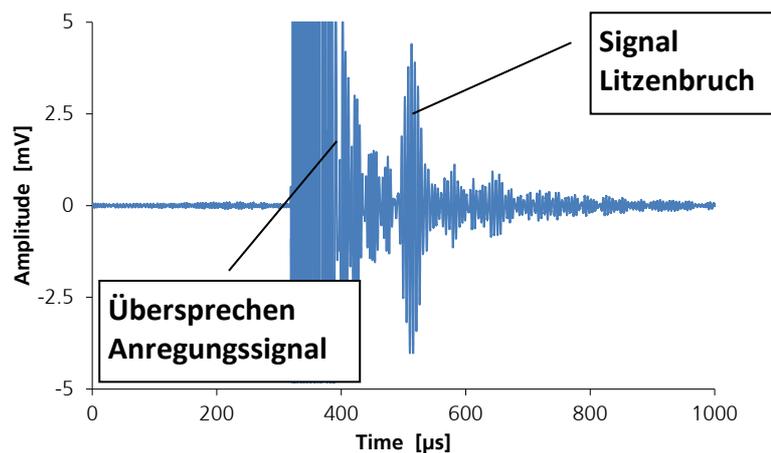


Abb 4. Ultraschall A-Bild der Untersuchungen, die in Abb. 3 dargestellt sind.

2.3 Monitoring einer Brücke mit mikromagnetischen Sensoren

Neben der Entwicklung von zerstörungsfreien Inspektionsansätzen der beschriebenen kritischen Bereiche von Seil- und Spanndrahtkonstruktionen wurden auch Monitoring Untersuchungen an einem realen Bauwerk durchgeführt. Im Rahmen des Projekts stand die in Tabelle aufgeführte Brücke für Untersuchungen zur Verfügung. Beim Beginn von Sanierungsmaßnahmen am Bauwerk (Baujahr 1951) im Herbst 2010 wurden in zwei Verankerungsbereichen Korrosionsschäden festgestellt. Diese Vorschädigung sowie die Tatsache, dass die Fahrbahnplatte bei der Sanierung einige Tonnen an Gewicht verlieren wird sowie mehrere Belastungstests vor, während und nach der Sanierung durchgeführt wurden, prädestinierten das Bauwerk für den Einsatz eines Monitoring Systems, da so definierte Belastungen zur Kalibrierung eines Monitoring Systems zur Verfügung standen. Eine detaillierte Beschreibung des kompletten angewendeten Monitoring Konzepts und der dazugehörigen Voruntersuchungen ist in [27] zu finden.

Von Seiten des Fraunhofer IZFP wurden an zwei Verankerungsbereichen, so dass beide Straßenseiten instrumentiert sind, je drei Brückenseile mit für ein Monitoring angepassten mikromagnetischen Prüfsystemen ausgestattet. Damit war die Überwachung

der gesamten Brücke möglich. Dem Ansatz ein Monitoring mittels mikromagnetischer Verfahren durchzuführen lag die Annahme zu Grunde, dass eine Veränderung des Querschnitts der Brückenseile, z.B. durch Korrosionsschäden oder Litzenbrüche, zu einer Spannungsumverteilung in den Seilbündeln der Brücke, bestehend aus 8 Seilen, führt. Die Mikromagnetischen Prüfgrößen sind relativ empfindlich für Spannungsänderungen. Ein am Anfang der Sanierung des Bauwerks durchgeführter Belastungstest (Abb. 5) hat dies bestätigt. Bei diesem Belastungstest wurden mit einem 60 t Kran verschiedene Positionen auf der Brücke angefahren, die positionsabhängig unterschiedlich starke Belastungen der Seilbündel hervorriefen (1, 2, 3 in Abb. 5 rechts). Auch das Ausgangssignal der leeren, gesperrten Brücke konnte als der Kran für ein Wendemanöver die Brücke kurzzeitig verließ (zwischen Position 2 und 3) reproduziert werden, ebenso sieht man den wiedereinsetzten Verkehr nach Aufhebung der Sperrung.

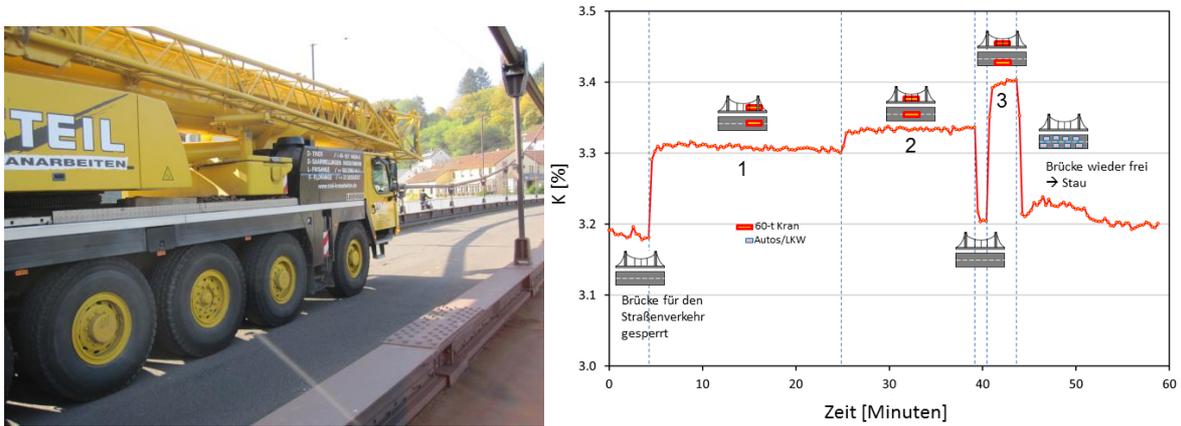


Abb 5. Links: Belastungstest an der Brücke mit einem 60 t Kran. Rechts: Ergebnis des Belastungstests. Dargestellt ist die mikromagnetische Prüfgröße Klirrfaktor. Die Veränderung der Spannungen in den Seilbündeln ist in Abhängigkeit von der Position des Krans signifikant nachweisbar.

Diese Kalibrieruntersuchungen haben gezeigt, dass Spannungsveränderungen in den Brückenseilen mikromagnetisch nachweisbar sein sollten. Daher läuft seit Herbst 2012 an dem Bauwerk ein kontinuierliches Monitoringsystem (die Datenerfassungsrate liegt etwa im Minutentakt). Dieses beinhaltet auch einen Temperatursensor. Einige erste Ergebnisse dieses Langzeitmonitorings sind in Abbildung 6 dargestellt.

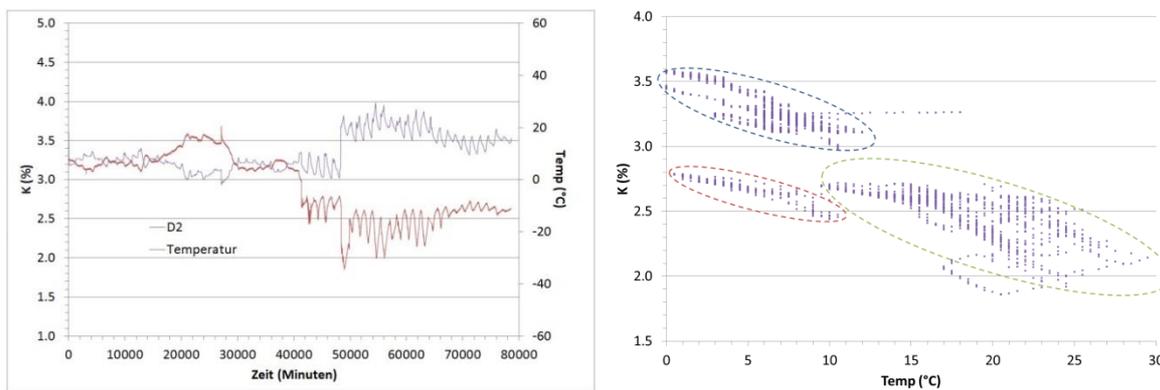


Abb 6. Links: Temperaturänderung und Klirrfaktor als eine mikromagnetische Prüfgröße des Langzeitmonitorings. Rechts: Darstellung der Korrelation von Temperatur und Klirrfaktor .

Abb. 6 (links) zeigt, dass zwischen Temperatur und den mikromagnetischen Prüfgrößen, hier der Klirrfaktor, eine signifikante Korrelation besteht. Jahreszeitabhängig sind zyklische Schwankungen erkennbar, die bei entsprechenden Unterschieden zwischen Tages- und Nachttemperaturen zu periodischen Abfolgen führen. Die

Temperaturänderungen induzieren thermozyklische Spannungsänderungen in den Brückenseilen. Eine genauere Analyse der Korrelation der mikromagnetischen Prüfgrößen mit der Temperatur zeigt, dass in diesem dargestellten Zeitbereich drei voneinander unabhängige Korrelationsbereiche existieren (Abb. 6, rechts). Innerhalb dieser Cluster gibt es wiederum noch einzelne von der Temperatur unabhängige Spannungsänderungen. Die Existenz der drei unabhängigen Cluster sowie die anderen Ereignisfolgen repräsentieren Spannungsänderungen im Bauwerk, die nicht auf Temperaturänderungen zurückgeführt werden können.

Während der Renovierung der Brücke ist die Fahrbahnplatte deutlich leichter geworden (einige Tonnen) und Baumaßnahmen haben zu weiteren Veränderungen am Bauwerk geführt. Hier könnte eine Erklärung für die verschiedenen unabhängigen Korrelationsbereiche liegen, da sich so auch das Spannungsregime in den Brückenseilen verändert hat. Auch die Gesamtsteifigkeit des Bauwerks kann sich durch diesen Umbau verändert haben. Die Bereiche, die keinem der drei Cluster zugeordnet werden können, können auch durch Ereignisse wie LKW Verkehr trotz einer Gewichtsbeschränkung oder aber Relaxationserscheinungen in den Brückenseilen hervorgerufen werden. Eine weiterführende Analyse dieser Ergebnisse ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

3. Schlussfolgerungen

Brückenseile, Spannseile, Drahtseile und sonstige Zugglieder stellen Konstruktionselemente dar, die in vielen Bauwerken zu finden sind. Konstruktiv bedingt weisen diese auch nicht zugängliche Bereiche auf, meist in sicherheitsrelevanten Bereichen wie Verankerungszonen oder aber diese Konstruktionselemente sind generell versagensrelevant für das Gesamtbauwerk. Somit ist eine Untersuchung der schwer oder nicht zugänglichen Bereiche mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren von Bedeutung für die Zustandsbewertung eines solchen Bauwerks.

Mittels geführter Ultraschallwellen können sowohl Spannseile als auch Brückenseile auf Brüche und Korrosionsschäden hin untersucht werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die EMUS Technik durch die modenreine Anregung von SH-Wellen mit verschiedenen Polarisierungen hier zu relativ guten Ergebnissen führt. Generell haben die Untersuchungen auch deutlich gemacht, dass die üblichen Formen des Korrosionsschutzes die geführten Wellen bei Spanndrähten sehr stark dämpfen, so dass dann nur noch Reichweiten in Impuls-Echo Anordnung von etwa einem Meter erzielt werden. Bei freien Spanndrähten sind Untersuchungen über mehrere Meter problemlos möglich. Brückenseile wie z. B. vollverschlossene Spiralseile ermöglichen allein aufgrund ihrer komplexen Geometrie keine größeren Untersuchungsreichweiten. Dennoch sind Inspektionen von z.B. Ankersockeln auf innere Defekte möglich.

Im Rahmen des Projekts FilameNDT war auch die Installation eines Monitoring Systems an einem realen Bauwerk möglich. An der Hängebrücke über die Saar in Mettlach wurde unter anderem ein mikromagnetisches Monitoring System bestehend aus je 3 Prüfsystemen an je drei Brückenseilen in zwei Verankerungsbereichen installiert. Die Ergebnisse zeigten, dass auch mittels mikromagnetischer Prüfmethode Veränderungen in den anliegenden mechanischen Spannungen nachgewiesen werden können. Dabei kann eine Brückenseite von einem Verankerungsbereich aus überwacht werden.

4. Danksagung

Dem BMBF wird hiermit für die Förderung des Projekts FilameNDT im Rahmen des Fraunhofer-Carnot Programms PICF gedankt (Förderkennzeichen 01SF0804). Weiterhin

gilt dem Landesbetrieb für Straßenbau des Saarlandes der Dank für die Möglichkeit der Nutzung des Bauwerks 1 des Saarlandes im Rahmen dieser Untersuchungen.

5. Referenzen

- [1] Potts AE (1988) Non-destructive testing of steel wire ropes. Symposium of the British Institute of NonDestructive Testing, London
- [2] Weischedel HR, Hohle HW (1995) Quantitative Non- Destructive In-Service Evaluation of Stay Cables of Cable- Stayed Bridges: Methods and Practical Experience. SPIE, 2456: 226–236.
- [3] Barton JR, Teller CM, Suhler SA (1989) Design, Develop, and Fabricate a Prototype Nondestructive Inspection and Monitoring System for Structural Cables and Strands of Suspension Bridges. Report FHWA-RD-89-158, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- [4] Hanasaki K, Tsukada K, Moriya T (2000) A Magnetic Method for Evaluation of the Deterioration of Large Diameter Wire Ropes. WCNDT Symposium, Roma
- [5] Bergamini A Christen R, Motavalli M (2003) A Simple Approach to the Automatic Recognition of Flaws in Large Diameter Steel Cables. NDT-CE, Berlin
- [6] Paulson PO (1998) Continuous acoustic monitoring of suspension bridges and cable stays, Proceedings of SPIE, 3400: 205-213
- [7] Sluzka P, Gagnon C, Rankin S (2006) Inspection, evaluation and monitoring of suspension bridge cables. ASCE Conf. Proceedings, Structural Engineering and Public Safety
- [8] Ghorbanpoor, A. (1999) Evaluation of Prestressed Concrete Girders Using Magnetic Flux Leakage Proceedings of the ASCE Structures Congress, Structural Engineering in the 21st Century, New Orleans: 284–287.
- [9] Hillemeier B, Walter A (2007) Fast Non-destructive localisation of prestressing steel fractures in post-tensioned concrete bridges. In: Advances in Construction Materials, Springer-Verlag, pp 563-574
- [10] Pavlakovic B, Lowe M, and Cawley P (2003) The inspection of tendons in post-tensioned concrete using guided waves. Insight, 41 (7): 446-452
- [11] Suzuki N, Takamatsu H, Kawashima S, Sugii KI, and Iwasaki M (1988) Ultrasonic Detection Method for Wire Breakage. Kobelco Technology Review, 4: 23–26.
- [12] Nussbaum, JM (1999) Zur Erkennbarkeit von Drahtbrüchen in Drahtseilen durch Analyse des magnetischen Störstellenfeldes. Dissertation, University of Stuttgart
- [13] Sawade G, Gampe U, Krause HJ (1998) Non Destructive Examination of Prestressed Tendons by the Magnetic Stray Field Method. In: Proc. 4th Conf. on Engineering Structural Integrity Assessment, Cambridge UK: 353-363.
- [14] Hillemeier B, Walther A, Pak C (2008) Fast Non-Destructive Localisation of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned Concrete Bridges. In: Accelerated Bridge Construction – Highway for Life Conference, Baltimore, Maryland: 409-410.
- [15] Laguerre L, Bouhelier M, Grimault A (2004) Application of ultrasonic guided waves to the evaluation of steel members integrity. In: 2nd European Conference on Structural Health Monitoring (SHM), Munich, Germany
- [16] Laguerre L, Aime JC, Brissaud M (2002) Magnetostrictive pulse-echo device for non destructive evaluation of cylindrical steel materials using longitudinal guided waves. Ultrasonics, 39 (7): 503-514
- [17] Sprenger, H, Gaul, L (2011) Ultrasonic Structural Health Monitoring of Cable Structures. In: Fu-Kuo Chang (Ed.): Structural Health Monitoring, Vol. 2, Condition-based Maintenance and Intelligent Structures. Lancaster, DEStech Publications, Inc., pp 12
- [18] Hayashi T, Tamayama C, Murase M (2003) Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example. Ultrasonics, 41 (3):175-183
- [19] Wilcox P, Lowe MJS, Cawley P (2005) Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array. IEEE UFFC, 52 (4): 652-665
- [20] Jiles D (1991) Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. Chapman and Hall, London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras
- [21] Huang M, Jiang L, Liaw P, Brooks C, Seeley R, Klarstrom D (1998) Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture. Materials Research, 50 (11)
- [22] Kim YP, Fregonese M, Mazille H, Féron D, Santarini G (2003) Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel. NDT&E International, 36: 553-562
- [23] Yuyama S, Yokoyama K, Niitani K, Ohtsu M, Uomoto T (2007) Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission. Construction and building materials, 21: 491–500
- [24] Taylor JL, Casey NF (1984) The Acoustic Emission of Steel Wire Ropes. Wire Industry 51 (601): 79-82

- [25] Sison M, Duke JC, Horne M (1996) Acoustic emission monitoring of steel bridges members. Final report, Virginia Transportation Research Council, VA 24061- 0219
- [26] Casey NF, Taylor JL (1985) The evaluation of wire rope by acoustic emission technique. *British Journal of N.D.T.*, 27 (6): 351-356
- [27] Kurz JH, Laguerre L, Niese F, Gaillet L, Szielasko K, Tschuncky R, Treysede F (2013) NDT for need based maintenance of bridge cables, ropes and pre-stressed elements. *J Civil Struct Health Monit* 3:285–295