

Zustandsbewertung von Spannbetonbauwerken anhand von in Spannglieder integrierter ortsauflösender Sensoren (smart tendons)

<https://doi.org/10.14459/2023.1724792.mbs27.07>

Christian Gläser



Dr.-Ing. Christian Gläser

1995-2000 Studium Bauingenieurwesen, TU München

2000-2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotion am Lehrstuhl für Massivbau der TU München

2007-2009 Technischer Betriebsleiter des MPA BAU der TU München

2009-2018: CEO Europe für den Bereich Vorspanntechnik bei DYWIDAG

2018-2020: President Mega Projects bei DYWIDAG

Seit 2020: Chief Technology Officer bei DYWIDAG, seit 2022 President Corporate Development

Für Spannglieder mit nachträglichem Verbund wurde ein Verfahren entwickelt, Glasfasersensoren in die Hohlräume zwischen den Einzeldrähten von Spannstahlлитzen einzubringen. Durch Optimierung von Faseraufbau und -geometrie konnte ohne zusätzliche Verklebung eine hervorragende mechanische Verbundwirkung zwischen Faser und Spannstahl hergestellt werden und gute Korrelation mit Referenzdehnungsmessungen nachgewiesen werden. Neben einer ortsauflösenden Dehnungsmessung konnten auch Verpressfehler und Spannstahlbrüche erkannt werden.

For bonded multistrand tendons a method for inserting glass fiber sensors into the cavities between the individual wires of prestressing steel strands was developed. By optimizing the fiber layout and geometry, excellent bond could be achieved between fiber and prestressing steel without additional gluing. Good correlation with reference strain measurements could be demonstrated. In addition to spatially resolved strain measurement, grouting errors and prestressing steel fractures could also be detected.

Motivation und Zielsetzung

Faseroptische Sensoren bieten die Möglichkeit der ortsauflösenden Dehnungsmessung über die gesamte Bauwerkslänge [1]. Für die praxistaugliche Anwendung ist eine robuste und den Bauablauf wenig beeinflussende Integration der Glasfaserkabel in das Bauteil mit späterer Verbindung zu einem Messgerät wünschenswert. Für Spannbetonbauwerke wurden in einem durch mfund geförderten Forschungsvorhaben verschiedene Applikationsvarianten der faseroptischen Sensoren in Spanngliedern untersucht.

Spannstahlлитzen mit integrierten Glasfasersensoren bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund

Der größte Mehrwert für Spannglieder mit integrierten Glasfasersensoren wird bei Spannbetonbauwerken mit Spanngliedern mit nachträglichem Verbund gesehen, weil bei diesen Spanngliedern

- die Spanngliedkraft zwischen den Verankerungen infolge örtlicher Spannungszuwächse veränderlich ist und durch den starren Verbund dieser Spannungszuwachs auch Rückschlüsse auf die Spannungsverteilung im Querschnitt zulässt,
- bisher Spannkraftverluste infolge Reibung und Ankerschlupf nur rechnerisch ermittelt werden konnten und mit den beim Spannvorangang gemessenen Gesamtdehnwegen abgeglichen werden konnten,
- die Messung einer Kraft an der Verankerung keinen repräsentativen Aufschluss über mögliche Spannstahldrahtbrüche liefert und
- die Messung der Dehnungen während der Erhärtungsphase des Einpressmörtels Rückschlüsse auf die Verpressqualität liefern kann.

Prinzipiell kann eine Spannstahl-Litze mit integriertem Glasfasersensor auch für verbundlose Vorspannung, Spannbettvorspannung bzw. bei geotechnischen Anker eingesetzt werden.

Es wurden verschiedene Lösungsansätze, Glasfaserkabel in Spanngliedern zu integrieren und damit in Spannbetonbauwerken ohne Störung des Bauablaufs einzubauen, untersucht. Da lose in das Hüllrohr eingeschobene Glasfasersensoren ein hohes Beschädigungspotenzial während des Litzen-einstoßes bzw. Vorspannens aufweisen, wurde dieser Ansatz schnell verworfen. Außen an den Spannstahl-Litzen angebrachte Fasersensoren müssen verklebt werden (oder sich alternativ unter einer die Spannstahl-Litze umgebenden Epoxidharzbeschichtung befinden [2]), um Verbund zwischen den Spannstahl-Litzen und der Faser sicherzustellen. Da Applikationstechnik sowie ausreichende Alkaliresistenz und Langzeitverhalten des Klebers große Herausforderungen darstellen, aber eine Beschädigung der Faser während des Spannstahleinbaus nicht komplett auszuschließen ist, und eine Epoxidharzbeschichtung [2] in Deutschland nicht üblich ist, wurde eine im Inneren der Litze integrierte Faserapplikation favorisiert.

In Deutschland werden üblicherweise siebendrähtige Spannstahl-Litzen mit einem Nennquerschnitt von $A_p = 150 \text{ mm}^2$ (selten auch noch $A_p = 140 \text{ mm}^2$) verwendet. Diese Litzen können mit speziellem Gerät geöffnet werden, so dass in den Zwischenraum zwischen Außendraht und Kerndraht dünne Glasfaserkabel appliziert werden können. Die nach Einbringen der Faser wieder verschlossene Litze unterscheidet sich optisch und mechanisch nicht von einer Standardlitze und kann ohne Einschränkungen – sowohl bei Fertigspanngliedern als auch bei Baustellenfertigung der Spannglieder –

Zustandsbewertung von Spannbetonbauwerken anhand von in Spannglieder integrierter ortsauflösender Sensoren (smart tendons)

verarbeitet werden. Das Einbringen der Fasern im Inneren der Spannglieder ermöglicht es auch, dass die Glasfasersensoren durch die Verankerung hindurchgeführt werden können, ohne dass durch den insbesondere im Bereich der Verankerungskeile auftretendem Querdruck eine Beschädigung der Glasfaser erfolgt.

Der kleberfreie Verbund zwischen Glasfaser und Spannstahl-Litze wird durch einen geeigneten Faseraufbau und geeignete Fasergeometrie sichergestellt. Die eigentliche Faser, die durch den Forschungspartner Solifos AG des durch m fund geförderten Forschungsprojekt „smart tendon“ bereitgestellt wurde, ist dabei von einer Polyamidschicht umgeben und durch einen Edelstahlmantel geschützt. Dies schützt die Faser insbesondere während der Einbringung in die Zwischenräume der Litze, reduziert aber auch die Empfindlichkeit der Faser gegen einwirkenden Querdruck. Durch geometrische Betrachtungen wurde ein geeigneter Faserdurchmesser von ca. 0,8 mm ausgewählt und in Versuchen auf Eignung überprüft. Bei kleineren Durchmessern konnte die Faser aus der Litze herausgezogen werden (kein Verbund), bei größeren Durchmessern wurde die Faser durch den Querdruck der Nachbardrähte abgeklemmt und lieferte keine verwertbaren Messsignale mehr.

Für die Anschlussmöglichkeit der Glasfaser an eine Auslese-einheit muss die Faser außerhalb der Spannglieder-Verankerung freigelegt werden (siehe Abb. 1). Dazu werden die Außendrähte der Litze hinter der Verankerung (im Bereich der später angeordneten Verpresskappe) mit einem Spezialgerät, das eine Beschädigung der Glasfaser ausschließt, abgetrennt.



Abb. 1: In Spannstahl-Litze integrierte Glasfaser zur Dehnungsmessung

Die Faser wird anschließend terminiert und mit einer Spleißverbindung mit einem Kabel mit Steckverbindung verbunden. Diese Steckverbindung kann in die Verpresskappe integriert sein oder aus dieser mit einer Kabeldurchführung herausgeführt werden, falls die Verpresskappe nach Abschluss der Verpressarbeiten einbetoniert wird. Falls bereits während des Spannvorgangs Messungen gewünscht werden, kann auch außerhalb der Spannpresse temporär ein Anschluss für die Auslesegeräte geschaffen werden. Nach Absetzen der Spannpresse und Abschneiden der Spannstahlüberstände muss dann wie oben beschrieben der finale Anschluss hergestellt werden.

Experimentelle Nachweise der Eignung zur Dehnungsmessung

Die prinzipielle Eignung wurde experimentell im Rahmen eines Arbeitspakets des durch mfund geförderten Projekts „smart tendon“ an der HTWK Leipzig in Kooperation mit der IexB Ingenieurgesellschaft für experimentelle Bauwerksuntersuchung mbH getestet. Dabei wurden zunächst alle vorab beschriebenen Sensoranordnungen (geklebt am Außendraht dem Schlag der Litze folgend, geklebt am Außendraht der Litzenachse folgend, eingebracht im Inneren der Litze) an Einzellitzen ohne Endverankerung im Zugversuch getestet und die gemessenen Werte mit den Messwerten von z.B. induktiven Wegaufnehmern, die an der Litze angebracht waren, verglichen. Alle Versuche belegten gute Übereinstimmung mit der Referenzmessung. Aufgrund der leichteren Applikationstechnik wurde jedoch entschieden, alle weiteren Untersuchungen ausschließlich mit den zwischen die Einzeldrähten eingebrachten Glasfasersensoren durchzuführen.

Im nächsten Schritt wurden Zugversuche an keilverankerten Einzellitzen im zementverpressten Hüllrohr durchgeführt. Die Litzen wurden dazu ins Hüllrohr eingebracht, in einem Rahmen (siehe Abb. 2) vorgespannt und bei ca. $0,6 F_{pk}$ verankert. Um die sonst bei kurzen Litzenlängen starken Verluste aus Keilschlupf auszugleichen, wurden Tellerfedern unter den Verankerungen montiert.

Zustandsbewertung von Spannbetonbauwerken anhand von in Spanngliedern integrierter ortsauflösender Sensoren (smart tendons)



Abb. 2: Vorspannen der mit Glasfaser versehenen Litzen in einer Rahmenkonstruktion im DYWIDAG Prüflabor Leipzig

Die Hüllrohre wurden anschließend im geeigneten Zustand mit Zementmörtel verfüllt (siehe Abb. 3) und im vorgespannten Zustand an die HTWK übergeben. Während des Erhärtens des Einpressmörtels wurden die Dehnungen gemessen und es war möglich, die in einigen Prüfkörper eingebrachten Fehlstellen im Zementmörtel ab ca. 10 cm Länge zu detektieren.

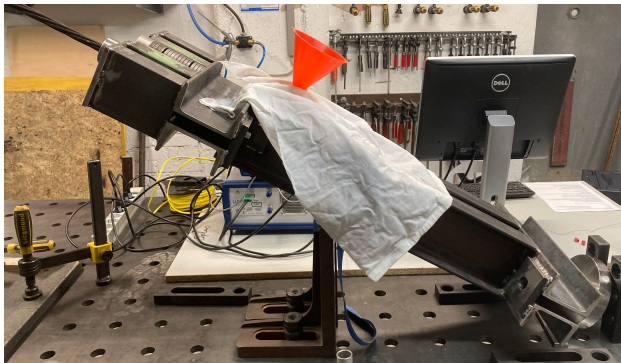


Abb. 3: Verpressen der mit Glasfaser versehenen Einzelligenspannglieder im DYWIDAG Prüflabor Leipzig

Neben den ohne Imperfektionen hergestellten Prüfkörpern wurden auch Prüfkörper erstellt, bei denen durch Styroporkörper Verpressfehler simuliert wurden oder Litzen mechanisch geschwächt wurden, so dass diese bei weiterer Belastung in der Prüfmaschine versagen. Alle Probekörper wurden an der HTWK bis zum Spannstahlbruch belastet (siehe Abb. 4).

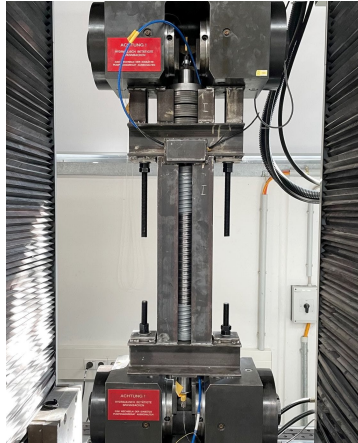


Abb. 4: Zugversuch der mit Glasfaser versehenen Einzellitzenspannglieder an der HTWK Leipzig

Alle Versuchsergebnisse zeichneten sich durch exzellente Korrelation der mittels Faseroptik und herkömmlichen Wegaufnehmern gemessenen Dehnungen. Die bei der Laststeigerung über die Vordehnung erfolgte Rissbildung im Einpressmörtel konnte gut erkannt werden. Drahtbrüche konnten mühelos identifiziert werden. Allerdings war es nicht möglich, das Versagen bzgl. Laststufe und Ort vor Versagen zuverlässig zu prognostizieren.

Im nächsten Schritt des über m fund geförderten Forschungsvorhabens werden nun an der TU Dresden Bauteilversuche durchgeführt, Auswertemethoden durch MKP entwickelt und dann hoffentlich an einem Pilotbauwerk die finale Eignung demonstriert werden können.

Verwertung der Ergebnisse der faseroptischen Messung für die Bewertung des Bauteilzustands

Faseroptische Sensoren unterliegen keiner Alterung. Anders als bei herkömmlichen Sensoren (z.B. Kraftmessdosen) ist von einer lebensdauerübergreifenden Nutzbarkeit auszugehen. Dies ist besonders wichtig, da gerade im fortgeschrittenen Bauwerksalter Veränderungen des Tragverhaltens beobachtet werden sollen.

Aufgrund der derzeit noch hohen Anschaffungskosten für Auslesegeräte ist von einem kontinuierlichen Monitoring nicht auszugehen, was auch bei guter Bauausführung in den ersten Nutzungsjahren eines Bauwerks wenig Information liefern würde. Ohne große Kosten kann bei den Hauptprüfungen nach DIN 1076 [3] ein Auslesegerät angeschlossen werden und die Dehnungen zu diesem Zeitpunkt festgehalten werden und mit den Dehnungen zum Zeitpunkt der Nullmessung (empfehlenswert direkt nach dem Vorspannen) nach erfolgter Temperaturkompensation abgeglichen werden. Die Temperaturmessung kann dabei z.B. mit denselben Fasern und Auslesegeräten, die Raman-Anteile des Lichtsignals nutzen, erfolgen.

Die Auswertung der Messsignale kann neben Rückschlüssen auf die aktuelle Spanngliedkraft an einer beliebigen Stelle im Bauwerk auch Informationen über eine Rissbildung, insbesondere in für eine haptische Prüfung nicht zugänglichen Bereichen, liefern. So kann damit z.B. Rissbildung in der Fahrbahnplatte, die ohne Entfernen des Belags bzw. der Bauwerksabdichtung bei einer normalen Brückenhauptprüfung nicht erkennbar ist, detektiert werden, anhand rechnerischer Simulation möglicher Schädigungsmechanismen die Ursache erkannt werden und frühzeitig Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Da nur wenige (meistens sogar nur eine oder zwei Litzen) pro Spannglied und auch nicht alle Spannglieder mit faseroptischen Sensoren ausgestattet werden müssen, entstehen nur unwesentliche Mehrkosten während der Bauphase, es können aber bedarfsgerecht während der Lebensdauer wertvolle Informationen zum Tragverhalten und Bauwerkszustand gewonnen werden.

Fazit

Die beschriebene Technologie bietet großes Potential für Neubauten von Spannbetonbrücken, wo bei nur minimaler Steigerung der Herstellkosten ohne Behinderung des Bauablaufs Sensoren integriert werden können, die zu jedem späteren Zeitpunkt während der Nutzungszeit wichtige Informationen liefern können. Die eingebauten Sensoren sind sowohl mit Messgeräten basierend auf der Rayleigh-Rückstreuung des Frequenzspektrums als auch mit Ausleseeinheiten, die Brillouin-Anteile des Lichtsignals nutzen, verwendbar. Mehrere faseroptische Sensoren können mit Multiplexern an die Ausleseeinheiten angeschlossen werden oder durch Verbindung der Fasern an den dem Messgerät abgewandten Seiten zu Schlaufen verbunden werden. Technische Weiterentwicklungen der Messgeräte sollten mit den eingebauten Fasern uneingeschränkt nutzbar sein. Für Dauermessungen sind geeignete Verfahren zur Datenreduktion zu entwickeln.

Derzeit geplante Pilotanwendungen (z.T. in verwandten Forschungsvorhaben) werden die Praxistauglichkeit beweisen. Eine Verknüpfung mit vorhandenen Bauwerksprüfnormen (DIN 1076 [3], Ri-EBW-Prüf [4] etc.) ist möglich und soll nach erfolgten Praxisversuchen angegangen werden.

Literatur

- [1] Samiec, D.: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. In: Photonik 6/2011.
- [2] Masashi Oikawa, Shinji Nakaue, Naoki Sogabe, Michio Imai: "SmART Strand" Prestressing Steel Strand with Optical Fiber Sensor for Tension Monitoring. Im Tagungsband des „13th - Japanese-German Bridge Symposium“, 01/2023, Osaka.
- [3] DIN 1076: „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung“, 11/1999, Berlin.
- [4] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, Stand 22.02.2017