

**Digitales Testfeld
Autobahn
Intelligente Brücke
Untersuchungsprogramm**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 188

bast

Digitales Testfeld Autobahn Intelligente Brücke

Untersuchungsprogramm

von

Christiane Butz
Daniel Rill

Maurer Engineering GmbH
München

Ursula Freundt
Sebastian Böning
Erik Werner

Ingenieurbüro Prof. Dr. Freund
Weimar

Stefan Fischer
Florian Lau

Universität zu Lübeck

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 188

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0615
Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke –
Untersuchungsprogramm

Fachbetreuung
Sarah Windmann

Referat
Betonbau

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-721-1

Bergisch Gladbach, April 2023

Kurzfassung – Abstract

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Für das Pilotprojekt „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ wurde das Bauwerk BW 402e im Bereich des AK Nürnberg mit vier einzelnen, voneinander unabhängigen Monitoring-Systemen, einem Server und einer Internet-Verbindung ausgestattet. Die Monitoring-Systeme bestehen aus zwei intelligenten Kalottenlagern, einer intelligenten Schwenktraversen-Dehnfuge, dem System RTMS zur Erfassung relevanter BrückenKennwerte und Verkehrsbelastungen und einem drahtlosem Sensornetz zur Erfassung von Bauwerkseigenschaften und Wetter. Während der fünfjährigen Projektlaufzeit wurde der Betrieb und die Funktionsfähigkeit der Anlage sichergestellt, sodass die Systeme Datenerfassungsquoten zwischen 70 % und 97 % erreichten. Alle Systeme verarbeiten die Sensordaten automatisiert auf der lokal installierten Hardware zu relevanten Kenngrößen, die den Zustand des Bauwerks, einzelner Bauteile sowie Verkehrseinwirkungen und klimatische Einwirkungen erfassen. Diese aggregierten Daten sowie die Messdaten werden auf dem Server gespeichert bzw. in einer Datenbank abgelegt. Basierend auf dieser Datenbank werden die Ergebnisse kontinuierlich und mit einem möglichst geringen Zeitversatz tabellarisch und grafisch auf einer Webpage den Betreibern zur Verfügung gestellt. Zu den Ergebnissen, die auf der Webpage dargestellt werden, gehören Status der Messsysteme und Einzahlwerte zum Bauwerksstatus und Verkehr, Wetterdaten, Verkehrsdaten und Oberflächentemperaturen, Bauwerkssteifigkeit und externe Vorspannung, statistisch ausgewertete Messdaten und Auslastungsgrade, Daten der intelligenten Fahrbahnübergangskonstruktion und der intelligenten Lager, Messdaten aus dem drahtlosen Sensornetz, Störungen bzw. Ausfall der Internetanbindung und Informationen zum Bauwerk.

Digitales Testfeld Autobahn – Smart Bridge – Investigation Programme

For the pilot project “Smart Bridge in the Digitales Testfeld Autobahn”, the BW 402e structure in the area of the Nuremberg interchange was equipped with four individual, independent monitoring systems, a server and an internet connection. The monitoring systems consist of two smart spherical bearings, a smart swivel joist expansion joint, the system RTMS for recording relevant bridge parameters and traffic loading and a wireless sensor network for recording structure properties and weather. The operation and functionality of the system was ensured during five years so that the systems achieved data acquisition rates between 70% and 97%. All systems automatically process sensor data on locally installed hardware into relevant parameters that capture the condition of the bridge structure, bearings and expansion joint, as well as traffic impacts and climatic effects. These aggregated data as well as the measurement data are stored on the server resp. in a database. Based on this database, the results are continuously made available to the operators in tabular and graphical form on a web page with as little time lag as possible. The results displayed on the web page include status of the measurement systems and single-number values for the structure’s status and traffic, weather data and surface temperatures, traffic data, structure stiffness and external prestressing, statistically evaluated measurement data and utilisation rates, data from the smart expansion joint and smart bearings, measurement data from the wireless sensor network, malfunctions or failure of the Internet connection, and information about the structure.

Summary

Digitales Testfeld Autobahn – Smart Bridge – Investigation Programme

1 Smart Bridge part of Digitales Testfeld Autobahn

In addition to the usual damage-based structural inspection, the term "smart bridge" is used to develop an adaptive system for continuous provision of relevant information for a holistic condition assessment using suitable sensor technology in conjunction with analysis and evaluation procedures.

This will provide online indications of expected damage and condition changes. In combination with prognosis and structural models and with the integration of previously available information from databases, the basis for a reliability-oriented and preventive bridge maintenance management is thus created.

For the pilot project "Smart Bridge in the Digital Testbed Motorway", the bridge structure BW 402e in the vicinity of the Nuremberg interchange (connecting ramp between motorways A3 and A9) was made available by the North Bavarian Motorway Directorate. The four-span prestressed concrete box girder bridge was newly built as a replacement for a parallel, heavily damaged bridge structure. It has a maximum span of 40m, a total length of 155m, a width of 14.5m between the railings.

In the project "Digitales Testfeld Autobahn– Smart Bridge – Investigation Programme", the operation and functionality of the entire monitoring system consisting of individual systems is ensured. The maintenance of the system, the replacement of components, if necessary, the preparation of regular maintenance reports and the web-based presentation of results are carried out.

2 Smart bearings

The operation of the monitoring system for recording relevant bearing action effects is provided by Maurer Engineering.

2.1 Sensors

Two spherical bearings that are multidirectionally movable and located at bridge axis 40 are equipped with the following built-in measuring technology:

- Three pressure sensors in each bearing 40/1 and 40/3 to determine the vertical bearing load.
- Two distance sensors at bearing 40/3 for recording bridge inclination and natural frequencies.
- One displacement sensor at bearing 40/3 for measuring the bearing's relative displacement.

2.2 Data acquisition and evaluation

A control cabinet with a measuring amplifier for data acquisition is located at the bridge pier of axis 40. Evaluation and storage of the measured data is carried out by computers in the main control cabinet at axis 50 (see section 3.2).

The sensor signals are digitised with a sampling rate of 50Hz and stored using commercial data acquisition software. Time is permanently synchronised with the system time of the network-attached storage (NAS).

The measurement data is used to obtain aggregated data automatically on-site by means of software developed in-house.

For the period from 01/2017 to 12/2021, the data collection rate is 70.5%.

2.3 Operation and maintenance

Inspection and maintenance of the system is carried out annually by checking the functionality and state of the sensors, hardware and accessories, and cleaning if necessary.

Already at the end of 2017, the pressure sensors DS 40/1-1 and DS 40/1-2 showed a strong drift. They failed completely in January 2018. Sensor DS 40/3-2 also showed a physically inexplicable decrease in the pressure signal. In summer 2020, pressure sensor 40/1-3 failed. The pressure sensors could not be repaired or replaced.

Remote maintenance of the measurement data acquisition, automated data evaluation and data management is carried out via internet.

2.4 Results

Aggregated data is automatically compiled on site from the measurement data and transferred to the database via NAS. This aggregated data is displayed graphically and/or in tabular form in the web application as follows

- Graphical display of two bridge natural frequencies.
- Graphical display of quasi-stationary bearing forces.
- Tabular display of measured extreme values of the bearing pressures, graphical display of the monthly and daily extreme values and mean values of the bearing pressures.
- Tabular display of measured extreme values of the bearing displacement and accumulated sliding path, graphical display of monthly and daily extreme values and mean values of the bearing displacement.
- Tabular display of measured extreme values of the bearing displacement and accumulative sliding path, graphical display of monthly and daily extreme values and mean values of the bearing displacement.
- Graphical display of the derived combined sliding gap.
- Tabular display of traffic-induced overall bearing forces.

3 Smart Expansion Joint

The operation of the monitoring system for recording the traffic loads and monitoring the expansion joint is conducted by Maurer Engineering.

3.1 Sensors

A swivel joist expansion joint DS 320 GO located at bridge axis 50 is equipped with the following built-in measuring technology:

- 24 force sensors for measuring the traffic load variation,
- a load cell for measuring the absolute prestress force as reference,

- draw-wire sensors for total joint width measurement and gap widths between first and third centre beams,
- four accelerometers for measuring the vibration of the centre beams.

3.2 Data acquisition and evaluation

The system includes amplifiers, a computer for data acquisition and storage and a computer for evaluation of the measured data. Two control cabinets are located below the expansion joint, in which amplifiers are located. A large control cabinet is located inside the bridge deck near the end cross section at axis 50. It contains measuring amplifiers and a computer as well as an uninterruptible power supply (UPS).

The sensor signals are digitised and stored using commercial data acquisition software with two different sampling rates. The time is permanently synchronised with the system time of the NAS.

Automated aggregated data is obtained from the measured data using software developed in-house.

For the period 01/2017 to 12/2021, the data collection rate is 70.5%

3.3 Operation and maintenance

The system is inspected and maintained annually by checking the functionality and state of the sensors, hardware and accessories and cleaning if necessary.

No maintenance measures were necessary.

Remote maintenance of the measurement data acquisition, the automated evaluation and the data management is carried out via internet.

3.4 Results

Aggregated data is automatically determined on site from the measurement data and transferred to the database via NAS. This aggregated data is displayed graphically and/or in tabular form in the web application as follows

- Graphical display of the bearing forces as extreme values and average values for the crossbeam bearings in the carriageway.

- Graphical display of the overall bearing force as extreme values and mean value for the left and right lane.
- Graphical display of the relevant natural frequency as extreme values and mean value for the left and right track.
- Graphical display of the gap widths as extreme values and mean value for the left and right lane.
- Graphical display of the total gap width as extreme values and mean value.
- Graphical display of the sliding distances as extreme values and mean value for the left and right lanes.
- Graphical display of the traffic composition based on 6 vehicle classes, number of vehicles per month, percentage.
- Tabular display of the individual vehicles data with time index, vehicle class, number of axles, total weight, speed and lane.
- Graphical display of vehicle speeds by vehicle class as extreme values and mean values.
- Graphical display of the number of individual axle loads according to load level.
- Six strain gauges installed at the expansion joint in axis 50 to derive axle number, spacing and load distribution.
- Four inductive displacement transducers attached to bearing 40/1 in axis 40 to detect superstructure rotation and bearing compression as well as superstructure displacement in longitudinal direction.
- Four accelerometers mounted on the external tendons to determine the frequency.
- 2 cameras for vehicle recording.

4.2 Data acquisition and evaluation

For data acquisition, the system includes amplifiers, a computer for data evaluation and storage and another computer for camera control.

Sensor signals are digitised with three different sampling rates and stored using commercial data acquisition software. Time is permanently synchronised with the NAS system time.

Automated aggregated data is obtained from the measurement data using software developed in-house.

For the period 01/2017 to 12/2021, the collection rate is 97%.

4 Bridge parameters

The monitoring system RTMS for recording of the effects and resistance of the bridge (relevant bridge parameters) is provided by consulting engineer Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt (IBF).

4.1 Sensors

Bridge parameters are determined using measurement data from the following sensors:

- 20 strain gauges installed in the superstructure in four cross sections A, B, C and D between axis 30 and 50 and used to detect vehicle, speed and weight.
- Two temperature sensors located in cross section B between axis 40 and 50 and used to detect temperature effects.

4.3 Operation and maintenance

The system is inspected and maintained annually by checking the sensors' functionality and state, hardware and accessories, and cleaning if necessary.

Inductive displacement transducer at bearing 40/1 showed distinctive features. After an exchange, it was found to be stuck due to environmental pollution. This was prevented by regular cleaning. There were no other distinctive features.

The remote maintenance of the measurement data acquisition and its evaluation takes place via internet access. The automated evaluation is carried out on place. The system and the automated evaluation have been running stably since implementing. The monitoring algorithms for recognising distinctive features react reliably.

4.4 Results

Aggregated data is automatically determined on site from the measurement data and transferred to the database via NAS. This aggregated data is displayed graphically and/or in tabular form in the web application as follows

- Tabular display of individual vehicles with date, time, vehicle type, track, total weight, speed, number of axles, overload (y/n).
- Graphical and tabular display of the composition of HGV traffic in [%] with differentiation between semi-trailer trucks, trucks with trailer, trucks without trailers and others.
- Graphical and tabular display of HGV traffic volume in [number/day] with the above-mentioned differentiation.
- Tabular display of vehicle parameters, i.e. distribution of total weight on axles in [%], axle spacing in [m], traffic composition in [%], average total weight in [t] for nine different vehicle types.
- Graphical display of distribution function of total weight for vehicle type 41, type 97, type 98.
- Graphical and tabular display of static bridge loading by traffic as a ratio of actual minimum/maximum values to design values and as a ratio of characteristic minimum/maximum values determined from measurement data to design values determined from load model LM 1.
- Graphical and tabular display of fatigue loading of the bridge due to traffic as a ratio of damage-equivalent stress ranges determined from measurement data in relation to damage-equivalent stress ranges determined from fatigue load model FLM 3.
- Graphical and tabular display of the structure stiffness over relative natural frequency of the bridge.
- Graphical and tabular display of the external prestressing as the relative natural frequency of the prestressing.
- Threshold values with mail information from traffic load, fatigue damage, prestressing force.

5 Wireless sensor network

The wireless sensor network is operated by the Institute for Telematics at the University of Lübeck (UzL).

5.1 Sensors

The following battery-operated sensors are integrated in the sensor network, which are attached to the bridge deck between axis 40 and 50:

- Two type-K thermocouples inside the bridge structure to detect the structure temperature.
- One SHT sensor to detect the sun's temperature at the bridge structure and humidity.
- Two potentiometric displacement sensors to detect the change in crack size.
- Two load cell sensors to detect not only the change in crack size in one but in two dimensions.
- An expansion sensor, which uses the same principle as the displacement sensors, but with an additional spring, to detect the expansion.
- A tilt sensor to detect the tilt of the bridge.

A meteorological station for recording the amount of rain, wind direction, wind speed, temperature and humidity is located above the eastern abutment next to the roadway.

5.2 Data acquisition

The hardware for data acquisition delivered by the sensors consists of

- two repeaters that ensure the connectivity of the network and forward received data to neighbouring sensor nodes.
- a gateway as a data sink in the wireless sensor network. Here the measurement data is collected and transmitted to the NAS via a serial interface.
- the NAS located in a control cabinet for data storage (see section 6.1).

The wireless sensor network is controlled with software developed in-house.

Until autumn 2018, data was collected with one reading/minute (sampling rate 0.017Hz). In order to adapt the service life of the replaced batteries to the project duration, a measured value/15 min (sampling rate 1/900Hz) has been recorded since then.

During 01/2017 to 12/2021, the recording rate is about 91.23%.

5.3 Operation and maintenance

The system was installed and put into operation on 15.06.2017. No on-site maintenance is required.

In September 2018, a necessary battery change was carried out. Due to the reduction of the sampling rate, no further battery change was necessary.

Since November 2019 the weather station provided sporadically measurement data. A cause for the persistent failures could not be identified. It was not possible to repair the weather station. In September 2021 the weather station automatically restarted and is in service since then.

On 05.03.2019, a repeater failed. As it is a redundant component in the network, it is not necessary to repair it at present.

Remote maintenance of the measurement data acquisition, the automated evaluation and the data management is carried out via internet.

5.4 Results

Aggregated data is automatically determined on site from the measurement data and transferred to the database via NAS. This aggregated data is displayed graphically and/or in tabular form in the web application as follows

- surface temperature, air temperature, air shadow temperature,
- cracks,
- slope,
- force effect,
- battery voltage,
- meteorological data.

Due to the failure of the weather station, data from the weather station No. 3668 at Nuremberg Airport maintained by German Weather Service are additionally displayed.

6 Network

The server (NAS) is operated by the Institute for Telematics at the University of Lübeck (UzL).

6.1 Hardware

The NAS consists of a RAID6 system with nine six-terabyte hard disks. If one hard disk fails, a tenth "hot spare" hard disk is automatically activated to repair the RAID. The NAS is protected against data loss due to power failures via a UPS. The independent systems Intelligent Bearing, Intelligent Expansion Joint and Bridge Characteristics are connected to the NAS via LAN connection.

6.2 Data management

Raw data are generated directly by the measuring computers and their peripherals and represent the values generated by the sensors. All raw data are stored on the NAS in corresponding directories. In addition, two external hard drives are connected for manual raw data retrieval.

Aggregated data can be obtained from several samplings of a single sensor taken at different times, or from data of several sensors at one time, or even from already aggregated data. These data are stored in a common database for further processing, e.g. for cross reference, interpretation, graphical and tabular display via web application, download.

The SQL database contains various tables to manage bridge parameters and aggregated data from the four systems.

6.3 System security

The following security measures are implemented to protect the data of the Smart Bridge from access/abuse by third parties:

- Remote access via SSH tunnel
- Remote access via VPN using the router with firewall (independent of the NAS)
- Password protection
- Software updates

Each system as well as the NAS are automatically monitored remotely by triggering email alerts in case of anomalies.

Physical protection against unauthorised access, vandalism, contamination and weathering is achieved by

- Abutment with lockable door to restrict access into the bridge deck.
- Lockable control cabinets in the bridge deck to protect the hardware.
- Lockable control cabinet in a position on pier 40 that is difficult to reach.
- Sensor nodes, meteorological station and cameras are placed outside the bridge deck but at locations difficult to reach.
- Protection against dirt and weathering by Plexiglas encasement of the bearings at pier 40.

6.4 Access

Two websites provide general access to all data:

Access to the NAS via a website (<https://intelligente-bruecke.synology.me:5001/>)

Access to the web-application developed by the University of Lübeck (currently installed on a development server at the University of Lübeck): (<https://ibast.itm.uni-luebeck.de/dev>) Depending on the user's role, (e.g. BMVI, BASt, Autobahn GmbH des Bundes), it is determined which different levels of detail of the bridge are visible.

6.5 Operation and maintenance

The system was installed and commissioned on 15.06.2017. No on-site maintenance is required. Remote maintenance is carried out via the internet.

A hard disk in the RAID6 system of the central server failed on 19 November 2017 and was replaced on 11 December 2017 as scheduled.

An operating system failure occurred on 05.09.2017. After reinstallation the system was put into service on 19.09.2017

A processor error occurred on 05.02.2019. The system was put into service again on 03.04.2019 after installation of a replacement device in the Smart Bridge and replacement of a defective hard disk.

A failure of a RAID6 hard disk occurred on 19.11.2019.

Warnings are also displayed for hard disk number 6, which indicates that the hard disk will soon reach the end of its service life.

Numerous internet connection failures were detected. Power failures lasting several days were also detected and led to data loss.

7 Web application

A result-based web application has been developed to make the automatically obtained aggregated data available. The data are provided continuously and with as little time lag as possible. The aggregated data is displayed graphically or in tabular form and the hardware is monitored in a hierarchical structure.

The main levels are:

- Overview – status of the measurement systems and one-number values for the status of the bridge structure status and for traffic loading.
- Weather – meteorological data
- Actions – traffic data and bridge surface temperatures
- Resistances – structural stiffness and external prestressing
- Bridge – statistically evaluated measurement data and load capacity factors
- Components – aggregated data of the smart expansion joint and the smart bearings
- Sensor network – measurement data
- Disruptions – internet connection failure
- Bridge structure overview – information on the bridge
- Downloads – Information on data download

The aim is to enable the bridge operator to recall the latest characteristic values at any time via the web application in order to monitor the structural components, detect changes in bridge state and optimise maintenance, repair and preservation measures.

Inhalt

1	Zusammenfassung	13	4	Messergebnisse	83
2	Sensorsysteme	13	4.1	Verkehrsdaten	83
2.1	Intelligente Lager	13	4.1.1	Intelligente Schwenktraversen- Dehnfuge	83
2.1.1	Monitoring System	13	4.1.2	RTMS	86
2.1.2	Datenerfassung und -speicherung	20	4.2	Klimadaten	102
2.2	Intelligente Schwenktraversen- Dehnfuge	24	4.2.1	Wetterstation	102
2.2.1	Monitoring System	24	4.2.2	Referenzdaten des DwD	102
2.2.2	Datenerfassung und -speicherung	30	4.3	Statische Brückenreaktionen	104
2.3	RTMS für BrückenKennwerte	32	4.3.1	Risse	104
2.3.1	Monitoring System	32	4.3.2	Neigung	104
2.3.2	Datenerfassung und -speicherung	51	4.3.3	Kraft	104
2.4	Drahtloses Sensornetz	61	4.3.4	Bauwerkstemperatur	105
2.4.1	Monitoring System	62	4.4	Statische Beanspruchung der Brücke bzw. Verkehrslastbild	105
2.4.2	Datenerfassung und -speicherung	65	4.5	Ermüdungsbeanspruchung der Brücke	107
3	Zentralserver	69	4.6	Selbstüberwachung der Kalottenlager	109
3.1	Hardware	69	4.6.1	Allgemeines	109
3.2	Datenmanagement	71	4.6.2	Druckbelastung	109
3.2.1	Datenmodell	71	4.6.3	Verschiebung	110
3.2.2	Datenformat	71	4.6.4	Verdrehung	111
3.2.3	Datenzugriff	79	4.6.5	Akkumulierte Gleitwege	111
3.3	Sicherheitskonzept	80	4.6.6	Gleitspalte der ebenen und sphärischen Gleitfläche	111
3.3.1	Generelle Sicherheitsmaßnahmen	80	4.6.7	Selbstüberwachung der Kalottenlager	112
3.3.2	Router	81	4.7	Lagerwege infolge Temperatur und Verkehr	112
3.3.3	Physische Sicherheit	81	4.7.1	Lagerwege infolge Temperatur von Jan. 2017 bis Dez. 2018	112
3.3.4	Passwörter	81	4.7.2	Lagerwege infolge Verkehr von Jan. 2017 bis Dez. 2018	113
3.3.5	Benutzer	82			
3.3.6	Systemupdates	82			
3.4	Überwachung	82			
3.5	Wartung und Instandsetzung	82			
3.5.1	Ausfälle	82			

4.7.3	Lagerwege infolge Temperatur und Verkehr seit Januar 2019	113	5.10	Gekoppelte Auswertungen aus den vier Systemen	125
4.8	Kennwerte des Bauwerks- widerstandes	113	6	Zusammenfassung und Ausblick . . .	125
4.8.1	Vorbemerkungen	113	6.1	Zusammenfassung.	125
4.8.2	Ermittlung der Eigenfrequenzen.	114	6.2	Ausblick	125
4.8.3	Aufbereitung der Eigenfrequenzen.	117	6.2.1	Sensorsysteme.	125
4.8.4	Ableitung von Statuskennwerten für den Widerstand.	119	6.2.2	Zentralserver, Datenbank und Webapplikation.	126
4.9	Eigenüberwachung des Fahrbahnübergangs.	120	6.2.3	Daten – Auswertung, Qualität und Weiterverwendung	126
4.9.1	Eigenschwingverhalten	120	Literatur	127	
4.9.2	Spaltweiten.	120	Bilder	127	
4.10	Gekoppelte Auswertungen aus vier Systemen	120	Tabellen	132	
4.10.1	Verkehrsdaten	120			
4.10.2	Tragsystemeigenschaften	121			
4.10.3	Lagerkräfte und -verformungen	121			
5	Automatisierte Auswertung	121			
5.1	Verkehrsdaten	121			
5.1.1	Intelligente Schwenktraversen- Dehnfuge	121			
5.1.2	RTMS.	121			
5.2	Klimadaten	121			
5.2.1	Sensorwertexponenten	121			
5.2.2	Mittelung.	122			
5.2.3	Kalibriergeraden.	122			
5.2.4	Automatische Aufbereitung	122			
5.3	Statische Brückenreaktionen	122			
5.4	Statische Beanspruchung der Brücke bzw. Verkehrslastbild	123			
5.5	Ermüdungsbeanspruchung der Brücke	123			
5.6	Selbstüberwachung der Kalottenlager	123			
5.7	Lagerwege infolge Temperatur.	123			
5.8	Globale Steifigkeit und Spannkraft- verlauf der externen Spannglieder	124			
5.9	Eigenüberwachung des Fahrbahnübergangs.	125			

1 Zusammenfassung

Ergänzend zur bisher üblichen schadensbasierten Bauwerksprüfung erfolgt unter dem Begriff „Intelligente Brücke“ die Entwicklung eines adaptiven Systems zur kontinuierlichen Bereitstellung relevanter Informationen für eine ganzheitliche Zustandsbewertung durch den Einsatz von geeigneter Sensorik in Verbindung mit Analyse- und Bewertungsverfahren. Hierdurch werden online Hinweise auf zu erwartende Schädigungen und Zustandsänderungen ermöglicht. In Kombination mit Prognose- und Strukturmodellen und unter Einbindung bislang verfügbarer Informationen aus Datenbanken wird damit die Grundlage für ein zuverlässigkeitsorientiertes und präventives Erhaltungsmanagement geschaffen.

Das Pilotprojekt für die Intelligente Brücke ist das von der Autobahndirektion Nordbayern zur Verfügung gestellte Bauwerk BW402e im Bereich des AK Nürnberg (Verbindungsrampe BAB A3 zur BAB A9). Es handelt sich um den Neubau einer vierfeldrigen Spannbeton-Hohlkastenbrücke, maximale Stützweite 40 m, Gesamtlänge 155 m, Breite 14,5 m zwischen den Geländern als Ersatzneubau für ein parallel verlaufendes, stark geschädigtes Brückenbauwerk.

Ziel des Projekts „Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm“ ist der Betrieb und die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der gesamten, aus vier einzelnen Systemen bestehenden Anlage im Untersuchungszeitraum (Messgeräte, Übertragungstechnik...), Wartung der Anlage, ggf. Austausch von Elementen, Erstellung regelmäßiger Wartungsberichte und Ergebnisdarstellung.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt in drei Stufen, wobei im Jahr 2017 die Stufe 1 bearbeitet wurde, d. h. eine manuelle und teilautomatisierte Auswertung erfolgte bei den Auftragnehmern.

Im Jahr 2018 wurde die teilautomatisierte Auswertung weiterentwickelt zu einer vollautomatisierten und nicht-vor-Ort getestet. Eine vor-Ort-Implementierung erfolgte im 1. und 2. Quartal 2019 für die Messwerte aus den Kalottenlagern, Verkehrsdaten aus der Dehnfuge und Verkehrserkennung aus RTMS.

Im Jahr 2020 wurde die vollautomatisierte Auswertung vor-Ort optimiert und die Ergebnisse in eine Webapplikation integriert und dargestellt.

Im Jahr 2021 wurde die Ergebnisdarstellung in der Webapplikation vervollständigt.

Die Entwicklung der Auswertung zu einer automatisierten Auswertung vor Ort wird parallel zu diesem Projekt in drei einzelnen Projekten bearbeitet (siehe [1], [2], [3]).

In Kapitel 2 und 3 werden die Sensorsysteme und der Zentralserver beschrieben sowie die Datenerfassung mit Fernüberwachung. Die Zeiträume, in denen die Messsysteme ordnungsgemäß gemessen und aufgezeichnet haben, werden aufgelistet. Außerdem werden die durchgeführten Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten dokumentiert. Insbesondere wird in Kapitel 3 die Datenbank als Grundlage der Web-Applikation beschrieben.

In Kapitel 4 werden die Messergebnisse der Stufe 1 und 2 sowie über die Ergebnisse der optimierten AuswerteprozEDUREN dargestellt.

In Kapitel 5 werden die automatisierten Auswertungen beschrieben. Über Weiterentwicklungsmöglichkeiten wird in Kapitel 6 berichtet.

2 Sensorsysteme

2.1 Intelligente Lager

In Achse 40 der Brücke sind zwei Lager vom Typ KGA 18436 kN mit integrierter Messtechnik verbaut (siehe Tabelle 1).

2.1.1 Monitoring System

2.1.1.1 Sensoren

Im Folgenden werden grafisch die Einbaupositionen der Sensoren in KGA 40/1 und KGA 40/3 dargestellt (siehe Bild 1 und Bild 2).

Sensortyp	Lager	
	KGA 40/1	KGA 40/3
Drucksensoren	3 Stk.	3 Stk.
Abstandssensoren	0	2 Stk.
Wegsensoren	0	1 Stk.

Tab. 1: Anzahl der Sensoren in den Lagern

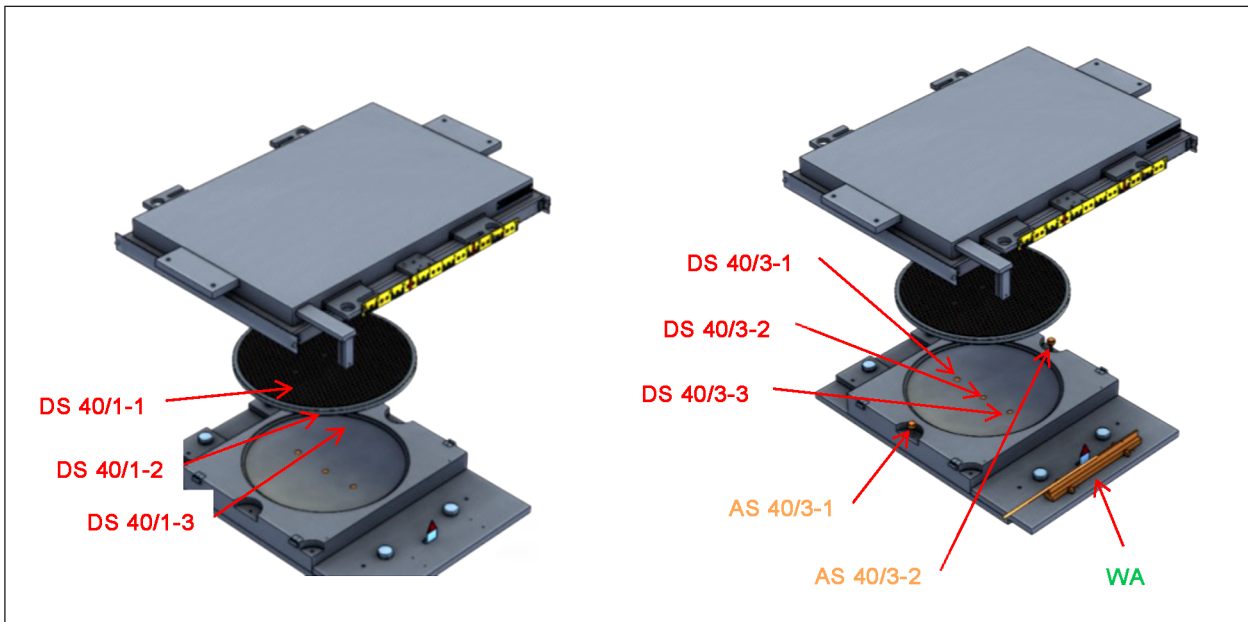


Bild 1: Links KGA 40/1 und Rechts KGA 40/3



Bild 2: Links KGA 40/1 und Rechts KGA 40/3 im Bauwerk

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden folgende Abkürzungen verwendet.

DS = Drucksensor

WA = Wegaufnehmer

AS = Abstandssensoren

- Drucksensoren DS zur Auflastmessung

In den Lagern 40/1 und 40/3 sind im Lagerunterteil jeweils 3 Drucksensoren in einer Linie quer zur Längsachse der Brücke eingebaut. Die Sensoren haben einen Messbereich von 0-1200 bar und basieren auf einer DMS-Vollbrücke. Sie ermöglichen es, unter Zuhilfenahme einer durch Versuche ermittelten Kalibrierkurve die vertikale Auflast des Lagers anzugeben.

- Abstandssensoren AS zur Neigungsmessung

Im Lager 40/3 sind in Richtung der Brückenlängsachse zwei Abstandssensoren eingebaut. Diese Sensoren besitzen einen Messbereich von 2,0 mm und werden eingesetzt, die Verdrehung des Lagers um die Achse 40 zu messen. Diese Abstandssensoren sind in der Lage, sehr präzise zu messen. Diese Eigenschaft wird hier genutzt, um die vertikale Relativbewegung des Lageroberteils gegenüber dem Lagerunterteil im Bereich von ± 1 mm zu messen. Bei einem Messpunktabstand von 620 mm lässt sich so eine Verdrehung im Bereich von $\pm 0,185$ bzw. $\pm 3,23$ ‰ feststellen. Die Sensoren sind so eingestellt, dass beim Einbau am 07.07.2016 jeweils + 1,0 mm ausgegeben wurde.

- Wegaufnehmer WA zur Verschiebungsmessung
Am Lager 40/3 ist unterhalb der Skala in Richtung der Brückenlängsachse ein Wegaufnehmer eingebaut, welcher zum Aufzeichnen der Lagerposition und des Lagerweges dient. Dazu wird die Relativverschiebung zwischen dem Lagerunter- und dem Lageroberteil gemessen. Der Messbereich des Sensors beträgt ± 125 mm (gesamt 250 mm). Der Sensor wurde so positioniert, dass sich die Nullposition entsprechend der Skala des Lagers in der Mitte des Verschiebeweges befindet. Ist das Lageroberteil gegenüber dem Unterteil in Richtung des Widerlagers verschoben, wird ein negativer Wert ausgegeben. Ist das Lageroberteil gegenüber dem Unterteil vom Widerlager weg verschoben, wird ein positiver Wert ausgegeben.

2.1.1.2 Geräte zur Datenerfassung

Die Signale der an und in den Lagern verbauten Sensoren werden mittels eines Messverstärkers, der sich in einem Schaltkasten direkt am Brückenpfeiler befindet, erfasst und im Weiteren durch einen Embedded-PC aufgezeichnet. Dieser Messrechner befindet sich in einem großen Schaltschrank innerhalb der Brücke bei Achse 50. In einem zweiten, kleineren Schaltschrank befindet sich ein leistungsfähiger Industrie-PC, mit dem die automatisierte Auswertung durchgeführt wird.

2.1.1.3 Wartung und Instandsetzung

2.1.1.3.1 Allgemeines

2.1.1.3.2 Inspektion am 11.12.2017

Im Rahmen der Inspektion am 11.12.17 konnte nur der Schaltschrank und der Wegsensor inspiziert werden. Die Messtechnik wurde visuell und manuell auf Schäden untersucht und zusätzlich alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

Für eine genauere Untersuchung der im Lager verbauten Sensoren sind eine Hebebühne und die Demontage des Vogelschutzes an dem Pfeiler der Achse 40 notwendig.

- Schaltschrank am Pfeiler der Achse 40
Die visuelle Überprüfung des Schaltschranks hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und

der Stecker ist deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.

Der Schaltschrank ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Wegsensor WA 40/3

Die visuelle Überprüfung des Wegsensors hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist deren Zustände als sehr gut bestätigt worden.

Der Wegsensor ist nicht übermäßig verschmutzt.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

2.1.1.3.3 Ausfall von Drucksensoren

Bereits Ende 2017 wiesen Sensor DS 40/1-1 und DS 40/1-2 eine starke Drift auf. Sie fielen im Januar 2018 komplett aus. Auch Sensor DS 40/3-2 zeigte eine physikalisch nicht erklärbare Druckabnahme. Bild 3 und Bild 4 zeigen die Verläufe der Mittelwerte der gemessenen Druckschwankungen.

Im Sommer 2020 kam es zu einem weiteren Ausfall des Sensors 40/1-3. Der Ausfall fand während eines Ausfalls der Datenaufzeichnung statt (siehe Bild 5 bis Bild 7). Somit ist eine Analyse der Ursache für den Ausfall anhand von Messdaten nicht möglich.

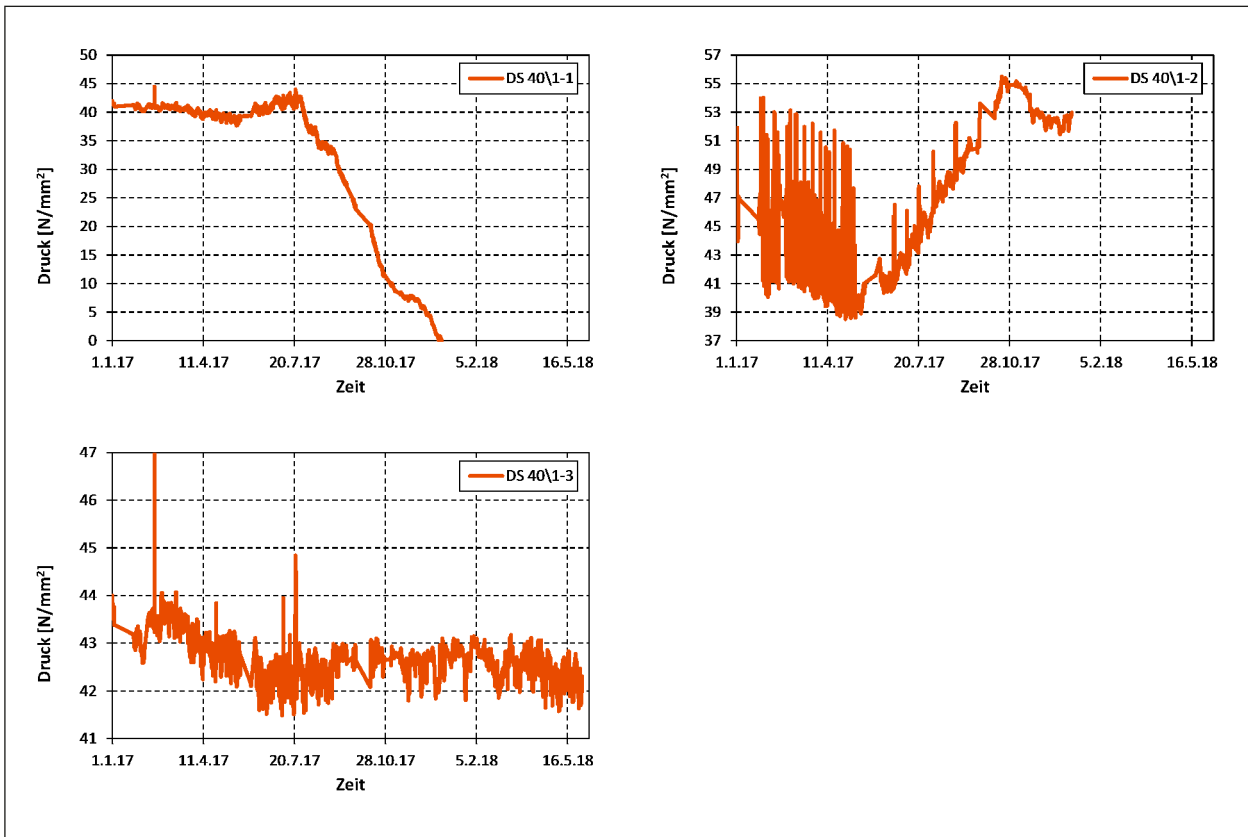


Bild 3: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/1

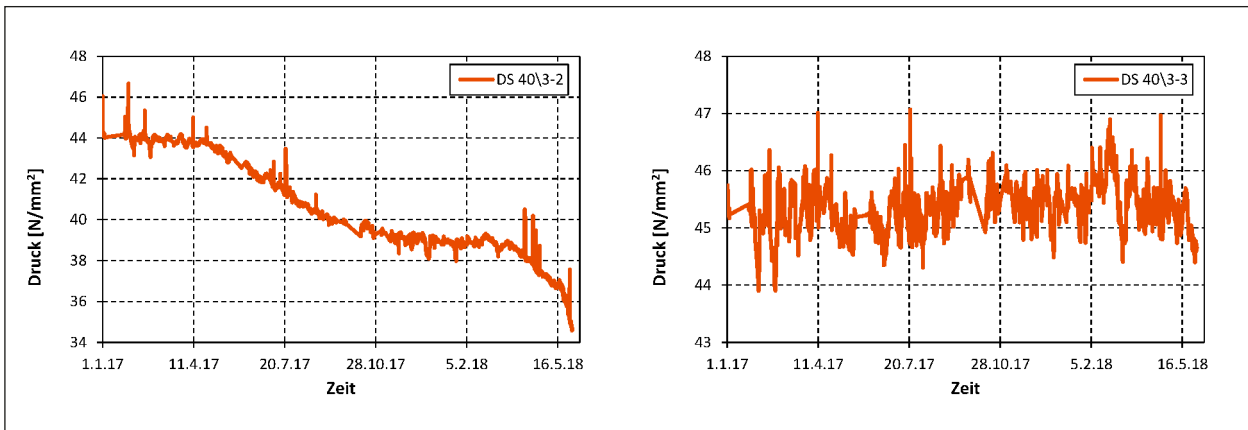


Bild 4: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/3

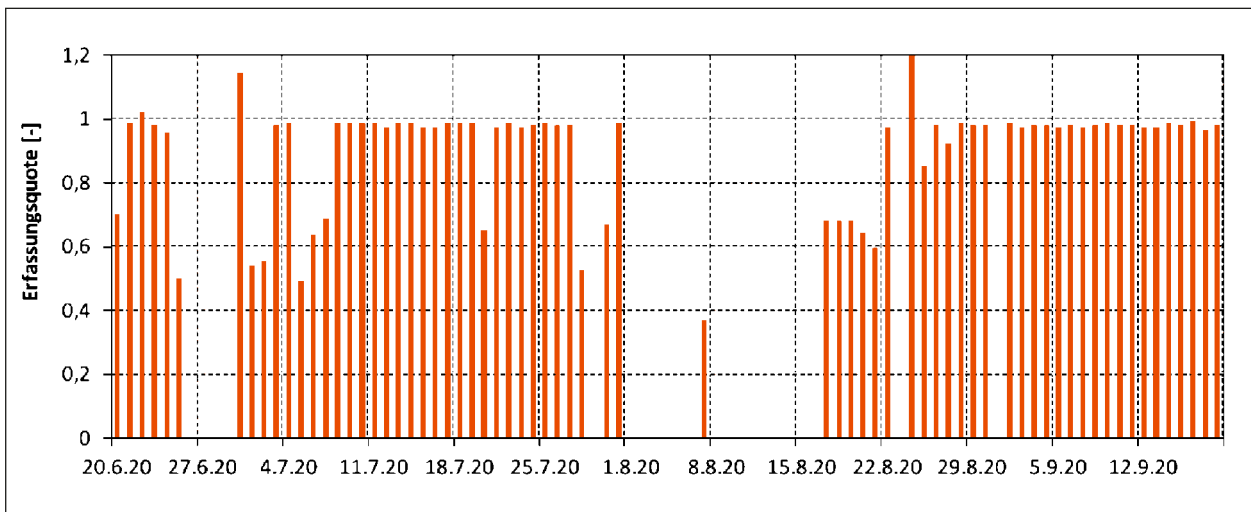


Bild 5: Erfassungsquote des Systems Maurer von Juni bis September 2020

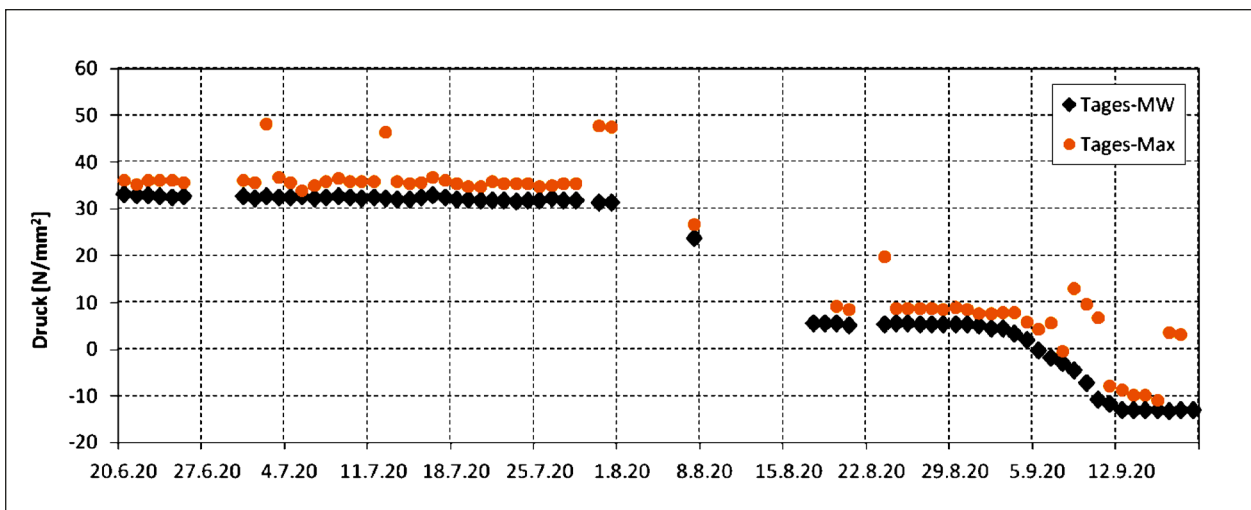


Bild 6: Tagesmittelwerte und Tagesmaxima des Drucks des Sensors 40/1-3 im Lager 40/1 im Zeitraum Juni bis September 2020

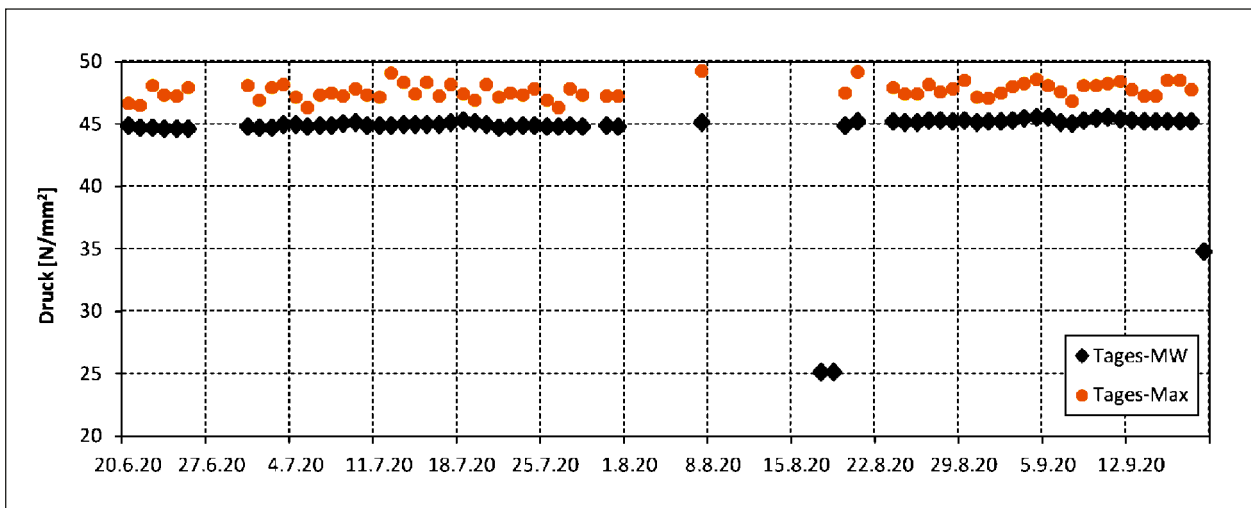


Bild 7: Tagesmittelwerte und Tagesmaxima des Drucks des Sensors 40/3-3 im Lager 40/3 im Zeitraum Juni bis September 2020

2.1.1.3.4 Inspektion am 19.04.2018

Im Rahmen der Referenzfahrten am 22.04.2018 wurde am 19.04.2018 das Lager 40/3 temporär mit einem zusätzlichen Wegsensor instrumentiert, welcher die verkehrsinduzierten Verschiebungen in der ebenen Gleitfläche erfasste. Dafür wurde der Vogelschutz am Pfeiler 40 entfernt, sodass ebenfalls eine Inspektion der außen liegenden Bauteile, d. h. Sensorkabel, Switch Box, Schaltkasten und Wegsensor WA 40/3, durchgeführt wurde.

- Kabel der Drucksensoren von Lager 40/1 und 40/3
Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.
- Switch Box am Lager 40/1 und 40/3
Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln und Steckern bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.
- Schaltschrank des Messverstärkers
Die visuelle Überprüfung des Schaltschranks hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist auch deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.
Der Schaltschrank ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.
Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.
- Wegsensor WA 40/3
Die visuelle Überprüfung des Wegsensors hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist dessen Zustand als sehr gut bestätigt worden.
Der Wegsensor ist nicht übermäßig verschmutzt.
Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.
- Defekte Drucksensoren am Lager 40/1
Nach den Referenzfahrten wurde an einem Drucksensor des Lagers 40/1 am 22.04.2018 ein Schnellcheck durchgeführt, ob ein Spannungssignal mittels digitalem Multimeter am

Sensorkabel anliegt. Dieser Test führte zu keinem eindeutigen Ergebnis.

2.1.1.3.5 Wartung am 07.06.2018

Im Juni wurde eine Wartung der Kabel- und Steckverbindung der Drucksensoren durchgeführt mit dem Ziel, den Ausfall der Sensoren zu beheben.

Eine Hebebühne war zur Demontage des Vogelschutzes und zur Durchführung der Wartungsarbeiten erforderlich.

Die Sensoreingänge wurden am Messverstärker getauscht.

Die Kabelsteck-Verbindungen wurden in den Switch-Boxen gelöst und mit einem digitalen Multimeter wurde das Spannungssignal gemessen.

Es konnte kein Schaden an Sensorkabeln und Messverstärker festgestellt werden. Die Ursache für den Ausfall der Drucksensoren wurde nicht gefunden.

2.1.1.3.6 Inspektion am 04.07.2019

Am 04.07.2019 wurde eine visuelle Inspektion der gesamten Messtechnik durchgeführt und alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

- Kabel der Drucksensoren von Lager 40/1 und 40/3
Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.
- Switch Box am Lager 40/1 und 40/3
Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln und Steckern bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.
- Schaltschrank des Messverstärkers
Die visuelle Überprüfung des Schaltschranks hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen.
Der Schaltschrank ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.
Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Wegsensor WA 40/3

Die visuelle Überprüfung des Wegsensors hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnten deren Zustände als sehr gut bestätigt werden.

Der Wegsensor ist nicht übermäßig verschmutzt.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

2.1.1.3.7 Inspektion am 18.11.2020

Im Rahmen der Inspektion am 18.11.2020 wurde die gesamte Messtechnik visuell und manuell auf Schäden überprüft und zusätzlich alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

- Kabel der Drucksensoren von Lager 40/1 und 40/3

Die Anschlussleitungen sind in sehr gutem Zustand und haben keine Schäden oder starke Verschmutzung aufgewiesen.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Switch Box am Lager 40/1 und 40/3

Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln und Steckern bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.

- Schaltschrank des Messverstärkers

Die visuelle Überprüfung des Schaltschranks hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.

Der Schaltschrank ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Wegsensor WA 40/3

Die visuelle Überprüfung des Wegsensors hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.

Der Wegsensor ist nicht übermäßig verschmutzt.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

2.1.1.3.8 Inspektion am 15.09.2021

Im Rahmen der Inspektion am 15.09.2021 wurden die gesamte Messtechnik visuell und manuell auf Schäden überprüft und zusätzlich alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

- Kabel der Drucksensoren von Lager 40/1 und 40/3

Die Anschlussleitungen sind in sehr gutem Zustand und weisen keine Schäden oder starke Verschmutzung auf.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Switch Box am Lager 40/1 und 40/3

Es sind keine äußeren Beschädigungen an den Kabeln und Steckern bei einer visuellen Überprüfung festgestellt worden.

- Schaltschrank des Messverstärkers

Die visuelle Überprüfung des Schaltschranks hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.

Der Schaltschrank ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Die Schaltschrankheizung ist erfolgreich auf ihre ordnungsgemäße Funktion überprüft worden.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Wegsensor WA 40/3

Die visuelle Überprüfung des Wegsensors hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers ist auch deren Zustand als sehr gut bestätigt worden.

Der Wegsensor ist nicht übermäßig verschmutzt.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

2.1.1.3.9 Ausfall des Datenrecorders

Wie in Kapitel 2.1.1.2 beschrieben, besteht das System zur Datenerfassung aus einem Datenrekorder bzw. Embedded-PC sowie vier A/D-Wandlermodule bzw. Messverstärker.

Die Übertragung der Daten von den A/D Wandlern zum Datenrekorder kann entweder per Ethernet-Kabel über das lokale Netzwerk oder per Firewire-Kabel als kaskadierte Punkt-zu-Punkt-Verbindung erfolgen.

Da im Dauerbetrieb des Messsystems keine stabile Verbindung über Firewire erreicht werden konnte, wurde im Juni 2017 die Datenweitergabe mit Ethernet-Kabeln eingerichtet.

Nach mehreren Monaten der weitgehend problemlosen kontinuierlichen Datenaufzeichnung kam es im März 2019 wiederholt zu Engpässen in der Bandbreite der Netzwerkverbindung, welche eine Unterbrechung der Messung verursachte. Es wurde angenommen, dass die Ursache für die Engpässe die Videodatenübertragung über das interne Netzwerk der intelligenten Brücke war. Um diese Unterbrechungen der Messung zu unterbinden, wurde im April 2019 eine kaskadierte Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen A/D Wandlern und dem Datenrekorder mit FireWire-Kabeln eingerichtet.

Nach anfänglichem stabilem Betrieb entstanden ab Mitte Mai 2019 gelegentlich und ab Juni 2019 permanent Unterbrechungen der Firewire-Verbindung, die eine dauerhafte Datenaufzeichnung zunehmend verhinderte.

Nach intensiver Fehlersuche mit Unterstützung des Herstellers wurde Anfang August 2019 ein Hardwaredefekt an dem Datenrekorder für die wahrscheinlichste Ursache der Ausfälle angenommen. Der Datenrekorder wurde am 14.08.2019 ausgebaut und für die Reparatur zum Hersteller geschickt. Anfang November 2019 wurde der Datenrecorder mit Bestätigung, dass Reparaturen an einer fehlerhaften Lötstelle im Firewire-Modul des Datenrecorders durchgeführt wurden, zurückgeschickt.

Aufgrund eines ebenfalls vom Hersteller eigenmächtig durchgeführten Softwareupdates entstanden Kompatibilitätsprobleme mit dem bestehenden Programm zur Datenaufzeichnung, sodass das Messprogramm mit der neuen Softwareversion erst am 13.12.2019 Dezember wieder vollumfänglich in dauerhaften Betrieb genommen werden konnte.

Bei der Wiederinbetriebnahme wurde ein zusätzliches Überwachungsskript eingeführt, welches im Falle eines Speicherüberlaufes das System automatisch neu startet.

Im Februar 2020 war das gesamte Netzwerk der intelligenten Brücke durch Umstellungsarbeiten weitgehend nicht verfügbar. In diesem Zeitraum kam es durch Speicherüberläufe und fehlerhaften Systemupdates zum Stillstand der Aufzeichnung und Auswertung.

Das vermeintlich im November 2019 behobene Problem der schadhafte Firewire-Verbindung trat im Juni 2020 erneut auf. Wiederum schien die fehlerhafte elektrische Verbindung im Gerät durch die saisonbedingt höheren Umgebungstemperaturen ausgelöst worden zu sein. Das Gerät wurde vom Hersteller komplett getauscht, das Neugerät wurde am 21.8.2020 in Betrieb genommen.

Eine fehlerhafte Konfiguration im Windows-Betriebssystem des Neugerätes führte noch einmal zu einem Ausfall zwischen 4. und 17.11. 2020.

2.1.2 Datenerfassung und -speicherung

2.1.2.1 Aufbau der Datenerfassung

- Messdatenaufzeichnung

Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit einer kommerziellen Messtechnik-Software. Durch diese Software werden die Messverstärker verwaltet, die Daten aufgezeichnet und die Ausführung von Skripten gesteuert.

- Messung

Die Messwerte aller Sensoren des Lagers werden mit 50 Hz aufgezeichnet.

Eine Messung dauert jeweils 10 min. Anschließend werden die gespeicherten Sensorsignale automatisch weiterverarbeitet.

- Datensicherung

Die Daten werden als 7-Zip-Dateien abgelegt, da sich die Dateigröße auf diesem Weg von ca. 380 MB auf ca. 75 MB pro 10 Minuten reduzieren lässt.

- Ablauf der Datensicherung

1. Die Daten werden mit einer Messsoftware erfasst und nach Beendigung der zehnminüti-

gen Messung auf einer direkt am Datenrecorder angeschlossenen USB-Festplatte im bin-Format abgelegt. Zusätzlich wird noch eine TST-Datei mit allen relevanten Messungsinformationen, eine events-Datei mit Informationen über alle Messungen, die seit dem letzten Reset des Systems erfolgten, und alle 24 Stunden eine stat-Datei mit Min/Max/Mean-Werten, die bei jedem Durchlauf aktualisiert wird, abgelegt.

2. Bei Start einer neuen Messung wird automatisch eine Batch-Datei gestartet, die wiederum die Ausführung eines PowerShell Skripts auslöst. Dieses packt alle Dateien, die jünger als fünf Minuten sind, mithilfe des Programms 7-Zip und verschiebt sie auf die NAS in den Ordner \\NUERNBERG\Maurer. Im Anschluss werden alle 7-Zip-Dateien und alle Dateien, die älter als 25 Tage im Ordner F:\BW402_MMS_Messdaten gelöscht. War der Kopiervorgang nicht erfolgreich, bleiben die 7-Zip-Dateien so lange auf der USB-Festplatte liegen (maximal 25 Tage), bis dieser erfolgt ist.
 3. Von dem Ordner \\NUERNBERG\Maurer der NAS werden stündlich die Daten der letzten 24 Stunden auf eine weitere externe Festplatte in den Ordner \\NUERNBERG\usbshare1-2\Maurer kopiert. Diese Festplatte kann, wenn die Speicherkapazität erreicht ist, vor Ort getauscht werden und die Daten zur Auswertung mitgenommen werden.
- **Detailerläuterung PowerShell Skript**
 1. Überprüfung zu Anfang, ob noch ein vorheriges Skript läuft, da der Kopiervorgang über die Netzwerkverbindung im ungünstigen Fall zur NAS sehr lange dauern kann oder auch unterbrochen werden könnte.
 2. Suche aller Dateien, die jünger als 5 min sind (damit also alle 3 Messdatenfiles der letzten abgespeicherten Messung).
 3. Packen der gefundenen Dateien.
 4. Kopieren abhängig davon, ob das vorherige Skript bereits abgeschlossen ist, aller 7-Zip-Files auf die NAS (auch diejenigen die bereits vorhanden sind).
 5. Löschen abhängig davon, ob der Kopierbefehl einen Fehler verursacht hat, und ab-

hängig davon, ob das vorherige Skript bereits abgeschlossen ist, det 7-Zip-Files.

6. Löschen aller Dateien, die älter als 25 Tage sind.
7. Überprüfung des freien RAM des Messrechners. Droht ein Speicherüberlauf, wird der Messrechner automatisch neugestartet.

Packen und Kopieren werden in einem täglichen Logfile erfasst. Wenn beim Kopieren Verzögerungen auftreten und ein vorangegangenes Skript noch nicht abgeschlossen ist, sobald das Neue gestartet wird, wird ein gesondertes Logfile angelegt, das auch die Uhrzeit enthält, um später die Problematik auf den ersten Blick erkennen zu können.

- **Auswertung**

Die Auswerte-Software liest das jeweils neueste 7-Zip-File ein und verarbeitet es wie in Kapitel 5 beschrieben.

2.1.2.2 Fernüberwachung/Alert

Zur Überwachung des Systems sind verschiedene Elemente vorhanden.

- Zugang über eine SSH-Verbindung via NAS und Remotedesktop auf den Messrechner: Über diesen Zugang ist es möglich direkt auf die Oberfläche des Messsystems zuzugreifen und die Messung zu überwachen.
- TeamViewer Zugang: Dieser Zugang ist standardmäßig deaktiviert. Sobald das System jedoch durch einen Reset oder einen längeren Stromausfall neugestartet wird, wird auch der Teamviewer gestartet. Diese Option ermöglicht auch nach dem Ausfall des SSH-Servers der NAS den Zugriff.
- Fernüberwachungsmodul: Über dieses wird der gesamte Schaltschrank überwacht. Dieser gibt über eine Weboberfläche und per E-Mail Auskunft über Innen – und Außentemperatur, den Öffnungszustand der Schaltschranktür sowie das Bestehen der Internetverbindung durch den regelmäßigen Versand von Status-E-Mails. Des Weiteren ermöglicht das Gerät den Reset einzelner Module oder des vollständigen Schaltschranks aus der Ferne.

- E-Mail-Benachrichtigungen: In der Regel wird alle 24 Stunden eine E-Mail versendet, über die einerseits geprüft werden kann, ob die Messsoftware noch läuft, zum anderen wird eine Log-Datei angehängt, die die Vorgänge innerhalb der Messsoftware mit Datum dokumentiert.
- 24-stündliche Ausführung eines Skripts über den Taskplaner von Windows: Das Skript wird alle 24 Stunden automatisch von Windows ausgeführt und läuft damit unabhängig von der Messung. Dieses Skript überprüft den Speicherstatus der externen Festplatte des Messrechners und der Wechselfestplatte an der NAS. Diese Informationen werden dann per E-Mail an die Maurer Engineering versendet. Über die Abfrage der Speichersituation lassen sich sehr viele Informationen über das System gewinnen. So lässt sich feststellen, ob die Messung läuft, der Zip- und Kopiervorgang funktioniert, die NAS erreichbar ist und ob die Festplatten voll oder beschädigt sind. Die versandte Mail gibt abhängig vom Status des Messsystems eindeutige Signale. Beispielsweise wird dann die Priorität der Mail auf „hoch“ gesetzt.
- E-Mail-Benachrichtigung aus der Auswertesoftware: Wenn länger als eine Stunde kein neues Auswertergebnis vorliegt, wird eine Warnung per E-Mail gesendet.

2.1.2.3 Zeitsynchronisation

Zum Vergleich der Messwerte und zu einer Kopplung der Auswertung von Intelligenten Lagern und intelligenter Schwenktraversen-Dehnfuge mit dem System RTMS für Brückenkennwerte ist eine ausreichend genaue Zeitsynchronisation zwischen den unabhängigen Systemen erforderlich. Dafür wurden zusätzlich zu einer Synchronisierung der Zeiten der Messrechner mit der Zeit der NAS per NTPv4 zusätzliche Echtzeitkanäle für jeden Datenrecorder bzw. Messverstärker generiert und abgespeichert. Damit ist für jeden Messwert ein Echtzeitstempel vorhanden, der erlaubt, alle an der Intelligenten Brücke erfassten Werte der drei Systeme in Bezug zu setzen bzw. zu vergleichen.

Diese Erweiterung wurde im Messprotokoll per Fernzugriff am 05.04.2018 implementiert und bis zum 09.04.2018 getestet. Seit dem 09.04.2018 werden die synchronisierten Echtzeitkanäle neben den Messwerten gespeichert.

2.1.2.4 Erfasste Zeiträume

Neben den unvorhergesehenen Ausfällen aufgrund von unterschiedlichen Problemen, musste die Messung auch gelegentlich manuell (MaStopp) gestoppt werden, um Einstellungen und Optimierungen an der Messsoftware und/oder dem System vornehmen zu können. Die in Kapitel 2.1.1.3.9 erläuterten Ausfälle führten im Jahr 2019 zu erheblichem Datenverlust.

In den Tabellen 2 bis 5 werden die Zeiten sowie die Ursachen für Messausfälle gelistet.

Der Ausfall zwischen Mai und Juni 2021 wurde nicht erkannt, da gleichzeitig die Auswertung von Altdaten durchgeführt wurde und somit keine Meldung ausgelöst wurde. Die automatisierte Überwachung wurde daraufhin diesbezüglich angepasst.

2.1.2.5 Wartung und Instandsetzung

Die Wartung der Software findet in Form eines regelmäßigen Remotezugriffs auf den Messrechner ein bis mehrmals wöchentlich statt. Dabei wird geprüft, ob die Software und die Skripte ordnungsgemäß laufen, die Daten auf den Festplatten vollständig sind und ob die angezeigten Messsignale plausibel sind. Die Softwareeinstellungen sowie die Skripte werden regelmäßig an die neuesten Erkenntnisse angepasst und wenn erforderlich aktualisiert (siehe Tabelle 6).

Aufgrund des nicht beabsichtigten Software-Updates wurde ein aufwendiges Update des Messjobs im Dezember 2019 erforderlich (siehe Tabelle 6).

Datum	Ursache
12.04.2017	MaStopp
02.06.2017	SystemReset
06.06.2017	MaStopp
07.06.2017	SystemReset
07.06.2017	MaStopp
08.06.2017	MaStopp
16.06.2017	MaStopp
19.06.2017	MaStopp
20.06.2017	MaStopp
20.06.2017	MaStopp
06.07.2017	MaStopp
04.09.2017	MaStopp
28.09.-11.10.2017	Stromausfall
05.09.-10.10.2017	NAS-Ausfall
12.10.2017	MaStopp
16.10.2017	MaStopp
27.10.-02.11.2017	Softwareupdate
03.11.2017	MaStopp
06.11.2017	MaStopp
11.12.2017	MaStopp
12.12.2017	MaStopp
04.-08.01.2018	Systemausfall (ca. 105 h)
21.03.2018	MaStopp (ca. 20 min)
05.04.2018	MaStopp (ca. 5,5 h)
06.04.2018	MaStopp (ca. 3 h)
09.04.2018	MaStopp (ca. 2,5 h)
22.04.2018	MaStopp (ca. 0,5 h)
06.06.2018	Wartungsarbeiten (keine Messwerte am Lager für ca. 8 h)
11.06.201	MaStopp (50min)
15.-18.06.2018	Systemausfall (ca. 61,5 h)
22.-27.08.2018	Systemausfall (ca. 161,5 h)
10.-26.09.2018	Systemausfall (ca. 380 h)
22.-27.11.2018	Systemausfall (ca. 105 h)

Tab. 2: Zeiträume ohne Datenerfassung 2017-2018

Datum	Ursache
14.02.2019 (6:40h)	Initiale Konfiguration (6,66 h)
05.03.2019 (2d 8:26h)	Kein Speicherplatz auf der Festplatte vorhanden
22.03.2019 (04:17h 2d 17:55h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
25.03.2019 (1d 17:30h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
27.03.2019 (01:08h, 01:29h, 03:47h, 17:59h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
28.03.2019 (16:43h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
29.03.2019 (2d 15:23h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
01.04.2019 (14:10h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
02.04.2019 (14:54h)	Pufferüberlauf des Datenrecorders
03.04.2019 (01:33h)	Wartungsarbeiten
28.04.2019 (1d 08:10h)	Datenrecorder „eingefroren“
04.05.2019 (1d 15:46)	Verbindungsfehler Firewire
23.05.2019 (15:54h)	Verbindungsfehler Firewire
03.06.2019 (10d 03:39)	Stromausfall
14.06.2019 (1d 14:00h)	Verbindungsfehler Firewire
25.06.2019 (171d)	Ständige Verbindungsfehler Firewire
26.12.2019 4d	Systemneustart nicht ausgeführt

Tab. 3: Zeiträume ohne Datenerfassung 2019

Datum	Ursache
1.1.2020 13d	Fortsetzung von Ausfall ab 26.12.2019
29.1.2020 30d	Fehlgeschlagenes Update auf Auswerterechner, unerkant wegen Netzwerkausfall
20.4.2020 2d	Pufferüberlauf des Datenrecorders
28.5.2020 2d	Pufferüberlauf des Datenrecorders
20.6.2020 62d – intermittierend	Wiederauftreten der Firewire-Instabilität (Es liegen in diesem Zeitbereich sporadisch Messwerte vor)
4.11.2020 13d	Totalabsturz des Windows-Betriebssystems des Datenrecorders

Tab. 4: Zeiträume ohne Datenerfassung 2020

Datum	Ursache
27.5.-17.6.2021 (19d)	Totalabsturz des Windows-Betriebssystems des Datenrecorders
7.7.-12.7.2021 (5d)	Ursache unbekannt, Datenrecorder und Auswerte-PC vorübergehend nicht erreichbar bzw. aktiv

Tab. 5: Zeiträume ohne Datenerfassung 2021

Datum	Änderung im Messjob
08.06.2017	Messjob Update (Zippen und Kopieren)
20.06.2017	Kanalnamen geändert Rechneruhrzeit auf UTC geändert Automatische Filter aktiviert
05.04.2018	Echtzeitkanal aktiviert
14.2.2019	Auswerte-PC in Betrieb genommen
Dezember 2019	Messjob Update aufgrund von Softwareupdate
November 2020	Neues Aufsetzen des Datenrecorders

Tab. 6: Wartungs- und Instandsetzungen

2.2 Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge

In Achse 50 der Brücke ist eine Fuge des Typs DS 320 GO mit integrierter Messtechnik der Maurer SE eingebaut.

2.2.1 Monitoring System

2.2.1.1 Sensoren

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden folgende Abkürzungen verwendet.

B Beschleunigungssensoren

W Seilzugsensoren

K01-K24 Kraftsensoren

KMD Kraftmessdose

Im Folgenden werden die Einbaupositionen der Sensoren in der Fuge dargestellt (siehe Bild 8).

- Kraftsensor zur Auflastmessung (K)

In der Fuge sind 24 Kraftsensoren und Verstärker verbaut (siehe Bild 9 und Bild 10). Über die Verstärker wird ein zur Ladung proportionales ± 10 V Signal ausgegeben. Die Kraftsensoren werden alle 10 min mit Start der neuen Aufzeichnung über die Verstärker auf Null zurückgesetzt, um die Auswirkungen Driftens auf die Messdaten so gering wie möglich zu halten. Somit werden über die Kraftsensoren nur relative Kraftänderungen angezeigt.

- Kraftmessdose zur Referenzmessung (KMD)

In der Fuge ist als Referenz zu den Kraftmessringen und zur Überwachung der Federvorspan-

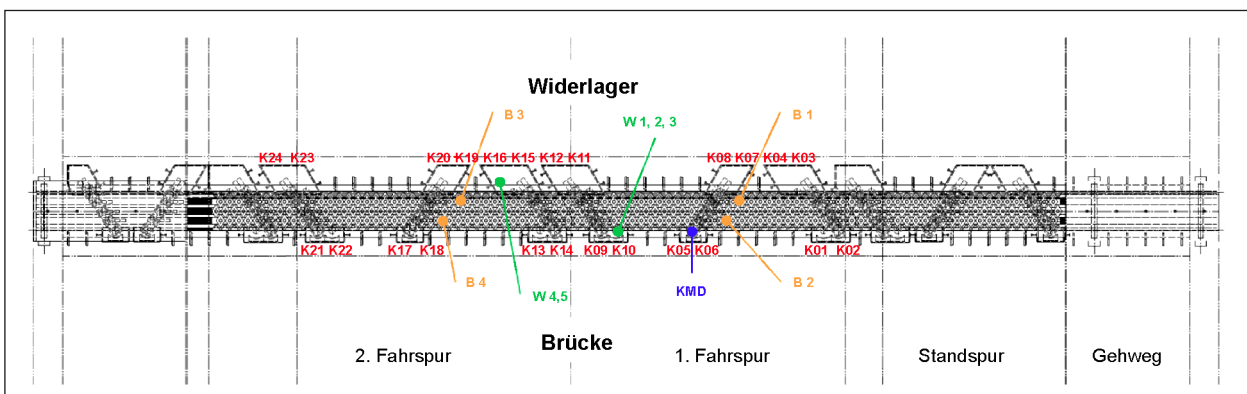


Bild 8: Position der Sensoren in der Fuge in der Draufsicht

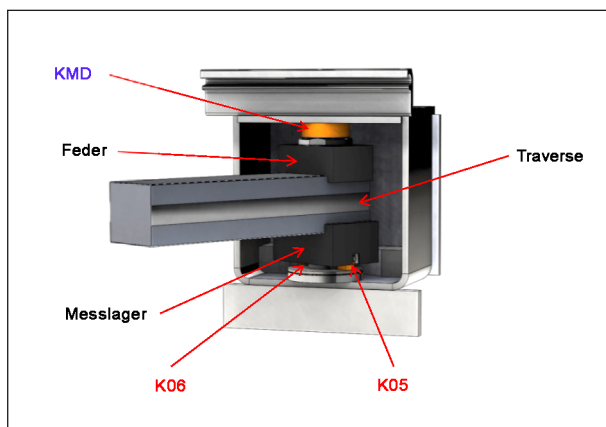


Bild 9: Darstellung des Messlagers und der KMD

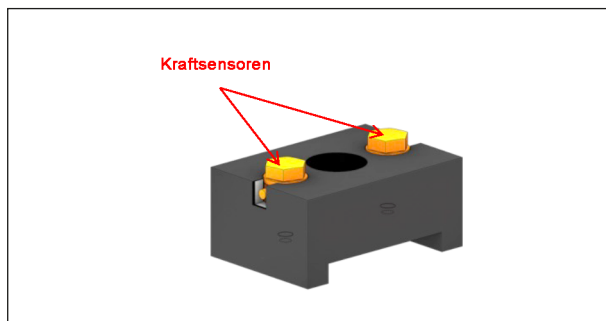


Bild 10: Darstellung und Aufbau des Messlagers

nung zwischen Randfeder und Randkasten eine Kraftmessdose verbaut (siehe Bild 9). Diese ba-sierte Kraftmessdose zeigt die absolute Kraft an, die im System wirkt.

- Seilzugsensoren zur Spaltnessung (W)

In der Fuge sind insgesamt 5 Seilzugsensoren verbaut (siehe Bild 11 und Bild 12). Über diese Sensoren werden der Gesamtfugenspalt und der Abstand zwischen erster und dritter Lamelle ermittelt.

- Beschleunigungssensoren zur Schwingungsmessung (B)

In der Fuge sind insgesamt 4 Beschleunigungssensoren installiert (siehe Bild 13). Montiert sind die Sensoren jeweils in Feldmitte der zwei Fahrspuren an der ersten und dritten Lamelle. Durch Auswertung der Signale lässt sich die Schwingfrequenz der Lamellen und der Zeitpunkt, an dem das Rad beim Überfahren auf die Lamelle trifft, feststellen. In Kombination mit den Informationen des Seilzugsensors kann so auch die Geschwindigkeit errechnet werden, mit der das Fahrzeug die Fuge überquert hat.

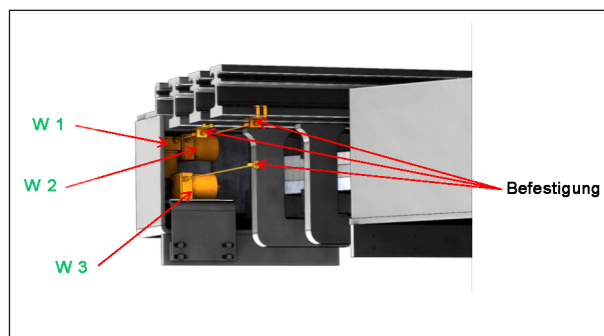


Bild 11: Darstellung der Seilzugsensoren W1-W3

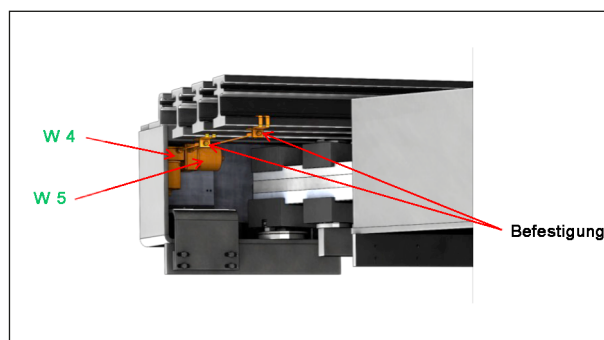


Bild 12: Darstellung der Seilzugsensoren W4-W5

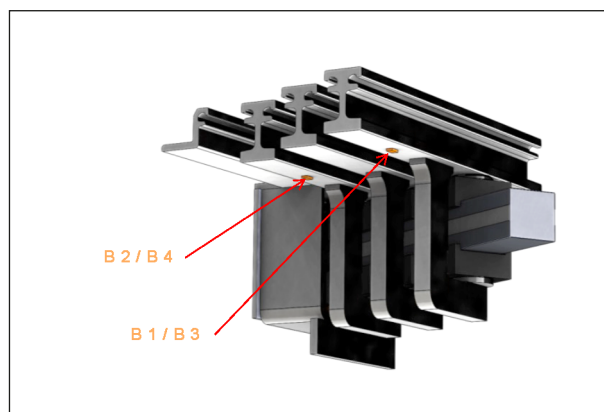


Bild 13: Darstellung der Beschleunigungssensoren B1-B4

2.2.1.2 Geräte zur Datenerfassung

Die durch die in der Fuge verbauten Sensoren generierten Signale, werden mittels Messverstärkern erfasst und im Weiteren durch einen Datenrecorder bzw. Embedded PC aufgezeichnet. Bei den Kraftsensoren sind wie oben beschrieben noch Verstärker zwischengeschaltet. Da die Lagerdaten über denselben Rechner aufgezeichnet werden wie die der Fuge, ist der unten dargestellte Schaltschrank auch derselbe wie beim Lager.

2.2.1.3 Wartung und Instandsetzung

2.2.1.3.1 Inspektion am 11.12.2017

Im Rahmen der Inspektion am 11.12.17, wurden die gesamte Messtechnik visuell und manuell auf Schäden überprüft und zusätzlich alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

- Schaltkasten der Fuge

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und der Stecker konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Um möglichem Datenverlust vorzubeugen, wurde die externe Festplatte am Messverstärker vorsorglich durch eine neue Festplatte ersetzt.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüsse erkennbar.

- Kraftsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Sensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden. Lediglich das äußere Schutzrohr musste vereinzelt wieder in Position geschoben werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüssen erkennbar.

- Kraftmessdose in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Kraftmessdose hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüssen erkennbar.

- Seilzugsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Seilzugsensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Es ist keine Verschmutzung der Seile erkennbar, welche die Funktion beeinträchtigen

würde. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüssen erkennbar.

- Beschleunigungssensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Beschleunigungssensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Kabelbefestigungen waren stellenweise gelöst, konnten aber wieder montiert werden. Im Rahmen des nächsten Besuchs der Brücke durch Mitarbeiter der Maurer Engineering müssen die Befestigungen durch neue ersetzt werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüssen erkennbar.

- Schaltkästen der Ladungsverstärker in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Schaltkästen hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Schaltkästen sind frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder anderen Einflüssen erkennbar.

2.2.1.3.2 Inspektion am 19.04.2018

Im Rahmen der Vorbereitung der Referenzfahrten wurde am 19.04.2018 eine visuelle Inspektion der gesamten Messtechnik durchgeführt und alle Sensorsignale am Messrechner auf Plausibilität geprüft.

- Schaltkasten der Fuge

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und der Stecker konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Kraftsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Sensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Kraftmessdose in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Kraftmessdose hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Seilzugsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Seilzugsensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Es ist keine Verschmutzung der Seile erkennbar, welche die Funktion beeinträchtigen würde. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Beschleunigungssensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Beschleunigungssensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Schaltkästen der Ladungsverstärker in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Schaltkästen hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Schaltkästen sind frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

2.2.1.3.3 Inspektion am 04.07.2019

Am 04.07.2019 eine visuelle Inspektion der gesamten Messtechnik durchgeführt.

- Schaltkasten der Fuge

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und der Stecker konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Kraftsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Sensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar. Einzelne Schutzschläuche sind verrutscht, sodass Kabel der Kraftsensoren sichtbar sind. Aufgrund der geringen Belastung und Einwirkung auf die Kabel sind vorerst keine Maßnahmen erforderlich.

- Kraftmessdose in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Kraftmessdose hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Seilzugsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Seilzugsensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Es ist keine Verschmutzung der Seile erkennbar, welche die Funktion beeinträchtigen würde. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Beschleunigungssensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Beschleunigungssensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Schaltkästen der Ladungsverstärker in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Schaltkästen hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Schaltkästen sind frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

2.2.1.3.4 Inspektion am 18.11.2020

Am 18.11.2020 wurde eine visuelle Inspektion der gesamten Messtechnik durchgeführt.

- Schaltkasten der Fuge (groß)

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und der Stecker konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder andere Einflüsse erkennbar.

Der Messrechner wurde vorübergehend entnommen, um eine Softwarewartung durchführen zu können.

- Schaltkasten der Fuge (klein)

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Der Zustand des Auswerterechners und der zugehörigen Anschlusskabel sind einwandfrei.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder andere Einflüsse erkennbar.

- Kraftsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Sensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden. Lediglich das äußere Schutzrohr musste einzeln wieder in Position geschoben werden. An einer Stelle wurde die Befestigung des Schutzrohres am Schalblech mit Klebeband wiederhergestellt.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Kraftmessdose in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Kraftmessdose hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Seilzugensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Seilzugensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Es ist keine Verschmutzung der Seile erkennbar, welche die Funktion beeinträchtigen würde. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Beschleunigungssensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Beschleunigungssensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Schaltkästen der Ladungsverstärker in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Schaltkästen hat keine äußeren Beschädigungen erkennen las-

sen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Schaltkästen sind frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

2.2.1.3.5 Inspektion am 15.09.2021

Am 15.09.2021 wurde eine visuelle Inspektion der gesamten Messtechnik durchgeführt.

- Schaltkasten der Fuge (groß)

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und der Stecker konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder andere Einflüsse erkennbar.

Die Lüfterfilter wurden ersetzt und der Lüfter erfolgreich auf Funktion überprüft.

- Schaltkasten der Fuge (klein)

Die visuelle Überprüfung des Schaltkastens hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Der Zustand des Auswerterechners und der zugehörigen Anschlusskabel sind einwandfrei.

Der Schaltkasten ist frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen durch Tiere oder andere Einflüsse erkennbar.

Die Lüfterfilter wurden ersetzt und der Lüfter erfolgreich auf Funktion überprüft.

- Kraftsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Sensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Lediglich das äußere Schutzrohr musste vereinzelt wieder in Position geschoben werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Kraftmessdose in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Kraftmessdose hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Seilzugsensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Seilzugsensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Es ist keine Verschmutzung der Seile erkennbar, welche die Funktion beeinträchtigen würde. Bei einer Prüfung des Sensorkabels und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Beschleunigungssensoren in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Beschleunigungssensoren hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Es sind somit keine die Funktion beeinträchtigenden Spuren von Beschädigungen erkennbar.

- Schaltkästen der Ladungsverstärker in der Fuge

Die visuelle Überprüfung der Schaltkästen hat keine äußeren Beschädigungen erkennen lassen. Bei einer Prüfung der Sensorkabel und des Steckers konnte auch deren Zustand als sehr gut bestätigt werden.

Die Schaltkästen sind frei von Verschmutzung und Feuchtigkeit.

Es sind somit keine Spuren von Beschädigungen erkennbar.

2.2.1.3.6 Ausfall des Datenrecorders

siehe Kapitel 2.1.1.3.9

2.2.2 Datenerfassung und -speicherung

2.2.2.1 Aufbau der Datenerfassung

- Messdatenaufzeichnung

Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit einer kommerziellen Messtechnik Software. Durch diese Software werden die Messverstärker verwaltet, die Daten aufgezeichnet, der Reset der Kraftsensoren und die Ausführung von Skripten gesteuert.

- Messung

Die Messwerte aller Sensoren der Fuge werden mit Ausnahme der fünf Wegsensoren mit einer Abtastrate von 2.500 Hz aufgezeichnet. Die Wegsensoren werden mit 50 Hz aufgezeichnet. Aufgrund der großen dynamischen Effekte und sehr kurzen Zeiträume beim Überfahren der Übergangskonstruktion sind 2.500 Hz erforderlich. Die Wahl der geringeren Abtastrate für die Wegsensoren liegt darin begründet, dass dort nur mehr oder weniger statische, bzw. sehr langsame Änderungen aufgenommen werden.

Eine Messung dauert jeweils 10 min, wobei zu Beginn jeder Messung ein automatischer Reset der Kraftsensoren durch die Verstärker erfolgt und zusätzlich ein externes Skript ausgelöst wird.

- Datensicherung

Die Daten werden im letzten Schritt als 7-Zip-Dateien abgelegt, da sich die Dateigröße auf diesem Weg von ca. 380 MB auf ca. 75 MB pro 10 min reduzieren lässt. Zum Öffnen dieses Dateiformats ist das Programm 7-Zip erforderlich.

- Ablauf der Datensicherung

1. Die Daten werden mit einer Messtechnik Software erfasst und nach Beendigung der zehnminütigen Messung auf einer direkt am Datenrecorder angeschlossenen USB-Festplatte im bin-Format abgelegt. Zusätzlich wird noch eine TST-Datei mit allen relevanten Messungsinformationen, eine events-Datei mit Informationen über alle Messungen, die seit dem letzten Reset des Systems erfolgten und alle 24 Stunden eine stat-Datei mit Min/Max/Mean-Werten, die bei jedem Durchlauf aktualisiert wird, abgelegt.

2. Bei Start einer neuen Messung wird automatisch eine Batch-Datei gestartet, die wiederum die Ausführung eines Powershellskripts auslöst, dass alle Dateien, die jünger als fünf Minuten sind, mithilfe des frei erhältlichen Packprogramms 7-Zip packt, dann auf die NAS in den Ordner \\NUERNBERG\Maurer verschiebt und im Anschluss alle 7-Zip-Dateien und alle Dateien, die älter als 25 Tage sind, im Ordner F:\BW402_MMS_Messdaten löscht. War der Kopiervorgang nicht erfolgreich, bleiben die 7-Zip-Dateien so lange auf der USB-Festplatte liegen (maximal 25 Tage), bis dieser erfolgt ist. Von dem Ordner \\NUERNBERG\Maurer der NAS werden stündlich die letzten 24 Stunden auf eine weitere externe Festplatte in den Ordner \\NUERNBERG\usbshare1-2\Maurer kopiert. Diese Festplatte kann dann, wenn die Grenze der Speicherkapazität erreicht ist, vor Ort getauscht werden und die Daten zur Auswertung mitgenommen werden.

- Detaillierterläuterung PowerShell Skript

1. Überprüfung zu Anfang, ob noch ein vorheriges Skript läuft, da der Kopiervorgang über die Netzwerkverbindung im ungünstigen Fall zur NAS sehr lange dauern kann oder auch unterbrochen werden könnte.
2. Suche aller Dateien, die jünger als 5 min sind (damit also alle 3 Messdatenfiles der letzten abgespeicherten Messung).
3. Packen der gefundenen Dateien.
4. Kopieren abhängig davon, ob das vorherige Skript bereits abgeschlossen ist, aller 7-Zip-Files auf die NAS (auch diejenigen die bereits vorhanden sind).
5. Löschen abhängig davon, ob der Kopierbefehl einen Fehler verursacht hat und abhängig davon, ob das vorherige Skript bereits abgeschlossen ist, der 7-Zip-Files.
6. Löschen aller Dateien, die älter als 25 Tage sind.
7. Überprüfung des freien RAM des Datenrecorders. Droht ein Speicherüberlauf, wird der Datenrecorder automatisch neugestartet.

Packen und Kopieren werden in einem täglichen Logfile erfasst. Wenn beim Kopieren Verzögerungen auftreten und ein vorangegangenes Skript noch nicht abgeschlossen ist, sobald das Neue gestartet wird, wird ein gesondertes Logfile angelegt, das auch die Uhrzeit enthält, um später die Problematik auf den ersten Blick erkennen zu können.

2.2.2.2 Fernüberwachung/Alert

Zur Überwachung des Systems sind verschiedene Elemente vorhanden.

1. Zugang über eine SSH-Verbindung via NAS und Remotedesktop auf den Messrechner: Über diesen Zugang ist es möglich, direkt auf die Oberfläche des Messsystems zuzugreifen und die Messung zu überwachen.
2. TeamViewer Zugang: Dieser Zugang ist standardmäßig deaktiviert. Sobald das System jedoch durch einen Reset oder einen längeren Stromausfall neugestartet wird, wird auch der Teamviewer gestartet. Diese Option ermöglicht auch nach dem Ausfall des SSH-Servers der NAS den Zugriff.
3. Fernüberwachungsmodul: Über das Fernüberwachungsmodul wird der gesamte Schaltschrank überwacht. Dieser gibt über eine Web-Oberfläche und per Mail Auskunft über Innen- und Außentemperatur, den Öffnungszustand der Schaltschranktür sowie das Bestehen der Internetverbindung durch den Regelmäßigen Versand von Status-E-Mails. Des Weiteren ermöglicht das Gerät den Reset einzelner Module oder des vollständigen Schaltschranks aus der Ferne.
4. E-Mail-Benachrichtigungen: In der Regel wird alle 24 Stunden eine E-Mail versandt, über die einerseits geprüft werden kann, ob die Messsoftware noch läuft, zum anderen wird eine Log-Datei angehängt, die die Vorgänge innerhalb von der Messsoftware mit Datum dokumentiert.
5. 24-stündliche Ausführung eines Skripts über den Taskplaner von Windows: Das Skript wird alle 24 Stunden automatisch von Windows ausgeführt und läuft damit unabhängig von der Messung. Dieses Skript überprüft den Speicherstatus der

externen Festplatte des Messrechners und der Wechselfestplatte an der NAS. Diese Informationen werden per E-Mail an die Maurer Engineering versandt. Über die Abfrage der Speichersituation lassen sich sehr viele Informationen über das System gewinnen. So lässt sich feststellen, ob die Messung läuft, der Zip- und Kopiervorgang funktioniert, die NAS erreichbar ist und ob die Festplatten voll oder beschädigt sind. Die versandte E-Mail gibt abhängig vom Status des Messsystems eindeutige Signale. Beispielsweise wird dann die Priorität der Mail auf „hoch“ gesetzt.

6. E-Mail-Benachrichtigung des Auswertesystems: Wenn länger als eine Stunde kein neues Auswertergebnis vorliegt, wird eine Warnung per E-Mail gesendet.

2.2.2.3 Zeitsynchronisation

Zum Vergleich der Messwerte und zu einer Kopplung der Auswertung von Intelligenten Lagern und intelligenter Schwenktraversen-Dehnfuge mit dem System RTMS für BrückenKennwerte ist eine ausreichend genaue Zeitsynchronisation zwischen den unabhängigen Systemen erforderlich. Dafür wurden zusätzlich zu einer Synchronisierung der Zeiten der Messrechner mit der Zeit der NAS per NTPv4 zusätzliche Echtzeitkanäle für jeden Datenrecorder bzw. Messverstärker generiert und abgespeichert. Damit ist für jeden Messwert ein Echtzeitstempel vorhanden, der erlaubt, alle an der Intelligenten Brücke erfassten Werte der drei Systeme in Bezug zu setzen bzw. zu vergleichen.

Diese Erweiterung wurde im Messprotokoll per Fernzugriff am 05.04.2018 implementiert und bis zum 09.04.2018 getestet. Seit dem 09.04.2018 werden die synchronisierten Echtzeitkanäle neben den Messwerten gespeichert.

2.2.2.4 Erfasste Zeiträume

siehe Kapitel 2.1.2.4

2.2.2.5 Wartung und Instandsetzung

Die Wartung der Software findet in Form eines regelmäßigen Remotezugriffs auf den Messrechner ein bis mehrmals wöchentlich statt. Dabei wird ge-

prüft, ob die Software und die Skripten ordnungsgemäß laufen, die Daten auf den Festplatten vollständig sind und ob die angezeigten Messsignale plausibel sind. Die Softwareeinstellungen sowie die Skripte werden regelmäßig an die neuesten Erkenntnisse angepasst und wenn erforderlich aktualisiert.

Aufgrund des nicht beabsichtigten Software Updates wurde ein aufwendiges Update des Messjobs im Dezember 2019 erforderlich.

Datum	Änderung im Messjob
08.06.2017	Messjob Update (Zippen und Kopieren)
05.06.- 16.06.2017	Abtastrate für Wegsensor auf 2.500 Hz gesetzt (Probe)
20.06.2017	Kanalnamen geändert Rechneruhrzeit auf UTC geändert Automatische Filter aktiviert
05.04.2018	Echtzeitkanal aktiviert
14.2.2019	Auswerte-PC in Betrieb genommen
Dezember 2019	Messjob update aufgrund von Software-update
November 2020	Neues Aufsetzen des Datenrecorders

2.3 RTMS für Brückenkenwerte

2.3.1 Monitoring System

2.3.1.1 Sensoren

Die installierten Sensoren konzentrieren sich im Überbau an 4 Messquerschnitten (A, B, C und D – siehe Bild 15), der Übergangskonstruktion (Messachse E – siehe Bild 15) und dem nördlichen Lager der Bauwerksachse A 40.

Zusätzlich zu dem mit RTMS bezeichneten System werden die externen Spannglieder mit Beschleunigungssensoren ausgestattet. Diese dienen der Ermittlung der Spannkraft über die Zeit (vgl. Bild 14).

Die Vorspannkraft kann indirekt anhand des Schwingverhaltens der externen Spannglieder abgeleitet und damit messtechnisch erfasst werden. Das Messkonzept sieht deshalb zur Überwachung der Vorspannkraft der externen Spannglieder 3 Beschleunigungssensoren (PBC) zentrisch montiert und in vertikaler Richtung messend vor. Ein weiterer Beschleunigungssensor (PBC) ist auf dem zugehörigen Umlenksattel (Nordseite) in Feld 4 der Brücke analog montiert und dient dazu, vom normalen Verkehr abweichende, dynamische Anregungen identifizieren und zuordnen zu können. Bild 14 zeigt die Positionen und Bezeichnungen der Beschleunigungssensoren (PBC) im Brückenlängsschnitt.

Am nördlichen/kurveninneren Kalottenlager von Achse 40 werden an allen 4 Punkten des Lagers induktive Wegaufnehmer (IWT) installiert. Drei dieser Sensoren (MS 27v, 28v und 29v) messen in vertikaler Richtung und ermöglichen die Ermittlung der räumlichen Überbauverdrehung und der Lagerkompression. Der vierte Sensor misst die relative Verschiebung des Überbaus an dieser Stelle in horizontaler Richtung entlang der Brückenlängsachse (MS 30h).

Die Abtastrate der Sensoren an der Fahrbahn-Übergangskonstruktion wurde mit 600 Hz gewählt und die der Sensoren im und am Überbau mit 75 Hz. Die zwei Temperatursensoren werden mit 1 Hz abgetastet und befinden sich in Messachse B.

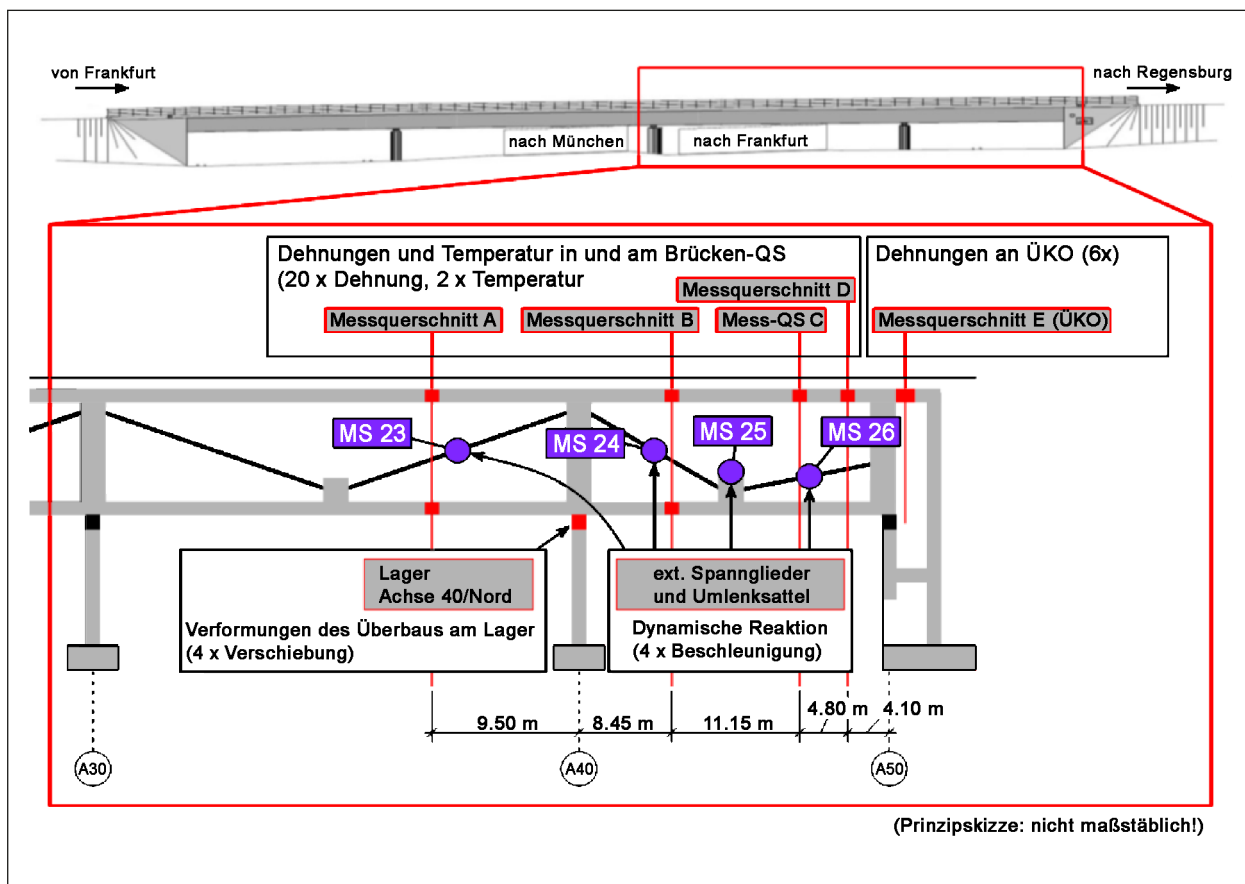


Bild 14: Lage der Sensoren am Bauwerk

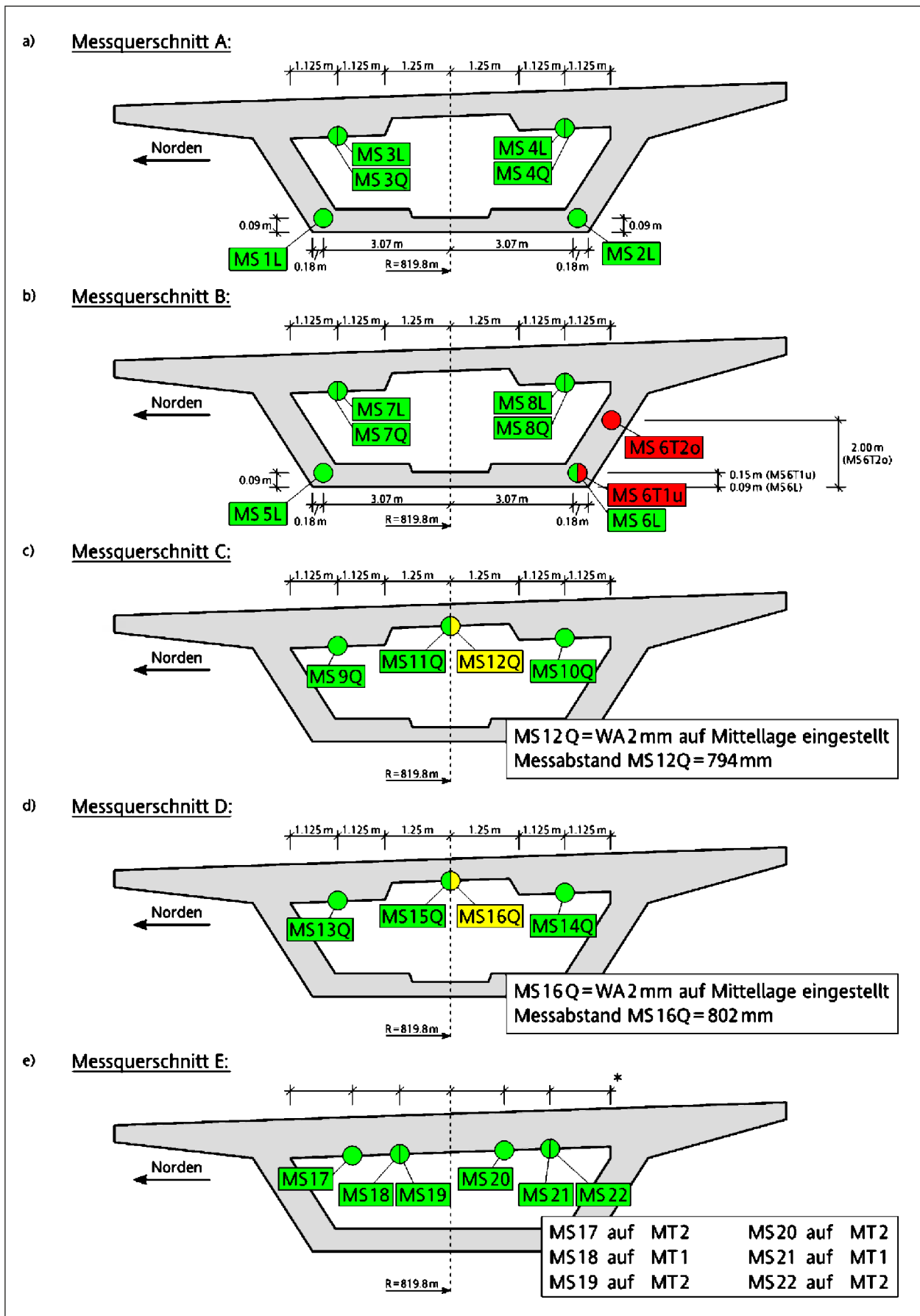


Bild 15: Lage und Bezeichnung der Messstellen

2.3.1.2 Geräte zur Datenerfassung

Die Signale der verschiedenartigen Sensoren (DMS – Dehnung, IWT – Verschiebung, PCB – Beschleunigung, Temperatur) sind in Längsrichtung der Brücke bis zu etwa 38 m weit auseinanderliegend im und am Brückenbauwerk installiert. Um die benötigten Kabellängen möglichst kurz und gleich lang zu halten, sind die Messverstärker (s.g. Quanten) an zwei Positionen im Überbau in Messschränken untergebracht. Die Messverstärker digitalisieren die Messsignale, welche dann mittels der zugehörigen, auf einen Standard-PC installierten Messsoftware CATMAN-EASY aufgezeichnet werden. Der Rechner ist zusammen mit drei Messverstärkern im Messschrank an Bauwerksachse 40 untergebracht. Die Anbindung der übrigen zwei Messverstärker im Messschrank an Bauwerksachse 50 erfolgt über Lichtwellenleiter.

2.3.1.3 Wartung und Instandsetzung/ Inspektionsberichte

Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik sind Gegenstand der Wartungsarbeiten.

Gleichzeitig werden alle Abdichtungen und Befestigungspunkte der Kabelführungen untersucht und gereinigt.

Nachfolgend werden die Arbeiten aufgeführt, die während einer turnusmäßigen Wartung durchgeführt werden.

Messquerschnitt A

Die im Messquerschnitt A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgt über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wird einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuch-

te auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgt auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 werden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messquerschnitt B

Die im Messquerschnitt B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgt über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wird einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgt auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 werden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messquerschnitt C

Die im Messquerschnitt C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgt über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wird mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgt auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 werden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messquerschnitt D

Die in Messquerschnitt D installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgt über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wird mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgt auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 werden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messquerschnitt E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeck-



Bild 16: Achse 40 Lager 40.1 Reinigung Vogelschutz von außen

mittels ABM 75 werden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit). Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt werden überprüft.

Lager Achse 40 Nord

Die am Lager 40.1 (Pfeiler 3) Achse 40 installierten induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v, MS30h werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Es ist notwendig, die Vogelschutzabdeckung für diese Arbeiten zu entfernen, um Sichtkontrollen und Reinigungen zu ermöglichen (siehe Bild 16 und Bild 17).

Beschleunigungssensoren

Die auf den Spannseilen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 werden gereinigt und die Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 18). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die mechanischen Halterungen jedes Sensors wurden auf festen Sitz kontrolliert.



Bild 17: Lager 40.1 Sichtkontrolle



Bild 18: Beschleunigungssensoren am Spannseil



Bild 20: Messachse 40 Messschrank



Bild 19: Messachse 50 Messschrank



Bild 21: Messachse 50 Schaltschrank NAS

Messschrank A50

Die Messverstärker im Messschrank (Achse 50 – siehe Bild 19 und Bild 21) werden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

Messschrank A40

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40 – siehe Bild 20) werden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger. Getestet und überprüft wird das Lüftungssystem.

Gesamtsystem

Im Rahmen der Wartung wird die Festplatte zur manuellen Datensicherung ausgetauscht. Das Gesamtsystem wird auf die Funktionsfähigkeit überprüft.

Zusammenfassung Wartungsarbeiten

Nachfolgend werden die durchgeführten turnusmäßigen Wartungsarbeiten seit Projektbeginn zusammengefasst. Die erste Wartung erfolgte dabei regulär nach rund einem Jahr Betrieb des Systems im Dezember 2017.

Am 30. Januar 2018 kam es zu einem Ausfall einer der drei vertikalen induktiven Wegaufnehmer am Lager Achse 40. Die Fehlercharakteristik im Messdatenverlauf wurde dabei von der automatischen Überwachung in der zu diesem Zeitpunkt laufenden Version nicht erkannt, sodass die Problematik erst bei einer „manuellen“ visuellen Sichtung des Messdatenverlaufes im Mai 2018 identifiziert wurde. Aufgrund der Redundanzen innerhalb des Messsystems wurde ein unmittelbarer Eingriff für nicht erforderlich gehalten und stattdessen die Kontrolle des Sensors im Rahmen einer vorgezogenen Wartung im September 2018 realisiert. Die automatische Datenüberwachung ist auf Grundlage der gewonnenen

nen Erfahrungen modifiziert und erweitert worden, um diese Fehlercharakteristik zuverlässig zu erkennen.

Nach einem Austausch des Sensors wurde ein Festsitzen durch Umweltverschmutzung festgestellt. Diesem Sachverhalt wurde im Weiteren durch eine regelmäßige Reinigung vorgebeugt. Es war kein weiterer Austausch notwendig.

Am 04.02.2019 kam es zu einem Festsitzen eines anderen vertikalen, induktiven Wegaufnehmers am Lager Achse 40. Durch die modifizierte automatisierte Datenüberwachung wurde diese Störung praktisch unmittelbar erkannt und eine entsprechende Warnmeldung per E-Mail versendet. Die Reinigung des Sensors erfolgte am 12.02.2019 in Verbindung mit ohnehin geplanten Arbeiten am Bauwerk.

2.3.1.3.1 Wartung 1 – 11.12.2017

2.3.1.3.1.1 Zusammenfassung

Die nachfolgenden Ausführungen dokumentieren die durchgeführte Wartung und sind aus dem übergebenen Wartungsbericht vom 15.12.2017 übernommen.

Am 11.12.2017 wurden Kontroll- und Wartungsarbeiten am Brückenbauwerk BW402e (Kreuz Nürnberg) von Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik waren Gegenstand der Wartungsarbeiten. Gleichzeitig wurden alle Abdichtungen und Befestigungspunkte der Kabelführungen untersucht und gereinigt.

Die Wartungsarbeiten hatten keine Auswirkungen auf die laufenden, unterbrechungsfreien Messabläufe. Nach durchgeführter Wartung liefen alle Systeme einwandfrei.

2.3.1.3.1.2 Wartungsabläufe

Messachse A

Die über Messachse A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den

Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse B

Die über Messachse B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse C

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wur-

de mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse D

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit). Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt wurden überprüft.

Achse 40 Lager

Die am Lager 40.1 über Achse 40 installierten induktiven Sensoren MS28v, MS29v, MS30h wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Vogelschutzabdeckung wurde äußerlich vom Schmutz befreit, um eine Sichtkontrolle zu ermöglichen. Es kann eingeschätzt werden, dass die induktiven Sensoren ihre Basisposition behalten haben und die Lagerverformungen zuverlässig messen.

Beschleunigungssensoren an Spannseilen

Die auf den Spannseilen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die mechanischen Halterungen jedes einzelnen Sensors wurden auf festen Sitz kontrolliert.

Messachse 50 am Messschrank

Die Messverstärker im Messschrank (Achse 50) wurden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

Messachse 40 am Messschrank

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Software und Datenmanagement funktionierten einwandfrei. Das Lüftungssystem wurde auf winterbetrieb eingestellt.

Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

2.3.1.3.1.3 Funktionskontrolle Gesamtsystem

Die Datenerfassung wurde während der Wartungsarbeiten nicht unterbrochen.

2.3.1.3.2 Wartung 2 – 17.09.2018

2.3.1.3.2.1 Zusammenfassung

Die nachfolgenden Ausführungen dokumentieren die durchgeführte Wartung und sind aus dem übergebenen Wartungsbericht vom 25.09.2018 übernommen.

Am 17.09.2018 wurden Kontroll- und Wartungsarbeiten am Brückenbauwerk BW402e (Kreuz Nürnberg) von Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik waren Gegenstand der Wartungsarbeiten. In diesem Zusammenhang erfolgte die Überprüfung eines Lagersensors, der im zurückliegenden Prüfzeitraum fehlerhafte Werte lieferte. Alle Abdichtungen und Befestigungspunkte der Kabelführungen wurden untersucht und gereinigt.

Während den Wartungsarbeiten wurde die laufende Messung kurzzeitig gestoppt. Nach durchgeführter Wartung/Reparatur liefen alle Systeme einwandfrei.

2.3.1.3.2.2 Wartungsabläufe

Messachse A

Die über Messachse A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse B

Die über Messachse B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den

Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse C

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse D

Die über Messachse D installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfas-

sung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit). Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt wurden überprüft.

Achse 40 Lager 40.1

Die am Lager 40.1 (Pfeiler 3) Achse 40 installierten induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v, MS30h wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Es war notwendig, die Vogelschutzabdeckung für diese Arbeiten im Bereich MS29v und MS30h zu entfernen, um Sichtkontrollen, Reinigungen und notwendige Reparaturen zu ermöglichen (siehe Bild 22).

Der induktive Wegsensor MS29v wurde auf Funktionsfähigkeit überprüft und ein mechanischer Defekt festgestellt (siehe Bild 23). Reparaturversuche vor Ort blieben ohne Erfolg. Aus diesem Grund wurde der Sensor MS29v abgebaut und durch einen Sensor gleicher Bauart ersetzt. Die fachgerechte Montage des Austauschensors beinhaltete die Kabeltrennung, Lötarbeiten und die Herstellung eines Feuchtigkeitsschutzes an der Verbindungsstelle (Schrumpfschlauch). Der Sensor wurde mechanisch neu positioniert, die Sensorkenndaten in die Sensordatenbank der Messsoftware catman® programmiert und ein elektrischer Nullabgleich durchgeführt.



Bild 22: Achse 40 Lager 40.1 Demontage Vogelschutz



Bild 23: Lager 40.1 Bereich Wartung/Reparatur

Der induktive Sensor MS30h wurde um 5 mm (horizontale Messrichtung) ausgefahren, damit der Messbereich für die jahrzeitlichen Verschiebungen infolge Temperaturveränderungen optimal ausgeschöpft wird.

Nach der Reinigung aller Lagersensoren erfolgte die Montage der gereinigten Vogelschutzabdeckung, dabei wurden fehlende Schrauben ersetzt.

Es kann eingeschätzt werden, dass die induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v und MS30h die Lagerverformungen wieder zuverlässig messen.

Beschleunigungssensoren an Spannsen

Die auf den Spannsen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 wurden gereinigt und die Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 24). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die mechanischen Halterungen jedes Sensors wurden auf festen Sitz kontrolliert.



Bild 24: Beschleunigungssensor auf Spannseil

Messachse 50 Messschrank

Die Messverstärker im Messschrank (Achse 50) wurden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

Messachse 40 Messschrank

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Software und Datenmanagement funktionierten einwandfrei. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger. Getestet und überprüft wurde der Einfluss des Lüftungssystems auf die laufende Messung. In Absprache mit Frau Prof. Freundt wurde das Lüftungssystem ausgeschaltet. Weitere Tests im Labor sind geplant. Über den Austausch des bestehenden Lüftungssystems wird nachgedacht.

Messung der Betonüberdeckungen

In der unmittelbaren Nähe der Messstellen MS3L/MS3Q und MS7L/MS7Q wurde die Betonüberdeckung mithilfe eines Bewehrungssuchgerätes HILTI Ferrosan FS10 gemessen. In diesen Bereichen unterscheiden sich die Überdeckungen um 9 mm.

2.3.1.3.2.3 Funktionskontrolle Gesamtsystem

Die Datenerfassung wurde während der Wartungsarbeiten kurzzeitig unterbrochen.

Für Messstellen MS27v, MS28v und MS29v erfolgte ein elektrischer Nullabgleich.

Die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems wiesen die Kollegen der VTE am 17.09.2018 im Beisein

von Frau Prof. Dr. U. Freundt, Herrn Dr. Böning und Herrn Leipold nach und verschlossen anschließend die Messschränke. Der Sensoraustausch am 17.09.2019 wurde in der Dokumentation „Digitales Testfeld Autobahn-Intelligente Brücke BW 402e“ vom 08.07.2016 vermerkt und das aktuelle Prüfprotokoll hinzugefügt.

2.3.1.3.3 Wartung 3 – 21.11.2019

2.3.1.3.3.1 Zusammenfassung

Die nachfolgenden Ausführungen dokumentieren die durchgeführte Wartung und sind aus dem übergebenen Wartungsbericht vom 09.12.2019 übernommen.

Am 21.11.2019 wurden Kontroll- und Wartungsarbeiten am Brückenbauwerk BW402e (Kreuz Nürnberg) von Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik waren Gegenstand der Wartungsarbeiten. Alle Abdichtungen und Befestigungspunkte der Kabelführungen wurden untersucht und gereinigt. Weiterhin wurden die Lagersensoren gründlich gereinigt und die einseitig offene Vogelschutzabdeckung wieder montiert.

Für die Durchführung der Wartung, insbesondere der Reinigung der Lagersensoren, wurde die laufende Messung über den Fernzugriff kontrolliert gestoppt und nach rund 5 Stunden ebenfalls über den Fernzugriff wieder gestartet.

Nach durchgeführter Wartung liefen alle Systeme einwandfrei.

Während den Wartungsarbeiten wurden umfangreiche Standortfotos erstellt, um die zukünftig zwingend notwendige Beantragung einer verkehrsrechtlichen Sperrung für Anfahrt und Abfahrt der Hebebühne und des Wartungsfahrzeugs zu erleichtern.

2.3.1.3.3.2 Wartungsabläufe

Messachse A

Die über Messachse A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den

Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse B

Die über Messachse B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse C

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstellen im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsen-

sensor wurde mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse D

Die über Messachse D installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde mit einem feinen Pinsel gereinigt und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Reinigung der Abdeckungen erfolgte auf der Oberseite mit einem feinen Pinsel. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit). Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt wurden überprüft.

Achse 40 Lager 40.1

Die am Lager 40.1 (Pfeiler 3) Achse 40 installierten, induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v, MS30h wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft und gereinigt (siehe Bild 25). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Es war notwendig, die Vogelschutzabdeckung für diese Arbeiten im Bereich MS29v und MS30h zu entfernen, um Sichtkontrollen und Reinigungen zu ermöglichen. Nach der Reinigung aller Lagersensoren erfolgte die Montage der gereinigten Vogelschutzabdeckung, dabei wurden Nietverbindungen erneuert und fehlende Schrauben ersetzt (siehe Bild 26).

Beschleunigungssensoren an Spannseilen

Die auf den Spannseilen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 wurden gereinigt und die Funktionsfähigkeit überprüft. Die



Bild 25: Achse 40 Lager 40.1 – Wartung Sensoren



Bild 26: Achse 40 – Vogelschutz nach Reparatur

Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die mechanischen Halterungen jedes Sensors wurden auf festen Sitz kontrolliert.

Messachse 50 Messschrank

Die Messverstärker im Messschrank (Achse 50) wurden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

Messachse 50 NAS-Schrank

Es erfolgte der Austausch der externen USB-Festplatte am NAS zum Datentransport.

Messachse 40 Messschrank

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Software und Datenmanagement funktionierten einwandfrei. Die Reinigung der Hardware erfolgte mit einem Akku-Staubsauger.

2.3.1.3.3 Funktionskontrolle Gesamtsystem

Nach dem Abschluss der Wartungsarbeiten wurde die Messung über den Fernzugriff neu gestartet. Das Gesamtsystem lief damit nach Abschluss der Arbeiten planmäßig.

2.3.1.3.4 Wartung 4 – 10.11.2020

2.3.1.3.4.1 Zusammenfassung

Am 10.11.2019 wurden Kontroll- und Wartungsarbeiten am Brückenbauwerk BW402e (Kreuz Nürnberg) von Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik waren Gegenstand der Wartungsarbeiten. Alle Abdichtungen, Befestigungspunkte, Anschlusskabel und die Lagersensoren wurden einer Sichtkontrolle unterzogen. Es wurde festgestellt, dass die Vogelschutzabdeckung an einer Stelle nicht geschlossen war.

Die Wartungsarbeiten hatten keinen Einfluss auf die laufenden Messabläufe. Nach durchgeführter Wartung/Reparatur liefen alle Systeme einwandfrei.

2.3.1.3.4.2 Wartungsabläufe

Messachse A

Die über Messachse A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse B

Die über Messachse B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse C

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (in-

duktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde einer Sichtkontrolle unterzogen und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse D

Die über Messachse D installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde einer Sichtkontrolle unterzogen und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen



Bild 27: ÜK nach Wartungsarbeiten

(Gewährleistung der Dichtigkeit – siehe Bild 27). Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt wurden überprüft.

Achse 40 Lager 40.1

Die am Lager 40.1 (Pfeiler 3) Achse 40 installierten, induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v, MS30h wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker.

Es konnte nur eine eingeschränkte Sichtkontrolle durchgeführt werden, da keine Hebebühne zur Verfügung stand.

Die Vogelschutzabdeckung war an einer Stelle einseitig von den Befestigungswinkeln abgerissen (siehe Bild 28). Eine Reparatur konnte nicht erfolgen. Die einseitig geöffnete Vogelschutzabdeckung könnte die Korrosion der Taststifte an den Wegsensoren beschleunigen und im ungünstigsten Fall bei verstärkten Streueinsätzen im Winter, verbunden mit Wind und hoher Luftfeuchtigkeit, zu Ausfällen führen.



Bild 28: Achse 40 Lager 40.1 Vogelschutz einseitig abgerissen



Bild 29: Beschleunigungssensor

Beschleunigungssensoren an Spannseilen

Die auf den Spannseilen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen und die Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 29). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Befestigung jedes Sensors wurde auf festen Sitz kontrolliert.

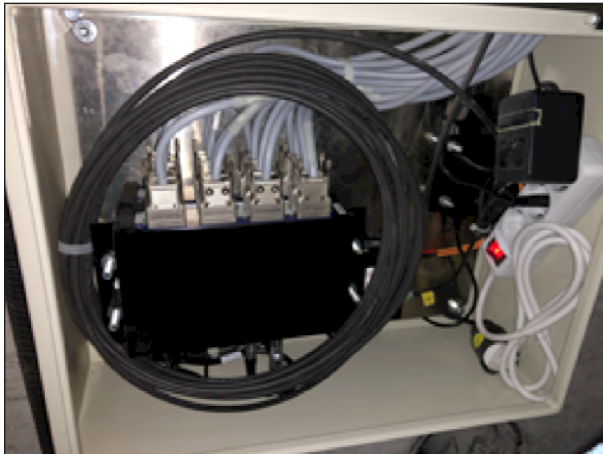


Bild 30: Messachse 50 Messschrank



Bild 31: Messachse 50 Messschrank NAS

Messachse 50 Messschrank und Messschrank NAS mit ext. Datenspeicher

Die Messverstärker im Messschrank Achse 50 (siehe Bild 30) wurden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft. Letzteres wurde auch im Messschrank NAS (siehe Bild 31) durchgeführt.

Messachse 40 Messschrank

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft (Bild 32). Software und Datenmanagement funktionierten einwandfrei.



Bild 32: Messachse 40 Messschrank

2.3.1.3.4.3 Funktionskontrolle Gesamtsystem

Die Datenerfassung wurde während der Wartungsarbeiten kurzzeitig unterbrochen und die Festplatte EXT.2 durch die Festplatte EXT.1 ersetzt.

2.3.1.3.1 Wartung 5 – 06.05.2021

2.3.1.3.1.1 Zusammenfassung

Am 06.05.2021 wurden Kontroll-, Reparatur-, und Wartungsarbeiten am Brückenbauwerk BW402e (Kreuz Nürnberg) von Kollegen der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Überprüfung der Funktionsfähigkeit von Hard- und Software sowie die Kontrolle der eingebauten Sensorik waren Gegenstand der Wartungsarbeiten. Alle Abdichtungen, Befestigungspunkte, Anschlusskabel wurden einer Sichtkontrolle unterzogen, davon vier Sensoren zur Erfassung der Lagerbewegungen zusätzlich umfassend gereinigt.

Die Wartungsarbeiten hatten keinen Einfluss auf die laufenden Messabläufe. Nach durchgeführter Wartung/Reparatur liefen alle Systeme einwandfrei.

2.3.1.3.1.2 Wartungsabläufe

Messachse A

Die über Messachse A installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle 1L und 2L (Messstellen Beton innen) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne äußere mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS3L, MS3Q, MS4L, MS4Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse B

Die über Messachse B installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und Temperatursensoren wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Kabel von Messstelle MS6T1u und MS6T2o (Temperatursensoren im Beton) wurden bei der Installation von innen in den Hohlkasten geführt. Die Übergangsstelle (Kabelaustritt aus dem Beton) wurde einer Sichtprüfung unterzogen. Ein mögliches Abscheren der Kabel kann ohne mechanische Einwirkung ausgeschlossen werden.

Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS5L, MS6L, MS7L, MS7Q, MS8L, MS8Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse C

Die über Messachse C installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (in-

duktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS12Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde einer Sichtkontrolle unterzogen und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS9Q, MS10Q, MS11Q, MS12Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse D

Die über Messachse D installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungssensor (induktiver Sensor) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS16Q besteht aus einem induktiven Wegsensor, der über eine Messbasisverlängerung angetastet wird. Der induktive Wegsensor wurde einer Sichtkontrolle unterzogen und das mechanische System auf Funktionsfähigkeit überprüft. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längs- und Querdehnungen MS13Q, MS14Q, MS15Q wurden bei der Installation mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

Messachse E – Übergangskonstruktion

Die über Messachse E (Übergangskonstruktion) installierten Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 33). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstellen (Dehnungsmessstreifen) zur Erfassung der Längsdehnungen auf der Unterseite der Übergangskonstruktion MS17, MS18, MS19, MS20 sind mit Abdeckmittel ABM 75 versehen. Diese Abdeckungen verhindern den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf den DMS-Sensor. Die Abdeckkanten des Abdeckmittels ABM 75 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen (Gewährleistung der Dichtigkeit).

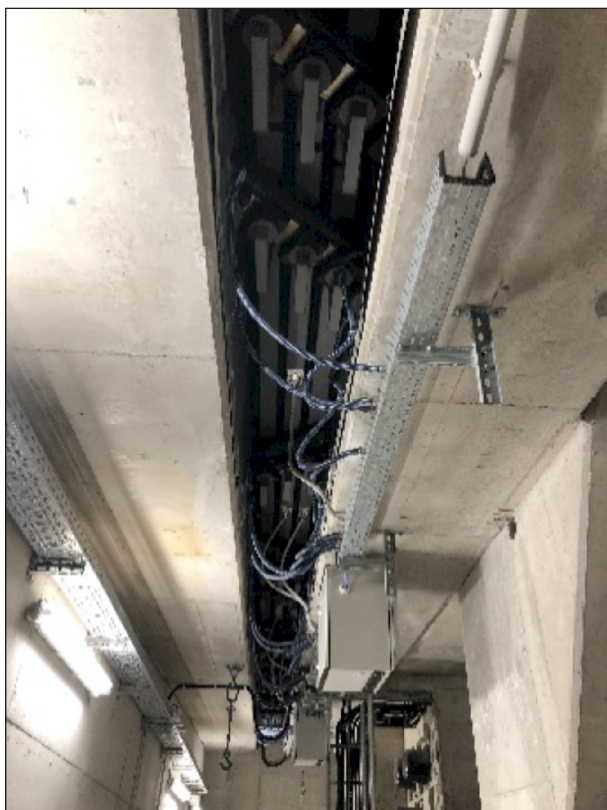


Bild 33: FÜK nach Wartungsarbeiten

Die Kabelbefestigungen von den Sensoren bis zum jeweiligen ersten Halterungspunkt wurden überprüft.

Achse 40 Lager 40.1

Die am Lager 40.1 (Pfeiler 3) Achse 40 installierten induktiven Sensoren MS27v, MS28v, MS29v, MS30h wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 35 bis Bild 38). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Messstelle MS29v wurde repariert, d. h. die Bewegungsfreiheit des Taststiftes wiederhergestellt. Im Anschluss erfolgte die Reinigung der Sensoren MS27v, MS28v und MS30h.

Die Vogelschutzabdeckung wurde nach den Wartungsarbeiten wieder umlaufend montiert (siehe Bild 34).



Bild 34: Achse 40 Lager 40.1 Durchführung der Wartungsarbeiten



Bild 35: Wartungsarbeiten an MS27v



Bild 36: Wartungsarbeiten an MS28v



Bild 38: Wartungsarbeiten an MS 30h



Bild 39: Beschleunigungssensoren



Bild 37: Wartungsarbeiten an MS29v

Beschleunigungssensoren an Spannseilen

Die auf den Spannseilen angeordneten Beschleunigungssensoren MS23, MS24, MS25, MS26 wurden einer Sichtkontrolle unterzogen und die Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 39). Die Überprüfung erfolgte über die Zuordnung jeder einzelnen Messstelle im Messverstärker. Die Befestigung jedes Sensors wurde auf festen Sitz kontrolliert.

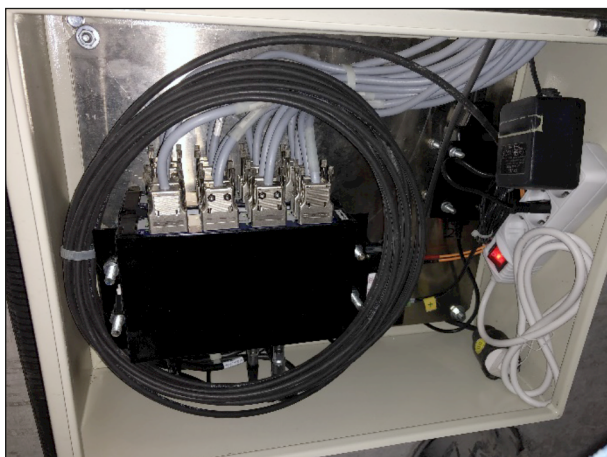


Bild 40: Messschrank



Bild 41: Messschrank NAS

Messachse 50 Messschrank und Messschrank NAS mit ext. Datenspeicher

Die Messverstärker im Messschrank (Achse 50) wurden auf Funktionsfähigkeit; Kabelführungen auf festen Sitz überprüft (siehe Bild 40). Letzteres wurde auch im Messschrank NAS durchgeführt (siehe Bild 41).

Messachse 40 Messschrank

Die Messverstärker und der Messrechner im Messschrank (Achse 40) wurden auf Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 42). Software und Datenmanagement funktionierten einwandfrei.



Bild 42: Messschrank

2.3.1.3.1.3 Funktionskontrolle Gesamtsystem

Die Datenerfassung wurde während der Wartungsarbeiten kurzzeitig unterbrochen und die Festplatte EXT.1 durch die Festplatte EXT.2 ersetzt.

2.3.2 Datenerfassung und -speicherung

2.3.2.1 Aufbau der Datenerfassung

Die Datenerfassung und die Konfiguration des Messsystems wird mit der Messsoftware CATMAN-EASY vorgenommen, die auf einem in der Brücke befindlichen Standard-PC installiert ist. Mittels CATMAN-EASY wird die Abtastrate der Sensoren und auch die Art der Messdatenspeicherung vorgegeben. In der gegenwärtigen Konfiguration werden die permanent auflaufenden Messdaten stündlich in separaten Diadem-Dateien auf dem Messrechner gespeichert. Diadem-Dateien bestehen aus einem Set von vier Dateien, die neben einer Datei mit den

reinen Messwerten aller Sensoren (*.R32, 8-Byte Gleitkommadarstellung) aus weiteren drei Dateien mit Informationen zur Messung (*.DAT, Headerdatei mit Informationen zu den Sensoren/Datenkanälen; *.events; *.TSX) bestehen. Dieses Speicherschema führt zu einem relativ geringen Speicherplatzbedarf. Die zeitliche Zuordnung der Messungen anhand der mit den Diadem-Dateien gespeicherten Informationen ist sekundengenau möglich.

Die Signalauflösung, sprich die jeweilige Abtastrate bzw. Messfrequenz der Sensoren, wird ebenfalls mit CATMAN-EASY konfiguriert und ist auf die zu messende physikalische Größe und auf das dem entsprechend dem Messkonzept vorgesehene Auswerteziel abgestimmt. Die Änderung der Temperatur des Brückenüberbaus ist eine sich vergleichsweise langsam ändernde Messgröße und wird dem entsprechend mit einer relativ geringen Abtastrate von 1 Hz hinreichend genau erfasst. Demgegenüber beträgt die Abtastrate der an der Übergangskonstruktion angebrachten Dehnmessstreifen 600 Hz. Hiermit ist gewährleistet, dass die Einzelachsen der darüber hinwegfahrenden Fahrzeuge hinreichend genau im Signal abgebildet sind, um damit z. B. auch deren Abstand ermitteln zu können. Diese relativ hohe Messfrequenz ergibt sich aus der erwarteten maximalen Überfahrgeschwindigkeit und den minimalen zu unterscheidenden Achsabständen. Ebenfalls mit 600 Hz werden die Beschleunigungen in der Mitte der externen Spannglieder abgetastet. Vorgesehen ist es, die so erhaltenen Daten hinsichtlich des Frequenzgehaltes der Spanngliedschwingungen auszuwerten. Mit dieser Abtastrate ist es möglich, Bauwerksschwingungen bis zu 300 Hz zu erfassen. Relativ hochfrequente Bauwerksschwingungen können beispielsweise im regellosen Verkehr infolge von Überfahrten über die Fahrbahnübergangskonstruktion (ÜKO) induziert werden. Die übrigen Sensoren werden alle mit einer Frequenz von 75 Hz abgetastet. Dieser Wert ist ausreichend, da die Daten dieser Messstellen einerseits in ihrem zeitlichen Signalversatz ausgewertet werden. Dieser Versatz ist aufgrund der räumlichen Distanz der Messstellen in Fahrtrichtung zueinander (Messquerschnitte A-D) vergleichsweise groß und erlaubt somit die reduzierte Abtastrate. Andererseits erfassen diese Sensoren generell das Bauwerkverhalten im räumlichen Sinne weitreichender, was ebenfalls die reduzierte Abtastrate rechtfertigt.

In Summe werden Messdaten von 36 Sensoren permanent erhoben und gespeichert. Die Begren-

zung der Abtastrate auf ein notwendiges Minimum ist wichtig, um die im Projektzeitraum auflaufenden Datenmengen mit sinnvollem Aufwand beherrschen zu können. Die genannte Konfiguration des RTMS Messsystems führt dazu, dass etwa 21 GB je Woche an Messdaten generiert werden. Bleibt die aktuelle Systemkonfiguration unverändert, wird sich die Datenmenge zum Projektende auf etwas mehr als 5 TB summieren. Durch Datenkompression können die rohen Messdaten auf etwa 45 % der ursprünglichen Größe reduziert werden.

Mit dem Ziel der Sicherung der Messdaten werden alle auf dem Messrechner gespeicherten Diadem-Dateien auf einem in der Brücke befindlichen Netzwerkspeicher (NAS) gesichert. Dort erfolgt die Datenspeicherung auf einem redundant ausgelegten Verbund von Festplatten. Zusätzlich werden die Messdaten auf eine an der NAS angeschlossene externe Festplatte kopiert. Diese werden in der Stufe 1 regelmäßig getauscht und zur Datenanalyse in der Brücke angeholt und zur Bearbeitung ins Büro verbracht.

Die abschließende Inbetriebnahme des Internetzuganges, umgesetzt durch die Autobahndirektion Nordbayern, fand am 26.01.2017 statt. Bis zu diesem Zeitpunkt waren keine Kontroll- oder Zugriffsmöglichkeiten auf das Messsystem von außen möglich. Mit dem Aufbau der Internetverbindung war neben der aktiven Zugriffsmöglichkeit auch eine automatische permanente Eigenüberwachung der auflaufenden Messdaten möglich. Eine vor Ort laufende eigenentwickelte Software analysiert dabei alle 6 Stunden die neuen Messdaten und erzeugt eine Kontrollmeldung per E-Mail. In der Kontrollmeldung werden Überschreitungen von definierten Grenzen für die Messwerte kommuniziert. Außerdem erfolgen entsprechende Warnmeldungen, wenn keine neuen Messdaten vorhanden sind (Messung steht). Daneben überprüft die Software, ob der Datenupload zur Webanwendung funktioniert.

2.3.2.2 Integration der Zeitinformation in die Messdatenerhebung

Um die zeitliche Zuordnung der Messdaten zwischen den verschiedenen an der Intelligenten Brücke installierten Messanlagen zu gewährleisten, ist es zwingend erforderlich, die Messdaten mit verlässlichen Zeitinformationen zu verknüpfen.

Das RTMS Messsystem mit Sensoren am Überbau der Brücke, am Lager an Achse 40 und am Fahr-

bahnübergang realisiert diese Verknüpfung in der Art, dass die eingesetzten Messverstärker ihre Systemzeit vom Messrechner beziehen und dieser kontinuierlich seine eigene Systemzeit per NTP mit der Systemzeit der NAS synchronisiert. Unter Verwendung dieses Zeitsignals ist die Anlage so konfiguriert, dass neben den Messkanälen zu jeder im System definierten Messfrequenz Zeitkanäle generiert werden. Diese sogenannten Echtzeitkanäle werden mit den Messdaten zusammen in den Ausgabedateien gespeichert. Im Ergebnis wird so erreicht, dass für jeden Messwert ein Zeitstempel vorhanden ist, der die zeitliche Zuordnung zulässt.

Für die Umsetzung dieser Lösung war eine Neukonfiguration der Messsoftware erforderlich, die am 23.01.2018 über den Fernzugriff realisiert wurde. Die erforderlichen Konfigurationsschritte wurden auch an den Projektpartner Maurer übermittelt und dort umgesetzt. Somit existieren nunmehr in beiden Messsystemen Zeitkanäle, die für die Zusammenführung bzw. den Abgleich der Messdaten aus den beiden Systemen eingesetzt werden können.

2.3.2.3 Erfasste Zeiträume

In den nachfolgenden Darstellungen sind die Zeiträume, in denen vom Messsystem Daten ordnungsgemäß aufgezeichnet wurden, visualisiert.

Die Zusammenstellung beginnt dabei im Oktober 2016, unmittelbar nach den durchgeführten Kalibrierfahrten und führt bis zum 17.12.2018, 00:32 Uhr morgens. Alle Zeitangaben erfolgen in UTC (Koordinierte Weltzeit), um in der Messdatenerfassung Probleme bei der Umstellung von Sommerzeit auf Winterzeit und umgekehrt zu vermeiden. Die nachfolgenden Grafiken sind für die einzelnen Monate getrennt aufgeführt. Die Zeilen stellen die einzelnen Tage des jeweiligen Monats dar, die Spalten zeigen die einzelnen Stunden des Tages. Grüne Zellen zeigen eine vollständig gemessene Stunde. Orangene Zellen verdeutlichen eine teilweise Messaufzeichnung in der Stunde und rote Zellen zeigen eine durchgehend nicht gemessene Stunde. In den Grafiken ist zusätzlich die vorhandene Möglichkeit eines Fernzugriffes auf die Anlage verdeutlicht.

Ein weiterer längerfristiger Ausfall des Fernzugriffes lag von Anfang September 2017 bis Anfang Oktober 2017 vor. In diesem Zeitraum lag eine Störung des NAS vor. Da dieses System den Zugriff auf die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems steuert, konnte nicht auf den Messrechner zugegriffen

werden. Die eigentliche Messung lief unabhängig davon planmäßig weiter.

Vom 12.02.2020 bis zum 23.03.2020 bestand Infolge von Arbeiten zur technischen Änderung der Internetanbindung keine Anbindung. Dies hat dazu geführt, dass die interne Festplatte am 22.02.2020 vollgelaufen ist und die Messung ausgefallen ist. Aufgrund einer fehlerhaften Konfiguration der neuen Internetanbindung kam es im April 2020 zu einem weiteren Ausfall der Messung.

Die oben beschriebene permanente Eigenüberwachung und Kontrollmeldung per Mail war vom Ausfall der NAS nicht betroffen, sodass die Informationen über den ordnungsgemäßen Betrieb nach wie vor eingingen. Eingriffe wären in diesem Zeitraum jedoch von außen nicht möglich gewesen.

Hinsichtlich des Betriebes des Messsystems seit nunmehr über 60 Monaten (ab Kalibrierung) lassen sich folgende wesentliche Ausfallszeiten der Messung durch das System RTMS zusammenfassen:

l) a) 22.11.2016 bis 12.12.2016

Abbruch der Messung, wahrscheinlich kleine Stromschwankung, Erkennung nur bei Termin vor Ort (kein Fernzugriff vorhanden), Neustart vor Ort

b) 02.06.2017 bis 20.06.2017

Mehrfach Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff, Fehlerursache war die Steuerung des Lüfters am Messschrank, Ursache wurde von Ort am 20.06.2017 behoben

c) 28.09.2017 bis 29.09.2017

Stromausfall am gesamten Bauwerk, Neustart des Messrechners und der Messung planmäßig, nachdem der Strom wieder vorhanden war

d) 30.04.2019 bis 01.05.2019

Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff

e) 06.08.2019 bis 07.08.2019

Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff

- f) 22.02.2020 bis 23.03.2020
Ausfall der Internetanbindung, Neustart der Messung nach der Wiederherstellung der Verbindung
- g) 02.04.2020 bis 07.04.2020
Ausfall der Internetanbindung, Neustart der Messung nach der Wiederherstellung der Verbindung
- h) 13.03.2021 bis 15.03.2021
Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzuff
- i) 23.05.2021 bis 25.05.2021
Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff
- j) 17.07.2021 bis 19.07.2021
Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff
- k) 29.07.2021 bis 02.08.2021
Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff
- l) 14.09.2021 bis 15.09.2021
Abbruch der Messung, zeitnahe Erkennung über automatische Eigenüberwachung, Neustart der Messung über Fernzugriff

Hinzu kommen einige kurze Unterbrechungen der Messungen im Zusammenhang mit Wartungsmaßnahmen am Messsystem oder Konfigurationsmaßnahmen.

Insgesamt zeigt sich damit das installierte System als äußerst stabil. Die vorhandenen Kontrollmöglichkeiten erlauben die quasi permanente Prüfung der laufenden Messungen. Ausfälle an anderen Komponenten des Gesamtsystems (NAS) schränken die Kontrollmöglichkeiten zwar ein, haben aber keinen Einfluss auf die fortlaufende Messung. Unterbrechungen des Internetzuganges lagen im Zuge der laufenden Messungen mehrfach vor. Dieser Sachverhalt wurde stets durch ausbleibende Kon-

trollmeldungen erkannt. Hier besteht jedoch keine Einflussmöglichkeit.

Bild 43 zeigt exemplarisch eine grafische Darstellung der erfassten Zeiträume. Ergänzend zu dieser Darstellung wird in den nachfolgenden Bildern exemplarisch eine Auswahl von Messdatenverläufen dargestellt. Diese Daten stammen aus der vor Ort quasi permanent laufenden Eigenüberwachung des Messsystems. Es handelt sich dabei um Stundenmittelwerte der Messungen.

Da vor Ende Januar 2017 die oben genannte, quasi permanent laufende Eigenüberwachung des Messsystems aufgrund des noch nicht vorhandenen Internetzuganges nicht in Echtzeit möglich war, werden nachfolgend die Darstellungen der Messdaten ab Anfang Februar 2017 bis November 2020 gezeigt (siehe Bild 44 bis Bild 52).

In der Darstellung der Messwertverläufe ist deutlich ein Trend zu erkennen, der einem Jahresrhythmus folgt. Überlagert wird dieser Verlauf von einem generellen Absinken der Messwerte über den gesamten Aufzeichnungszeitraum. Die Sensoren, die direkt die Dehnung an der Längsbewehrung messen, zeigen diese Charakteristik besonders deutlich (MS 1L, MS 2L MS 5L und MS 6L).

		Uhrzeit														Anmerkungen	Fernzugriff vorhanden						
		00:00:00	01:00:00	02:00:00	03:00:00	04:00:00	05:00:00	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00			14:00:00	15:00:00	16:00:00	17:00:00	18:00:00	19:00:00
Mai 2021	Sa. 01.05.2021	Green															Green						
	So. 02.05.2021	Green															Green						
	Mo. 03.05.2021	Green															Green						
	Di. 04.05.2021	Green															Green						
	Mi. 05.05.2021	Green															Green						
	Do. 06.05.2021	Green															Green						
	Fr. 07.05.2021	Green															Green						
	Sa. 08.05.2021	Green															Green						
	So. 09.05.2021	Green															Green						
	Mo. 10.05.2021	Green															Green						
	Di. 11.05.2021	Green															Green						
	Mi. 12.05.2021	Green															Green						
	Do. 13.05.2021	Green															Green						
	Fr. 14.05.2021	Green															Green						
	Sa. 15.05.2021	Green															Green						
	So. 16.05.2021	Green															Green						
	Mo. 17.05.2021	Green															Green						
	Di. 18.05.2021	Green															Green						
	Mi. 19.05.2021	Green															Green						
	Do. 20.05.2021	Green															Green						
	Fr. 21.05.2021	Green															Green						
	Sa. 22.05.2021	Green															Green						
	So. 23.05.2021	Green															Green						
	Mo. 24.05.2021	Red															Green						
	Di. 25.05.2021	Red															Green						
	Mi. 26.05.2021	Green															Green						
	Do. 27.05.2021	Green															Green						
	Fr. 28.05.2021	Green															Green						
	Sa. 29.05.2021	Green															Green						
	So. 30.05.2021	Green															Green						
	Mo. 31.05.2021	Green															Green						

Bild 43: Erfasste Zeiträume – IBF – Mai 2021

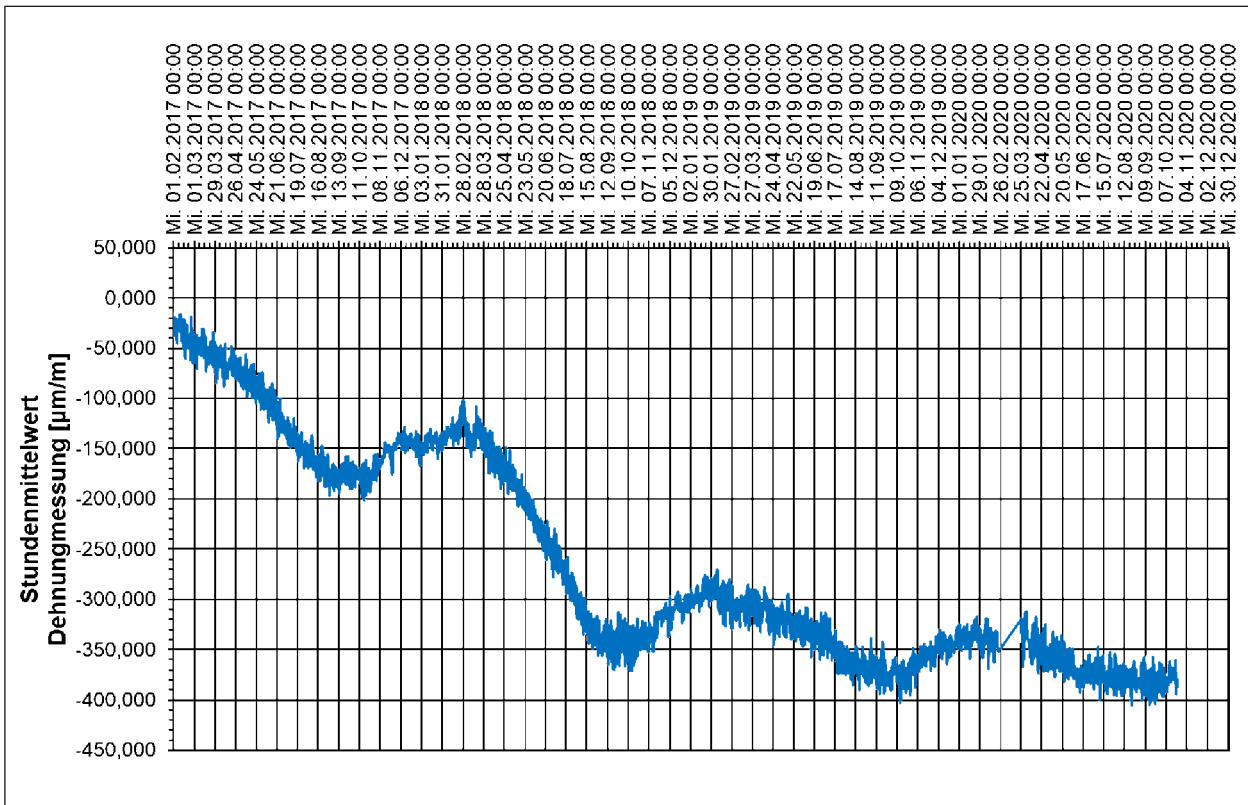


Bild 44: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 1 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung

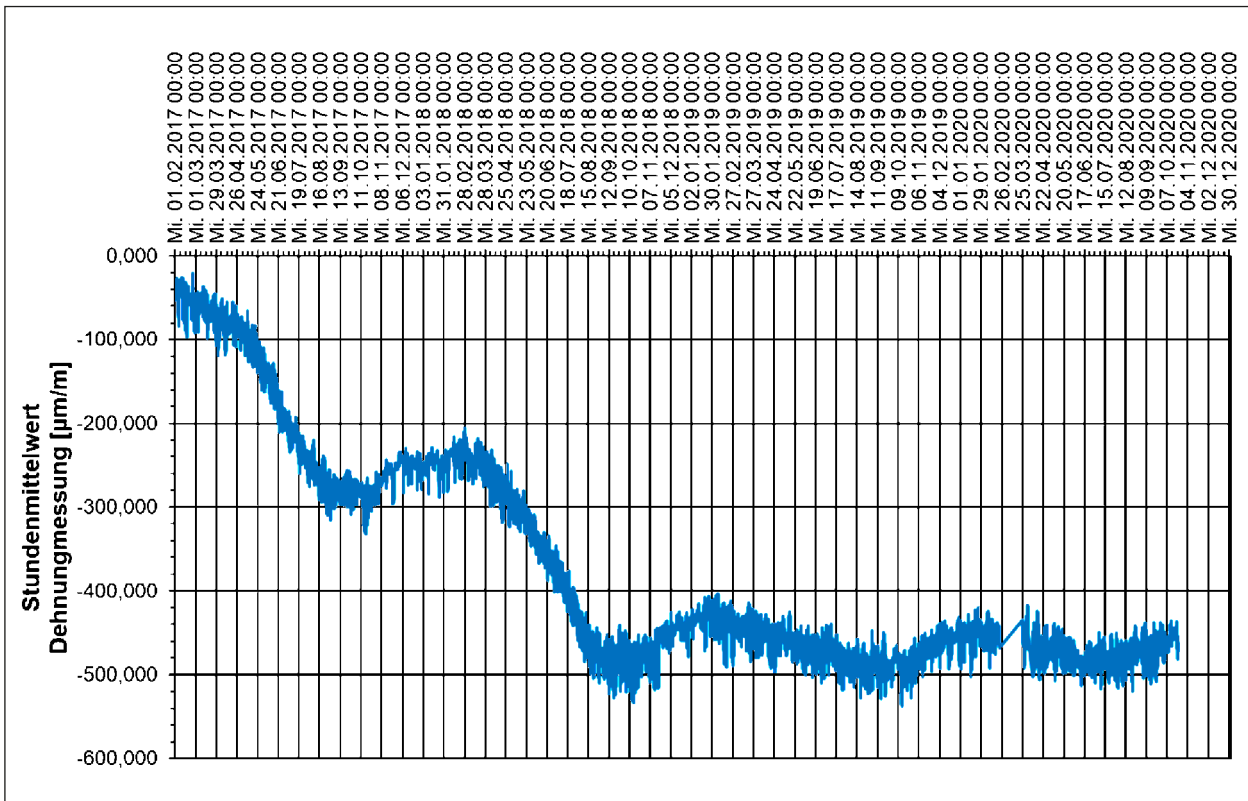


Bild 45: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 2 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung

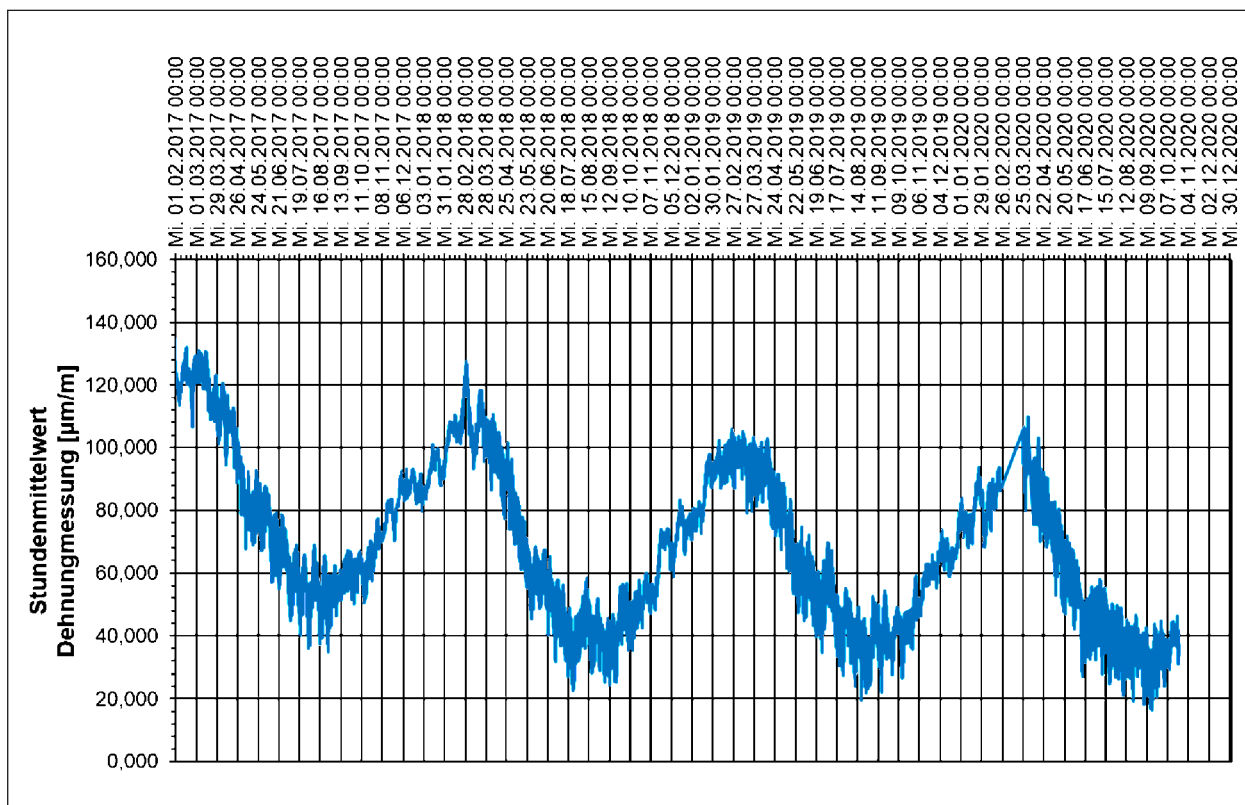


Bild 46: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 3 Q – Dehnungsmessung am Querschnitt Querrichtung

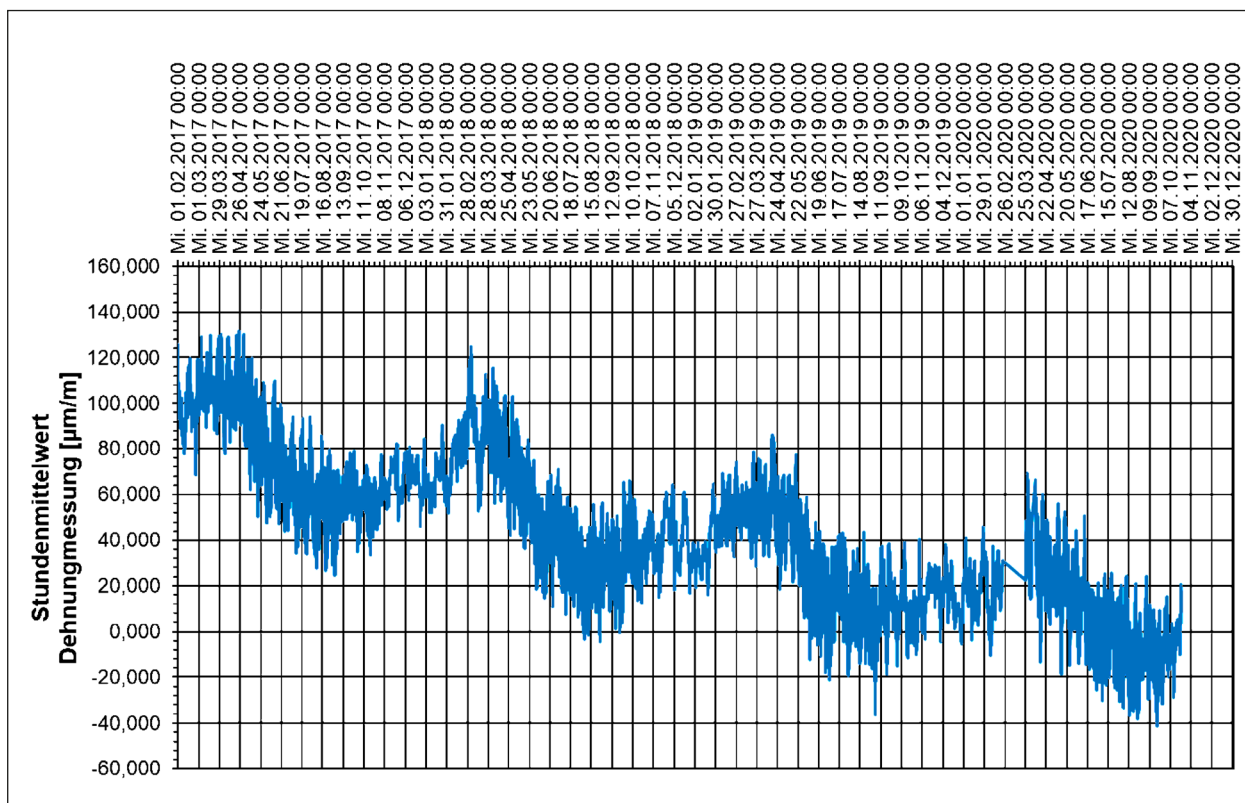


Bild 47: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 3 L – Dehnungsmessung am Querschnitt –Längsrichtung

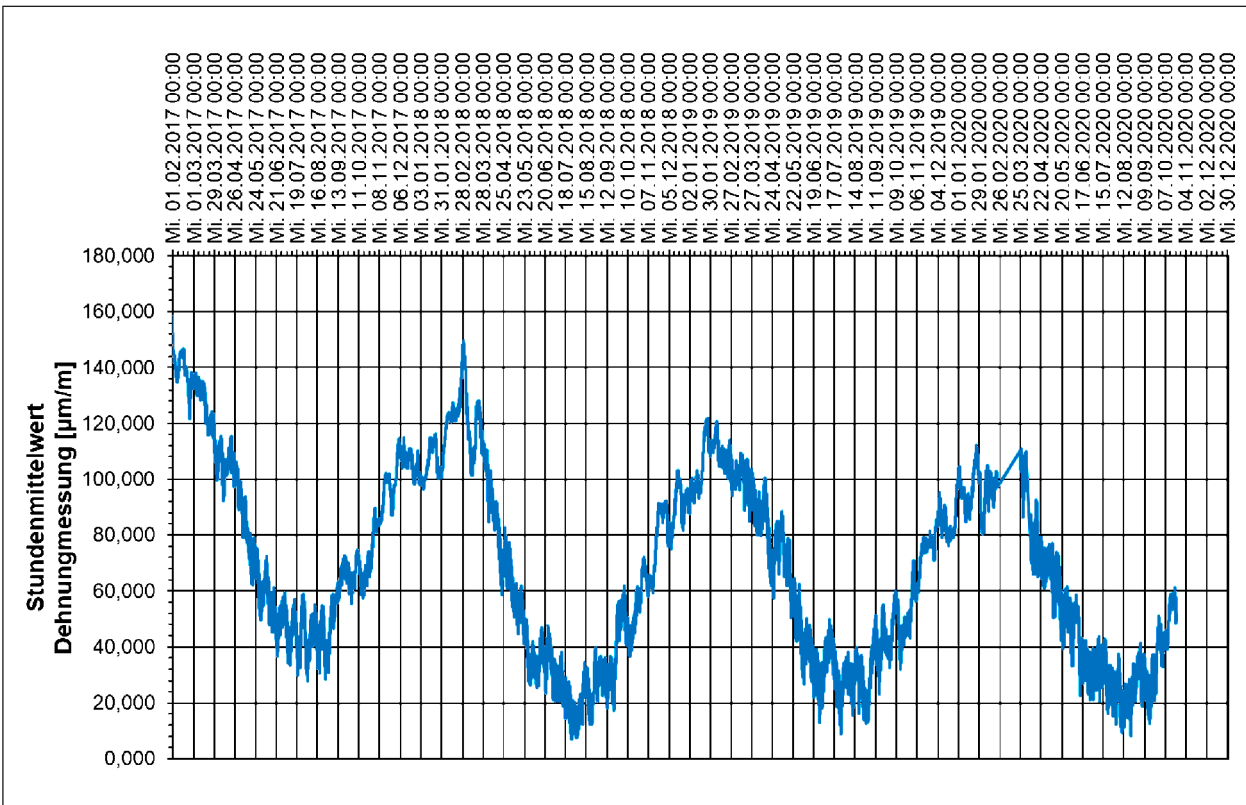


Bild 48: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 4 Q – Dehnungsmessung am Querschnitt – Querrichtung

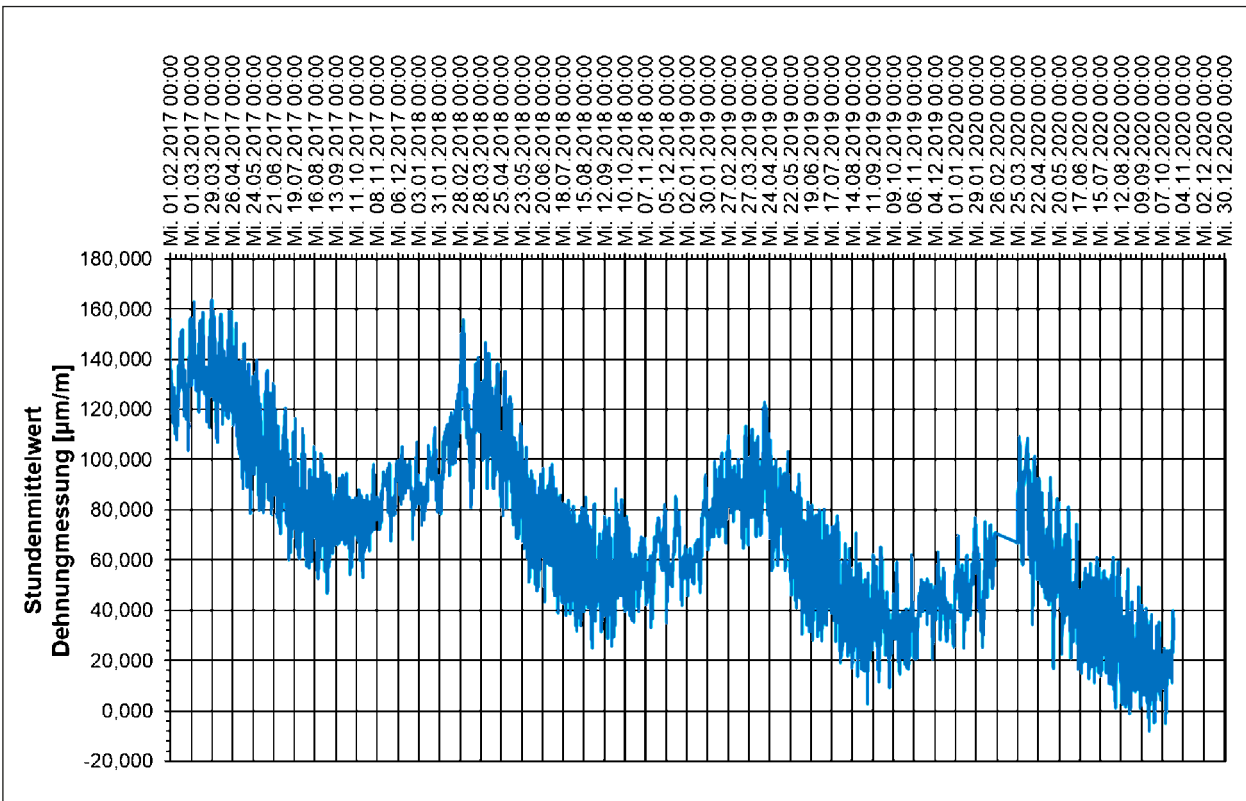


Bild 49: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 4 L – Dehnungsmessung am Querschnitt – Längsrichtung

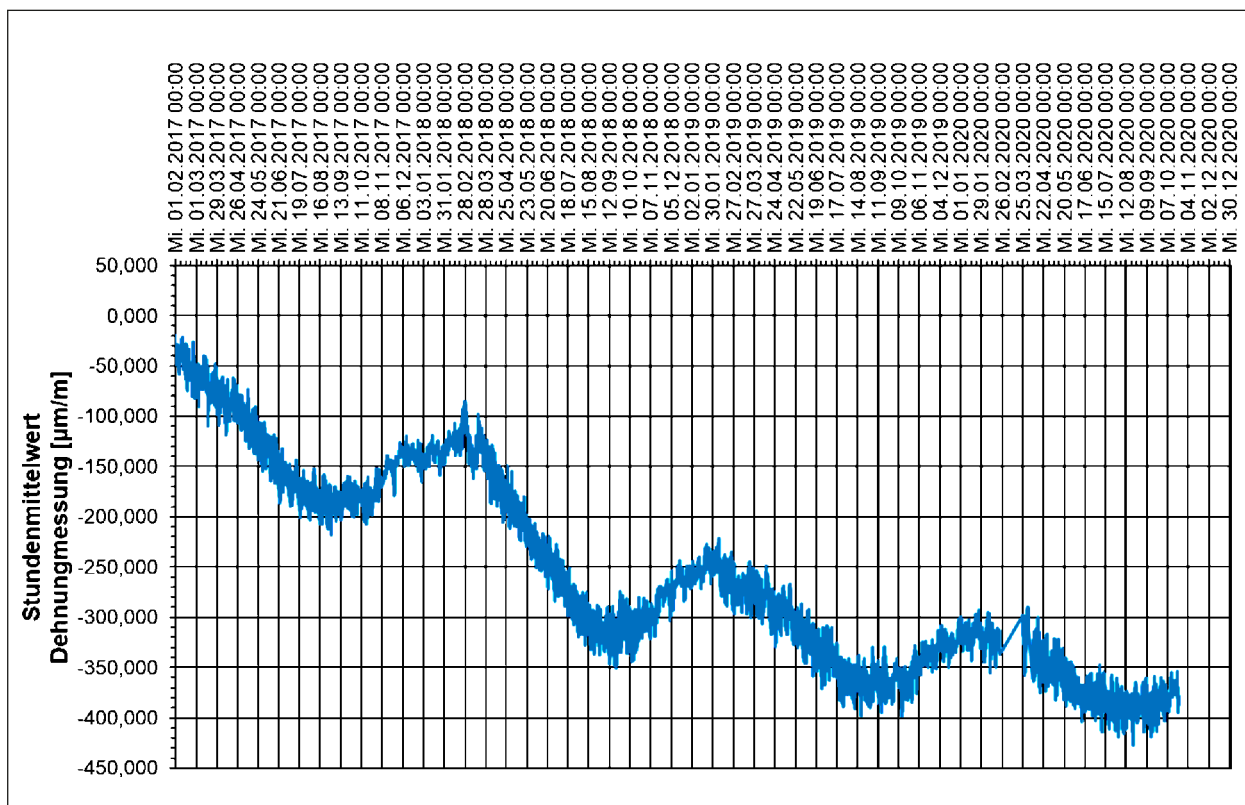


Bild 50: Verlauf der Stundensmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 5 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung

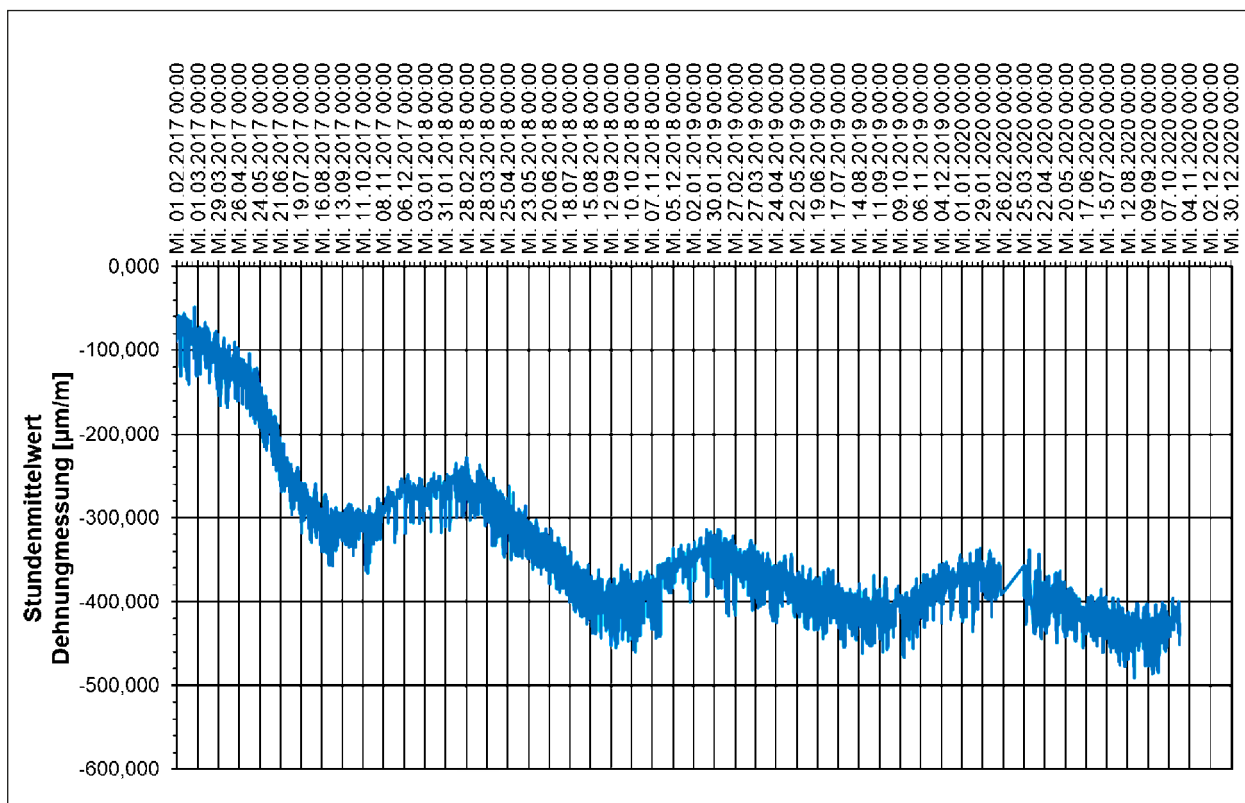


Bild 51: Verlauf der Stundensmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 6 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung

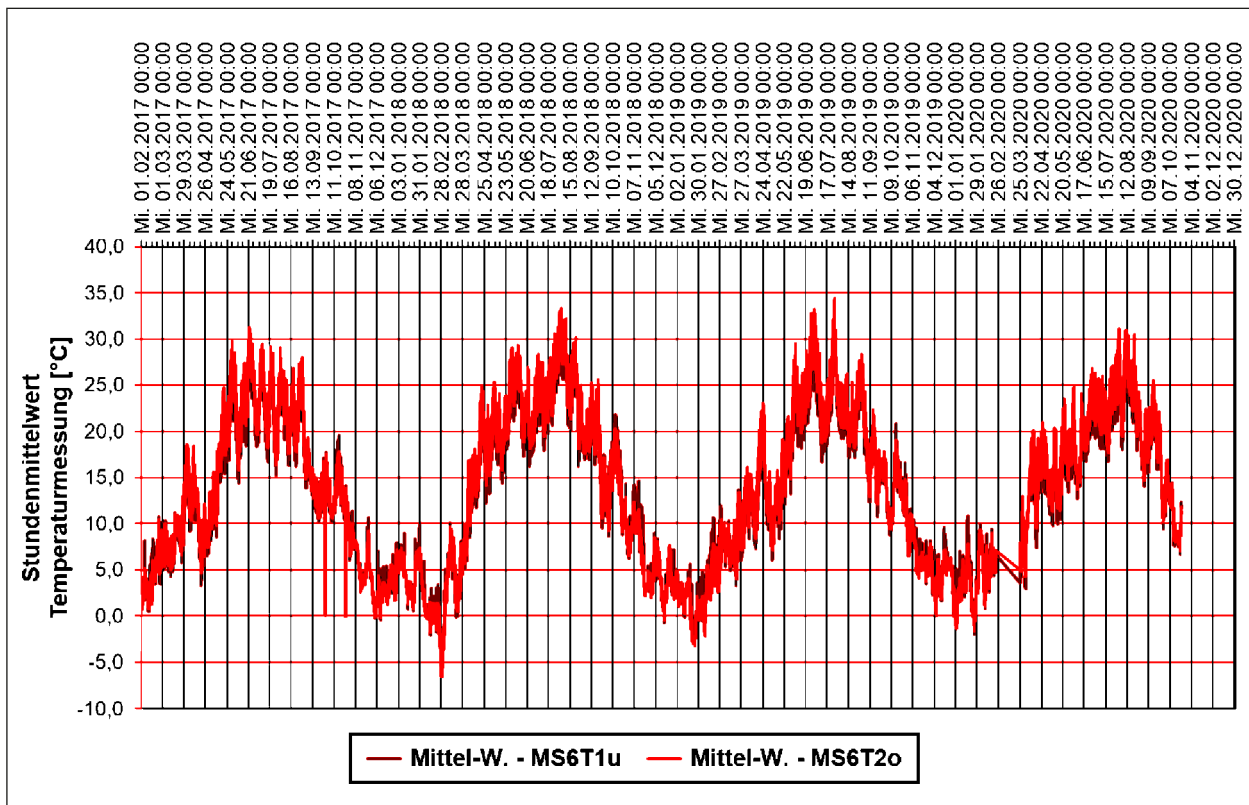


Bild 52: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Temperaturmessungen am Bauwerk (eingebaute Sensoren)

2.3.2.4 Wartung und Instandsetzung

Hinsichtlich der Wartung und Instandsetzung bzw. Aktualisierung der Software ist zwischen den Komponenten Betriebssystem, Messsoftware und Auswertesoftware zu differenzieren.

Sowohl für das Betriebssystem (Microsoft Windows 8.1) als auch für die Messsoftware (CatMan Easy 4.2.1) wurden bisher keine Aktualisierungen in Form von Updates oder Versionsupgrades vorgenommen. Im weiteren Projektablauf ist dies auch nicht vorgesehen. Der Messrechner befindet sich in einem nach außen abgeschlossenem lokalem Netzwerk. Zugriffe auf den Messrechner sind nur über die durch das NAS realisierte Zugangsmöglichkeit vorhanden. Automatische Updates des Betriebssystems könnten den autarken Betrieb stören. Da die Messsoftware lediglich die eigentliche Messung und die Abspeicherung der Daten realisiert und dies seit Projektbeginn zuverlässig, wird keine unmittelbare Notwendigkeit einer Aktualisierung der Messsoftware gesehen.

Hinsichtlich der Software zur Datenverarbeitung (Auswertung der aufgezeichneten Messdaten) muss im gegenwärtigen Projektstand zwischen zwei Bereichen unterschieden werden. Der erste Bereich ist die Überwachung der Messung und die vereinfachte Prüfung der auflaufenden Messdaten. Diese Überwachung wird seit Projektbeginn durch ein eigenentwickeltes Softwaretool realisiert. Hier fanden im Projektablauf Modifikationen statt. Hierbei handelte es sich um die Umsetzung einer verbesserten Erkennung einer Störung eines Sensors (vgl. Problematik vertikaler Induktiver Wegaufnehmer am Lager), die Bereitstellung der ermittelten Kontrollwerte der Messung für die Web-Anwendung sowie die Generierung von Daten für die Prüfung der Zeitsynchronisation der Rechner im lokalen Netz. Die Modifikationen wurden dabei über die vorhandene Zugriffsmöglichkeit übertragen. Der zweite Bereich der detaillierten Auswertung der Messdaten zur Erkennung von Verkehr und zur Identifikation von Änderungen des Tragverhaltens des Bauwerkes läuft seit Februar 2019 vor Ort am Bauwerk.

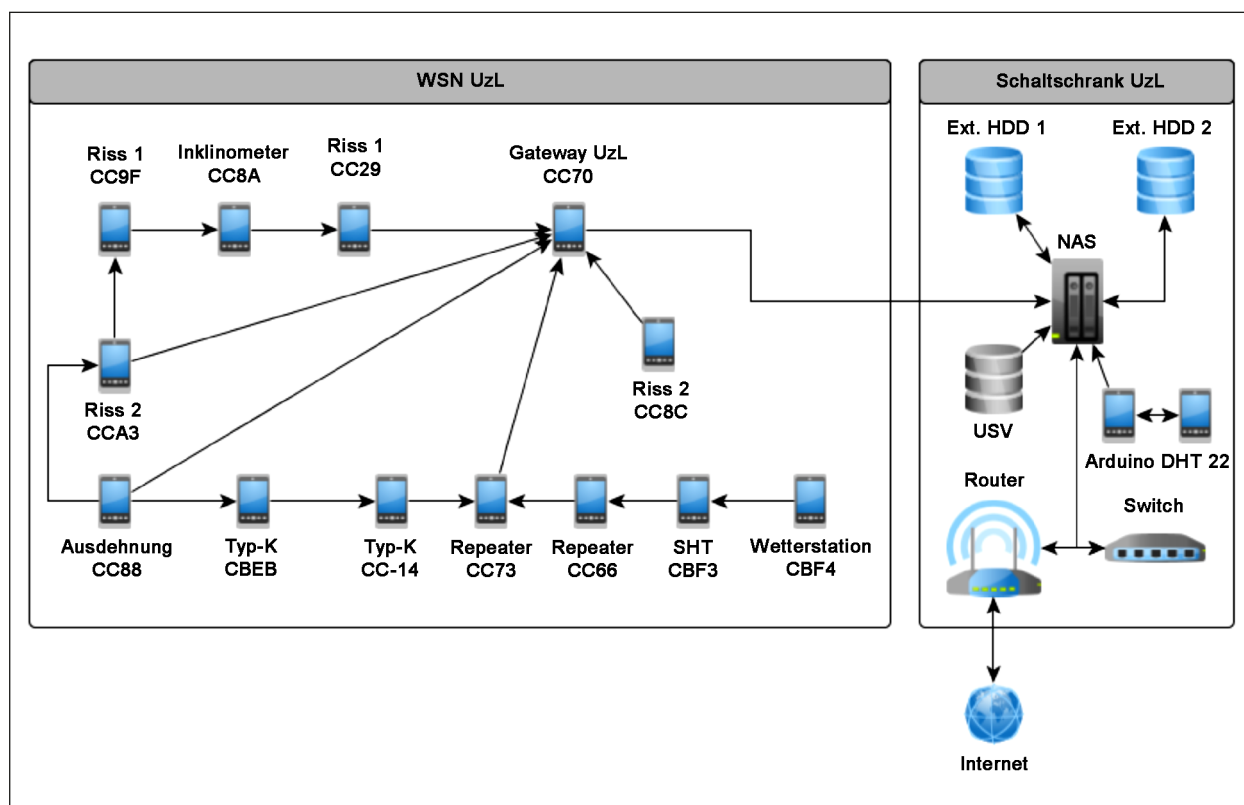


Bild 53: Links ist das drahtlose Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck zu sehen. Dieses ist über eine serielle Schnittstelle mit dem NAS verbunden. Nur das Gateway UzL hat eine direkte Verbindung außerhalb des WSN

2.4 Drahtloses Sensornetz

Bild 53 stellt eine Übersicht über die installierte Hardware dar. Links ist das drahtlose Sensornetzwerk dargestellt. Die einzelnen Knoten sind gemäß ihrer Funktion und den letzten vier Ziffern ihrer MAC-Adresse benannt.

Rechts daneben befindet sich eine schematische Übersicht über den Schaltschrank UzL. Darin befinden sich ein NAS mit angeschlossener, unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) sowie zwei externe Festplatten, welche für die Datenabholung verwendet werden. Außerdem wird ein Arduino mit einem DHT22 Sensor eingesetzt, um die Temperatur innerhalb des Schaltschranks zu überwachen und gegebenenfalls zu steuern.

Ein Switch befindet sich ebenfalls im Schaltschrank. Über diesen werden die Messrechner der unabhängigen Monitoring-Systeme mit dem NAS verbunden. Der Router befindet sich außerhalb der Brücke und stellt eine Firewall-geschützte Internetverbindung her.



Bild 54: Fotografie des Schaltschranks UzL mit den genannten Geräten

Bild 54 zeigt eine Fotografie der angeschlossenen Geräte und deren Unterbringung im Schaltschrank UzL.

2.4.1 Monitoring System

Das Sensorsystem der UzL besteht sowohl aus Hardware- als auch aus Softwarekomponenten. In diesem Kapitel wird zuerst auf die verwendete Hardware eingegangen.

2.4.1.1 Sensoren

Tabelle 7 zeigt eine tabellarische Übersicht der installierten Geräte mit Sensoren. Diese finden sich ebenfalls in Bild 53 wieder.

Es werden verschiedene Umgebungsparameter ermittelt. Neben einer Wetterstation wurden weitere Temperatursensoren, Neigungssensoren und potentiometrische Weggeber zur Überprüfung von Rissweiten installiert. Die folgende Aufzählung erklärt die einzelnen Sensorknoten detailliert. Die erfassten Daten werden in Kapitel 4.3 aufgezeigt.

- Das Gateway UzL ist die Datensinke im drahtlosen Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck. Hier werden die gemessenen Daten gesammelt und über eine serielle Schnittstelle an das NAS übertragen. Von dort aus werden die Daten an einen Server der Universität zu Lübeck übermittelt und in eine Datenbank eingespeist.
- Zwei Typ-K Thermoelemente wurden innerhalb des Brückenbauwerks zur Erfassung der Bauwerkstemperatur angebracht. Diese dienen u. a. als Referenz für die anderen Monitoring-Systeme.

ID	MAC	Typ
59	0x158D000046CC70	Gateway UzL
60	0x158D000046CBEB	Typ-K
61	0x158D000046CBF4	Wetterstation
62	0x158D000046CC14	Typ-K
63	0x158D000046CBF3	SHT
64	0x158D000046CC29	Riss 1
65	0x158D000046CC66	Repeater
67	0x158D000046CC73	Repeater
68	0x158D000046CC8C	Riss 2
69	0x158D000046CCA3	Riss 2
70	0x158D000046CC9F	Riss 1
71	0x158D000046CC88	Ausdehnung
72	0x158D000046CC8A	Neigung

Tab. 7: MAC-Adressen der einzelnen Knoten, deren Datenbank-IDs und die dazugehörigen Bezeichnungen

- Die Wetterstation ermittelt verschiedene Messgrößen wie Regenmenge, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.
- Der SHT Sensor ermittelt Sonnentemperatur am Brückenbauwerk und Luftfeuchtigkeit.
- Zwei Repeater, die an der Brücke installiert wurden, stellen die Konnektivität des Netzwerkes sicher und reichen empfangene Daten an benachbarte Sensorknoten weiter in Richtung Gateway UzL.
- Die Riss 1-Sensoren sind mit potentiometrischen Weggebern ausgestattet. Diese messen, wie sich ausgewählte Rissgrößen mit der Zeit verändern.
- Riss 2-Sensoren verfügen über einen Riss 1-Sensor und ein zusätzliches Sensorelement, welches Kraft misst, die durch Oberflächenverformung entsteht.
- Der Ausdehnungssensor funktioniert nach demselben Prinzip wie die Riss 1-Sensoren. Der Unterschied besteht darin, dass eine Feder versucht, das Messelement in einen vollständig ausgedehnten Zustand zu befördern.

Bild 55 zeigt einen beispielhaften Sensorknoten vom Typ Riss 2. Dieser ist an der Spanngliedumlenkung Achse 40 angebracht.

Bild 56 bis Bild 59 zeigen die Sensorpositionen der Knoten im Rissplan als blaue Knotenpunkte. Die stärksten Funkverbindungen werden über Verbindungen durch Pfeile dargestellt. Da es sich um ein ad-Hoc Netzwerk handelt, können die wirklichen Verbindungen mit der Zeit stark variieren.

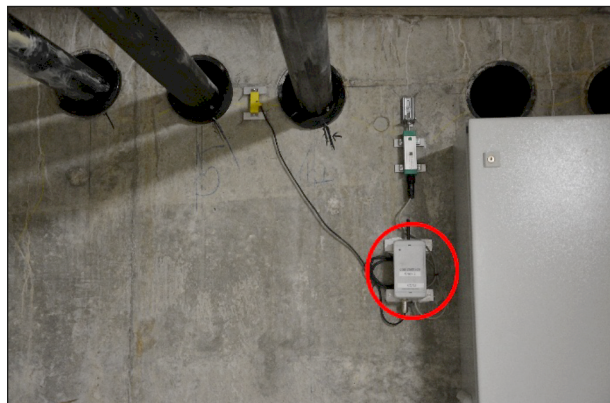


Bild 55: Fotografie eines Riss 2 Sensorknotens mit Kraftsensor (gelb) und potentiometrischem Weggeber

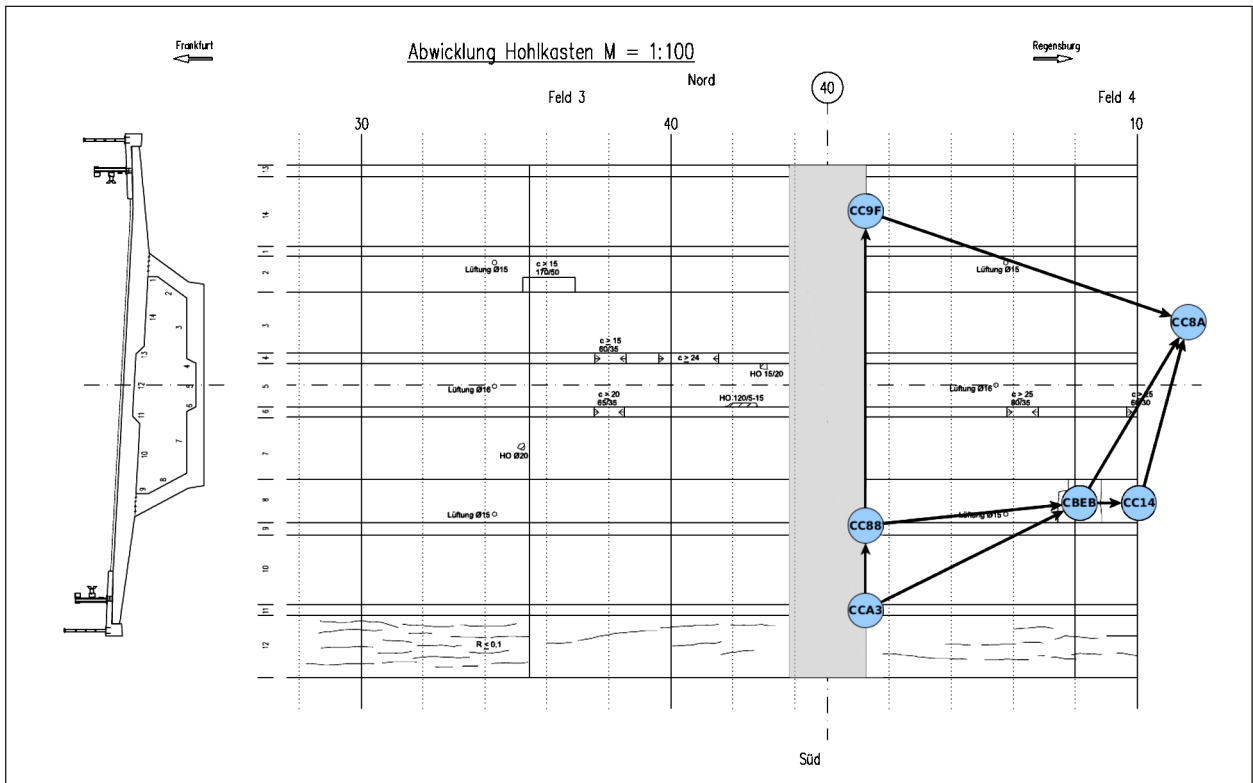


Bild 56: Darstellung des potentiometrischen Weggebers CC9F, des Riss-/Kraftsensors CCA3, des Ausdehnungssensors CC88, der Materialtemperatsensoren CBEB \& CC14, des Neigungssensors CC8A und die angenommene Konnektivität im Feld 4 links

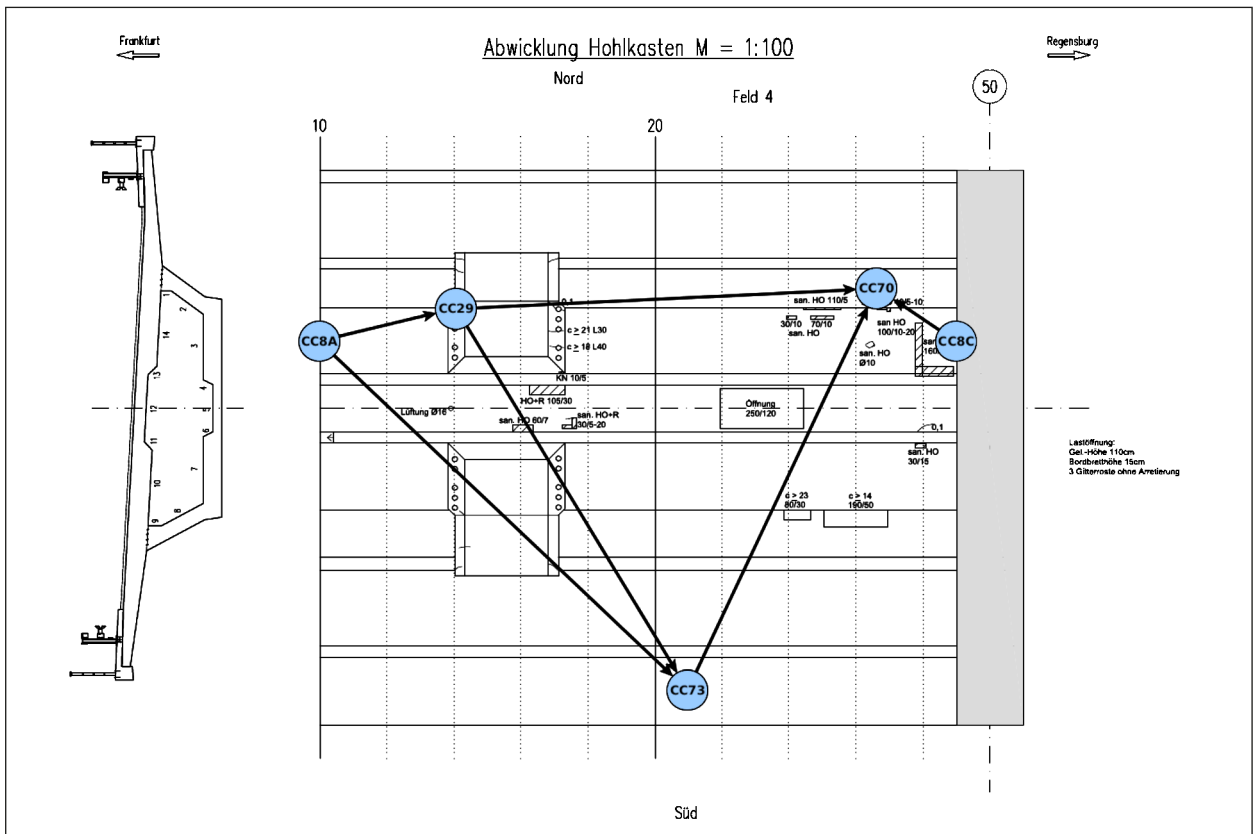


Bild 57: Darstellung des Neigungssensors CC8A, des potentiometrischen Weggebers CC29, des Repeaters CC73, des Gateways CC70, des Riss-/Kraftsensors CC8C und die angenommene Konnektivität im Feld 4 rechts

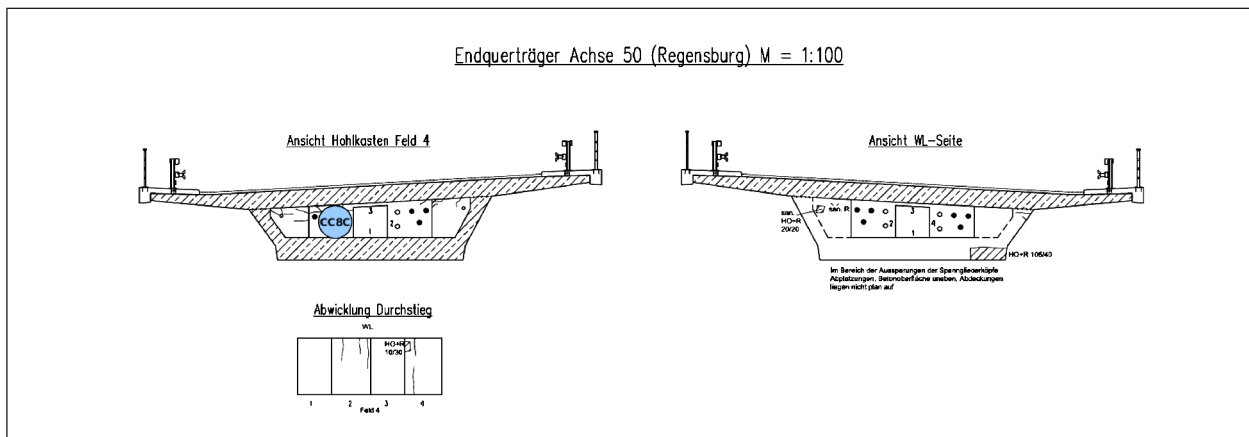


Bild 58: Darstellung des Riss-/Kraftsensors CC8C in der Brückenskizze an der Achse 50

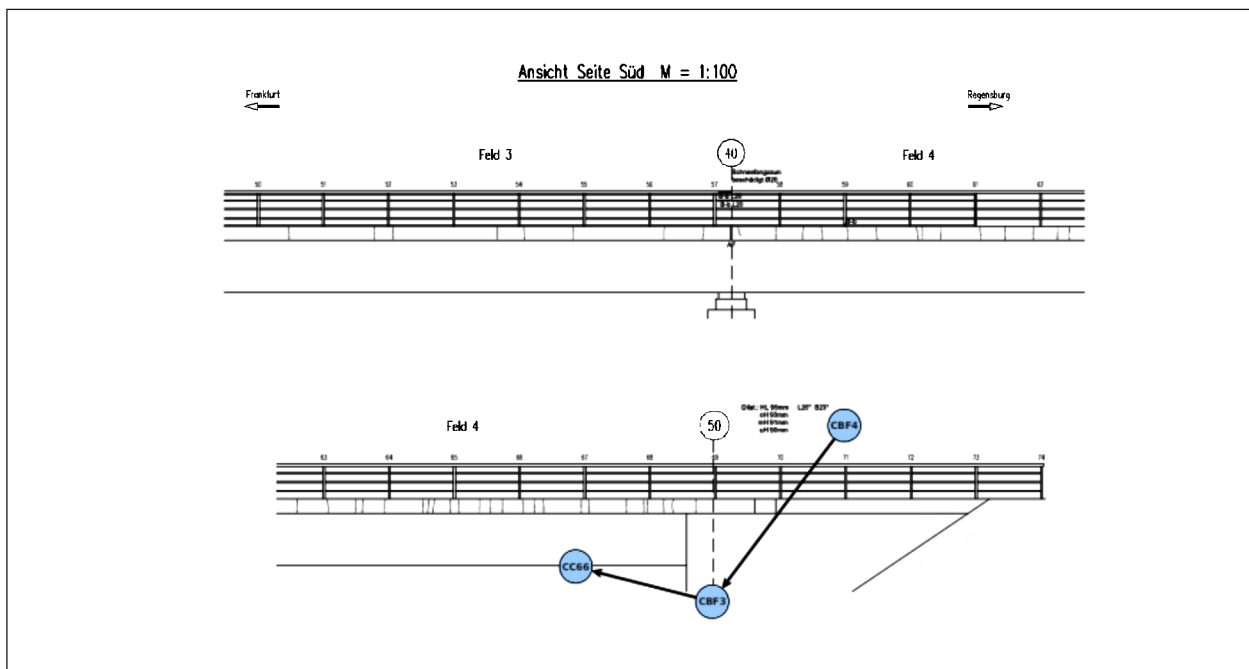


Bild 59: Darstellung eines Repeaters (CC66), eines Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensors (CBF3) und der Wetterstation (CBF4) sowie ihre angenommene Konnektivität im äußeren Bereich der Brücke

2.4.1.2 Geräte zur Datenerfassung

Neben dem WSN UzL (Wireless Sensor Network) wird das NAS für den Betrieb von Software zur Datenerfassung eingesetzt. Diese wird verwendet, damit die ermittelten Daten sortiert, zugeordnet und persistent in einer Datenbank gespeichert werden. Die Datenbank wird zurzeit auf einem Server der Universität zu Lübeck im Institut für Telematik betrieben. Der Server der UzL wird momentan ebenfalls für eine Web-basierte Messdatenpräsentation aller Projektpartner eingesetzt.

2.4.1.3 Wartung und Instandsetzung

Die letzte Inspektion des WSN UzL und des Zentral-servers wurde im November 2020 durchgeführt. Es wurden alle Klebstellen der Sensoren und Sensorknoten überprüft. Dabei sind keine Besonderheiten aufgefallen – alle Sensorknoten und Sensoren befinden sich an den geplanten Positionen und es sind keine Zeichen von Materialermüdung erkennbar.

Die Batteriestände der einzelnen Sensorknoten der UzL werden ebenfalls in der Datenbank abgelegt, wodurch erkannt wird, wann ein Batteriewechsel erfolgen muss.

Der Zentralserver (NAS) informiert die Universität zu Lübeck über Störungen im Betriebsablauf mithilfe von E-Mail-Benachrichtigungen, z. B. I/O-Fehler auf defekten RIAD-Festplatten.

Der Zentralserver wurde nach einem Betriebssystemfehler am 18.09.17 wieder in Betrieb genommen. Dabei kam es nicht zu Datenverlusten.

Um Fehler der Art in der Zukunft zu vermeiden, wurden mehrere zusätzliche Skripte installiert, welche den Speicherzustand des NAS periodisch überprüfen und an die Verantwortlichen schicken. Ein lokales Konfigurations-Backup wurde angelegt, um zukünftigen Problemen vorzubeugen.

Ausgefallene Sensorknoten starten sich automatisch neu.

2.4.2 Datenerfassung und -speicherung

Die Software zur Datenerfassung- und -speicherung ist unter anderem in Bild 60 dargestellt. Die Messdaten werden durch das WSN UzL erfasst und in einem stark komprimierten Format über mehrere Sprünge an das Gateway UzL weitergereicht. Dieses reicht die Daten über eine serielle Schnittstelle an den „BridgeConnector“ weiter.

Diese Softwarekomponente ist als Pipeline organisiert (Bild 61). Eingehende Messdaten werden zuerst dekodiert und anschließend wird mittels eines Prüfsummenverfahrens überprüft, ob bei der Über-

tragung Fehler aufgetreten sind. Sollte dies nicht der Fall sein, wird die AES-Verschlüsselung der Daten rückgängig gemacht und anschließend werden die Daten deserialisiert. Nun können sie in die Datenbank eingespeist werden.

Sollte es nötig sein, Kontrollsignale an das WSN UzL zu senden, muss die Pipeline rückwärts durchlaufen werden.

Es wird eine herkömmliche SQL-Datenbank als persistente Speichermöglichkeit eingesetzt.

2.4.2.1 Aufbau der Datenerfassung

Im WSN UzL werden alle Datenerfassungen ein Mal alle 15 Minuten angestoßen (die Messfrequenz belief sich im ersten Jahr auf ein Mal pro Minute). Dafür werden die Sensorknoten aus einem Energiespar-Zustand aufgeweckt. Im Anschluss daran

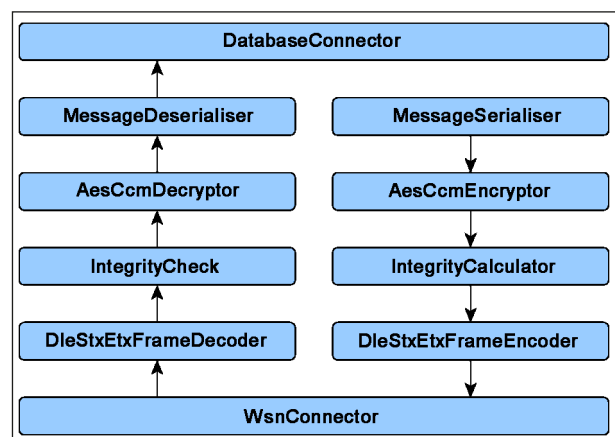


Bild 61: Dargestellt ist die Datenverarbeitung-Pipeline, welche alle erfassten Messdaten durchlaufen müssen, bevor sie in die Datenbank eingespeist werden können.

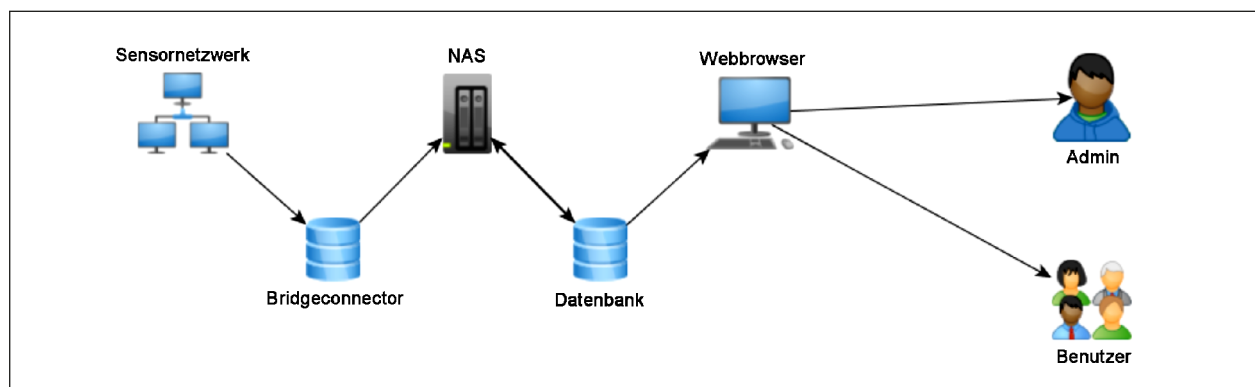


Bild 60: Darstellung des Datenflusses durch das WSN UzL erfasste Sensornetz. Nachdem die Messdaten, möglicherweise über mehrere Sprünge, das Sensornetz verlassen haben, werden diese an eine Softwarekomponente namens „BridgeConnector“ weitergereicht. Von dort gelangen sie über das NAS in eine Datenbank und können von einem beliebigen Webbrowser abgerufen werden.

wird eine Messung unternommen. Die erfassten Daten werden entsprechend ihres Types und ihrer physikalischen Einheit auf den Sensorknoten verarbeitet und für den Transport vorbereitet. Gleitkommazahlen werden durch Exponent und Basis dargestellt und ausschließlich in der Datenbank abgelegt. Von dort aus können sie in verschiedenen Formaten exportiert werden. Alle Daten werden als „Comma Separated Values“ übergeben.

2.4.2.2 Erfasste Zeiträume

Die Messungen der UzL durch das WSN UzL haben am 15.06.17 begonnen und seitdem gab es mehrere größere Messausfälle (siehe Tabelle 8). Von Mitte Juli bis Mitte August 2017 mussten Nachkorrekturen an der Software vorgenommen werden, um diese an den Standort in Nürnberg anzupassen.

Zwischen Anfang September und Oktober kam es zu einem Betriebssystemfehler des Zentralservers, weswegen die Messungen der UzL vorübergehend zum Erliegen kamen. Seitdem laufen die Messungen weitestgehend fehlerfrei.

2018 kam es erneut zu Zwischenfällen. Um die maximale Lebensdauer der Batterien des Sensornetzes zu bestimmen, musste diese mit einer sehr hohen Messfrequenz (1-mal pro Minute) betrieben werden. Dies führte dazu, dass die Batterien nach ca. 1,5 Jahren das Ende ihrer Haltbarkeit erreichten. Da jedes Sensornetzwerk sich an einen Standort anpasst, kommt es vor, dass versendete Datenpakete gewisse Routen durch das Netzwerk bevorzugen. Dies kann dazu führen, dass einige Sensorknoten energetisch stärker belastet sind als andere. Tabelle 9 zeigt die entsprechenden Daten.

Wie zu erwarten war, ist ein kaskadierter Ausfall der Knoten zu erkennen. Die Sensorknoten betrieben unterschiedlich viele Sensoren und müssen entsprechend der vorherrschenden Topologie des

ID	Datum
1	10.07.17 05:31:09 – 16.07.17 06:25:47
2	18.07.17 12:43:19 – 16.08.2017 14:12:36
3	29.08.17 10:22:52 – 01.09.2017 13:17:05
4	04.09.17 18:46:10 – 11.10.2017 12:02:09
5	12.10.17 10:47:08 – 24.10.2017 11:37:19

Tab. 8: Anzahl und Zeiträume der Messausfälle der UzL 2017

Sensornetzwerkes unterschiedliche Lasten durch Paketweiterleitung stemmen. Der Batterietausch wurde am Vormittag des 11.11.18 erfolgreich durchgeführt.

Zusätzlich wurde die Messfrequenz der Sensorknoten auf im Schnitt einmal alle fünfzehn Minuten herabgesetzt, damit kein weiterer Tausch während der verbleibenden Projektdauer durchgeführt werden muss.

Die Wetterstation ist über den Zeitraum des bisherigen Betriebs mehrfach aufgefallen (siehe Tabelle 10) und die ursprüngliche Hypothese, dass niedrige Temperaturen eine Rolle spielen, musste verworfen werden. Zurzeit gibt es keine sinnvolle Erklärung für die Ausfälle. Auch ein Neustart aller Komponenten konnte die Funktion nicht wiederherstellen. Als Ersatz für die fehlenden Wetterdaten werden die Daten des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Nürnberg verwendet. Im August 2021 ist die Wetterstation überraschenderweise wieder in Betrieb gegangen.

Im Jahr 2018 kam es zu einigen kleineren Ausfällen der Internetverbindung (siehe Tabelle 11).

CBF4	10.09.18	CC73	23.09.18
CC14	11.09.18	CC8C	29.09.18
CBEB	12.09.18	CC29	Nie
CC66	12.09.18	CC70	Nie
CBF3	13.09.18	CC88	Nie
CCA3	15.09.18	CC8A	Nie
CC9F	16.09.18	CBF4	28.11.18

Tab. 9: Daten der spannungsverlustbedingten Messausfälle pro Sensorknoten

Datum
2019-11-28 – 2019-04-21
2019-04-28 – 2019-05-13
2019-05-14 – 2019-06-02
2019-06-03 – 2019-06-27
2020-04-09 – 2020-08-22
2020-09-20 – 2021-01-14
2021-01-14 – 2021-07-19
2021-08-01 – 2021-08-20

Tab. 10: Anzahl und Zeiträume der Ausfälle der Wetterstation

Dies entspricht einer 97,28 % Verfügbarkeit. Der Hauptteil der Nichtverfügbarkeit geht auf einen Defekt am Lichtwellenleiter von ca. sechs Tagen zurück. Ohne diesen war das Internet und damit auch der Fernzugriff zu 99,99 % verfügbar.

Im Jahre 2019 kam es zu mehreren längerfristigen Ausfällen der Stromversorgung, welche ebenfalls den Fernzugriff auf die Brücke eingeschränkten. Durch den Aufbau eines Gartentores wurde ein Stromkabel beschädigt. Durch eine provisorische Reparaturmaßnahme kam es zu einer Überspannung an der intelligenten Brücke, welche die USV des NAS zerstörte, jedoch das NAS und damit die Daten schützte. Durch einen Prozessorfehler ist das NAS fast zwei Monate ausgefallen und musste durch den Hersteller ersetzt werden. Das NAS war 2019 dadurch mindestens 1/5 der Zeit nicht verfügbar, wodurch Datenverluste beim Sensornetzwerk UZL entstanden.

Tabelle 12 listete die Ausfälle der Internetverbindung im Zeitraum Juni 2019 bis November 2020. Tabelle 13 gibt einen detaillierten Überblick über die Ausfälle im Jahr 2019.

Besonders zu benennen ist der Ausfall der Internetverbindung zwischen dem 02.11.2020 und dem 23.03.2020. In diesem Zeitraum wurde die Internetanbindung der Brücke verändert, wodurch es zu einer Ausfallzeit von mehr als einem Monat kam. Abgesehen davon lief das System deutlich stabiler als die Jahre zuvor.

In der ersten Hälfte des Jahres 2021 ist das System lediglich zwei Mal für kurze Zeit ausgefallen. Von 14:15 bis 15:22 am 13.03.21 und von 00:45 bis 05:43 am 11.06.21. Dies entspricht einer quasi 100 % Verfügbarkeit.

Datum
2017-12-17 01:44:11 – 2017-12-19 11:19:50
2018-03-15 02:05:56 – 2018-03-15 03:00:57
2018-04-04 13:14:16 – 2018-04-04 16:18:21
2018-04-04 09:16:10 – 2018-04-04 12:09:15
2018-06-23 04:08:02 – 2018-06-23 05:21:54
2018-06-12 09:39:32 – 2018-06-18 10:01:19
2018-07-09 23:59:45 – 2018-05-17 15:39:26

Tab. 11: Anzahl und Zeiträume der Internetausfälle 2017 und 2018

Datum
2019-06-03 13:05:02 – 2019-06-11 12:33:44
2019-06-12 08:00:02 – 2019-06-12 09:55:50
2019-06-27 08:15:01 – 2019-06-27 12:46:38
2019-06-27 14:25:02 – 2019-06-27 14:34:09
2019-07-02 09:35:03 – 2019-07-02 12:28:21
2019-07-04 16:28:21 – 2019-07-05 09:28:21
2019-07-19 21:05:01 – 2019-07-19 21:32:18
2019-08-12 10:25:02 – 2019-08-20 11:07:47
2019-08-20 13:40:01 – 2019-08-20 15:24:12
2019-08-21 08:10:02 – 2019-08-21 14:41:13
2020-01-17 04:45:11 – 2020-01-17 08:01:51
2020-01-22 08:40:03 – 2020-01-22 12:53:49
2020-02-11 10:35:02 – 2020-03-23 18:03:57
2020-07-29 21:20:02 – 2020-07-29 21:20:02
2020-08-05 13:25:03 – 2020-08-05 13:33:10

Tab. 12: Anzahl und Zeiträume der Internetausfälle Juni 2019 bis November 2020

Gesamtdauer		
Beginn	Ende	Dauer
05.12.2018	03.12.2019	367
Beginn	Ende	Dauer
20.08.2019 13:40	20.08.2019 15:24	0d 01:44
21.08.2019 08:10	21.08.2019 14:41	0d 06:31
19.07.2019 21:05	21.07.2019 21:32	2d 00:27
02.07.2019 09:35	02.07.2019 12:28	0d 02:53
27.06.2019 14:25	27.06.2019 14:34	0d 00:09
27.06.2019 08:15	27.06.2019 12:46	0d 04:31
12.06.2019 08:00	12.06.2019 09:55	0d 01:55
12.08.2019 10:25	20.08.2019 11:07	8d 00:42
03.06.2019 00:00	11.06.2019 00:00	9d 00:00
23.07.2019 05:10	23.07.2019 05:10	0d 00:00
04.07.2019 16:28	04.07.2019 16:28	0d 00:00
05.07.2019 09:11	05.07.2019 09:28	0d 00:17
08.02.2019 00:00	03.04.2019 16:00	55d 00:00
03.06.2019 00:00	11.06.2019 00:00	9d 00:00
	Summe	74d 19:09
	Anteil	20,54 %
	Ohne NAS	0,74 %

Tab. 13: Ausfälle im Jahre 2019. Grün dargestellt sind Ausfälle der Internetverbindung, gelb dargestellt Ausfälle der Stromanbindung und rot dargestellt Ausfälle des NAS

2.4.2.3 Wartung und Instandsetzung

Sollte eine der Softwarekomponenten ausfallen, werden die Verantwortlichen über E-Mails benachrichtigt. Es wird mittels einer Heuristik überprüft, ob die Menge des Dateneingangs den Erwartungen entspricht. Sollte es zu Abweichungen kommen wird ein Alarm gesendet.

Um Ausfälle in Zukunft früher und besser erkennen zu können, wurde ein Skript entwickelt, welches den letzten Eingang von Messdaten in der Datenbank pro Sensorknoten prüft.

Bild 62 zeigt das verwendete Skript in der Programmiersprache JavaScript. Es werden der Reihe nach die Zeitstempel der zuletzt eingegangenen Daten für definierte Sensorknoten-IDs angefragt und mit dem aktuellen Datum verglichen. Sollte die Differenz größer als ein definierter Schwellwert sein, wird an die Statusmail der entsprechende Knoten die ID mit Zeitdifferenz angehängen.

Das System (NAS) versucht, sich von selbst neu zu starten, sollte es zu Ausfällen kommen. Sollte dies nicht möglich sein, kann eine alternative, manuelle Strategie verwendet werden.

```

1  const rp = require('request-promise');
2  var nodemailer = require('nodemailer');
3
4  var transporter = nodemailer.createTransport({
5    service: 'gmail',
6    auth: {
7      user: 'intelligente.bruecken@gmail.com',
8      pass: '*****'
9    }
10 });
11
12 var mailOptions = {
13   from: 'intelligente.bruecken@gmail.com',
14   to: 'intelligente.bruecken@gmail.com',
15   subject: '24h sensor status',
16   text: 'That was easy!'
17 };
18
19 const baseUrl = 'https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/channeldata/'
20 const opts = {
21   json: true,
22   auth: {
23     user: 'devserver',
24     pass: '*****',
25     sendImmediately: false
26   },
27   uri: ''
28 }
29
30 async function doStuff() {
31   let badOnes = [];
32
33   for (var i = 59; i <= 72; i++) {
34
35     opts.uri = baseUrl + i + '/0/_last';
36     let response = await rp(opts);
37     let date = Date.now();
38     console.log('Node $[i] was seen $((date - response.time)/1000) seconds ago. ');
39     if (date - response.time > 24*60*60*1000) {
40       badOnes.push({nodeId: i, diff: date - response.time});
41     }
42   }
43   console.log(badOnes);
44   return badOnes;
45 }
46
47 doStuff();

```

Bild 62: Skript zur E-Mail-Benachrichtigung von Nutzern, sollten innerhalb eines definierten Zeitraumes keine Daten in der Datenbank eingegangen sein

Auf allen Ethernet-Anschlüssen des NAS ist Wake on LAN (WoL) aktiviert. Es ist damit möglich, eine Bytesequenz an das gesamte Intranetz der intelligenten Brücke zu schicken. Diese „Magic-Packet“ genannte Bytesequenz besteht aus sechs Mal in Folge dem hexadezimalen Wert „FF“. Danach wird 16-mal die MAC-Adresse des Zielsystems wiederholt. Es ist dabei nicht von Belang, welches Transportprotokoll verwendet wird (z. B. IP).

2.4.2.4 Speicherstände

Die Speicherauslastung von verschiedenen Systemen der Universität zu Lübeck ist von beständigem Interesse. Um sicher zu stellen, dass es an keiner Stelle zu Speicherüberläufen kommt, wird täglich eine Statusmail gesendet.

Der Speicherstand des NAS sieht im September 2021 wie in Bild 63 zu sehen aus.

Das Hauptvolumen der Festplatte ist zu ca. 72 % gefüllt (siehe Bild 63). Die Speicherbelegung des NAS wächst damit erwartungskonform, nachdem Videodaten entfernt wurden.

Der Datenbankserver der Universität zu Lübeck ist lediglich zu 60 % ausgelastet. Die zu Verfügung stehenden Kapazitäten sind bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht erschöpft.

Zusätzlich wurde die Serverhardware der Universität zu Lübeck aktualisiert und kann dementsprechend höheren Anforderungen gerecht werden. Insbesondere steht nun mehr Speicherplatz zur Verfü-

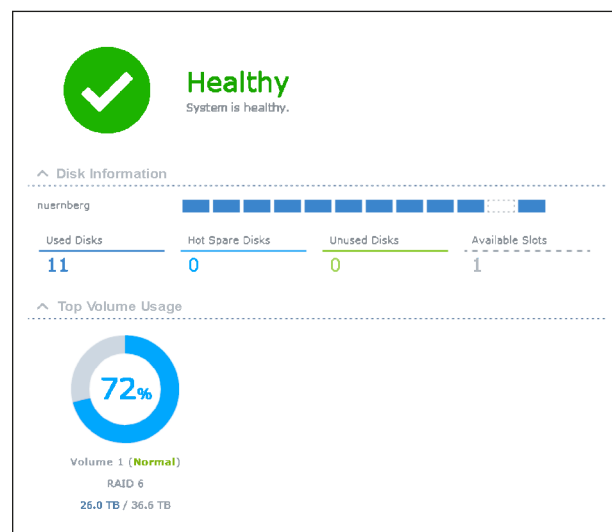


Bild 63: Speicherauslastung des Zentralservers sowie Gesundheitszustand der verwendeten RAID-6 Festplatten

gung, was es ermöglicht, größere Datenmengen auf einmal durch die REST-Schnittstelle in die Datenbank zu schreiben. Wird die Last zu hoch, läuft die Java-interne Heap-Struktur über und das Programm zur Anbindung der Datenbank muss neugestartet werden.

3 Zentralserver

In diesem Kapitel wird der Zentralserver (NAS) und die angeschlossene Infrastruktur erklärt. Es wird gesondert auf das Datenmanagement eingegangen und in Grundzügen das Sicherheitskonzept erläutert. Es wird zudem erklärt, wie der Zentralserver überwacht und gewartet wird.

3.1 Hardware

Bild 64 zeigt eine Übersicht über die Systemarchitektur. Im Schaltschrank UzL ist das NAS untergebracht, welches zur Speicherung der erfassten Rohdaten dient und zur Verwaltung und Koordination des Gesamtsystems eingesetzt wird.

Die Sensorik ist an den jeweiligen Messrechnern/ Messverstärkern oder am NAS angeschlossen.

Die folgende Aufzählung liefert eine knappe Beschreibung der einzelnen Komponenten und ihrer Zuordnungen:

- Das NAS (Network Attached Storage) bildet die Kernkomponente des Gesamtsystems. Es verbindet Außenwelt und internes System miteinander, indem ein Zugriff über einen SSH-Tunnel ermöglicht wird. Alle erfassten Messdaten werden hier hinterlegt und tageweise auf externe Festplatten gespiegelt.
- Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ist per USB an das NAS angeschlossen. Die USV sendet über USB Signale an das NAS, wenn der Strom ausfällt und sobald wieder Strom vorhanden ist. Damit kann das NAS im Falle eines Stromausfalls ohne Datenverlust herunter- und wieder hochgefahren werden.
- Der Switch verbindet alle Komponenten im System miteinander und ermöglicht so Fernwartung und Fernzugriff.
- Der Router stellt eine Verbindung mit dem Internet her und bietet eine Firewall an.
- Im Schaltschrank UzL befindet sich ein Arduino Nano mit einem DHT22-Sensor, welcher die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit misst. Damit wird eine dynamische Lüftungssteuerung im Schaltschrank der UzL ermöglicht. Der Arduino ist per USB an das NAS angeschlossen. Es verfügt somit über keine eigene IP-Adresse.
- WSN UzL: Hierbei handelt es sich um das drahtlose Sensornetzwerk (engl. Wireless Sensor Network, kurz WSN) der UzL. Dies schließt das Gateway UzL mit ein.
- Das Gateway UzL ist ein spezieller Sensorknoten im Sensornetz der UzL. Der Gateway-Knoten ist der einzige Sensorknoten, welcher über eine Serielle-Schnittstelle-zu-USB-Konverter per USB an das NAS angeschlossen ist. Es verfügt somit über keine eigene IP-Adresse.
- Über den Messrechner IBF werden alle erforderlichen Wartungs- und Steuerarbeiten an der entsprechenden Sensorik vorgenommen.
- Sensorik IBF ist die installierte Sensorik.
- Rechner „Kamera“ wird verwendet, um die Kameras anzusteuern.
- Kamera 1/2 werden zur Referenzdatenerzeugung für die Fahrzeugerkennung eingesetzt.
- Über den Messrechner MSE werden alle erforderlichen Wartungs- und Steuerarbeiten an der entsprechenden Sensorik vorgenommen.
- Fernüberwachungsgerät im Schaltschrank MSE wird zur Überwachung (z. B. Messrechner-Ausfall) des Messrechners und des Schaltschranks verwendet und sendet E-Mail- und SMS-Alarmsignale, sollten Fehler auftreten.
- Sensorik MSE ist die von MSE installierte Sensorik.
- Insgesamt sind im Gesamtsystem vier externe Festplatten vorgesehen, von denen maximal zwei zu jeder Zeit im NAS angeschlossen sind. Die zwei übrigen Festplatten dienen der manuellen Abholung erfasster Messdaten, welche aufgrund der Größe nicht über den Internetanschluss abtransportiert werden können. Die Festplatten werden entsprechend ausgetauscht. Jeweils eine der Festplatten wird von der MSE und vom IBF verwendet.

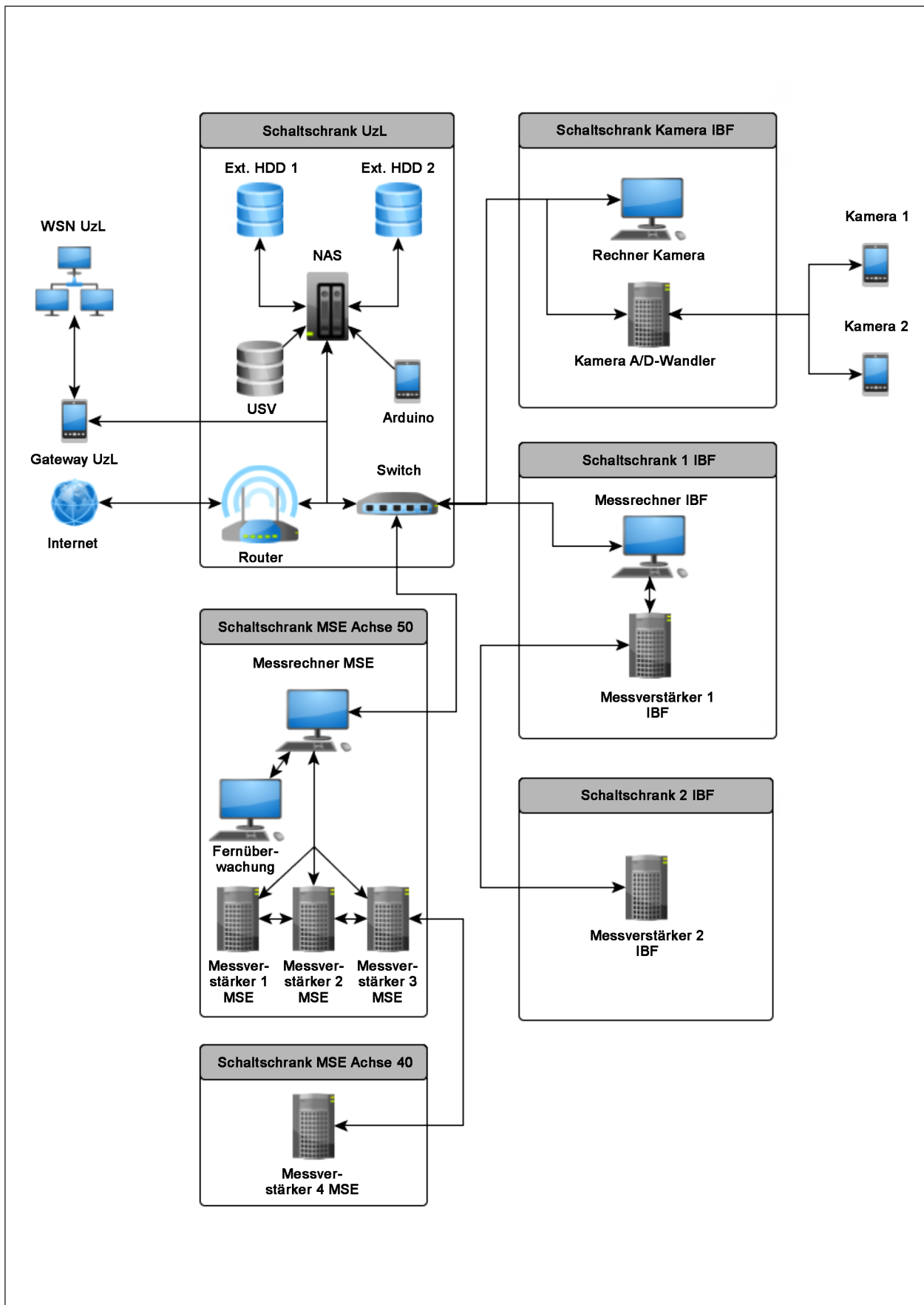


Bild 64: Systemarchitektur der intelligenten Brücke. Dargestellt sind die verwendeten Geräte und ihre Verbindungen. An das NAS und an den Messrechnern ist jeweils die Sensorik der Projektpartner angeschlossen.

3.2 Datenmanagement

Im NAS wird ein RAID6-System bestehend aus neun sechs Terabyte Festplatten verwendet. Bei einem RAID6 können maximal zwei Platten ausfallen. Eine zehnte sechs Terabyte Festplatte ist als sogenannte „Hot-Spare“-Festplatte vorgesehen. Sobald eine Festplatte im RAID ausfällt, wird diese Platte automatisch verwendet, um das RAID zu reparieren.

Das NAS selbst ist über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) vor Datenverlust durch Stromausfälle abgesichert. Sollte es zu einem Stromausfall kommen, startet sich das System nach einem kontrollierten Herunterfahren über eine USV von selbst neu, sobald wieder Strom vorhanden ist. Die Kommunikation zwischen USV und NAS findet über USB statt.

Alle gemessenen Rohdaten werden auf dem NAS in entsprechenden Verzeichnissen der Projektpartner hinterlegt. Zudem sind zwei externe Festplatten angeschlossen, welche für die manuelle Datenabholung eingesetzt werden. Dieser wird nur vom IBF und von der Maurer Engineering verwendet.

Das IBF hinterlegt zusätzlich täglich eine geringe Menge Videodaten.

3.2.1 Datenmodell

Bezüglich der Daten wird zwischen Rohdaten vor der Interpretation, Rohdaten nach der Interpretation und aggregierten Daten unterschieden. Rohdaten vor der Interpretation werden zwar erfasst, sollen jedoch zu keinem Zeitpunkt visualisiert werden.

- Rohdaten vor der Interpretation werden direkt von den Messrechnern und deren Peripherie generiert und stellen die von den Sensoren erzeugten Werte dar (z. B. Spannungswerte oder Widerstände).
- Rohdaten nach der Interpretation sind die von den Messsystemen erfassten Werte, die in physikalische Einheiten umgerechnet werden, d. h., ein Drucksensor sollte Werte in der Einheit Pascal liefern, ein Abstandssensor einen Wert mit der Einheit m oder ein Temperatursensor in der Einheit Grad Celsius.
- Aggregierte Daten werden aus den Rohdaten nach der Interpretation gewonnen. Aus aggregierten Daten können wiederum höher aggregierte Daten gewonnen werden. Während, wie

oben beschrieben, Rohdaten nach der Interpretation immer noch Werte eines einzelnen Sensors zu einem bestimmten Messzeitpunkt umfassen, können aggregierte Daten aus mehreren Messdaten eines einzelnen Sensors, die zu verschiedenen Zeiten gewonnen wurden, aber auch aus Daten mehrerer Sensoren zu einem Zeitpunkt und sogar wieder aus schon aggregierten Daten gewonnen werden.

3.2.2 Datenformat

Die aggregierten Daten bzw. auch die Rohdaten nach der Interpretation müssen in einer gemeinsamen Datenbank gespeichert werden, um diese

- weiterverarbeiten zu können,
- für einen Quervergleich austauschen zu können,
- weiter zu interpretieren und aggregieren zu können und
- auf einer Webseite bzw. App geeignet grafisch darzustellen.

Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, ein gemeinsames Datenformat zu verwenden, in dem alle gemessenen Werte repräsentiert werden, um eine einfache Auswertung zu gestatten.

Das Datenformat ist so ausgelegt, dass es mehrere Brücken verwalten kann. In diesem Kapitel werden grobe SQL-Schemata angegeben.

3.2.2.1 Brücken

Es gibt zunächst eine Tabelle „Bridge“. Damit wird das System ausbaufähig ausgelegt und könnte an weiteren Brücken eingesetzt werden. Diese Tabelle beinhaltet generelle Informationen zur Brücke (siehe Tabelle 14).

ID (Integer)	Eindeutiger Identifikator einer Brücke
Name (String)	Eindeutiger Name einer Brücke im Gui
Erstellungsdatum (Date)	Erstellungszeitpunkt der Tabelle
Adresse (String)	Die zentrale IP/MAC-Adresse der Brücke
Lat (Float)	Geo-Koordinate der Brücke 1
Lng (Float)	Geo-Koordinate der Brücke 2

Tab. 14: Datenmodell einer Brücke in der Webapplikation und Datenbank

3.2.2.2 Sensorknoten

Die verschiedenen Knoten (Sensorknoten/Messsysteme) gehören immer exakt zu einer Brücke. Diese werden in der Tabelle „Nodes“ gespeichert (siehe Tabelle 15). Jedes Messsystem hat eine eindeutige Adresse.

3.2.2.3 Kanäle oder Sensoren

Tabelle 16 zeigt das Datenmodell eines Sensors (Kanals), welches immer einem Sensorknoten zugeordnet ist.

ID (Integer)	Zuweisungs-ID für angeschlossene Sensoren
Bridge_ID (Integer)	Zuweisung von Sensorknoten zu Brücken
Adresse (String)	Die Adresse (IP oder MAC) des Knotens
Erstellungsdatum (Date)	Die Zeit, wann dieser Datensatz erstellt wurde

Tab. 15: Datenmodell eines Sensorknotens in Datenbank und Webapplikation

ID (Integer)	Eindeutiger Identifikator eines Sensors
Node_ID (Integer)	Zuweisung von Sensoren zu Knoten
Unit_fundamental_ID (Integer)	Die grundlegende Messeinheit der Sensoren (z. B. m/s)
Erstellungsdatum (Date)	Die Zeit, wann dieser Datensatz erstellt wurde
Unit_target_ID (Integer)	Die Zieleinheit der Sensorwerte (z. B. m/h)
Unit_prefix_ID (Integer)	Das Präfix der Zieleinheit (z. B. k (Kilo))
Beschreibung (String)	Metasprachliche Beschreibung der Messung

Tab. 16: Datenmodell eines Sensors (Kanals). Diese sind immer einem Sensorknoten zugeordnet

3.2.2.4 Einheiten

Zur Berechnung der Einheiten werden noch drei weitere Tabellen benötigt (siehe Tabelle 17 bis 19).

Units_fundamental	
ID (Integer)	Unit (String)
1	unknown
2	V
3	K
...	...
n-1	m/s
n	m

Tab. 17: Beispiel einer ID zu Einheiten Zuordnung

Unit_prefixes			
ID (Integer)	Factor (decimal)	Name (String)	Symbol (String)
...
8	1.000	Kilo	k
9	100	Hekto	h
10	10	Deka	da
11	1	-	-
12	0,1	Dezi	d
13	0,01	Zenti	c
14	0,001	Milli	m
...

Tab. 18: Beispielhafte Auflistung verschiedener Einheiten Präfix-Werte

Units_derived			
ID (Integer)	Unit_fundamental (Integer)	Unit_target (String)	Formular (String)
...
3	7	m/h	X*360 s/h

Tab. 19: Beispiele für inferierte Einheiten

3.2.2.5 Tabellen RTMS für Brückenkenwerte

In Tabelle 20 bis 28 werden die Tabellenspezifikationen der aggregierten Daten des IBF aufgezeigt. Sich wiederholende Muster werden dabei durch die Buchstaben *k* und *n* gekennzeichnet.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
fromTime	Long	Intervallanfang
toTime	Long	Intervallende
lkwCount	Int	Gesamte Lkw-Anzahl
lkwoACount	Int	Lkw ohne Anhänger
lkwmACount	Int	Lkw mit Anhänger
lkwsattelCount	Int	Sattelschlepper

Tab. 20: Spezifikation der Tabellen Lkw0 – Lkw3 sowie LkwHistory

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
RTMS_ID_String	Long	ID String RTMS Intern
time	Long	Datum/Zeit Achse 1 ÜKO
lane	Int	Spur 1 oder 0
type	Int	Fz-Typ Code
velocity	Int	Fz-Geschwindigkeit
veh_dist	Int	Abstand zum vorh. FZ [cm]
gvw	Int	Gesamtgewicht [kg]
flag_overload	Int	Flag Überladung
naxles	Int	Anzahl Achsen
n_axles_type	Int	Typ Achse <i>n</i>
n_axles_load	Int	Achslast Achse <i>n</i> [kg]
n_axles_dist	Int	Abstand Achse <i>n</i> [cm]
cam_n_pic_k	B64String	Kamera FR <i>n</i> für B <i>k</i>
diag_n	B64String	Diagramm <i>n</i>

Tab. 21: Spezifikation der Fahrzeugdetaildaten. *n* und *k* stehen für eine sich wiederholende Anzahl Tabellenspalten desselben Typs.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Name_MSPoint	String	Name der Messstelle
Name_MQ	String	Name des Messquerschnittes
UNIT	String	Einheit
Has_ValueDB_Data	Boolean	Zeiger auf ValueDbData vorhanden
ValueDB_Data_Full_Name	String	URI zu ValueDB-Data
ValueDB_Data_Full_NoLines	Int	Tabellengröße
ValueDB_Data_LastVal_Name	String	Letzte Werte und Bilder eines Sensors
...

Tab. 22: Metainformationen aller Systeme und Sensoren des IBF. Die Datenbankstruktur wurde exemplarisch für eine Messstelle gezeigt. Diese gilt für StatusDbData, ResultDbFFTDData, ResultDbFatigueData, ResultDbStressData und ValueDbData.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
Hour-Min	Long	Stundenmaximum
Hour-Max	Float	Stundenminimum
Hour-Mean	Float	Stundenmittel
Vis-Time-From	Long	Intervallbeginn
Vis-Time-To	Long	Intervallende
Vis-Min-Val	Float	Mindestwert im Bild
Vis-Max-Val	Float	Maximalwert im Bild
Vis-Offset-Val	Float	Offset im Bild
Vis-Pic	B64String	Bild als b64String

Tab. 23: Spezifikation der Tabelle ValueDB_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
InternPNumber	Long	Stundenmaximum
MeasurementFileName	String	Stundenminimum
Eval_and_Status_Time	Long	Stundenmittel
HeaderOK	Boolean	Intervallbeginn
ImportOK	Boolean	Intervallende
FileAlertMessage	String	Mindestwert im Bild
SystemStatusAlert	Boolean	Maximalwert im Bild
SystemStatusMessage	String	Offset im Bild

Tab. 24: Tabellenspezifikation der Tabelle StatusDB_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
StatStress_toNow_Max_Abs	Float	Maximalwert bisher absolut
StatStress_toNow_Max_Rel	Float	Maximalwert bisher relativ
StatStress_toNow_Min_Abs	Float	Minimalwert bisher absolut
StatStress_toNow_Min_Rel	Float	Minimalwert bisher relativ
StatStress_Predicted_A_Max_Abs	Float	char. Maximalwert aus allen Daten bisher absolut
StatStress_Predicted_A_Max_Rel	Float	char. Maximalwert aus allen Daten bisher relativ
StatStress_Predicted_A_Min_Abs	Float	char. Minimalwert aus allen Daten bisher absolut
StatStress_Predicted_A_Min_Rel	Float	char. Minimalwert aus allen Daten bisher relativ
StatStress_Predicted_B_Max_Abs	Float	char. Maximalwert aus Daten 12 Wochen absolut
StatStress_Predicted_B_Max_Rel	Float	char. Maximalwert aus Daten 12 Wochen relativ
StatStress_Predicted_B_Min_Abs	Float	char. Minimalwert aus Daten 12 Wochen absolut
StatStress_Predicted_B_Min_Rel	Float	char. Minimalwert aus Daten 12 Wochen relativ

Tab. 25: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Stress_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Time	Long	Zeitstempel
Calc_SVal_toNow	Float	
Calc_SVal_lastWeek	Float	
Calc_SVal_lastMonth	Float	
Calc_SVal_lastYear	Float	
Calc_eqDelta_toNow_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite bisher absolut
Calc_eqDelta_lastWeek_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Wo absolut
Calc_eqDelta_lastMonth_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Mo absolut
Calc_eqDelta_lastYear_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Jahr absolut
Calc_eqDelta_toNow_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite bisher
Calc_eqDelta_lastWeek_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Wo
Calc_eqDelta_lastMonth_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Mo
Calc_eqDelta_lastYear_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Jahr
DeltaS_DB_Name	String	URI zu Detailtabelle

Tab. 26: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDb_Fatigue_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
DeltaSClass	Long	
DeltaepsClass	Float	
N	Float	

Tab. 27: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Fatigue_DeltaS_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
NatFreq_Number_A	Int	
NatFreq_Val_A	Float	
NatFreq_Number_B	Int	
NatFreq_Val_B	Float	
NatFreq_Number_C	Int	
NatFreq_Val_C	Float	
NatFreq_Number_D	Int	
NatFreq_Val_D	Float	
ResultVal_A	Float	rel. Eigenfrequenz A
ResultVal_B	Float	rel. Eigenfrequenz B
ResultVal_C	Float	rel. Eigenfrequenz C

Tab. 28: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_FFT_Data

3.2.2.6 Tabellen Lager und Dehnfuge

In Tabelle 29 bis 32 werden die Tabellenspezifikationen der Aggregierten Daten der Maurer Engineering aufgezeigt. Sich wiederholende Muster werden dabei durch die Buchstaben k und n gekennzeichnet.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
time	Long	Zeitstempel
fahrzeugklasse	Int	
anzahlAchsen	Int	
gewicht	Float	
geschwindigkeit	Float	
spur	Int	

Tab. 29: Datenbanktabelle für die Übergangskonstruktion

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
time	Long	Zeitstempel
maxValue	Float	
minValue	Float	
medValue	Float	
eigenfrequenz	Float	
status	Boolean	

Tab. 30: Tabellenspezifikation der Tabelle MaurerStatusBD

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
NTP	Long	Zeitstempel
erfassungsquote	Float	
dS_40_3_1_mean	Float	
dS_40_3_1_max	Float	
dS_40_3_1_min	Float	
dS_40_3_2_mean	Float	
dS_40_3_2_max	Float	
dS_40_3_2_min	Float	
dS_40_3_3_mean	Float	
dS_40_3_3_max	Float	
dS_40_3_3_min	Float	
wa_mean_mean	Float	
wa_mean_max	Float	
wa_mean_min	Float	
rot_40_3_mean	Float	
rot_40_3_max	Float	
rot_40_3_min	Float	
rot_40_3_75q	Float	
rot_40_3_25q	Float	
akk_gw_eben_temp	Float	
akk_gw_eben_temp_verkehr	Float	
akk_gw_eben_temp_ges		
akk_gw_eben_temp_verkehr_ges	Float	
akk_gw_eben_temp_verkehr_prognose	Float	
akk_gw_sphaerisch_temp	Float	
akk_gw_sphaerisch_temp_verkehr	Float	
akk_gw_sphaerisch_temp_ges	Float	
akk_gw_sphaerisch_temp_verkehr_ges	Float	
akk_gw_sphaerisch_temp_verkehr_prognose	Float	
gleitspalt	Float	
eigenfrequenz1	Float	
Eigenfrequenz2	Float	
f_40_1_mean	Float	
f_40_1_max	Float	
f_40_1_min	Float	
f_40_3_mean	Float	
f_40_3_max	Float	
f_40_3_min	Float	

Tab. 31: Tabellenspezifikation der Tabelle LagerData

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
ansicht_ID	Integer	ID
infoString_1	String	
infoString_2	String	
infoString_3	String	
infoString_4	String	
infoString_5	String	
infoString_6	String	
infoString_7	String	
infoString_8	String	
infoString_9	String	
infoString_10	String	
infoString_11	String	
infoString_12	String	
infoString_13	String	
infoString_14	String	
infoString_15	String	
infoString_16	String	
infoString_17	String	
infoString_18	String	
infoString_19	String	
datenPfad1 – datenPfad30	String	

Tab. 32: Tabellenspezifikation der Tabelle MaurerMetadata

3.2.2.7 Tabelle Statusseite

In Tabelle 33 bis 35 wird die entwickelte Tabellenspezifikation für die Daten auf der Statusseite dargestellt. Aus den verschiedenen Teilsystemen werden die aufbereiteten Daten in diese definierte Datenbank übertragen.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Weather_UpDateTime	Long	Zeitstempel
Weather_T_Out_Current	Float	Momentane Temperatur
Weather_T_Out_DayMin	Float	Tagesminimaltemperatur
Weather_T_Out_DayMax	Float	Tageshöchsttemperatur
Weather_RelHumidity_Current	Float	Momentane Luftfeuchtigkeit
Weather_RelHumidity_DayMin	Float	Tagesminimum Luftfeuchtigkeit
Weather_RelHumidity_DayMax	Float	Tagesmaximum Luftfeuchtigkeit
Weather_WindSpeed_Current	Float	Momentane Windgeschwindigkeit
Weather_WindSpeed_DayMin	Float	Tagesminimum Windgeschwindigkeit
Weather_WindSpeed_DayMax	Float	Tagesmaximum Windgeschwindigkeit
Weather_WindDirection_Current	Float	Momentane Windrichtung
Weather_WindDirection_DayMin	Float	Tagesminimum Windrichtung
Weather_WindDirection_DayMax	Float	Tagesmaximum Windrichtung
Weather_Precipitation_Current	Float	Momentaner Niederschlag
Weather_Precipitation_DayMin	Float	Tagesminimum Niederschlag
Weather_Precipitation_DayMax	Float	Tagesmaximum Niederschlag
SystemStatus_UpDateTime	Long	Zeitpunkt des letzten Updates
SystemStatus_Inet_Speed	Float	Internetgeschwindigkeit
SystemStatus_Inet_Availability	Float	Internet-Verfügbarkeit
SystemStatus_Computer_A_Status_STR	String	Statuscode Rechner A
SystemStatus_Computer_A_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Computer_B_Status_STR	String	Statuscode Rechner B
SystemStatus_Computer_B_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Server_Status_STR	String	Statuscode NAS
SystemStatus_Server_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Storage_Val	Float	Systemauslastung
SystemStatus_Storage_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode

Tab. 33: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 1

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
BridgeStatus_UpDateTime	Long	Letzter Updatezeitpunkt
BridgeStatus_StaticCapacity_Val	Float	
BridgeStatus_StaticCapacity_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_FatigueCapacity_Val	Float	
BridgeStatus_FatigueCapacity_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExternalPreStress_Val	Float	
BridgeStatus_ExternalPreStress_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BridgeStiffness_Val	Float	
BridgeStatus_BridgeStiffness_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BearingStatus_A_Val	Float	
BridgeStatus_BearingStatus_A_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BearingStatus_B_Val	Float	
BridgeStatus_BearingStatus_B_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExpansionJointStatus_A_Val	Float	
BridgeStatus_ExpansionJointStatus_A_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExpansionJointStatus_B_Val	Float	
BridgeStatus_ExpansionJointStatus_B_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_OverAllStatus_Val	Float	
BridgeStatus_OverAllStatus_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
TrafficData_UpDateTime	Long	
TrafficData_All_LKW_Count_CurrentDay	Int	Anzahl Lkw Tag
TrafficData_All_LKW_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 28 Tage
TrafficData_LKW_oA_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw ohne Anhänger 28 Tage
TrafficData_LKW_mA_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw mit Anhänger 28 Tage
TrafficData_LKW_Sat_Count_Last28Days	Int	Anzahl Sattelschlepper 28 Tage
TrafficData_LKW_Other_Count_Last28Days	Int	Anzahl Sonstige 28 Tage

Tab. 34: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 2

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
TrafficData_LKW_oA_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw ohne Anhänger 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_mA_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw mit Anhänger 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_Sat_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Sattelschlepper 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_Other_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Sonstige 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_2_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 2-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_3_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 3-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_4_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 4-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_5_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 5-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_6_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 6-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_over6_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 6+-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_2_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 2-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_3_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 3-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_4_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 4-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_5_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 5-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_6_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 6-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_over6_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 6+-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_low_20ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw -20 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_20_30_ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 20-30 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_30_40_ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 30-40 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_up_20ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 4+ Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_low_20ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw -20 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_20_30_ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 20-30 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_30_40_ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 30-40 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_up_20ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 40+ Tonnen 28 Tage Prozent

Tab. 35: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 3

3.2.3 Datenzugriff

Es stehen mehrere Möglichkeiten zum Schreib- und Lesezugriff auf die Daten zur Verfügung.

3.2.3.1 Webapplikation

Der generelle Zugriff auf alle Daten findet über zwei Web-Anwendungen statt:

- Zugriff auf das NAS über eine Anwendung (<https://intelligente-bruecke.synology.me:5001/>)
- Zugriff auf die von der Universität zu Lübeck entwickelte Anwendung (derzeit auf einem Entwicklungsserver der Universität zu Lübeck installiert): (<https://ibast.itm.uni-luebeck.de/dev>)

Dafür können diverse Benutzer mit verschiedenen Rollen (z. B. BMVI, BAST, ABDNB) angelegt wer-

den, welche verschiedene Detailgrade der Brücke sehen können.

3.2.3.2 Datenzugriff via REST

Die Rohdaten nach der Interpretation sowie die aggregierten Daten werden in einer Datenbank gespeichert. Um den Zugriff darauf so einfach wie möglich zu gestalten, stellen wir eine WebServiceSchnittstelle entsprechend der REST-Technologie über HTTP zur Verfügung. Für diese Schnittstelle werden Programmierbibliotheken generiert, deren Methoden sich in eigene Programme einbinden lassen. Über diese Schnittstellen können Daten von allen Partnern in die Datenbank geschrieben und auch wieder ausgelesen werden. Da REST-Schnittstellen HTTP-basiert sind, kann eine einfache Authentifizierung gewährleistet werden.

Alle Tabellen unterstützen dieselben http-Methoden. Folgendes Beispiel illustriert das Vorgehen anhand der Tabelle StatusDB_DataResource:

- GET** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/last“
- GET** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/{from}/{to}“
- PUT** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}“
- POST** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}“
- POST** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/batch“
- DELETE** „https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}“

{id} entspricht dabei einem beliebigen String. Von jeder Tabelle können beliebige Varianten angelegt werden, welche durch die Id gekennzeichnet werden. Die einzelnen Tabellennamen für die URLs sind den Tabellenspezifikationen entnommen worden. Daten der Maurer Engineering sind entsprechend Tabellenbezeichner und Identifikator verfügbar unter der Adresse:

https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/Maurer/{Tabellenname}/{id}/(last)

3.2.3.3 Netzlaufwerk-Freigaben

Wie oben beschrieben, werden sowohl das NAS-System als auch die externen Festplatten als Netzlaufwerk mittels SMB freigegeben. Damit können alle Arten von Daten einfach in einem für einen Rechner freigegebenen Verzeichnis abgelegt werden. Diese werden automatisiert auf eine externe USB-Platte gespiegelt, welche dann zu Analyse-zwecken im Labor abgeholt werden kann.

Im Prinzip können Netzlaufwerk-Freigaben auch nach außerhalb erfolgen, z. B. an Rechner in Weimar, München, Lübeck oder Bergisch Gladbach.

3.3 Sicherheitskonzept

In diesem Kapitel werden die Sicherheitsmaßnahmen erläutert, welche die intelligente Brücke vor Zugriff/Missbrauch Dritter schützen sollen. Es werden sowohl Hardware- als auch Softwareaspekte erläutert. Bild 65 zeigt die aktuelle Architektur des Gesamtsystems mit besonderem Augenmerk auf die Sicherheit und die Arten des Zugriffs.

3.3.1 Generelle Sicherheitsmaßnahmen

Damit das Gesamtsystem nicht von dritten beeinträchtigt werden kann, wurden diverse Sicherheits-

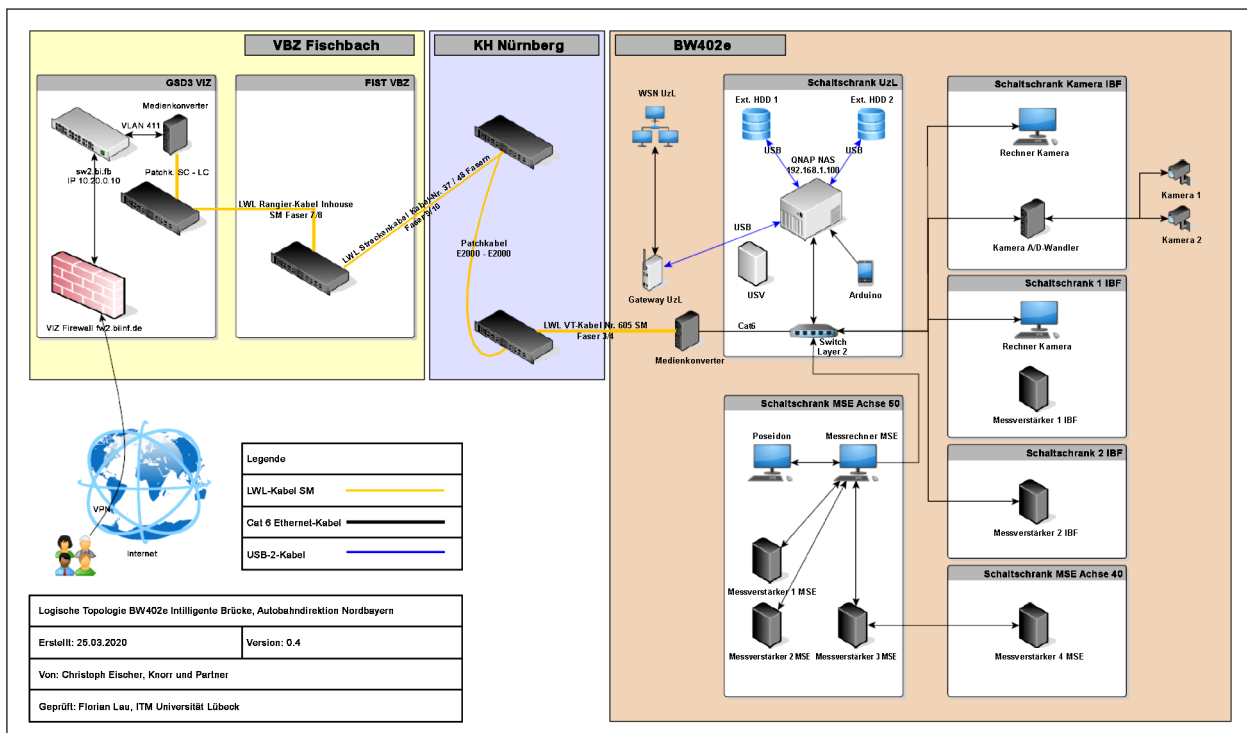


Bild 65: Architektur des Gesamtsystems inklusive Router und weiterer Infrastruktur in Fischbach

maßnahmen getroffen. Unter anderem findet der Großteil der Fernzugriffe über SSH-Tunnel statt.

Die Sicherheit des Gesamtsystems ist somit stark von der Sicherheit von SSH abhängig. Das NAS verwendet die aktuell sichersten Protokolle.

Die SSH-Informationen, bei „sehr sicheren“ Systemeinstellungen im Synology DSM lauten wie folgt:

- Cipher:
aes128-ctr, aes128-gcm@openssh.com,
aes192-ctr, aes256-ctr, aes256-gcm@openssh.com
- KEX (key-exchange):
curve25519-sha256@libssh.org, diffie-hellman-group-exchange-sha256
- MAC:
hmac-sha2-256, hmac-sha2-256-etm@openssh.com, hmac-sha2-512, hmac-sha2-512-etm@openssh.com, umac-128-etm@openssh.com, umac-128@openssh.com

Die aktuell auf dem NAS installierte SSH-Version ist OpenSSL 1.0.2g vom 1. März 2016.

3.3.2 Router

Der Router wurde durch ein Exemplar der Firma kp-Consult ausgetauscht, welche die Hardware nun betreut und einen Zugriff auf das NAS nur noch mittels eines VPN erlaubt, um so zusätzliche Sicherheit zu gewähren.

3.3.2.1 Erstinstallation

Im Rahmen der Erstinstallation des NAS wurde ein Router der Firma D-Link (D-Link H1 8.01) verbaut. Auf diesen Router konnte nur aus dem Intranetz der Brücke oder mittels eines SSH-Tunnels (realisiert über das NAS) zugegriffen werden.

Nur folgende Ports wurden bedient:

- 21 – FTP_aktiv + FTPS_aktiv
- 22 – SSH
- 5001 – Gesicherter Zugriff auf die Weboberfläche der Synology-Diskstation
- 55536 – 55567 – FTP_passiv + FTPS_passiv

Der Router war wie alle anderen Geräte/Zugänge auch passwortgeschützt.

3.3.2.2 Ersatzinstallation

Durch den Ausfall des NAS am 08.02.2019 war kein Zugriff auf alle Systeme von außen möglich. Entsprechend der Systemauslegung wurden alle Zugriffe von außen über SSH-Tunnel realisiert, die über das NAS aufgebaut wurden. Die gleiche Situation trat bereits im September 2017 auf (vgl. Kapitel 3.5.1).

Aufgrund der zu erwartenden längeren Ausfallzeit des NAS (Garantieabwicklung – vgl. ebenfalls Kapitel 3.5.1) wurde am 12.02.2019 der vorhandene Router deaktiviert und zunächst temporär ein anderes Gerät verbaut. Hierbei handelte es sich um das Gerät FritzBox 4040 der Firma AVM. Dieser Router ermöglicht die Herstellung gesicherter VPN-Verbindungen von außen. Somit konnte eine alternative, gesicherte, externe Zugriffsmöglichkeit unabhängig vom NAS realisiert werden.

3.3.3 Physische Sicherheit

Die physische Sicherheit der intelligenten Brücke ist durch verschiedene Mechanismen sichergestellt. Der Zugriff zur Brücke selbst ist durch eine verschlossene Tür nur autorisiertem Personal zugänglich. Alle Hardwarekomponenten an der Brücke sind in entsprechenden Schaltschränken untergebracht, für die ebenfalls spezielle Schlüssel benötigt werden. Diese Schränke sichern die Hardware ebenfalls gegen Schädlinge wie z. B. Mäuse und andere Nager ab.

Alle innerhalb der Brücke angebrachten Sensorknoten sind durch die verschlossene Eingangstür gesichert und fest verschlossen. Durch die Gerätegehäuse ist sichergestellt, dass keinerlei Nager oder Insekten Schaden anrichten können. Die außerhalb der Brücke angebrachten Sensorknoten sind so angebracht worden, dass Randalierer nur mit professionellen Mitteln wie Hebebühnen an die entsprechenden Geräte gelangen können.

3.3.4 Passwörter

Verwendete Passwörter werden unter keinen Umständen an unbefugte Dritte weitergegeben. Sollte dies bekannt werden, werden alle im System verwendeten Passwörter geändert. Das NAS verfügt über eine Konfigurationsmöglichkeit, welche einen Passwortwechsel mit einer beliebigen Frequenz erzwingen kann. Davon wird für einen störungsfreien,

autarken Betrieb des Systems kein Gebrauch gemacht, da hierdurch zum Beispiel die permanente Datensynchronisation zwischen den Messrechnern und dem NAS gestört werden würde. Der Personenkreis mit Zugriffsmöglichkeiten ist für den sicheren Betrieb des Systems entsprechend qualifiziert.

3.3.5 Benutzer

Der Admin-Benutzer des NAS (Username: admin) ist durch ein zufallsgeneriertes 16-stelliges Passwort gesichert. Der Schlüsselraum umfasst groß- und kleingeschriebene Buchstaben, Zahlen sowie Sonderzeichen.

Gemäß Fachliteratur gelten Passwörter der Länge 12 als unknackbar – 16 Stellen erhöhen die Sicherheit noch einmal enorm.

Somit ergeben sich $(26+26+10+27)^{16}$ verschiedene Passwörter. Nach zehn Versuchen kann eine IP für zehn Minuten keinen erneuten Login-Versuch unternehmen.

Nur der Admin-Benutzer verfügt über die vollständigen Rechte auf dem NAS.

Neben dem Admin-Benutzer wurden weitere Benutzer eingerichtet, welche den gleichen Anforderungen an das Passwort gerecht werden. Diese Benutzer können in genau einen Verzeichnisbaum schreiben. Für alle anderen Verzeichnisse sind höchstens Leserechte vergeben.

3.3.6 Systemupdates

Das NAS selbst und damit die verwendete SSH-Version werden aktualisiert, sobald die Firma Synology Sicherheitsupdates für das NAS bereitstellt.

Die Sicherheit des Gesamtsystems ist maßgeblich von der SSH-Sicherheit abhängig.

3.4 Überwachung

Das NAS kann über drei Wege erreicht werden:

- Über die Weboberfläche der NAS (Synology Diskstation mit Betriebssystem Synology DSM~6.1) via HTTPS, abgesichert mit einem Let's Encrypt Zertifikat und TLS-Protokollen. Dieser Zugang wird benötigt, da das Synology DSM diese Schnittstelle zur Konfiguration vorsieht.

- Über SSH als Tunnel und für eine Notfall-Wartungsschnittstelle des NAS.
- Über FTP/S auf freigegebenen Verzeichnissen auf dem NAS, damit in der Entwicklungsphase einzelne Projektpartner auf anfallende Dateien (Sensor-/Kontrolldaten) zugreifen können.

Sollen Überwachungsaufgaben anfallen, werden diese über einen der angegebenen Kanäle erledigt.

Der Zentralserver (NAS) informiert die Universität zu Lübeck über Störungen im Betriebsablauf mit E-Mail-Benachrichtigungen, z. B. I/O-Fehler auf defekten RIAD-Festplatten.

3.5 Wartung und Instandsetzung

Das NAS informiert die Verantwortlichen täglich durch eine E-Mail über den Systemzustand. Sollte es zu Auffälligkeiten kommen, werden gesonderte E-Mails vom System selbst verschickt.

Monatlich wird eine Untersuchung der Speichermedien im NAS unternommen und an die Mitarbeiter der UzL geschickt. Sollte es zu Problemen kommen, versucht das System selbstständig Korrekturmaßnahmen zu unternehmen.

Sobald vorhanden, werden Aktualisierungen des Betriebssystems installiert.

Sollte es zu unerwarteten Stromausfällen kommen, wird der Zentralserver mittels der USV automatisch neugestartet. Sollte dies wider Erwarten nicht funktionieren, werden die Verantwortlichen über den Stromausfall informiert und gebeten, einen manuellen Neustart vorzunehmen.

Bei jedem Zugriff über die Weboberfläche des NAS wird sofort eine Schaltfläche mit dem Gesundheitszustand des Systems angezeigt.

3.5.1 Ausfälle

Am 19. November 2017 ist die Festplatte 11 im RAID6 System des Zentralservers ausgefallen. Es wurden über 66.000 fehlerhafte Sektoren erkannt und die Festplatte wurde am 11. Dezember 2017 planmäßig ausgetauscht. Die Festplatte steht nun als Hot-Spare-Festplatte zur Verfügung, sollte eine andere Festplatte einen Defekt erleiden.

Zwischen dem 05.09.2017 und dem 19.09.2017 kam es zu einem Betriebssystemausfall des Zentralservers. Dabei musste eine Neuinstallation vorgenommen werden. Die Ursache für den Fehler (Memoryleak in der Rootpartition) wurde behoben. Es kam nicht zu Datenverlust.

Am 05.02.2019 kam es zu einem Prozessorfehler am NAS. Das NAS ließ sich nach mehreren Versuchen nicht wieder hochfahren und musste nach Rücksprache mit dem Kundenservice ausgetauscht werden. Zur Abwicklung der Garantie wurde das Gerät an den Händler zurück übersandt, was 55 Tage in Anspruch nahm. Am 03.04.2019 wurde ein Ersatzgerät installiert. Alle Daten sind bei dem Austausch erhalten geblieben, da sich die Gerätespezifikation nicht geändert hat. Da das Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck seine Daten direkt an das NAS übermittelt und von dort weiter versendet, entstand in den 55 Tagen ein Messausfall. Danach konnte der Betrieb wie gewohnt wiederaufgenommen werden.

Am 03.04.2019 wurde beim Austausch des NAS eine defekte Festplatte ersetzt. Diese hatte zuvor zahlreiche Fehlermeldungen pro Tag produziert und ließ sich später nicht mehr starten. Die Festplatte konnte problemlos in das RAID6-System aufgenommen werden.

Am 19.11.2019 um 00:02 kam es zu einem Ausfall der RAID6 Festplatte Nummer 12.

Für Festplatte Nummer 6 werden ebenfalls Warnungen angezeigt, weswegen für diese ebenfalls ein Ersatz beschafft werden muss. Bislang kam es zu mindestens 175 Sektorenfehlern, was ein baldiges Ende der Lebensdauer der Festplatte beschreibt.

Am 05.03.2019 kam es zum Ausfall eines Repeaters der Universität zu Lübeck. Dadurch kam es zu keinerlei Beeinträchtigungen des Messsystems, da es sich lediglich um redundante Hardware handelt.

4 Messergebnisse

4.1 Verkehrsdaten

Durch geeignete Auswertungen der Messdaten werden Fahrzeuge identifiziert, die das Bauwerk passieren. Pro erfasstes Fahrzeug werden folgende Daten ermittelt:

- Fahrzeuggesamtgewicht
- Achsanzahl
- Achslasten
- Achsabstände
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Abstand zum vorhergehenden Fahrzeug
- Fahrzeugklassifizierung (Fahrzeugtyp)

Die Aufbereitung der Daten der einzelnen erfassten Fahrzeuge führt zu folgenden Daten:

- Fahrzeugzahlen pro Zeiteinheit
- Verkehrszusammensetzung
- Gesamtgewichtsverteilung definierter Fahrzeugtypen

4.1.1 Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge

4.1.1.1 Allgemeines

Im Projekts FE 15.0644 [2] wurde anhand der Messdaten eine Verkehrsklassifizierung, Achslast- sowie Gesamtgewicht der Fahrzeuge und eine Eigenüberwachung der Dehnfuge entwickelt.

4.1.1.2 Geschwindigkeit

Durch feinere Abstimmung der digitalen Filterparameter konnte die Genauigkeit der Geschwindigkeitserfassung insbesondere im Bereich der mittleren Geschwindigkeiten deutlich verbessert werden. Für Geschwindigkeiten zwischen 60 und 90 km/h liegt die mittlere Abweichung bei ca. 4 % (siehe Bild 66).

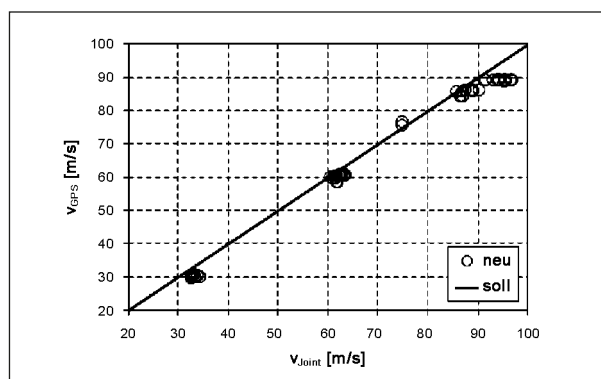


Bild 66: Gemessene Geschwindigkeit v_{Joint} zu tatsächlicher Geschwindigkeit v_{GPS} während der Referenzfahrten

Mit der Auswerteprozedur werden die Geschwindigkeiten im Mittelwert um 3,1 km/h überschätzt. Mittelwert der Differenz zwischen gemessener Geschwindigkeit und tatsächlicher Δ_{mean} sowie die zugehörige Standardabweichung Δ_{σ} nach Geschwindigkeitsbereich getrennt sind in Tabelle 36 zu finden.

4.1.1.3 Fahrzeugklassifizierung

Ziel ist eine Verkehrsklassifizierung nach dem 5+1 System anhand der Messgrößen Fahrzeuggesamtgewicht, Radstände und Geschwindigkeit.

Einzelfahrzeuge und Gespanne sowie Personen- und Lastkraftwagen lassen sich durch die Anzahl der Achsgruppierungen und das maximal zulässige Gesamtgewicht gut identifizieren. Die Unterscheidung zwischen Bus und Lkw ist anhand dieser Kriterien nicht möglich, da Gesamtgewicht und Radstände sehr ähnlich sind.

Als weiteres notwendiges Unterscheidungsmerkmal wird die Fahrzeuggeschwindigkeit hinzugezogen. Es wird angenommen, dass Busse eine höhere Geschwindigkeit aufweisen als Lkws (trotz der bestehenden Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Strecke). Somit wird der Verkehr anhand der in Tabelle 37 genannten Kriterien gruppiert.

v [km/h]	Δ_{mean} [km/h]	Δ_{σ} [km/h]
~30	3,4	0,6
~60	2,2	0,9
~90	3,7	2,6

Tab. 36: Abweichungen der gemessenen Geschwindigkeit zur tatsächlichen

No.	Art	n _{Achse} [-]	G (+ 10 %) [ton]	v (+ 10 %) [km/h]
1	Pkw, Lieferwagen	1-2	< 3,5	Beliebig
2	Pkw, Lieferwagen + Anhänger	>2	< 7	Beliebig
3	Lkw	2	7 – 40	< 80
4	Lkw, Lkw + Anhänger	> 2	7 – 44	< 80
5	Bus	2-3	7 – 40	80 – 100
0	beliebig			

Tab. 37: Unterscheidungsmerkmale für eine Fahrzeugklassifizierung 5+1

Eine Toleranz von +10 % berücksichtigt Messungenauigkeiten in Geschwindigkeit und Gesamtgewicht sowie geringe Überladungen.

Motorräder werden nach dieser Klassifizierung auch zu Pkw gezählt. Oft wird bei diesen aber durch das geringe Gesamtgewicht nur eine Achse erfasst.

Es wird angenommen, dass Lkw-Fahrer sich stärker an die Geschwindigkeitsbegrenzung halten als Pkw- und Lieferwagen-Fahrer.

Im Zeitraum vom 1. Juni bis 10. September 2018 wurden 2.702.837 Einzelfahrzeuge gezählt, diese teilen sich auf den beiden Fahrspuren wie in Bild 67 dargestellt auf die Kategorien auf.

Es zeigt sich eine erwartungsgemäße Verteilung der Fahrzeuge auf die beiden Spuren, insbesondere befinden sich auf der linken Spur weniger Fahrzeuge und kaum Lkw.

Die Zuordnung zu den Fahrzeugklassen ergibt eine unerwartet hohe Anzahl an Sonderfahrzeugen der Klasse 0. Hier werden einige leichte Pkws fälschlicherweise eingruppiert, bei denen die 2. Achse nicht deutlich im Signal erkennbar ist.

Die Fahrzeugerkennung wurde um einen Modus ergänzt, welcher in Stausituationen keine Fahrzeuggruppierung mehr vornimmt, sondern nur noch die Einzelachsen aufzeichnet. Da bei Geschwindigkeiten unter ca. 30 km/h die Abstände zwischen den Fahrzeugen in derselben Größenordnung liegen wie zwischen den Achsen innerhalb eines Fahrzeuges, kann diese Maßnahme die Fehlzuordnungen reduzieren.

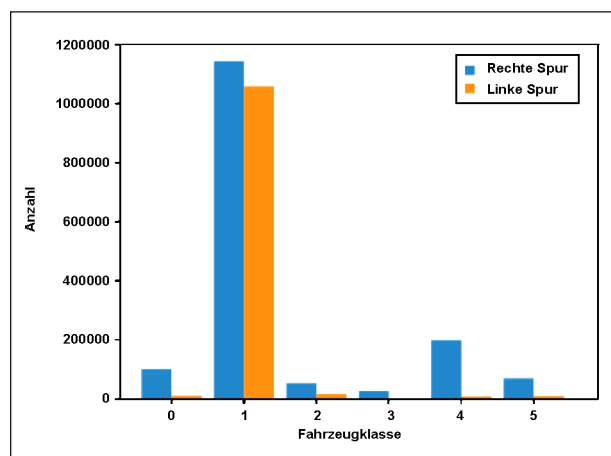


Bild 67: Fahrzeugklassifizierung für 1.06.2018 bis 10.09.2018

4.1.1.4 Achslasten und Fahrzeuggewicht

Im Projekt FE 15.0644 [2] wurden die Auswerteprozeduren gekoppelt mit numerischen Simulationen weiterentwickelt, um die Genauigkeit der gemessenen Achslasten zu verbessern. Anhand der Referenzfahrten vom April 2018 kann die Genauigkeit, die mit der ursprünglichen Auswerteprozedur erreicht wird, in Bild 68 bis Bild 71 achsweise sowie im Gesamtgewicht dargestellt werden.

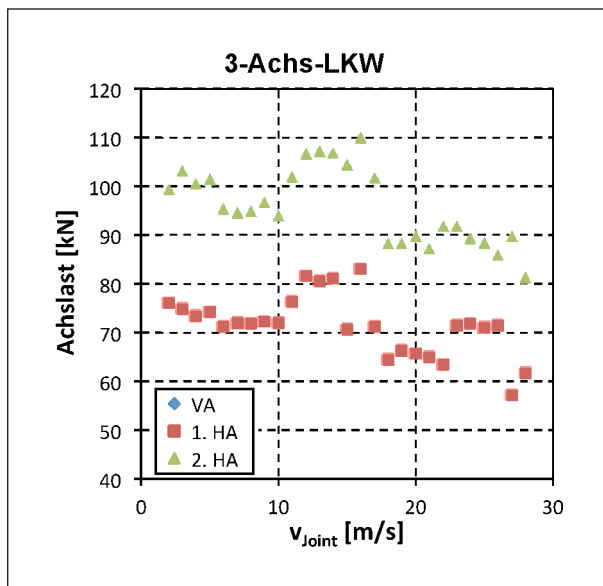


Bild 68: Gemessene Achslasten des 3-Achs-Lkws

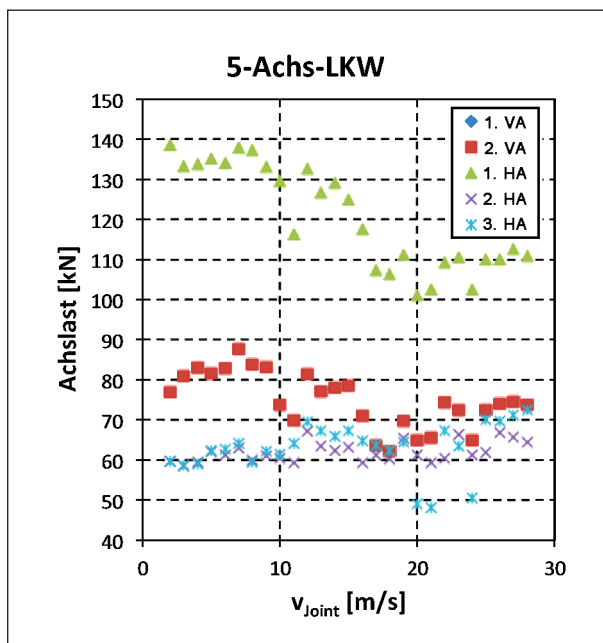


Bild 69: Gemessene Achslasten des 5-Achs-Lkws

Die Genauigkeit bei der Bestimmung des Gesamtgewichts für die Referenzfahrten vom April 2018 ist mit dieser ursprünglichen Auswerteprozedur wie folgt (siehe Bild 70 und Bild 71):

- Maximale Abweichung: 1,12
- Minimale Abweichung: 0,86
- Mittelwert: 1,00
- Standardabweichung: 0,06

Durch Einführung einer Kompensationsfunktion, welche die dynamischen Schwingungen der Fuglamellen rechnerisch eliminiert (vgl. Bild 72), wurde die Genauigkeit der Gewichtserkennung verbessert werden (siehe Bild 72, Bild 73, [2]).

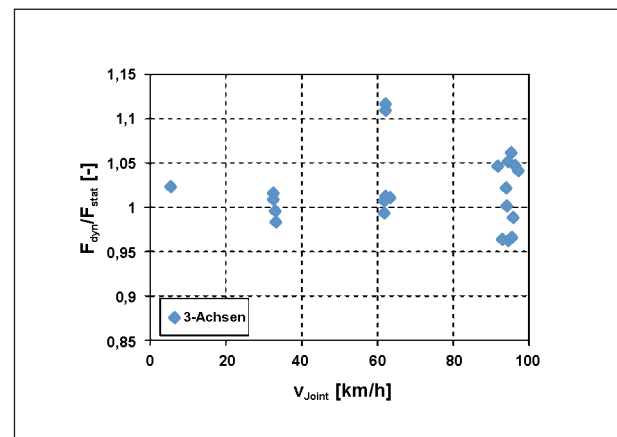


Bild 70: Gemessenes Gesamtgewicht zu statischem Gesamtgewicht für den 3-Achs-Lkw

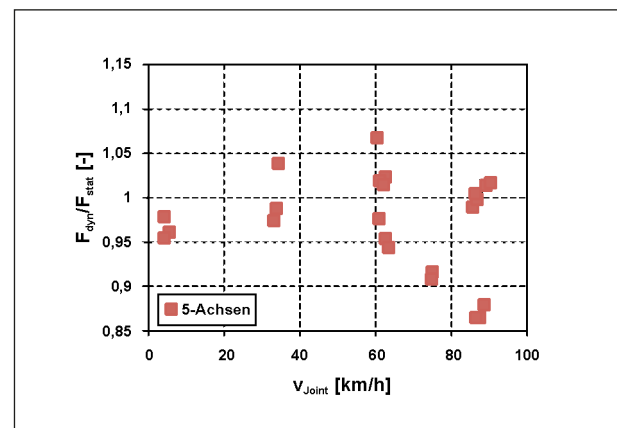


Bild 71: Gemessenes Gesamtgewicht zu statischem Gesamtgewicht für den 5-Achs-Lkw

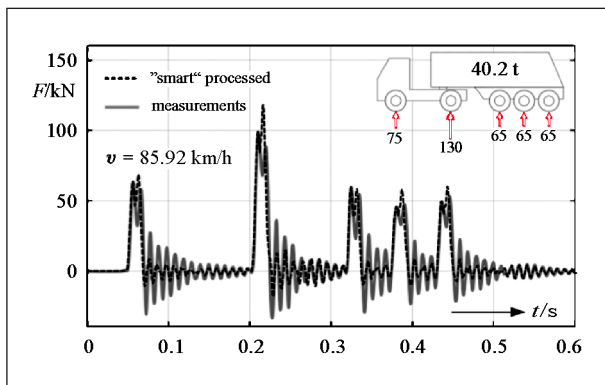


Bild 72: Wirkung des Kompensationsalgorithmus

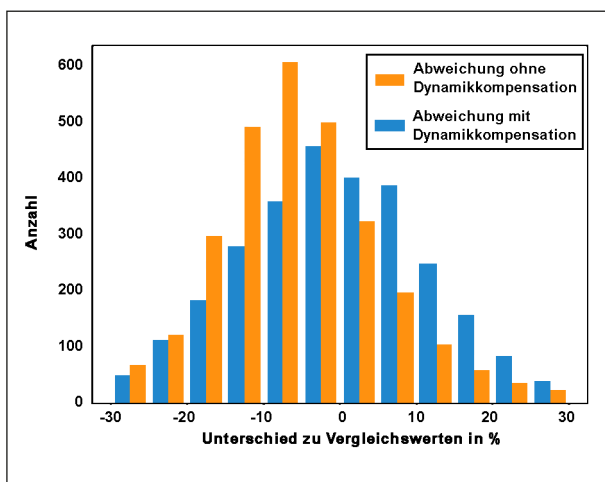


Bild 73: Prozentuale Abweichungen in den Fahrzeuggewichten zwischen Maurer und IBF mit und ohne Dynamikkompensation

4.1.2 RTMS

Die Ermittlung der in Kapitel 4.1 genannten Verkehrsdaten erfolgt im Zusammenspiel zwischen rechnerisch erstellten und an die Messungen kalibrierten Einflussflächen und den aktuellen Messergebnissen.

Die Entwicklung, Erprobung und Verbesserung der erforderlichen Algorithmen und programmtechnischen Umsetzungen ist Gegenstand des parallel laufenden FE-Projektes 15.631/2016/LRB [3].

Nachfolgend werden Ergebnisse der ermittelten Verkehrsdaten für die Projektlaufzeit (Datenauswertung für den Zeitraum Februar 2017 bis August 2021) zusammengestellt.

4.1.2.1 Fahrzeuganzahl (Lkw) pro Tag

In den nachfolgenden Diagrammen (Bild 74 bis Bild 81) ist die Anzahl der pro Tag erfassten Lkw-Fahrzeuge über den gesamten aktuellen Auswertzeitraum dokumentiert. Deutlich wird in den Diagrammen der Wochengang des Aufkommens des Lkw-Verkehrs mit den höchsten Fahrzeugzahlen an den Tagen Dienstag bis Freitag. Des Weiteren sind Feiertage in den Daten ebenfalls klar erkennbar. In Bild 74 wird beispielsweise das Osterwochenende 2017 (Ostersonntag 16.04.2017) deutlich. In Bild 75 wird der 1. Mai 2017 (Montag), Christi Himmelfahrt (Donnerstag, 25.05.2017) sowie Pfingstmontag (05.06.2017) ersichtlich. Im Zeitraum zwischen dem 12.06.2017 und dem 17.06.2017 kam es zu einer Reihe von Ausfällen des Messsystems (vgl. Kapitel 2.3.2.3), sodass hier keine vollständigen Tageserfassungen des Verkehrs möglich waren. Dies zeigt sich in den Zahlenwerten der erkannten Fahrzeuge. Deutlich wird außerdem noch die geringere Fahrzeuganzahl an Samstagen im Juli 2017 (Lkw-Fahrverbot in Zeiten der Sommerferien). In Bild 76 zeigt sich im Zeitraum Ende August 2017/Anfang September 2017 eine größere Anzahl von Fahrzeugen auf dem zweiten Fahrstreifen. Hier fanden Baumaßnahmen im Bereich des Bauwerkes statt (auf Satellitenbildern nachvollziehbar), sodass etwas häufiger der zweite Fahrstreifen genutzt wurde. In Bild 77 sind insbesondere die Weihnachtsfeiertage und der Jahreswechsel anhand der geringeren Fahrzeuganzahl ersichtlich. Außerdem wird dort auch der Reformationstag am 31.10.2017 deutlich, der im Jahr 2017 ein bundeseinheitlicher Feiertag war (vgl. dazu Bild 81 – im Jahr 2018 war der Reformationstag in Bayern kein Feiertag, somit deutlich höhere Fahrzeuganzahl). In den weiteren Darstellungen lassen sich ebenfalls Feiertag und auch insgesamt ein Jahresgang des Verkehrsaufkommens identifizieren (vgl. Bild 92). Die Erfassung der Fahrzeuganzahl durch das System RTMS funktioniert damit stabil.

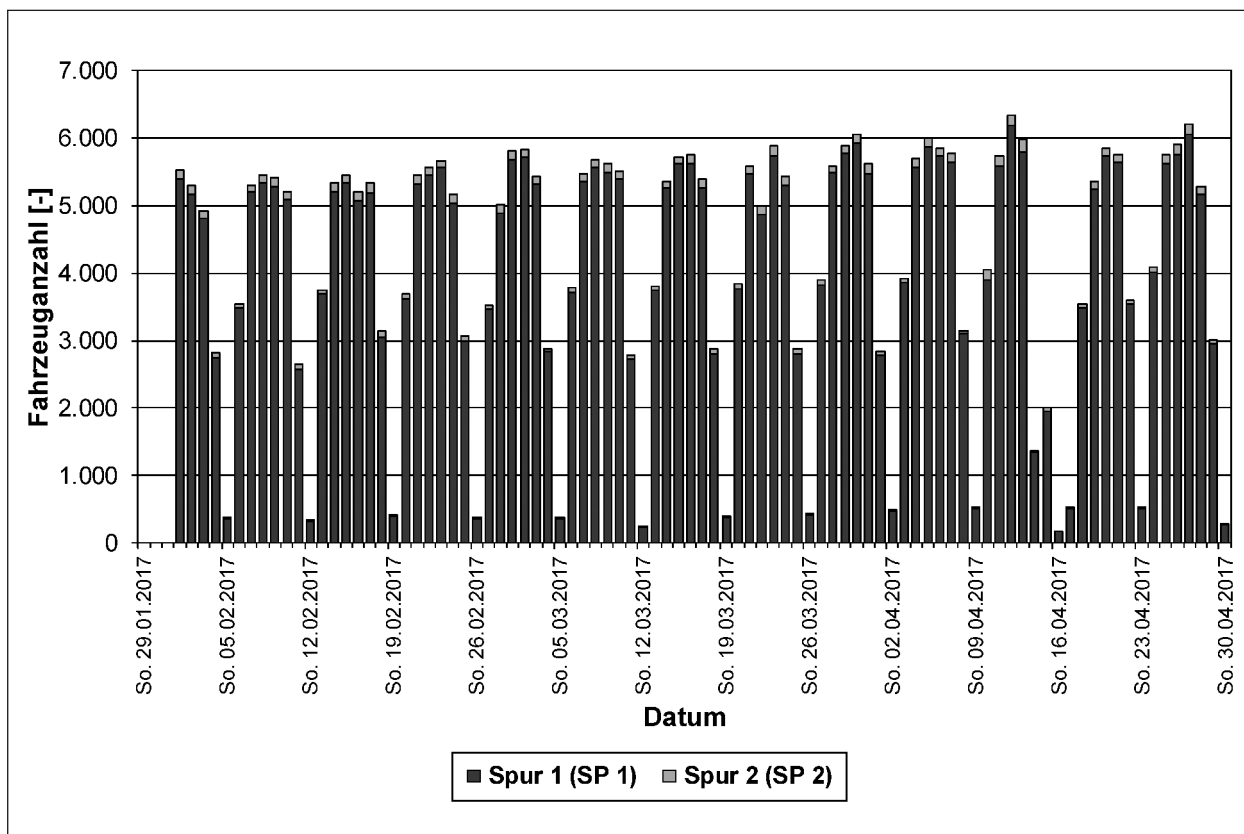


Bild 74: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2017 bis April 2017

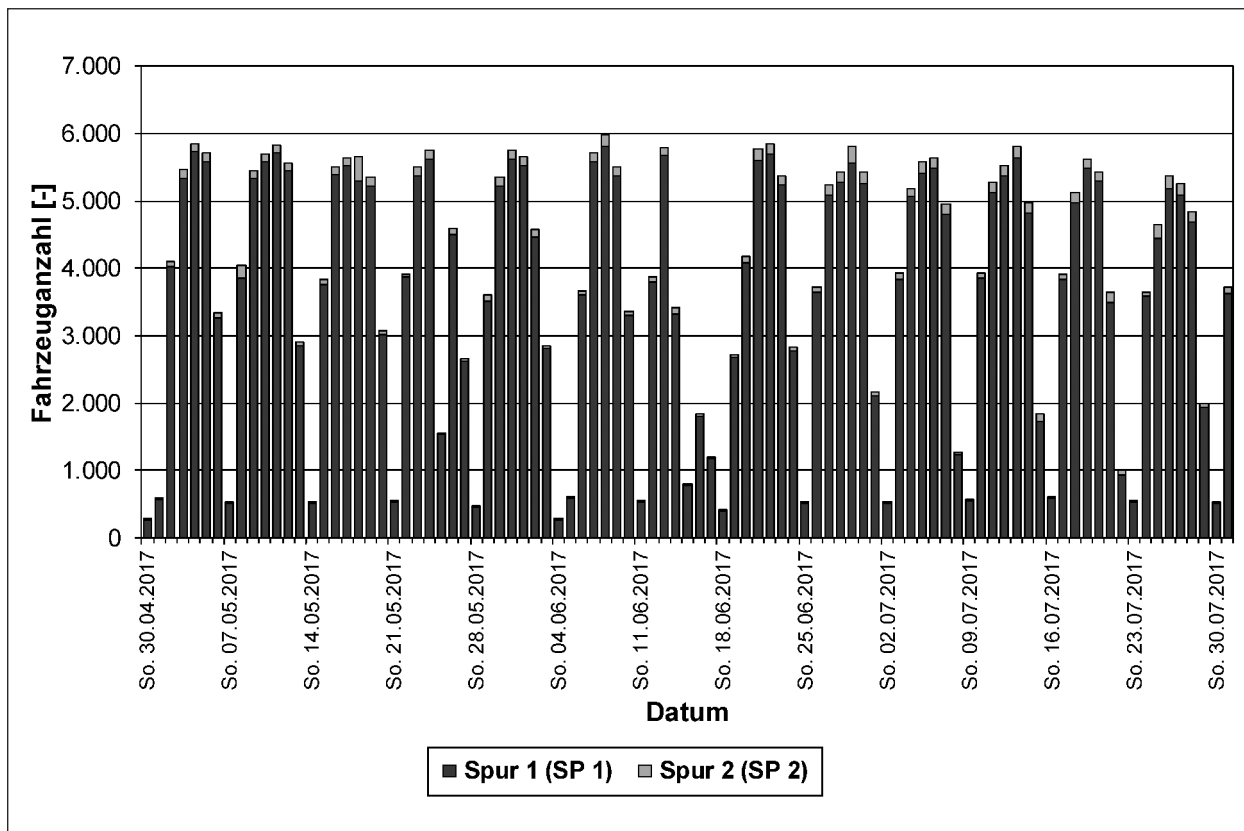


Bild 75: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2017 bis Juli 2017

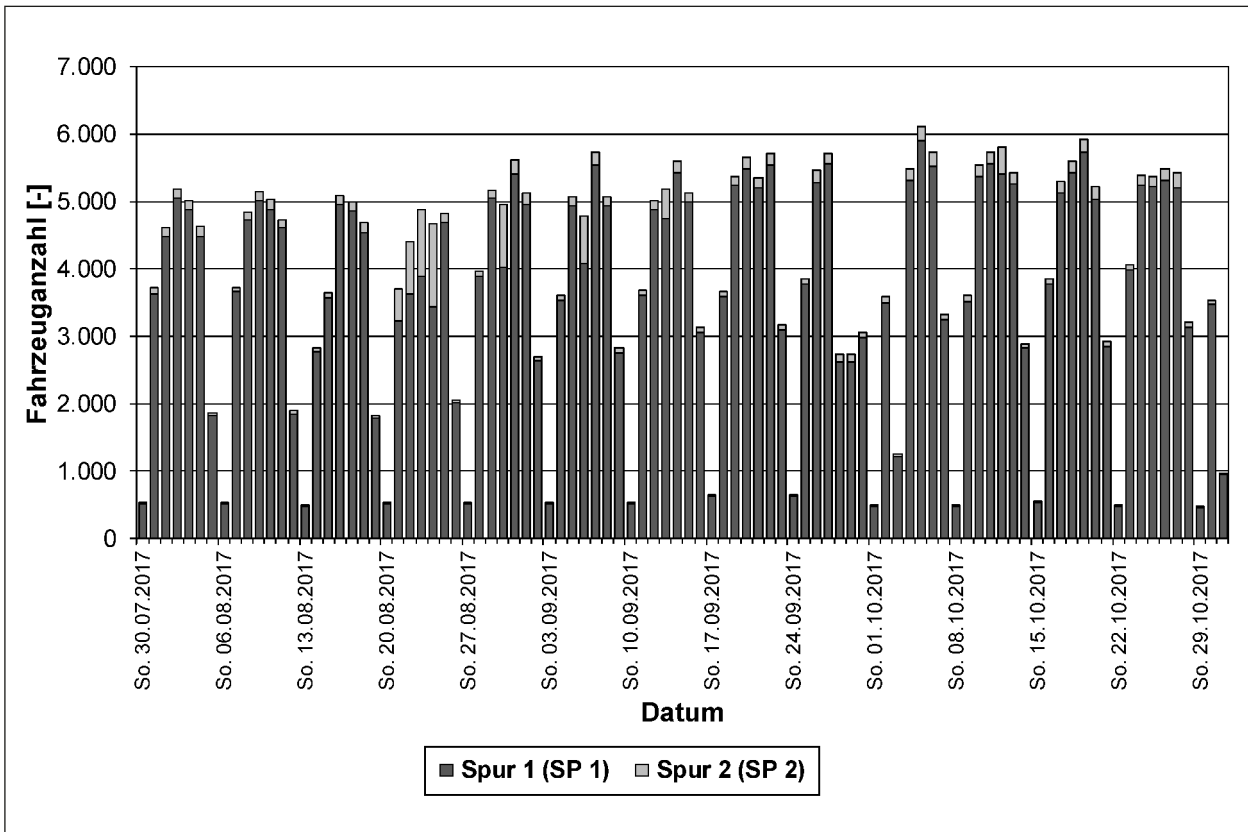


Bild 76: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum August 2017 bis Oktober 2017

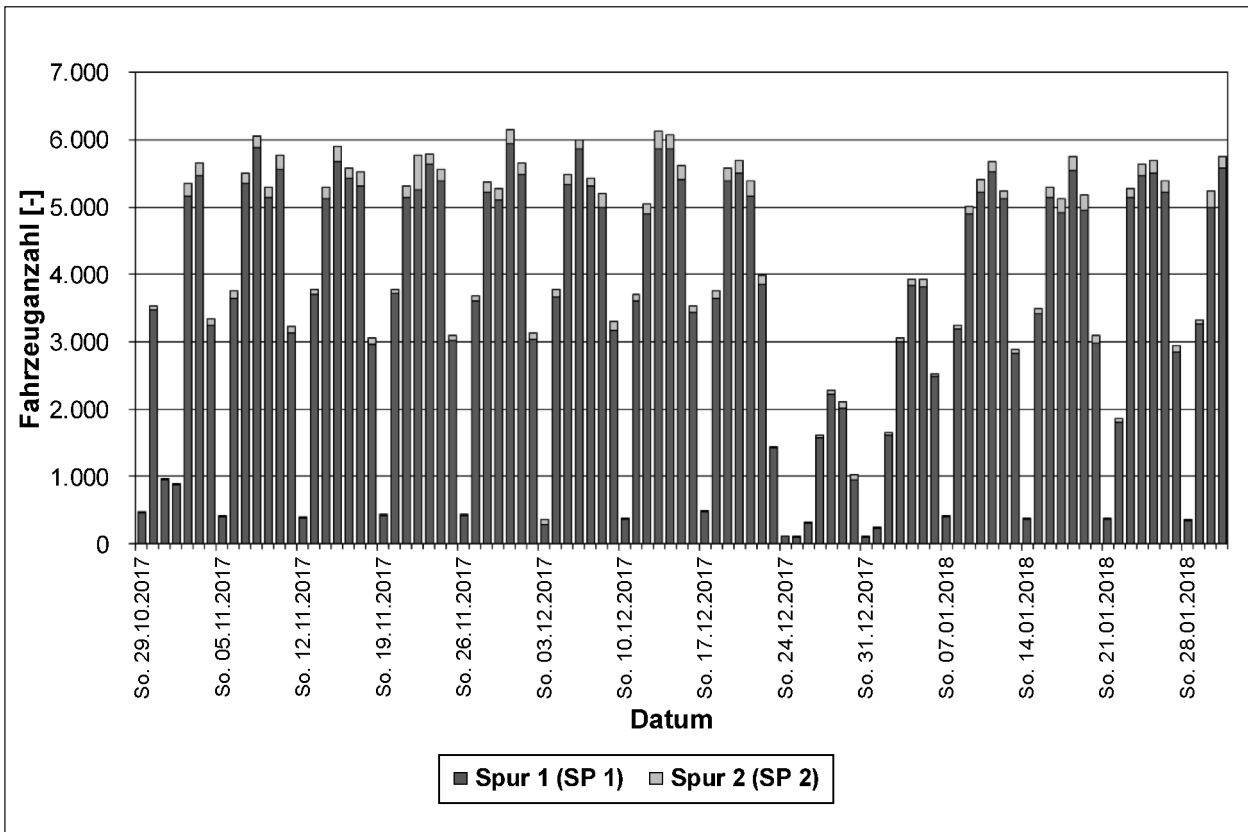


Bild 77: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum November 2017 bis Januar 2018

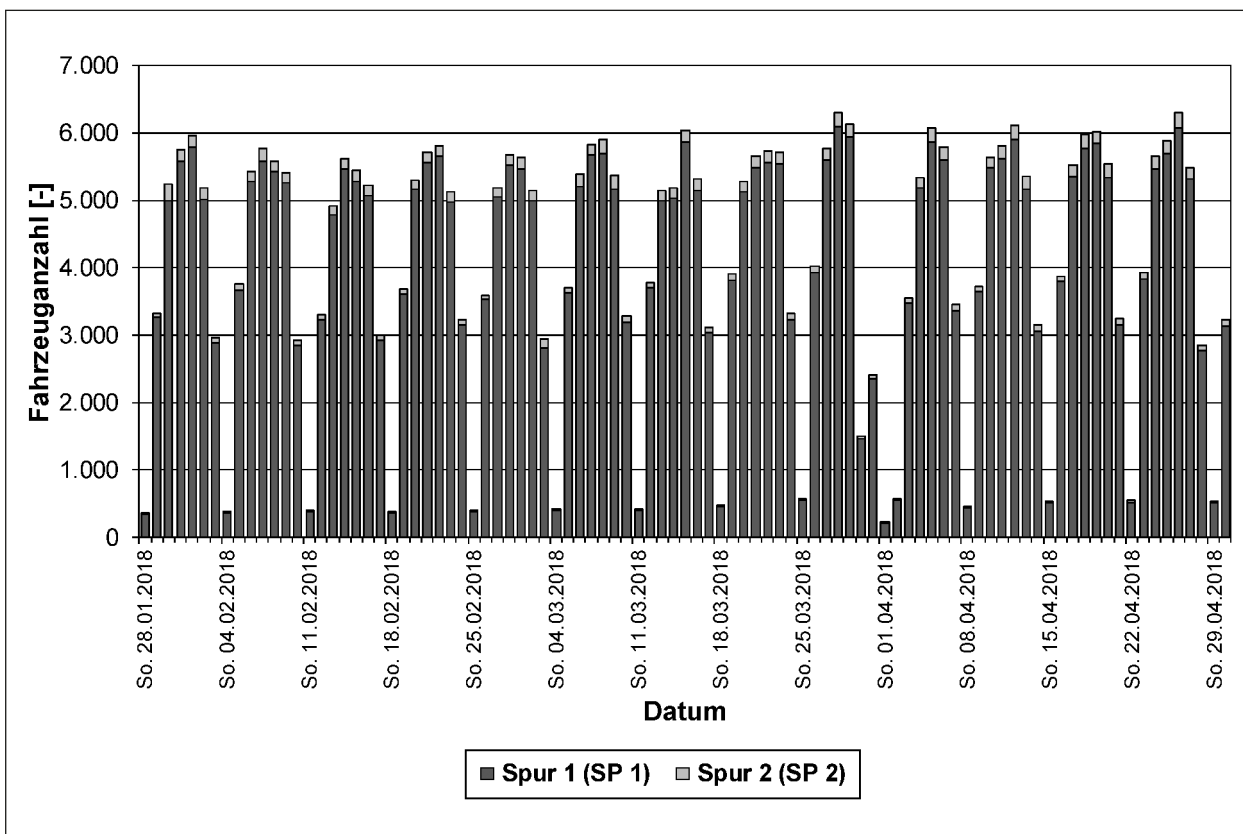


Bild 78: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2018 bis April 2018

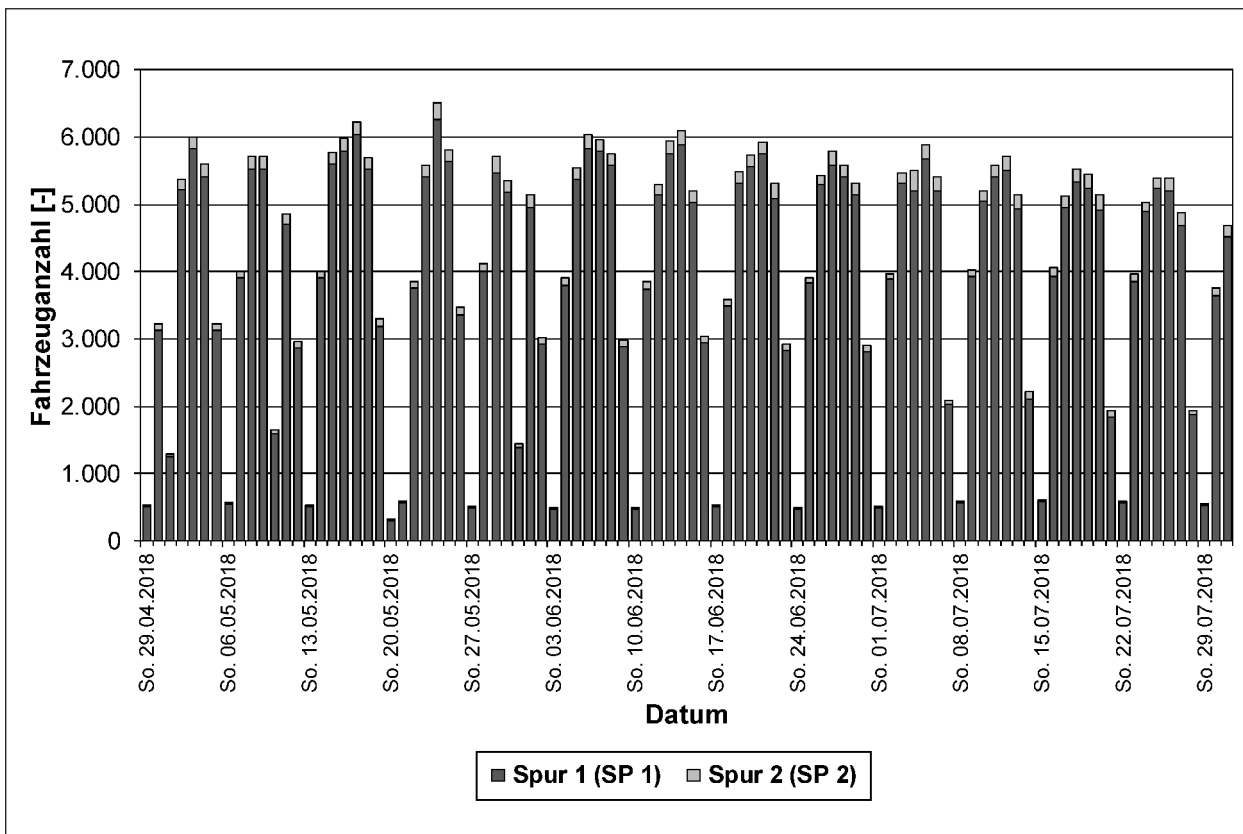


Bild 79: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2018 bis Juli 2018

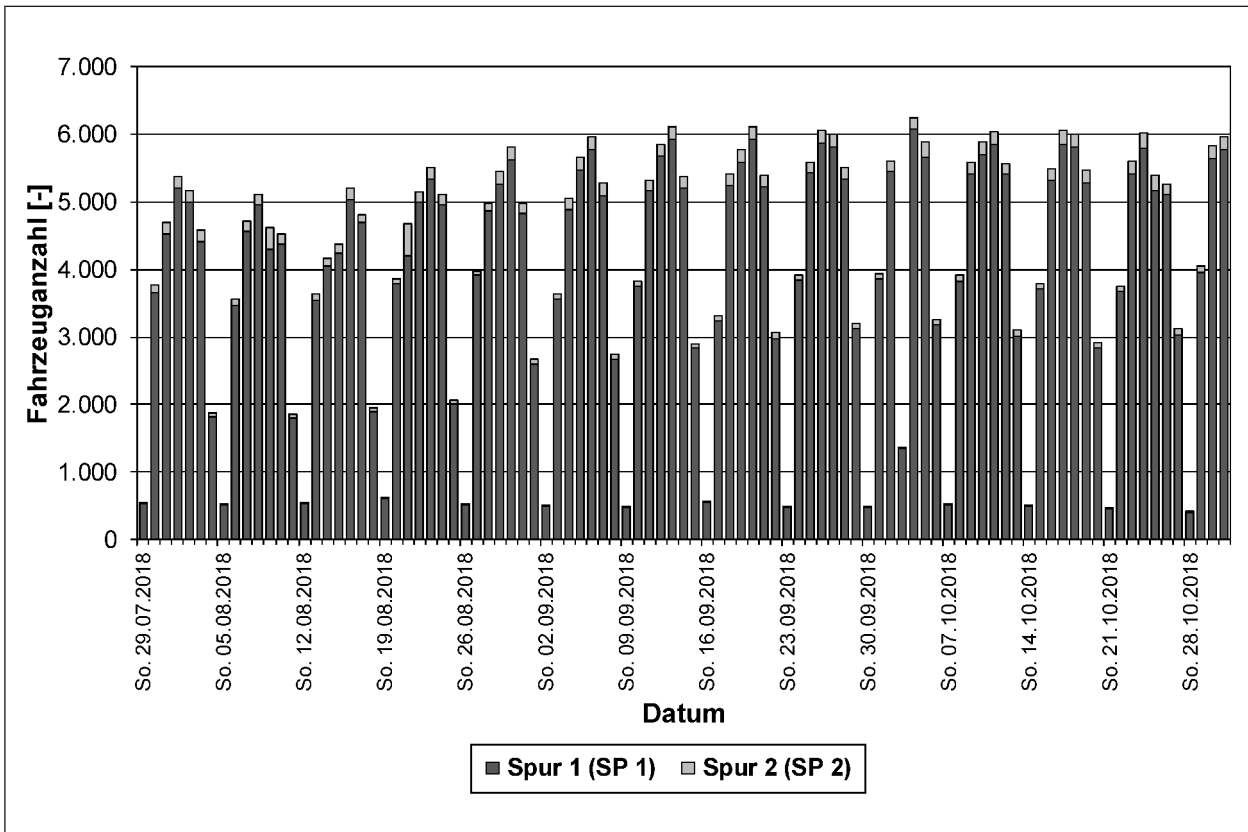


Bild 80: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum August 2018 bis Oktober 2018

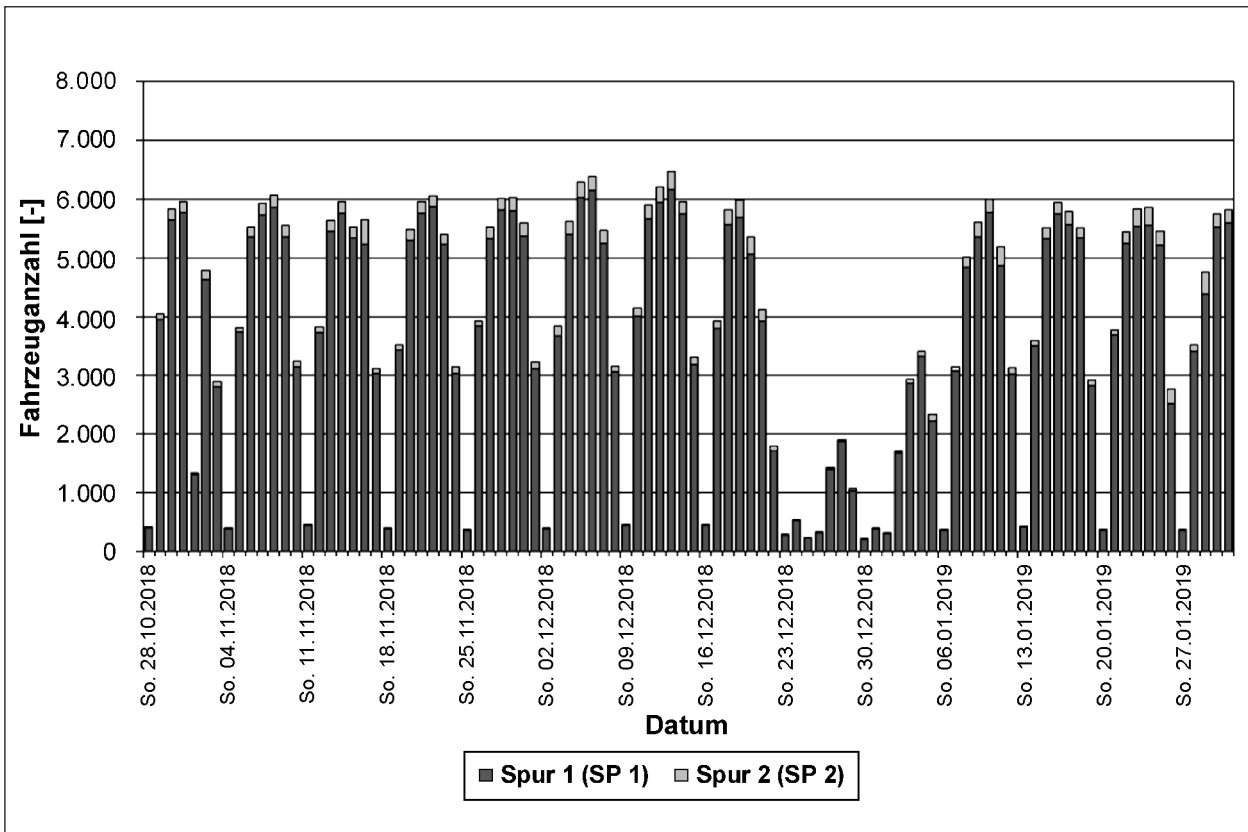


Bild 81: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum November 2018 bis Januar 2019

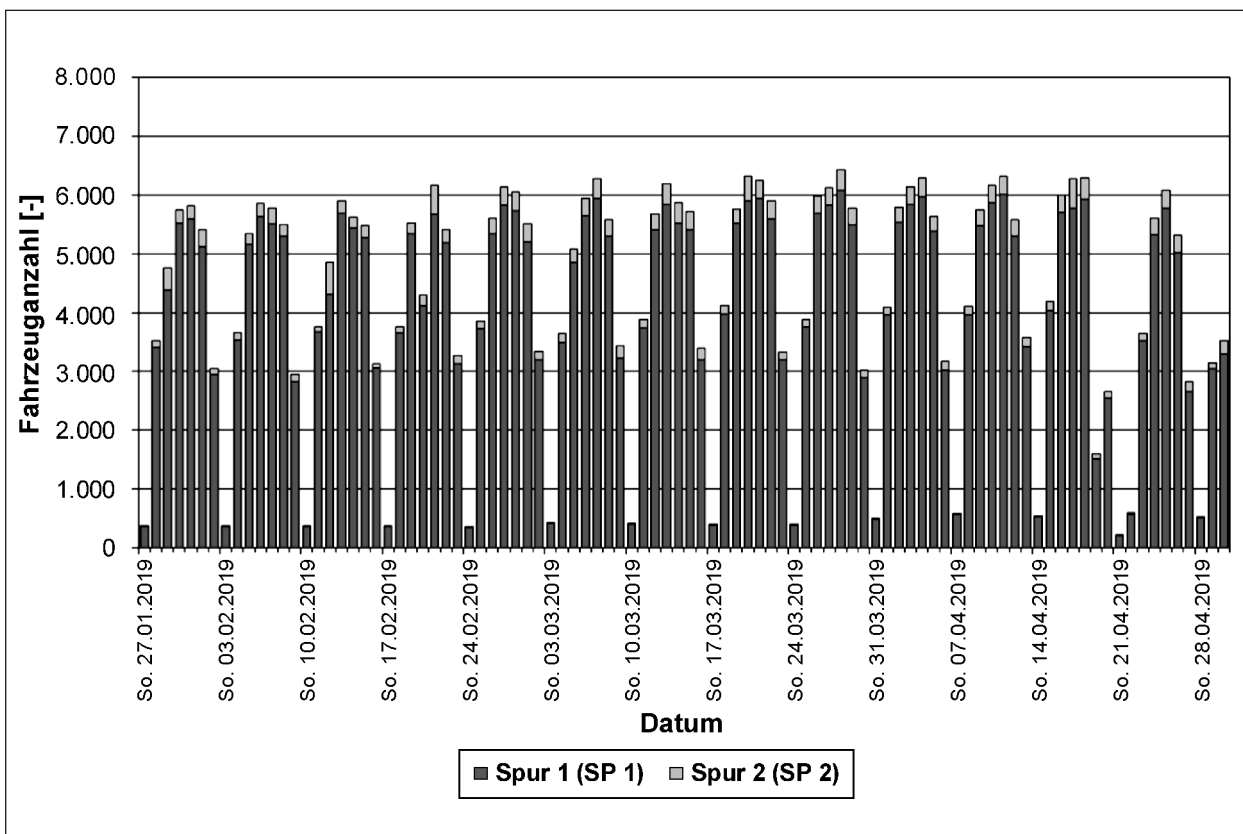


Bild 82: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2019 bis April 2019

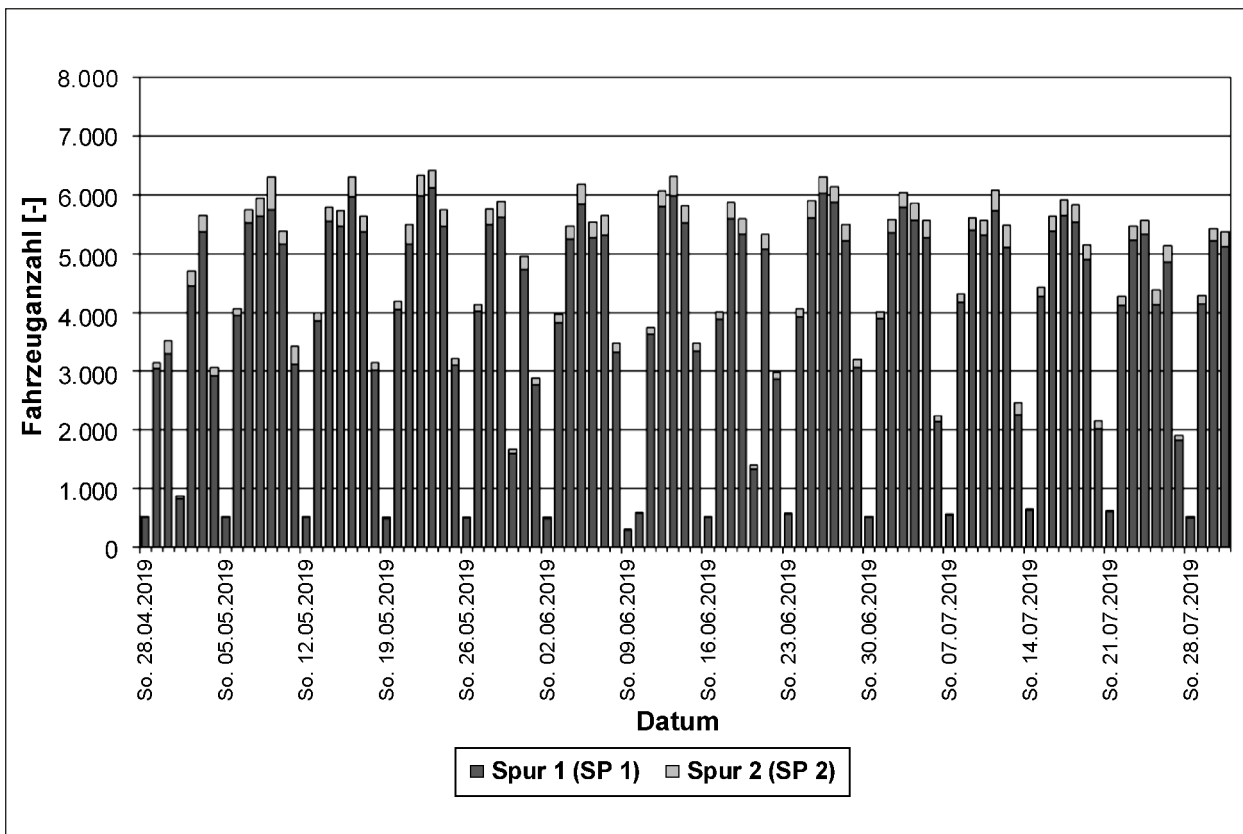


Bild 83: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2019 bis Juli 2019

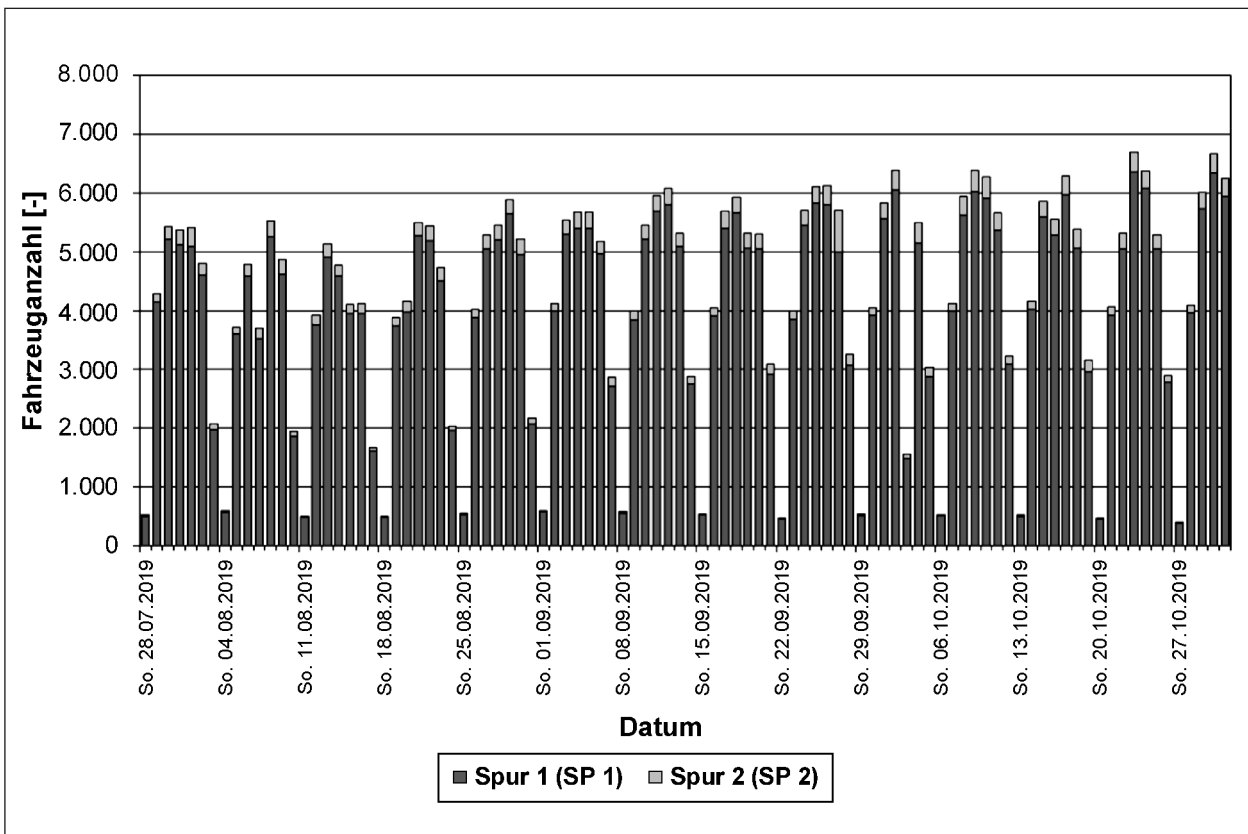


Bild 84: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum August 2019 bis Oktober 2019

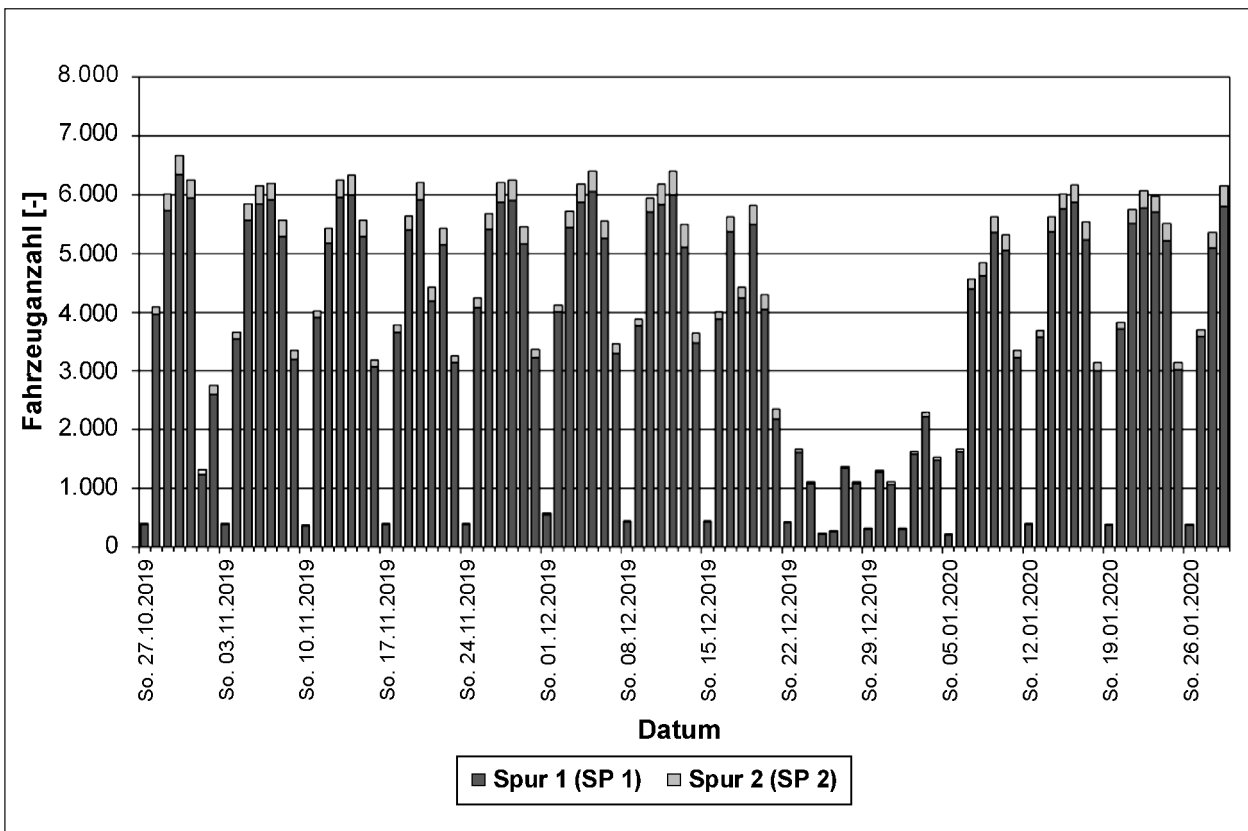


Bild 85: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum November 2019 bis Januar 2020

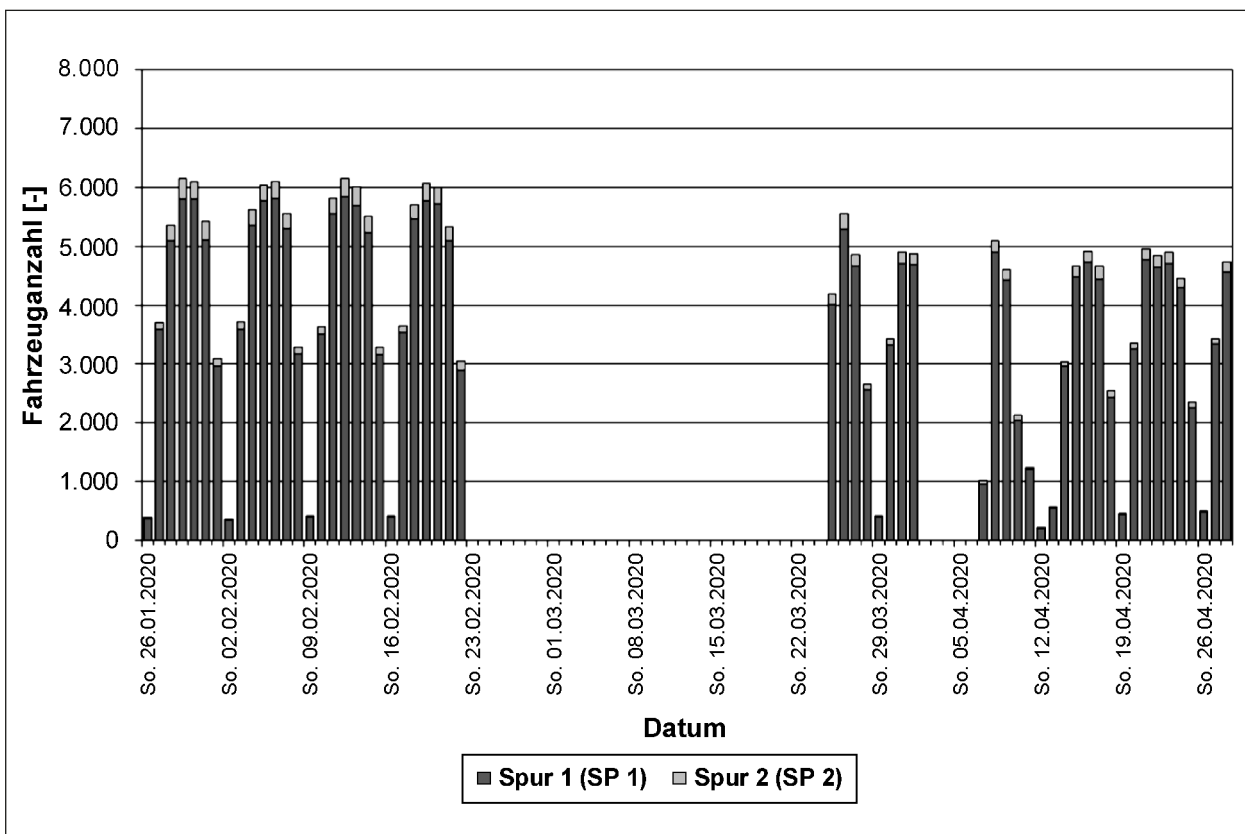


Bild 86: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2020 bis April 2020

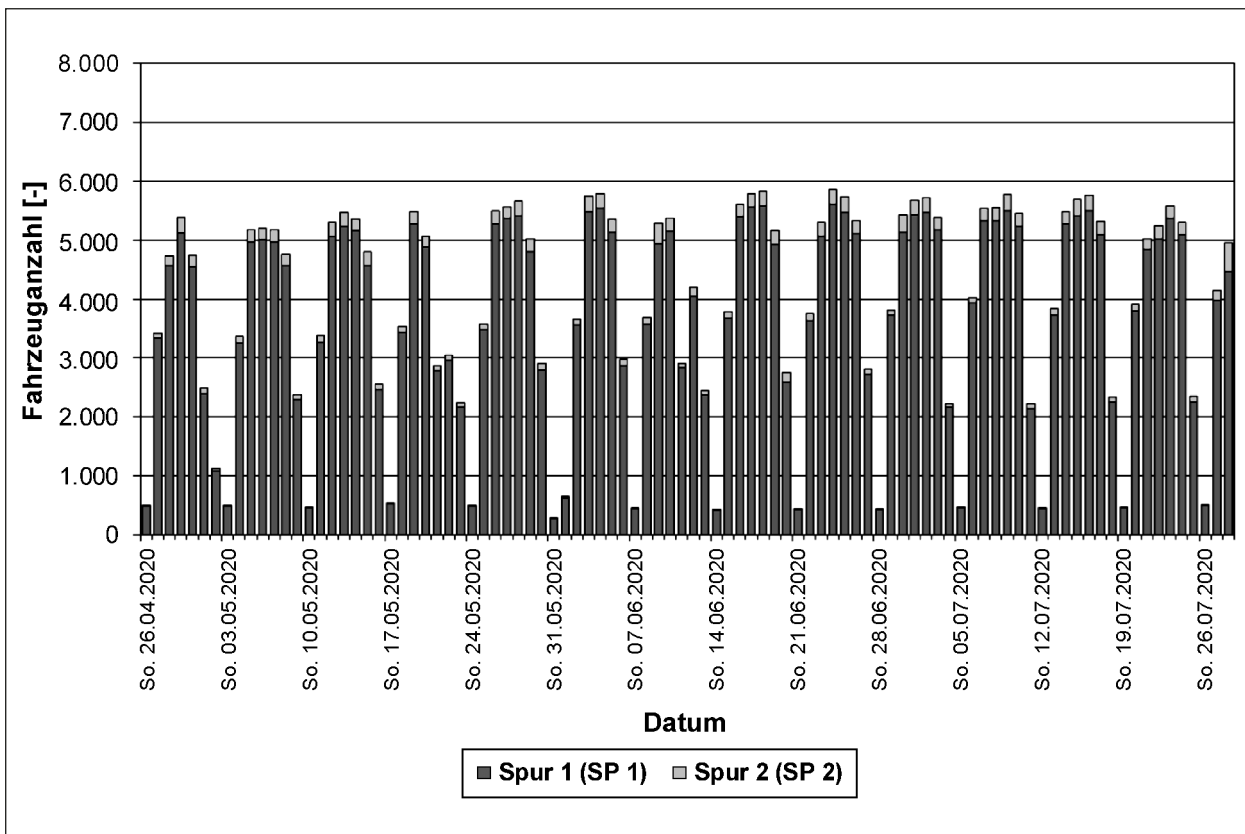


Bild 87: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2020 bis Juli 2020

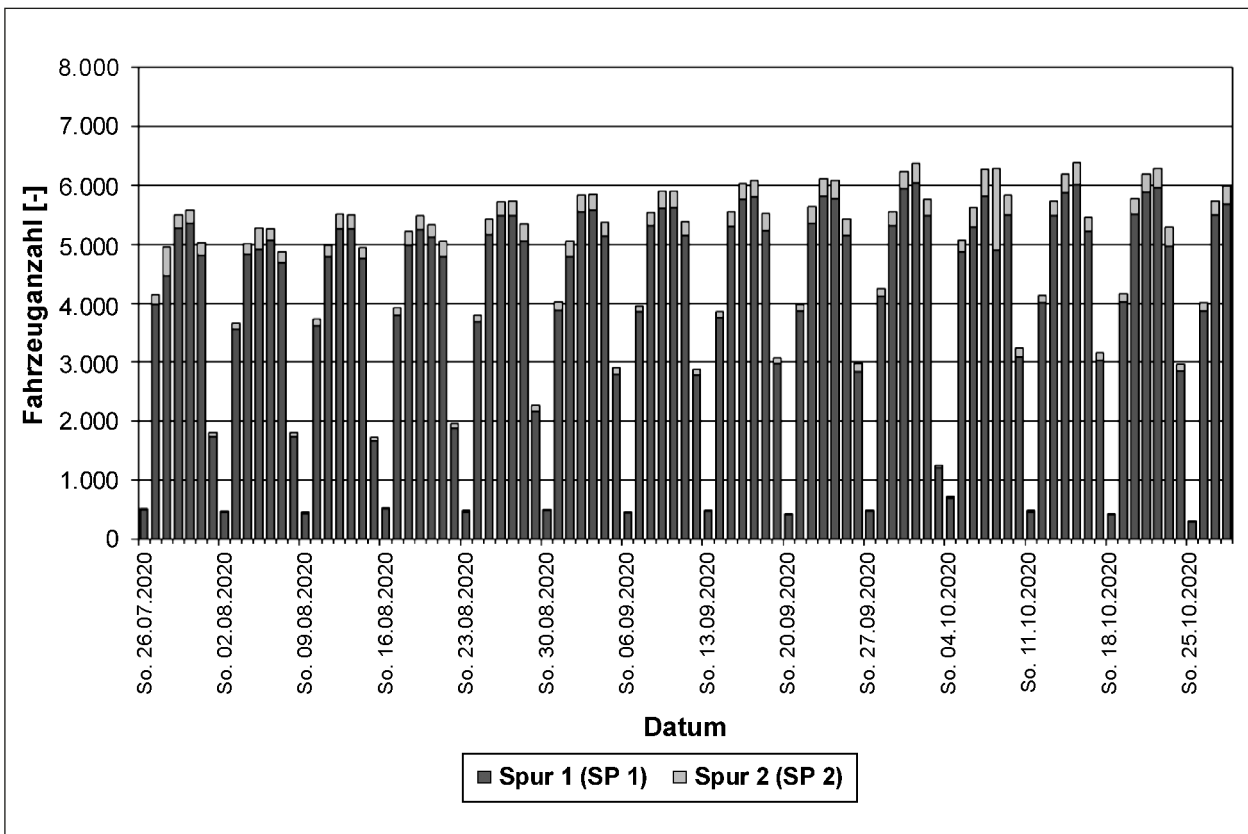


Bild 88: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum August 2020 bis Oktober 2020

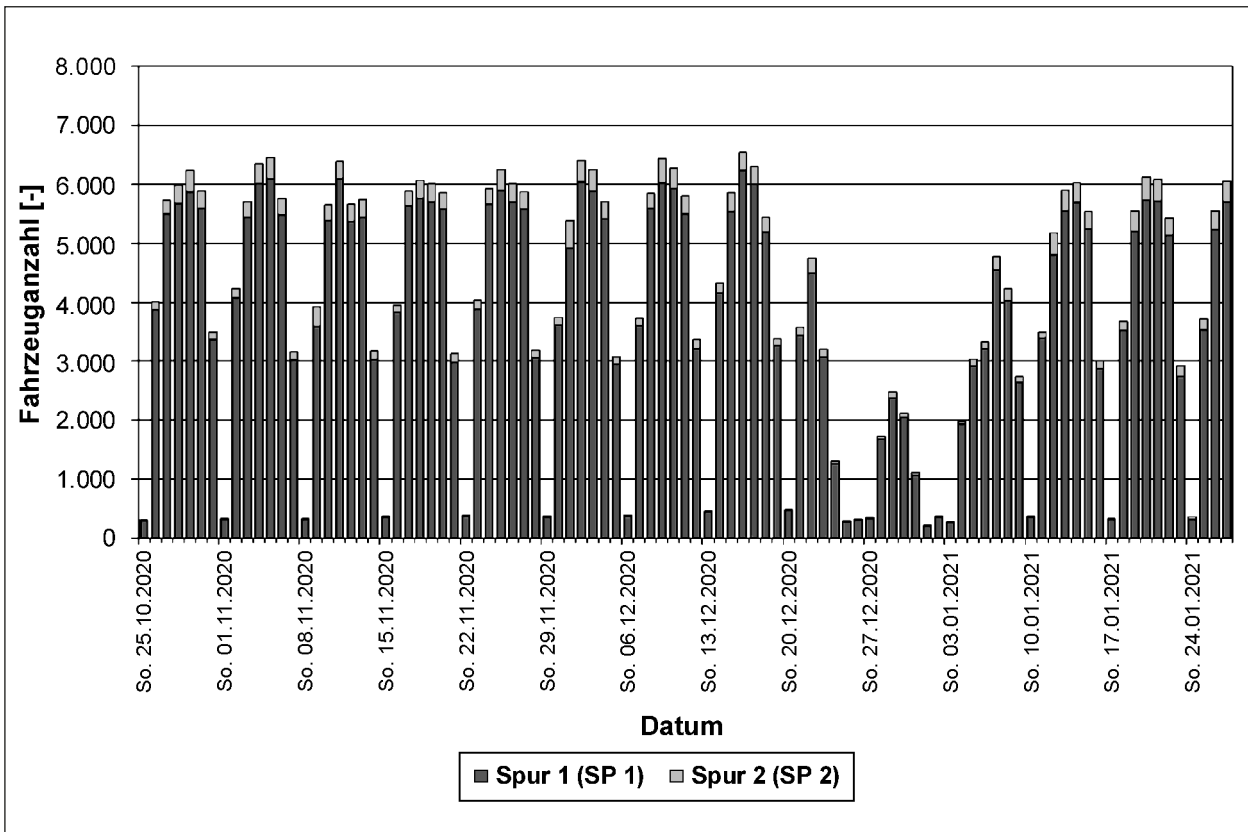


Bild 89: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrstreifen – Zeitraum November 2020 bis Januar 2021

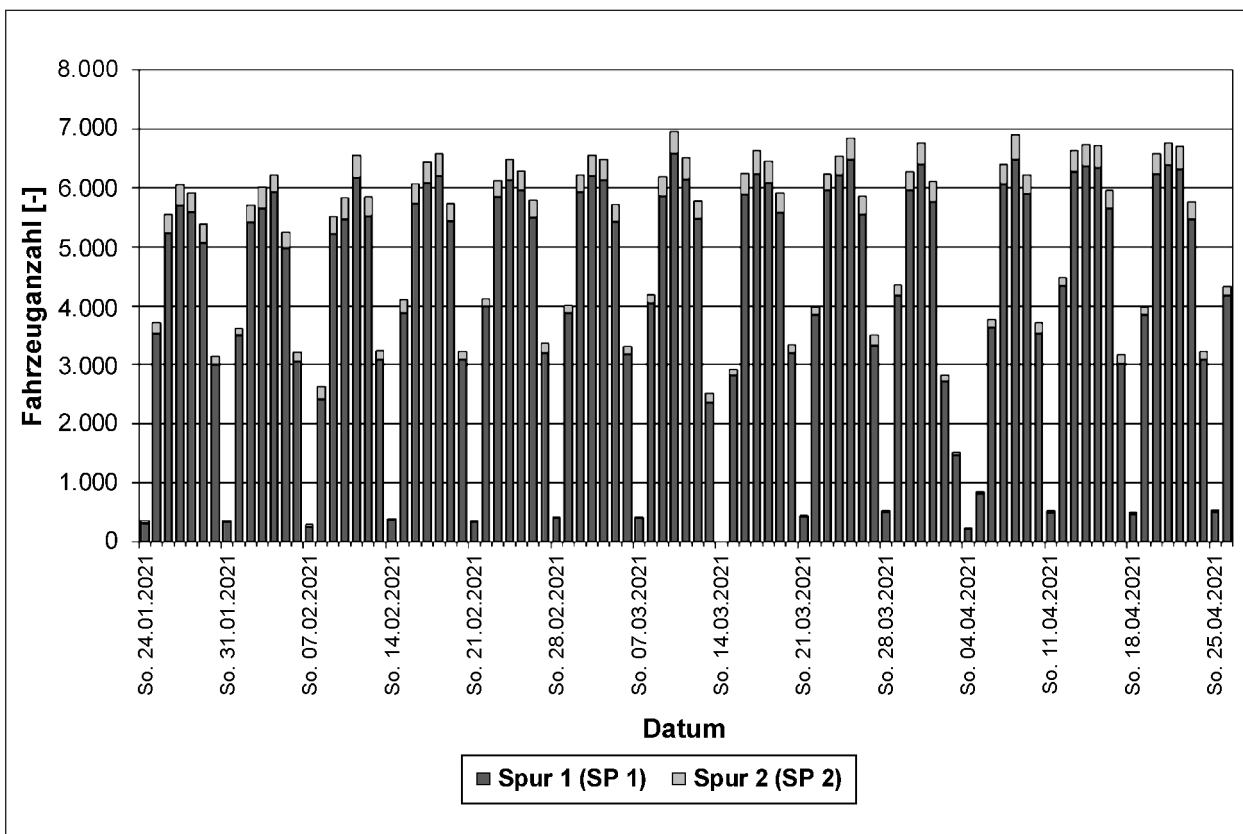


Bild 90: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2021 bis April 2021

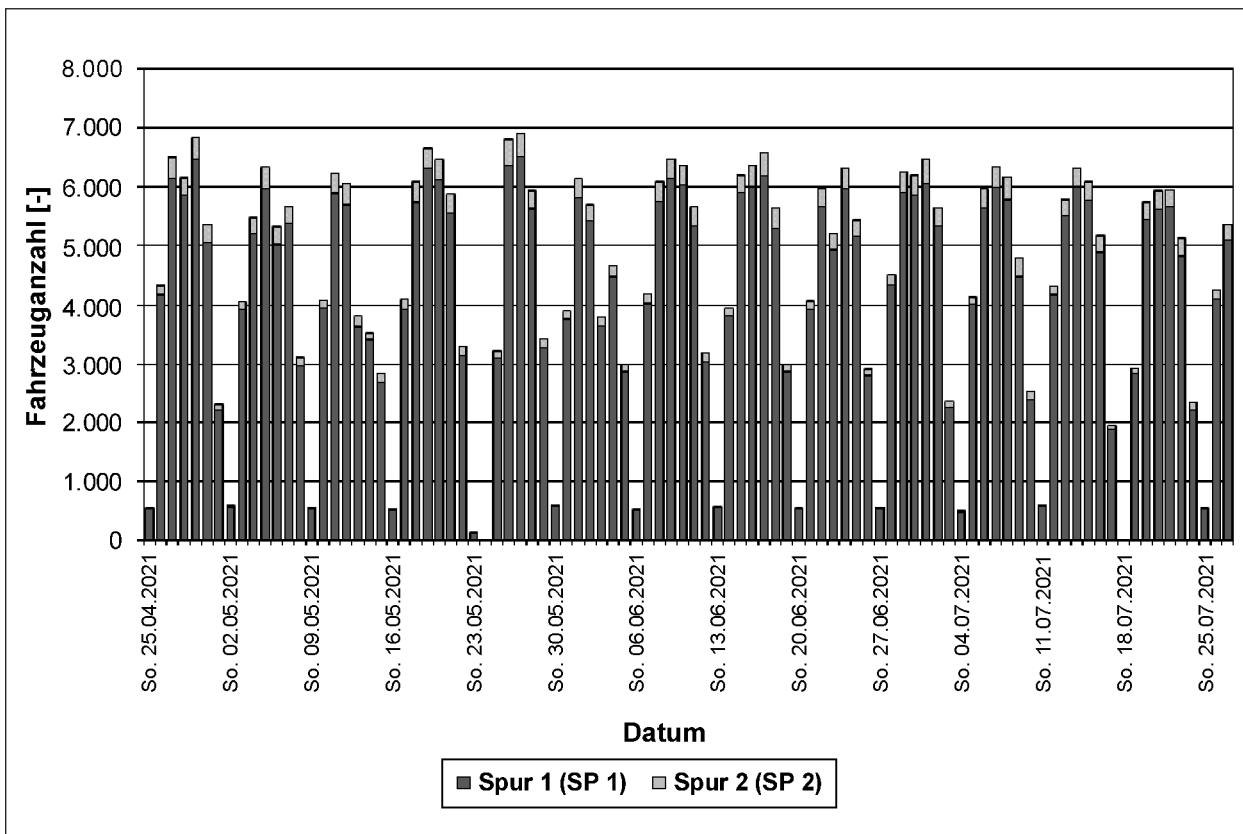


Bild 91: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2021 bis Juli 2021

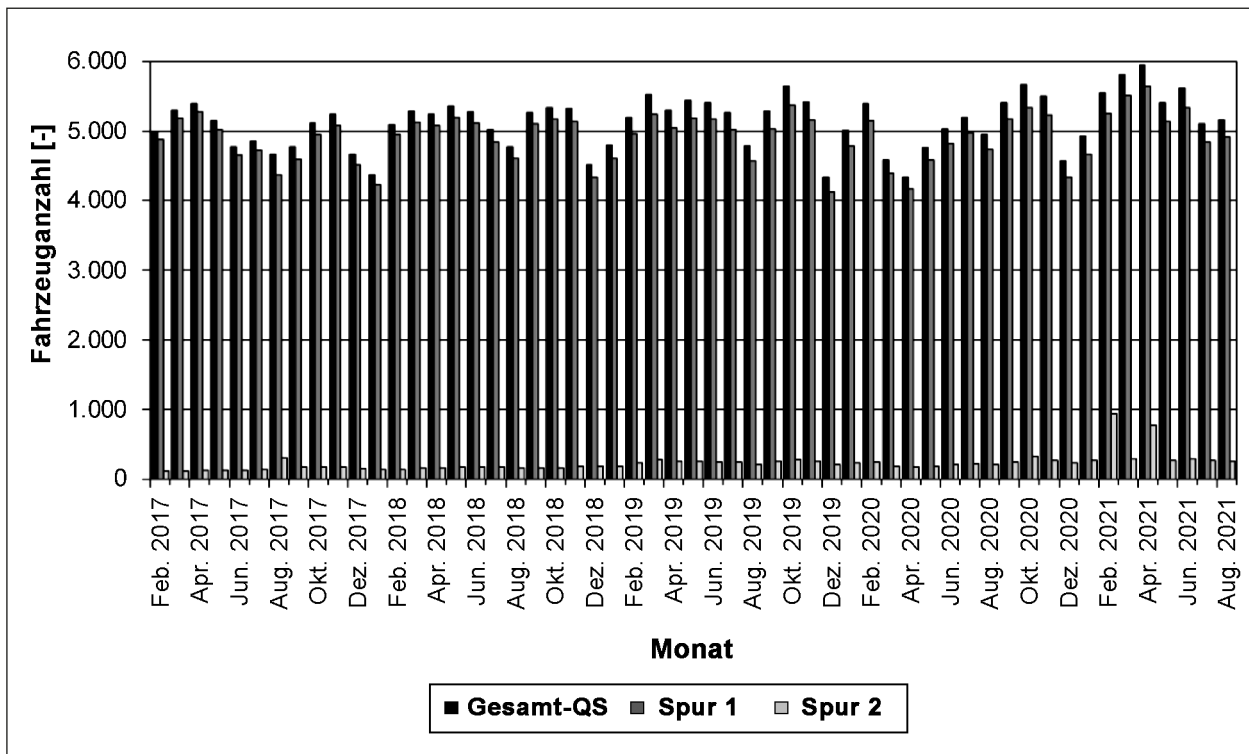


Bild 92: DTV-SV Werte monatsweise für den Auswertzeitraum – Mittelwerte für die Tage Montag bis Freitag, ohne Feiertage

4.1.2.2 Schwerverkehrszusammensetzung

Im Zuge der Verkehrserkennung durch das System RTMS erfolgt eine Zuordnung der erkannten Fahrzeuge in Typenklassifizierung in Anlehnung an die Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012, Tabelle 2-12). Hierbei wird in der gegenwärtigen Umsetzung der Auswertung zwischen 25 Fahrzeugtypen zzgl. einer Code-Nummer für Fahrzeuge, die nicht zu den definierten Typen zugeordnet werden können, unterschieden. Diese feine Klassifizierung lässt sich in eine grobe Klassifizierung hinsichtlich Lkw ohne Anhänger, Lkw mit Anhänger, Sattelzugfahrzeuge, Busse und nicht klassifizierte Fahrzeuge überführen.

Exemplarisch für den gesamten Auswertungszeitraum sind in den beiden Diagrammen (Bild 93 und Bild 94) für Februar bis April 2017, Februar bis April 2018 sowie für Februar bis April 2021 für jeden Tag die Werte der Schwerverkehrszusammensetzung für Spur 1 aufgetragen. Deutlich wird darin der geringere Anteil von Sattelzugfahrzeugen an Sonn- und Feiertagen. Anzumerken ist, dass die Differenzierung zwischen Lkw ohne Anhänger und Bussen nicht vollständig realisiert werden kann. Vor diesem Hintergrund ist der ausgewiesene deutlich höhere

Anteil von Bussen am Schwerverkehr an Sonn- und Feiertag noch nicht vollständig belegbar.

In Bild 95 ist eine Zusammenfassung der ermittelten Daten der Schwerverkehrszusammensetzung in der erläuterten groben Differenzierung dargestellt. Hierin wurden die Mittelwerte über den Zeitraum Februar 2017 bis August 2021 gebildet. Zusammenfassend zeigt sich, dass der ermittelte Anteil von Sattelzugfahrzeugen am gesamten Schwerverkehr bezogen auf den Gesamtquerschnitt (beide Spuren) bei rund 72 %, der Anteil von Lkw mit Anhängern bei 17 % und der Anteil von Lkw ohne Anhänger sowie Bussen bei rund 9 % liegt. Daten aus früheren Erfassungen an einer anderen Autobahn liefern hier Werte von 67 %/22 %/11 %.

Für einen weiteren Vergleich können auch vorliegende Daten aus automatischen Dauerzählstellen im Bereich des Autobahnkreuzes Nürnberg herangezogen werden. Diese beziehen sich jedoch auf die Tage Montag bis Sonntag und ordnen Fahrzeuge ab 3,5 t dem Schwerverkehr zu. Aus den Daten ergeben sich Werte von ca. 60 %/19 %/21 %. Der Anteil von Sattelzugfahrzeugen ist also niedriger und der Anteil von Lkw ohne Anhänger höher. Aufgrund der betragsmäßig kleinen Werte der gemessenen Bauwerksreaktionen kann es zu einer aus-

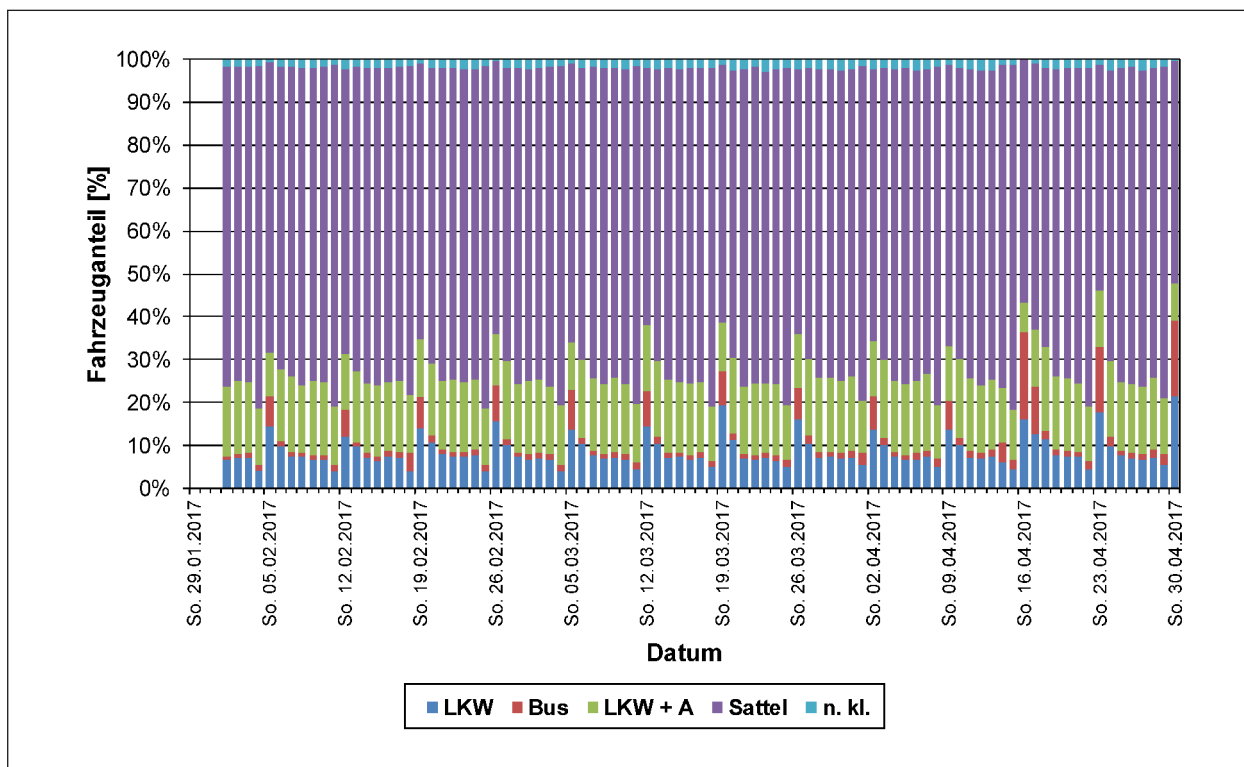


Bild 93: Schwerverkehrszusammensetzung in grober Klassifizierung pro Tag (Spur 1) – Zeitraum Februar 2017 bis April 2017

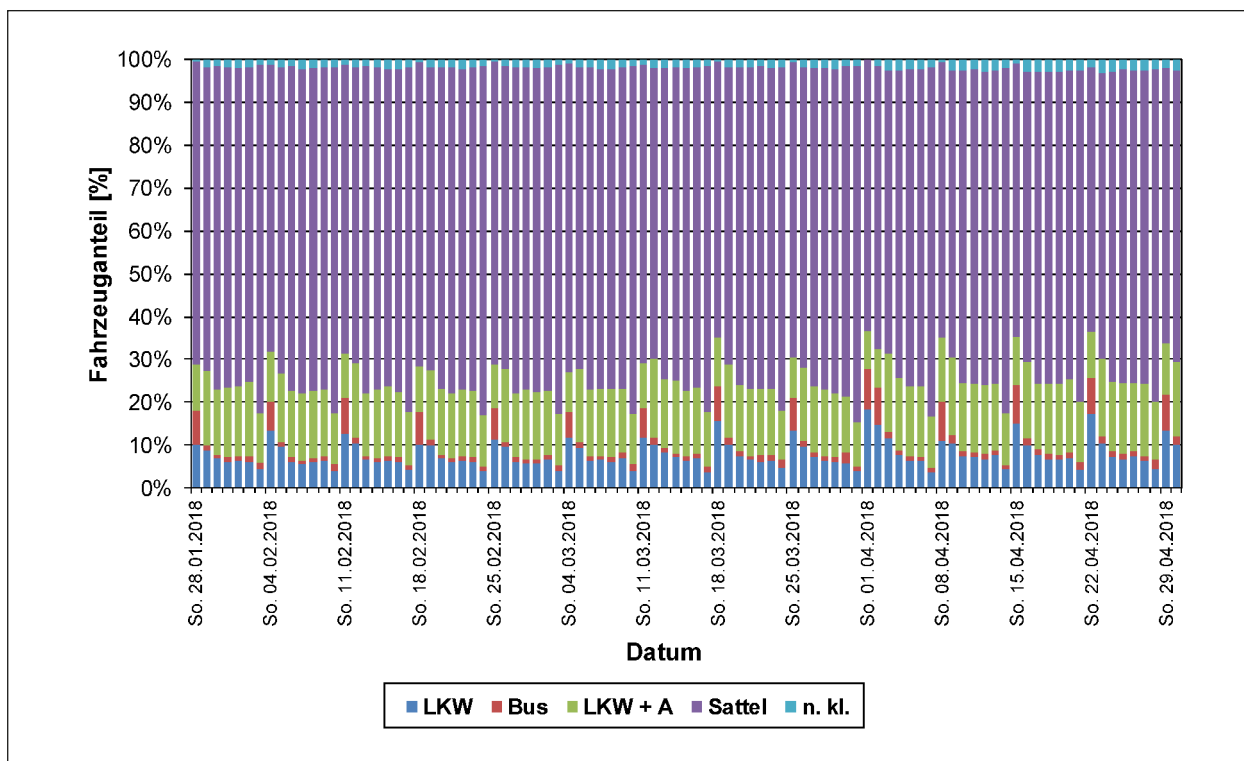


Bild 94: Schwerverkehrszusammensetzung in grober Klassifizierung pro Tag (Spur 1) – Zeitraum Februar 2018 bis April 2018

bleibenden oder auch fehlerhaften Erkennung von leichten Lkw-Fahrzeugen kommen. Außerdem erfolgt die Differenzierung zwischen Lkw ohne Anhänger und Kleintransportern über die Achskonfiguration. Eine zuverlässige Erkennung von sehr leichten Lkw bzw. die zuverlässige Differenzierung zwischen leichten Lkw und Kleintransportern kann nicht vollständig realisiert werden.

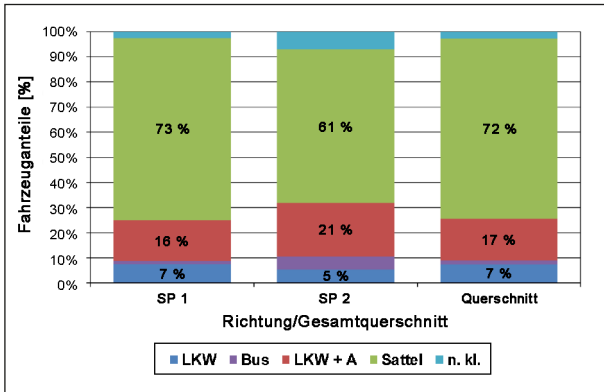


Bild 95: Mittelwerte der Schwerverkehrszusammensetzung für den gesamten Auswertungszeitraum – bezogen auf die Tage Montag bis Freitag ohne Feiertage

4.1.2.3 Daten für ausgewählte Fahrzeugtypen

Für ausgewählte Fahrzeugtypen sind in Tabelle 38 Parameter für ausgewählte Fahrzeugtypen zusammengestellt. Bei den Daten handelt es sich um die Werte der Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen, die Achsabstände, die Anteile der einzelnen Fahrzeugtypen bezogen auf die Auswahl der Fahrzeugtypen sowie das mittlere Gesamtgewicht. Die Parameter sind dabei über den gesamten Auswertungszeitraum gemittelt. Für die Parameter liegen aus früheren Daten Vergleichswerte vor. So deckt sich zum Beispiel die ermittelte mittlere Achslastverteilung für Fahrzeugtyp 8 (2-achsiger Lkw ohne Anhänger) praktisch exakt mit früheren Werten. Der ermittelte mittlere Achsabstand ist mit 5,2 m etwas größer als in früheren Daten (dort rund 4,5 m). Die Ursache liegt hier sehr wahrscheinlich in der nicht vollständig zuverlässigen Differenzierung zwischen Lkw und Kleintransportern. Für den Fahrzeugtyp 41 (3-achsiger Lkw mit 2-achsigem Anhänger) liegen die Werte für die Achslastverteilung mit 22,1/22,5/18,5/18,7/18,1 sowohl leicht oberhalb als auch leicht unterhalb von Vergleichsdaten

		Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen									
		Typ 8	Typ 9	Typ 32	Typ 33	Typ 34	Typ 41	Typ 96	Typ 97	Typ 98	Typ 300
A1	[%]	45,0 %	36,4 %	36,2 %	27,0 %	28,1 %	22,0 %	44,0 %	30,5 %	21,1 %	
A2	[%]	55,0 %	34,7 %	36,9 %	33,4 %	27,8 %	22,7 %	33,0 %	27,7 %	23,1 %	
A3	[%]	0,0 %	28,9 %	27,0 %	20,3 %	21,7 %	18,6 %	22,9 %	20,7 %	18,3 %	
A4	[%]	0,0 %	0,0 %	0,0 %	19,2 %	22,3 %	18,7 %	0,0 %	21,1 %	18,6 %	
A5	[%]	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	17,9 %	0,0 %	0,0 %	18,9 %	
		Achsabstände									
		Typ 8	Typ 9	Typ 32	Typ 33	Typ 34	Typ 41	Typ 96	Typ 97	Typ 98	Typ 300
A1-2	[m]	5,2	4,5	4,4	4,4	3,7	4,4	3,5	3,4	3,5	
A2-3	[m]	0,0	1,4	6,1	5,7	5,5	1,3	6,4	6,2	5,2	
A3-4	[m]	0,0	0,0	0,0	4,1	1,2	5,1	0,0	1,2	1,2	
A4-5	[m]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	1,2	
Summe	[m]	5,2	5,9	10,5	14,3	10,4	14,6	9,9	10,8	11,1	
		Verkehrszusammensetzung									
		Typ 8	Typ 9	Typ 32	Typ 33	Typ 34	Typ 41	Typ 96	Typ 97	Typ 98	Typ 300
	[%]	6,5 %	1,8 %	1,7 %	1,9 %	3,6 %	4,3 %	3,4 %	18,4 %	56,8 %	1,6 %
		Mittleres Gesamtgewicht									
		Typ 8	Typ 9	Typ 32	Typ 33	Typ 34	Typ 41	Typ 96	Typ 97	Typ 98	Typ 300
t		11,1	18,5	16,1	20,6	22,3	27,7	15,9	20,2	30,4	29,2

Tab. 38: Eigenschaften ausgewählter Fahrzeugtypen – Mittelwerte über den gesamten Auswertungszeitraum

(20,9/25,8/16,1/19,5/17,7). Die Ursache liegt hier vordergründig in der noch nicht vollständig korrekten Erkennung der Achslastverteilung innerhalb der Achsgruppe des Lkw (Achse 2/3). Hinsichtlich der mittleren Achsabstände sind die Werte sehr ähnlich den Vergleichsdaten, abgesehen vom letzten Achsabstand (3,7 hier zu 4,6 in Vergleichsdaten). Für die Fahrzeugtypen 97 und 98 (Sattelzug mit 2-achsiger Zugmaschine und 2- bzw. 3-achsigem Auflieger) ergeben sich gegenüber Vergleichsdaten für den Anteil der zweiten Achse etwas geringere Werte, während für die Achsgruppe in der Summe etwas höhere Werte vorliegen. Hinsichtlich der Achsabstände ergeben sich gegenüber den Vergleichsdaten durchgehend etwas geringere Werte.

4.1.2.4 Gesamtgewichtsverteilungen

Im vorhergehenden Kapitel wurden hinsichtlich der Gesamtgewichte der betrachteten Fahrzeugtypen lediglich Mittelwerte angegeben. Die Datenaufbereitung erlaubt jedoch eine differenziertere Auswertung hin zu Verteilungsfunktionen der Gesamtgewichte der Fahrzeuge. Diese werden u. a. in Verkehrssimulationsrechnungen benötigt.

Aus den erfassten Daten wird pro Fahrzeugtyp zunächst eine Häufigkeitsverteilung (Histogramm) der

Gesamtgewichte (Klassenbreite 1 t) ermittelt. Dieses Histogramm wird von absoluten Häufigkeiten in relative Häufigkeiten umgerechnet und an die Ergebniswerte iterativ eine Dichteverteilung (maximal drei zueinander gewichtete Normalverteilungen) über eine Minimierung der Fehlerquadratsumme angenähert.

Im Rahmen der Bearbeitung des parallelen Forschungsprojektes FE 15-0631-2016-LRB [3] wurden die eingesetzten Algorithmen zur Bestimmung des Gesamtgewichtes eines überfahrenden Fahrzeuges schrittweise verbessert. Zur Erläuterung der daraus resultierenden Effekte sind in den Diagrammen in Bild 96 bis Bild 98 anhand der Gesamtgewichtsverteilungen von drei ausgewählten Fahrzeugtypen (Typ 41, 97 und 98) dargestellt. In Bild 96 und Bild 97 sind die ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen für Oktober 2017 und Oktober 2018 dargestellt. Die Messdaten aus diesen Zeiträumen wurden bisher lediglich mit der initialen Umsetzung der Algorithmen zur Gesamtgewichtsbestimmung ausgewertet. Die aus den Messungen im Oktober 2019 ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen (Bild 98) basieren auf dem aktuellen Entwicklungsstand der Algorithmen. Erkennbar ist dies vordergründig an der Lage des Modalwertes der Gesamtgewichtsverteilung für Fahrzeugtyp 98. Im Oktober 2017 und

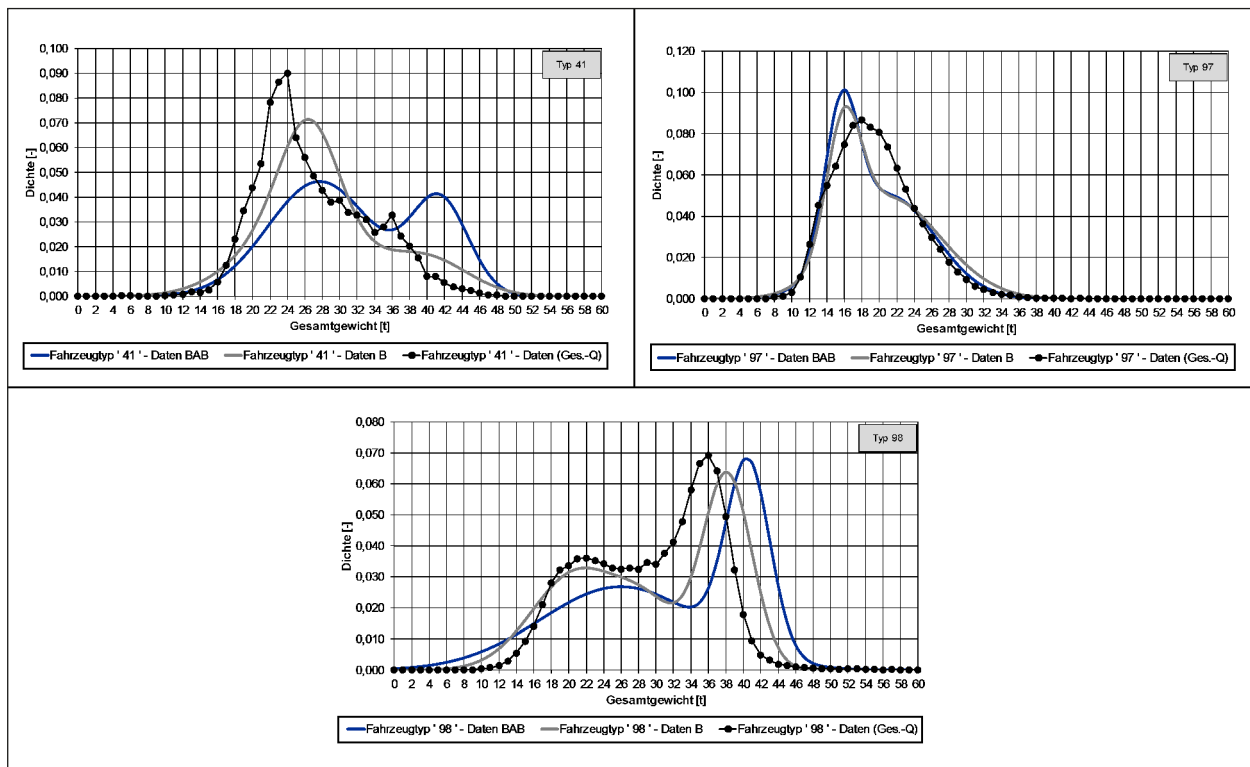


Bild 96: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2017 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

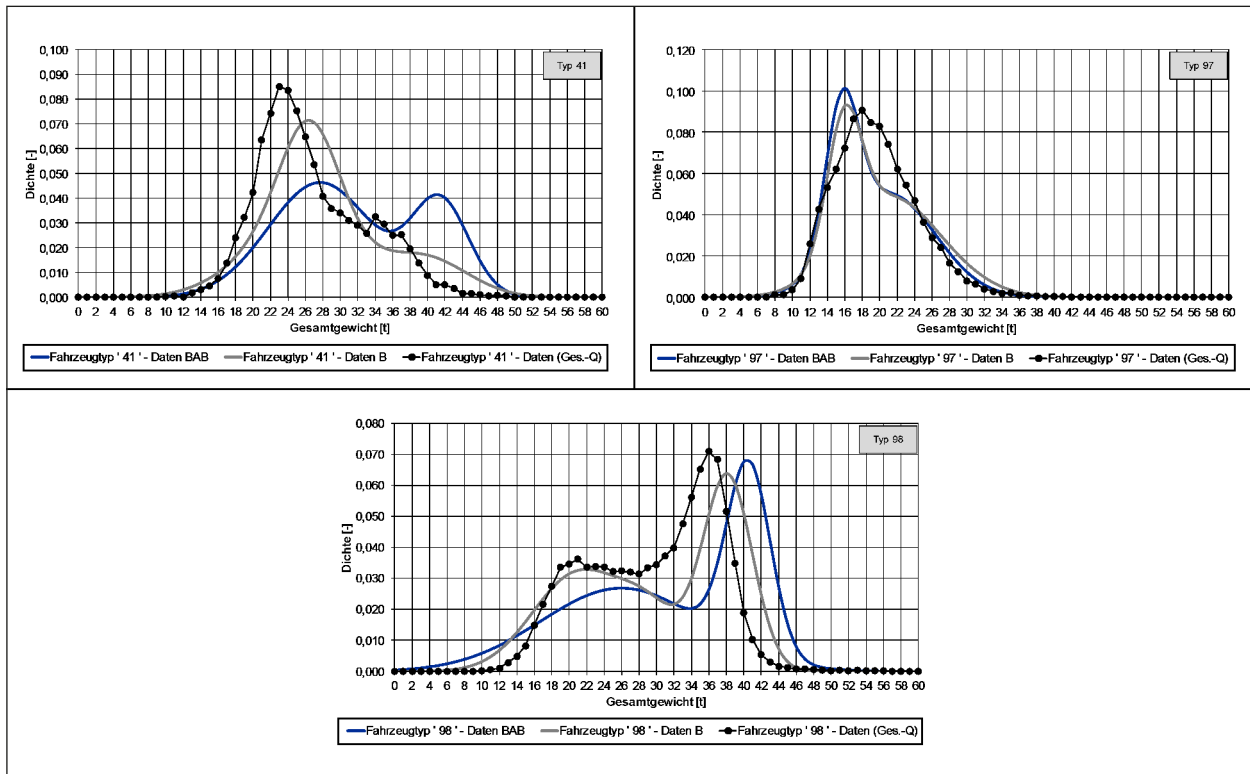


Bild 97: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2018 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

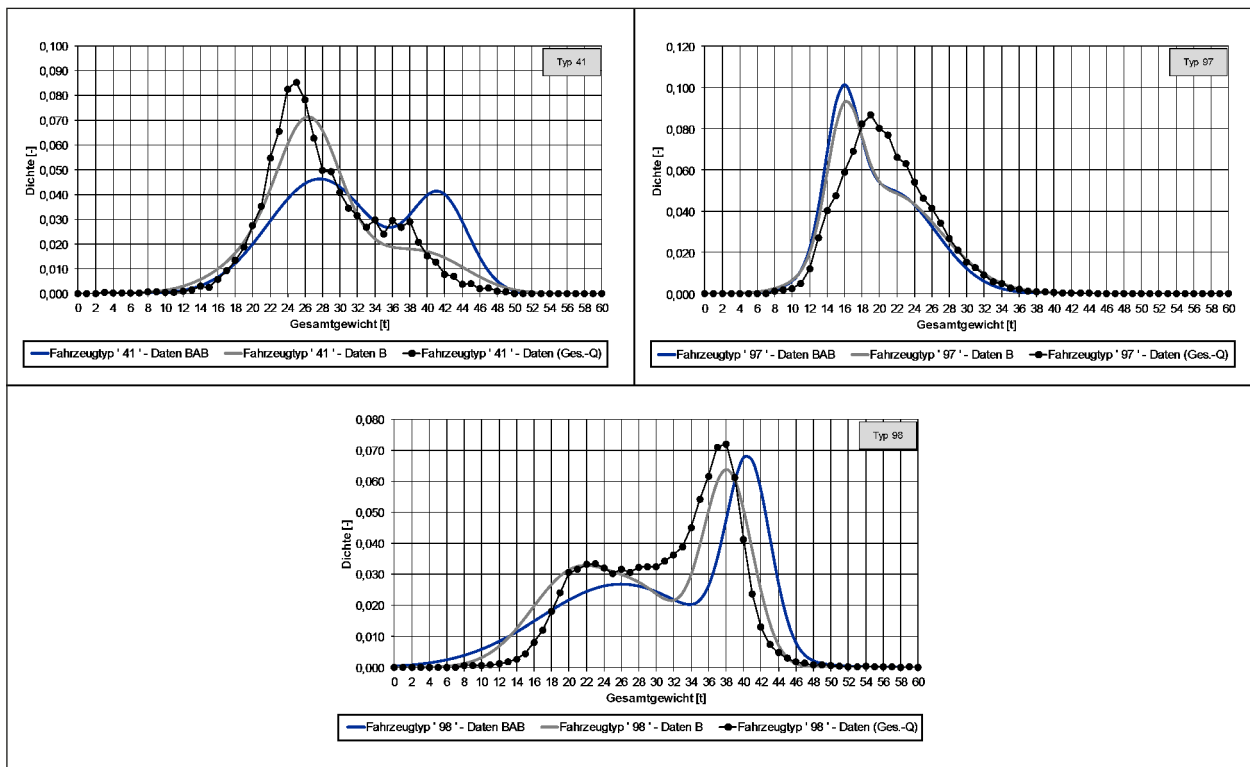


Bild 98: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2019 – Algorithmen aktuelle Entwicklungsstufe – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

2018 lag dieser Modalwert (größte relative Häufigkeit bzw. Dichte im Diagramm) bei 36 t Gesamtgewicht. Im Oktober 2019 lag der Modalwert hingegen bei 38 t Gesamtgewicht. Die Ursache liegt hier in der verbesserten Ermittlung der Gesamtgewichte und nicht in einer Änderung der realen Gesamtgewichte der Fahrzeuge. Generell zeigen sich in den Diagrammen deutliche Unterschiede zu den eingetragenen Vergleichsdaten. Die Ursache liegt vorwiegend in einer nach wie vor nicht vollkommen exakten Ermittlung des Gesamtgewichtes der Fahrzeuge.

4.1.2.5 Großraum- und Schwerlastverkehr

Fahrzeuge aus dem Bereich des Großraum- und Schwerlastverkehrs werden grundsätzlich durch die aktuellen Algorithmen erkannt. Die Fahrzeuge werden dann in der Typisierung mit dem Code 300 belegt. Somit können hierzu im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung auch entsprechende Auswertungen und Aufbereitungen realisiert werden.

Exemplarisch sind in den beiden nachfolgenden Darstellungen (Bild 99 und Bild 100) Visualisierungen von erkannten Fahrzeugen aufgeführt. Diese



Bild 99: Visualisierung der Erkennung eines Fahrzeuges des Großraum- und Schwerlastverkehrs

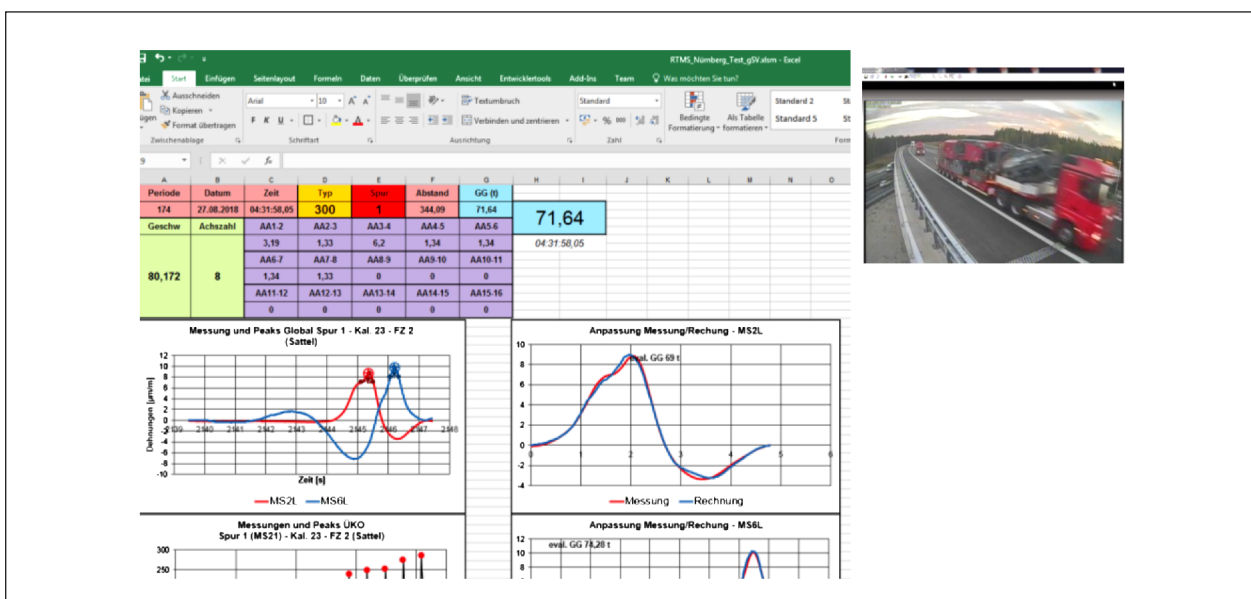


Bild 100: Visualisierung der Erkennung eines Fahrzeuges des Großraum- und Schwerlastverkehrs

Visualisierungen dienen hier lediglich zur Dokumentation der grundsätzlichen Erkennung der Fahrzeuge und stellen in dieser Form keine finale Umsetzung von Ergebnisdarstellungen zum Beispiel in der Web-Anwendung dar.

4.2 Klimadaten

Bislang wurden automatische Auswertungen der ermittelten Sensordaten vorgenommen. Messdaten werden, wenn möglich, quartalsweise an die BAST übergeben.

In diesem Kapitel werden ausgewählte Messergebnisse des gesamten bisherigen Messzeitraums aufgezeigt und gegebenenfalls erläutert. Die zwei großen Messausfälle sind durch eine Geradeninterpolation gekennzeichnet.

4.2.1 Wetterstation

Die Wetterstation erfasst Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Regen, Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Bild 107 zeigt den Temperaturverlauf vom 26.09.2019 bis 24.10.2019 exemplarisch. Die starken Schwankungen sind dem Tag-Nacht-Verlauf geschuldet. Die erfassten Daten stimmen mit den Erwartungswerten der Jahreszeiten überein.

Bild 108 zeigt die erfasste Luftfeuchtigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019. Es ist zu erkennen, dass die Luftfeuchtigkeit teils stark schwankt und sich im Winter/Herbst immer weiter den 100 % annähert.

Bild 109 zeigt die erfasste Regenmenge vom 26.09.2019 bis 24.10.2019. Der Übersicht halber wurden starke Outlier abgeschnitten. So ist ein Sensor trotz Schirmung durch starke Windeinflüsse derart gestört worden, dass ein Sensorwert von mehr als 1.800 Liter Regen pro Quadratmeter anfiel. Es ist zu erkennen, dass im Herbst/Winter deutlich beständiger Regen fällt, die besonders starken Abweichungen von der Norm jedoch im Sommer auftraten.

Bild 110 zeigt die Windgeschwindigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019 exemplarisch. Die Windrichtung wurde ebenfalls erfasst, ist jedoch wenig aussagekräftig im Jahresüberblick und wurde dem-

entsprechend ausgelassen. Es ist zu erkennen, dass extrem starke Regenfälle häufig mit ähnlich starkem Wind zusammen auftreten. Es sind starke Ausschläge Anfang Oktober in beiden Graphen zu erkennen.

4.2.2 Referenzdaten des Dwd

Um die erfassten Wetterdaten zu verifizieren und weitere Daten, welche die Wetterstation der UzL nicht erfassen kann, bereitzustellen, verwendet die Universität zu Lübeck die erfassten Daten der nächsten Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes.

Bild 101 zeigt die Lage der Wetterstation im Vergleich zur Intelligenten Brücke. Als Referenzdaten werden vom Deutschen Wetterdienst Schattentemperatur, Windgeschwindigkeit und Regen/Stunde verwendet. Hinzu kommen Daten zur Sonnenscheindauer und Sonnenscheinintensität, welche nicht von der Wetterstation der UzL erfasst werden können.

Bild 102 zeigt die erfasste Temperatur. Es ist eine deutliche Korrelation mit den Daten der Wetterstation (Bild 107) zu erkennen. Bild 103 verdeutlicht



Bild 101: Standort der Wetterstation im Vergleich zur Intelligenten Brücke (ca. 13 km)

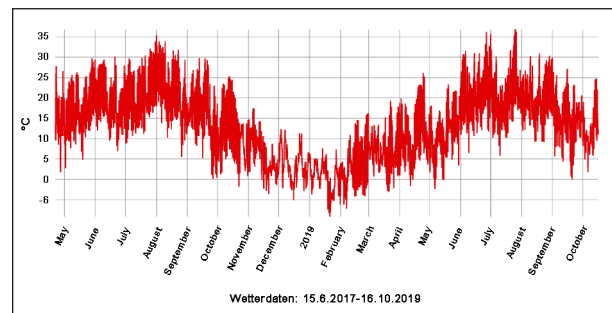


Bild 102: Temperaturdaten des Dwd über den Messzeitraum der Wetterstation der UzL

die Regenmenge pro Quadratcentimeter über den gesamten Messzeitraum. Die Korrelation mit den Daten der Brücke ist vorhanden, allerdings deutlich weniger stark ausgeprägt. Die geografische Distanz ist bei ca. 13 km vermutlich bereits zu hoch.

Bild 104 zeigt die Windgeschwindigkeit, welche vom Deutschen Wetterdienst gemessen wurde. Diese korreliert ebenfalls stark mit den an der Brücke gemessenen Werten (Bild 110).

Bild 105 zeigt die Sonnenscheindauer über den Messzeitraum. Diese kann von der Wetterstation der UzL nicht erfasst werden. An dieser Stelle muss vollständig auf die Referenzwerte des Deutschen Wetterdienstes verwiesen werden.

Bild 106 zeigt die vom Deutschen Wetterdienst gemessenen Strahlungsdaten. Diese könnten von größerem Interesse sein als die reine Sonnenscheindauer, da quantifizierte Ergebnisse vorliegen. Die reine Sonnenscheindauer lässt kaum Rückschlüsse auf die eingestrahlte Energiemenge zu.

Die aufgezeigten Daten entstammen dem FTP-Server des Deutschen Wetterdienstes. Dieser ist frei zugänglich und kann von beliebigen Parteien ge-

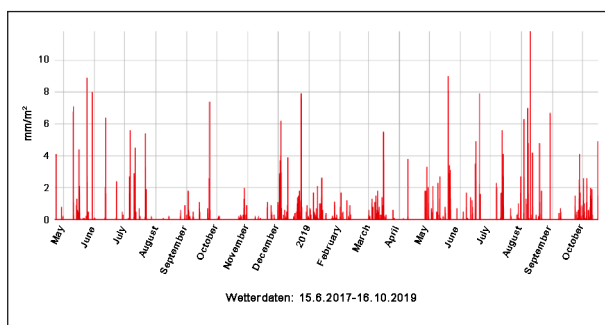


Bild 103: Regenmenge pro Stunde über den Messzeitraum der Wetterstation der UzL

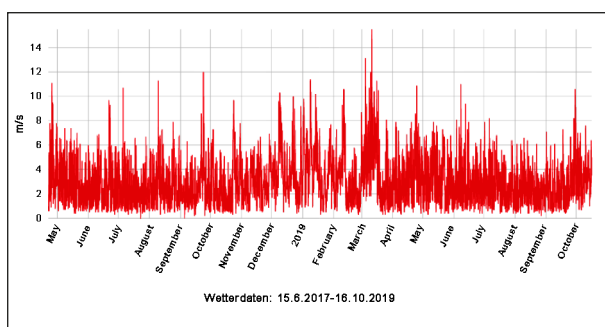


Bild 104: Windgeschwindigkeit vom Dwd über den gesamten Messzeitraum der Wetterstation der UzL

nutzt werden. Der Server ist unter der Adresse ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/hourly/ erreichbar. Die verantwortliche Wetterstation ist die Nummer 03668. In den Unterverordnern befinden sich PDF-Dateien, welche Informationen zur Formatierung, Bedeutung und Lesbarkeit der verschiedenen Dateien beinhalten. Unter der Adresse ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/hourly/air_temperature/recent/ befinden sich besagte Dateien.

Die Station 03668 verfügt über den vollen Funktionsumfang, was nur bei einem Bruchteil der Wetterstationen in Deutschland der Fall ist.

Da die Daten teilweise Ausreißer enthalten, hat die UzL diese manuell entfernt. In den Rohdaten sind diese durch den Wert -999 gekennzeichnet.

Das verwendete Datenformat ist sehr alt. Verwendet werden Textdateien, welche wie CSV-Dateien formatiert sind. Zeilenumbrüche werden mit dem String `or` gekennzeichnet.

Die grafische Aufarbeitung ist mittels Tabellenkalkulationsprogrammen vorgenommen worden.

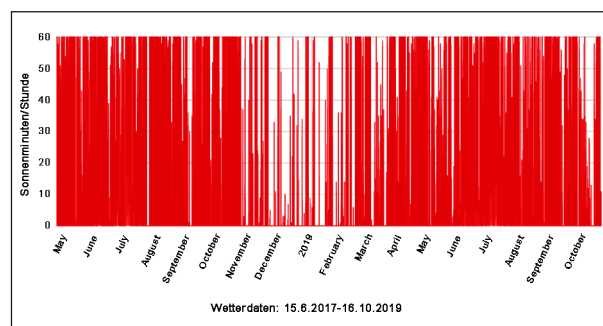


Bild 105: Sonnenscheindauer über den gesamten Messzeitraum der UzL, erfasst durch den Dwd

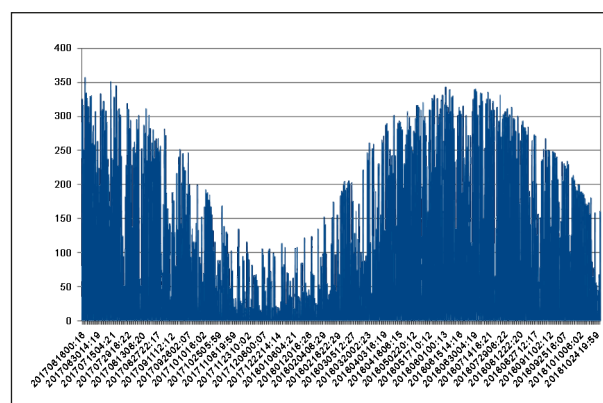


Bild 106: Sonnenscheinintensität in Joule pro Quadratcentimeter gemessen durch den Dwd

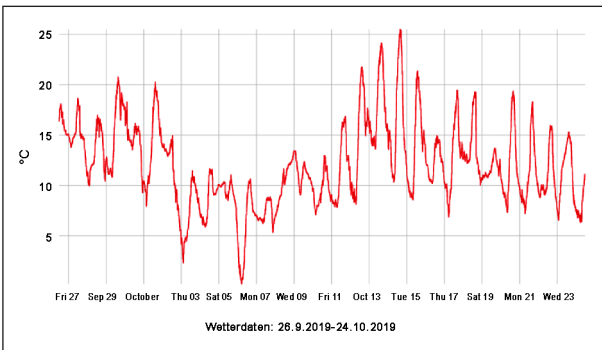


Bild 107: Dargestellt ist die erfasste Schattentemperatur vom 26.09.2019 bis 24.10.2019

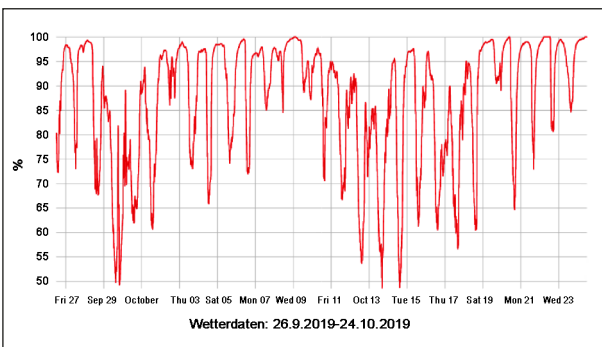


Bild 108: Dargestellt ist die erfasste Luftfeuchtigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019

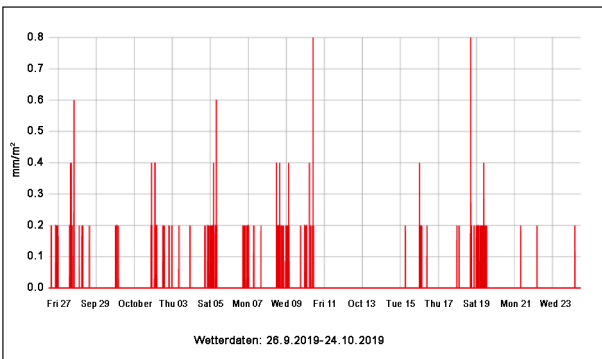


Bild 109: Dargestellt ist die erfasste Regenmenge vom 26.09.2019 bis 24.10.2019

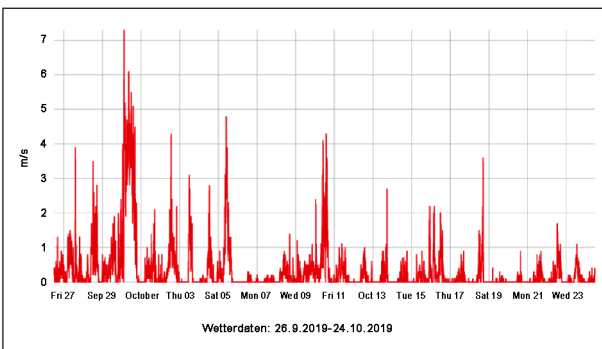


Bild 110: Dargestellt ist die erfasste Windgeschwindigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019

4.3 Statische Brückenreaktionen

In diesem Kapitel werden ausgewählte erfasste statische Bauwerksdaten aufgezeigt. Die zwei großen Messausfälle sind ebenfalls durch eine Geradeninterpolation gekennzeichnet.

4.3.1 Risse

Bild 111 zeigt die Rissentwicklung des Sensors CC8C. Dieser ist direkt an der Spanngliedverankerung an der Achse 50 angebracht. Es ist zu erkennen, dass eine Korrelation mit der Außentemperatur festzustellen ist. Bei Wärme sind Risse eher weiter geöffnet, bei Kälte geschlossener. Es ist anzumerken, dass lediglich der Ausschlag des Sensors aufgezeigt ist – dieser entspricht nicht der tatsächlichen Rissgröße.

4.3.2 Neigung

Bild 112 zeigt die Neigung der Intelligenten Brücke in Fahrtrichtung über den gesamten Messzeitraum. Es ist zu erkennen, dass die Neigung der Brücke mit fallenden Temperaturen zunimmt. Es sind Schwankungen von circa 0,1 Grad zu erkennen.

4.3.3 Kraft

Bild 113 zeigt die einwirkende Kraft auf gewählte Risse in der Nähe der Spannglieder. Angegeben sind gemessene Spannungswerte. Werte von 1,73 entsprechen dabei keiner einwirkenden Kraft und Werte bis 1,88 entsprechen einer Kräfteinwirkung von mehr als 7 kg. Der Sensor ist bis auf wenige Prozentpunkte linear.

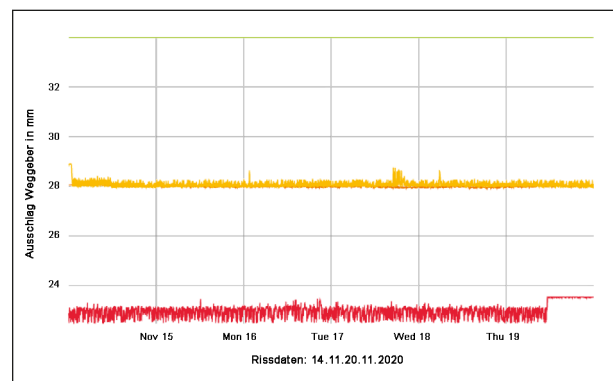


Bild 111: Dargestellt ist die erfasste Rissgröße über den Messzeitraum 14.11.2020 bis 22.11.2020. Aufgezeigt sind die Sensorknoten CCA3 (rot), CC8C (orange), CC29 (gelb) und CC9F (grün)

4.3.4 Bauwerkstemperatur

Bild 114 zeigt die verschiedenen Temperaturen an unterschiedlichen Stellen des Bauwerks. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen unterschiedlich stark schwanken. Die Oberflächentemperatur schwankt deutlich weniger stark als die Schattentemperatur.

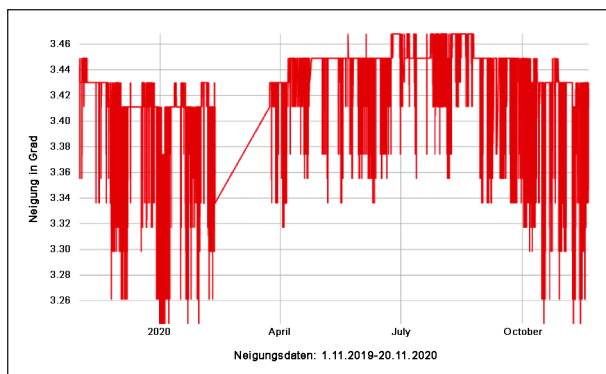


Bild 112: Dargestellt ist die erfasste Neigung über den Messzeitraum 1.11.2019 bis Ende 20.11.2020

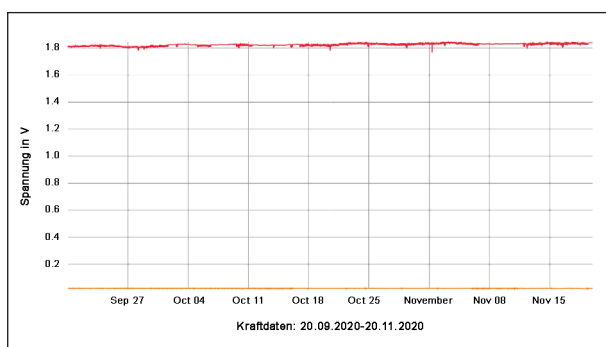


Bild 113: Dargestellt ist die erfasste Kraftauswirkung auf die Oberfläche über den Messzeitraum 20.09.2020 bis 20.11.2020

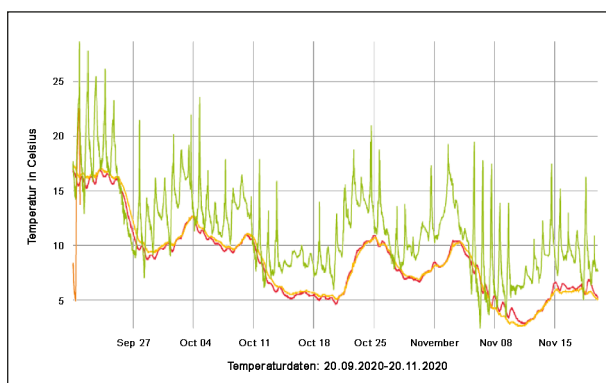


Bild 114: Lufttemperatur im Schatten CBF3 (grün), Oberflächentemperatur Hohlkörper Oben CBEB (gelb), Oberflächentemperatur Hohlkörper Unten CC14 (rot) und Lufttemperatur der Wetterstation CBF4 (orange)

4.4 Statische Beanspruchung der Brücke bzw. Verkehrslastbild

Im Rahmen der Bearbeitung des parallelen Forschungsprojektes FE 15-0631-2016-LRB [3] wurde eine Methodik zur Ermittlung von statischen Beanspruchungen aus dem Verkehr über eine geeignete Auswertung der Messdaten umgesetzt.

Die nachfolgenden Ausführungen wurden aus [3] in gekürzter Form übernommen.

Die Ermittlung von Kennwerten der statischen Beanspruchungen aus dem Verkehr erfolgt durch eine statistische Auswertung der Zeitverläufe an ausgewählten Messstellen. Die dafür eingesetzte Methode wurde in zahlreichen vorhergehenden Untersuchungen mit verschiedenen Zielstellungen entwickelt und eingesetzt. In den meisten bisherigen Untersuchungen wurden dabei statistische Auswertungen von Kennwert-Zeit-Verläufen aus simulierten Fahrzeugfolgen durchgeführt.

Im Zuge der statistischen Auswertung wird ein Kennwert-Zeit-Verlauf einer Klassengrenzendurchgangszählung zugeführt. Es wird also gezählt, wie oft der Verlauf festgelegte Klassengrenzen über- bzw. unterschreitet. Das Ergebnis dieser Auszählung ist ein Histogramm, in dem für jede Klassengrenze die absolute Anzahl der Über- bzw. Unterschreitungen aufgetragen ist. Für die weitere Auswertung ist es dann erforderlich, an dieses Histogramm eine geeignete Funktion anzunähern. Hierzu wird in im verwendeten Verfahren die Rice-Verteilung genutzt und die Parameter dieser Funktion über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Sind diese Parameter bekannt, können Werte mit einer beliebigen Wiederkehrperiode, also auch Werte mit einer Wiederkehrperiode von 1000 Jahren, die als charakteristische Werte definiert werden, berechnet werden.

Die Erläuterungen für die Aufbereitung der Messdaten hin zu Kennwerten der statischen Beanspruchungen aus Verkehr erfolgten nachfolgend exemplarisch für die Messstelle MS6L. Entsprechende Auswertungen werden ebenfalls für die Messstellen MS1L, MS2L und MS5L sowie zu Testzwecken für die Messstellen MS7Q, MS8Q, MS13Q und MS14Q durchgeführt.

In den beiden nachfolgenden Diagrammen sind für die Messstelle MS6L die Stundenmaximalwerte (Bild 115) und die Stundenminimalwerte (Bild 116) mit einer jeweils zusätzlich eingetragenen Hüllkurve

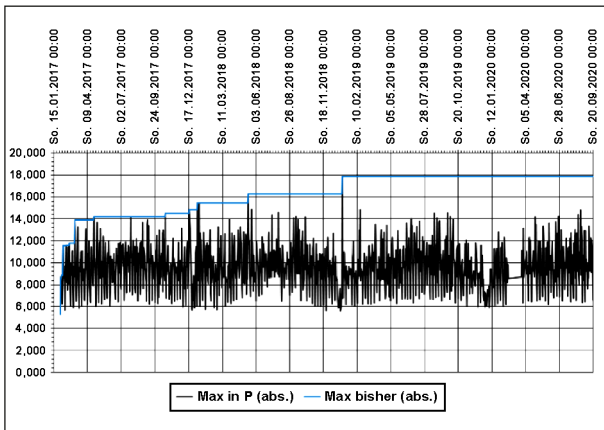


Bild 115: MS6L – Stunden-Maximalwerte und Hüllkurve

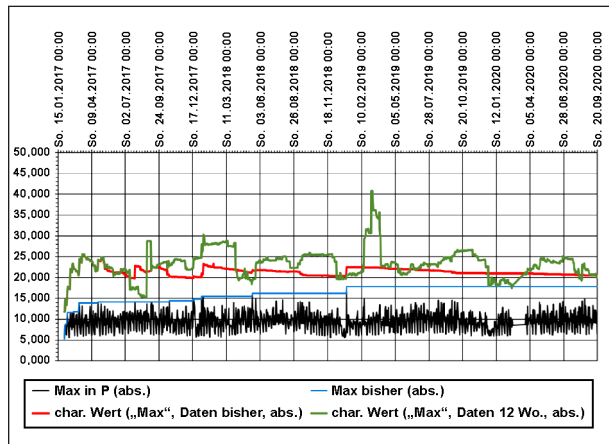


Bild 117: MS6L – Stunden-Maximalwerte, Hüllkurve und charakteristische Werte

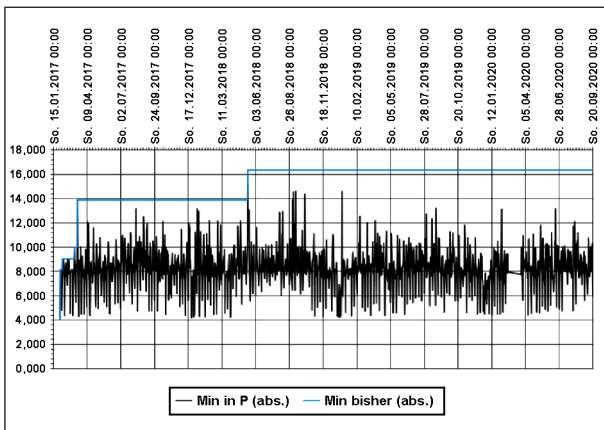


Bild 116: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte) und Hüllkurve

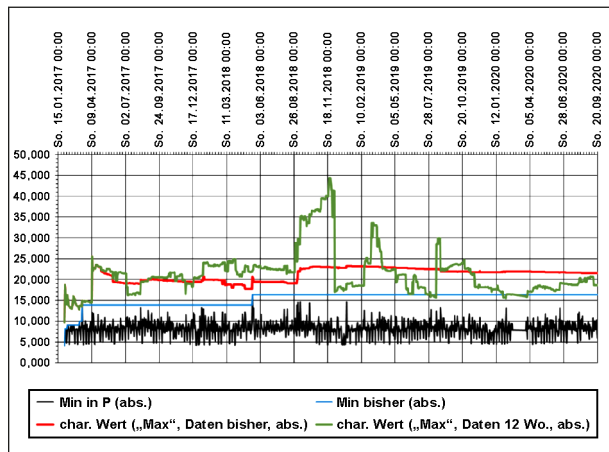


Bild 118: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte

dargestellt. Die Stundenmaximal- bzw. Minimalwerte ergeben sich dabei aus einer zunächst durchgeführten Temperaturkompensation der Messdaten über die Bildung eines gleitenden Mittelwertes über 400 Sekunden. Diese Kompensation wird ebenso für die Verkehrserkennung und Gesamtgewichtsbestimmung eingesetzt. Damit liefert der berechnete Messdatenverlauf vordergründig Tragwerksreaktionen aus dem Verkehr. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt unter dieser Grundannahme.

Neben der Bestimmung der Stundenmaximal- bzw. Minimalwerte erfolgt die Auswertung der bereinigten Messdaten mit genannter Methodik. Hierzu werden zwei Varianten betrachtet. In der ersten Variante werden zum Auswertungszeitpunkt alle bisher aufgelaufenen Daten für die statistische Auswertung und Extrapolation herangezogen. In einer zweiten Variante werden lediglich die aufgelaufenen Daten der zum Auswertungszeitpunkt letzten 12 Wochen herangezogen.

In Bild 117 und Bild 118 sind die in den beiden genannten Varianten ermittelten charakteristischen Werte eingetragen. Es wird ersichtlich, dass insbesondere die ermittelten charakteristischen Werte auf der Datenbasis der letzten 12 Wochen deutliche Streuungen aufweisen. Anzumerken ist dabei, dass durch die direkte Auswertung der Messdaten bestimmte ungünstige Situationen, wie zum Beispiel die Überfahrt eines sehr schweren Sondertransportes, direkten Einfluss auf die Auswertung und vor allem die Extrapolation der Werte hin zu den gesuchten Werten mit einer rechnerischen mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren haben.

Für die Ableitung von relevanten Aussagen zu den ermittelten statischen Beanspruchungswerten aus dem Verkehr ist der Vergleich mit den Werten aus dem Ansatz des für die Bemessung des Tragwerkes verwendeten Lastmodells erforderlich. In nachfolgender Tabelle 39 sind die entsprechenden Werte zusammengestellt. Die Werte wurden dabei an-

Messstelle	LM 1 (EC + NA) positiver Bereich	LM 1 (EC + NA) negativer Bereich
MS1L	53,869	-16,23
MS2L	51,476	-16,58
MS5L	66,474	-31,82
MS6L	63,409	-35,02

Tab. 39: Vergleichswerte aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 nach Eurocode und NA

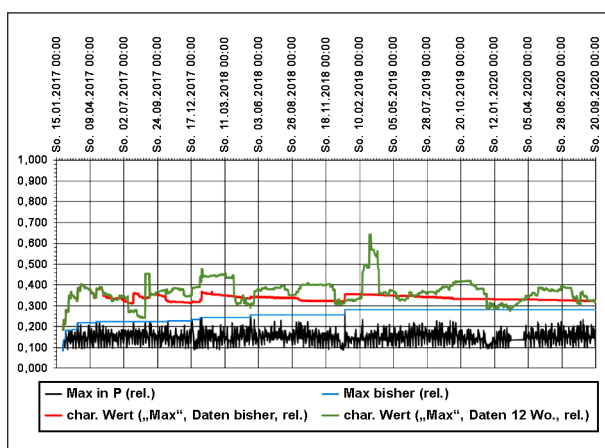


Bild 119: MS6L – Stunden-Maximalwerte, Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1

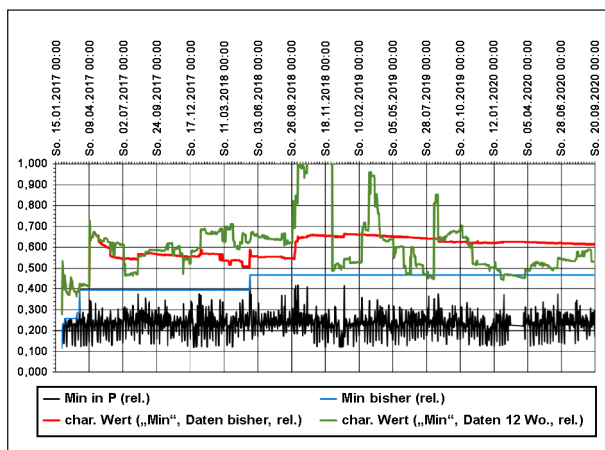


Bild 120: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1

hand von Einflussflächen für die betrachteten Kennwerte ermittelt.

In den Diagrammen in Bild 119 und Bild 120 sind die Ergebnisse aus Bild 117 und Bild 118 als Verhältnisse zu den Vergleichswerten aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 für Messstelle MS6L aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass für den Bereich der

Minimalwerte die ermittelten charakterlichen Werte auf Grundlage der Daten der jeweils letzten 12 Wochen zum Teil über dem Wert aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 liegen. Vor dem Hintergrund der Methodik der Ermittlung der charakteristischen Werte aus Messdaten wird dieser Sachverhalt hier jedoch als weniger relevant eingeschätzt.

4.5 Ermüdungsbeanspruchung der Brücke

Im Rahmen der Bearbeitung des parallelen Forschungsprojektes FE 15-0631-2016-LRB [3] wurde eine Methodik zur Ermittlung von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln aus dem Verkehr über eine geeignete Auswertung der Messdaten umgesetzt.

Die nachfolgenden Ausführungen wurden aus [3] in gekürzter Form übernommen.

Zur Identifikation von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln werden die Messdaten von ausgewählten Messstellen ausgewertet. Bei den betrachteten Punkten handelt es sich dabei um die Messstellen mit Dehnungsmessungen an der eingebauten schlaffen Bewehrung (MS1L, MS2L, MS5L, MS6L).

Für die Ermittlung von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln werden die Messdaten einer Rainflow-Auszählung unterzogen. Der hierfür verwendete Algorithmus wurde aus der Literatur entnommen und bestimmt geschlossene Hystereseschleifen in einem beliebigen Zeitverlauf. Vor der Durchführung der Rainflow-Auszählung werden die Messverläufe analog zum vorhergehenden Kapitel um Anteile aus Temperatur bereinigt, indem die Bildung eines gleitenden Mittelwertes der Messdaten über 400 Sekunden realisiert wird. Entsprechend werden die erhaltenen Schwingspiele als rein verkehrsinduziert angesehen.

Die Anwendung der Rainflow-Auszählung liefert eine Rainflow-Matrix. Durch Spiegelung dieser Matrix an der Hauptdiagonale erhält man die Anzahl von geschlossenen Schleifen mit unterschiedlichen Schwingbreiten. Die Delta-Werte der Dehnungen werden linear in Delta-Werte der Spannungen umgerechnet.

Sind Größe und Anzahl der Schwingspiele bekannt, muss der ertragbare Wert von Schwingungsspiel und Anzahl für den verwendeten Stahl ermittelt wer-

den. Die Berechnung von Schädigungen aus den ermittelten Schwingspielen erfolgt anhand der Wöhler-Linie für Schlaffstahl entsprechend dem deutschen NA zum EC 2 Teil 2 (DIN EN 1992-2/NA). Die Berechnung von Schädigungssummen erfolgt mit den ermittelten Spannungsschwingbreiten und definierten Wöhler-Linien nach den technisch üblichen Verfahren.

Die genannten Auswertungen führen zunächst zu Schädigungssummen im betrachteten Auswertungszeitraum. Für die Ableitung von praktikablen Vergleichswerten werden diese Schädigungssummen im weiteren Verlauf zu Schädigungsäquivalenten Schwingbreiten umgerechnet. Dies erfolgt entsprechend dem Nachweiskonzept des Eurocodes. Die schädigungsäquivalenten Schwingbreiten werden mit den entsprechenden Werten verglichen, die sich aus dem Ermüdungsnachweis für die betrachteten Stellen am Tragwerk ergeben.

Nachfolgend wird das Vorgehen exemplarisch für die Messstelle MS1L beschrieben.

Im Diagramm in Bild 121 sind ermittelte Schädigungssummen für den gesamten bisherigen Auswertungszeitraum dargestellt. Dabei werden verschiedene Zeiträume betrachtet. In der ersten Variante werden zum Auswertungszeitpunkt alle bisher aufgelaufenen Daten für die Ermittlung der Schädigungssumme herangezogen. In den weiteren Varianten werden lediglich die aufgelaufenen Daten der zum Auswertungszeitpunkt letzten 52 Wochen, 12 Wochen und der letzten Woche herangezogen. Hieraus geben sich die unterschiedlichen Verläufe der Schädigungssummen.

Im nächsten Schritt werden die ermittelten Schädigungssummen in schädigungsäquivalente Schwing-

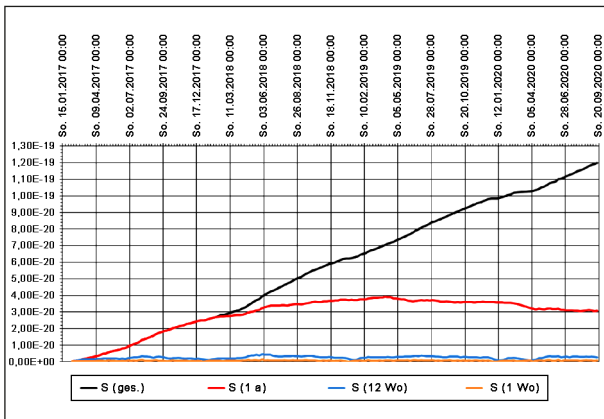


Bild 121: MS1L – Ermittelte Schädigungssummen für verschiedene Betrachtungszeiträume

breiten umgerechnet. Das Ergebnis dieser Umrechnung ist für das hier betrachtete Beispiel in Bild 122 dargestellt. Diese Ergebnisse bilden in der weiteren Aufbereitung die Datengrundlage. Sie repräsentieren einen Wert $\Delta\sigma_{Mess, equ}$ für den jeweiligen Betrachtungszeitraum. Als Vergleichsbasis dient der zu berechnende Wert $\Delta\sigma_{s, equ}$ nach Norm. Dieser Wert ergibt sich nach Gleichung (4.1) aus den Einzelwerten nach Gleichung (4.2) bis (4.4).

$$\Delta\sigma_{s, equ} = \Delta\sigma_s \cdot \lambda_s \tag{4.1}$$

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{ELM3} \cdot f \tag{4.2}$$

$$f = 1,4 \tag{4.3}$$

$$\lambda_s = \varphi_{fat} \cdot \lambda_{s,1} \cdot \lambda_{s,2} \cdot \lambda_{s,3} \cdot \lambda_{s,4} \tag{4.4}$$

Der Wert $\Delta\sigma_{ELM3}$ wird dabei in Analogie zu den ermittelten Vergleichswerten bei den betrachteten statischen Beanspruchungen aus erzeugten Einflussflächen für die betrachteten Kennwerte jedoch unter Ansatz des Ermüdungslastmodell ELM 3 ermittelt. Der Wert f wird mit 1,4 angesetzt (Tragwerksbereich außerhalb der Zwischenstützen).

Der Wert λ_s ist ein Produkt aus mehreren Teilfaktoren. Der Wert $\lambda_{s,1}$ zur Berücksichtigung des Bauteiltyps wird aus dem Nomogramm der DIN EN 1992-2 (Bild NN.2) entnommen und liegt bei einem Wert von 1,2. Der Wert $\lambda_{s,1}$ zur Berücksichtigung des Verkehrsvolumens wird in den vorliegenden Auswertungen vereinfacht mit 1,0 angenommen, ebenso der Wert $\lambda_{s,4}$ zur Berücksichtigung von Verkehr auf mehreren Fahrstreifen. Der Wert φ_{fat} wird mit 1,2 angesetzt.

Damit verbleibt in der Zusammenstellung der Wert $\lambda_{s,3}$ als Beiwert zur Berücksichtigung von verschiedenen Nutzungsdauern. Nach Norm ergibt sich dieser Wert entsprechend nachfolgender Gleichung (4.5). Diese Gleichung wird zu Gleichung (4.6) erweitert.

$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{years}}{100}} \tag{4.5}$$

$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{Hours}}{100 \cdot 365 \cdot 24}} \tag{4.6}$$

Die Ermittlung der Vergleichswerte erfolgt nunmehr mit den genannten Parametern. Der Wert $\Delta\sigma_{ELM3}$ unterscheidet sich für die verschiedenen betrachteten Messstellen, die übrigen Werte sind unabhängig von den betrachteten Messstellen. Für den Wert $\lambda_{s,3}$

werden verschiedene Zahlenwerte entsprechend den unterschiedlichen betrachteten Zeiträumen verwendet.

Aus der Bildung der Verhältniswerte zwischen den ermittelten schädigungsäquivalenten Schwingbreiten (Bild 122) und den berechneten Vergleichswerten ergeben sich die in Bild 123 dargestellten Ergebnisverläufe. Es wird ersichtlich, dass sich für die beiden berücksichtigten Betrachtungszeiträume 52 Wochen und Gesamtzeit nach einem Jahr Datenauswertung (Februar 2018) keine wesentlichen Änderungen der ermittelten Werte zeigen. Für die kürzeren Betrachtungszeiträume (12 Wochen, 1 Woche) zeigen sich erwartungsgemäß gewisse Änderungen der Werte, da sich hier saisonale Effekte stärker in den Ergebnissen widerspiegeln.

Entsprechend der beschriebenen Art der Datenaufbereitung bedeutet der im Beispiel vorliegende Ergebniswert von rund 0,45 nicht, dass nach der bis-

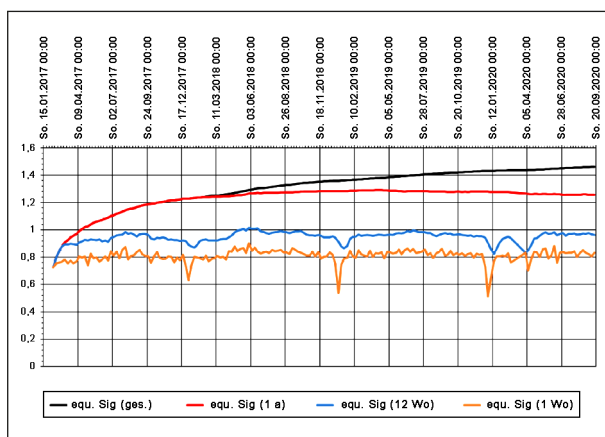


Bild 122: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten für verschiedene Betrachtungszeiträume

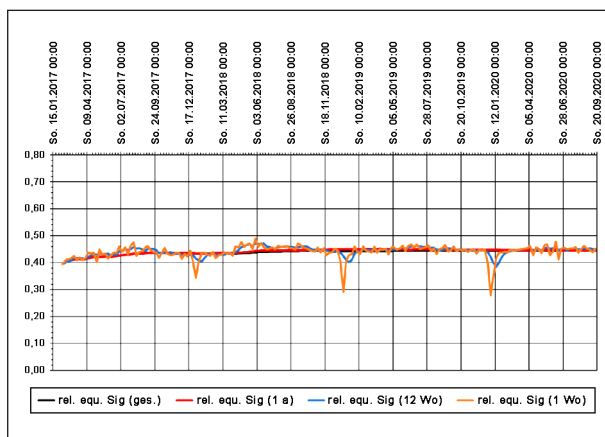


Bild 123: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten im Verhältnis zu Vergleichswerten für verschiedene Betrachtungszeiträume

herigen Nutzungszeit des Bauwerkes von nahezu drei Jahren bei einer angestrebten Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren bereits 45 % einer gedachten Ermüdungskapazität erschöpft sind. Für die Betrachtungsvariante des gesamten bisherigen Zeitraumes wird im Laufe der weiteren Auswertungen der Messdaten die rechnerische Schädigungssumme weiter ansteigen. Die schädigungsäquivalente Schwingbreite steigt ebenfalls weiter an, aufgrund der für die Umrechnung zugrundeliegenden Wöhler-Linie jedoch nicht in linearem Verhältnis zum Anstieg der Schädigungssumme. Der Vergleichswert aus dem Ermüdungslastmodell steigt jedoch aufgrund des eingeführten Anpassungsfaktors $\lambda_{s,3}$ nach Gleichung (7.6) ebenso weiter an. Unter der Annahme, dass die Charakteristik der bisherig ermittelten, schädigungsrelevanten Schwingspiele aus dem Verkehr in Zukunft unverändert bleibt, kann davon ausgegangen werden, dass sich der ermittelte Vergleichswert von rund 0,45 nicht wesentlich ändert. Entsprechend würden jedoch eben solche Änderungen der Charakteristik der schädigungsrelevanten Schwingspiele zu einer Änderung des Verlaufes des ermittelten Vergleichswertes führen und können entsprechend identifiziert werden.

4.6 Selbstüberwachung der Kalottenlager

4.6.1 Allgemeines

Anhand der Signale der Sensoren, die in der Achse 40 im Lager 40/1 und 40/3 eingebaut sind (siehe Kapitel 2.1.1.1), werden die Kalottenlager überwacht, indem die realen Verschiebungen, Verdrehungen und Drücke mit den für die Auslegung der Lager vorgegebenen Bemessungswerten verglichen werden.

4.6.2 Druckbelastung

Die gemessenen Druckmaxima und -minima und Mittelwerte von Sensor DS 40/1-3 und DS 40/3-3 liegen im Bereich der Bemessungswerte für den Zustand der Gebrauchstauglichkeit von $f_{d,GZG} \leq 60 \text{ N/mm}^2$ (siehe Bild 125 bis Bild 128).

Der Sensor DS 40/3-3 zeigt zeitweise Tagesmaxima in einer Größenordnung, die nicht durch überrollenden Verkehr verursacht wird. Diese werden durch einen elektronischen Defekt des Sensors

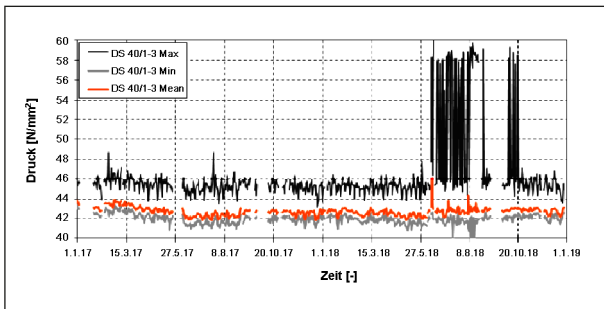


Bild 124: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\1-3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

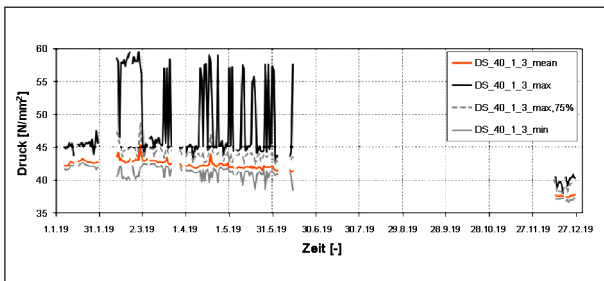


Bild 125: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\1-3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

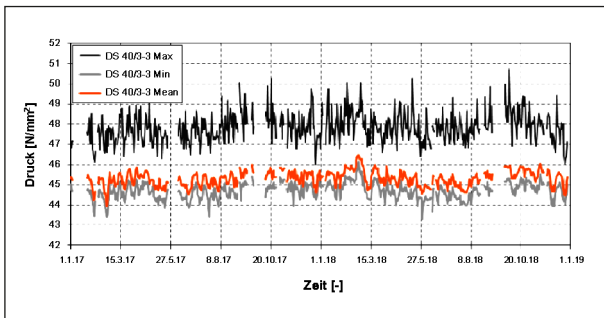


Bild 126: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\3-3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

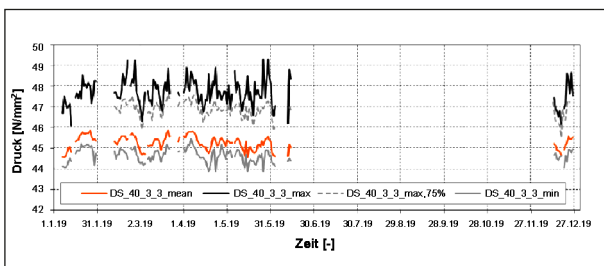


Bild 127: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\3-3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

hervorgerufen, der nicht identifizierbar ist. Auffällig ist, dass die hohen Maxima in den Sommermonaten entstehen und im Winter nicht auftreten. Um die Ergebnisqualität von diesen Störungen zu bereinigen, wurden in 2019 zusätzlich die 75%-Quantile der Tagesmaxima ausgewertet.

Aufgrund des langen Ausfalls des Datenrekorders im Jahr 2019 wird empfohlen, die Drucksensoren mithilfe von kontrollierten Überfahrten zu prüfen. Dies wurde im Jahr 2020 im Rahmen der kontrollierten Überfahrten für das Projekt FE15.0644 [2] gemacht. Zusätzlich werden die außenliegenden Kontakte der Sensoren geprüft.

Die Daten des Sensors 40/3-3 liefern zuverlässig gute Werte. Die gemessenen Drücke sind im unkritischen Bereich für das Lager.

4.6.3 Verschiebung

Die 10-minütigen Mittelwerte der Verschiebung der ebenen Gleitfläche zeigen, dass der Gleitweg in der ebenen Gleitfläche deutlich unterhalb der maximal möglichen Verschiebung von ± 125 mm liegt (siehe Bild 128 und Bild 129). Eine detaillierte Beschreibung der Lagerwege ist in Kapitel 4.6.7 zu finden.

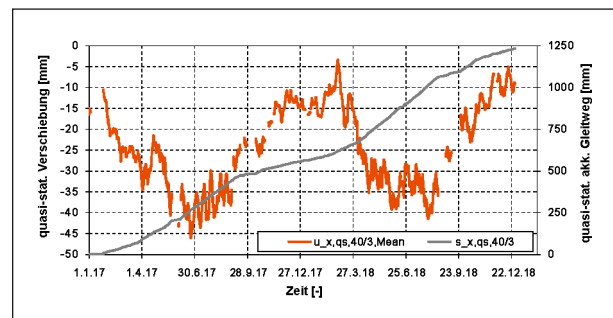


Bild 128: Tägliche Mittelwerte der gemessenen quasi-stationären Gleitwege $u_{x,qs,40\3,Mean}$ des Sensors WA 40\3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018 und akkumulierter Gleitwege $s_{x,qs,40\3}$

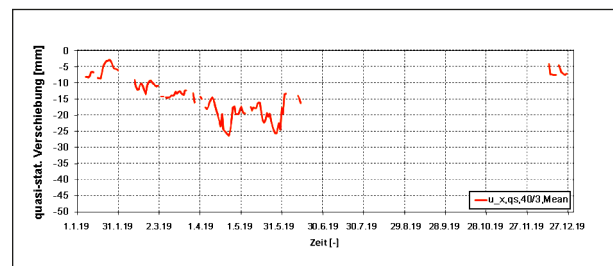


Bild 129: Tägliche Mittelwerte der gemessenen quasi-stationären Gleitwege $u_{x,qs,40\3,Mean}$ des Sensors WA 40\3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

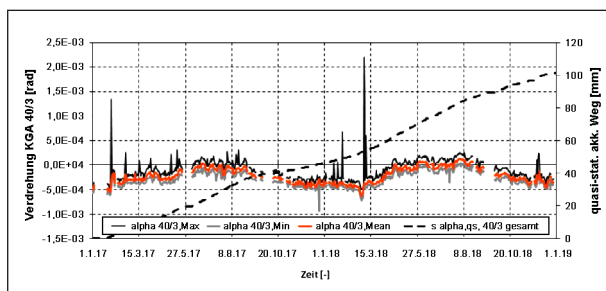


Bild 130: Quasi-stationäre Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima der Lagerverdrehung im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018 und akkumulierter Gleitweg infolge quasi-statischer Lagerverdrehung

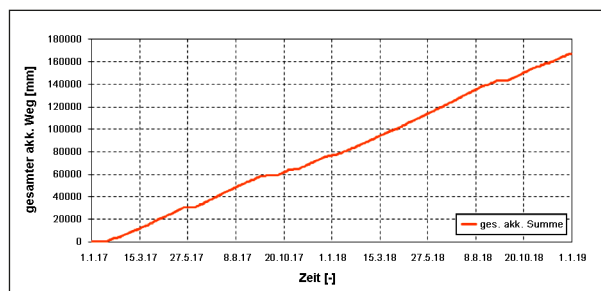


Bild 132: Akkumulierte ebene Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

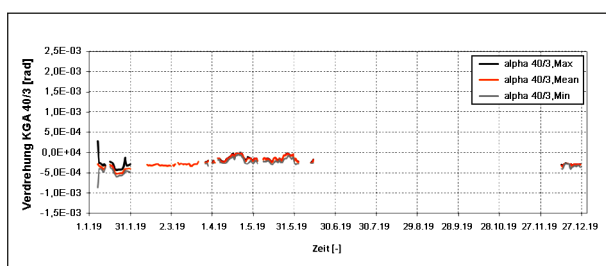


Bild 131: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der berechneten Lagerverdrehung anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

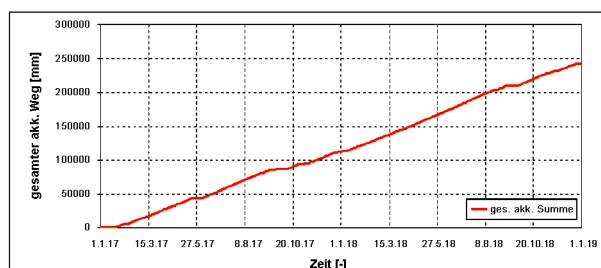


Bild 133: Akkumulierte sphärische Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

4.6.4 Verdrehung

Die anhand der gemessenen Abstände mit Sensor AS 40\3-1 und AS 40\3-2 berechnete Lagerverdrehung zeigt, dass die maximale Rotationskapazität von 0,02 rad nicht erreicht wurde (siehe Bild 130 und Bild 131). Eine maximale Verdrehung von $\pm 0,02$ rad entspricht einem Abstand von 0...2 mm. Der Sensor AS 40\3-2 zeigt zwar kurzzeitig einen größeren Abstand als 2 mm an. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen Sensor und Lageroberteil kurzzeitig größer als 2 mm war, der Verdrehwinkel insgesamt aber geringer war. Diese Verdrehung führte zu keiner Beschädigung am Sensor.

4.6.5 Akkumulierte Gleitwege

Für die Lebensdauer des Gleitmaterials sind die akkumulierten Wege der ebenen und der konkaven Gleitfläche maßgeblich (siehe Bild 132 bis Bild 134). Dafür wurde der Mittelwert der ebenen Lagerverdrückung bzw. konkaven Lagerverdrehung auf jeder 10-minütigen Messdatei berechnet und daraus der akkumulierte Gleitweg ermittelt.

Eine detaillierte Beschreibung der akkumulierten Gleitwege ist in Kapitel 4.6.7 zu finden.

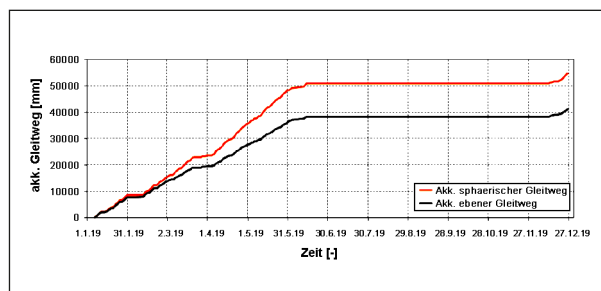


Bild 134: Akkumulierte ebene und sphärische Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

4.6.6 Gleitpalte der ebenen und sphärischen Gleitfläche

Der relative Abstand zwischen Lagerunterteil und dem Zentrum des Lageroberteils wird mithilfe der Abstandssensoren und der Annahme eines mechanischen Kalottenlagermodells berechnet. Die Werte des berechneten LO-Abstands können als Indiz für Verschleiß verstanden werden, da einige Einflussgrößen im mechanischen Modell vernachlässigt werden. Der Verlauf des LO-Abstands über den zweijährigen Zeitraum basierend auf quasi-stationären Werten ergibt einen sinnvollen Verlauf mit geringer Streubreite, die durch vernachlässigbare Einflussfaktoren hervorgerufen wird. Somit ist die Be-

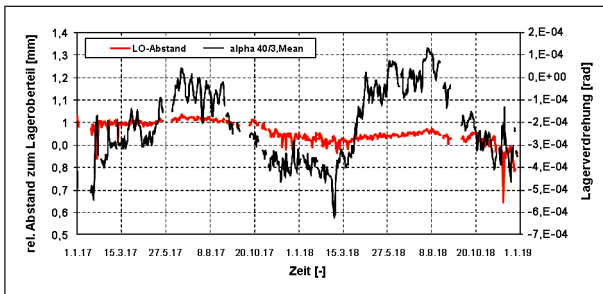


Bild 135: Berechneter Abstand zur oberen Lagerplatte anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

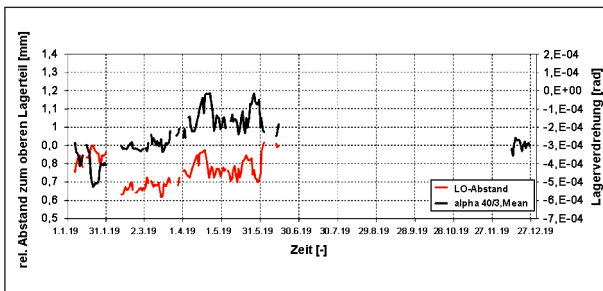


Bild 136: Berechneter Abstand zur oberen Lagerplatte anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019

trachtung des LO-Abstands eine geeignete Größe zur Eigenüberwachung des Kalottenlagers, d. h. der Verschleiß des Gleitmaterials infolge Gleitweg wird überwacht. In Bild 135 und Bild 136 ist eine Reduktion des Abstands von ca. 1 mm auf 0,6 mm, die eventuell mit jahreszeitlichen Temperaturschwankungen korreliert sein könnte, zu erkennen. Für eine Beurteilung, ob die Abnahme durch Verschleiß des Gleitmaterials oder durch Setzungen des Betons oder Durchbiegungen hervorgerufen wird, ist ein längerer Messzeitraum erforderlich und ein Vergleich mit dem Gleitspalt, der bei einer Brückeninspektion gemessen wird.

4.6.7 Selbstüberwachung der Kalottenlager

In der automatisierten Auswertung (ab Febr. 2019) wird die Selbstüberwachung der Lager bei den Angaben zum Bauwerksstatus auf der Status-Seite der Webpage berücksichtigt. Unter „Lager 1“ wird der akkumulierte Gleitweg als Maximalwert des ebenen und des sphärischen Gleitwegs in km angegeben. Die Bewertung erfolgt farblich wie folgt:

- Grün – Gleitweg < 40 km
- Gelb – Gleitweg < 45 km
- Rot – Gleitweg < 50 km

Unter „Lager 2“ wird der maximale gemessene Lagerdruck bezogen auf den zulässigen Lagerdruck im GZT von 90 N/mm² in % angegeben. Die Bewertung erfolgt farblich wie folgt:

- Grün – Lagerdruck/zul. GZT-Druck < 80 %
- Gelb – Lagerdruck/zul. GZT-Druck < 10 %
- Rot – Lagerdruck/zul. GZT-Druck > 100 %

Eine kurzzeitige Überschreitung des zulässigen GZT-Drucks von 90 N/mm² bedeutet nicht, dass eine Schädigung des Lagers eingetreten ist. Es wird eine Abweichung von den statistischen Berechnungen detektiert.

4.7 Lagerwege infolge Temperatur und Verkehr

Anhand der gemessenen Verschiebungen und Verdrehungen der Lager werden die temperaturinduzierten und die verkehrsinduzierten Lagerwege separat ermittelt. Die temperaturinduzierten Lagerwege werden anhand des quasi-stationären Mittelwerts der Lagerverschiebung und der Lagerverdrehung ermittelt (siehe Bild 133 und Bild 130). Zur Ermittlung der verkehrsinduzierten Lagerwege wurde während der Referenzfahrten im April das Lager 40/3 mit einem weiteren Wegsensor temporär ausgestattet. Die Ergebnisse sind in den Berichten zum Projekt FE 15.0632 [1] dargestellt und in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

4.7.1 Lagerwege infolge Temperatur von Jan. 2017 bis Dez. 2018

4.7.1.1 Ebene Gleitfläche

Im Zeitraum 2017/2018 betragen die Extremwerte des gemittelten Verschiebewegs $u_{x,40/3,qs,Mean}$ 41,5 mm zwischen dem Minimum von -45,5 mm und dem Maximum von -4,00 mm (siehe Bild 129). Der anhand der gemessenen Werte akkumulierte, temperaturinduzierte Gleitweg beträgt 1.230,0 mm. Zu beachten ist, dass in diesem Zeitraum 18 % der Zeit keine Daten aufgezeichnet wurden. Der durchschnittliche, akkumulierte Gleitweg pro 10-minütigem Datensatz beträgt 0,01443 mm und der damit berechnete akkumulierte, temperaturinduzierte Gleitweg für den Zeitraum von 2 Jahren beträgt 1.516,7 mm. Wird die rechnerische Entwurfslebensdauer der Brücke von 100 Jahren betrachtet, ergibt

sich ein berechneter akkumulierter quasi-stationärer Gleitweg von 75,83 m.

Aufgrund der geringen gesammelten Datenmenge sind die Ergebnisse des Jahres 2019 eingeschränkt aussagefähig, da in 55 % der Zeit keine Daten aufgezeichnet wurden. Die Extremwerte des gemittelten Verschiebewegs $u_{x,40/3,qs,Mean}$ betragen als Maximum -3,0 mm und als Minimum -26,4 mm.

Im Jahr 2019 ist der temperaturinduzierte, akkumulierte Gleitweg nicht mehr separat ermittelt worden (siehe Kapitel 4.7.3).

4.7.1.2 Sphärische Gleitfläche

Die quasi-stationäre Lagerverdrehung $\alpha_{40/3,Mean}$ wird verwendet, um den Gleitweg in der sphärischen Gleitebene zu berechnen. Dieser Gleitweg wird aufsummiert zum akkumulierten Gleitweg $s_{\alpha,40/3,qs}$ infolge Temperaturverformung des Brückendecks (siehe Bild 130). Der sphärische Gleitweg ist ca. 1/10 des ebenen Gleitwegs. Es ergibt sich ein akkumulierter Gleitweg von $1,2 \cdot 10^{-3}$ mm pro 10-minütigem Datensatz, d. h. 61,8 mm pro Jahr, für den Zeitraum von Januar 2017 bis Dezember 2018.

Im Jahr 2019 ist der temperaturinduzierte, akkumulierte Gleitweg nicht mehr separat ermittelt worden (siehe Kapitel 4.7.3).

4.7.2 Lagerwege infolge Verkehr von Jan. 2017 bis Dez. 2018

4.7.2.1 Ebene Gleitfläche

Bild 132 zeigt den gesamten akkumulierten ebenen Gleitweg, der sich aus dem berechneten und um 25 % korrigierten fluktuierenden und dem gemessenen quasi-stationären akkumulierten Gleitweg zusammensetzt. Aufgrund einer 82%igen Erfassung während des Messzeitraums wird der durchschnittliche fluktuierende, akkumulierte Gleitweg von 1,96 mm pro 10-minütigem Datensatz ermittelt. Anhand dieses Werts und des durchschnittlich ermittelten, quasi-stationären Gleitwegs ergibt sich ein gesamter Gleitweg von 203.189,2 mm über den 2-Jahres-Zeitraum bzw. 101,6 m pro Jahr. Der prognostizierte, akkumulierte Gleitweg, der während der Lebensdauer der Brücke von 100 Jahren entsteht, beträgt 10.160 m. Bei dieser Prognose wird angenommen, dass sich der Verkehr nicht ändert.

Im Jahr 2019 ist der verkehrsinduzierte, akkumulierte Gleitweg nicht mehr separat ermittelt worden (siehe Kapitel 4.7.3).

4.7.2.2 Sphärische Gleitfläche

Anhand der fluktuierenden Lagerverdrehung werden die Verschiebungen in der sphärischen Gleitebene berechnet und aufsummiert (siehe Bild 133). Die akkumulierten, gesamten Lagerverschiebungen in der sphärischen Gleitebene betragen ca. 2,86 mm pro 10-minütigem Datensatz, d. h. 147,19 m pro Jahr und 14.719 m in 100 Jahren.

Im Jahr 2019 ist der verkehrsinduzierte, akkumulierte Gleitweg nicht mehr separat ermittelt worden (siehe Kapitel 4.7.3).

4.7.3 Lagerwege infolge Temperatur und Verkehr seit Januar 2019

Für die automatisierte Auswertung (ab Feb. 2019) wurde auf die Unterteilung nach temperaturinduziertem und verkehrsinduziertem Lagerweg verzichtet. Daher wird nur der gesamte akkumulierte Weg getrennt nach ebener und sphärischer Gleitfläche angegeben (siehe <https://ibast.itm.uni-luebeck.de/lagerverschiebung> und <https://ibast.itm.uni-luebeck.de/lagerverdrehung>).

4.8 Kennwerte des Bauwerks-widerstandes

Im Rahmen der Bearbeitung des parallelen Forschungsprojektes FE 15-0631-2016-LRB [3] wurde eine Methodik zur Ermittlung von Kennwerten des Bauwerkswiderstandes auf Basis der Ermittlung von Eigenfrequenzen und der Weiterverarbeitung der ermittelten Werte umgesetzt. Als Kennwerte des Widerstandes wurden dabei die Änderung der Spannkraft in einem der externen Spannglieder sowie die Änderung der globalen Steifigkeit des Bauwerkes betrachtet.

Die nachfolgenden Ausführungen wurden [3] in gekürzter Form übernommen.

4.8.1 Vorbemerkungen

Zur Ermittlung der genannten Kennwerte werden aus den Messdaten der installierten Beschleunigungssensoren (MS 23 bis MS 26) Amplituden-

spektren berechnet. Die Peaks dieser Spektren entsprechen verschiedenen Eigenfrequenzen.

Für die Beschleunigungsmessungen an einem externen Spannglied (MS23, MS 24 und MS 26) ergeben sich damit Eigenfrequenzen des Spanngliedes. Die Beschleunigungsmessung am Umlenksattel des externen Spanngliedes liefert Eigenfrequenzen der Brücke.

Die Eigenfrequenzen des Spanngliedes korrespondieren zur Vorspannkraft im Spannglied und die Eigenfrequenzen der Brücke korrespondieren zur kumulierten Steifigkeit des Bauwerkes.

Im nachfolgenden Kapitel wird zunächst auf die Grundlegende Ermittlung der Eigenfrequenzen eingegangen. Anschließend wird die Weiterverarbeitung der ermittelten Eigenfrequenzen hin zu Kennwerten des Widerstandes des Bauwerkes erläutern.

4.8.2 Ermittlung der Eigenfrequenzen

Die Darstellung der Ermittlung der Eigenfrequenzen erfolgt anhand von Messdaten der Kalibrierfahrten am 30.09.2016 und anhand von ausgewählten Messdaten aus der laufenden Datenerfassung.

Aus den Messdaten der Kalibrierfahrten wurde zur Ermittlung der Eigenfrequenzen ein Zeitbereich t_1 des Schwingungsverlaufs (vgl. Bild 137 a), der nicht durch eine externe Anregung mit überlagernder Frequenz gestört ist und damit ein freies Schwingen des Spanngliedes vorausgesetzt werden kann, ausgewertet. Bild 137 c zeigt die Amplitudenspektren für den Zeitbereich t_1 , der vor dem Zeitpunkt liegt, zu dem ein Fahrzeug die FÜ erreicht hat. Ohne die störenden, von außen induzierten Schwingungen, welche die Eigenschwingungen der Spannglieder überlagern, treten alle messbaren Eigenfrequenzen deutlicher hervor. Da das Schwingverhalten der

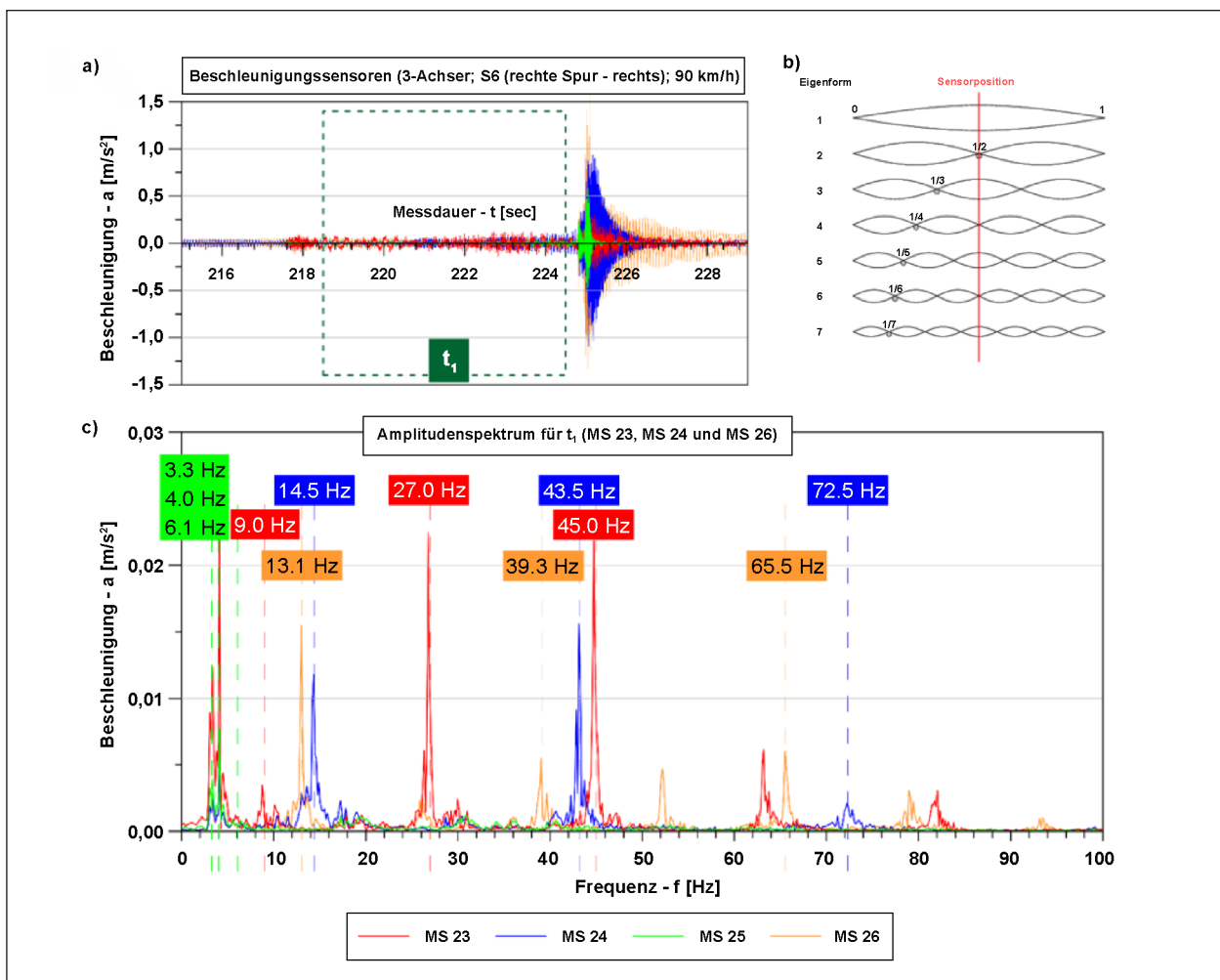


Bild 137: (a) Messverlauf der Beschleunigungssensoren (MS 23-26) bei Kalibrierfahrt ID 35 (Fz. 1, linke Spur – rechts orientiert, 90 km/h). (b) Die ersten sieben Eigenformen der ext. Spannglieder entsprechend einer harmonischen Schwingung. (c) Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für den Zeitbereich t_1 .

Spannglieder näherungsweise dem einer harmonischen Schwingung gleichkommt (vgl. Bild 137 b), hat die Installation der Beschleunigungssensoren in Spanngliedmitte zur Folge, dass nur jeweils die 1., 3., 5.... Eigenfrequenz detektiert werden kann. Bei den geradzahigen Eigenformen befindet sich der Nulldurchgang einer harmonischen Schwingung an der Position des Sensors. Die unterschiedlichen Eigenfrequenzen der Spanngliedbereiche sind auf die verschiedenen Spanngliedlängen in den instrumentierten Bereichen zurückzuführen. Bild 137 c zeigt dementsprechend jeweils die 1., 3. und 5. Eigenfrequenz der Spannglieder.

Für den Sensor MS 25, der direkt auf dem Umlenk-sattel installiert ist, gilt, dass dieser das Schwingverhalten des Brückenüberbaus abbildet. Dessen 1., 2. und 5. Eigenform führen an dieser Sensorposition zu Bewegungen, die mit dem Sensor messbar sind. Die dazugehörigen Eigenfrequenzen sind in Bild 137 c im Spektrum sichtbar, zusätzlich sind die numerischen Werte dargestellt.

Für den Fall des unregelmäßig fließenden Verkehrs erfolgt die Auswertung der Messungen der Sensoren auf den externen Spanngliedern ebenfalls mittels FFT zu Amplitudenspektren (vgl. Bild 138 MS 23, MS 24, MS 26). Der Unterschied zur Auswertung der bei den Kalibrierfahrten erhaltenen Messdaten besteht darin, dass nicht versucht wurde, Zeitabschnitte aus den Messdaten zu extrahieren, die ein ungestörtes Schwingen des Brückenüberbaus bzw. der Spannglieder beinhalten. Sinnvoll für die Situation des unregelmäßig fließenden Verkehrs ist es, zu prüfen, ob es für die kontinuierliche Eigenfrequenzüberwachung überhaupt notwendig ist, gezielt Zeitbereiche der Messung zu berücksichtigen. Für eine ausreichend genaue Eigenfrequenzbestimmung muss lediglich sichergestellt sein, dass die Zeitbereiche, in denen die ungestörten Schwingungen enthalten sind, im ausreichenden Verhältnis zur gesamten Zeitspanne stehen, für die die Auswertung durchgeführt wird.

In Bild 138 sind für jeweils 1 h Messdauer die Amplitudenspektren der Beschleunigungsmessungen an den Spanngliedern dargestellt. Die gewählten Zeitbereiche unterscheiden sich hinsichtlich der Verkehrssituation auf der Brücke. Ein Zeitbereich liegt nachts in der Zeit von 23:33–00:32 Uhr (UTC +1) und ist gekennzeichnet durch relativ geringes Verkehrsaufkommen. Der Vergleichszeitraum ist am selben Tag, jedoch morgens mit stark erhöhtem Verkehrsaufkommen von 7:32–8:31 Uhr (UTC +1).

Es ist davon auszugehen, dass sich die gewählten Auswerteziträume deutlich unterscheiden hinsichtlich der Zeitanteile, in denen keine ungestörte Schwingung der Spannglieder möglich war. Die Gegenüberstellung der in beiden Zeiträumen ermittelten Eigenfrequenzen gibt somit Auskunft darüber, ob die Strategie praktikabel ist, ungeachtet der Störeinträge die Messdaten ohne Selektion in die Frequenzberechnung einzubeziehen.

Bild 138 stellt die Amplitudenspektren mit Kennzeichnung der gefundenen Eigenfrequenzen für diese beiden Zeitbereiche gegenüber. Deutlich zu erkennen ist, dass für beide Verkehrssituationen die 1. und 3. Eigenfrequenz für alle drei Messstellen zuverlässig ermittelt werden können. Die Peaks stellen sich bei den 1. Eigenfrequenzen fast als einzelne Spektrallinie dar, was auf einen hohen Anteil ungestörter Schwingungen hindeutet. Höhere Eigenfrequenzen sind deutlich sichtbar, jedoch mit zunehmender Nähe zur Fahrbahnübergangskonstruktion wird der störende Einfluss infolge des überfahrenden Verkehrs dominanter und erschwert die präzise Quantifizierung der Eigenfrequenzen. Unter Nähe wird hier sowohl die Entfernung der Messstelle zur Fahrbahnübergangskonstruktion als auch der Abstand der Eigenfrequenzen der Spanngliedbereiche zum für diese Auswertung störenden Frequenzband verstanden, welches sich aus den Eigenschwingungen der Fahrbahnübergangskonstruktion selbst ergibt und etwa im Bereich um 100 Hz liegt.

In Tabelle 40 sind die numerischen Werte zusammengefasst. Die Abweichungen in der Eigenfrequenzbestimmung für die zwei ausgewerteten Zeitbereiche sind für die 1. und 3. Eigenform kleiner als 0.15 % bzw. die ermittelten 1. Eigenfrequenzen differieren nur maximal 0.02 Hz.

Für die Anwendung dieser Auswertungen der Beschleunigungsmessungen zur Ermittlung von Kennwerten des Bauwerkswiderstandes sind diese Abweichungen hinreichend gering. Es ist damit nicht erforderlich, explizite Bereiche aus den Beschleunigungsmessungen mit geringem bzw. keinem Verkehr zu betrachten. Dies vereinfacht die automatisierte Messdatenauswertung erheblich.

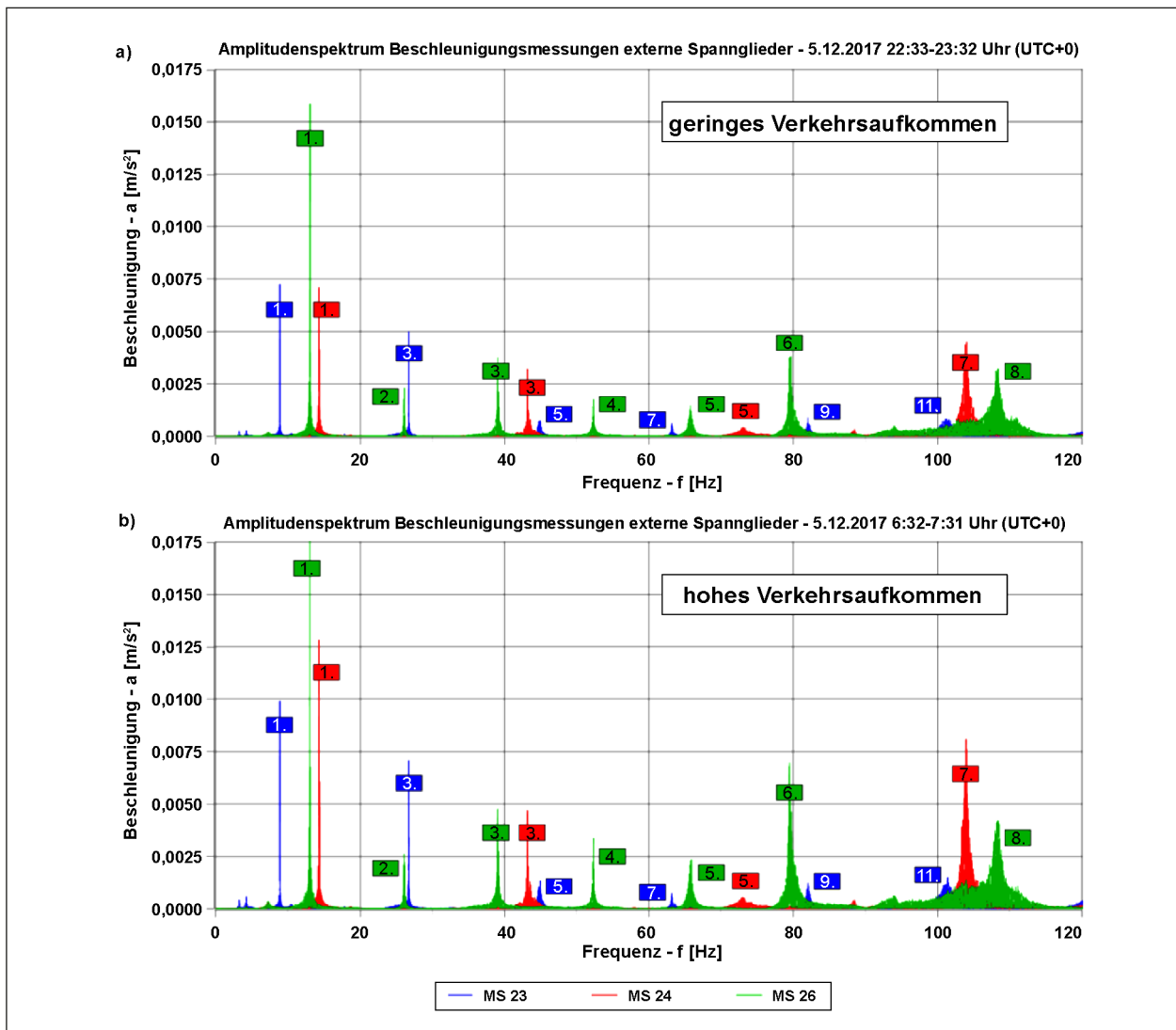


Bild 138: Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für die Zeitbereiche (a) nachts mit relativ geringem Verkehrsaufkommen und (b) tagsüber mit relativ hohem Verkehrsaufkommen. Gekennzeichnet sind die durch Peaks sichtbaren Eigenfrequenzen der den Sensoren zugehörigen Spanngliedabschnitte.

Messstelle	MS 23		MS 24		MS 26	
	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$
1. Eigenfrequenz [Hz]	8,88	8,87	14,26	14,28	13,02	13,01
2. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	26,08	26,07
3. Eigenfrequenz [Hz]	26,72	26,70	43,19	43,20	39,06	39,03
4. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	52,34	52,04
5. Eigenfrequenz [Hz]	44,98	44,96	73,11	72,99	65,69	65,88
6. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	79,68	79,54
7. Eigenfrequenz [Hz]	63,22	63,19	104,00	103,93	–	–
8. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	104,36	108,39
9. Eigenfrequenz [Hz]	82,00	82,02	–	–	–	–
10. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	–	–
11. Eigenfrequenz [Hz]	101,22	101,38	–	–	–	–

Tab. 40: Messtechnisch ermittelte Eigenfrequenzen der erfassten Spanngliedabschnitte auf Basis der dargestellten Amplitudenspektren

4.8.3 Aufbereitung der Eigenfrequenzen

4.8.3.1 Entwicklung der Eigenfrequenzen über die Zeit

Anhand der durchgeführten Auswertungen der Beschleunigungsmessungen hin zur Ermittlung von Eigenfrequenzen werden im Folgenden die Verläufe dieser ermittelten Eigenfrequenzen über den Zeitraum Februar 2017 bis Oktober 2020 grafisch dargestellt. Es wird sich dabei auf die jeweils ersten ermittelten Eigenfrequenzen an den Messstellen beschränkt (MS23, MS24 und MS26 – erste Eigenfrequenz, MS25 – dritte Eigenfrequenz).

In den Diagrammen in Bild 139 bis Bild 141 sind die Verläufe der ermittelten ersten Eigenfrequenzen an den Messstellen MS23, MS24 und MS26 dargestellt. Diese Messstellen befinden sich an einem externen Spannglied und liefern damit die Eigenfrequenz des Spanngliedes. Es wird ersichtlich, dass die Verläufe einen ausgeprägten Jahresgang aufweisen. Zusätzlich wird ersichtlich, dass an allen drei Messstellen die Eigenfrequenzen über den ge-

samten dargestellten Zeitraum tendenziell geringer werden.

Im Gegensatz dazu zeigt sich in dem in Bild 142 dargestellten Verlauf der dritten Eigenfrequenz an Messstelle MS25 (Umlenksattel des externen Spanngliedes) analog zu den Eigenfrequenzen an den Messstellen am externen Spannglied selbst ein ausgeprägter Jahresgang. Die zusätzliche Veränderung der Eigenfrequenz über den gesamten Betrachtungszeitraum ist hier jedoch kaum vorhanden.

Hinsichtlich der Eigenfrequenzen am externen Spannglied wird im nachfolgenden Kapitel zunächst der Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft erläutert. Anschließend werden Analysen der aufgezeigten Verlaufscharakteristik (Jahresgang sowie Langzeitverhalten) dargestellt. Beide Schwerpunkte bilden die Grundlage für eine Überwachung der Eigenfrequenzen und damit der zugehörigen Parameter des Bauwerkswiderstandes.

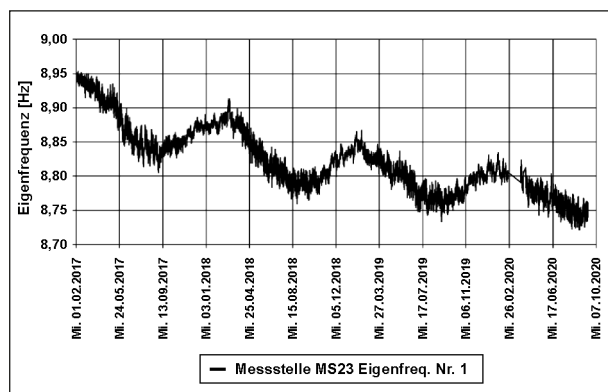


Bild 139: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS23 – Februar 2017 bis Oktober 2020

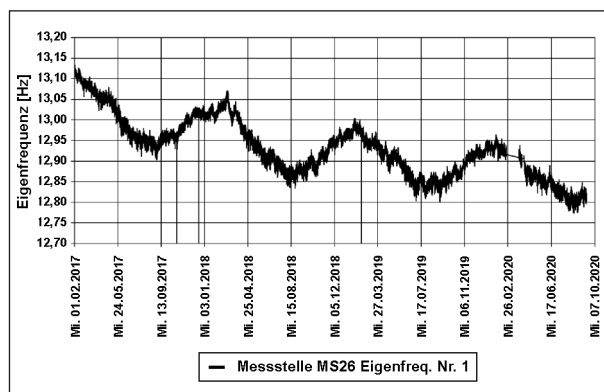


Bild 141: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS26 – Februar 2017 bis Oktober 2020

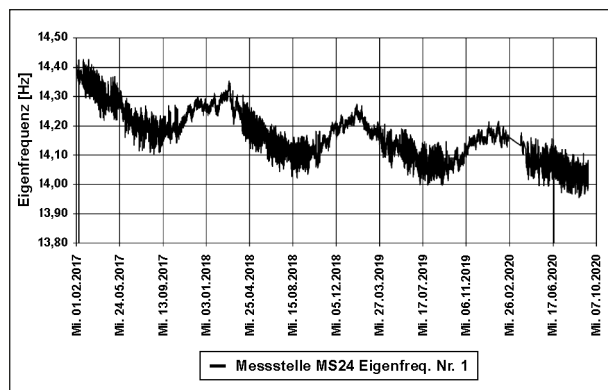


Bild 140: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS24 – Februar 2017 bis Oktober 2020

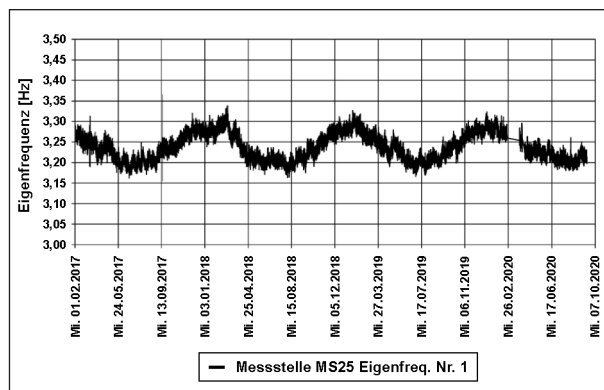


Bild 142: Ermittelte 3. Eigenfrequenzen – MS25 – Februar 2017 bis Oktober 2020

4.8.3.2 Beziehung zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft

Für die ermittelten Eigenfrequenzen der externen Spannglieder existiert ein Zusammenhang zwischen den Eigenfrequenzen und der Vorspannkraft im Spannglied. Aufgrund der geometrischen Eigenschaften der Spanngliedabschnitte zwischen den Umlenkstellen kann die mechanische Grundlage einer Saitenschwingung für die Beziehung zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft angenommen werden. Die Richtung der Schwingungen ist orthogonal zur Spannrichtung. In diese Richtung besitzt das Spannglied eine vernachlässigbar geringe Steifigkeit. Der Zusammenhang zwischen Vorspannkraft und 1. Eigenfrequenz f_1 der sogenannte Grundschiwingung ergibt wie folgt:

$$f_1 = \frac{1}{d_{\text{äq}} L} \times \sqrt{\frac{P_{m0}}{\pi \times \rho}} \quad (4.7)$$

Hierin bezeichnen $d_{\text{äq}}$ den äquivalenten Durchmesser des Spanngliedes. Die Länge des jeweiligen Spanngliedabschnittes ist die Länge zwischen den Umlenkpunkten und mit L bezeichnet.

Die Vorspannkraft des Spanngliedes fließt mit P_{m0} und die Materialdichte mit ρ in die Berechnung ein. Höhere Eigenfrequenzen ergeben sich als ganzzahlige Vielfache der nach Gleichung (4.7) ermittelten 1. Eigenfrequenz f_1 .

Im vorhergehenden Kapitel 4.8.2 wurde die Ermittlung der Eigenfrequenzen dargestellt und aufgezeigt, dass die direkte Auswertung der auflaufenden Messdaten aus dem fließenden Verkehr verwendbare Ergebnisse liefert.

Für eine praktikable Überwachung der Eigenfrequenzen bzw. der daraus abgeleiteten Vorspannkraft ist es zunächst erforderlich, die Größenord-

nung einer Änderung der Eigenfrequenzen bei einer Veränderung der Vorspannkraft infolge einer möglichen Schädigung des Spanngliedes abzuschätzen. Gleichung (4.7) bildet hierzu die Basis. Hierzu wird die rechnerische Änderung der Vorspannkraft P_{m0} bei einem Ausfall von einzelnen Litzen des Spanngliedes betrachtet. Die Vorspannkraft ergibt sich nach nachfolgender Gleichung (4.8).

$$\frac{n_{\text{wirksam}}}{n_{\text{gesamt}}} \cdot P_{m0} \quad (4.8)$$

Unter der weiteren Annahme, dass im Fall eines Ausfalles einzelner Litzen des Spanngliedes Änderungen der übrigen Parameter in Gleichung (4.7) vernachlässigbar klein sind, ergeben sich die in Tabelle 41 aufgeführten exemplarischen Werte der ersten und dritten Eigenfrequenz an den Messstellen am externen Spannglied. Betrachtet wurden ein angenommener Ausfall von 1 von 60 Litzen sowie ein Ausfall von 20 von 60 Litzen. Die Vorspannkraft P_{m0} verringert sich entsprechend und es ergeben sich die aufgeführten Eigenfrequenzen. Für die Analysen hier ist dabei vordergründig die absolute Änderung der Eigenfrequenz von Bedeutung. So ergibt sich zum Beispiel für die erste Eigenfrequenz an Messstelle MS23 bei einem Ausfall von 1 von 60 Litzen eine absolute Änderung der Eigenfrequenz von -0,074 Hz.

Der Vergleich dieser Größenordnung mit dem Verlauf der ersten Eigenfrequenz der Messstelle MS23 in Bild 139 zeigt auf, dass bereits aus dem ersichtlichen Jahresgang größere Änderungen der Eigenfrequenz und damit der Vorspannung im Spannglied einhergehen als aus einem rechnerischen Ausfall einer Litze. Für die Messstellen MS24 und MS26 sind diese Zusammenhänge für die erste Eigenfrequenz ähnlich.

	$d_{\text{äq}} \cdot L$	Eigenfrequenz	unbeschädigt	Ausfall von 1 Litze		Ausfall von 20 Litzen	
				Abs.	Delta	Abs.	Delta
P_{m0}			3.240 kN	3.186 kN	-54	2.160 kN	-1080
Sensor MS 23	1,29 m ²	f_1	8,88 Hz	8,80 Hz	-0,074	7,25 Hz	-1,629
		f_3	26,62 Hz	26,41 Hz	-0,223	21,75 Hz	-4,887
Sensor MS 24	0,80 m ²	f_1	14,26 Hz	14,14 Hz	-0,119	11,64 Hz	-2,616
		f_3	42,77 Hz	42,42 Hz	-0,358	34,92 Hz	-7,849
Sensor MS 26	0,88 m ²	f_1	13,00 Hz	12,89 Hz	-0,109	10,61 Hz	-2,385
		f_3	38,99 Hz	38,66 Hz	-0,326	31,83 Hz	-7,154

Tab. 41: Berechnete 1. und 3. Eigenfrequenz der instrumentierten Spanngliedabschnitte und die zugehörigen Systemparameter für den Ausfall von keiner, einer und 20 Litzen des Spanngliedes

4.8.3.3 Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzeffekten

Für eine praktikable Überwachung der Eigenfrequenzen ist es erforderlich, die in Kapitel 4.8.3.1 aufgezeigten lang-, mittel- und kurzfristigen Effekte im Rahmen der Messdatenauswertung und Aufbereitung zu kompensieren. Die umgesetzte Kompensationsmethodik beruht dabei auf der Annahme, dass bisher am Bauwerk keine Schädigungen eingetreten sind und die ersichtlichen Effekte aus der veränderlichen Temperaturbeanspruchung und aus regulären Effekten wie Kriechen und Schwinden resultieren. Der bisherige Verlauf dient damit als Basis, das reguläre Verhalten des Tragwerkes abzubilden und zukünftige Änderungen dieses Verhaltens identifizieren zu können. Erläuterungen hierzu finden sich in [3].

In Bild 143 sind die Ergebnisse der Kompensation des aufgezeichneten Verlaufes der 1. Eigenfrequenz an MS23 (vgl. Bild 139) hin zu Kontrollwerten nur Identifikation von Änderungen der Eigenfrequenz und damit der Vorspannung, die nicht aus den zuvor genannten Effekten resultieren.

Der in Bild 143 dargestellte Verlauf verdeutlicht, dass mit den eingeführten Kompensationen der Lang-, Mittel- und Kurzeffekte die verbleibende Änderung der Eigenfrequenz deutlich kleiner ist als eine durch den Ausfall einer Litze verursachte Änderung.

Die Methodik für die Aufbereitung der ermittelten Eigenfrequenzen wird für alle betrachteten Messstellen eingesetzt. Für die Messstelle MS25 repräsentieren die ermittelten Eigenfrequenzen nicht die Eigenfrequenzen des externen Spanngliedes und damit die Vorspannung, sondern sie repräsentieren die Eigenfrequenzen des Bauwerkes selbst und stehen damit in Bezug zur Steifigkeit des Bauwerkes. Im Gegensatz zur externen Vorspannung liegt hier kein einfacher Zusammenhang zwischen Steifigkeits- und Eigenfrequenzänderung vor, sodass sich im vorliegenden Fall lediglich auf die qualitative Überwachung der Eigenfrequenzen des Bauwerkes beschränkt wird. Die Methodik der Kompensation der Lang-, Mittel- und Kurzeffekte wird aber ebenso eingesetzt. In Bild 144 werden die Ergebnisse der Kompensation für die 3. Eigenfrequenz an Messstelle MS25 und damit am Umlenksattel bzw. Bauwerk dargestellt.

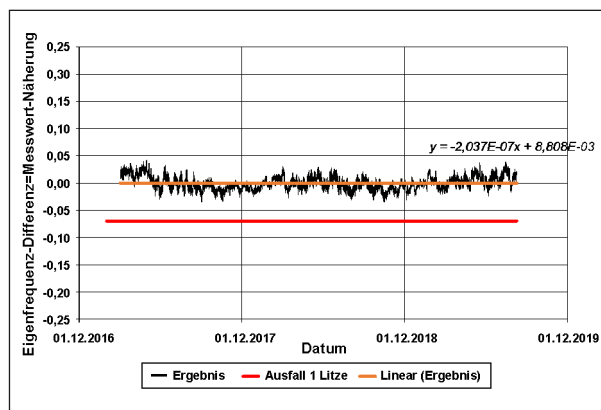


Bild 143: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße (Eigenfrequenz-Differenz = Messwert-Näherung)

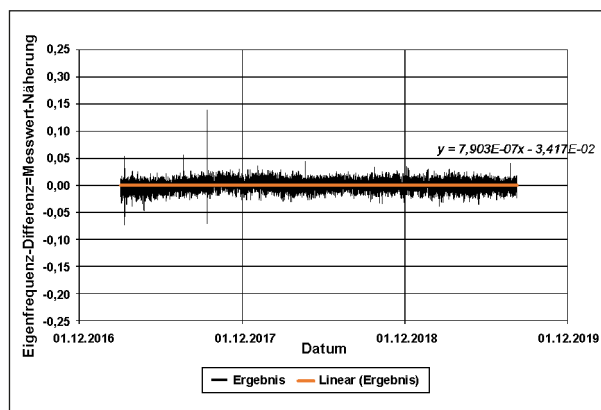


Bild 144: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße (Eigenfrequenz-Differenz = Messwert-Näherung)

4.8.4 Ableitung von Statuskennwerten für den Widerstand

4.8.4.1 Vorspannung

Die in Kapitel 4.8.3.3 vorgestellte Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzeffekten führt zu einem berechneten Kontrollverlauf der Eigenfrequenzen, der im Regelfall, also ohne plötzliche Spannkraftänderungen oder eine Änderung der bisherigen Charakteristik infolge der kompensierten Effekte, um den Wert 0,00 schwankt (vgl. Bild 143). Eine deutliche Veränderung des Verlaufes hin zu einem Wert von z. B. -0,07 deutet auf eine Änderung der Vorspannkraft in der Größenordnung eines Ausfalls von einer von 60 Litzen im Spannglied hin.

4.8.4.2 Bauwerkssteifigkeit

Für die Kenngröße der Bauwerkssteifigkeit erfolgt die Ermittlung von Statuswerten prinzipiell analog zur Vorspannung. Der wesentliche Unterschied besteht dabei darin, dass im Gegensatz zur Vorspannung keine direkten Zahlenwerte für den Zusammenhang zwischen einer Änderung der Eigenfrequenz und in diesem Fall einer Änderung der Bauwerkssteifigkeit vorliegen.

4.9 Eigenüberwachung des Fahrbahnübergangs

4.9.1 Eigenschwingverhalten

Für jeden Sensor wird die dominante Eigenfrequenz im Leistungsdichtespektrum bestimmt, da eine Verschiebung dieser auf mögliche Veränderungen im Zustand der Dehnfuge hindeutet.

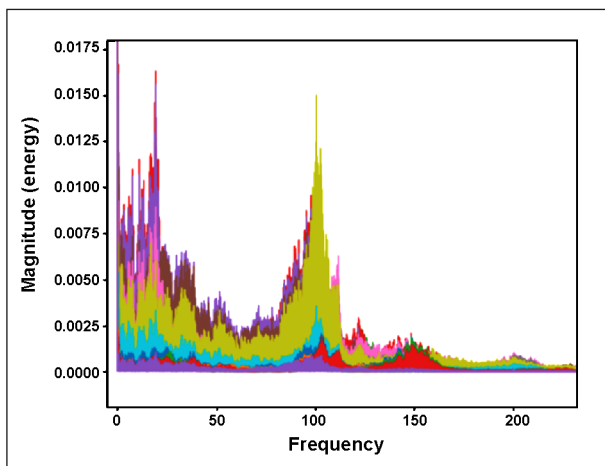


Bild 145: Leistungsdichtespektrum aller Kraftsensoren

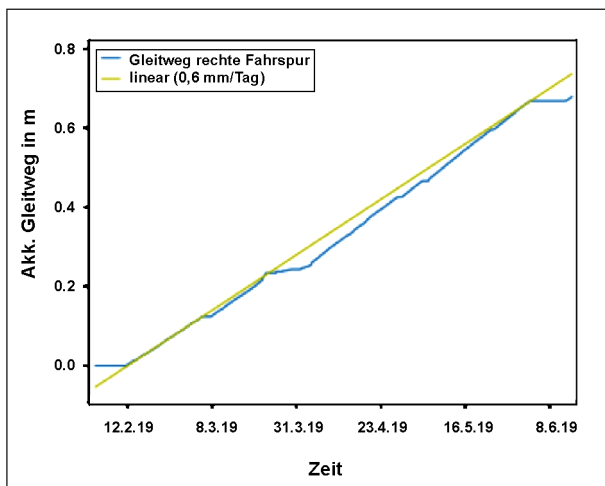


Bild 146: Akkumulierter Gleitweg der rechten Teilkonstruktion über einen Zeitraum von ca. 4 Monaten

Bild 145 zeigt ein solches Beispiel-Spektrum, in dem für die Mehrzahl der Sensoren die Lamellen-Eigenfrequenz von ca. 100 Hz als dominante Eigenfrequenz erkennbar ist.

4.9.2 Spaltweiten

Für jedes 10-Minuten-Intervall wird die Gesamtspaltweite der beiden Fugenabschnitte dargestellt. Diese Ausgabe wird zur Langzeitauswertung der akkumulierten Fugenbewegung herangezogen, um einen möglichen Verschleiß der Gleitflächen von Lager- und Federelemente zu detektieren. Es ergibt sich eine relativ gleichmäßige, durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit von ca. 0,6 mm/Tag bzw. 2,2 m pro Jahr.

Die Einzelspaltweiten zwischen Randprofil und 1. Lamelle sowie 3. Lamelle und Randprofil werden verwendet, um die Spaltweitensteuerung der Dehnfuge zu überwachen.

4.10 Gekoppelte Auswertungen aus vier Systemen

4.10.1 Verkehrsdaten

Im aktuellen Projekt erfolgt die Verkehrserkennung in den einzelnen Systemen unabhängig voneinander. Im Schlussbericht zum Projekt FE 15.631/2016/LRB [3] wurden Vergleiche zwischen den Erfassungsdaten des Systems RTMS und der Intelligenten Schwenktraversen-Dehnfuge durchgeführt. Im Ergebnis zeigen sich in vielen Punkten gute Übereinstimmungen zwischen den ermittelten Datenbeständen, jedoch auch Ansätze für weitere Verbesserungen der Algorithmen.

Diese Verbesserungen beziehen sich zunächst auf die einzelnen Systeme selbst. In zukünftigen Projekten könnte mit der Verwendung von gekoppelten Daten aus den verschiedenen Systemen die Ergebnisqualität verbessert werden. Die Grundlage für die dafür erforderliche Zuordnung zueinander sind die aufgezeichneten Zeitinformationen in den getrennt erfassten Messdaten. Durch die erfolgte Implementierung von NTP-Zeitkanälen in die Datenaufzeichnungen und die permanente Zeitsynchronisation zwischen den verschiedenen Systemen liegt die erforderliche Basis hierfür vor. Für die weiteren Untersuchungen müssen noch die technischen Umsetzungen für einen praktikablen Datenaustausch zwischen den Systemen geschaffen werden (siehe Kapitel 3.2).

4.10.2 Tragsystemeigenschaften

Die Grundlage für die Ermittlung der Tragsystemeigenschaften und deren Veränderung über die Zeit ist analog zu den zuvor genannten Verkehrsdaten der Austausch der eigentlichen Daten untereinander. Die oben genannten Randbedingungen und nächsten Schritte gelten hier analog.

4.10.3 Lagerkräfte und -verformungen

Vgl. Anmerkungen in Kapitel 4.10.1 und 4.10.2.

Im Schlussbericht zum Projekt FE 15.0632 [1] wurden Vergleiche zwischen den Erfassungsdaten des Systems RTMS und dem Intelligenten Kalottenlager durchgeführt. Im Ergebnis zeigen sich in vielen Punkten gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen Lagerbewegungen. Die Unterschiede sind auf unterschiedliche Sensoren, Einbautoleranzen und das Brückenverhalten (gekrümmter Oberbau) zurückzuführen.

5 Automatisierte Auswertung

5.1 Verkehrsdaten

5.1.1 Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge

Während eine kommerzielle Software verwendet wurde, um teilautomatisierte Auswertungen nicht-vor-Ort zu entwickeln, wird für die Entwicklung einer automatisierten vor-Ort Auswertung die quelloffene Programmiersprache Python (derzeit in der Version 3.6.5) verwendet aufgrund folgender Vorteile:

- unentgeltlich nutzbar
- Funktionsbibliotheken vorhanden
- für große Datenmengen geeignet
- Kompilierung in ausführbares stand-alone Programm möglich

Die Auswerteprozeduren sind modular aufgebaut wie folgt:

1. Steuermodul
2. Eingabemodul

3. Verarbeitungsmodul

- Datenaufbereitung
- Verkehrserfassung
- Zustandsüberwachung

4. Ausgabemodul

Um auch im Falle einer Staubildung keine Information zu verlieren, werden neben den Fahrzeugdaten auch die Daten der Einzelachsen gespeichert.

Jedem Fahrzeug- und Achsdatensatz ist ein eindeutiger Zeitstempel zugewiesen.

Die Prozeduren in den Verarbeitungsmodulen wurden im Verlauf des Projekts optimiert, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

5.1.2 RTMS

Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten zur Identifikation von Fahrzeugen, die das Bauwerk passieren, erfolgt seit Februar 2019 durchgehend und vollständig automatisiert vor Ort am Messrechner. Die Ergebnisdaten werden am Messrechner lokal gespeichert, regelmäßig zum NAS zu Kontrollzwecken bzw. zur weiterführenden Aufbereitung (Berichte, Präsentationen usw.) über den Fernzugriff übertragen. Weiterführende Erläuterungen zum Ablauf der automatisierten Datenauswertung zur Verkehrserkennung finden sich in [3].

5.2 Klimadaten

Die automatisierte Auswertung der Messdaten ist auf allen Geräten vollständig umgesetzt. Die Berechnungsschritte werden auf den Sensorknoten selbst vorgenommen, da lediglich der Abgleich mit einer Kalibriergeraden erfolgen muss. Die Überprüfung eines linearen Zusammenhanges nimmt dabei wenig Rechenleistung in Anspruch.

5.2.1 Sensorwertexponenten

Die WMD Geräte arbeiten intern mit Ganzzahlarithmetik, d. h. sie nutzen keine Gleitkommadarstellung von Messwerten. Um dennoch Nachkommastellen darstellen zu können, verwenden sie das Konzept des Sensorwertexponenten.

Dabei drücken die Geräte die Messwerte als eine Kombination eines vorzeichenbehafteten 32-bit Koeffizienten sowie einer Zehnerpotenz aus. So kann beispielsweise der Wert

-0.03 als $- * 10^{(-2)}$ (Sensorwertexponent -2), $-30 * 10^{(-3)}$ (Sensorwertexponent -3) usw.

dargestellt werden. Alle Controller verwenden intern einen bestimmten, nicht konfigurierbaren Exponenten, der an die Messauflösung angepasst ist. Wenn ein Controller jedoch die Möglichkeit bietet, eine Kalibriergerade zur Anwendung zu bringen, ist es gegebenenfalls sinnvoll, im Rahmen der Umrechnung anhand der Kalibriergeraden auch den Exponenten zu wechseln. Daher bieten einige Controller die Möglichkeit, den Exponenten einzustellen, der für das Ergebnis der Umrechnung passend ist. Der eingestellte Exponent bezieht sich somit auf das Ergebnis der Anwendung der Kalibriergeraden.

Kommt die Kalibriergerade nicht zum Einsatz, muss derjenige Exponent eingestellt werden, den der Controller intern vor Anwendung der Kalibriergeraden verwendet. Den intern verwendeten Exponenten entnehmen Sie bitte der Beschreibung des jeweiligen Controllers.

5.2.2 Mittelung

Um Außeneinflüsse auf die Messwerte wie Rauschen und Störungen zu minimieren, bieten einige Controller die Möglichkeit zur Mittelung der Messwerte. Einfluss auf die Mittelung haben die Parameter Mittelungsmethode (Averaging Method), Anzahl der abgeschnittenen Ausreißer (Number of outliers cut away, O) sowie Anzahl der gemittelten Werte (Number of averaged samples, A).

Im Rahmen der Mittelung werden

$$2 * O + A$$

Werte des Sensors gemessen. Diese werden dann der Größe nach sortiert und die kleinsten O Werte sowie die größten O Werte verworfen. Aus den verbleibenden A Werten wird in Abhängigkeit von der Mittelungsmethode der Mittelwert bzw. der Median bestimmt.

5.2.3 Kalibriergeraden

Einige Controller bieten die Möglichkeit, die primäre Messgröße (meist eine Spannung) direkt auf dem

Gerät in eine andere Größe (z. B. Strom, Temperatur, Kraft...) anhand eines linearen Zusammenhangs umzurechnen, beziehungsweise eine Kalibrierung vorzunehmen.

Dazu kommt eine Kalibriergerade zum Einsatz. Diese wird durch zwei Punkte (x_0, y_0) und (x_1, y_1) definiert. Die Kalibriergerade dient ausschließlich der Umrechnung der Koeffizienten. Für die Umrechnung des Exponenten ist der Konfigurationsparameter Sensorwertexponent zuständig.

5.2.4 Automatische Aufbereitung

In der Webanwendung der Universität zu Lübeck sind die erfassten Klimadaten durch die Anwendung von Kalibriergeraden und Sensorwertexponenten sowie einiger Offsets in eine geeignete Einheit umgerechnet worden. Dies ist möglich, da ein linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen VoltZahl und der angestrebten Einheit existiert.

Durch eine mathematische Intervallskalierung kann das Messintervall in Volt in die Zieleinheit umgerechnet werden. Dies geschieht auf den Sensorknoten selbst, damit wertvolle Versorgungsspannung gespart werden kann. Die Kommunikation in drahtlosen Sensornetzwerken ist für ca. 95 % des Energieverbrauchs verantwortlich.

Es ist nicht geplant, die reinen Klimadaten weiter zu verarbeiten. Sollte es erforderlich sein, die Daten in ein anderes Format umzurechnen, kann dies durch eine geeignete Einstellung in der Webanwendung geschehen. Diese greift auf die bereits verarbeiteten Daten zu und errechnet ein eingestelltes Anzeigeformat, sollte dies von Interesse sein.

5.3 Statische Brückenreaktionen

Die statischen Brückenreaktionsdaten umfassen Neigung, Rissbreiten und Oberflächenkräfteinwirkung.

Die Werte werden, analog zu den Wetterdaten, in Volt gemessen und auf den Sensorknoten selbst anhand eines linearen Zusammenhangs zwischen Messeinheit und Zieleinheit transformiert.

In der Datenbank liegen demnach bereits aggregierte Daten vor. Rissbreiten werden in Millimeter gemessen, Neigungen in Grad und Kraft in Joule.

Die Rissbreite beschreibt dabei lediglich den Messausschlag des potentiometrischen Weggebers. Es

ist nötig, einen Offset von den Messdaten abzuziehen, damit nur die tatsächliche Verformung der Rissee aufgezeigt wird. Der initiale Ausschlag des Messinstruments kann so herausgerechnet werden. Die Universität zu Lübeck hat dies durch einen Bearbeitungsschritt im Browser durchgeführt. Würden die Daten in der Datenbank bereits transformiert vorliegen, so würde die Information über den tatsächlichen Messausschlag verloren gehen.

5.4 Statische Beanspruchung der Brücke bzw. Verkehrslastbild

Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten hin zur Ermittlung von charakteristischen Werten der statischen Beanspruchungen des Bauwerkes aus dem Verkehr entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4.4 erfolgt seit Mai 2019 in mehreren Entwicklungsschritten durchgehend und vollständig automatisiert vor Ort am Messrechner. Die Ergebnisdaten werden am Messrechner lokal gespeichert, regelmäßig zum NAS zu Kontrollzwecken bzw. zur weiterführenden Aufbereitung (Berichte, Präsentationen usw.) über den Fernzugriff übertragen. Weiterführende Erläuterungen zum Ablauf der automatisierten Datenauswertung zur Verkehrserkennung finden sich in [3].

5.5 Ermüdungsbeanspruchung der Brücke

Die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten hin zur Ermittlung von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln aus dem Verkehr entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4.5 erfolgt seit März 2019 in mehreren Entwicklungsschritten durchgehend und vollständig automatisiert vor Ort am Messrechner. Die Ergebnisdaten werden am Messrechner lokal gespeichert, regelmäßig zum NAS zu Kontrollzwecken bzw. zur weiterführenden Aufbereitung (Berichte, Präsentationen usw.) über den Fernzugriff übertragen. Weiterführende Erläuterungen zum Ablauf der automatisierten Datenauswertung zur Verkehrserkennung finden sich in [3].

5.6 Selbstüberwachung der Kalottenlager

Die automatisierte Auswertung zur Selbstüberwachung der Kalottenlager wurde am 10.02.2019 vor-Ort eingerichtet und in Betrieb genommen.

Während eine kommerzielle Software verwendet wurde, um teilautomatisierte Auswertungen nicht-vor-Ort zu entwickeln, wird für die Entwicklung einer automatisierten vor-Ort Auswertung die quelloffene Programmiersprache Python (derzeit in der Version 3.6.5) verwendet (siehe Kapitel 5.1.1).

Die AuswerteprozEDUREN sind modular aufgebaut wie folgt:

1. Steuermodul
2. Eingabemodul
3. Verarbeitungsmodul
 - Datenaufbereitung
 - Verkehrserfassung
 - Zustandsüberwachung
4. Ausgabemodul

Die Selbstüberwachung der Kalottenlager erfolgt in Form von Extremwerten und Mittelwerten der gemessenen Drücke, Verschiebungen und Verdrehung sowie den Mittelwerten der resultierenden Auflast und den akkumulierten Gleitwegen und dem Gleitpalt (siehe Tabelle 42).

5.7 Lagerwege infolge Temperatur

Die automatisierte Auswertung zur Selbstüberwachung der Kalottenlager wurde am 10.02.2019 vor-Ort eingerichtet und in Betrieb genommen. Der Aufbau der automatisierten Auswertung ist in Kapitel 5.6 beschrieben. Die Lagerwege infolge Temperatur werden in Form von täglichen Extremwerten der Ebenen und der sphärischen Lagerverschiebung sowie die akkumulierten Gleitwegen erfasst (siehe Tabelle 42).

Ausgabeparameter	Einheit	Sensor-input	Grenzwerte	Beschreibung	Überwachung			Ausgabeintervall	
					Sensor	Lager	Bauwerk		
DS_40_1_3_min	N/mm ²	DS 40/1-3	> 0	Minimum des absoluten Drucks	X	X		Täglich	
DS_40_1_3_mean	N/mm ²			Mittelwert der Druckmodalwerte	X				
DS_40_1_3_max	N/mm ²		< 90	Maximum des absoluten Drucks	X	X			
DS_40_3_2_min	N/mm ²	DS 40/3-2	> 0	Minimum des absoluten Drucks	X	X			
DS_40_3_2_mean	N/mm ²			Mittelwert der Druckmodalwerte	X				
DS_40_3_2_max	N/mm ²		< 90	Maximum des absoluten Drucks	X	X			
DS_40_3_3_min	N/mm ²	DS 40/3-3	> 0	Minimum des absoluten Drucks	X	X			
DS_40_3_3_mean	N/mm ²			Mittelwert der Druckmodalwerte	X				
DS_40_3_2_max	N/mm ²		< 90	Maximum des absoluten Drucks	X	X			
F_40_1	kN	DS 40/1-3		Mittelwert der Kraftmodalwerte basierend auf DS_40_1_3_mean			X		
F_40_3	kN	DS 40/3-3		Mittelwert der Kraftmodalwerte basierend auf DS_40_3_3_mean			X		
Akk. ebener GW	mm	WA 40/3, AS 40/3-1, AS 40/3-2	$< 5 \times 10^4$	Differenzsumme der Modalwerte der Lagerverschiebung Differenzsumme der berechneten absoluten Verschiebungen infolge Verdrehung		X			
Akk. sphärischer GW	mm	AS 40/3-1, AS 40/3-2	$< 5 \times 10^4$	Differenzsumme der berechneten absoluten Verschiebungen infolge Verdrehung		X			
Gleitspalt	mm	AS 40/3-1, AS 40/3-2	> 0,2	Mittelwert des zentrischen Abstands zwischen Lageroberplatte und Abstandssensoren		X			
Min. ebene Verschiebung	mm	WA 40/3	> -120	Minimum der Verschiebungsmodalwerte	X	X			
Mittl. ebene Verschiebung	mm				Mittelwert der Verschiebungsmodalwerte	X			X
Max. ebene Verschiebung	mm			< +120	Maximum der Verschiebungsmodalwerte	X	X		
Min. sphärische Verdrehung	rad	AS 40/3-1, AS 40/3-2	$> -5 \cdot 10^{-3}$	Minimum der Lagerverdrehung	X	X			
Mittl. sphärische Verdrehung	rad				Mittelwert der Modalwerte der Lagerverdrehung	X			X
Max. sphärische Verdrehung	rad			$< 5 \cdot 10^{-3}$	Maximum der Lagerverdrehung	X	X		
1. Eigenfrequenz	Hz				Mittelwert der Eigenfrequenz			X	
2. Eigenfrequenz	Hz			Mittelwert der Eigenfrequenz			X		

Tab. 42: Ergebnisse der automatisierten Auswertung für die Kalottenlager in Achse 40

5.8 Globale Steifigkeit und Spannkraftverlauf der externen Spannglieder

Die Ermittlung der Änderung der globalen Steifigkeit und der Änderung der Vorspannkraft in einem externen Spannglied beruht auf der Auswertung von Eigenfrequenzen entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4.8.2. Seit März 2019 erfolgt die Ermittlung der Eigenfrequenzen durchgehend und vollständig automatisiert vor Ort am Messrechner.

Die weiterführende Aufbereitung der ermittelten Eigenfrequenzen entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 4.8.3 und 4.8.4 erfolgt seit Oktober 2019 durchgehend und vollständig automatisiert vor Ort am Messrechner. Die Ergebnisdaten werden am Messrechner lokal gespeichert, regelmäßig zum NAS zu Kontrollzwecken bzw. zur weiterführenden Aufbereitung (Berichte, Präsentationen usw.) über den Fernzugriff übertragen. Weiterführende Erläuterungen zum Ablauf der automatisierten Datenauswertung zur Verkehrserkennung finden sich in [3].

5.9 Eigenüberwachung des Fahrbahnübergangs

Der Aufbau der automatisierten Auswerteprozeduren ist in Kapitel 5.1.1. beschrieben. Zur Zustandsüberwachung werden folgende Parameter kontinuierlich bestimmt:

1. Spaltweite an beiden Fahrspuren (Min/Max/Mittelwert)
2. Akkumulierte Fugenbewegung an beiden Fahrspuren (Nur thermische Bewegung durch Auswertung der 10-Minuten-Mittelwerte)
3. Dominante Eigenfrequenz der einzelnen Auflagerungspunkte
4. Lagerkräfte sowie maximale Achslast pro Spur

Die Punkte 1), 3) und 4) werden laufend mit Soll- bzw. Grenzwerten abgeglichen.

5.10 Gekoppelte Auswertungen aus den vier Systemen

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse auf der Webpage ermöglicht eine gekoppelte Auswertung. Eine automatisierte gekoppelte bzw. vergleichende Auswertung ist zum jetzigen Zeitpunkt technisch nicht möglich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Während der fünfjährigen Projektlaufzeit wurde der Betrieb und die Funktionsfähigkeit der Anlage bestehend aus zwei intelligenten Kalottenlagern, einer Intelligenten Schwenktraversen-Dehnfuge, dem System RTMS zur Erfassung relevanter Brückenwerte und Verkehrsbelastungen und einem drahtlosem Sensornetz zur Erfassung von Bauwerkseigenschaften und Wetter sichergestellt, sodass die Systeme Datenerfassungsquoten zwischen 70 % und 97 % erreichten. Alle Systeme verarbeiten die Sensordaten automatisiert auf der lokal installierten Hardware zu relevanten Kenngrößen, die den Zustand des Bauwerks, einzelner Bauteile

sowie Verkehrseinwirkungen und klimatische Einwirkungen erfassen. Diese aggregierten Daten sowie die Messdaten werden auf dem Server gespeichert bzw. in einer Datenbank abgelegt. Basierend auf dieser Datenbank werden die Ergebnisse kontinuierlich und mit einem möglichst geringen Zeitverstoß tabellarisch und grafisch auf einer Webpage den Betreibern zur Verfügung gestellt. Zu den Ergebnissen, die auf der Webpage dargestellt werden, gehören Status der Messsysteme und Einzelergebnisse zum Bauwerksstatus und Verkehr, Wetterdaten, Verkehrsdaten und Oberflächentemperaturen, Bauwerkssteifigkeit und externe Vorspannung, statistisch ausgewertete Messdaten und Auslastungsgrade, Daten der intelligenten Fahrbahnübergangskonstruktion und der intelligenten Lager, Messdaten aus dem drahtlosen Sensornetz, Störungen bzw. Ausfall der Internetanbindung und Informationen zum Bauwerk.

6.2 Ausblick

Basierend auf den Erfahrungen der letzten fünf Jahre werden Ausblicke für die Sensorsysteme, das Datenmanagement und die Daten und Datenweiterverwendung gegeben.

6.2.1 Sensorsysteme

6.2.1.1 Intelligente Lager und Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge

Die intelligenten Kalottenlager erfassen nicht nur statische Lasten, sondern können mit guter Genauigkeit auch verkehrsinduzierte Einwirkungen erfassen, aus denen Lkw-Gesamtgewichte durch Erweiterung der Algorithmen gewonnen werden können sowie Kenndaten zum Zustand der Lager. Aufgrund der Ausfälle einer Vielzahl der Drucksensoren sollte Ersatzsensorik appliziert werden bzw. ein Austausch der Drucksensoren vorgenommen werden. Letzteres ermöglicht auch eine Ursachenuntersuchung.

Das Sensorsystem der Schwenktraversen-Dehnfuge liefert seit 5 Jahren verlässliche Daten. Eine Erweiterung bzw. Ergänzung des Messsystems auf andere Dehnfugentypen, bestenfalls zur nachträglichen Instrumentierung im eingebauten Zustand, könnte eine Verkehrserfassung an einer Vielzahl von Brücken, die sich an neuralgischen Stellen im Bundesfernstraßennetz befinden, ermöglichen.

6.2.1.2 RTMS für Brückenkenwerte

Das System RTMS zeichnet seit 5 Jahren nahezu ohne Ausfälle Messdaten und evaluierte Daten auf. Es realisiert als BWIM System zuverlässig Verkehrsdaten analog zu WIM Daten. Es wird ein Verschnitt mit den Verkehrszählenden umliegender Stationen empfohlen. Objektspezifische Lastmodelle stehen online zur Verfügung.

Die intelligente Brücke sollte als Prototyp für Entwicklungen genutzt werden. Eine weitere Ausstattung der Brücke mit neuen und konventionellen Systemen in Ergänzung, Erweiterung oder auch als Ersatz vorhandener Systeme wird Ansporn für viele Disziplinen sein. Es sind Querverbindungen möglich und sinnvoll. Besonders empfehlenswert ist die Verbindung des RTMS Systems mit einem bildverarbeitenden System.

6.2.1.3 Drahtloses Sensornetz

Das drahtlose Sensornetzwerk ist grundsätzlich für den Einsatz bei der Brückenüberwachung, wenn niedrige Abstraten ausreichen, als kostengünstige Alternative zu verkabelter Sensorik geeignet, da es seit mehreren Jahren ohne Batteriewechsel stabil in Betrieb ist und Messergebnisse liefert. Falls die Wetterstation ein weiteres Mal ausfällt, sollte die Ursachensuche fortgeführt werden.

Es wird empfohlen, das drahtlose Netzwerk auf weitere Brückenfelder zu erweitern und den Betrieb zu testen. Auch eine Versorgung lediglich mit Solarstrom sollte für eine batterieunabhängige Energieversorgung verfolgt werden. Des Weiteren ließe sich ein solches Netzwerk um KI-Komponenten erweitern, welche weitere Datenverarbeitungsschritte vor Ort mit geringen Energieaufwand durchführen könnten.

6.2.2 Zentralserver, Datenbank und Webapplikation

Der Zentralserver als RAID6 System mit Hot-Spare Festplatten hat sich vor Ort im Einsatz im Brückenüberbau bewährt. Trotz des zeitgleichen Ausfalls von bis zu drei Festplatten sind alle aufgezeichneten Daten gesichert worden und Datenverluste sind nicht entstanden. Da die aggregierten Daten mittels eines R-Sync-Skriptes in regelmäßigen Abständen gesichert werden, sind diese Daten selbst bei einem Totalausfall des Systems abrufbar.

Die SQL-Datenbank erfüllt ihre Aufgaben entsprechend den Anforderungen. Aufgrund der großen Datenmengen könnte es vorteilhaft sein, auf eine Time-Series-Datenbank umzusteigen, um nicht nur Zugriffszeiten und Verarbeitungsdauer der zugrundeliegenden Baumstruktur zu minimieren, sondern auch die große Anzahl an Tabellen auf wenige Exemplare zu reduzieren.

An der Webanwendung sind zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Änderungen nötig. Eine Erweiterung durch zusätzlich Auswertungen mit und ohne neue Sensoren ist jederzeit möglich und wünschenswert. Empfohlen wird, alle Technologien auf ein aktuelles Sicherheitsniveau anzuheben und Kompatibilität herzustellen.

6.2.3 Daten – Auswertung, Qualität und Weiterverwendung

Die automatisierte Auswertung vor Ort liefert die Kenndaten der Brücke und der Belastung aus Verkehr und Temperatur. Während die Auswertung überwacht wird, wird eine inhaltliche Überwachung lediglich anhand einer Schwellwertüberschreitung durchgeführt. Eine regelmäßige Qualitätsprüfung der ausgewerteten Daten wird empfohlen. Diese führt zu einer Weiterentwicklung der Algorithmen und ist Basis weiterer Erkenntnisgewinne. Kenndaten und die verwendeten Algorithmen dürfen nicht auf dem Stand von 2017 bleiben, sondern müssen zu lebenden Kenndaten werden. Dabei wird sich herausstellen, welche gewählten Kenndaten die erwartete Aussagequalität erreichen und welche Neuentwicklung sinnvoll ist.

Sowohl die Messdaten als auch die evaluierten Daten stehen für weitere Forschungen o. ä. zur Verfügung. Dafür sind eine Qualitätssicherung und Einordnungen in Qualitätssysteme wie z. B. COST 323 dringend zu empfehlen. Dafür ist eine regelmäßige Kalibrierung in definierten Zeitabständen notwendig. Aus den Erfahrungen der zurückliegenden 5 Jahre wird ein Kalibrierrhythmus von 2 Jahren empfohlen.

Eine Weiterverwendung der Messdaten und evaluierten Daten ist wünschenswert, z. B. als Smart Data für einen digitalen Zwilling etc.

Literatur

- [1] BUTZ, C.: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager, Bericht B 160, Bundesanstalt für Straßenwesen, März 2021
- [2] RILL, D.: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen, Bericht B168, Bundesanstalt für Straßenwesen, Juli 2021
- [3] FREUNDT, U., BÖNING, S., FISCHER, S., LAU, F.: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten, Vorabveröffentlichung, Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt und Universität zu Lübeck, Dezember 2020

Bilder

- Bild 1: Links KGA 40/1 und Rechts KGA 40/3
- Bild 2: Links KGA 40/1 und Rechts KGA 40/3 im Bauwerk
- Bild 3: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/1
- Bild 4: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/3
- Bild 5: Erfassungsquote des Systems Maurer von Juni bis September 2020
- Bild 6: Tagesmittelwerte und Tagesmaxima des Drucks des Sensors 40/1-3 im Lager 40/1 im Zeitraum Juni bis September 2020
- Bild 7: Tagesmittelwerte und Tagesmaxima des Drucks des Sensors 40/3-3 im Lager 40/3 im Zeitraum Juni bis September 2020
- Bild 8: Position der Sensoren in der Fuge in der Draufsicht
- Bild 9: Darstellung des Messlagers und der KMD
- Bild 10: Darstellung und Aufbau des Messlagers
- Bild 11: Darstellung der Seilzugsensoren W1-W3
- Bild 12: Darstellung der Seilzugsensoren W4-W5
- Bild 13: Darstellung der Beschleunigungssensoren B1-B4
- Bild 14: Lage der Sensoren am Bauwerk
- Bild 15: Lage und Bezeichnung der Messstellen
- Bild 16: Achse 40 Lager 40.1 Reinigung Vogelschutz von außen
- Bild 17: Lager 40.1 Sichtkontrolle
- Bild 18: Beschleunigungssensoren am Spannseil
- Bild 19: Messachse 50 Messschrank
- Bild 20: Messachse 40 Messschrank
- Bild 21: Messachse 50 Schaltschrank NAS
- Bild 22: Achse 40 Lager 40.1 Demontage Vogelschutz
- Bild 23: Lager 40.1 Bereich Wartung/Reparatur
- Bild 24: Beschleunigungssensor auf Spannseil
- Bild 25: Achse 40 Lager 40.1 – Wartung Sensoren
- Bild 26: Achse 40 – Vogelschutz nach Reparatur
- Bild 27: ÜK nach Wartungsarbeiten
- Bild 28: Achse 40 Lager 40.1 Vogelschutz einseitig abgerissen
- Bild 29: Beschleunigungssensor
- Bild 30: Messachse 50 Messschrank
- Bild 31: Messachse 50 Messschrank NAS
- Bild 32: Messachse 40 Messschrank
- Bild 33: FÜK nach Wartungsarbeiten
- Bild 34: Achse 40 Lager 40.1 Durchführung der Wartungsarbeiten
- Bild 35: Wartungsarbeiten an MS27v
- Bild 36: Wartungsarbeiten an MS28v
- Bild 37: Wartungsarbeiten an MS29v
- Bild 38: Wartungsarbeiten an MS 30h
- Bild 39: Beschleunigungssensoren
- Bild 40: Messschrank
- Bild 41: Messschrank NAS

- Bild 42: Messschrank
- Bild 43: Erfasste Zeiträume – IBF – Mai 2021
- Bild 44: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 1 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung
- Bild 45: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 2 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung
- Bild 46: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 3 Q – Dehnungsmessung am Querschnitt Querrichtung
- Bild 47: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 3 L – Dehnungsmessung am Querschnitt –Längsrichtung
- Bild 48: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 4 Q – Dehnungsmessung am Querschnitt – Querrichtung
- Bild 49: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 4 L – Dehnungsmessung am Querschnitt – Längsrichtung
- Bild 50: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 5 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung
- Bild 51: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Messstelle MS 6 L – Dehnungsmessung eingebaute Bewehrung
- Bild 52: Verlauf der Stundenmittelwerte von Februar 2017 bis November 2020 – Temperaturmessungen am Bauwerk (eingebaute Sensoren)
- Bild 53: Links ist das drahtlose Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck zu sehen. Dieses ist über eine serielle Schnittstelle mit dem NAS verbunden. Nur das Gateway UzL hat eine direkte Verbindung außerhalb des WSN
- Bild 54: Fotografie des Schaltschranks UzL mit den genannten Geräten
- Bild 55: Fotografie eines Riss 2 Sensorsknotens mit Kraftsensor (gelb) und potentiometrischem Weggeber
- Bild 56: Darstellung des potentiometrischen Weggebers CC9F, des Riss-/Kraftsensors CCA3, des Ausdehnungssensors CC88, der Materialtemperatursensoren CBEB\& CC14, des Neigungssensors CC8A und die angenommene Konnektivität im Feld 4 links
- Bild 57: Darstellung des Neigungssensors CC8A, des potentiometrischen Weggebers CC29, des Repeaters CC73, des Gateways CC70, des Riss-/Kraftsensors CC8C und die angenommene Konnektivität im Feld 4 rechts
- Bild 58: Darstellung des Riss-/Kraftsensors CC8C in der Brückenskizze an der Achse 50
- Bild 59: Darstellung eines Repeaters (CC66), eines Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensors (CBF3) und der Wetterstation (CBF4) sowie ihre angenommene Konnektivität im äußeren Bereich der Brücke
- Bild 60: Darstellung des Datenflusses durch das WSN UzL erfasste Sensornetz. Nachdem die Messdaten, möglicherweise über mehrere Sprünge, das Sensornetz verlassen habe, werden diese an eine Softwarekomponente namens „BridgeConnector“ weitergereicht. Von dort gelangen sie über das NAS in eine Datenbank und können von einem beliebigen Webbrowser abgerufen werden.
- Bild 61: Dargestellt ist die Datenverarbeitung-Pipeline, welche alle erfassten Messdaten durchlaufen müssen, bevor sie in die Datenbank eingespeist werden können
- Bild 62: Skript zur E-Mail-Benachrichtigung von Nutzern, sollten innerhalb eines definierten Zeitraumes keine Daten in der Datenbank eingegangen sein
- Bild 63: Speicherauslastung des Zentralservers sowie Gesundheitszustand der verwendeten RAID-6 Festplatten

- Bild 64: Systemarchitektur der intelligenten Brücke. Dargestellt sind die verwendeten Geräte und ihre Verbindungen. An das NAS und an den Messrechnern ist jeweils die Sensorik der Projektpartner angeschlossen
- Bild 65: Architektur des Gesamtsystems inklusive Router und weiterer Infrastruktur in Fischbach
- Bild 66: Gemessene Geschwindigkeit v_{Joint} zu tatsächlicher Geschwindigkeit v_{GPS} während der Referenzfahrten
- Bild 67: Fahrzeugklassifizierung für 1.06.2018 bis 10.09.2018
- Bild 68: Gemessene Achslasten des 3-Achs-Lkws
- Bild 69: Gemessene Achslasten des 5-Achs-Lkws
- Bild 70: Gemessenes Gesamtgewicht zu statischem Gesamtgewicht für den 3-Achs-Lkw
- Bild 71: Gemessenes Gesamtgewicht zu statischem Gesamtgewicht für den 5-Achs-Lkw
- Bild 72: Wirkung des Kompensationsalgorithmus
- Bild 73: Prozentuale Abweichungen in den Fahrzeuggewichten zwischen Maurer und IBF mit und ohne Dynamikkompensation
- Bild 74: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2017 bis April 2017
- Bild 75: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2017 bis Juli 2017
- Bild 76: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum August 2017 bis Oktober 2017
- Bild 77: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum November 2017 bis Januar 2018
- Bild 78: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2018 bis April 2018
- Bild 79: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2018 bis Juli 2018
- Bild 80: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum August 2018 bis Oktober 2018
- Bild 81: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum November 2018 bis Januar 2019
- Bild 82: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2019 bis April 2019
- Bild 83: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2019 bis Juli 2019
- Bild 84: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum August 2019 bis Oktober 2019
- Bild 85: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum November 2019 bis Januar 2020
- Bild 86: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2020 bis April 2020
- Bild 87: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2020 bis Juli 2020
- Bild 88: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum August 2020 bis Oktober 2020
- Bild 89: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum November 2020 bis Januar 2021
- Bild 91: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2021 bis April 2021
- Bild 90: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Februar 2021 bis April 2021
- Bild 91: Anzahl von erkannten Lkw-Fahrzeugen pro Tag getrennt für Fahrsteifen – Zeitraum Mai 2021 bis Juli 2020

- Bild 92: DTV-SV Werte monatsweise für den Auswertungszeitraum – Mittelwerte für die Tage Montag bis Freitag, ohne Feiertage
- Bild 93: Schwerverkehrszusammensetzung in grober Klassifizierung pro Tag (Spur 1) – Zeitraum Februar 2017 bis April 2017
- Bild 94: Schwerverkehrszusammensetzung in grober Klassifizierung pro Tag (Spur 1) – Zeitraum Februar 2018 bis April 2018
- Bild 95: Mittelwerte der Schwerverkehrszusammensetzung für den gesamten Auswertungszeitraum – bezogen auf die Tage Montag bis Freitag ohne Feiertage
- Bild 96: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2017 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen
- Bild 97: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2018 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen
- Bild 98: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2019 – Algorithmen aktuelle Entwicklungsstufe – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen
- Bild 99: Visualisierung der Erkennung eines Fahrzeuges des Großraum- und Schwerlastverkehrs
- Bild 100: Visualisierung der Erkennung eines Fahrzeuges des Großraum- und Schwerlastverkehrs
- Bild 101: Standort der Wetterstation im Vergleich zur Intelligenten Brücke (ca. 13 km)
- Bild 102: Temperaturdaten des DwD über den Messzeitraum der Wetterstation der UzL
- Bild 103: Regenmenge pro Stunde über den Messzeitraum der Wetterstation der UzL
- Bild 104: Windgeschwindigkeit vom DwD über den gesamten Messzeitraum der Wetterstation der UzL
- Bild 105: Sonnenscheindauer über den gesamten Messzeitraum der UzL, erfasst durch den DwD
- Bild 106: Sonnenscheinintensität in Joule pro Quadratzentimeter gemessen durch den DwD
- Bild 107: Dargestellt ist die erfasste Schattentemperatur vom 26.09.2019 bis 24.10.2019
- Bild 108: Dargestellt ist die erfasste Luftfeuchtigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019
- Bild 109: Dargestellt ist die erfasste Regenmenge vom 26.09.2019 bis 24.10.2019
- Bild 110: Dargestellt ist die erfasste Windgeschwindigkeit vom 26.09.2019 bis 24.10.2019
- Bild 111: Dargestellt ist die erfasste Rissgröße über den Messzeitraum 14.11.2020 bis 22.11.2020. Aufgezeigt sind die Sensor-knoten CCA3 (rot), CC8C (orange), CC29 (gelb) und CC9F (grün)
- Bild 112: Dargestellt ist die erfasste Neigung über den Messzeitraum 1.11.2019 bis Ende 20.11.2020
- Bild 113: Dargestellt ist die erfasste Kraftauswirkung auf die Oberfläche über den Messzeitraum 20.09.2020 bis 20.11.2020
- Bild 114: Lufttemperatur im Schatten CBF3 (grün), Oberflächentemperatur Hohlkörper Oben CBEB (gelb), Oberflächentemperatur Hohlkörper Unten CC14 (Rot) und Lufttemperatur der Wetterstation CBF4 (orange)
- Bild 115: MS6L – Stunden-Maximalwerte und Hüllkurve
- Bild 116: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte) und Hüllkurve
- Bild 117: MS6L – Stunden-Maximalwerte, Hüllkurve und charakteristische Werte
- Bild 118: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte

- Bild 119: MS6L – Stunden-Maximalwerte, Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1
- Bild 120: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1
- Bild 121: MS1L – Ermittelte Schädigungssummen für verschiedene Betrachtungszeiträume
- Bild 122: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten für verschiedene Betrachtungszeiträume
- Bild 123: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten im Verhältnis zu Vergleichswerten für verschiedene Betrachtungszeiträume
- Bild 124: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\1-3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 125: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\1-3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 126: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\3-3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 127: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der gemessenen Drücke des Sensors DS 40\3-3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 128: Tägliche Mittelwerte der gemessenen quasi-stationären Gleitwege $u_{x,qs,40/3,Mean}$ des Sensors WA 40\3 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018 und akkumulierter Gleitwegs $s_{x,qs,40/3}$
- Bild 129: Tägliche Mittelwerte der gemessenen quasi-stationären Gleitwege $u_{x,qs,40/3,Mean}$ des Sensors WA 40\3 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 130: Quasi-stationäre Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima der Lagerverdrehung im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018 und akkumulierter Gleitweg infolge quasi-statischer Lagerverdrehung
- Bild 131: Tägliche Maxima, Minima und Mittelwerte der berechneten Lagerverdrehung anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 132: Akkumulierte ebene Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 133: Akkumulierte sphärische Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 134: Akkumulierte ebene und sphärische Gleitwege aus Temperatur und Verkehr (insgesamt) zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 135: Berechneter Abstand zur oberen Lagerplatte anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 136: Berechneter Abstand zur oberen Lagerplatte anhand der Sensoren AS 40\3-1 und AS 40\3-2 zwischen Januar 2019 und Dezember 2019
- Bild 137: (a) Messverlauf der Beschleunigungssensoren (MS 23-26) bei Kalibrierfahrt ID 35 (Fz. 1, linke Spur – rechts orientiert, 90 km/h). (b) Die ersten sieben Eigenformen der ext. Spannglieder entsprechend einer harmonischen Schwingung. (c) Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für den Zeitbereich t_1
- Bild 138: Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für die Zeitbereiche (a) nachts mit relativ geringem Verkehrsaufkommen und (b) tagsüber mit relativ hohem Verkehrsaufkommen. Gekennzeichnet sind die durch Peaks sichtbaren Eigenfrequenzen der den Sensoren zugehörigen Spanngliedabschnitte
- Bild 139: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS23 – Februar 2017 bis Oktober 2020
- Bild 140: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS24 – Februar 2017 bis Oktober 2020
- Bild 141: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS26 – Februar 2017 bis Oktober 2020

Bild 142: Ermittelte 3. Eigenfrequenzen – MS25 – Februar 2017 bis Oktober 2020	dargestellt Ausfälle der Stromanbindung und rot dargestellt Ausfälle des NAS
Bild 143: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße (Eigenfrequenz-Differenz = Messwert-Näherung)	Tab. 14: Datenmodell einer Brücke in der Webapplikation und Datenbank
Bild 144: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße (Eigenfrequenz-Differenz = Messwert-Näherung)	Tab. 15: Datenmodell eines Sensorknotens in Datenbank und Webapplikation
Bild 145: Leistungsdichtespektrum aller Kraftsensoren	Tab. 16: Datenmodell eines Sensors (Kanals). Diese sind immer einem Sensorknoten zugeordnet.
Bild 146: Akkumulierter Gleitweg der rechten Teilkonstruktion über einen Zeitraum von ca. 4 Monaten	Tab. 17: Beispiel einer ID zu Einheiten Zuordnung
	Tab. 18: Beispielhafte Auflistung verschiedener Einheiten Präfix-Werte
	Tab. 19: Beispiele für inferierte Einheiten
	Tab. 20: Spezifikation der Tabellen Lkw0 – Lkw3 sowie LkwHistory

Tabellen

Tab. 1: Anzahl der Sensoren in den Lagern	
Tab. 2: Zeiträume ohne Datenerfassung 2017-2018	Tab. 21: Spezifikation der Fahrzeugdetaildaten. n und k stehen für eine sich wiederholende Anzahl Tabellenspalten desselben Typs
Tab. 3: Zeiträume ohne Datenerfassung 2019	Tab. 22: Metainformationen aller Systeme und Sensoren des IBF. Die Datenbankstruktur wurde exemplarisch für eine Messstelle gezeigt. Diese gilt für StatusDbData, ResultDbFFTDData, REsultDbFatigueData, ResultDbStressData und ValueDbData
Tab. 4: Zeiträume ohne Datenerfassung 2020	Tab. 23: Spezifikation der Tabelle ValueDB_Data
Tab. 5: Zeiträume ohne Datenerfassung 2021	Tab. 24: Tabellenspezifikation der Tabelle StatusDB_Data
Tab. 6: Wartungs- und Instandsetzungen	Tab. 25: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Stress_Data
Tab. 7: MAC-Adressen der einzelnen Knoten, deren Datenbank-IDs und die dazugehörigen Bezeichnungen	Tab. 26: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDb_Fatigue_Data
Tab. 8: Anzahl und Zeiträume der Messausfälle der UzL 2017	Tab. 27: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Fatigue_DeltaS_Data
Tab. 9: Daten der spannungsverlustbedingten Messausfälle pro Sensorknoten	Tab. 28: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_FFT_Data
Tab. 10: Anzahl und Zeiträume der Ausfälle der Wetterstation	Tab. 29: Datenbanktabelle für die Übergangskonstruktion
Tab. 11: Anzahl und Zeiträume der Internetausfälle 2017 und 2018	Tab. 30: Tabellenspezifikation der Tabelle MaurerStatusBD
Tab. 12: Anzahl und Zeiträume der Internetausfälle Juni 2019 bis November 2020	Tab. 31: Tabellenspezifikation der Tabelle LagerData
Tab. 13: Ausfälle im Jahre 2019. Grün dargestellt sind Ausfälle der Internetverbindung, gelb	

-
- Tab. 32: Tabellenspezifikation der Tabelle
MaurerMetadata
- Tab. 33: Tabellenspezifikation der Tabelle
DB_StatusPage_Full – Teil 1
- Tab. 34: Tabellenspezifikation der Tabelle
DB_StatusPage_Full – Teil 2
- Tab. 35: Tabellenspezifikation der Tabelle
DB_StatusPage_Full – Teil 3
- Tab. 36: Abweichungen der gemessenen
Geschwindigkeit zur tatsächlichen
- Tab. 37: Unterscheidungsmerkmale für eine
Fahrzeugklassifizierung 5+1
- Tab. 38: Eigenschaften ausgewählter Fahrzeug-
typen – Mittelwerte über den gesamten
Auswertungszeitraum
- Tab. 39: Vergleichswerte aus dem Ansatz des
Lastmodells LM 1 nach Eurocode und NA
- Tab. 40: Messtechnisch ermittelte Eigenfrequen-
zen der erfassten Spanngliedabschnitte
auf Basis der dargestellten Amplituden-
spektren
- Tab. 41: Berechnete 1. und 3. Eigenfrequenz der
instrumentierten Spanngliedabschnitte
und die zugehörigen Systemparameter für
den Ausfall von keiner, einer und 20 Lit-
zen des Spanngliedes
- Tab. 42: Ergebnisse der automatisierten Auswer-
tung für die Kalottenlager in Achse 40

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BASt-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers € 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck € 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brenninger, Zulauf, Locher € 18,00

B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023

B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen

Friedrich € 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.