

Anwendungsbereiche von Fiber Optic Sensing im digitalen Bahnsystem

Fiber Optic Sensing (FOS) gilt bereits seit mehreren Jahren als zukunftsfähige und potentialreiche Technik im Bereich der Sensorik mit einer Vielzahl von branchenübergreifenden Einsatzmöglichkeiten. Doch welche Anwendungsbereiche und zugrunde liegenden Messtechnologien bieten das größte Potential zum Einsatz im Bereich digitaler Bahnsysteme und wo liegen aktuell die wesentlichen Herausforderungen?

1. Einordnung und Beschreibung von FOS

Fiber Optic Sensing (FOS) findet in vielen Industrien seinen Einsatz und wird beispielsweise in der Öl- und Gasindustrie zur Überwachung kritischer Infrastrukturelemente wie Pipelines verwendet. Der übergeordnete Begriff des Fiber Optic Sensing (FOS) beschreibt eine Messtechnik, bei der Messgrößen über faseroptische Sensoren ermittelt werden. Grundsätzlich wird dabei zwischen punktuellen Messungen, bei der sich der Sensor an einem bestimmten Messpunkt entlang der Faser befindet, sowie verteilten Messungen, bei der die vollständige Faser als Sensor verwendet wird, unterschieden. Zur Anwendung werden Lichtimpulse in eine Faser gesendet und die Reflexionen, die innerhalb dieser entstehen, von der Auswerteinheit aufgenommen und verarbeitet. Veränderungen

dieser Reflexionen geben einen Aufschluss über äußere Einflussfaktoren (z.B. mechanische Wellen, Temperatur), die auf die Faser einwirken. [1] Im Bahnbereich wurden hierzu Messprinzipien jeweils auf Basis punktueller sowie verteilter, faseroptischer Sensoren grundlegend erprobt.

Zu den punktuellen Sensortechnologien zählt Fiber-Bragg-Grating (FBG). Bei dieser Technologie werden periodisch verteilte Mikrostrukturen mit Hilfe eines UV-Lasers in die Faser eingeschrieben. Diese Mikrostrukturen (Bragg-Gitter) fungieren als Interferenzfilter und führen zu einer Reflexion der Lichtimpulse mit Wellenlängen innerhalb des Filterbereichs. Äußere Einflüsse (z.B. Temperaturänderungen, mechanische Einwirkungen) führen zu einer Änderung der Bragg-Wellenlänge und können über die veränderte Reflexion detektiert werden. [2] Im Bereich der sicherheitsrelevanten Achszähltechnik werden beispielsweise bereits heute Glasfasern mit eingeschriebenen Faser-Bragg-Gittern als Sensoren verwendet. Über eine Klebeverbindung werden diese Sensoren direkt am Gleis befestigt. Durch die Verformung des Gleises bei Belastung verändert sich der Gitterabstand und damit die reflektierte Wellenlänge der Faser, wodurch ein hochgenaues Zählen von Achsen möglich wird. [3]

Im Vergleich hierzu werden bei verteilten, faseroptischen Sensortechnologien die natürlichen Eigenschaften der Glasfaser genutzt. Einschlüsse sowie Partikel



**Master of Science
Patrick Paulovic**

Junior Consultant,
quattron management
consulting gmbh

patrick.paulovic@quattron.com

innerhalb der Faser führen zur Reflexion der Lichtimpulse, der sogenannten Rückstreuung (Backscattering). Das Prinzip des Distributed Acoustic Sensing (DAS) basiert dabei auf Veränderungen der Reflexion, die durch äußere, insbesondere akustische Einflüsse in Form von Schallwellen auf die Glasfaser einwirken. Dabei kann, basierend auf dem Prinzip der linearen Rayleigh-Streuung, die Intensität der Rückstreuung in Abhängigkeit zur vergangenen Zeit seit Absendung des Laserimpulses gesetzt werden, um Rückschlüsse auf die Ausprägung sowie den Ort der physischen Einwirkung auf die Glasfaser abzuleiten. Hierzu werden Single-Mode-Fasern aus dem Telekommunikationsbereich verwendet, die mit Hilfe minimaler Anpassung an den Enden der Faser zur Nutzung von DAS, in virtuelle Mikrofone umgewandelt werden können. [2]

Im Bahnsystem entstehen für FOS eine Vielzahl möglicher Einsatzbereiche, wobei sich hier insbesondere DAS als vielversprechende Technologie herauskristallisiert hat, die nach einmaliger Installation für

Im Bahnsystem entstehen für FOS eine Vielzahl möglicher Einsatzbereiche, wobei sich hier insbesondere DAS als vielversprechende Technologie herauskristallisiert hat.

unterschiedliche Anwendungsszenarien verwendet werden kann.

Für DAS können einzelne, freie Glasfasern genutzt werden, die bereits in Kabelschächten in unmittelbarer Nähe zum Gleis verlaufen. Durch die Anbindung einer Abfrageeinrichtung (Interrogator) können über DAS Live-Daten generiert und Unregelmäßigkeiten über eine Strecke von 70 km zeitlich sowie örtlich detektiert werden. [4] DAS-basierte Systeme erzeugen trotz regelbasierter Filterung sehr große Datenmengen (mind. 1 Terrabyte am Tag/Auswertehheit), deren Speicherung und Verarbeitung im digitalen Bahnsystem in einem zentralisierten Data-Center erfolgt. [5]

2. Anwendungsbereiche von DAS im digitalen Bahnsystem

Die Haupteinsatzbereiche von FOS im digitalen Bahnsystem können für diese Betrachtung in Instandhaltung, Umfeldüberwachung und sicherheitsrelevante Zuglokalisierung im Bereich der Leit- und Sicherungstechnik (LST) untergliedert werden.

2.1. Instandhaltung

In der Digitalisierung des Bahnsystems liegt der Fokus auf der Verbesserung der Betriebsqualität sowie der Kapazitätssteigerung. Um dies zu realisieren, bestehen sowohl fahrzeug- als auch streckenseitig hohe Qualitätsanforderungen, die im digitalen Bahnsystem mit Hilfe eines modernen Instandhaltungssystems sichergestellt werden müssen. Als wichtiges Element dieses echtzeitbasierten Instandhaltungssystems kann DAS genutzt werden, um Unregelmäßigkeiten am Fahrzeug sowie im Bereich der Infrastruktur zu detektieren. Dabei werden alle Vibrationen und Geräusche von der Faser erfasst und Abweichungen vom Normzustand durch Auswertelgorithmen sichtbar.

Aktuell verwendete Systeme zur Zustandsüberwachung von Fahrzeugen und Infrastruktur im Rahmen eines Instandhaltungssystems lassen sich grundlegend in vier Hauptgruppen unterteilen.

- Fahrzeug misst Infrastruktur (Track Recording Cars/Gleismesswagen)
- Fahrzeug misst Fahrzeug (Vehicle On-Board Health Monitoring System)
- Infrastruktur misst Infrastruktur (Trackside Sensor System)
- Infrastruktur misst Fahrzeug (Way Side Train Monitoring System) [5]

Alle Systemgruppen sind in der Anwendung erprobt und die Stärken liegen primär in der präzisen Ermittlung von Messdaten. Allerdings führt sowohl die Nutzung, die Installation als auch die Wartung dieser Systeme zu hohen Kosten. In diesem Zusammenhang kann durch den Einsatz von DAS ein Großteil der Grundfunktionalitäten der Systeme abgedeckt und eine Zustandsüberwachung sowohl der Fahrzeuge als auch der Infrastruktur realisiert werden. Zudem ist DAS im Vergleich zu anderen Zustandsüberwachungssystemen (Einzel- bzw. Gesamtsystem) wartungsarm und durch die Möglichkeit der Verwendung einzelner, bereits vorhandener Glasfasern vergleichsweise kostengünstig.

2.2. Umfeldüberwachung

Viele Bahninfrastrukturbetreiber sehen sich mit steigenden Herausforderungen konfrontiert, die durch Vandalismus und Diebstählen an Infrastrukturelementen verursacht werden. Auch in diesem Bereich findet Fiber Optic Sensing seinen Einsatz. Durch DAS ist es den Betreibern möglich, eine flächendeckende und kostengünstige Überwachung der Bahninfrastruktur bereitzustellen. Akustische Signale, die Täter durch physische Bewegungen an relevanten Infrastrukturelementen im Bereich des Gleisfeldes ausstrahlen, können über die Glasfaser erfasst und ausgewertet werden. Dabei dient DAS der Lokalisierung des Eindringlings bzw. Täters. Durch die Kombination mit einem innovativen Videoüberwachungssystem besteht zusätzlich die Möglichkeit, diese direkt zu identifizieren und mögliche Gegenmaßnahmen zu initiieren. Im Vergleich zu einer vollständig kamerabasierten Überwachung der Infrastruktur, ermöglicht die Nutzung von DAS eine Senkung der Ausrüstungs-, Wartungs- sowie Personalkosten. [6]

Neben Schäden an der Infrastruktur durch Vandalismus und Diebstählen kann DAS zudem verwendet werden, um Personen, Tiere oder Gegenstände im Gleis zu detektieren. So können Schäden, die durch äußere Umwelteinflüsse wie Hangrutsche oder umgestürzte Bäume verursacht wurden, schneller entdeckt und beseitigt werden, um die Sicherheit und Qualität des Bahnbetriebs weiter zu verbessern. [7]

2.3. Zuglokalisierung

Neben der Instandhaltung und Umfeldüberwachung bietet DAS ein großes Potential, in digitalen Bahnsystemen zukünftig

auch im Bereich der sicherheitsrelevanten Zuglokalisierung zum Einsatz zu kommen. Zum aktuellen Zeitpunkt erfolgt dies infrastruktureitig und punktuell durch die Verwendung einer Gleisfreimeldung mit Gleisstromkreisen, Achszählssystemen und Balisen, die hohe Investitions- und Wartungskosten an einer großen Menge an Außenanlagen verursachen. [8]

Die Verwendung von DAS ermöglicht hingegen eine kontinuierliche Zuglokalisierung, durch die Aufnahme aller Vibrationen und Geräusche, die mittels Rad-Schiene-Kontakt vom Fahrzeug auf die Faser einwirken. Dies bietet im Vergleich zu satellitenbasierten Zuglokalisierungssystemen den Vorteil, dass eine genaue Lokalisierung auch in Bereichen mit schlechtem bzw. keinem GPS-Signal sowie auch GSM-R (z. B. in Tunneln) möglich ist. [1]

In diesem Anwendungsszenario werden ebenfalls bereits vorhandene Glasfasern verwendet, die wiederum an eine Auswerteeinheit und Stromversorgung angeschlossen werden. Diese einfache Installation ermöglicht die schnelle und kostengünstige Ausrüstung einer Vielzahl von Strecken mit DAS-Technologie. Da vorhandene Glasfasern meist nicht direkt an der Strecke verlaufen, ist zur Vermeidung von Messfehlern eine Geo-Kalibrierung notwendig. Aktuelle Systeme ermöglichen dabei eine automatisierte Konfiguration mit anschließender selbständiger Geo-Kalibrierung. Dies führt dazu, dass DAS bereits nach wenigen Testfahrten betriebsbereit ist und zur Zuglokalisierung verwendet werden kann. Stand heute können so ca. 85–95% einer Strecke überwacht und Bereiche, in denen aktuell keine Detektion möglich ist, stark vermindert werden. Dabei ist die Genauigkeit der Zugortung maßgeblich von der Streckenkenntnis, der Qualität der Geo-Kalibrierung und dem speziell entwickelten Auswertelgorithmus abhängig. Mit Hilfe eines zusätzlichen Edge-Computing-Systems können die riesigen Mengen gesammelter Rohdaten auf relevante Informationen reduziert werden. Dies ermöglicht die sekundliche, visuelle Darstellung der für die Zuglokalisierung wesentlichen Informationen wie Zuganfang/-ende (in GPS-Koordinaten oder Streckenkilometrierung), die Zuggeschwindigkeit sowie das befahrene Gleis. [1]

3. Herausforderungen für den Einsatz von FOS im Bahnsystem

Trotz der raschen Weiterentwicklung der Technologie sind für den effizienten Einsatz

von FOS im Bahnsystem noch einige Herausforderungen zu überwinden.

In vielen Anwendungsfällen von DAS werden bereits vorhandene Glasfasern genutzt, die entlang der Strecke in Kabelkanälen verlegt sind. Diese verlaufen jedoch häufig nicht parallel zum Gleis bzw. weisen unterschiedliche Entfernungen zur Gleisachse oder ein besonderes Glasfaserslayout, wie z.B. an Bahnhöfen, auf und können dadurch zu Messungenauigkeiten beim Einsatz in der Instandhaltung sowie Zuglokalisierung führen. Um diese Messungenauigkeiten zu minimieren, ist eine genaue Streckenkenntnis sowie das Einfügen zusätzlicher Kalibrierungspunkte an außergewöhnlichen Stellen der Strecke und Positionen der Faser notwendig. Hierbei versprechen jedoch moderne DAS-Systeme Abhilfe durch Ausgleich mittels automatischer Geo-Kalibrierung. [5] Mit Hilfe zusätzlicher Zuordnung von Streckeninformationen (z. B. Entfernung der Glasfaser zur Gleisachse) zu Positionen entlang der Faser und Beachtung dieser im Rahmen der quantitativen Auswertung, sind zukünftig weitere Optimierungen möglich.

Darüber hinaus können äußere Bedingungen (z. B. das Wetter) oder Störgrößen wie Geräusche von Fahrzeugen an Bahnübergängen die Messgenauigkeit von DAS negativ beeinflussen. Diese wechselnden Umwelteinflüsse führen dazu, dass in Erprobungen eine identische Zugeinheit mit gleicher Beladung zu unterschiedlichen Tages- und Uhrzeiten Abweichungen der Messwerte aufweist. [5] Eine weitere Herausforderung stellt die grundsätzliche Messmethodik von DAS dar. Die Einwirkungen auf die Faser in Form von Vibrationen des Zuges über den Rad-Schiene-Kontakt sind grundlegend abhängig von deren Geschwindigkeit. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass DAS-Systeme fahrende Züge sehr gut detektieren können, bei stehenden Zügen jedoch nur sehr geringe Einwirkungen auf die Faser in Form der fahrzeugeigenen Aggregatgeräusche ermittelt werden können. [9] Um diesen Grenzfalle des stehengebliebenen Zuges dennoch bewerten zu können, verwenden aktuelle Systeme dedizierte, regelbasierte Algorithmen. [10] Durch die Weiterentwicklung quantitativer Messungen sowie der zugehörigen Auswertalgorithmen besteht ferner unter Nutzung des Potentials von Machine Learning die Möglichkeit, Messungenauigkeiten zu vermindern und spezifische Ereignisse noch genauer zu detektieren. [1]

4. Fazit

Fiber Optic Sensing bietet eine Vielzahl verschiedener Einsatzbereiche im digitalen Bahnsystem. Insbesondere DAS hebt sich dabei durch enormes Einsparungspotential von Ausrüstungs-, Wartungs- sowie Personalkosten und die Möglichkeit der kontinuierlichen Erfassung von Live-Daten von den bestehenden Systemen in den Bereichen der Instandhaltung, Umfeldüberwachung und Zuglokalisierung ab.

So ist es bereits heute möglich, bei nicht sicherheitsrelevanten Anwendungen der Instandhaltung wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen, die zu einer steigenden Sicherheit und Qualität des Bahnsystems führen. Allerdings ist zu beachten, dass DAS zum aktuellen Zeitpunkt im Bereich der Instandhaltung (noch) nicht den Ansatz verfolgt, bestehende und erprobte Systeme der Zustandsüberwachung vollständig abzulösen. Der Fokus liegt bislang noch auf der Bereitstellung von zusätzlichen Informationen, um diese bestehenden Systeme effektiver zu nutzen. Dabei dient DAS der Erfassung von Streckenschäden sowie der Bereitstellung von Positionsinformationen, die genutzt werden können, um Track Recording Cars gezielt einzusetzen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine effektive Mängelbehebung bei kosteneffizienter Nutzung der vorhandenen Ressourcen. [5]

Die Nutzung von DAS in der Instandhaltung sowie der Umfeldüberwachung ermöglicht die Live-Erprobung und Sammlung wertvoller Daten, die zukünftig adaptiert werden können, um das große Potential dieser Technologie auch im Bereich der sicherheitsrelevanten Zuglokalisierung zu nutzen. Dabei werden DAS-Systeme als Unterstützung zu den vorhandenen zug- und streckenseitigen Systemen verwendet, um in Netzen mit langen Blockabschnitten oder vielen Tunneln mit schlechter GPS- sowie GSM-R-Verbindung zusätzliche Informationen zur Ermittlung der exakten und aktuellen Zugposition bereitzustellen. [1]

Mit Hilfe zielgerichteter Weiterentwicklungen der Auswerteinrichtung und zugehöriger Algorithmen sowie der Zuordnung von erweiterten Streckendaten zu Positionen entlang der Faser wird es jedoch in naher Zukunft möglich sein, DAS als eigenständiges System zur sicherheitsrelevanten Zuglokalisierung zu nutzen. Dies bietet die große Perspektive der Ablösung einer Vielzahl von Einzelkomponenten (z. B. Achszählsysteme inkl. zugehörige Stellwerkselemente), die zu einer enormen Kos-

tenersparnis, resultierend aus verringerten Ausrüstungs- sowie Wartungskosten, erhöhter Kapazität, Qualität und Flexibilität in Verbindung mit einer Komplexitätsreduktion des Bahnsystems führen. •

Literatur

- [1] Zeilinger, R.; Haid, S.: Präzise Zugortung in Echtzeit auf Basis von FOS, SIGNAL+DRAHT (112) 09/2020, S. 38–46
- [2] Rosenberg, M.; Hall, A.: Distributed Acoustic Sensing als Basistechnologie für Anwendungen im Bahnbereich, SIGNAL + DRAHT (108) 9/2016, S. 73–84
- [3] Heyder, M.; Arezki, A.: Innovation im Bahnbereich – Achszähler auf Basis von optischen Sensoren, SIGNAL + DRAHT (110) 9/2018, S. 92–97
- [4] AP Sensing GmbH [Hrsg.] (o.J.): Distributed Acoustic/Vibration Sensing (DAS/DVS), <https://www.apsensing.com/technology/distributed-acoustic-sensing-das-dvs>, abgerufen am 09.01.21 um 15:00
- [5] Vidovic, I.; Marschnig, S.: Optical Fibres for Condition Monitoring of Railway Infrastructure – Encouraging Data Source or Errant Effort?, Appl. Sci. 2020, 10, 6016, <https://doi.org/10.3390/app10176016>
- [6] de las Heras, J. C.; Kleine, M.: Innovative Kombination aus Distributed Acoustic Sensing und Kameraüberwachung, SIGNAL + DRAHT (112) 6/2020, S. 24–30
- [7] Deutsche Bahn AG [Hrsg.] (2019): Immer ein Ohr an der Schiene: Fiber Optic Sensing, <https://inside.bahn.de/fiber-optic-sensing>, abgerufen am 09.01.21 um 16:00
- [8] Schild, R. R.; Schnieder, E.; Rettinger, A.; Robl, C.; Freissler, T.; Becker, U.; Kaloustian, S.; Ackermann, U.; Brand, A.: smartrail 4.0 (2019): Zwischenbericht Technologie PoC Lokalisierung, www.smartrail40.ch, abgerufen am 10.01.21 um 14:00
- [9] Exner, J.; Pohl, P.: Potenzial und Entwicklungsschwerpunkte der verteilten faseroptischen Sensorik im Bahnbereich, SIGNAL + DRAHT (111) 1+2/2019, S. 27–30
- [10] Lancaster, G.; Rosenberger, M.: Distributed Acoustic Sensing (DAS) im Bahnbereich: Umsetzung einer Vision, Signal + DRAHT (110) 7+8/2018, pp. 47–57

Summary

Application fields of Fiber Optic Sensing in the digital rail system

FOS offers a variety of application fields in the digital railway system and can already be used today for non-safety relevant applications in maintenance and environment monitoring. The combination of existing as well as DAS-based systems offers the advantage of live-testing, data and information collection. This enables further development in technology in order to use it in the future also as an independent train localizing system in the railway system. So, the full potential of FOS regarding capacity and quality increase as well as the cost efficiency of the railway system can be exploited.