

SensoJointField: Umsetzung eines IoT-Sensornetzwerks für das Deformationsmonitoring hochbeanspruchter Betonfahrbahndecken

Philipp ENGEL¹ & Christoph RECKNAGEL²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Philipp.Engel@BAM.de (corresponding Author)

² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Christoph.Recknagel@BAM.de

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-016](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-016), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

1 Einführung und Problemstellung

Im standardisierten Betonstraßenbau stellen Fugen und deren abdichtender Verschluss durch angepasste Fugenfüllsysteme sensible, zugleich jedoch unverzichtbare Konstruktionselemente dar. Ihr Funktionsverhalten und ihre Dauerhaftigkeit haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Nutzungs- und Lebensdauer von Betondeckenkonstruktionen und bestimmen über die erreichbaren Erhaltungsintervalle wesentlich die Verfügbarkeit von Betonstraßen. Vor dem Hintergrund erkannter Schadensursachen stellt der Übergang von einer überwiegend empirisch geprägten Dimensionierungs- und Bewertungsmethodik der Konstruktionselemente Fuge und Fugenfüllsystem hin zu einer gebrauchsbazogenen, funktionsanalytischen Methodik einen wesentlichen Ansatz zur Optimierung und Weiterentwicklung des Betonstraßenbaus dar (RECKNAGEL u. a., 2024).

Zentrale Voraussetzung für eine solche funktionsanalytische Dimensionierung und Bewertung ist die möglichst realitätsnahe Erfassung der Art und des Umfangs der maßgebenden Beanspruchungen von Fuge und Fugenfüllsystem. Nur auf dieser Grundlage lässt sich die Einwirkseite auf die Gebrauchseigenschaften des Systems angemessen beschreiben. Neben den direkten klimatischen und weiteren Umwelteinwirkungen sind insbesondere die aus diesen Beanspruchungen resultierenden Deformationen als entscheidende Einflussgrößen auf die Konstruktionselemente zu berücksichtigen. Das anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsprojekt „SensoJointField“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) verfolgt das Ziel, diese Deformationen unter praxisnahen Verkehrs- und Klimabedingungen sowie unter Berücksichtigung konstruktiv-technologischer Besonderheiten aktueller Regelbauweisen zu erfassen.

Die messtechnische Basis bildet der von der BAM nach straßenbaurelevanten Kriterien entwickelte hochauflösende Sensor „SensoJoint“ (SPITZER u. a., 2020). Dieser ist für den Einsatz direkt in der Rollspur des Schwerverkehrs auf hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken konzipiert und ermöglicht die mehraxiale Erfassung sowohl klimatisch induzierter Verformungen als auch verkehrsbedingter relativer Fugenbewegungen (Abb. 1).

Für den praxisnahen Erprobungseinsatz der „SensoJoint“-Sensorik in Kombination mit ergänzenden Sensoren wurden im Rahmen des Projekts „SensoJointField“ autarke Online-Monitoring-Stationen gefertigt (ENGEL u. a., 2025).

2 Methodik

Zentrale Komponente der Monitoring-Station ist der von der BAM entwickelte „SensoJoint“-Sensor, der bereits in einem vorgelagerten Entwicklungsprojekt unter definierten Leistungsanforderungen umgesetzt wurde. Zu den besonderen Kriterien zählen eine baustellengerechte Einbaugeometrie, Beständigkeit gegenüber Temperatur- und Feuchteeinwirkungen, Überrollbarkeit durch den LKW-Schwerverkehr sowie die Möglichkeit der Wiederverwendung. Weiterhin war die Spannweite der erforderlichen Leistungsmerkmale durch die Erfassung von z. B. jahreszeitlich bedingten Relativbewegungen im Bereich mehrerer Millimeter und gleichzeitiger Detektierbarkeit hochfrequenter verkehrsinduzierter Relativbewegungen in μm -Auflösung bestimmt. Im Rahmen einer Erprobungskampagne auf dem Untersuchungsgelände duraBAST konnte mit einem Prototyp nachgewiesen werden, dass die Entwicklungsanforderungen erfüllt sind (SPITZER u. a., 2019).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden im Projekt „SensoJointField“ zwei Monitoring-Stationen für die BAM-Sensortechnik entwickelt, die jeweils aus einem Schaltschrank mit den erforderlichen Komponenten für die autarke Energieversorgung, die Sensordatenerfassung und deren Fernübertragung bestehen (Abb. 2). Zusammen bilden die Monitoring-Stationen ein Sensornetzwerk für Messkampagnen entlang der Bundesautobahn A9 in Fahrtrichtung Berlin sowie der Bundesautobahn A4 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main.

Projektziel ist einerseits der Nachweis dauerhafter Funktionsfähigkeit und Praxiseignung des Monitoringkonzepts im permanenten Online-Betrieb unter realen klimatischen Einwirkungen und höchsten verkehrlichen Belastungen im Bundesfernstraßenbereich. Andererseits sollen mit Hilfe der Zeitreihen die Grundlagen für das Funktionsverständnis verschiedener komplexer Fahrbahnbelagskonstruktionen auf Basis moderner Baustoffqualitäten sowie des aktuellen Dimensionierungs- und Konstruktionsniveaus erarbeitet werden.

Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Sensortechnik

Sensor	Messgrößen	Schnittstelle
SensoJoint	3D-Deformationen	analog
Linearpotentiometer	1D-Deformationen	analog
Pt100	Temperatur	analog
Weight-in-Motion	Verkehrsdaten	HTTP
UV-Sensor	UV-Strahlung (UV-A/B)	Modbus RTU
Wetterstation	Meteorologie, GPS-Position	Modbus RTU

Neben den bereits genannten messtechnischen Gebrauchsanforderungen wurden an die technischen Eigenschaften des Systems weitere spezifische Entwicklungsanforderungen gestellt: eine baustellengerechte miniaturisierte Bauart, vandalismus- und witterungsgeschützte sowie gedämmte Ausführung, die Dauerbetriebsfähigkeit im Temperaturbereich von -10 bis $+50$ °C sowie ein energieautarker und verbrauchsoptimierter Betrieb. Als zusätzliche Anforderung ist die Rückführbarkeit verkehrsinduzierter Deformationen zur auslösenden Fahrzeugklasse anzustreben und das mobilfunkgestützte, fernwartungsfähige Sensornetzwerk für eine redundante Datensicherung auszulegen. Die Mess- und Steuertechnik muss über spezifische Hardware-Schnittstellen verfügen, um eine Kombination der unterschiedlichen Sensortypen für Deformationsmessungen, Fahrzeugklassifizierungen und klimatische Kennwerte zu ermöglichen. Die technische Umsetzung der „SensoJointField“-Messstationen soll nachfolgend beschrieben werden.



Abb. 1: „SensoJoint“-Sensor im überrollfähigen Gehäuse

3 Sensorik für das Deformationsmonitoring

Für die Deformationsmessungen an den beiden Autobahnabschnitten wurden jeweils drei elektro-mechanische „SensoJoint“-Sensoren als primäres Messsystem in aufeinanderfolgenden Fugenbereichen der Rollspur des LKW-Verkehrs installiert. Die Sensoren sind an eine autonom arbeitende Monitoring-Station angeschlossen. Die erfassten Signale werden über separate Signalwandler an einen Test-Controller übermittelt und mit einer Abtastrate von bis zu 2000 Hz lokal aufgezeichnet. Die Messfrequenz kann in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen flexibel angepasst werden.

Im Feldeinsatz unterscheidet das Monitoring-System zwischen zwei Betriebsmodi, die automatisch in Abhängigkeit von der Tageszeit aktiviert werden. Messungen zur Erfassung des aktuellen quasi-statischen Deformationszustands erfolgen stündlich über eine Dauer von 30 s

bei einer Abtastrate von 200 Hz. Zusätzlich werden während der Hauptverkehrszeiten zweimal täglich dynamische Aufzeichnungen der Deformationen für jeweils 10 min bei 2000 Hz durchgeführt. Die Leistungsfähigkeit der Sensoren wurde im Labor unter quasi-statischer Belastung sowie unter dynamischen Bedingungen verifiziert. In allen drei Messachsen erreichen die Sensoren eine Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ bei einer maximalen mittleren Abweichung von weniger als $0,05 \text{ mm}$ im Temperatureinsatzbereich zwischen $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jede Monitoring-Station kann durch zusätzliche Sensoren erweitert werden (Tab. 1). Ein Array aus vier Platin-Temperatursensoren (Pt100) ist direkt in die Fahrbahnoberfläche integriert. Zudem sind eine kompakte Wetterstation zur Erfassung von Temperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchte sowie ein Strahlungssensor für das UV-A/B-Spektrum auf dem Dach der Station installiert. Die Datenübertragung dieser Sensoren erfolgt über das standardisierte Feldbussystem Modbus RTU, das in industriellen Anwendungen weit verbreitet ist.

Am Untersuchungsabschnitt der BAB A9 wird die Sensorik durch ein Verkehrserfassungssystem „Weight-in-Motion“ (WIM) zur Fahrzeugklassifizierung und einen linearen Wegaufnehmer (Potentiometer) für konventionelle Deformationsüberwachungsmessungen ergänzt. Das integrierte WIM-System besteht aus Achslastsensoren, Induktionsschleife und Daten-Logger mit HTTP-Schnittstelle, über die ein automatischer Datenabruf möglich ist. Der Logger attribuiert anhand der Sensordaten den überrollenden Verkehr, etwa den Fahrzeugtyp nach Euro-13, die Geschwindigkeit und das Gesamtgewicht. Die Verkehrsdaten können anschließend im Post-Processing mit dem Deformationsdaten der „SensoJoint“-Sensoren verknüpft werden. Dazu muss lediglich gewährleistet sein, dass die Zeitstempel der im Verbund arbeitenden Sensoren durch ein Referenz-Zeitsignal (z. B. NTP/PTP, DCF77 oder GNSS) synchronisiert sind.

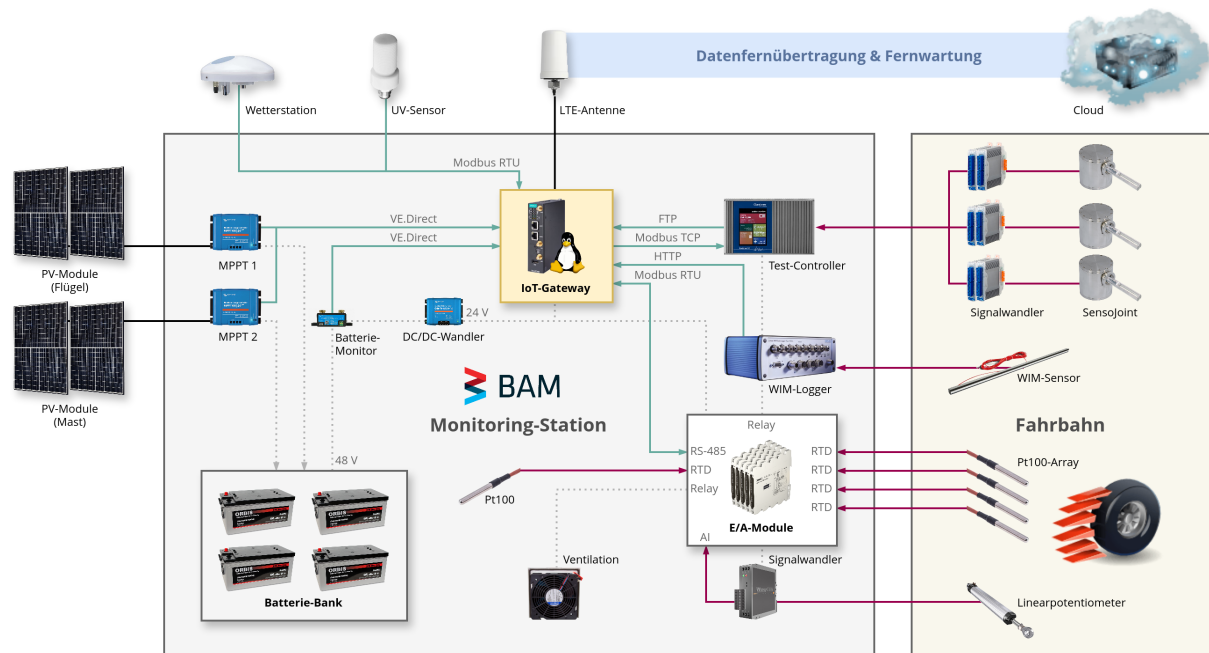


Abb. 2: Schematischer Aufbau einer Monitoring-Station im „SensoJointField“-Projekt

4 Autarke Energieversorgung der Monitoring-Stationen

Aufgrund der Lage der Messabschnitte an den Autobahnen A4 und A9 wurde für den Feldeinsatz eine autarke Photovoltaik-Insulanlage realisiert. Jede Monitoring-Station verfügt über mehrere PV-Module mit einer Gesamtleistung von 2000 W zur lokalen Energieerzeugung (Abb. 5), einen tiefentladefähigen Batteriespeicher mit einer Kapazität von 11 kWh sowie ergänzende Hard- und Softwarekomponenten zur Leistungsregelung und Energieüberwachung. Diese Konfiguration soll eine zuverlässige Versorgung bei einem gleichzeitig optimierten Energieverbrauch von unter 50 W während der Messungen gewährleisten.

Der Energiehaushalt wird durch eine speziell entwickelte Software kontinuierlich überwacht. Sie erfasst und protokolliert 45 Leistungsparameter, darunter Ladezustand, Spannungsniveau und Energieertrag der PV-Module. Wird dabei ein festgelegter Schwellenwert unterschritten, generiert das System eine Warnmeldung und übermittelt diese an den zentralen Monitoring-Server.

Zur weiteren Reduzierung des Energiebedarfs unterscheidet das System zwischen zwei definierten Betriebszuständen. Im Ruhemodus werden ausgewählte Komponenten – insbesondere die „SensoJoint“-Sensoren, das WIM-System sowie die Signalwandler – deaktiviert und physisch vom Netz getrennt, um den Energieverbrauch zu minimieren. Der Messmodus aktiviert sämtliche Sensoren und Controller für die Dauer der geplanten Deformationsaufzeichnungen. Diese kurzzeitige Phase höherer Leistungsaufnahme wird mehrmals täglich aktiviert und zeitlich mit den vorgesehenen Messintervallen synchronisiert.

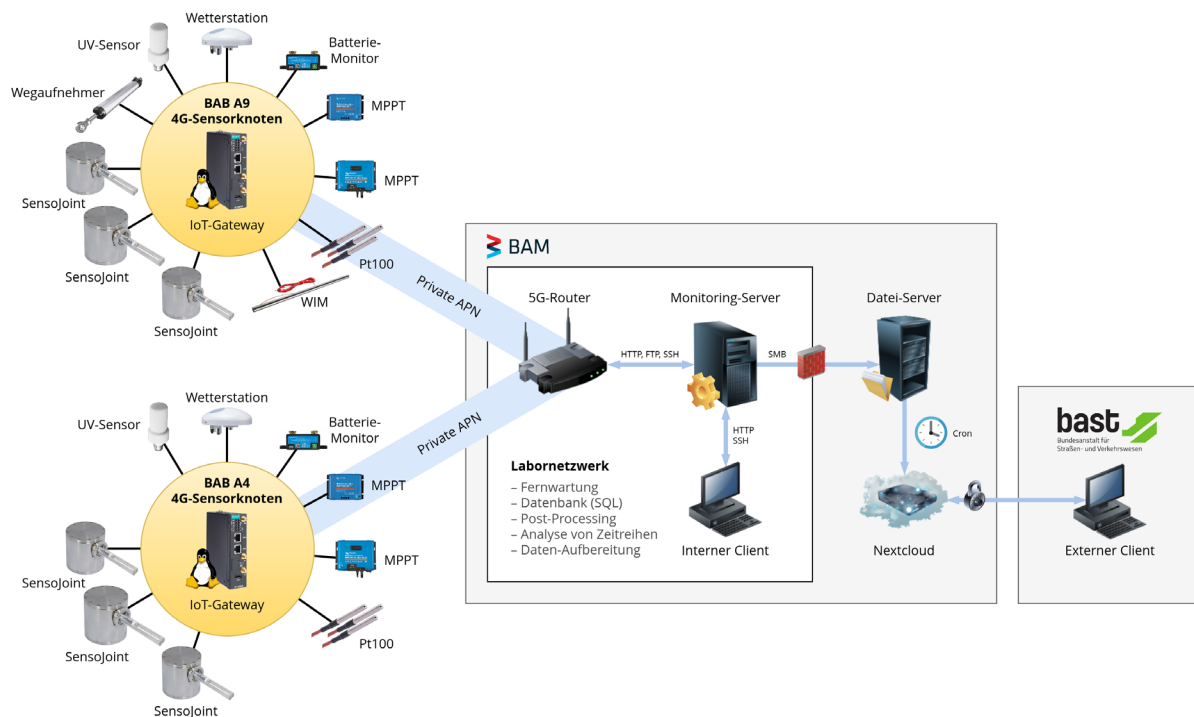


Abb. 3: Sensornetzwerk „SensoJointField“ bestehend aus zwei 4G-Sensorknoten und einem Monitoring-Server

5 Umsetzung des autonomen Sensornetzwerks

Das Konzept der Sensornetzwerks sieht vor, dass die Monitoring-Stationen in definierten Intervallen Messwerte autonom erfassen, verarbeiten, lokal speichern und anschließend über eine Mobilfunkverbindung an einen Server der BAM übertragen. Ziel dieser Architektur ist ein möglichst hoher Automatisierungsgrad der Messkampagnen. Für die Realisierung solcher autonomen Sensornetzwerke stehen inzwischen verschiedene technische Ansätze bereit, darunter Hardware- und Softwarelösungen aus dem Bereich des Internet of Things (IoT) sowie darauf abgestimmte Cloud-Umgebungen. Aufgrund der spezifischen Anforderungen des „SensoJointField“-Projekts hinsichtlich der Messverfahren und des erwarteten Datenvolumens wurde jedoch ein anwendungsspezifisch adaptiertes System entwickelt (Abb. 3).

Als zentrale Steuer- und Recheneinheit der Monitoring-Stationen dient jeweils ein 64-bit IoT-Gateway Moxa UC2200A. Dieser Industrie-Computer zeichnet sich durch geringen Energieverbrauch, erweiterten Einsatztemperaturbereich, integrierte 4G-Konnektivität, serielle Schnittstellen sowie ein Linux-basiertes Betriebssystem aus.

Die Monitoring-Software basiert auf dem Open-Source-Programmpaket DMPACK, das im Rahmen eines Promotionsvorhabens an der Technischen Universität Berlin für ingenieurgeodätische und geotechnische Deformationsüberwachungen entwickelt wurde (ENGEL, 2026). Die mehr als 30 Programme von DMPACK übernehmen zentrale mess- und datentechnische Aufgaben, darunter die Ansteuerung von Sensoren und Aktoren über das Modbus-Protokoll, die Speicherung von Zeitreihen in einer lokalen SQL-Datenbank sowie die periodische Synchronisation von Messdaten und Statusmeldungen mit dem zentralen Server.

Die Client-Server-Architektur gewährleistet eine verlustfreie und komprimierte Datenübertragung zwischen den Monitoring-Stationen und der BAM. Bei temporären Unterbrechungen der Mobilfunkverbindung werden die Datentransfers automatisch wiederholt. Zusätzlich überwacht der Server die Betriebsbereitschaft der Stationen über sogenannte *Heartbeat*-Nachrichten, die in frei konfigurierbaren Intervallen erwartet werden. Bleiben diese Meldungen aus, erzeugt das System eine Warnung.

Neben der Datenspeicherung und Netzwerküberwachung übernimmt der Server auch das Post-Processing der erfassten Messdaten. Die Zeitreihen der „SensoJoint“-Sensoren liegen in Rohform als polaren Koordinaten vor. Vor der Auswertung müssen zunächst der Temperatureinfluss korrigiert und die Koordinaten in ein kartesisches System transformiert werden. Nach einer Tiefpass-Filterung und der strukturellen Aufbereitung der Daten ist die Ausgabe in Form von Diagrammen und Berichten möglich (Abb. 4).

Die Datenübertragung zwischen den Monitoring-Stationen und dem Server erfolgt aus Sicherheitsgründen über einen privaten Mobilfunkzugang (Private APN), der vom öffentlichen Internet getrennt ist und nur autorisierten SIM-Karten Zugriff gewährt. Dadurch kann auf die Einrichtung eines zusätzlichen Virtual Private Network (VPN) verzichtet werden. Die bidirektionale Mobilfunkverbindung ermöglicht neben der Datenübertragung auch eine Fernwartung der beiden Stationen von der BAM aus.

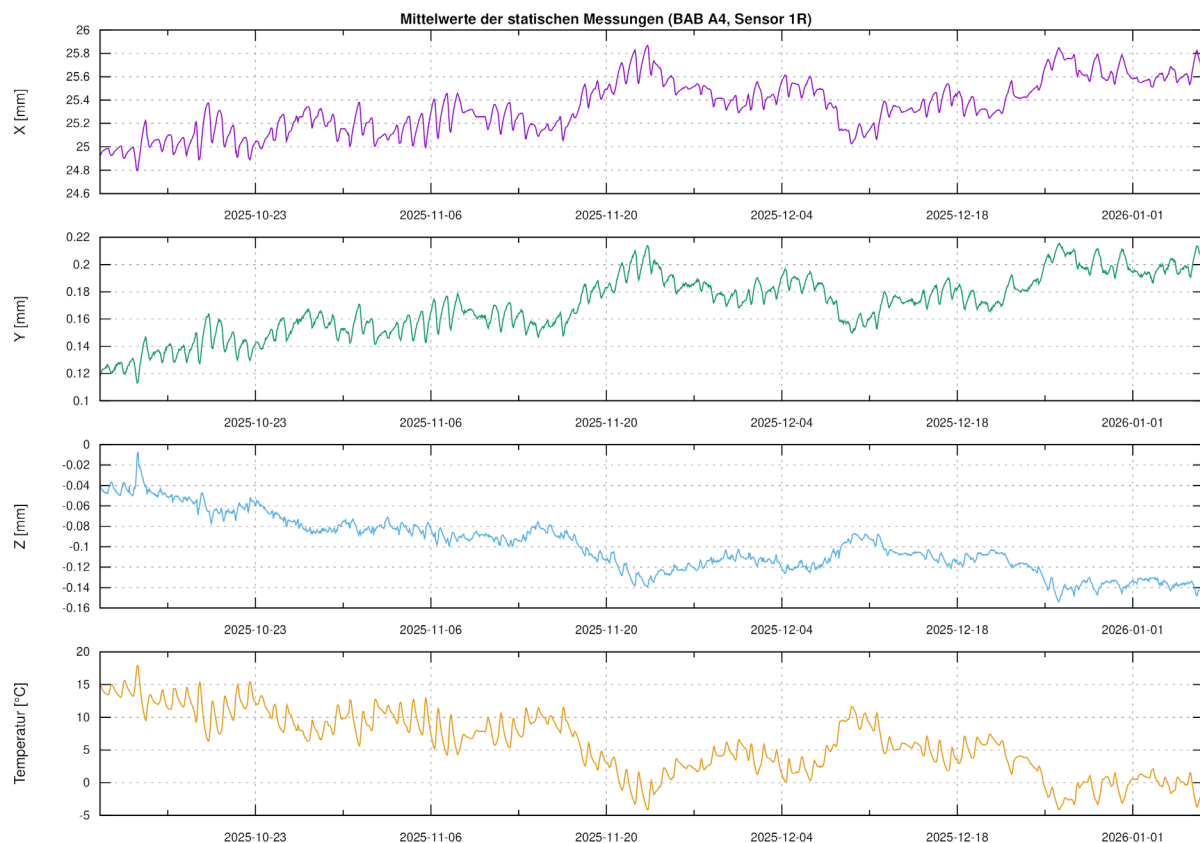


Abb. 4: Durch „SensoJoint“-Sensor 1R erfasste quasi-statische Deformationen im Fugenbereich seit dem Einbau im Oktober 2025 an der Autobahn A4

6 Freie Software

Freie Software hat sich als eine tragende Säule der IT-Infrastruktur anwendungsorientierter Forschung etabliert (FORTUNATO u. a., 2021). Die softwaretechnische Umsetzung des Sensornetzwerks im „SensoJointField“-Vorhaben folgt ebenfalls diesem Entwicklungsansatz. Neben dem Monitoring-System DMPACK basiert auch die weitere Software vollständig auf frei verfügbaren Komponenten, die unabhängig von einzelnen Herstellern und ohne Lizenzgebühren nutzbar sind. Dazu zählen Betriebssysteme für Server und eingebettete Systeme ebenso wie Datenbanksysteme zur Speicherung und Auswertung umfangreicher Zeitreihen. Programmiersprachen mit offenen Ökosystemen bilden die Grundlage für die Entwicklung von Steuerungslogik und Auswerte-Algorithmen.

Ergänzend werden etablierte Open-Source-Projekte für die Sensor- und Netzwerkkommunikation, die Datenkompression oder die Umsetzung von Web-Applikationen auf unterschiedlichen Ebenen in das Monitoring-System integriert. So ermöglicht die plattformübergreifende Bibliothek *libcurl* zuverlässige Datentransfers über eine Vielzahl von Netzwerkprotokollen und kann dank vorhandener Schnittstellen von mehr als 60 Programmiersprachen aus genutzt werden (STENBERG, 2026). Für die Kommunikation mit

Sensoren und Aktoren wird u. a. die Bibliothek *libmodbus* eingebunden, eine freie Implementierung des Modbus-Protokolls (RAIMBAULT, 2026). Zur effizienten Speicherung und Verwaltung großer, komplexer Datenmengen ist ein Rückgriff auf HDF5 möglich, ein leistungsfähiges und plattformunabhängiges Dateiformat, das sich in Wissenschaft und Technik bewährt hat (FOLK u. a., 2011).

Die modulare Nutzung freier Software erlaubt es, vorhandene Lösungen flexibel zu kombinieren und gezielt an die projektspezifischen Anforderungen anzupassen, ohne an die Einschränkungen proprietärer Produkte gebunden zu sein. Offene Schnittstellen sowie gut dokumentierte (Quasi-)Standards erleichtern darüber hinaus die Integration in bestehende Systeme und die Anbindung externer Hardware und Software.

7 Fazit

Die Betriebsbereitschaft der Monitoring-Stationen ist seit der Installation im Oktober 2025 gegeben und die aufgezeichneten Messdaten werden kontinuierlich übertragen. Noch ausstehend ist jedoch die vollständige Automatisierung der Auswertung der Verkehrs- und Deformationsdaten, insbesondere im Hinblick auf die algorithmische Zuordnung der unterschiedlichen Fahrzeugtypen zu den beobachteten geometrischen Veränderungen. Insgesamt hat sich der gewählte Ansatz zur Realisierung eines autonomen IoT-Sensornetzwerks als zielführend erwiesen. Er eröffnet vielversprechende Perspektiven für eine Ausdehnung des Systems auf weitere Abschnitte des Bundesfernstraßennetzes.



Abb. 5: Monitoring-Station mit PV-Inselanlage während der Installation an der Autobahn A4

Die erfolgreiche Feldvalidierung der entwickelten Sensormethodik ermöglicht darüber hinaus eine präzise Charakterisierung des realen Verhaltens bestehender und zukünftiger Betonbauweisen im Bereich der Fugen zwischen den Betonfahrbahnplatten unter hohen Nutzungs- und Beanspruchungsbedingungen. Die auf Grundlage der unterschiedlichen konstruktiven und technologischen Varianten aktueller Betondeckenbauweisen gewonnenen Zeitreihen bilden die Grundlage für den Übergang zu einer gebrauchstauglichen konstruktiven Bemessung der Fugenbereiche sowie für eine dauerhaft funktionsfähige Dimensionierung und Bewertung von Fugenfüllsystemen.

Die Ergebnisse können zudem in die laufende Fortschreibung des technischen Regelwerks ZTV Fug-StB einfließen und damit unmittelbar zur wissenschaftlich fundierten Optimierung und Weiterentwicklung dieses besonders sensiblen Bereichs des Betonstraßenbaus beitragen. Hierbei eröffnet insbesondere die Integration moderner Versuchstechniken wie der INFUKON-Methode (RECKNAGEL u. a., 2023) weitere Potenziale für eine Verbesserung der Fugubemessung und -ausführung.

Acknowledgement: Diesem Beitrag liegen Teile des im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, unter 08.0241/2015/FGB laufenden Forschungsprojektes zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Literatur

- ENGEL, PH.; RECKNAGEL, CH. (2025): SensoJointField. Konzeption einer Online-Messstation zur Deformationserfassung im Fugenbereich hochbeanspruchter Betonverkehrsflächen. Straße und Autobahn. 76(12); S. 895 – 899; ISSN 0039-2162; DOI.org/10.53184/STA12-2025-3
- ENGEL, PH. (2026): Deformation Monitoring Package (DMPACK). Webseite: <https://www.dabamos.de/dmpack.html> (08.01.2026)
- FOLK, M.; HEBER, G.; KOZIOL, Q.; POURMAL, E.; ROBINSON, D. (2011): An Overview of the HDF5 Technology Suite and its Applications. AD '11: Proceedings of the EDBT/ICDT 2011 Workshop on Array Databases; S. 36 – 47; DOI.org/10.1145/1966895.1966900
- FORTUNATO, L.; GALASSI, M. (2021): The Case for Free and Open Source Software in Research and Scholarship. Philosophical Transactions of the Royal Society A; 379 (2197). DOI.org/10.1098/rsta.2020.0079
- RAIMBAULT, S. (2026): libmodbus. Webseite: <https://libmodbus.org/> (08.01.2026)
- RECKNAGEL, CH.; SPILKER, A.; BUCHHEIM, J. (2023): INFUKON – Ein neuer Ansatz zur ganzheitlichen Analyse des Gebrauchsverhaltens hochbeanspruchter Betonfahrbahndecken im Fugenbereich; Straße und Autobahn, 11 (2023); Kirschbaum, Bonn, S. 917 – 926; ISSN 0039-2162; DOI.org/10.53184/STA11-2023-4
- RECKNAGEL, CH.; WEIGEL, S.; HOPPE, J. (2024): Dauerhafte Funktionsfähigkeit von Bauwerksfugen – Das Performance Concept in der Abdichtung von Betonfahrbahnen. In: Tagungsband „11. Jahrestagung des DAfStb“; Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V./BAM; Berlin 2024; S. 244 – 252; ISBN: 978-3-9818564-7-7; DOI.org/10.26272/opus4-61338

- SPITZER, S.; WENZEL, N.; PIRSKAWETZ, ST.; HOPPE, J.; RECKNAGEL, CH. (2019): Ermittlung realer Beanspruchungen des Fugensystems mit einem neuartigen Sensor; Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrstechnik (BASt); Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 08.0244/2015/FRB; 191 Seiten
- SPITZER, S.; HOPPE, J.; WENZEL, N.; PIRSKAWETZ, ST.; RECKNAGEL, CH. (2020): SENSO JOINT – An Innovative Sensor System for a Sustainable Joint Design of Concrete Pavements. In: Lecture Notes in Civil Engineering – Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements – Mairepav9; Herausgeber: Springer Switzerland/Ch. Raab (EMPA); Springer Nature 2020; S. 191 – 200; ISSN: 2366-2557; ISBN: 973-3-030-48678-5; DOI.org/10.1007/978-3-030-48679-2
- STENBERG, D. (2026): cURL. Webseite: <https://curl.se/> (08.01.2026)