

Verteilte faseroptische Dehnungsmessung an bestehenden Spannbetonbrücken - Erkenntnisse aus Laborversuchen und Feldmessungen

<https://doi.org/10.14459/mbs28.04>

Harald Burger, Oliver Fischer



Harald Burger, M.Sc.

2014 B.Sc Bau- und Umweltingenieurwesen,
Leopold Franzens Universität Innsbruck
2018 M.Sc. Bauingenieurwesen, TUM
2014-2018 Tragwerksplanung im Hoch- und
Industriebau, SSF AG
2018-2021 Objektüberwachung im Hoch- und
Industriebau, SSF AG
seit 09.2021 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Lehrstuhl für Massivbau, TUM



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer

1988 Diplom Bauingenieurwesen, TUM
1989-95 Wissenschaftlicher Assistent, UniBw
1994 Promotion
1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungs-
positionen in der Bauindustrie im In- und Ausland
2007 Diplomwirtschaftsingenieur, Univ. Hagen
seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM
seit 2011 Prüflingenieur und EBA-Prüfer

In der Forschung findet die verteilt faseroptische Dehnungsmessung bereits standardmäßig in Laborversuchen Anwendung und auch an Bauwerken gibt es verschiedenste Anwendungsfälle. Insbesondere bei Spannbetonbrücken erlaubt dieses Messverfahren eine Beurteilung des Bauwerkszustandes auf Grundlage von Dehnungsänderungen. Dabei kann zwischen Kurzzeitmessungen, die eine Beurteilung der Bauwerksreaktion auf kurzzeitig geplante Einwirkungen ermöglichen, und Langzeitmessungen, die eine Zustandsüberwachung gewährleisten, unterschieden werden. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Funktionsweise und durchgeführten Laboruntersuchungen. Darüber hinaus werden Ergebnisse an zwei Praxisbeispielen vorgestellt, die demonstrieren, dass aussagekräftige Messdaten zur Beurteilung und Überwachung des Zustandes bestehender Spannbetonbrücken erfasst werden können.

Distributed fiber-optic strain measurement is already standard in laboratory research and there are several applications on structures. For prestressed concrete bridges, this measurement method allows the condition assessment of the structure on the basis of strain changes. A distinction can be made between short-term measurements, which allow the response of the structure to short-term planned action, and long-term measurements, which ensure condition monitoring. This article provides an insight into the functionality and laboratory tests carried out. It also presents the results of two practical examples which show that measurement data can be recorded to assess and monitor the condition of existing prestressed concrete bridges.

Einleitung

Verteilte faseroptische Messsysteme ermöglichen die quasi-kontinuierliche Dehnungsmessung entlang einer Glasfaser in sehr kurzen räumlichen Abständen. Als Lichtquellen werden Laser eingesetzt, die je nach Messprinzip das vom Sensormaterial zurückgestreute Licht zur Erfassung von Dehnungsänderungen nutzen. Im Bauwesen werden derzeit hauptsächlich zwei Messprinzipien verwendet, die entweder die Brillouin- oder die Rayleigh-Streuung des Lichts nutzen. Messungen auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung ermöglichen räumliche Abstände der Messpunkte im Millimeterbereich. Die Sensorlänge kann dabei bis zu 100 m betragen. Dies

ermöglicht bei Anwendung in Schleifen die messtechnische Erfassung großer Flächen. Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Anwendung von Messsystemen auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung.

Durch die räumlich kurze Messpunktfolge werden entlang eines Sensors lokale Diskontinuitäten als Abweichungen von einem kontinuierlichen Dehnungsverlauf erkannt. Diese ergeben sich an der Betonoberfläche beispielsweise durch beginnende Rissbildung, Mikrorisse bis hin zu ausgeprägten Rissen oder lokale Steifigkeitsunterschiede. Da bei bestehenden Spannbetonbrücken in der Regel keine oder nur geringe Zugspannungen im Querschnitt auftreten, ist eine ausgeprägte Rissbildung seltener zu erwarten. Daher ist dieses Messsystem besonders geeignet, Dehnungsänderungen im Spannbeton vor Rissbildung zu verfolgen. Dabei können auch durch Vorspannung überdrückte Risse bei temporärer Belastung detektiert werden. Die Messtechnik eignet sich auch als Instrument zur Optimierung einer Nachrechnung bestehender Spannbetonbrücken in Stufe 3 bzw. Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie (NaRil) [1], zur Bestandsbewertung für Verstärkungsmaßnahmen [2], zur Überwachung während des Rückbaus oder auch zur Dauerüberwachung von Schädigungsmechanismen [3].

Für die zuverlässige Anwendung der Technologie ist eine Kalibrierung unter Laborbedingungen unerlässlich. Um die Einflussfaktoren auf die Messergebnisse zu identifizieren und zu bewerten, wurden am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) Untersuchungen durchgeführt. Dafür standen sowohl Laborversuche als auch praktische Anwendungen an bestehenden Spannbetonbrücken im Vordergrund. Nachfolgend werden ausgewählte Erkenntnisse aus Laborversuchen und Feldmessungen dargestellt.

Laborversuche zur Testung, Validierung und Kalibrierung der Sensorik

Bei bestehenden Bauwerken ist in erster Linie eine oberflächige Applikation sinnvoll. Es ist jedoch zu beachten, dass eine Vorbehandlung der Oberfläche notwendig sein kann, um eine ebene Klebefläche zu erhalten. Das Einfräsen einer Nut gewährleistet ebenfalls eine ebene Klebefläche, bietet zusätzlichen Schutz vor Umwelteinflüssen und gewährleistet durch eine dreiseitige Klebefläche eine optimierte Dehnungsübertragung vom Betonbauteil auf den Sensor. Der verteilte faseroptische Sensor (engl.: distributed

fiber optical sensors, kurz: DFOS) besteht aus einem Glasfaserkern und verschiedenen, mehr oder weniger robusten und sensitiven Ummantelungen.

Im Allgemeinen kann zwischen geschichteten und monolithischen DFOS unterschieden werden. Bei geschichteten DFOS sind die einzelnen Mantelschichten in Sensorlängsrichtung bei Überschreitung eines definierten Dehnungswertes zueinander verschieblich. Lokale Dehnungsspitzen, beispielsweise aus einem Riss, resultieren bei geschichteten DFOS in einem Schlupf innerhalb des Sensors. Dadurch ist eine Unstetigkeit im Messsignal noch sichtbar, auch wenn sich am Bauteil der Riss wieder schließt. Diese Eigenschaft führt jedoch auch zu einer Verzerrung des Messsignals, wodurch beispielsweise eine präzise Rissbreitenbestimmung nach mehrmaliger Rissbreitenänderung nicht mehr möglich ist. Im Gegensatz dazu sind mit monolithischen Sensoren wieder verschlossene Risse nicht detektierbar. Allerdings werden lokale Ereignisse unter zyklischer Belastung besser aufgelöst und Rissbreiten sicherer bestimmt. Bei breiten Rissen hingegen führt die hohe Dehnung zu einem Ausfall im Messsignal und eventuell auch zu einem Sensorbruch. Die Auswahl des Sensors muss folglich in Abhängigkeit von der Applikationsart und dem Zweck der Messung (Einsatzdauer, erwartbare Dehnungen etc.) getroffen werden.

Im Rahmen mehrerer Versuche wurde der Einfluss diverser Faktoren auf die Sensorik einer detaillierten Analyse unterzogen. Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchungen liegt auf der Verwendung von geschichteten Sensoren. Die Durchführung von Kurzzeitversuchen erlaubt die Bewertung des Messsignals bei konstanter Temperatur unter Druck, bei Zug bis zum Riss, bei Rissbildung sowie an der gerissenen Betonoberfläche. Abb. 1 zeigt ausgewählte Ergebnisse eines 4-Punkt-Biegeversuchs an einer vorgespannten Hohlblechplatte. In dieser Abbildung sind die Dehnungen in Bauteillängsrichtung an Unterseite der Platte vor, während und nach der Erstrissbildung dargestellt. Bei Rissbildung entsteht eine Dehnungsspitze im Messsignal. Die Rissbreite kann aus dem Integral der Dehnung über die Einflusslänge bestimmt werden. In Abhängigkeit vom verwendeten DFOS prägt sich die maximale Dehnung und die Einflusslänge der Dehnungsspitzen anders aus.

Um den Einfluss von Temperatur und Langzeiteffekten zu bestimmen, wurden zudem Laborversuche über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Gemäß DIN EN 1991-1 sind Spannbetonbrücken für Temperaturen

von -24°C bis 37°C zu bemessen. Diese Grenzwerte sind auch an Bauwerken bei Langzeitmessungen erwartbar. Neben dem Sensor muss der verwendete Klebstoff die vorgenannte Temperaturanforderung erfüllen und einen thermischen und hygrischen Temperaturausdehnungskoeffizienten aufweisen. [4]. Eine Temperaturkompensation bei der Dateninterpretation kann lediglich erfolgen, wenn das Temperaturverhalten und die effektiven Temperaturen während der Messungen bekannt sind.

Die an der TUM durchgeführten Versuche mit dem geschichteten DFOS BRUSens V9 belegen, dass bei einer über den Querschnitt konstanten thermischen Belastung eines Stahlbetonbalkens die Temperaturdehnungen der inneren Mantelschicht aus Edelstahl aufgezeichnet werden. Darüber hinaus lässt sich eine Streuung des Dehnungsprofils in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz über die Sensorlänge beobachten. Infolgedessen kann sich das Messsignal eines Risses ebenfalls reduzieren, sodass dieser unter Umständen nicht mehr als dominanter Dehnungspeak identifiziert werden kann. Ein Temperaturversuch an einem gerissenen Bauteil zeigt, dass eine Temperaturänderung von ca. 12°C zu einer signifikanten Reduktion des Messsignals führt. Außerdem wurde im Rahmen der Versuche ein Wert für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Sensors zwischen 15 und $19 \times 10^{-6}/\text{K}$ ermittelt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Durchschnittswert des Edelstahls nach Angaben des Herstellers Solifos AG bei $16 \times 10^{-6}/\text{K}$ liegt.

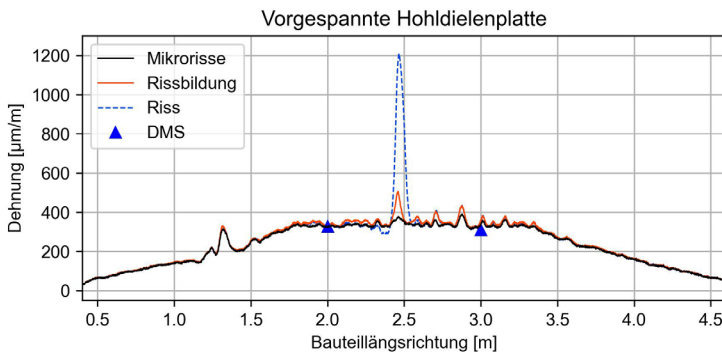


Abb. 1: Dehnungen bei Erstrissbildung an der Unterseite einer vorgespannten Hohldielenplatte im 4-Punkt-Biegeversuch

Kurzzeitmessungen bei der Verbundverankerung von Spanngliedern

Im Rahmen des Rückbaus der Talbrücke in Unterrieden wurde aus baupraktischen Gründen der Überbau in Herstellrichtung abgebrochen. Abb. 2 zeigt einen Teil des Längsschnitts und den Querschnitt der Brücke. Bei diesem Abbruchvorgang liegen die Trennfugen der Abbruchtakte nicht an den bestehenden Koppelfugen und die im nachträglichen Verbund liegenden Spannglieder müssen sich nach dem Durchtrennen über Verbund verankern. Die Bemessung der Rückbauzustände erfordert eine konkrete Annahme bezüglich der Verankerungslänge. Des Weiteren ist eine Validierung der im Verbundbereich auftretenden Spaltzugkräfte von Interesse. Aus diesem Grund wurden an der Talbrücke in drei Abbruchtakten Messungen mit faseroptischen Sensoren durchgeführt, um die Dehnungsverläufe beim Durchtrennen der Spannglieder zu erfassen. Ziel ist die Ableitung von Aussagen zur effektiven Verbundlänge und den Spannungsverteilungen im Diskontinuitätsbereich.

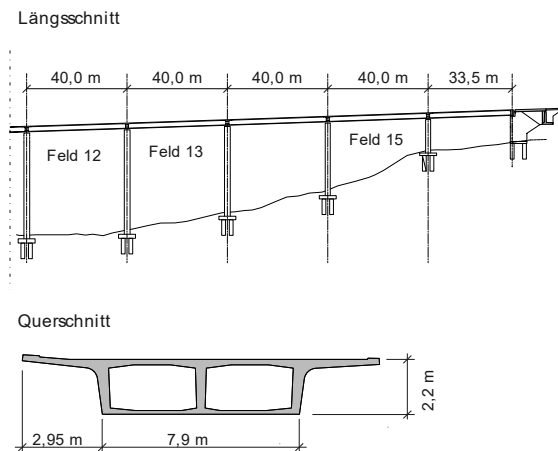


Abb. 2: Längs- und Querschnitt der Talbrücke Unterrieden, entnommen aus [5]

Die Messungen und die Auswertung der Messergebnisse wurden im Feld 12, Feld 13 und Feld 15 (siehe Abb. 2) in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden, dem Ingenieurbüro MKP GmbH und dem Ingenieurbüro Büchting + Streit AG durchgeführt [5]. In den Feldern wurden verschiedene Messanordnungen mit unterschiedlichen Klebstoff- und Sensorkombinationen eingesetzt und die Ergebnisse anschließend verglichen. Bei der Installation und der Auswertung zeigte sich, dass ein möglichst robustes Sensorsystem verwendet werden sollte. Dadurch kann auch ein Sensorbruch durch Rissbildung vermieden werden, sofern die Dehnungsübertragung der Betonoberfläche und dem Glasfaserkern nicht zu steif ausgebildet ist.

Die durchgeführten Messungen zeigen signifikante Stauchungen entlang der durchbohrten Spannglieder auf einer Länge von ca. 1,0 m bis 2,0 m, sofern der umgebende Beton nicht gerissen ist. Wenn Risse die zu verankernden Spannglieder kreuzen, zeigen die Ergebnisse Stauchungen über eine etwa ein Drittel längere Strecke. Aufgrund der geringen Betondeckung der Spannglieder kann die Verankerungslänge über die gemessene Stauchung abgeschätzt werden. In Abb. 3 sind die Messergebnisse entlang der Sensoren in Feld 13 qualitativ dargestellt. In Querrichtung sind Mikrorisse infolge Spaltzug in der Nähe der Bohrung entlang der Spanngliedachse ersichtlich. Diese Spaltzugrisse werden auch bei den Messungen in den anderen Feldern festgestellt und obwohl keine explizite Spaltzugbewehrung vorhanden war, blieben diese Risse sehr klein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die vorhandene Bügelbewehrung und die monolithische Bauweise der Stege mit Fahrbahn- und Bodenplatte den auftretenden Spaltzugkräften weitestgehend aufnehmen. Zusätzlich breitet sich die Last in nicht gerissene Bereiche aus und lagert sich um.

Durch den Einsatz von faseroptischen Messungen nach dem hier vorgestellten Konzept können die für die Bemessung getroffenen Annahmen während des Rückbaus verifiziert werden. Insbesondere bei Abweichungen der nachträglichen Verankerung von den berechneten Schlupfkriterien bieten die DFOS-Messungen eine detaillierte Grundlage zur Beurteilung des Rückbaufortschritts in Echtzeit und zur Einleitung geplanter Alternativmaßnahmen.

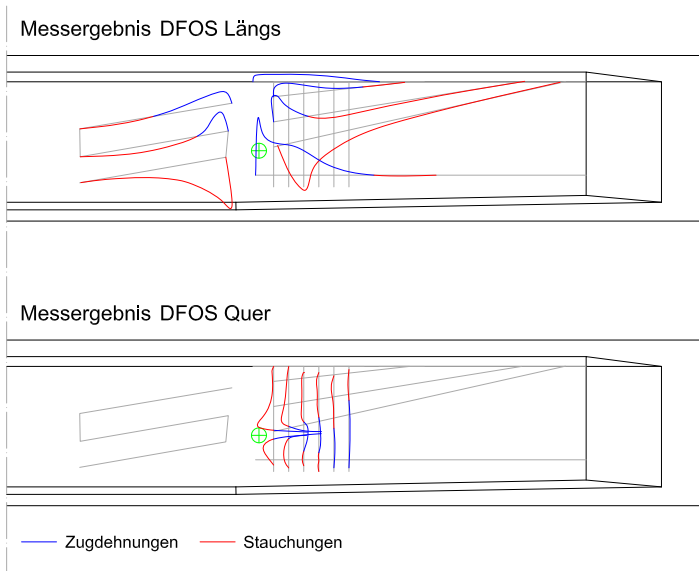


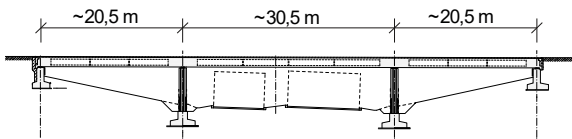
Abb. 3: Qualitative Darstellung der Dehnungsänderung in Feld 13 beim Durchtrennen der Spannglieder in der untersten Spanngliedachse; Stauchungen in Rot, Zugdehnungen in Blau.

Langzeitmessungen zur Detektion von Dehnungsänderungen und Erstrissbildung aufgrund von Spannstahlbrüchen

An den beiden Plattenbrücken „Kreuzhof“ mit spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahl (Typ Sigma Oval) in München wird für den sicheren Weiterbetrieb ein Monitoringsystem eingesetzt [6]. Bei beiden Bauwerken konnte das gemäß Handlungsanleitung Spannungsrissskorrosion geforderte Kriterium Riss vor Bruch nicht in jedem Querschnitt nachgewiesen werden [3]. Aber auch in Bereichen mit ausreichendem Ankündigungsverhalten, ist eine objektbezogene Prüfanweisung nach dieser Handlungsanweisung zu definieren. Neben einer 1,5-jährigen Datenerfassung mit unterschiedlicher Sensorik zur objektspezifischen Verkehrslastermittlung (B-WIM Sys-

tem) und dem fortlaufenden Dauerbetrieb von akustischen Sensoren zur direkten Detektion von Spanngliedbrüchen, werden vier Mal jährlich Dehnungen entlang der Brückenlängsrichtung, mit den DFOS BRUSens V9 gemessen. Ziel der DFOS ist die Detektion von Dehnungsänderungen und Rissen in Folge von Spanndrahtbrüchen. Abb. 4 zeigt den Längsschnitt und den Querschnitt eines der beiden Bauwerke. Die Platte wurde mit zylindrischen Hohlkörpern ausgeführt. In den Stegen zwischen diesen Hohlkörpern befinden sich mindestens zwei bis maximal sechs Spannglieder im nachträglichen Verbund. Die DFOS befinden sich in jedem zweiten Steg an der Unterseite des Überbaus.

Längsschnitt



Querschnitt

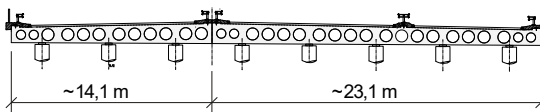


Abb. 4: Längsschnitt und Querschnitt der Brücke „Kreuzhof“ BW40/45

Nach der Inbetriebnahme des Monitoringsystems wurden Probelastungen durchgeführt, die nach sechs Monaten wiederholt wurden. Diese Maßnahme diente der Identifikation von Umwelteinflüssen bei bekannter Belastung auf die Sensorik. Die Messergebnisse zeigen, dass bei einer Belastung mit zwei LKWs mit maximalem Fahrzeuggewicht von 42 to nur sehr geringe Dehnungsänderungen von kleiner $-30 \mu\text{m/m}$ ($-0,03 \%$) auftreten. Demgegenüber manifestieren sich Dehnungsänderungen, die auf Temperaturschwankungen zurückzuführen sind, in besonders ausgeprägter Form. In Abb. 5 sind beispielhaft Messergebnisse seit Beginn der Aufzeichnungen 2021 dargestellt. Bei der Gegenüberstellung der Rohdaten mit

berechneten Dehnungen am Stabwerk zeigt sich ein konstanter Versatz der Dehnungen, während der lineare Trend ähnliche Tendenzen aufweist.

Ebenfalls treten in Abb. 5 Dehnungsspitzen auf. Diese weisen eine Dominanz von bis zu $200 \mu\text{m/m}$ ($0,20\%$). Im Rahmen von Laboruntersuchungen werden derartige Dehnungsspitzen in der Regel als Indiz für das Vorhandensein eines Risses gewertet. Eine visuelle Inspektion der Brücke ergab, dass der betreffende Bereich einen Versatz in der Betonoberfläche aufweist. Dies führt zu einer Umlenkung des Sensors in Längsrichtung, wodurch eine lineare Dehnungsübertragung zwischen Beton und Glasfaserkern nicht möglich ist. Betrachtet man alle Messungen über mehrere Jahre, so treten die Dehnungsspitzen bei gleicher Temperatur immer an der gleichen Stelle auf. Unter der Voraussetzung, dass das Messsignal auf eine Messung bei gleicher Temperatur bezogen wird, sind keine Dehnungsspitzen mehr erkennbar. Daraus kann geschlossen werden, dass es sich nicht um eine neu aufgetretene Dehnungsänderung handelt.

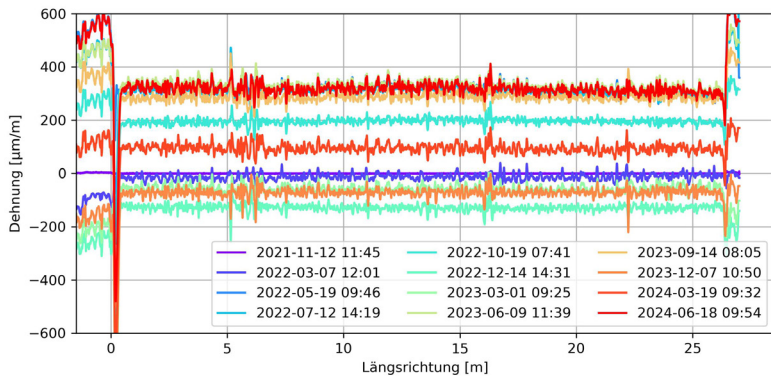


Abb. 5: Messergebnisse im mittleren Feld am Bauwerk BW40/45 seit Messbeginn November 2021

Fazit

Dieser Beitrag zeigt anhand von Praxisbeispielen und Laboruntersuchungen das Potenzial der verteilten faseroptischen Dehnungsmessung auf Basis der Rayleigh-Rückstreuung für die Zustandsbewertung und Überwachung von bestehenden Spannbetonbrücken. Der wesentliche Vorteil

dieser Messtechnik besteht in der Erfassung von Dehnungsänderungen, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind. Zudem ermöglicht sie Aussagen über die Rissbildung, ohne dass ein direkter Zugang zum Riss selbst erforderlich ist. In den vergangenen Jahren wurde die Messtechnik der verteilten faseroptischen Dehnungsmessung weiterentwickelt, wodurch sich eine gesteigerte Zuverlässigkeit bei der Datenerfassung, eine vereinfachte Handhabung sowie eine robuste Funktion in verschiedensten Umgebungen beobachten lässt. Gleichzeitig wurden von verschiedenen Herstellern neue faseroptische Sensoren entwickelt. Dies eröffnet die Möglichkeit, unterschiedliche Sensoren einzusetzen und verschiedenste Anwendungen zu realisieren. Folglich kann sie als präzise Methode zur Überwachung von Bauwerkszuständen bezeichnet werden.

Neben den dargestellten Beispielen existieren in der Literatur zahlreiche weitere Beispiele aus Labor- und Felduntersuchungen, die eine verlässliche Funktionsweise von DFOS verifizieren und die Vor- und Nachteile verschiedener Sensoren sowie die Grenzen ihrer Anwendung aufzeigen (z.B. [7][8][9]). Die zukünftige Herausforderung in der Anwendung bei bestehenden Spannbetonbrücken besteht in der Entwicklung von Standardlösungen für bestimmte Problemstellungen, die eine Lebensdauerverlängerung der Bauwerke ermöglichen.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Regelungen und Richtlinien für die Berechnung und Bemessung von Ingenieurbauwerken (BEM-ING) – Teil 2 Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bonn, 2011
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Berlin: DAfStb, 2020.
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Regelungen und Richtlinien für die Berechnung und Bemessung von Ingenieurbauwerken (BEM-ING) – Handlungsanweisung Spannungsrisskorrosion - Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrisskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Bonn, 2011.

- [4] Novák, B.; Stein, F.; Reinhard, J.; Dudonu, A.: Einsatz kontinuierlicher faseroptischer Sensoren zum Monitoring von Bestandsbrücken. In: Beton- und Stahlbetonbau Volume 116 (2021), Issue 10, S.s 718-726.
<https://doi.org/10.1002/best.202100070>
- [5] Burger, H.; Betz, B.; Richter, B.; Herbers, M.; Schramm, N.; Diers, J.; Schacht, G.; Lingemann, J.; Marx, S; Fischer, O.: Untersuchungen zur Verbundverankerung von durchtrennten Spanngliedern beim Brückenrückbau. In: Beton- und Stahlbetonbau Volume 119 (2024), Issue 10
<https://doi.org/10.1002/best.202400046>
- [6] Fischer, O.; Schramm, N.; Burger, H.; Tephö, T.: Wirklichkeitsnahe Beurteilung des Brückenbestands mit innovativer Sensorik – SpRK-Monitoring der Kreuzhofbrücken München. In: Innsbrucker Bautage 2022 – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix (2022). Herausgeber: Berger, J.
- [7] Bado, M.F.; Casas, J.R.: A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. In *Sensors* (2021), 21, 1818. Basel, Switzerland.
<https://doi.org/10.3390/s21051818>
- [8] Bednarski L.; Sienko R.; Howiacki T.; Zuziak K.; The Smart Nervous System for Cracked Concrete Structures: Theory, Design, Research, and Field Proof of Monolithic DFOS-Based Sensors. *Sensors* (2022), 22, 8713.
<https://doi.org/10.3390/s22228713>
- [9] Berrocal C.; Fernandez I; Bado, M.; Casas J.; Rempling R. (2021) Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing. *Structural Health Monitoring* Volume 20, Issue 6.
<https://doi.org/10.1177/1475921720984431>