

Viel Information oder nur viele Sensoren? – Beispiel eines Brückenmonitorings mit FBG

Frank LEHMANN¹, Michael SCHREINER¹, Felipe Isamu HARGER SAKIYAMA²

¹ MPA Universität Stuttgart, Stuttgart

² Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys (UFVJM), Teófilo
Otoni, Brasilien

Kontakt E-Mail: frank.lehmann@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Die erfolgreiche Dauerüberwachung eines Bauwerks ist wesentlich von der Platzierung der richtigen Sensoren an den richtigen Stellen abhängig. Es gibt dafür keine allgemeingültige Lösung, da jedes Bauwerk und die spezifischen Fragestellungen unter den jeweiligen Randbedingungen unterschiedlich sind. Zur sicheren Detektion von Änderungen im Trag- oder Verformungsverhalten der überwachten Bauwerke werden tendenziell immer mehr Sensoren installiert, natürlich auch bedingt durch deren sinkenden Kosten. Eine intelligente Auswertung der Daten wird mit der steigenden Datenmenge zunehmend wichtiger, wobei sich die geforderte Intelligenz nicht nur auf die autonome Bewertung aller einzelnen Datensätze bezieht, sondern auch die Benachrichtigung der Verantwortlichen auf Grundlage relevanter Kriterien und Kombinationen davon.

An der Spannbetonbrücke einer Bundesstraße mit einer Hohlkörperplatte als Feldquerschnitt und Sigma-Stahl als Spanngliedern wurde ein quasi-verteilttes, faseroptisches Monitoringsystem mit weitspannenden Faser-Bragg-Gitter Sensoren (LGFBGS) installiert, um eine lückenlose Echtzeiterkennung von Tragwerksänderungen zu ermöglichen. Insbesondere wurde hierfür ein neuer Algorithmus entwickelt und eingesetzt, der alle Messdaten unmittelbar während der Laufzeit bewertet und nur bei einer Inzidenz mehrerer unabhängiger Indikatoren die Messdaten abspeichert und eine Benachrichtigung auslöst. Das Monitoringsystem kann damit äußerst sensitiv eingestellt werden, bei gleichzeitiger Reduktion der Fehlalarme auf ein Minimum.

Die hier vorgestellten Arbeiten wurde im Rahmen der Promotion des Autors Felipe I.H. Sakiyama ermöglicht und zeigt nur einen kleinen Ausschnitt der durchgeführten Analysen und Überlegungen zum Monitoring. Die vollständige Dissertation ist unter <https://dx.doi.org/10.18419/opus-11681> frei verfügbar.



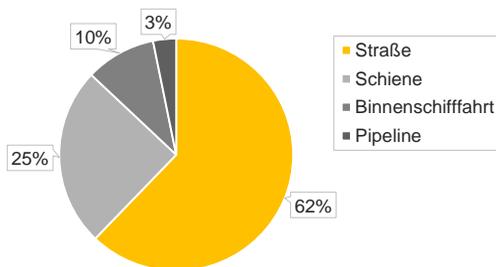
Viel Information oder nur viele Sensoren?

Beispiel eines Brückenmonitorings mit faseroptischen Sensoren

M. Schreiner, F. Lehmann, F.I. Harger Sakiyama

Motivation

Gütertransport in Deutschland /t km



13.172 km Bundesautobahnen



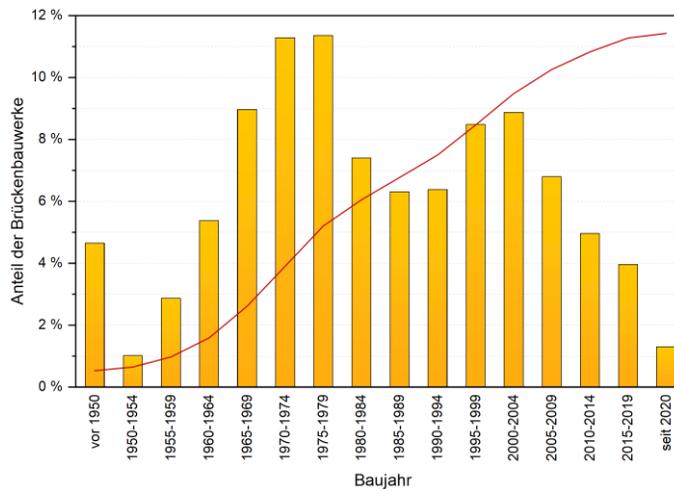
37.810 km Bundesstraßen



40.131 Brücken der Bundesfernstraßen

Quelle: BMDV/ BAST, 2023

Motivation



Quelle: BAST, 2023

Motivation

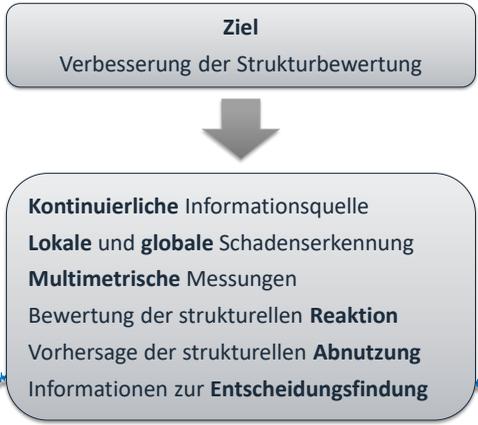
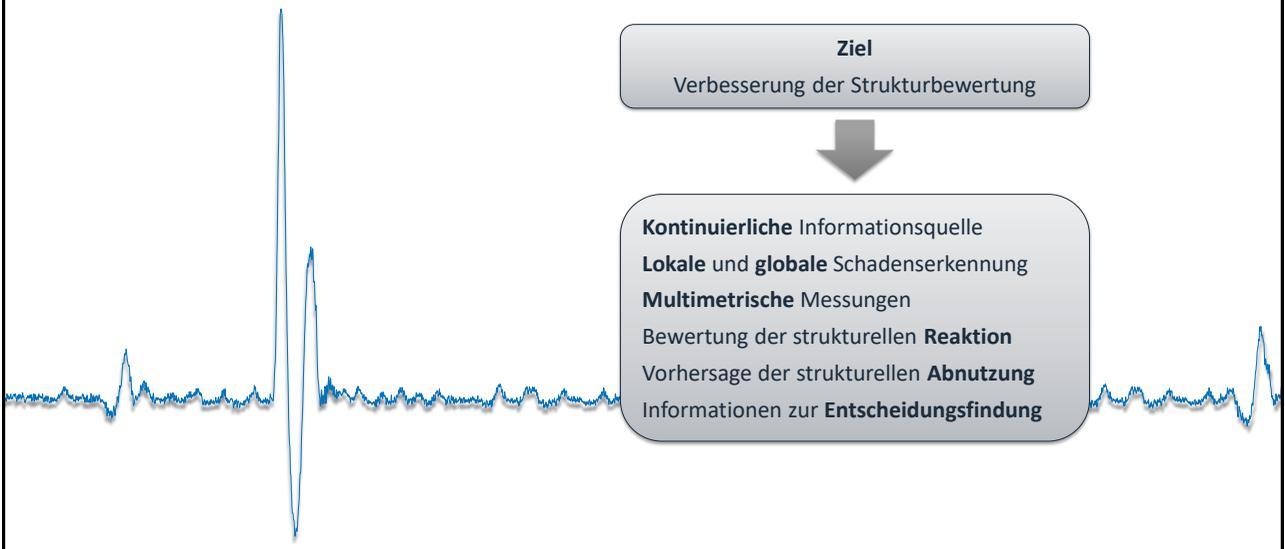
Straßentransport:

- Zunahme von 1991 bis 2020: ca. 82%
 - Erwartete Zunahme von 2020 bis 2030: ca. 20%
- + Lastenzunahme
+ Sondertransporte
+ zukünftige Transportlösungen (z.B. Roadtrains)

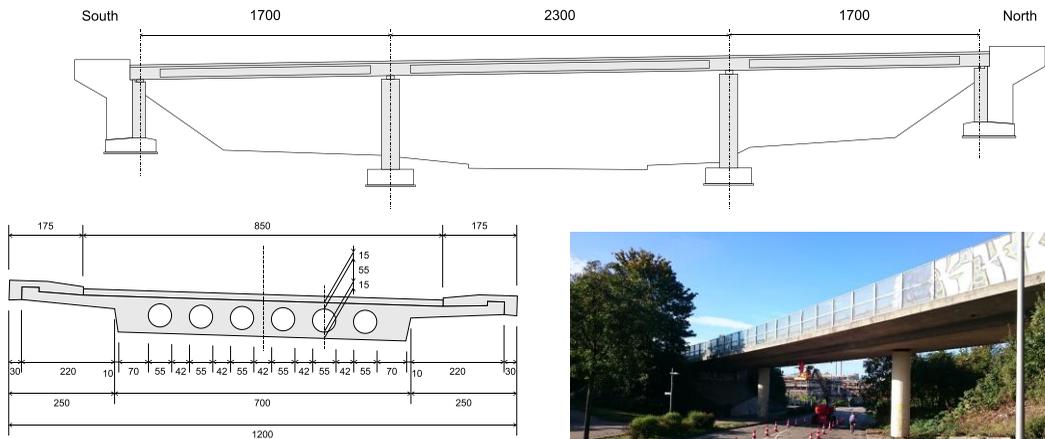


Quelle: BMVI, 2021

Bauwerksmonitoring



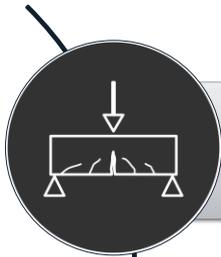
Spannbetonbrücke in Neckarsulm Übersicht



- Baujahr: 1964
- Kfz < 3,5 Tonnen (2022): 32.346 / Tag
- Kfz > 3,5 Tonnen (2022): 2.268 / Tag

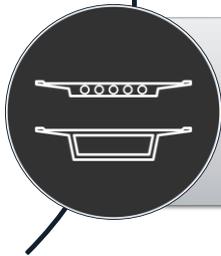
Spannbetonbrücke in Neckarsulm

Problembeschreibung



Lasten

- Gestiegene Verkehrsbelastung
- Temperaturlastfall ΔT



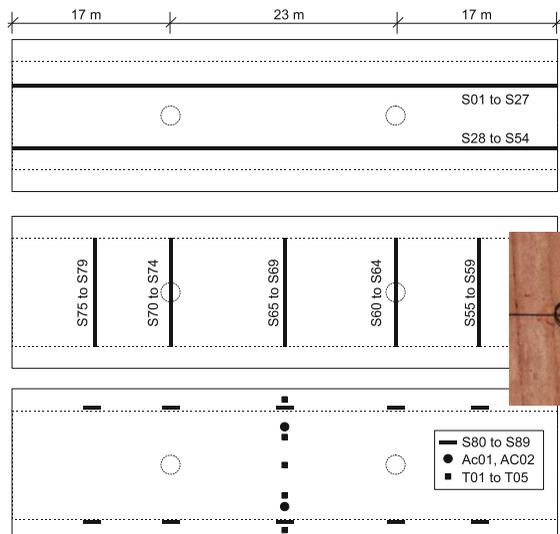
Bauweise

- Betondeckung
- Nur wenige Bügel und schlaaffe Bewehrung
- Hohlkörperquerschnitt
- Spannungsrissskorrosion (Spannstahl Sigma-Oval)

Siehe auch: T. Wüstholtz (2016): *Instandsetzung oder Neubau von Massivbrücken? Erfahrungen und davon abgeleitete Ansätze*. BAW Kolloquium Instandhaltung von Wasserbauwerken. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102345>

Spannbetonbrücke in Neckarsulm

Konzeptionierung



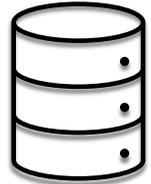
- 94 FBG Temperatursensoren
- 2 FBG Beschleunigungssensoren
- Messfrequenz 200 Hz
- 12 Installationstage (2 bis 3 Personen)

Spannbetonbrücke in Neckarsulm

Datenmanagement

Herausforderungen des Systems:

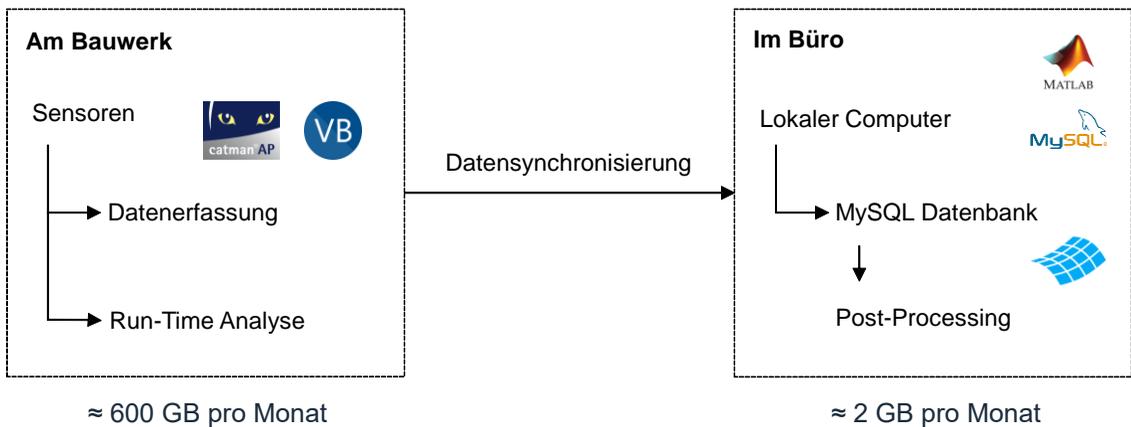
- Es werden riesige Datenmengen durch die Messungen mit hoher Frequenz erzeugt:
37.000 Einzelmessungen pro Sekunde (16,4 GB täglich)



- Unbekannte Betriebszustände:
 - Dynamische Lasten (Überfahrten, Beschleunigung, Abbremsen)
 - Zufällige Verkehrsbelastung (Anzahl und Abstand der Fahrzeuge, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, Masse, usw.)
 - Temperatureinfluss

Spannbetonbrücke in Neckarsulm

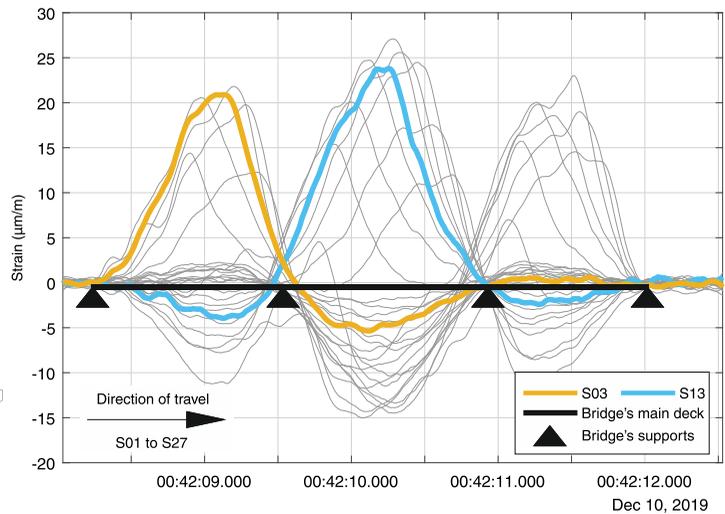
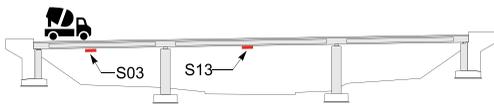
Datenmanagement



Ergebnisse

Dehnungseinflusslinien

- Während der Überfahrt eines schweren Fahrzeugs.
- Dauer \approx 4 Sekunden
- Aufgenommen mit einem parallelen Rekorder mit einem Schwellenwert zur Erkennung der Überfahrt eines Schwerlastkraftwagens.



Ergebnisse

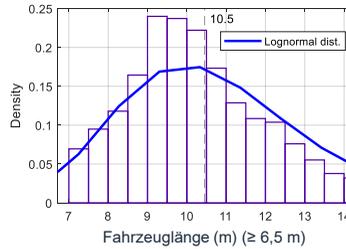
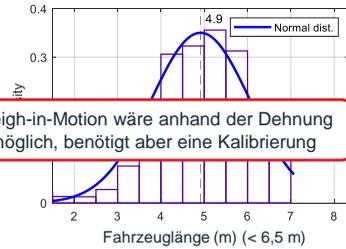
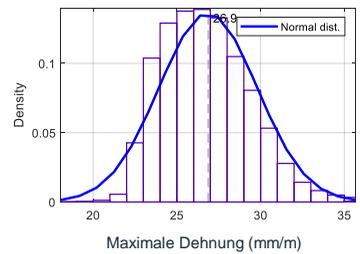
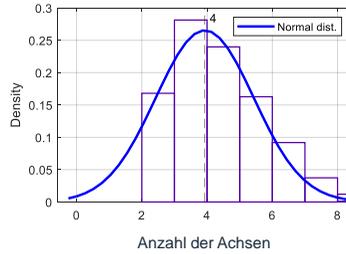
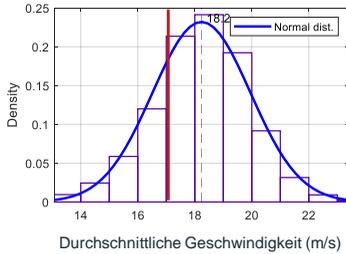
Verkehrszusammenfassung

- Clustering-Algorithmus zur Klassifizierung der aufgezeichneten Fahrzeugüberfahrten.
- Identifizierung einzelner Überfahrten (in beiden Fahrtrichtungen) anhand der Dehnung
 - Steigung der Messsignale von Sensoren S14 und S41 in Feldmitte
 - Nur bei Einzelüberfahrten (kein LKW-Gegenverkehr) mit ausreichender Last
 - Kein Weigh-in-Motion und keine Zählstelle! Nutzung für Model-Updating
- Extraktion:
 - Fahrtrichtung
 - Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit
 - Anzahl der Achsen
 - Maximale Dehnungsamplitude
 - Länge des Fahrzeugs

Über 174.000
Ereignisse analysiert!

Ergebnisse

Verkehrskarakterisierung



Weigh-in-Motion wäre anhand der Dehnung möglich, benötigt aber eine Kalibrierung

Anzahl der Ereignisse:

- 09.12.2019 bis 11.07.2023 (1.310 Tage)
- 174.134 Gesamt (133 pro Tag)

Mittelwerte:

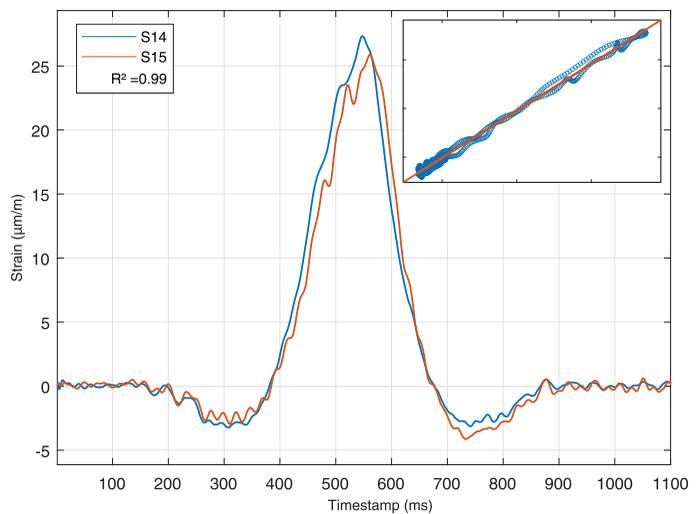
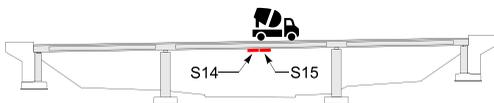
- Geschwindigkeit: 18,2 m/s (65,5 km/h)
- Anzahl der Achsen: 4
- Maximale Dehnung: 26,9 με
- Fahrzeuglänge:
 - < 6,5 m: 4,9 m
 - ≥ 6,5 m: 10,5 m

Ergebnisse

Vergleich benachbarter Sensoren

- Korrelation
- Gleichmäßiges Verhalten

$$\rho_{pq}(\tau_n) = \frac{\sum_{k=1}^n (s_{p,k} - \mu_p) \cdot (s_{q,k} - \mu_q)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (s_{p,k} - \mu_p)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n (s_{q,k} - \mu_q)^2}}$$



Ergebnisse

Temperatureinfluss

Dehnungsoffset aus einminütigen
Zeitfenstern

232.78 $\mu\text{m}/\text{m}$ 34.02 $^{\circ}\text{C}$

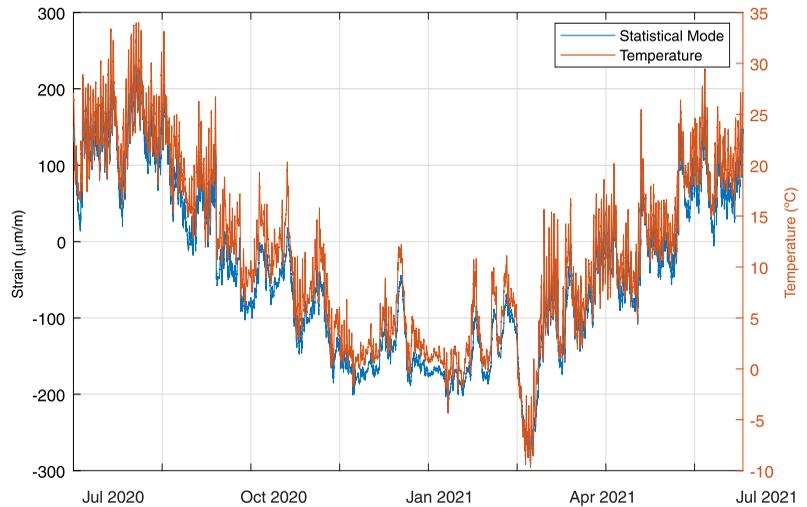
0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 14 $^{\circ}\text{C}$

-286.69 $\mu\text{m}/\text{m}$ -9.73 $^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = 11,87 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$



Sensor S14



Ergebnisse

Temperatureinfluss

Dehnungsoffset aus einminütigen
Zeitfenstern

232.78 $\mu\text{m}/\text{m}$ 34.02 $^{\circ}\text{C}$

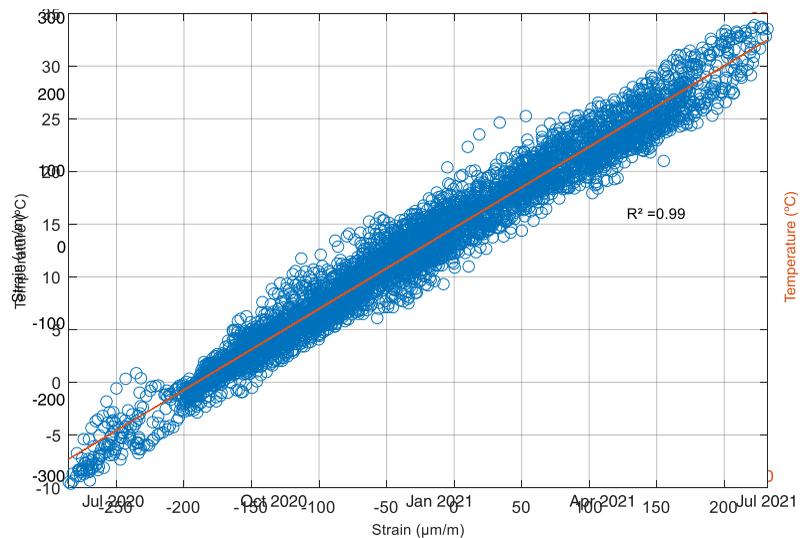
0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 14 $^{\circ}\text{C}$

-286.69 $\mu\text{m}/\text{m}$ -9.73 $^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = 11,87 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$



Sensor S14

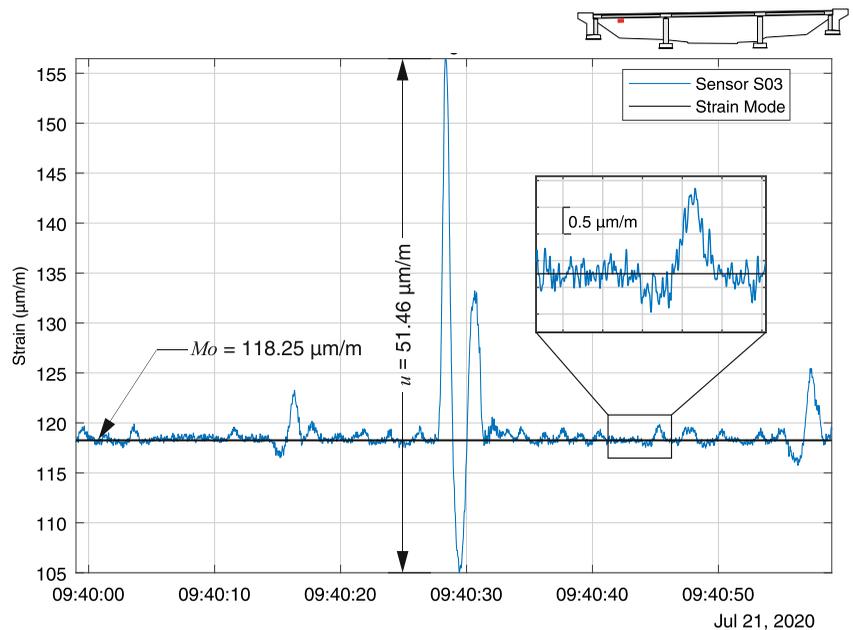


Ergebnisse

Signalparameter

Analyse kurzer Zeitfenster

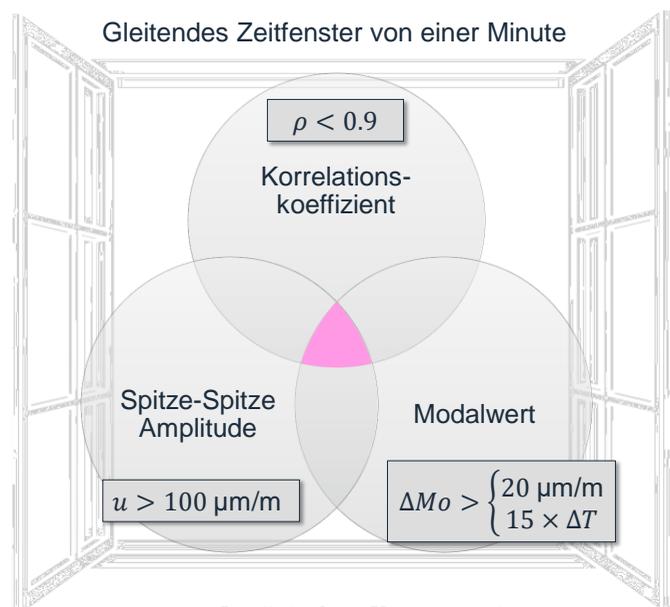
- Dehnungsoffset
- Modalwert der Dehnung
- Belastungsniveau
- Spitze-Spitze Amplitude



Ergebnisse

Real-Time (Runtime) Datenanalyse

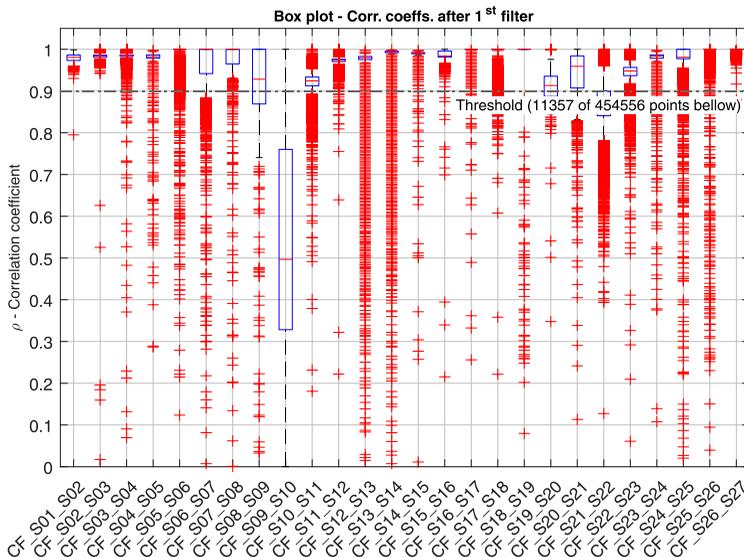
- Korrelationskoeffizient:
 - Vergleich benachbarter Sensoren
 - Gleichmäßiges Verhalten
- Dehnungsamplitude Spitze-Spitze
 - Vergleich mit Referenz
 - Verkehrslasten
- Modalwert der Dehnung
 - Vergleich über die Zeit
 - Bleibende Änderungen





Ergebnisse

Real-Time (Runtime) Datenanalyse



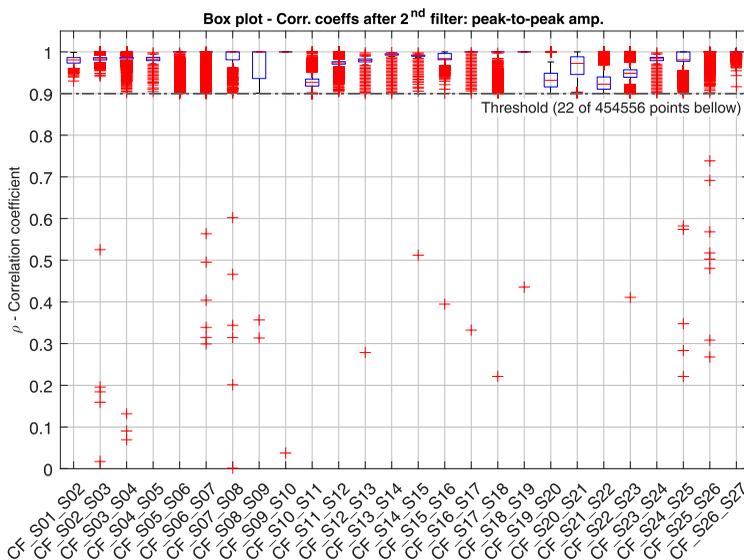
Referenzdaten von Juli 2020 bis Juli 2021.
Sensoren S01 bis S27.

- Korrelationskoeffizient:
 - Gleichmäßiges Verhalten
- 11.357** von **454.556** (2.5 %) Zeitfenster mit einer Korrelation kleiner als 0,9.



Ergebnisse

Real-Time (Runtime) Datenanalyse



Referenzdaten von Juli 2020 bis Juli 2021.
Sensoren S01 bis S27.

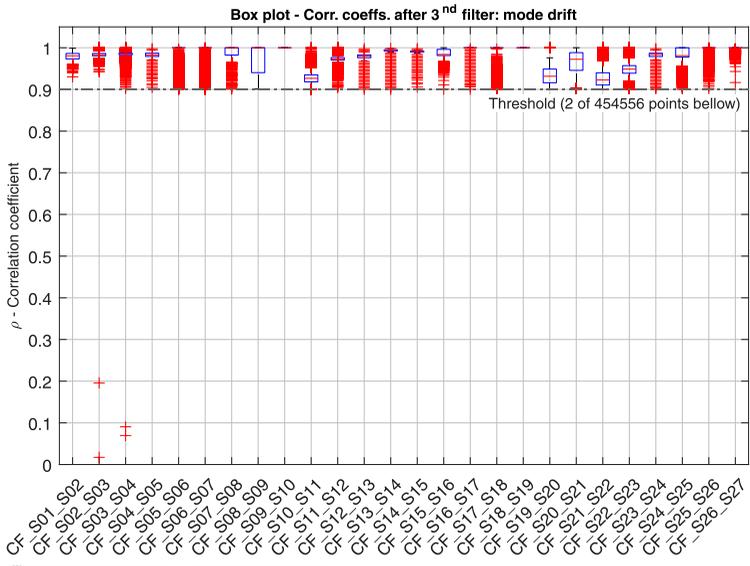
- Korrelationskoeffizient:
 - Gleichmäßiges Verhalten
- Spitze-Spitze Amplitude:
 - Verkehrslasten

22 von **454.556** (0,005 %) Zeitfenster mit einer Korrelation kleiner als 0,9 und einer Spitze-Spitze Amplitude größer als 100 μm .



Ergebnisse

Real-Time (Runtime) Datenanalyse



Referenzdaten von Juli 2020 bis Juli 2021. Sensoren S01 bis S27.

- Korrelationskoeffizient:
 - Gleichmäßiges Verhalten
- Spitze-Spitze Amplitude:
 - Verkehrslasten
- Modalwert:
 - Bleibende Änderungen

2 von 454.556 (4.4e-4 %) Zeitfenster mit einer Korrelation kleiner als 0,9, einer Amplitude größer als 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ und einer Modalwertänderung größer als 20 $\mu\text{m}/\text{m}$

Ausblick: Weitere Auswertungsmöglichkeiten

Merkmalsextraktion

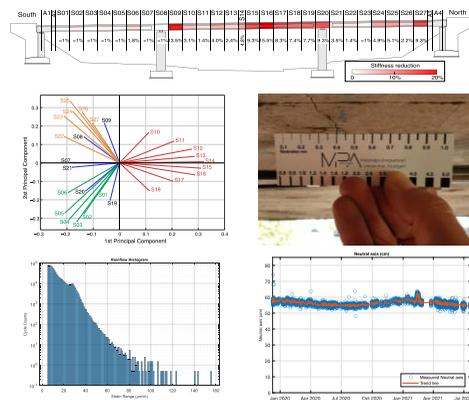
- Abschätzung des Degradationsgrads
- Principle Component Analysis (PCA)

Ermüdungsabschätzung

- Rainflow-Analyse
- Anzahl der Belastungszyklen

Belastung der Spannglieder

- Berechnung der Lage der neutralen Achse
- Erkennung von Schadensentstehungen



F.I. Harger Sakiyama: Real-size structural health monitoring of a pre-stressed concrete bridge based on long-gauge fiber Bragg grating sensors. Dissertation, Universität Stuttgart, 2021. <https://dx.doi.org/10.18419/opus-11681>

Zusammenfassung

- Der vorgeschlagene Echtzeit-Analysealgorithmus ist in der Lage, viele bekannte Einschränkungen eines Bauwerksmonitorings in der realen Anwendung zu überwinden.
 - Die Analyse mehrerer Parameter mit unterschiedlichen Kriterien führt zu einer niedrigen Fehlalarmrate.
 - Der Laufzeitbetrieb kann eine Echtzeit-Benachrichtigung vor der Datenübertragung liefern.
 - Unerwartetes strukturelles Verhalten wird mit einer Auflösung lokalisiert, die so klein ist wie die Messlänge des Sensors.
 - Die dreistufige Validierung zur Alarmauslösung kann auf dynamische Belastungen reagieren und ist frei von Temperatureinflüssen.

Vielen Dank!



Universität Stuttgart
Materialprüfungsanstalt (MPA)
Dr. Frank Lehmann
Michael Schreiner

frank.lehmann@mpa.uni-stuttgart.de
michael.schreiner@mpa.uni-stuttgart.de

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia (ICET)
Dr. Felipe Isamu Harger Sakiyama felipe.sakiyama@ufvjm.edu.br