

1 Sensorkonzept

Für das Demonstratorbauwerk werden die folgenden Sensortechnologien verwendet: Elektrische Dehnmessstreifen (DMS / SG), induktive Wegaufnehmer (WA), piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer (BA / ACC), Neigungsaufnehmer (NA / INC), Temperatursensoren (T), eine Videokamera sowie Mikrofone (MIC). Bei den meisten dieser Sensortypen handelt es sich um etablierte Technologien, die bereits bei einer Vielzahl an Brückenmessungen ihre Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit unter Beweis gestellt haben. Neue Ansätze finden sich beim Einsatz von Neigungssensoren, die in den letzten Jahren zunehmend für Brücken verwendet werden sowie beim Einsatz von Mikrofonen, die zur akustischen Achsdetektion verwendet werden sollen. Insgesamt wird mit 145 Kanälen gemessen. Eine Übersicht über die verwendete Sensorik bietet Anhang A.

Beide Teilbauwerke des Demonstrators werden messtechnisch überwacht. Der nördliche Überbau mit Fahrtrichtung Dortmund erhält aufgrund des schlechteren Zustandes (Zustandsnote: 2,9) eine umfassendere Sensorausrüstung (89 Sensoren). Der südliche Überbau mit Fahrtrichtung Frankfurt (Zustandsnote: 2,3) erhält eine reduzierte Sensoranzahl (56 Sensoren). Die Zielstellung für den Einsatz der verwendeten Sensorik wird in die folgenden drei Kategorien zusammengefasst:

1. **Globales Monitoring:** In dieser Kategorie werden Sensoren dazu genutzt globale Eigenschaften des Bauwerks, wie z.B. Eigenfrequenzen, zu messen.
2. **Lokales Monitoring:** In diese Kategorie fällt die Messung lokaler Eigenschaften, wie Rissbewegungen oder Dehnungen an Anschlüssen.
3. **Einwirkungsmonitoring:** Temperatur, Bridge-WiM, Mikrofone, Videokamera

Die verwendete Messsoftware Catman bietet die Möglichkeit, drei verschiedene Abtastraten zu nutzen. Es werden die folgenden Einstellungen gewählt: 1 Hz (langsam), 50 Hz (Standard) und 100 Hz (schnell). Um Aliasing zu vermeiden wird bei der Aufzeichnung ein digitaler Tiefpassfilter eingesetzt. Für alle Kanäle wird ein Besselfilter verwendet. Die Wahl der Trennfrequenz richtet sich nach dem Verwendungszweck des jeweiligen Sensors sowie nach der Abtastrate. Eine geeignete Filterordnung wird softwareseitig bestimmt.

Anmerkung: In einer Anpassung im August 2020 wurde die Standardabtastrate auf 100 Hz erhöht und die schnelle Abtastrate auf 300 Hz gesetzt. In der weiteren Datenverarbeitung werden die entsprechenden Sensoren jedoch weiterhin mit 50 Hz berücksichtigt, sodass die nachfolgend beschriebenen Einstellungen gültig bleiben.

1.1. Globales Beschleunigungsmonitoring

Aus den Beschleunigungsmessdaten lassen sich mittels Modalanalyse die Schwingungseigenschaften eines Bauwerks (Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und modale Dämpfung) ermitteln. Für das globale Beschleunigungsmonitoring werden am nördlichen Überbau jeweils sechs BA je Feld verwendet, also eine Gesamtzahl von 18. Diese werden im inneren des Hohlkastens beidseitig jeweils bei $\frac{1}{4} L$, $\frac{1}{2} L$ und $\frac{3}{4} L$ angebracht (siehe Abb. 1), wobei L die jeweilige Feldlänge bezeichnet. Diese Anordnung erlaubt umfassende Informationen sowohl über Biegeschwingungsformen, als auch über Torsi-

onsschwingungsformen. Am südlichen Überbau werden nur zwei BA je Feld jeweils beidseitig in Feldmitte angebracht, also eine Gesamtzahl von sechs. Die Beschleunigungsaufnehmer werden mit der schnellen Messrate abgetastet.

Sensor: MMF KB12VD

Insgesamt: 24 Sensoren

Abtastrate: 100 Hz

Tiefpassfilter: Bessel, 30 Hz

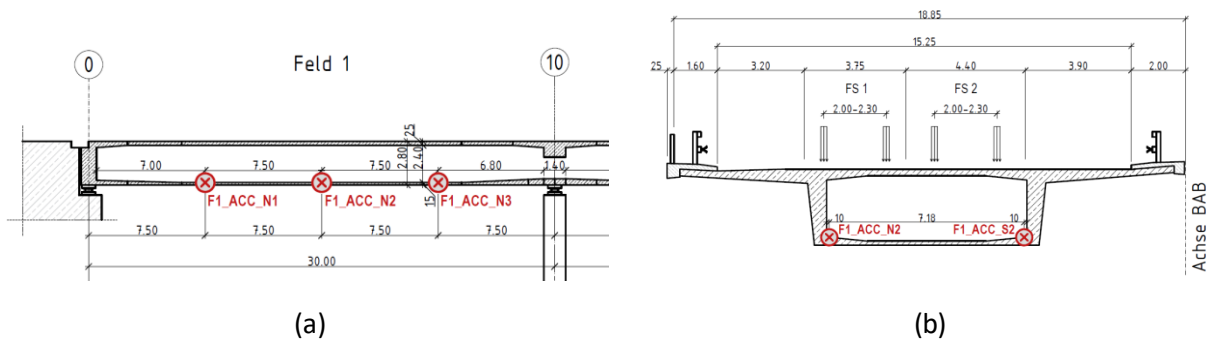


Abb. 1: Ausschnitt des globalen Beschleunigungsmonitorings am nördlichen Überbau: (a) Längsschnitt (b) Querschnitt

1.2. Globales Neigungsmonitoring

Für das globale Neigungsmonitoring werden am nördlichen Überbau jeweils drei NA je Feld im inneren des Hohlkastens verwendet. Diese Sensoren messen die Neigung der Brücke um die Brückenquerachse und werden mittig jeweils bei $\frac{1}{4}L$, $0,4L$ (Stelle des größten Biegemoments unter Streckenlast) und $\frac{3}{4}L$ appliziert (siehe Abb. 2). Zusätzlich werden im Stützquerschnitt jeweils 2 Sensoren von außen an den Untergurt angebracht. Einer dieser Sensoren misst die Neigung um die Querachse, der andere um die Brückenlängsachse. Am südlichen Überbau wird auf die Sensoren bei $0,4L$ sowie im Stützbereich verzichtet.

Durch die Neigungssensoren kann eine statische Kenngröße gemessen werden, die weniger von lokalen Gegebenheiten abhängt, wie z.B. die Dehnungsmessungen bei Beton. In einigen Veröffentlichungen werden durch Neigungssensoren vielversprechende Ergebnisse erzielt. Die Messwerte der verwendeten Sensoren enthalten allerdings einen großen Rauschanteil aus Bauwerksschwingungen. Eine Trennung der Signalanteile aus Verkehr vom Rauschen kann beim Demonstrator nicht eindeutig anhand eines Tiefpassfilters erfolgen. Aus diesem Grund wird auf ein Monitoring der Neigung infolge Verkehr verzichtet und die Neigungsmessung wird ausschließlich dazu genutzt, die temperaturabhängige Verformung der Brücke zu erfassen. Für diesen Zweck ist die langsame Abtastrate von 1 Hz ausreichend.

Sensor: Althen LSOX-L

Insgesamt: 19 Sensoren

Abtastrate: 1 Hz

Tiefpassfilter: Bessel, 0.2 Hz

1.3. Globales Monitoring der Auflagerverschiebungen

Die Festlager der Sachsengrabenbrücke befinden sich über den Stützen und die Loslager an den Widerlagern. Die Verschiebung der Loslager wird an allen Widerlagern mit jeweils vier WA gemessen.

Diese werden auf beiden Seiten des Überbaus jeweils oben und unten angebracht, um neben der Verschiebung auch die Verdrehung des Überbaus um die Querachse und vertikale Achse zu messen. Durch die Sensoren werden beispielsweise temperaturbedingte Ausdehnungen der Brücke aufgezeichnet und Mängel, wie das Blockieren eines Lagers, können erkannt werden.

Sensor: HBM WA

Insgesamt: 16 Sensoren

Abtastrate: 50 Hz

Tiefpassfilter: Bessel, 10 Hz

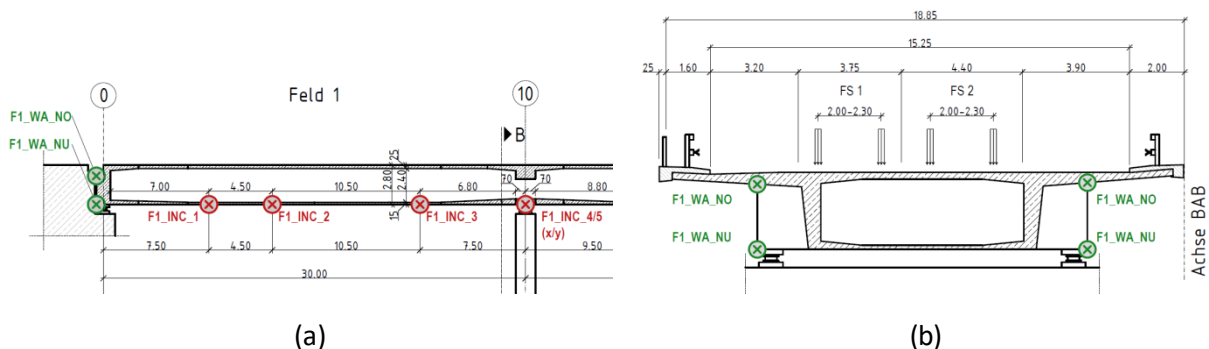


Abb. 2: Ausschnitt des globalen Neigungsmonitorings und der Messung der Auflagerverschiebung am nördlichen Überbau:
(a) Längsschnitt (b) Querschnitt

1.4. Lokales Dehnungsmonitoring

Um Aussagen über die Beanspruchung der maßgebenden Querschnitte im Feld und im Stützbereich zu erhalten wird mit Dehnmessstreifen gemessen. Aufgrund der einfachen Zugangsmöglichkeit ist die Installation aus dem Inneren des Hohlkastens eine Randbedingung. Je Messschnitt wird mit vier DMS gemessen (siehe Abb. 3). Die DMS werden jeweils beidseitig am Untergurt und am Steg appliziert. Zunächst wurde eine Positionierung des DMS oben am Steg direkt unterhalb der Fahrbahnplatte favorisiert, um eine Dehnungslinie über den gesamten Querschnitt zu erhalten. Die vorangegangenen finiten Elemente (FE) Berechnungen haben allerdings gezeigt, dass die DMS in diesem Bereich nahe der Dehnungsnulllinie liegen und damit kaum Dehnungen messbar sind. Stattdessen wird eine Positionierung 20 cm über Oberkante des Untergurts gewählt. Im Stützbereich verhindert ein massiver Querträger die Applikation der DMS unmittelbar über der Stütze. Um den Einfluss von Dehnungsdiskontinuitäten durch den Stützquerträger gering zu halten, wird hier in einem Abstand von 1 m jeweils vor und nach dem Querträger gemessen. Die Anordnung der DMS entspricht dem Feldbereich.

Am nördlichen Überbau wird mit insgesamt 28 Sensoren in jedem Feld und an den Stützen gemessen. In den Randfeldern liegt der Messquerschnitt bei 0,4 L, im mittleren Feld mittig. Am südlichen Überbau wird auf eine Messung im Stützquerschnitt verzichtet (Insgesamt 12 Sensoren). Der beschriebene Einsatzzweck der DMS könnte auch einem globalen Monitoring zugeordnet werden. Allerdings werden Dehnungsmessungen, v.a. auf Beton, durch die lokalen Gegebenheiten der Messstelle beeinflusst, z.B. durch Werkstoffinhomogenitäten. An den Positionen der DMS am Untergurt des Hohlkastens wurden bei der Installation öfters inhomogene Betonoberflächen registriert. Dies kann die Messung verfälschen. Aus diesem Grund wird hier die Kategorie lokales Monitoring gewählt.

Sensor: HBM 1-LY4, 100 mm, 120 Ohm, Viertelbrücke

Insgesamt: 40 Sensoren; Abtastrate: 50 Hz; Tiefpassfilter: Bessel, 10 Hz;

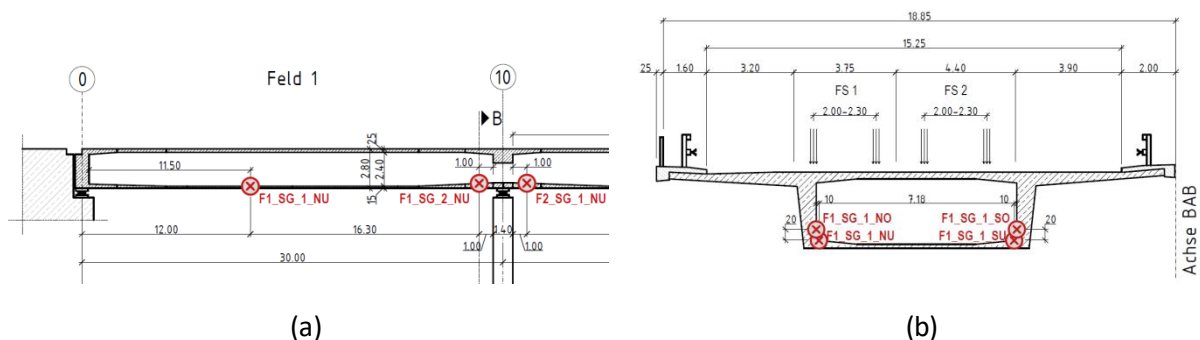


Abb. 3: Ausschnitt des Dehnungsmonitorings am nördlichen Überbau: (a) Längsschnitt (b) Querschnitt

1.5. Lokales Rissmonitoring

An der Sachsengrabenbrücke liegen mehrere Betonrisse mit bis zu 0.6 mm Rissweite vor. Diese Risse liegen überwiegend im Bereich der rechnerischen Momentennullpunkte ca. bei $\frac{1}{4}L$ und $\frac{3}{4}L$ der jeweiligen Feldlänge L und sind wahrscheinlich auf geringe Robustheitsbewehrung zurück zu führen. Aufgrund der Risse wurde die Brücke im Jahr 2000 durch externe Spannglieder ertüchtigt. Um zu überwachen, ob diese Risse aktiv sind oder zunehmen, wird an 2 Stellen des nördlichen Überbaus mit WAs die Rissweite gemessen. Je Messpunkt wird ein zweiter WA im Abstand von mindestens 75 cm im ungerissenen Bereich angebracht, sodass die relative Rissöffnung berechnet werden kann. Der Abstand richtet sich dabei nach der Verankerungslänge der Bewehrung. Am südlichen Überbau wird an 4 Stellen gemessen

Sensor: HBM WA

Insgesamt: 6x2 Sensoren; Abtastrate: 50 Hz; Tiefpassfilter: Bessel, 10 Hz;

1.6. Lokales Beschleunigungsmonitoring der externen Spannglieder

Aus den Eigenfrequenzen der externen Spannglieder kann die vorhandene Spannkraft ermittelt werden. Durch die Messung der Schwingungseigenschaften der externen Spannglieder mit Beschleunigungsaufnehmern können Schäden, die in einem Spannkraftverlust resultieren, frühzeitig erkannt werden. Am nördlichen Überbau wird an insgesamt vier der sechs Spannglieder gemessen, am südlichen Überbau an zwei.

Sensor: MMF KB12VD

Insgesamt: 6 Sensoren Abtastrate: 100 Hz Tiefpassfilter: Bessel, 30 Hz

1.7. Einwirkungsmonitoring

Das Einwirkungsmonitoring besteht aus den folgenden Komponenten:

- **Temperatur:** Die Außen- und Bauteiltemperatur wird mit 16 Temperaturfühlern gemessen. An beiden Überbauten gibt es jeweils einen Messquerschnitt, in dem die Temperaturfühler

an mehreren Stellen in Bohrungen eingelassen sind. Die Bohrungen sind so verteilt, dass sich ein vertikaler und horizontaler Temperaturgradient aus der Messung ermitteln lässt.

Sensor: Otom KS-PT100A-1.0-550-4L

Insgesamt: 16 Sensoren Abtastrate: 1 Hz Tiefpassfilter: -

- **Fahrzeugetkennung:** Für die Bestimmung der Verkehrslasten (Bridge Weigh-in-Motion) müssen einzelne Überfahrten in den Messdaten identifizieren werden. Dazu wird mit je zwei DMS je Fahrspur gemessen. Die DMS werden in Brückenquerrichtung unterhalb der rechnerischen Radaufstandsfläche appliziert (siehe Abb. 4). Durch zwei DMS je Fahrspur kann die Geschwindigkeit einer Überfahrt ermittelt werden. Um auch Ausschläge aus einzelnen Achsen zu erhalten wird die schnelle Messrate verwendet, die nachträglich von 100 Hz auf 300 Hz erhöht wurde. Zusätzlich wird untersucht, ob Fahrzeugachsen auch in akustischen Signalen mithilfe von Mikrofonen erkannt werden können. Dazu werden insgesamt drei Mikrofone (Bruel & Kjaer, Type 4957) an der Fahrbahnübergangskonstruktion appliziert. Aufgrund der hohen Abtastraten für die Mikrofone (10 kHz) wird nicht dauerhaft gemessen.

Sensor: HBM 1-LY4, 100 mm, 120 Ohm, Viertelbrücke

Insgesamt: 10 Sensoren; Abtastrate: 300 Hz; Tiefpassfilter: Bessel, 50 Hz;

- **Video:** Der Verkehr auf der Brücke wird mittels einer Wärmebildkamera aufgenommen. Durch die Verwendung einer Wärmebildkamera sind die Aufnahmen weitestgehend unabhängig von Lichtverhältnissen und Witterungsbedingungen. Personenbezogene Daten können dabei nicht erfasst werden. Die Bilddaten werden nicht automatisiert ausgewertet und dienen hauptsächlich zur Validierung der Messdaten. Beispielsweise kann durch die Videodaten verifiziert werden, dass extreme Amplituden in den Messdaten durch einen Schwertransport verursacht wurden. Eine Bildrate von 1 Hz ist für den Einsatzzweck der Kamera ausreichend.

Sensor: Axis Q1941-E

Insgesamt: 1 Sensor Abtastrate: 1 Hz Tiefpassfilter: -

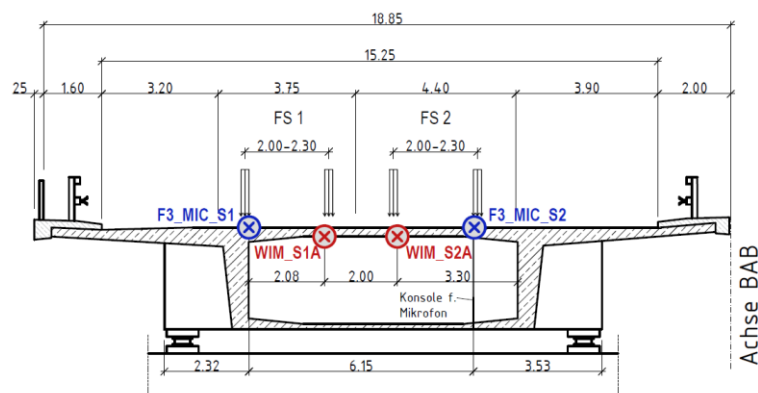


Abb. 4: Einwirkungsmonitoring mit DMS und Mikrofonen zur Erfassung von Überfahrten

2 Datenmanagement

Das Messsystem in der Brücke setzt sich aus Verstärkern (HBM QuantumX) in jedem Brückenfeld und einem zentralen Server im nördlichen Überbau zusammen. Die Messdaten werden von der Software automatisiert in 1-Stunden-Paketen im Catman-Dateiformat (*.bin) gespeichert und zusammen mit den Videodateien via LTE-Verbindung an den FTP-Server der Firma ITC übermittelt. Eine Catman-Datei hat eine Größe von ca. 330 MB. Die einstündigen Videodateien haben eine Größe von ca. 160 MB. Der FTP-Server dient als zentrale Verteilungsstelle, von der sich die Projektpartner der Universität Bonn und der TU Berlin die Daten herunterladen (siehe Abb. 5). Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgt bei den Projektpartnern. Die TU Berlin archiviert die Rohdaten und nutzt für die Auswertung ein Datenbanksystem. Alle verwendeten Server nutzen mindestens ein Raid 1 System, so dass eine Redundanz bei der Speicherung vorhanden ist.

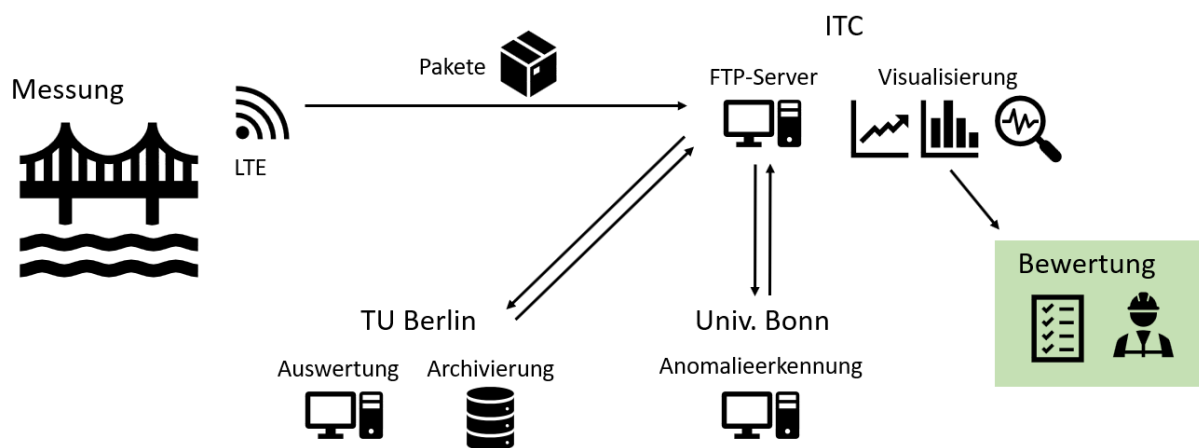


Abb. 5: Schematische Darstellung des Datenmanagements

3 Auswertung

Von den verschiedenen Projektpartnern werden die folgenden Auswertungen durchgeführt:

Universität Bonn:

- **Anomalieerkennung durch Deep Learning:** Eine Veränderung des Tragverhaltens durch Schäden, z.B. einem Spanngliedriss, resultiert in Veränderungen der Messdaten. Diese Veränderungen sowie Sensorschäden sollen durch Deep-Learning-Algorithmen erkannt werden. Um diese Algorithmen zu trainieren, muss zunächst ein Zeitraum an Messdaten im Ausgangszustand unter einer großen Bandbreite an Einwirkungen zur Verfügung stehen. Durch die saisonalen Temperaturschwankungen sollte dieser Zeitraum mindestens 9 bis 12 Monate betragen.

TU Berlin:

- **Modellkalibrierung:** Messgrößen und FE-Berechnungen unterliegen i.d.R. Abweichungen (siehe Abb. 6). Anhand der Messdaten kann ein FE-Modell der Brücke kalibriert werden, indem freie Steifigkeitsparameter, z.B. Materialeigenschaften wie der E-Modul, durch Optimie-

rung bestimmt werden. Durch die Kalibrierung, auch als FE-Update bezeichnet, steht nicht nur ein genaueres Berechnungsmodell für eine statische Bewertung zur Verfügung, sondern sie kann auch zur Schadenslokalisierung und -bewertung genutzt werden und ist damit eine Ergänzung zur Anomalieerkennung.

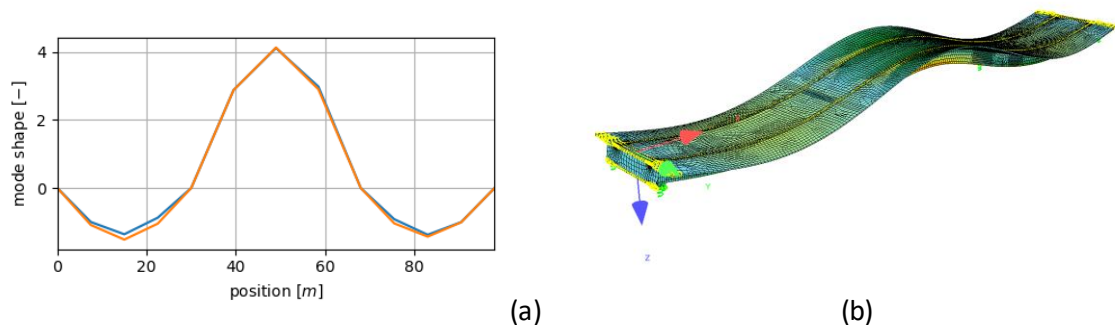


Abb. 6: Beispielhafte Darstellung der Abweichungen von Messgrößen und FE-Berechnungen: (a) messtechnisch ermittelte Schwingungsform des nördl. Überbaus mit einer Eigenfrequenz von 4,79 Hz (b) Korrespondierende Schwingungsform aus FE-Berechnung mit einer Eigenfrequenz von 4,50 Hz vor der Kalibrierung

- **Bridge Weigh-in-Motion (B-WiM):** Durch die Messtechnik werden einzelne Überfahrten in den Daten erkannt (siehe Abb. 7). Dies kann dazu genutzt werden die Verkehrslasten auf der Brücke zu bestimmen und ein objektspezifisches Ermüdungslastmodell abzuleiten. Das objektspezifische Lastmodell kann daraufhin in einer rechnerischen Bewertung verwendet werden. Zusammen mit einem kalibrierten FE-Modell bieten sich erhebliche Sicherheitsreserven im Vergleich zu normativen Ansätzen.
- **Sicherheitsäquivalente Bewertung:** Durch Extremwertstatistik und Rainflowzählung lassen sich in den maßgebenden Querschnitten anhand der Dehnungsmessung die genauen Beanspruchungen sowie charakteristische Werte ableiten. Mithilfe von probabilistischen Grenzzustandsgleichungen können objektspezifische Sicherheitselemente, wie Teilsicherheitsbeiwerte bestimmt werden. Dieses Vorgehen bietet auch für den Grenzzustand der Tragfähigkeit objektspezifische Lastmodelle.
- **Sonstige Signalmerkmale:** Zusätzlich zur Anomalieerkennung werden einige Signalmerkmale extrahiert, die grundsätzlich Auskunft über den Bauwerkszustand erlauben, dazu zählen u.a. die Schwingungseigenschaften, die temperaturabhängige Auflagerverschiebung und Überwachung der Spannkraft in den Spanngliedern.

ITC:

Online-Visualisierung der Messdaten und Ergebnisse: Auf der Plattform IRIS werden die Daten in aufbereiteter Form dem Nutzer zur Verfügung gestellt. Hier werden beispielsweise Zeitreihen der Sensoren visualisiert, ob Anomalien auftreten oder Grenzwerte überschritten werden (Ampel) sowie Zwischenergebnisse der sicherheitsäquivalenten Bewertung. Die Navigation soll dabei möglichst nutzerfreundlich und ansprechend sein. Zu diesem Zweck hat die TU Berlin ein weiteres 3D-Modell der

Brücke, das die Sensorpositionen enthält, erstellt. Informationen zu den Sensoren und Ergebnissen werden dann durch eine Auswahl im 3D-Modell bereitgestellt.

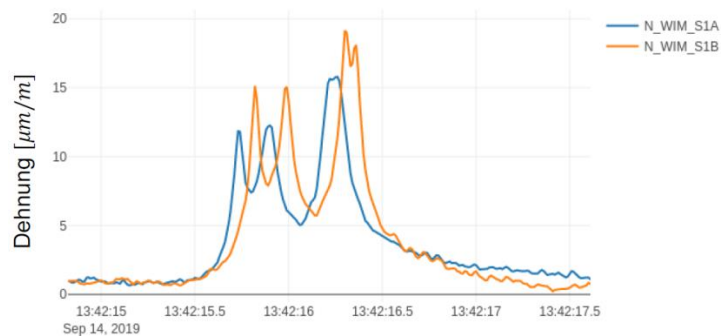
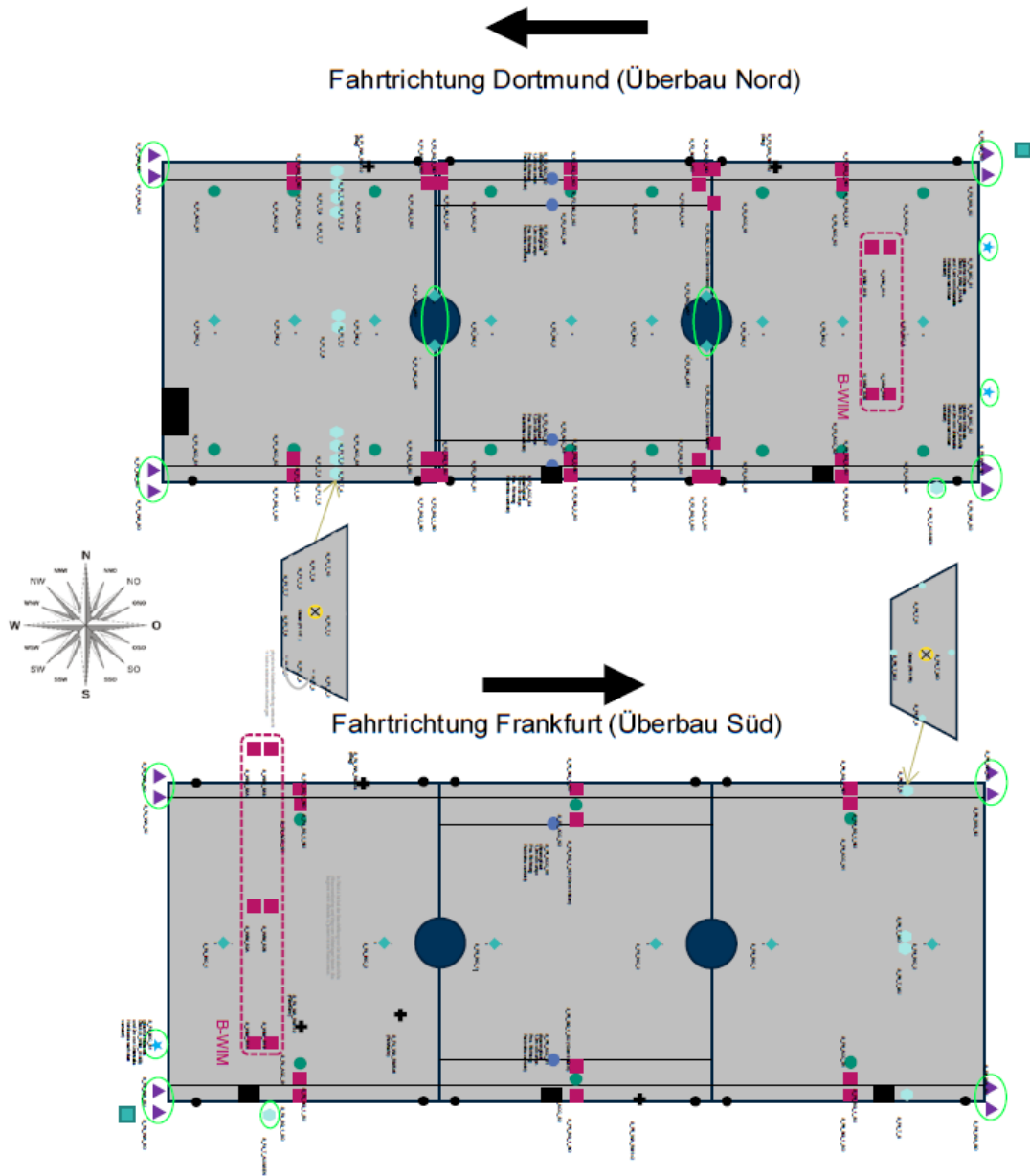


Abb. 7: Darstellung der Messreihen der WiM-DMS während einer identifizierten Überfahrt eines 4-achsigen LKW

Zunächst nutzen alle Projektpartner die Rohdaten für ihre Auswertung. Eine Vorverarbeitung erfolgt nach dem Bedarf der jeweiligen Auswertungsroutinen. Beispielsweise kommt die Anomalieerkennung, die Modalanalyse oder die Rainflowzählung nahezu ohne Vorverarbeitung aus. Die weiteren Auswertungsroutinen erfordern i.d.R. zunächst eine Trennung der Signalanteile aus Temperatur und Verkehrseinwirkung, z.B. Extremwertstatistiken oder B-WiM-Analysen. Die meisten Auswertungsroutinen befinden sich momentan noch in der Entwicklungs- und Plausibilisierungsphase, da die Projektlaufzeit schließlich noch 6 Monate beträgt.

Anhang A Übersicht Messtechnik



- Legende**
- ▲ Weg (uni) [4x4]
 - ◆ Neigung (uni) [19]
 - Beschleunigung (uni) [30]
 - DMS [34] → 100mm
 - Temperatur [10+4+2] → PT100
 - Rissmonitoring [6] → WA
 - Mikrophon [2+1] → B&K
 - Außenbereich
 - Löcher
 - Schaltschrank
 - Kamera