

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

Datenerfassungs- strategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

Datenerfassungs- strategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager

von

Christiane Butz

Maurer Engineering GmbH
München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 160

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 15.0632
Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke -
Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für
intelligente Kalottengleitleitlager

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 978-3-95606-550-7

Bergisch Gladbach, Februar 2021

Kurzfassung – Abstract

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Die intelligenten Kalottenlager sind durch Messdatenanalyse, Entwicklung geeigneter Algorithmen und Implementierung einer automatisierten Auswertung ein effektiver Baustein einer „Intelligenten Brücke“. Sie liefern kontinuierlich relevante Informationen sowohl zu Eigenüberwachung, Bauwerksüberwachung als auch Einwirkungserfassung. Somit können die Ergebnisse eingebunden werden in Prognose- und Strukturmodelle und schaffen damit eine Grundlage für ein zuverlässigkeitsorientiertes und präventives Erhaltungsmanagement.

Zur Selbstüberwachung der Lagerfunktionalität und des Lagerzustands werden Tagesextremwerte der Verschiebung in der ebenen Gleitfläche, der Verdrehung und des Drucks sowie akkumulierte Gleitwege und der Gleitspalt kontinuierlich ausgegeben. Zur Überwachung der Brückeneigenschaften dienen die ersten beiden Eigenfrequenzen sowie die Lagerkraft infolge ständiger Einwirkungen. Die Verkehrseinwirkung wird überwacht anhand der verkehrsinduzierten Lagerkräfte, die in einem täglichen Peak-Histogramm dem Betreiber der Intelligenten Brücke zur Verfügung gestellt werden. Die Auswahl der Sensoren, das Messwerterfassungssystem kombiniert mit den Auswertalgorithmen sind robust und liefern qualitativ hochwertige Messdaten. Z. B. werden verkehrsinduzierten Lagerkräfte mit einer Genauigkeit von $\pm 7\%$ des Fahrzeuggesamtgewichts erfasst. Im Jahresrhythmus werden die bemessungsrelevanten Quantilwerte der Lagerreaktionen ermittelt, die Aussagen zur Genauigkeit der normgemäßen Bemessung geben.

Digital testbed motorway – Smart bridge – Data collection strategies and data analysis for smart spherical bearings

The smart spherical bearings are an effective component of a “smart bridge” through measurement data analysis, development of suitable algorithms and implementation of an automated evaluation. They continuously provide relevant information on self-monitoring, structural monitoring and traffic loading. Thus, the results can be integrated into

prediction models and structural models and thus create a basis for a reliability-oriented and preventive bridge maintenance management.

For self-monitoring of bearing functionality and bearing condition, daily extreme values of the displacement in the plane sliding surface, the twist and the pressure as well as the accumulated sliding paths and the sliding gap are continuously evaluated. The first two natural frequencies as well as the bearing force as a result of constant actions serve to monitor the bridge properties. Traffic is monitored using the traffic induced bearing forces provided to the Smart Bridge operator in a daily peak histogram. The selection of sensors, the data acquisition system combined with the evaluation algorithms are robust and provide high quality measurement data. For example, traffic-induced bearing forces are recorded with an accuracy of $\pm 7\%$ of the total vehicle weight. In the annual rhythm, the design-relevant quantile values of the bearing reactions are determined, which give information about the accuracy of the standard design assumptions.

Summary

Digital testbed motorway – Smart bridge – Data collection strategies and data analysis for smart spherical bearings

1 Smart spherical bearings

Within the framework of the pilot project “Digital Testbed Motorway” the bridge BW402e, a two-lane overpass at the Nuremberg intersection, is equipped with sensors and instrumented components to provide information on the condition and loading of the bridge. The Smart Bridge is a pilot project for a partial realization of the Smart Bridge. I.a. two instrumented multi-directional movable spherical bearings with integrated measuring equipment were installed. In each concave bottom part of bearing 40/1 and 40/3 three pressure sensors are installed. Additionally two distance sensors and one displacement transducer are installed in bearing 40/3.

The suitability of the instrumented spherical bearings for detecting the action effects of dead weight, traffic loads and temperature effects as well as self-monitoring functions are determined and an automated evaluation of the measured parameters is developed within this project.

2 Relative displacement of the plane sliding surface

The horizontal bearing displacement between the upper part and the lower part of the bearing is measured with a displacement sensor. The temperature-induced, quasi-stationary displacement of the plane sliding surface between the bearing upper part and the lower part is determined on the basis of the 10-min mean values. As a measure of the wear on the sliding material, the displacement of the accumulated quasi-stationary sliding path of the plane sliding surface is determined (see Figure 1).

Figure 1 clearly shows the seasonal influence, i.e. the bridge expands in summer and shortens in winter. Over the period considered, the extreme values of the average displacement were 41.5 mm between the minimum of -45.5 mm and the maximum of -4.00 mm. Based on 82% data acquisition during the measurement period, the average accumulated sliding path per 10-min data set is found to be 0.01405 mm. The calculated accumulated sliding path for the period of 2 years is 1446.2 mm. If the design life of the bridge is considered to be 100 years, the result is an accumulated quasi-stationary sliding path path of 72.31 m.

A correlation analysis of bearing displacement and structural temperature shows that the actual thermal expansion is approximately 85% to 90% of that calculated using normative values. The result is a thermal expansion coefficient αT for the bridge of 0.9×10^{-5} or 0.85×10^{-5} [1/K].

Due to the constraint-free kinematic capabilities a rotation of the spherical cap causes an associated compensatory bearing displacement in the plane

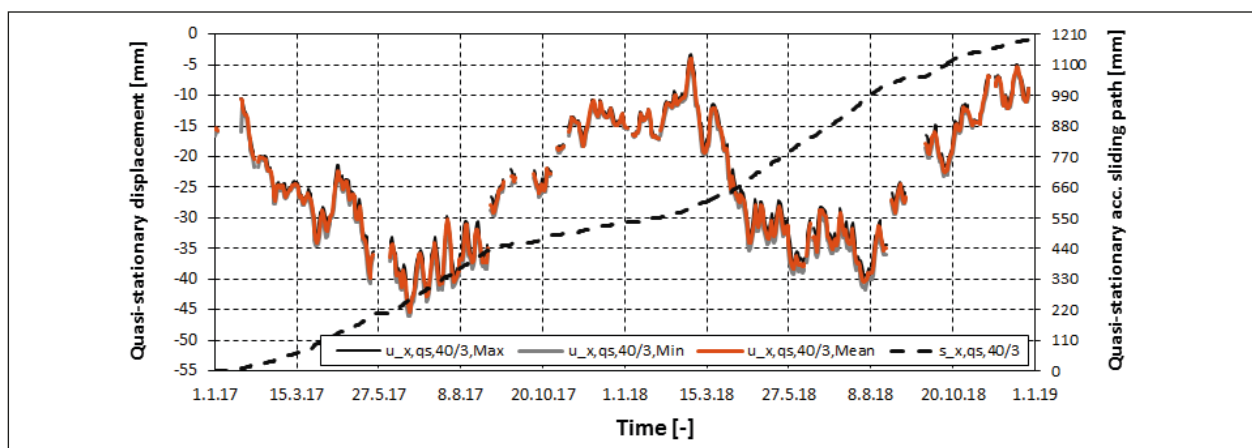


Fig. 1: Relative bearing displacement of the plane sliding surface and accumulated sliding path

sliding surface. The traffic-induced displacement of the plane sliding surface can be determined by means of the time-varying rotation of the bearing. Neglecting the elasticity and friction of the sliding material, model-based calculations result in conservative traffic-induced displacements. Measurements are used to determine an empirical correction function that captures friction and elasticity effects to correct the calculated bearing displacements. The average fluctuating accumulated sliding path is 1.96 mm per 10 min record. On the basis of this value and the average quasi-stationary sliding path, a total sliding path of 203189.2 mm is obtained over the 2-year period. Assuming that traffic does not change, the predicted accumulated sliding path after 10 years is 10160 m. In approval tests, the sliding material MSM[®] was exposed to an accumulated sliding path of 50 km without apparent wear. As a result, the bearing 40/3 in the plane sliding surface would not experience any significant wear during the entire life of the bridge.

3 Bearing rotation and displacement of the spherical sliding surface

The smoothed signals from the distance sensors are used to determine the rotation of bearing 40/3 about the bridge transverse axis and the accumulated sliding path of the spherical sliding surface. Looking at the bearing rotation, a stationary, seasonally variable rotation is clearly recognizable, which is overlaid by fluctuating traffic-induced rotations (see Figure 2). $\alpha_{40/3} \sim 0$ in summer means that the bearing rotation corresponds to the condition of June 2016 when the sensors were adjusted.

Possible reasons of the local peaks are dense traffic, work on or near the bridge, electronic disturbances.

The maximum bearing rotation is 2.2×10^{-3} rad and the minimum is -9.1×10^{-4} rad related to the installation situation in July 2016. Considering the maximum and minimum mean bearing rotation of 1.31×10^{-4} rad and -6.25×10^{-4} rad, the result is a symmetrical bearing rotation of $\pm 3.78 \times 10^{-4}$ rad. Both the absolute and the oversimplified bearing rotations are significantly smaller than the maximum possible of $\pm 5.0 \times 10^{-3}$ rad.

The quasi-stationary bearing rotation is used to calculate the sliding path in the spherical sliding plane and thus the accumulated sliding path due to temperature deformation of the bridge deck. The result is an accumulated sliding path of 1.2×10^{-3} mm per 10 min data set, i.e. 61.8 mm per year. On the basis of the fluctuating bearing rotation, the displacements in the spherical and the plane sliding surface are calculated and added up. The accumulated total bearing displacements in the spherical sliding plane are approximately 2.86 mm per 10 min data set, i.e. 147.19 m per year. Due to the high traffic load, the fluctuating bearing rotations lead to a large accumulated path and are not negligible in the self-monitoring of the component. The forecast of the accumulated sliding path during the lifetime of the bridge is 14.725 km, so that no appreciable wear of the sliding material is to be expected.

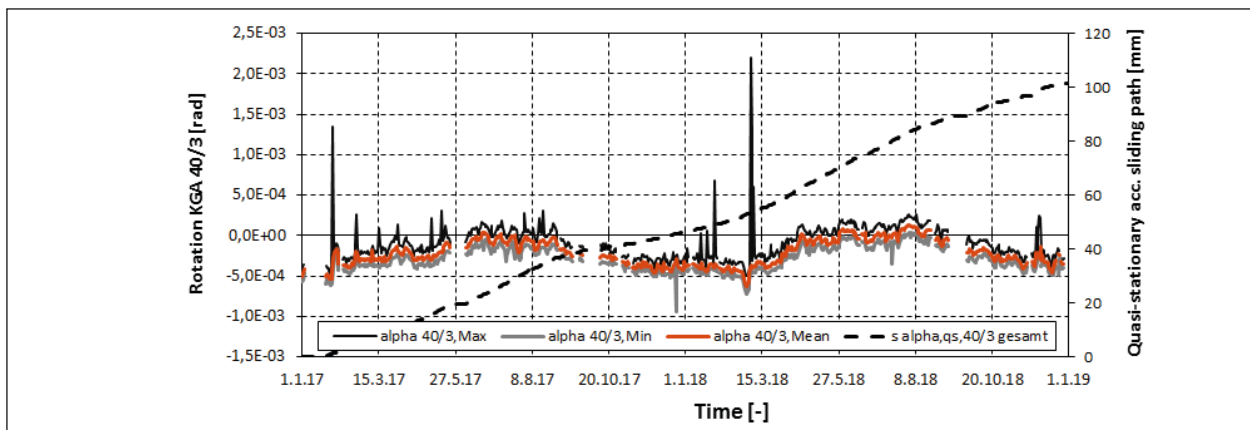


Fig. 2: Quasi-static bearing rotation with maxima and minima from 1.1.2017 till 31.12.2018

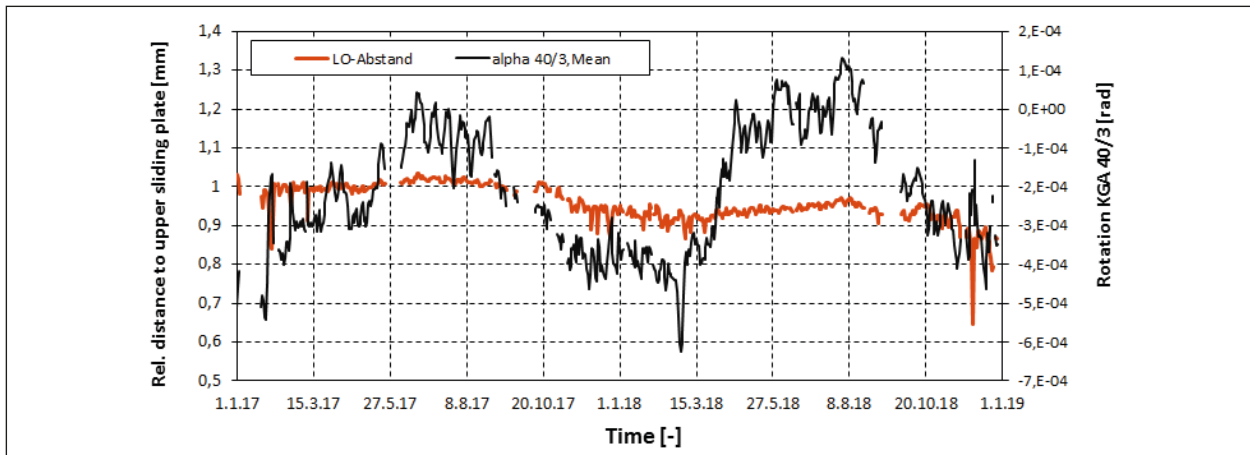


Fig. 3: Quasi-stationary bearing rotation and relative height of the upper plate centric above the calotte

4 Sliding clearance of the primary and secondary sliding surface

The relative distance between the bearing base and the center of the bearing upper plate is calculated using the distance sensors and assuming a mechanical spherical bearing model. The values of the calculated LO-distance can be understood only as an indication of wear, as some influencing variables in the mechanical model are neglected. The measured curve of the LO-distance over the two-year period based on quasi-stationary values results in a reasonable curve with small scatter, which is caused by negligible influencing factors. The measured curve of the LO-distance over the two-year period based on quasi-stationary values results in a reasonable curve with small scatter, which is caused by negligible influencing factors. Thus, consideration of the LO-distance is a suitable parameter for self-monitoring of the spherical bearing, i.e. the wear of the sliding material due to sliding is monitored. Figure 3 shows a reduction of the distance from approx. 1 mm to 0.95 mm, which could possibly be correlated with seasonal temperature fluctuations. For a judgment as to whether the decrease is caused by wear of the sliding material or by settling of the concrete or deflections, a longer measuring period is required.

5 Vertical bearing load

The measured vertical quasi-steady bearing forces are compared to calculated values to determine possible force redistribution due to bridge constitutional changes, e.g. change of stiffness, bearing settlement, etc., to detect. Figure 4 shows the monthly mean values of the bearing forces calculated from quasi-static pressure values. The

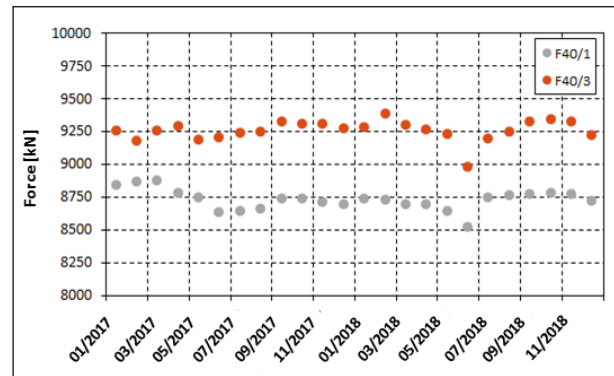


Fig. 4: Monthly mean values of the quasi-stationary vertical bearing load KGA 40/1 and KGA 40/3

mean value of the measured bearing force is 8721.5 kN at bearings 40/1 and 9248.8 kN at bearings 40/3.

Taking into account the accuracy of the pressure sensors of $\pm 2 \text{ N/mm}^2$, the deviation between measured and calculated design loads is determined.

The measured loads are between 1.04 to 1.27 and 1.22 times larger than the calculated, but still less than the γ_G times calculated permanent loads. Thus, the values from the static calculations based on normative material properties represent the actual loads well. The comparison with design values leads only to a “corridor” comparison, since it can not be separated whether structural changes, e.g. pier settlement, have already occurred, or whether manufacturing tolerances of the structure influence the bearing action effects.

Using the pressure sensors, fluctuating bearing reactions due to traffic can be recorded with sufficient accuracy. The total lorry weights are recorded with an accuracy of $\pm 7\%$ (see Figure 8). From the sum of the fluctuating bearing forces of

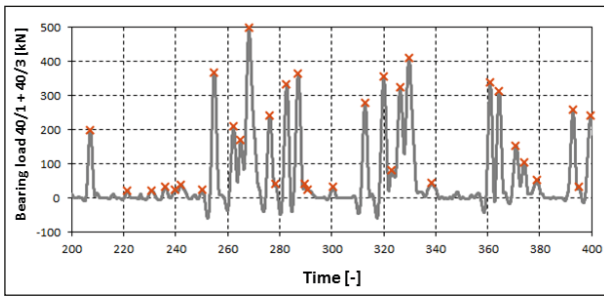


Fig. 5: Peaks of the combined bearing loads for dense traffic

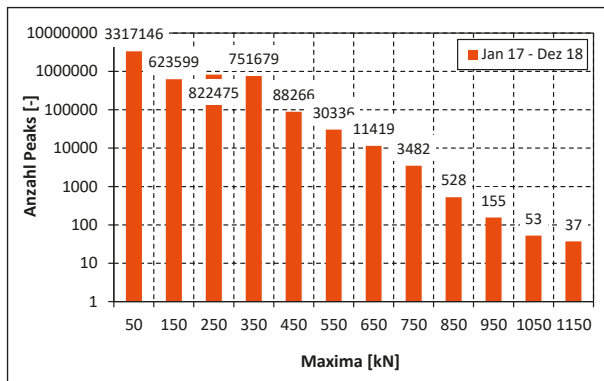


Fig. 6: Peak-classification for the time interval from January 2017 till December 2018

bearings 40/1 and 40/3, local maxima greater than 20 kN (i.e. 2038 kg) are determined (see Figure 5). These are summarized with a peak classification and thus provide valuable information about the impact of traffic on the bridge (see Figure 6).

6 Bridge's natural frequencies

The bridge natural frequencies are characteristics for the stiffness of the bridge. By means of the distance sensors, the vibration behavior of the bridge is detected and the natural frequencies are determined.

7 Evaluation of traffic-induced bearing reactions by numerical simulation

Since only the two bearings of axis 40 are instrumented, it is necessary to determine the accuracy of the traffic impact on a FE model of the bridge. To verify the measured traffic-induced bearing effects with the actual load from traffic, the reference runs are simulated with an FE bridge model with continuously moving single loads. The

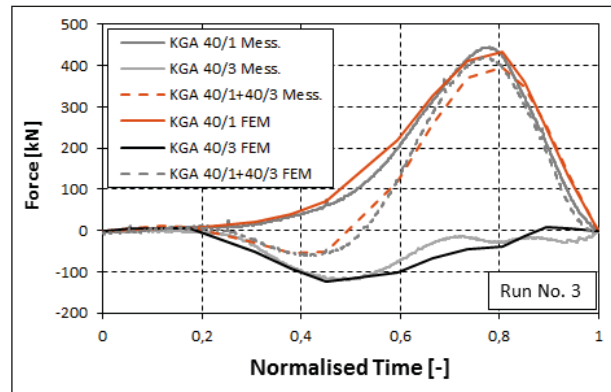


Fig. 7: Comparison of measured bearing reaction force and simulated one for reference run No. 3

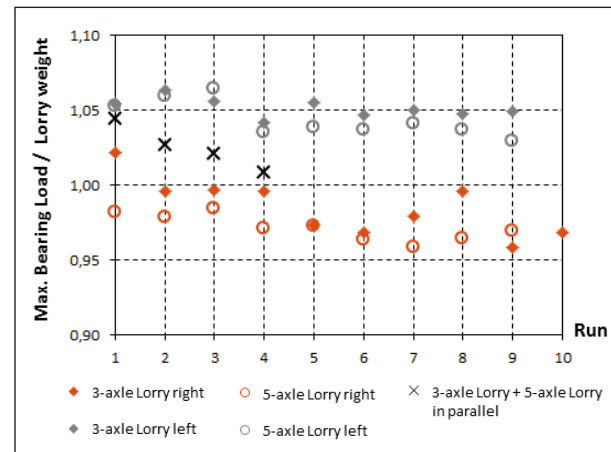


Fig. 8: Measured maximum Bearing Force vs. Lorry's Dead Load

results (see Figure 7) show a good similarity with the measurements. The instrumented bearings are able to detect the full traffic load of trucks.

8. Quality assurance of measured parameters

Since both the bridge and the bearings can change during operation so that the calibration functions for the sensors no longer lead to sufficiently accurate measured variables, an examination was carried out for the quality assurance of the sensor signals after approximately 1.5 years of operation. Reference runs with similar trucks and speeds were repeated and the fluctuating bearing forces were compared with the total truck weight (see Figure 8).

Overall, the accuracy of the traffic load determination is $\pm 7\%$ and thus still very satisfactory. The calibration of the bearings to measure the dead weight should take place in a laboratory. The calibration for the measurement of traffic loads can be done with the

installed bearings by calibration runs with lorries. The quality assurance of the pressure signals for traffic monitoring should be carried out every 2 years. The quality assurance of the measurements of the dead weight are more expensive. A partial unloading with hydraulic presse from below is recommended.

9 Automated evaluation and time synchronisation of measuring systems

All measuring systems that are installed and operated on the smart bridge store real-time time channels that are synchronized via NTP. This makes it possible to exchange and further process the measured data between all measuring systems.

In order to be able to evaluate the measurement results on site and at the same time as their acquisition, an automated evaluation has been implemented and has been in operation since February 2019. It provides daily results of the relevant parameters, which serve to monitor the sensor as well as to monitor the bearing function and service life as well as to monitor the structure.

10 Summary

The smart spherical bearings became an effective component of a “smart bridge” through measurement data analysis, development of suitable algorithms and implementation of an automated evaluation. They continuously provide relevant information on self-monitoring, structural monitoring and action effect detection. Thus, the results can be integrated into prediction models and structural models, thus creating a basis for a reliability-oriented and preventive bridge maintenance management.

1 Inhalt

Abkürzungen	15	4.6	Korrelation der quasi-stat. Lagerverdrehung mit der Temperatur	32
1 Allgemeines	17	4.7	Gleitspalte der primären und sekundären Gleitflächen.....	34
2 Intelligente Kalotten-Gleitlager in Position 40/1 und 40/3	17	4.8	Statistische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten.....	36
2.1 Allgemeines	17	4.9	Analyse und Bewertung des Lagerverdrehung und des akkumulierten Gleitwegs	36
2.2 Position der Sensoren	17	4.10	Genauigkeit der Ergebnisse.....	37
2.2.1 Kalotten-Gleitlager in Pos. 40/1	17			
2.2.2 Kalotten-Gleitlager in Pos. 40/3	17			
2.3 Datenerfassung	19	5 Vertikale Lagereinwirkung		37
3 Lagerverschiebung in der ebenen Gleitfläche	19	5.1	Analyse der Messdaten.....	37
3.1 Analyse der Messdaten.....	19	5.2	Verhalten und Ausfall der Drucksensoren...	37
3.2 Quasi-stationäre temperaturinduzierte Verschiebung.....	19	5.3	Quasi-stationäre Druckschwankungen und Lagereinwirkungen	38
3.3 Korrelation der quasi-stat. Lagerverschiebung mit der Temperatur	21	5.3.1	Druck.....	38
3.4 Verkehrsinduzierte, fluktuierende Verschiebung	23	5.3.2	Lagerkraft.....	39
3.5 Statistische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten.....	26	5.4	Einfluss von Lagerverdrehung und Lagerverschiebung auf die Lagerdrücke	40
3.6 Analyse und Bewertung der Lagerverschiebung und des akkumulierten Gleitwegs	26	5.5	Korrelation der quasi-stat. Lagereinwirkung mit der Temperatur	40
3.7 Genauigkeit der Ergebnisse.....	27	5.6	Verkehrsinduzierte Lagerkraft	48
3.7.1 Genauigkeit der quasi-stationäre Lagerverschiebung	27	5.6.1	Kalibrierfunktionen zur Bestimmung der verkehrsinduzierten Lagerkraft	48
3.7.2 Genauigkeit der fluktuierenden ebenen Lagerverschiebung	28	5.6.2	Ermittlung der Verkehrslast	49
		5.6.3	Ergebnisse.....	49
		5.7	Statische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten.....	50
		5.7.1	Statistische Auswertung des quasi-stationärem Verhalten der Lagerreaktionen	50
		5.7.2	Statistische Auswertung der verkehrsinduzierten Anteile der Lagerreaktionen.....	50
4 Lagerverdrehung und -verschiebung in der sphärischen Gleitfläche	29	5.8	Analyse und Bewertung der Lagerreaktionen.....	50
4.1 Analyse der Messdaten.....	29	5.9	Genauigkeit der Ergebnisse.....	51
4.2 Quasi-stationäre Lagerverdrehung	30	6 Brückeneigenfrequenz		52
4.3 Quasi-stationäre sphärische Gleitwege	31	6.1	Allgemeines	52
4.4 Fluktuierende sphärische Lagerverdrehung und Gleitwege.....	31			
4.5 Gleitgeschwindigkeit.....	31			

6.2	Peak-picking Methode.....	52	9.2.2	Fahrzeuge und Beladung.....	69
6.3	SSI-Cov Methode.....	52	9.2.3	Instrumentierung des Lagers 40/3.....	71
7	Datenaustausch und -vergleich mit RTMS.....	54	9.3	Verkehrslasterfassung.....	71
7.1	Allgemeines.....	54	9.4	Vereinfachte Kalibrierprozedur.....	74
7.2	Synchronisierte Datenerfassung von RTMS und Maurer.....	54	9.5	Vorschlag für die Qualitätssicherung.....	75
7.2.1	Zeitkanal in Relativzeit.....	54	10	Automatisierte Auswertung.....	75
7.2.2	Zeitkanal in Echtzeit.....	56	10.1	Verwendete Systeme.....	75
7.3	Verschiebung und Verdrehung am Lager 40/1 und 40/3.....	56	10.1.1	NI Diadem®.....	75
7.3.1	Beschreibung der Sensoren.....	56	10.1.2	Python / NumPy.....	75
7.3.2	Verschiebung der ebenen Gleitfläche.....	56	10.2	Auswerteprozeduren.....	76
7.3.3	Verdrehung der Lager.....	58	10.2.1	Steuermodul „Main“.....	76
8	Auswertung der verkehrsinduzierten Anteile anhand Simulation.....	59	10.2.2	Eingabemodul „Read7-Zip“.....	76
8.1	Allgemeines.....	59	10.2.3	Verarbeitungsmodul „Lagerauswertung“.....	76
8.2	Modellierung der Brücke.....	59	10.2.4	Ausgabemodule „Ergebnisdatenablage“.....	77
8.2.1	Geometrie.....	59	10.3	Implementierung und Erprobung.....	81
8.2.2	Material.....	59	11	Zusammenfassung und Ausblick.....	81
8.2.3	Vernetzung.....	60	Literatur.....	82	
8.2.4	Randbedingungen.....	60	Bilder.....	83	
8.3	Validierung.....	62	Tabellen.....	86	
8.3.1	Modalanalyse.....	62	Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen		
8.3.2	Statische Analyse.....	63	BASSt-Archiv ELBA unter:		
8.4	Ergebnisse.....	63	https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.		
8.4.1	Einfluss dynamischer Effekte.....	63			
8.4.2	Drehsteifigkeit.....	64			
8.4.3	Einflusslinien.....	64			
8.4.4	Laststellung in Längsrichtung.....	64			
8.4.5	Laststellung in Querrichtung.....	67			
8.5	Zusammenfassung.....	68			
9	Qualitätssicherung der Messwerte.....	68			
9.1	Allgemeines.....	68			
9.2	Referenzfahrten.....	68			
9.2.1	Allgemeines.....	68			

Anhang A	Zeichnungen und Lagerstatik	A.1
A.1	Lagerstatik	A.1
A.2	Lagerpläne	A.7
A.3	Zustimmung im Einzelfall	A.8
Anhang B	Kalibrierfahrten vom September 2016	B.1
B.1	Allgemeines	B.1
B.2	Überfahrten des Lkws mit 3 Achsen	B.4
B.3	Überfahrten des Lkws mit 5 Achsen	B.7
B.4	Parallele Überfahrten beider Lkws	B.10
Anhang C	Quasi-stationäre Lagereinwirkungen	C.1
C.1	Verschiebung und akkumulierter Gleitweg der ebenen Gleitfläche	C.1
C.2	Verdrehung und akkumulierter Gleitweg der sphärischen Gleitfläche	C.5
C.3	Druck im Lager 40/1	C.9
C.4	Druck im Lager 40/3	C.13
C.5	Zentrischer Abstand zur oberen Lagerplatte „LO-Abstand“	C.17
Anhang D	Fluktuierende Lagereinwirkungen	D.1
D.1	Eigenfrequenzen	D.1
D.2	Akkumulierten Gleitwege der ebenen und sphärischen Gleitflächen	D.5
D.3	Verkehrseinwirkungen	D.17
Anhang E	Automatisierte Auswertung	E.1
E.1	Modul „Main.py“	E.1
E.2	Modul „bearing.py“	E.3
E.3	Modul „eval_joint_data.py“	E.16
E.4	Modul „Main_movefiles.py“	E.19
E.5	Modul „maurer_resultfiles.py“	E.21
E.6	Modul „maurer_utils.py“	E.24
E.7	Modul „py7zlib.py“	E.30
E.8	Modul „readDailyBinary.py“	E.49
E.9	Modul „Readfrom7z.py“	E.50
Anhang F	Sensorkenngrößen	F.1
F.1	MAURER Drucksensoren DS 40/1-1, DS 40/1-2, DS 40/1-3. DS 40/3-1, DS 40/3-2, DS 40/3-3	F.1
F.2	MAURER Abstandssensoren AS 40/3-1 und AS 40/3-2	F.1
F.3	MAURER Wegsensor WA 40/3	F.1

Abkürzungen

BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	$s_{x, 40/3, traffic}$	Akkumulierter Gleitweg infolge fluktuierender, verkehrsinduzierter Lagerverschiebungen am Lager 40/3
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur		
IBF	Ingenieurbüro Prof. Dr. Ursula Freundt	$\alpha_{40/3}$	Lagerverdrehung um die y-Achse am Lager 40/3
KGA	Allseits bewegliches Kalottengleitlager	$\alpha_{40/3, qs}$	Quasi-stationäre Lagerverdrehung um die y-Achse am Lager 40/3
MMS	Maurer Monitoring System	$\alpha_{40/3, traffic}$	Berechnete fluktuierende Lagerverdrehung infolge Verkehr um die y-Achse am Lager 40/3
RTMS	Road Traffic Management System		
UzL	Universität zu Lübeck	$u_{\alpha, 40/3}$	Verschiebung in der sphärischen Gleitfläche am Lager 40/3
AS 40/3-1, AS 40/3-2	Abstandssensoren am Lager 40/3	$u_{\alpha, 40/3, qs}$	Verschiebung in der sphärischen Gleitfläche infolge quasi-stationärer Verdrehungen am Lager 40/3
DS 40/1-1, DS 40/1-2, DS 40/1-3	Drucksensoren am Lager 40/1	$u_{\alpha, 40/3, traffic}$	Verschiebung in der sphärischen Gleitfläche infolge fluktuierender Verdrehungen am Lager 40/3
DS 40/3-1, DS 40/3-2, DS 40/3-3	Drucksensoren am Lager 40/3	$s_{\alpha 40/3, qs}$	Akkumulierter Gleitweg infolge quasi-stationärer Lagerverschiebungen in der sphärischen Gleitfläche am Lager 40/3
WA 40/3	Wegaufnehmer am Lager 40/3		
$F_{40/1}$, $F_{40/3}$	Vertikale Lagerkraft von Lager 40/1 bzw. 40/3	$s_{\alpha 40/3, traffic}$	Akkumulierter Gleitweg infolge fluktuierender, verkehrsinduzierter Lagerverschiebungen in der sphärischen Gleitfläche am Lager 40/3
$d_{40/3-1}$, $d_{40/3-2}$	Abstand zwischen Lagerunterteil und -oberteil am Lager 40/3	$p_{40/1-1}$, $p_{40/1-2}$, $p_{40/1-3}$	Quasi-stationärer Druck an Sensor DS 40/1-1, DS 40/1-2 oder DS 40/1-3
$u_{x, 40/3}$	Relative Verschiebung zwischen Lageroberteil und -unterteil in Brückenlängsrichtung am Lager 40/3	$\Delta p_{40/1-1}$, $\Delta p_{40/1-2}$, $\Delta p_{40/1-3}$	Fluktuierender Druck an Sensor DS 40/1-1, DS 40/1-2 oder DS 40/1-3
$u_{x, 40/3, qs}$	Quasi-stationäre relative Verschiebung zwischen Lageroberteil und -unterteil in Brückenlängsrichtung am Lager 40/3	$p_{40/3-1}$, $p_{40/3-2}$, $p_{40/3-3}$	Quasi-stationärer Druck an Sensor DS 40/3-1, DS 40/3-2 oder DS 40/3-3
$u_{x, 40/3, traffic}$	Durch Verkehr verursachte relative Verschiebung zwischen Lageroberteil und -unterteil in Brückenlängsrichtung am Lager 40/3	$\Delta p_{40/3-1}$, $\Delta p_{40/3-2}$, $\Delta p_{40/3-3}$	Fluktuierender Druck an Sensor DS 40/3-1, DS 40/3-2 oder DS 40/3-3
$s_{x, 40/3, qs}$	Akkumulierter Gleitweg infolge quasi-stationärer Lagerverschiebungen am Lager 40/3	T	Temperatur
		ΔT	Temperaturdifferenz

t, t_1	Zeit
r_{Kal}	Radius der Kalotte
h_{Kal}	Höhe des Kalottensegments
t_{Spalt}	Höhe des Gleitspalts in der ebenen Gleitfläche
h_{Platte}	Höhe der ebenen Gleitplatte
l	Brückenlänge
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen

1 Allgemeines

Im Digitalen Testfeld Autobahn ist das BW402e, ein zweispuriges Überführungsbauwerk am Kreuz Nürnberg, mit Sensoren und mit instrumentierten Bauteilen ausgestattet, um als Pilotprojekt einer Teilrealisierung der intelligenten Brücke Zusatzinformationen über den Zustand und die Belastung der Brücke zu liefern. U. a. wurden zwei instrumentierte Kalotten-Gleitlager in der Achse 40 eingebaut (siehe Bild 1).

In diesem Projekt wird die Eignung der instrumentierten Kalottenlager zur Erfassung der Einwirkungen aus Eigengewicht, Verkehr und Temperatur sowie Funktionen zur Selbstüberwachung ermittelt und eine automatisierte Auswertung der Messdaten entwickelt. Die instrumentierten Kalottenlager sind Teil des Maurer Monitoring System (kurz mmS), welches an diesem Bauwerk neben den Lagern aus einem instrumentierten Fahrbahnübergang sowie der dazugehörigen Hardware zur Datenerfassung und -auswertung besteht. Die Entwicklungen „instrumentiertes Kalottenlager und Fahrbahnübergang“ sind im Rahmen des Forschungsclusters „Straße im 21. Jahrhundert“ der Bundesanstalt für Straßenwesen durch Forschungsmittel des BMVI gefördert worden [9].

2 Intelligente Kalotten-Gleitlager in Position 40/1 und 40/3

2.1 Allgemeines

In der Brückenachse 40 sind 2 Lager vom Typ KGA 18436 kN mit integrierter Messtechnik eingebaut. In Tabelle 1 sind die eingebauten Sensoren und deren

Anzahl pro Lager aufgelistet. Weitere Sensoren wurden am Lager 40/1 vom Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt angebracht.

2.2 Position der Sensoren

Im Folgenden werden die nachstehenden Abkürzungen verwendet:

DS = Drucksensor

WA = Wegaufnehmer

AS = Abstandssensoren

2.2.1 Kalotten-Gleitlager in Pos. 40/1

Die 3 Drucksensoren des Lagers 40/1 sind im Lagerunterteil integriert (siehe Bild 2). Bild 3 zeigt das im Bauwerk eingebaute Lager.

2.2.2 Kalotten-Gleitlager in Pos. 40/3

Im Lager 40/3 sind ebenfalls drei Drucksensoren im Lagerunterteil integriert sowie am Lagerunterteil zwei Abstandssensoren und ein Wegaufnehmer (siehe Bild 4). Bild 5 zeigt das im Bauwerk eingebaute Lager.

Sensor	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 pro Lager

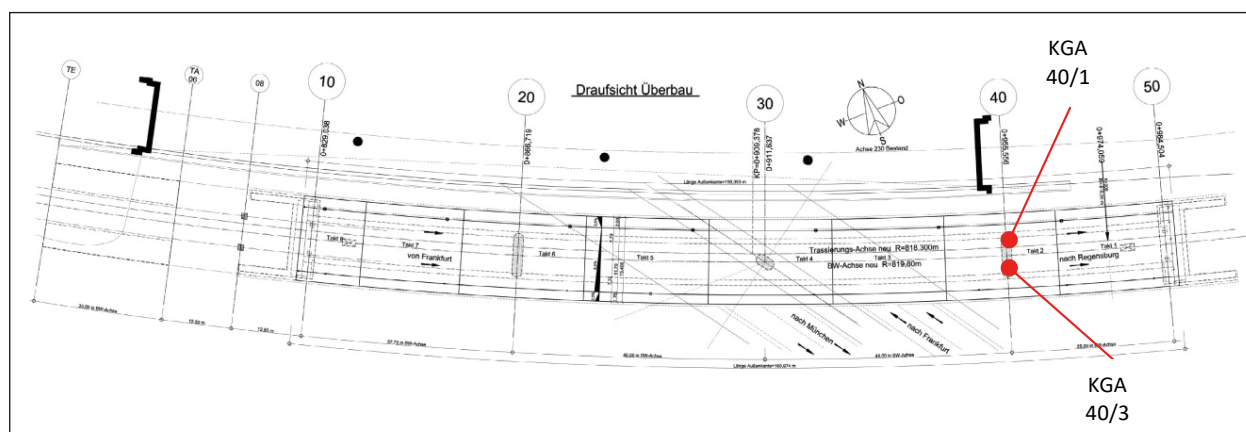


Bild 1: Einbauorte der instrumentierten Lager im BW402e

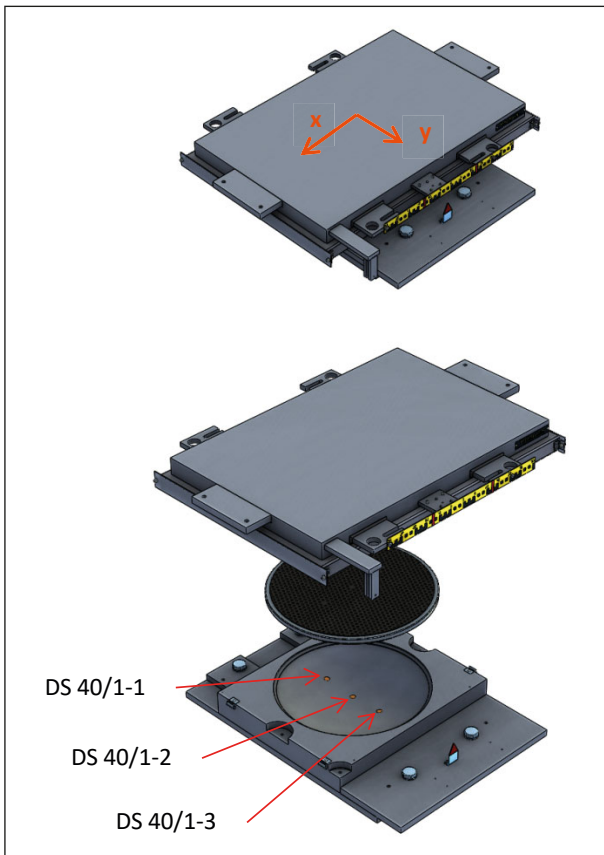


Bild 2: Koordinatensystem und Position der Drucksensoren in KGA 40/1

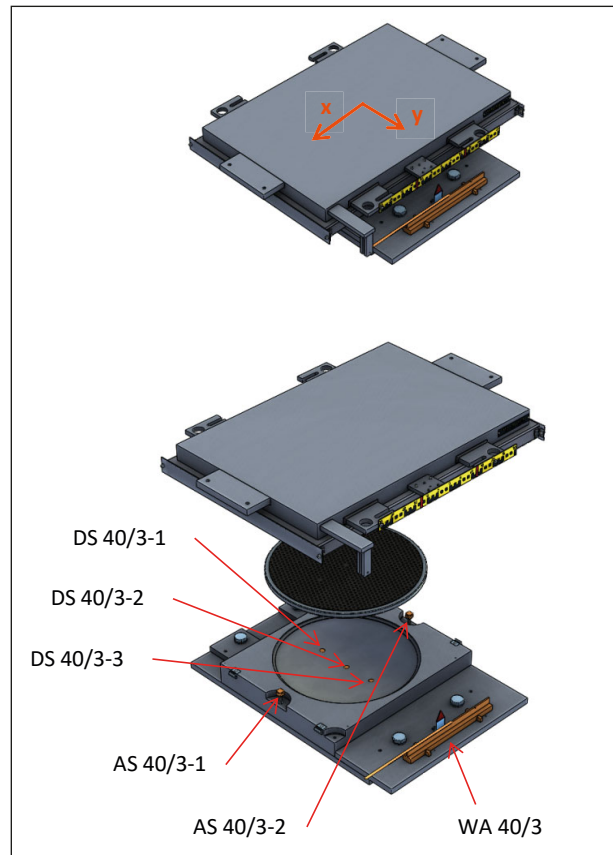


Bild 4: Koordinatensystem und Position der Druck-, Abstands- und Wegsensoren im KGA 40/3



Bild 3: Eingebautes KGA 40/1 im Bauwerk



Bild 5: Eingebautes KGA 40/3 im Bauwerk

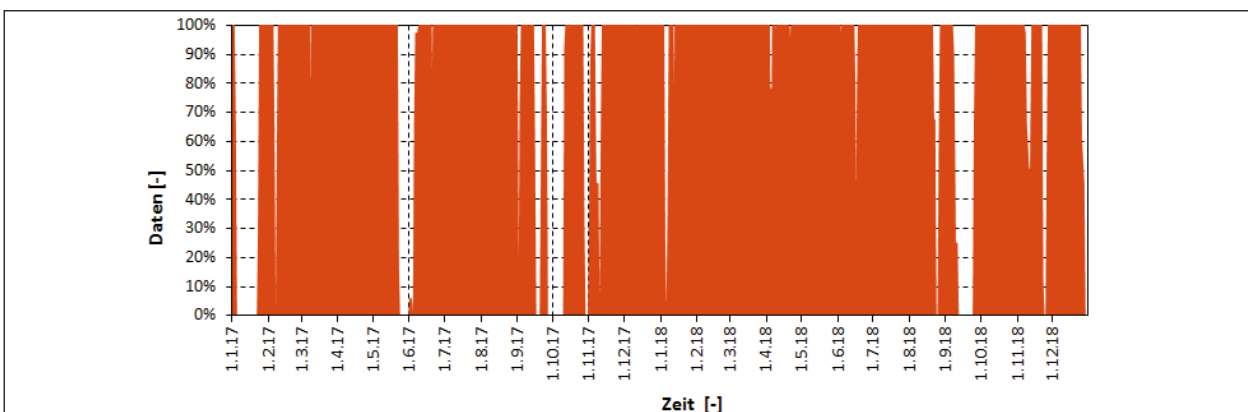


Bild 6: Erfasste Messdaten zwischen Januar 2017 und Dezember 2018

2.3 Datenerfassung

Die Signale der in den Lagern 40/1 und 40/3 integrierten Sensoren werden mit einer Abtastrate von 50 Hz erfasst. Alle 10 Minuten wird eine Datei mit Messdaten erstellt. Durch den Speichervorgang und das Nullstellen der ebenfalls mit erfassten Kraftsensoren an der Übergangskonstruktion werden ca. 10 sec zwischen zwei Messungen nicht erfasst.

Die Daten werden mit der Software Catman AP von Hottinger Baldwin Messtechnik erfasst, im HBM bin-Format gespeichert. Mit der Software Diadem von National Instruments werden Daten zwischen Januar 2017 und Dezember 2018 bearbeitet. Bild 6 zeigt die Zeiträume, in denen das System ordnungsgemäß Daten aufgezeichnet hat. Ursachen für die Ausfälle sind dem 2. Zwischenbericht des Auftrags FE 15.0615 [3] zu entnehmen.

Im Zeitraum vom 01.01.2017 bis 31.12.2018 wurde eine Datenerfassung von 82 % erreicht.

3 Lagerverschiebung in der ebenen Gleitfläche

3.1 Analyse der Messdaten

Die horizontale Lagerverschiebung zwischen Lageroberteil und Lagerunterteil wird mit dem Wegsensor WA 40/3 (siehe Kapitel 2.2.2) erfasst, der auf dem Lagerunterteil befestigt ist. Der Positionsgeber wird mit einer Stange, die gelenkig mit dem Lageroberteil verbunden ist, in Abhängigkeit der Relativverschiebung zwischen Lageroberteil und -unterteil verschoben.

Anhand des geglätteten Meßsignals der Lagerverschiebung (gleitende Mittelwertbildung mit $\Delta t = 1$ s), wird erkennbar, dass es mit der Verkehrsbelastung und der Lagerverdrehung eine korrelierte Änderung der Lagerverschiebung gibt (siehe Bild 7 bis Bild 9).

In Bild 7 ist erkennbar, dass die Größenordnung der verkehrsinduzierten Signaländerungen ca. 2/100 mm beträgt, welches von dem Sensor mit Messbereich 250 mm gemessen wird. Bezogen auf den Messbereich ist die Größenordnung von 2/100 mm zu gering, um ausreichend genau von diesem Sensor erfasst zu werden. Die Verschiebung der horizontalen Gleitebene wird anhand der Signale der Abstandssensoren und der kinemati-

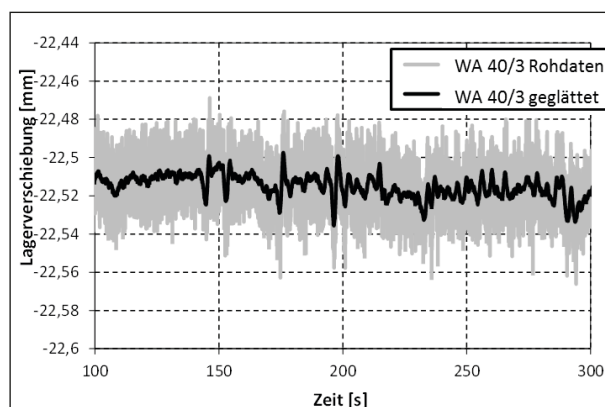


Bild 7: Horizontale Lagerverschiebung $u_{x,40/3}$ in Brückenlängsrichtung

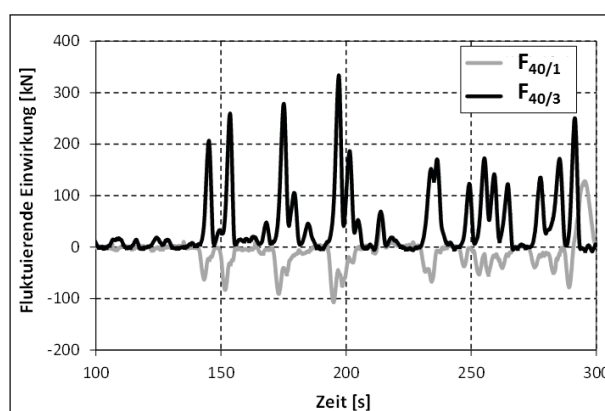


Bild 8: Fluktuierende Auflagerkräfte in Achse 40

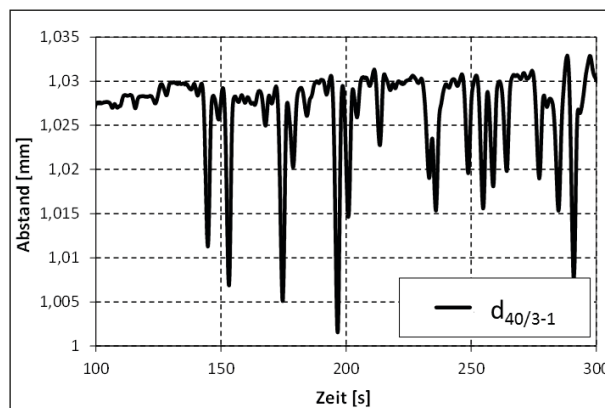


Bild 9: Abstandsmessung am Lager 40/3 Richtung Achse 50

schen Bewegungsmöglichkeiten des Kalottenlagers und des Brückenoberbaus ermittelt (siehe Kapitel 3.4).

3.2 Quasi-stationäre temperaturinduzierte Verschiebung

Die temperaturinduzierte, quasi-stationäre Verschiebung der ebenen Gleitfläche zwischen Lageroberteil und -unterteil wird anhand der 10-minütigen Mittelwerte $u_{x,40/3,qs}$ ermittelt. Als Maß für die Bean-

spruchung des Gleitmaterials wird der akkumulierte quasi-stationäre Gleitweg $s_{x,40/3,qs}$ der ebenen Gleitfläche ermittelt (siehe Bild 10).

$$s_{x,40/3,qs}(t_i) = s_{x,40/3,qs}(t_{i-1}) + |u_{x,40/3,qs}(t_i) - u_{x,40/3,qs}(t_{i-1})|$$

wobei

$u_{x,40/3,qs}$ 10-minütiger Mittelwert der Lagerverschiebung

$s_{x,40/3,qs}$ akkumulierter Gleitweg infolge quasi-stationärer Lagerverschiebungen

t_{i-1}, t_i Zeit

Bild 10 zeigt exemplarisch die quasi-stationäre Lagerverschiebung und den dazugehörigen akkumulierten Gleitweg während eines Tages. Bild 11 zeigt den Verlauf der Lagerverschiebung im Zeitraum von Januar 2017 bis Dezember 2018.

In Bild 11 erkennt man deutlich den jahreszeitlichen Einfluss, d. h. im Sommer dehnt sich die Brücke aus, im Winter zieht sie sich zusammen. Im Bezugszeitraum 2017/2018 betragen die Extremwerte des gemittelten Verschiebewegs $u_{x,40/3,qs,Mean}$

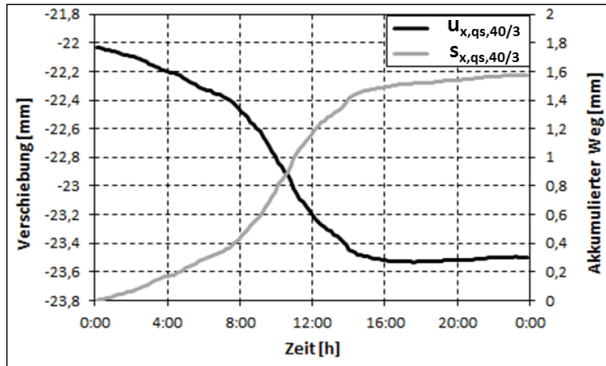


Bild 10: Horizontale Lagerverschiebung und akkumulierter Gleitweg für einen Tag

41,5 mm zwischen dem Minimum von -45,5 mm und dem Maximum von -4,00 mm. Der anhand der gemessenen Werte akkumulierte Gleitweg beträgt 1230,0 mm. Zu beachten ist, dass in diesem Zeitraum 18 % der Zeit keine Daten aufgezeichnet wurden. Der durchschnittliche akkumulierte Gleitweg pro 10-minütiger Datensatz beträgt 0,01443 mm und der damit berechnete akkumulierte Gleitweg für den Untersuchungszeitraum von 2 Jahren beträgt 1516,7 mm. Wird die rechnerische Entwurfslebensdauer der Brücke von 100 Jahren betrachtet, ergibt sich ein berechneter akkumulierter quasi-stationärer Gleitweg von 75,83 m.

Zur Identifizierung von nicht reversiblen Schwind- und Kriecheffekten, die eine langsame lineare Lagerverschiebung hervorrufen, wird eine lineare Trendlinie an der mittleren quasi-statischen Verschiebung $u_{x,40/3,qs,Mean}$ gebildet (siehe Bild 12). Die Trendlinie suggeriert eine nicht reversible Verschiebung von 5 mm pro Jahr, die durch Kriechen und Schwinden hervorgerufen sein könnte. Anzumerken ist, dass anhand des kurzen Zeitraums kein quantitativer Wert der Längenveränderung infolge Schwinden und Kriechen ermittelt werden kann. Der Trend kann auch durch unterschiedliche Wetterverhältnisse hervorgerufen werden.

Wird die Lagerverschiebung anhand der Temperaturkorrelation (siehe Bild 17) für Sensor 60 bereinigt, so ergibt sich die permanente Lagerverschiebung (siehe Bild 13). Es lässt sich eine lineare Veränderung zwischen Juni 2017 und September 2017 erkennen, ab November 2017 ist dieser nicht mehr erkennbar. Da die Lager Ende Januar 2016 ausgeliefert und eingebaut wurden, könnten die Schwind- und Kriechvorgänge bis Ende 2017 zum Stillstand gekommen sein. Aufgrund des Installationszeit-

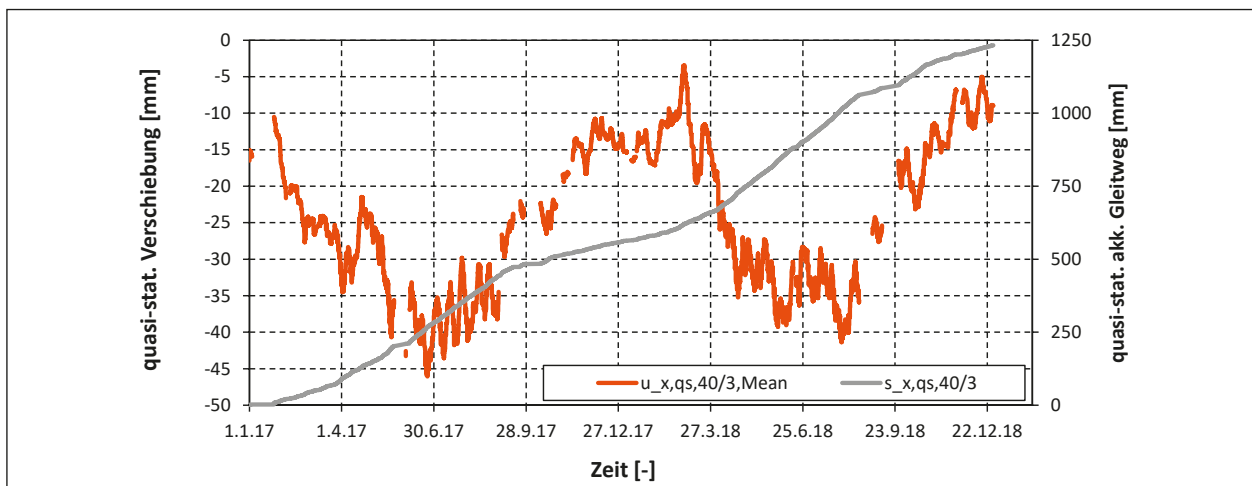


Bild 11: Quasi-stationäre horizontale Lagerverschiebung und akk. Gleitweg von Januar 2017 bis Dezember 2018

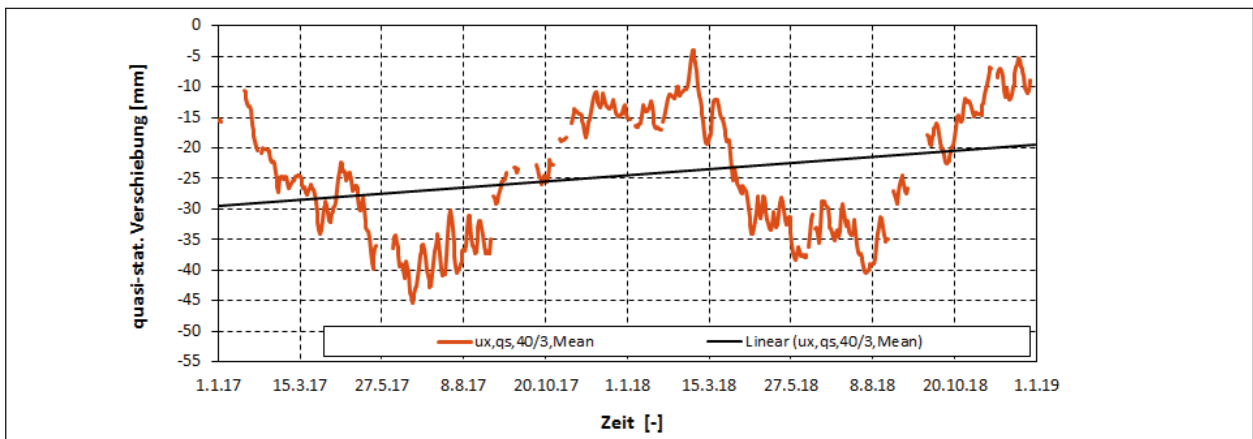


Bild 12: Horizontale Lagerverschiebung von Januar 2017 bis Dezember 2018 und linearer Trend zur Identifizierung von Schwinden

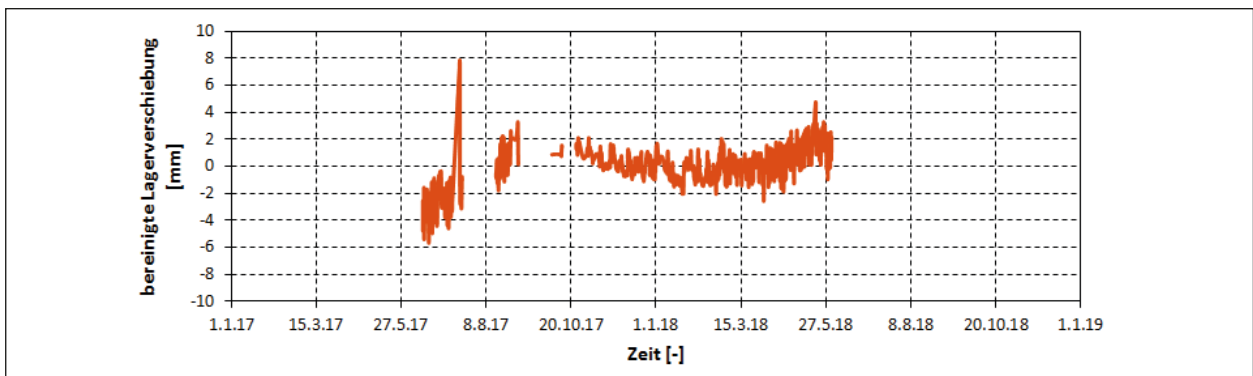


Bild 13: Um temperaturbedingte Verschiebungen bereinigte Lagerverschiebung

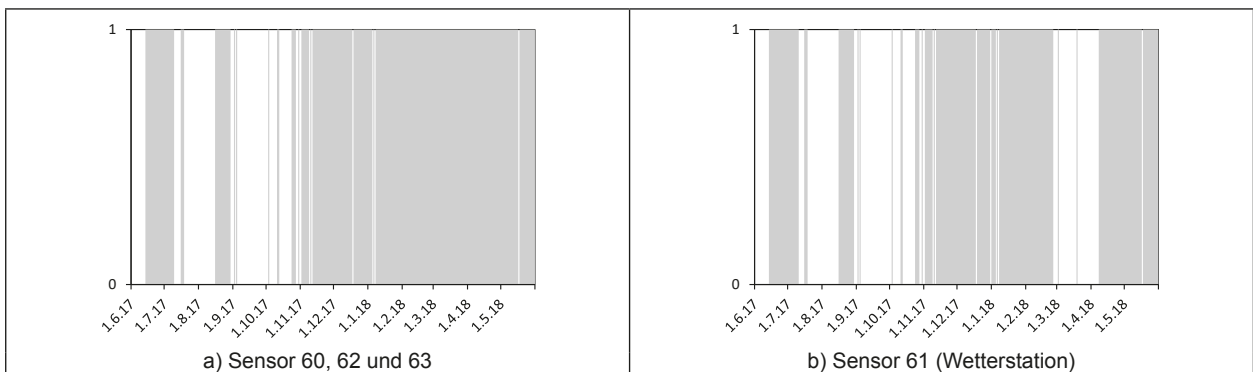


Bild 14: Zeiträume der gemessenen Klimadaten von UzL vom 14.6.2017 bis 31.5.2018

punkt der Temperatursensoren im Juni 2016 kann die bereinigte Lagerverschiebung nicht zu früheren Zeitpunkten ermittelt werden.

Die monatlichen quasi-stationären Lagerverschiebungen und die zugehörigen akkumulierten Gleitwege sind in Anhang C in Diagrammen dargestellt.

3.3 Korrelation der quasi-stat. Lagerverschiebung mit der Temperatur

Die Universität zu Lübeck, Institut für Telematik (kurz UzL) stellte für die in Bild 14 dargestellten

Zeiträume Messdaten von Bauwerkstemperaturen und Lufttemperaturen zur Verfügung. Diese Zeiträume werden verwendet, da zum einen die Aufzeichnung der Temperatur erst im Juni 2017 begonnen hat und zum anderen der Zeitraum von einem Jahr als ausreichend für die Ermittlung einer Korrelation angesehen wird. Sensor 60 und 62 sind Thermoelemente innerhalb der Brücke, Sensor 61 ist die Wetterstation auf der Brücke und Sensor 63 ermittelt die Sonnentemperatur am Brückenbauwerk. Lage der Sensoren kann Kapitel 2.4.1.1 des 2. Zwischenberichts des Auftrags FE 15.0615 [3] entnommen werden.

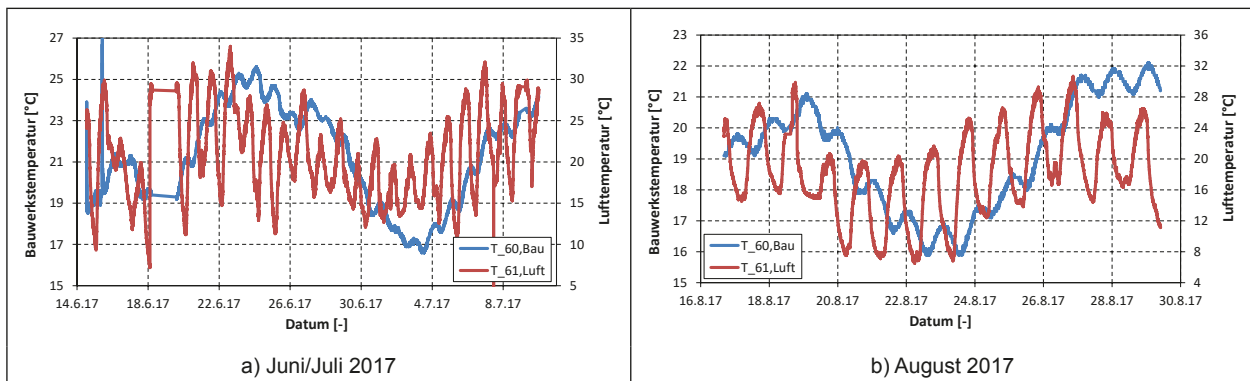


Bild 15: Oberflächentemperatur der Brücke gemessen mit Sensor 60 und Lufttemperatur an der Wetterstation gemessen mit Sensor 61

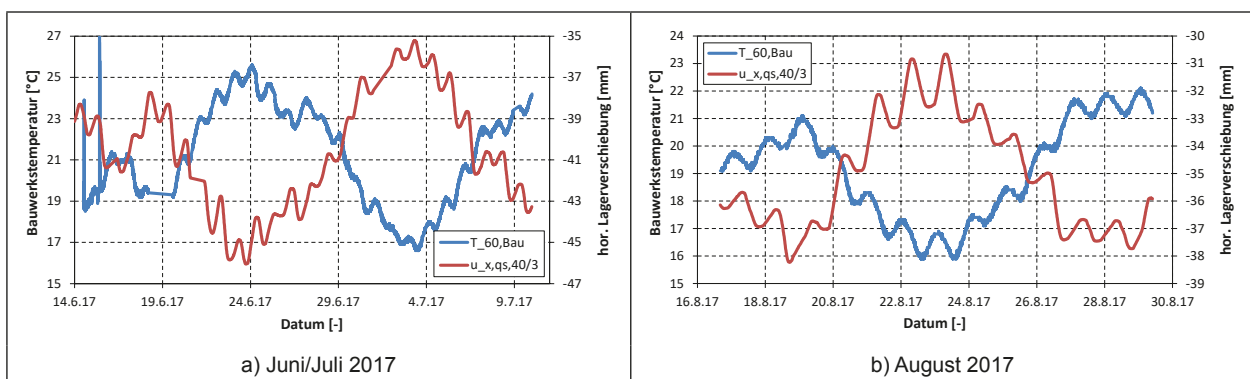


Bild 16: Oberflächentemperatur der Brücke gemessen mit Sensor 60 und horizontale Verschiebung am Lager 40/3

Für die Zeiträume Juni/Juli und August 2017 wird eine Analyse des Korrelationsverhaltens durchgeführt. Bild 15 zeigt, dass die Änderungen der Lufttemperatur vom Tagesgang mit ΔT von ca. 12 K dominiert werden. Bei der Bauwerkstemperatur ist zwar der Tagesgang mit ΔT von ca. 2 K erkennbar, allerdings ist die Temperaturschwankung aufgrund der Großwetterlage mit ΔT von ca. 4 bis 5 K deutlicher erkennbar als in der Lufttemperatur. Das Tagesmaximum und -minimum der Oberflächenbauwerkstemperatur läuft i. d. R. um ca. 4–6 h dem Maximum bzw. Minimum der Lufttemperatur hinterher.

Bild 16 zeigt die Oberflächentemperatur der Brücke und die horizontale Verschiebung am Lager 40/3. Es ist eine eindeutige Korrelation zu erkennen. Sowohl die Temperaturänderungen aufgrund der Großwetterlage als auch der Tagesgang bewirken eine Lagerverschiebung. Je wärmer die Brücke, desto mehr wird das Lageroberteil Richtung Widerlager geschoben (kleiner werdende Lagerverschiebung). Anhand der Maxima und Minima des Tagesgangtemperaturgangs an der Brückenoberseite und den Maxima und Minima des Tagesgangverschiebungswegs wird eine zeitliche Verschiebung von ca. 5 h ermit-

telt. Die lineare Beziehung zwischen Bauwerks-oberflächentemperatur und Lagerverschiebung wird in Bild 17 dargestellt.

Bild 17 zeigt anhand aller zur Verfügung stehenden Daten zwischen Januar 2017 und Mai 2018 die Abhängigkeit des ebenen quasi-stationären Lagerwegs von der Temperatur. Während der ebene Lagerweg stark mit der Bauwerkstemperatur korreliert ist, so sieht man bei der Lufttemperatur eine große Streubreite, welche bedingt ist, dass die Brücke sehr träge auf Temperaturveränderungen reagiert.

Aus der statischen Berechnungen der Brücke [4] lässt sich die Längenveränderung der Brücke pro $^{\circ}\text{K}$ wie folgt ermitteln.

Die Brücke ist eine Betonbrücke mit der Gesamtlänge l von 155,75 m. Der Abstand vom Festpunkt bis zu Achse 40 beträgt 126,75 m. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α_T beträgt 10^{-5} 1/K für Betonbrücken. Die Lagerverschiebung durch thermische Längenänderung der Brücke pro $^{\circ}\text{K}$ an der Achse 40 beträgt

$$\Delta u_x / \Delta T = \alpha_T \times 126,75 \times 10^3 = 1,2675 \text{ [mm/K]}$$

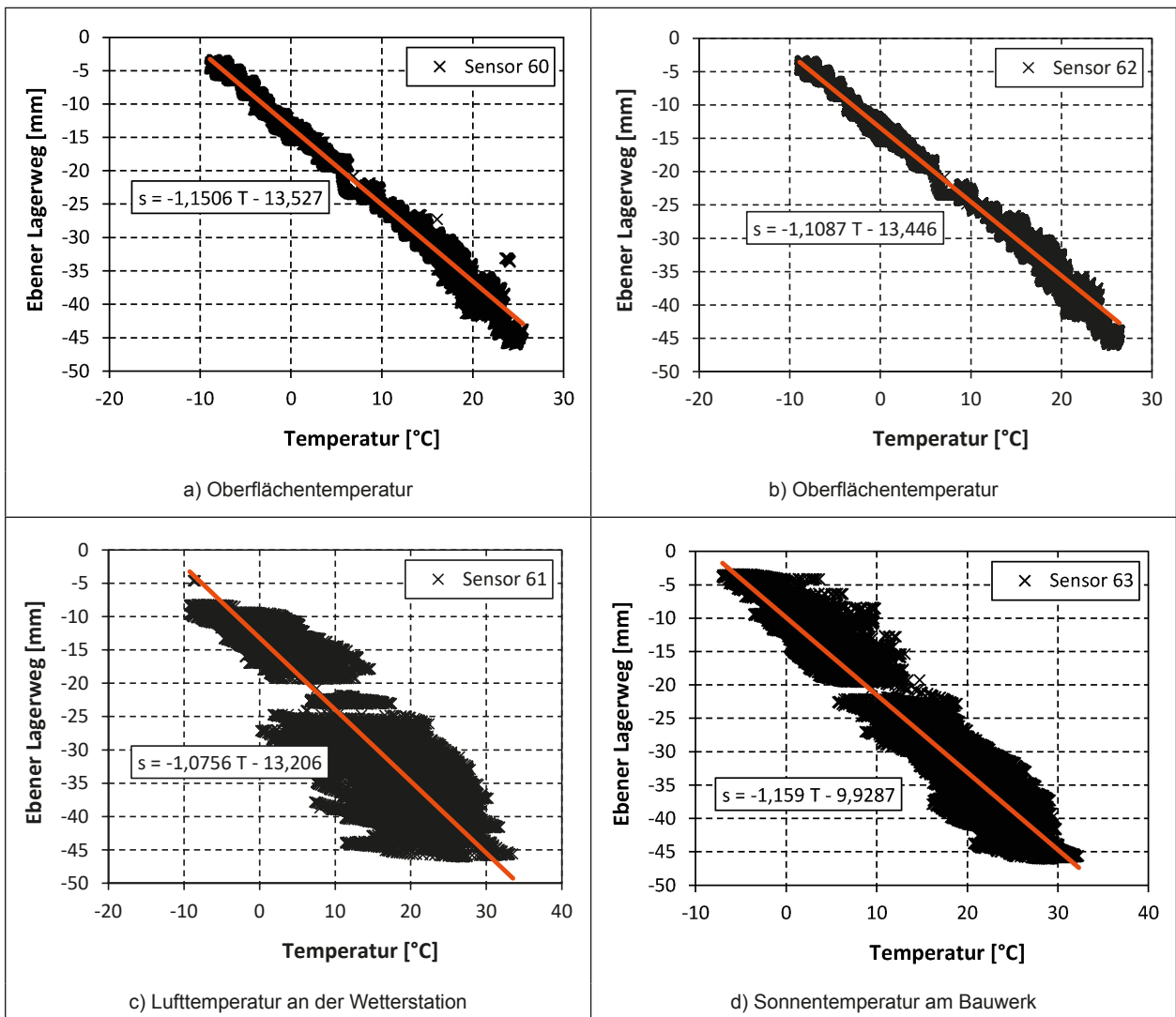


Bild 17: Oberflächentemperatur der Brücke und Lufttemperatur versus ebene Verschiebung am Lager 40/3 für den Erfassungszeitraum Januar 2017 bis Mai 2018

Bild 17 zeigt eine lineare Korrelation zwischen Längenänderung und Temperatur mit einem Faktor von 1,15 bzw. 1,10. Somit ist die tatsächliche Wärmeausdehnung ca. 85 % bis 90 % von der mit normativen Werten berechnete und es ergibt sich ein Wärmeausdehnungskoeffizient α_T für die Brücke von $0,9 \times 10^{-5}$ bzw. $0,85 \cdot 10^{-5}$ [1/K].

3.4 Verkehrsinduzierte, fluktuierende Verschiebung

Aufgrund der kinematischen Bewegungsmöglichkeit des Kalottenlagers wird bei einer durch Verkehr hervorgerufenen Lagerverdrehung eine damit einhergehende ausgleichende Lagerverschiebung hervorgerufen (siehe Bild 18). Diese Lagerverschiebung ist nicht mit dem Wegsensor WA 40/3 quantitativ zu erfassen, da eine Lagerverschiebung in der

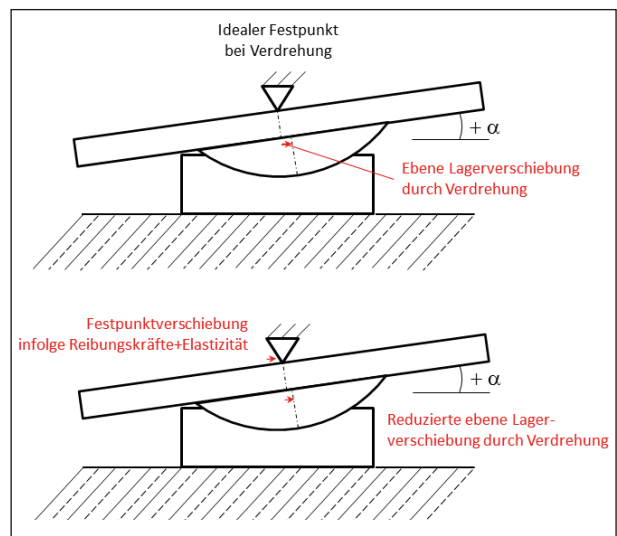


Bild 18: Verschiebung der ebenen Gleitplatte infolge Rotation der Kalotte

Größenordnung von ca. 0,02 mm durch einen überfahrenden Lkw hervorgerufen wird, die im Rauschen des Sensors nicht zu ermitteln ist (siehe Kapitel 3.7.1). Nichtsdestotrotz sind diese kleinen Verschiebungen, die jeder überfahrende Lkw hervorruft, für den akkumulierten Gleitweg relevant.

Wird das Kalottenlager idealisiert (siehe Bild 19), indem alle Werkstoffe als unendlich steif angenommen werden und Reibung in den Gleitflächen vernachlässigt wird, so lässt sich die verkehrsinduzierte Verschiebung der ebenen Gleitfläche mithilfe der fluktuierenden Rotation des Lagers wie folgt ermitteln:

$$u_{x,40/3,traffic}(t) = \alpha_{40/3,traffic}(t) \cdot \left(r_{Kal} - h_{Kal} - t_{Spalt} - \frac{h_{Platte}}{2} \right)$$

Der akkumulierte Gleitweg infolge verkehrsinduzierter Lagerverdrehungen ergibt sich wie folgt:

$$s_{x,40/3,traffic}(t_i) = s_{x,40/3,traffic}(t_{i-1}) + \left| \alpha_{40/3,traffic}(t_i) - \alpha_{40/3,traffic}(t_{i-1}) \right| \cdot \left(r_{Kal} - h_{Kal} - t_{Spalt} - \frac{h_{Platte}}{2} \right)$$

wobei

- $u_{x,40/3,traffic}$ berechnete fluktuierende Verschiebung der ebenen Gleitplatte infolge verkehrsinduzierter Lagerverdrehungen
- $\alpha_{40/3,traffic}$ berechnete fluktuierende Lagerverdrehung infolge Verkehr (vom quasi-stationären Wert bereinigt durch Subtraktion des Modalwerts $\alpha_{40/3}$ (siehe Kapitel 4.2) von der gemessenen Zeitreihe)
- $s_{x,40/3,traffic}$ akkumulierter Gleitweg infolge fluktuierender Verschiebung der ebenen Gleitplatte
- r_{Kal} Radius der Kalotte
- h_{Kal} Höhe des Kalottensegments
- t_{Spalt} Höhe des Gleitpalts in der ebenen Gleitfläche
- h_{Platte} Höhe der ebenen Gleitplatte

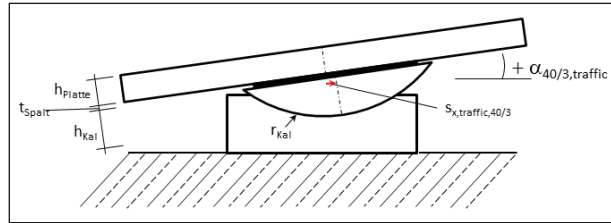


Bild 19: Bezeichnung der geometrischen Größen und der Freiheitsgrade des idealisierten Kalottenlagers

Bild 20 zeigt die ebene berechnete Lagerverschiebung sowie den dazugehörigen akkumulierten Gleitweg.

Die Vernachlässigung der Elastizität und der Reibung des Gleitwerkstoffs führt zu einer konservativen Verschiebung der ebenen Gleitfläche, da

- die Lagerverdrehung mit den gemessenen Abständen zwischen Lagerunterteil und Lageroberteil an 2 Stellen berechnet wird. Geringe Abstandsänderungen können durch die Elastizität des Gleitmaterials aufgenommen werden, ohne dass die Kalotte sich verdreht.
- der Verdrehung der Kalotte in der konkaven Gleitfläche und der Verschiebung in der ebenen Gleitfläche Reibkräfte entgegen wirken. Bevor die Kalotte sich verdreht, muss die Haftreibung überwunden werden. Das gleiche gilt für die ebene Gleitfläche. Die Haftreibung trägt dazu bei, dass zunächst die Elastizität des Gleitmaterials ausgenutzt wird, bevor die Kalotte sich verdreht.

Während der Referenzfahrten im April 2018 wurde ein zusätzlicher Wegsensor mit einem sehr geringen Messbereich zwischen oberer und unterer Lagerplatte installiert, um die relativen Lagerverschiebungen infolge Verkehrsüberfahrten zu erfassen (siehe Kapitel 9.2.3).

Bild 21 zeigt die gemessene relative Verschiebung zwischen Lageroberteil und -unterteil. Zu erkennen ist, dass die Verschiebung nach jeder Überfahrt nicht zum Ausgangspunkt zurückkehrt, sondern eine Restverschiebung übrig bleibt. Diese Restverschiebung ist durch die Haftreibung verursacht.

Die relative Verschiebung reduziert die berechnete Verschiebung. Eine Auswertung der Maxima bzw. Minima der gemessenen relativen Verschiebung mit den Maxima bzw. Minima der anhand der gemessenen Lagerverdrehung berechneten Verschiebung zeigt eine Geschwindigkeitsabhängigkeit (siehe Bild 22 (a)). Aufgrund der Regelgeschwindigkeit am Standort kann die berechnete Lagerverschie-

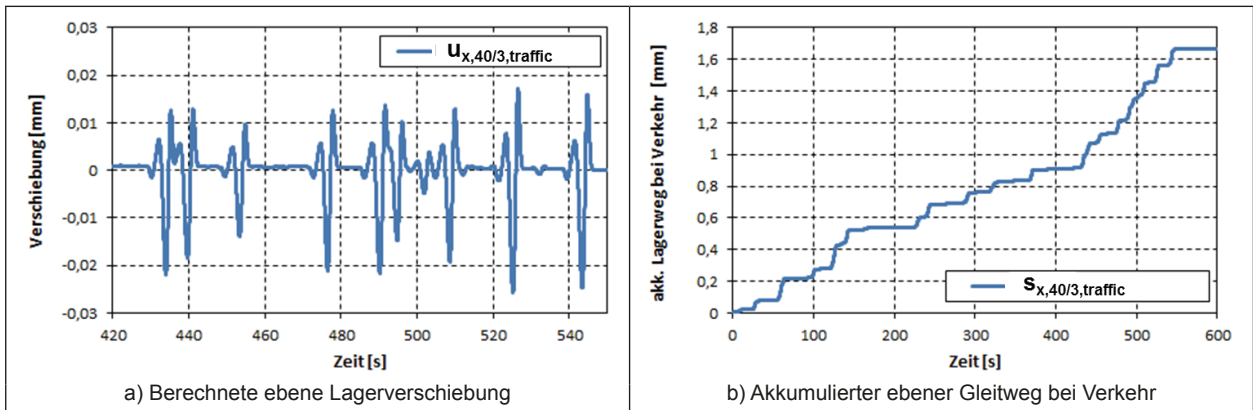


Bild 20: Ebene berechnete Lagerverschiebung infolge Verkehr am idealisierten Kalottenlager

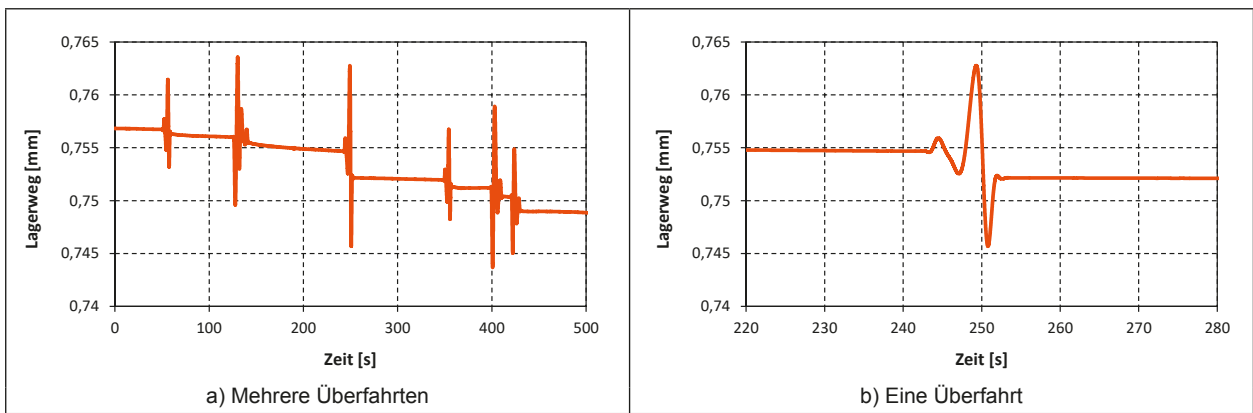


Bild 21: Ebene gemessene relative Lagerverschiebung infolge Verkehr

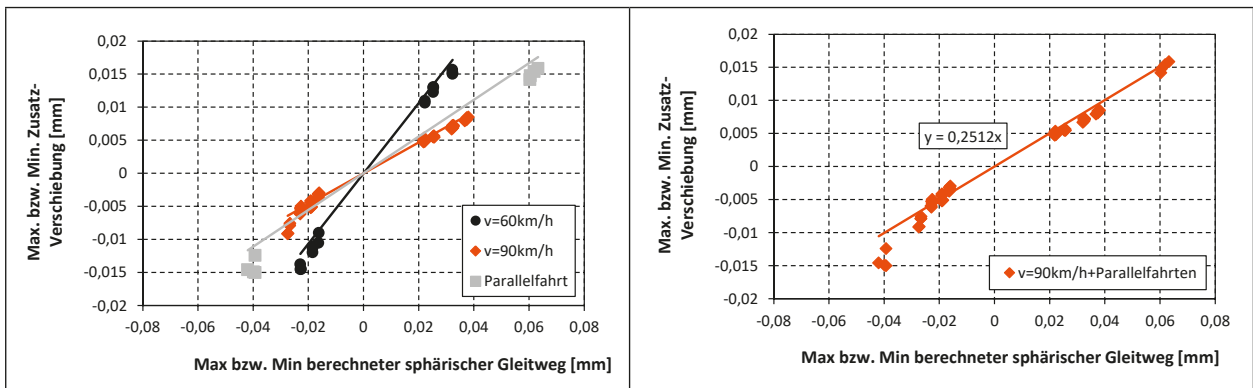


Bild 22: Ebene gemessene relative Lagerverschiebung infolge Verkehr

bung infolge Verkehr aufgrund von Reibungs- und Elastizitätseffekten um 25 % reduziert werden (siehe Bild 22 (b)).

Bild 23 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-minütiger Datensatz ermittelt. Anhand dieses Werts und des durchschnittlich ermit-

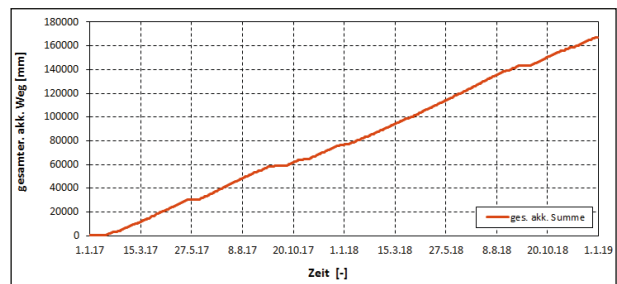


Bild 23: Summe der ebenen relative Lagerverschiebung infolge fluktuierender und quasi-stationärer Lagerverschiebungen für den Zeitraum von 1.1.2017 bis 31.12.2018

telten quasi-stationären Gleitweg ergibt sich ein gesamt. Gleitweg von 203189,2 mm über den 2-Jah-

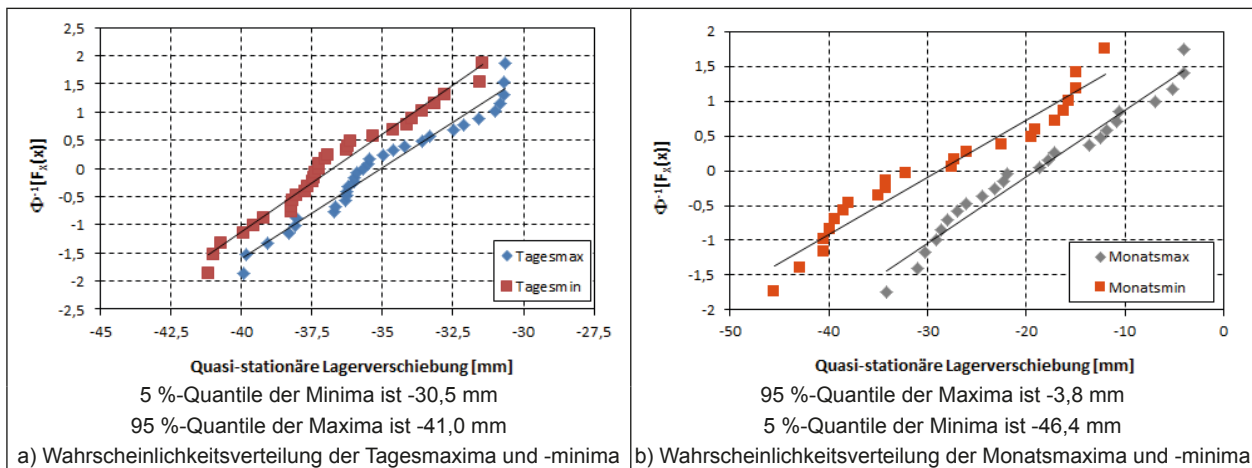


Bild 24: Normalverteilung der Tagesmax/Min im Monat August 2017 und der Monatsmax/Min von 01.2017 bis 12.2018

res-Zeitraum bzw. 101,6 m pro Jahr. Der prognostizierte akkumulierte Gleitweg, der während der Lebensdauer der Brücke von 100 Jahren entsteht, beträgt 10160 m. Bei dieser Prognose wird angenommen, dass sich der Verkehr nicht ändert. In den Zulassungsversuchen des Gleitmaterials MSM wurde ein akkumulierter Gleitweg von 50 km [8] ohne augenscheinlich Verschleiß ausgesetzt. Demzufolge würde das Lager 40/3 in der ebenen Gleitfläche keinen Verschleiß während der gesamten Lebensdauer der Brücke erfahren, auch wenn die quasi-stationären Lagerverschiebungen additiv berücksichtigt werden.

3.5 Statistische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten

Die Tagesmaxima und -minima der quasi-stationären Lagerverschiebung für August 2017 sowie die Monatsmaxima und -minima werden statistisch ausgewertet und den 5 %-Quantilwert für die Minima und den 95 %-Quantilwert für die Maxima ermittelt (siehe Bild 24). Die verkehrsinduzierten Lagerverschiebungen sind aufgrund ihrer Größenordnung bei der statistischen Auswertung zu vernachlässigen. Bild 24 zeigt die Verteilung der Tagesmaxima bzw. -minima bzw. Monatsmaxima bzw.-minima auf Wahrscheinlichkeitspapier, wobei die Wahrscheinlichkeitsachse die Inverse Φ^{-1} der Verteilungsfunktion $F_x(x)$ ist. Für die Lagerbemessung relevant ist eine statistische Auswertung der Jahresmaxima und -minima (siehe Tabelle 2). Die Stichprobe von $n = 2$ reicht nicht aus, um einen Vergleich mit Bemessungswerten durchzuführen.

Als Vergleich mit Bemessungswerten kann lediglich die tatsächliche Wärmeausdehnung aufgrund des

Jahr	Max. $u_{x,40/3,qs}$ [mm]	Min. $u_{x,40/3,qs}$ [mm]
2017	-10,63	-14,84
2018	-4,00	-12,02

Tab. 2: Jährliche Extremwerte der quasi-stationären Lagerverschiebung

konstanten Temperaturanteils mit den Bemessungsannahmen verglichen werden. Die tatsächliche Wärmeausdehnung ist geringer. Somit ist der Bemessungswert für den Wärmeausdehnungskoeffizient ausreichend sicher.

3.6 Analyse und Bewertung der Lagerverschiebung und des akkumulierten Gleitwegs

Im folgenden wird die gemessene Lagerverschiebung getrennt nach den Ursachen analysiert und bewertet.

Irreversible Lagerverschiebung infolge Kriechen und Schwinden

Eine irreversible Lagerverschiebung aufgrund von Kriechen in der um Temperatureffekte bereinigte Lagerverschiebung bis September 2017 ist erkennbar, aber aufgrund der limitierten Temperaturdaten nicht quantifizierbar. In der statischen Bemessung der Brücke werden Größen von 24,5 mm Lagerverschiebung aufgrund von Kriechen bis Verkehrsübergabe und 46,6 mm ab Verkehrsübergabe angegeben. Basierend auf den Messwerten werden diese Werte als konservativ eingestuft. Zu empfehlen ist, eine Erfassung der Bauwerkstemperatur und der Lagerwege ab Installation der Lager, um die Effekte von Schwinden und Kriechen auf die Lagerverschiebung zu erfassen.

Quasi-stationäre Lagerverschiebungen infolge Temperaturdehnung

Der Einfluss der Bauwerkstemperatur auf die Lagerverschiebung in der ebenen Gleitfläche ist eindeutig ermittelbar anhand einer linearen Korrelation, aber mit geringen Streuungen behaftet. Diese Streuungen sind bedingt, dass die gemessenen Bauwerkstemperatur nicht exakt dem konstanten Anteil der Bauwerkstemperatur entspricht. Maßgebende Materialeigenschaft für das Temperaturverhalten ist der Wärmeausdehnungskoeffizient des Oberbaus. Anhand der Messungen wird ein Wärmeausdehnungskoeffizient von ca. 85 % bis 90 % des nach Norm verwendeten ermittelt. Damit sind die in der statischen Bemessung ermittelten maximalen temperaturinduzierten Lagerverschiebungen konservativ.

Fluktuierende Lagerverschiebungen infolge Verkehrsbelastung

Die Lagerverschiebungen der ebenen Gleitplatte aufgrund von Verkehrsbelastung entstehen durch einen Ausgleich in der ebenen Gleitplatte infolge Verdrehung durch überrollende Fahrzeuge. Die Verschiebungen sind sehr gering und können mit dem Sensor WA 40/3 nicht erfasst werden. Mithilfe eines mechanischen Modells und den Messdaten der Abstandssensoren AS 40/3-1 und AS 40/3-2 können die Verschiebungen berechnet werden. Das mechanische Modell basiert auf Annahmen, die bei den Referenzfahrten im April 2018 mithilfe von zusätzlichen Sensoren überprüft wurden. Es wurde empirisch ein Korrekturfaktor ermittelt, der innere Steifigkeit und Reibungseffekte im Lager erfasst.

Die fluktuierende Lagerverschiebung (maximal 0,023 mm und minimal -0,011 mm im Messzeitraum) ist nicht maßgeblich für die Auslegung der oberen Gleitplatte. Allerdings ist sie nicht zu vernachlässigen bei der Ermittlung des akkumulierten Gleitwegs und sollte für eine Eigenüberwachung des Kalottenlagers erfasst werden.

Akkumulierter Gleitweg infolge Temperaturdehnungen und Verkehrsbelastung

Der akkumulierte Gleitweg wird getrennt nach quasi-stationären Verschiebungen und verkehrsinduzierten Verschiebungen ermittelt, da diese Verschiebungen mit unterschiedlichen Sensoren erfasst werden.

Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung ist der akkumulierte Gleitweg infolge Verkehr das ca. 140-fa-

che des akkumulierten Gleitwegs infolge Temperatureffekte. Somit wird deutlich, dass die messtechnische Erfassung der verkehrsinduzierten ebenen Lagerverschiebung besondere Aufmerksamkeit gebührt.

Die Prognose des akkumulierten Gleitwegs während der Lebensdauer der Brücke basierend auf den Messwerten des Zeitraums von Januar 2017 bis Dezember 2018 ergibt, dass ein Verschleiß des Gleitmaterials unwahrscheinlich ist.

3.7 Genauigkeit der Ergebnisse

Im folgenden wird die Genauigkeit der gemessenen Lagerverschiebung getrennt nach der verwendeten Messtechnik, der mechanischen Befestigung und den Auswerteprozeduren analysiert und bewertet.

3.7.1 Genauigkeit der quasi-stationäre Lagerverschiebung

Die Genauigkeit der Messwerte hängt ab von dem Sensor WA 40/3 und der Messdatenerfassungseinheit, hier QuantumX. Die technischen Daten des Sensors sind wie folgt:

- Ausgangssignal 4...20 mA
- Messbereich 0...250 mm
- Auflösung $\geq 700 \text{ nA}$, d. h. $1,1 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$
- Max. Wiederholgenauigkeit $\pm 5 \mu\text{m}$ (0,005 mm)
- Max. Linearitätsabweichung $\pm 200 \mu\text{m}$ (0,2 mm)
- Temperaturkoeffizient ist $\leq 30 \text{ ppm/K}$, d. h. $\leq 7,5 \mu\text{m/K}$ bei 250 mm

Der Sensor wurde im Juni 2016 (ca. 10 °C Außenlufttemperatur) in der Mittelstellung bei 125 mm auf Null gestellt. Bei additiver Überlagerung und der Annahme eines Temperatur des Sensors von -15 °C bis +20 °C ergibt sich eine Genauigkeit von maximal $\pm 393 \mu\text{m}$.

Die technischen Daten der Messdatenerfassungseinheit sind wie folgt:

- Rauschen bei 25 °C (Spitze-Spitze) bei Filter 5 Hz Bessel $< 1,25 \mu\text{A}$
- Linearitätsabweichung $< 0,02 \%$ vom Messbereichsendwert

- Nullpunktdrift < 0,05 %/10 K vom Messbereichsendwert
- Endwertdrift < 0,05 %/10 K vom Messwert

Die Drift infolge Temperaturänderungen kann vernachlässigt werden, da sich die Messdatenerfassungseinheit sich in einem temperierten Schaltschrank befindet. Das Rauschen ist ebenfalls nicht relevant, da die Sensorwerte eine Mittelung erfahren und somit das Rauschen keinen Einfluss hat. Maßgebend ist eine zusätzliche Vergrößerung der Genauigkeit von $\pm 50 \mu\text{m}$ infolge Linearitätsabweichung der Messdatenerfassungseinheit. Es ergibt sich eine resultierende Genauigkeit von maximal $\pm 443 \mu\text{m}$.

Die Qualität der Befestigung des Sensors beeinflusst die Genauigkeit der Messung. Bei der Montage wurde die Gelenkstange, die den Positionsgeber auf dem Sensor verschiebt, an der oberen Lagerplatte spielfrei befestigt. Der Positionsgeber ist auf dem Sensor geführt. Mögliches Spiel in der Führung ist in den Daten des Sensors berücksichtigt.

Da sich das Lageroberteil relativ zum Unterteil verdrehen kann, könnte durch eine Verdrehung eine Verschiebung des Positionsgebers verursachen. Überschläglich ermittelt mit $a_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$ ergibt sich eine mögliche Verschiebung durch Verdrehung von $9,52 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$, welche gegenüber der Genauigkeit der Messtechnik vernachlässigbar ist.

In der automatisierten Auswertung wird der arithmetische Mittelwert jeder 10-minütiger Messdatei ermittelt. Zur Bestimmung der Genauigkeit werden aus jeder Messdatei der arithmetische Mittelwert über drei kürzere Zeiträume von ca. 10 sec (am Anfang, in der Mitte und am Ende der Datei) ermittelt, in denen kein Verkehr über die Achse fährt.

Die manuell bestimmten quasi-stationären Werte werden mit den automatisch ermittelten Werte ver-

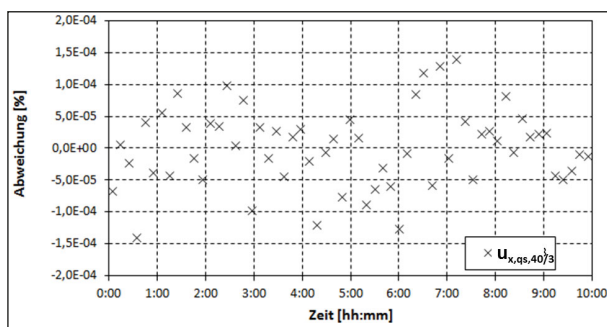


Bild 25: Abweichung der Mittelwerte über die ganze Messdatei und einzelne unbelastete Intervalle der horizontalen Lagerverschiebung

glichen (siehe Bild 25). Die Abweichungen sind vernachlässigbar klein.

Zur Berechnung der Genauigkeit des akkumulierten Gleitwegs wird angenommen, dass die resultierende Genauigkeit von maximal $\pm 443 \mu\text{m}$ in Extrempositionen auftritt, z. B. maximale Auslenkung, minimale Temperatur. Berücksichtigt man bei den beiden Extrempositionen (maximale Auslenkung, minimale Auslenkung) das jeweils ungünstige Vorzeichen der Genauigkeit so ergibt sich eine Genauigkeit von $\pm 3,5 \mu\text{m}$ pro akkumuliertem mm Gleitweg.

3.7.2 Genauigkeit der fluktuierenden ebenen Lagerverschiebung

Die ebenen Lagerwege infolge fluktuierender Belastungen werden mithilfe der Abstandssensoren AS 40/3-1 und AS 40/3-2 und des Ansatzes eines kinematischen Modells des Kalottenlagers berechnet und mit einem empirisch ermittelten Faktor korrigiert (siehe Kapitel 3.4).

Die technischen Daten der Sensoren sind wie folgt:

- Ausgangssignal 0...10 V
- Messbereich 0...2 mm
- Auflösung $\geq 1,5 \text{ nm}$
- Max. Linearitätsabweichung $\pm 0,32 \mu\text{m}$
- Temperaturstabilität Nullpunkt $4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$
- Temperaturstabilität Empfindlichkeit $-24 \text{ nm}/^\circ\text{C}$

Der Sensor wurde im Juni 2016 (ca. 10°C Außenlufttemperatur) in der Mittelstellung bei 1 mm eingestellt. Bei additiver Überlagerung und der Annahme des Temperaturbereichs des Sensors von -15°C bis $+20^\circ\text{C}$ ergibt sich eine Genauigkeit von maximal $\pm 1,02 \mu\text{m}$ bei -15°C .

Der Sensor ist an einen Verstärker angeschlossen, der sich im Schaltschrank befindet. Die technischen Daten des Verstärkers sind wie folgt:

- Auflösung 0,01 % des Messbereichs, d.h. $0,2 \mu\text{m}$
- Linearität $\pm 0,05 \%$ des Messbereichs, d. h. $\pm 1 \mu\text{m}$
- Empfindlichkeitsabweichung $\pm 0,1 \%$ des Messbereichs, d. h. $2 \mu\text{m}$
- Langzeitstabilität $> 0,05 \%$ des Messbereichs / Monat

- Temperaturstabilität 200 ppm

Da die Verstärker sich im geheizten Schaltschrank befinden, wird die Temperaturstabilität vernachlässigt. Es ergibt sich im ungünstigsten Fall eine additive Genauigkeit von $\pm 4 \mu\text{m}$ für die Messung der Abstände bzw. eine Genauigkeit von $\pm 1,3 \cdot 10^{-5}$ rad bei der Ermittlung des Verdrehwinkels.

Die technischen Daten der Messdatenerfassungseinheit sind wie folgt:

- Rauschen bei 25 °C (Spitze-Spitze) bei Filter 5 Hz Bessel $< 225 \mu\text{V}$
- Linearitätsabweichung $< 0,02 \%$ vom Messbereichsendwert
- Nullpunktdrift $< 0,02 \%/10 \text{ K}$ vom Messbereichsendwert
- Endwertdrift $< 0,05 \%/10 \text{ K}$ vom Messwert

Die Drift infolge Temperaturänderungen kann vernachlässigt werden, da sich die Messdatenerfassungseinheit in einem temperierten Schaltschrank befindet. Das Rauschen ist ebenfalls nicht relevant, da die Sensorwerte eine weitere Tiefpass-Filterung erfahren und somit das Rauschen keinen Einfluss hat. Maßgebend ist eine zusätzliche Vergrößerung der Genauigkeit von $\pm 0,4 \mu\text{m}$ infolge Linearitätsabweichung der Messdatenerfassungseinheit. Es ergibt sich eine resultierende Genauigkeit von maximal $\pm 4,4 \mu\text{m}$ für die Messung der Abstände bzw. eine Genauigkeit von $\pm 1,4 \cdot 10^{-5}$ rad bei der Ermittlung des Verdrehwinkels.

Die Befestigung der Sensoren ist spielfrei. Die Befestigung der Sensoren verursacht keine weitere Ungenauigkeit. Die Berechnung des Winkels beruht auf dem Abstand der Sensoren zueinander, hier 620 mm. Die Gewindebohrungen zur Befestigung der Sensoren können eine Toleranz von 0,5 mm aufweisen, die eine Genauigkeit von Auswertung $\pm 1,61 \cdot 10^{-3}$ rad bei der Berechnung der Verdrehung verursachen können.

Bei der Ermittlung des ebenen Gleitwegs infolge Verdrehung werden die folgenden Maße verwendet:

- $r_{\text{Kal}} = 920 \text{ mm}$ Radius der Kalotte
- $h_{\text{Kal}} = 58 \text{ mm}$ Höhe des Kalottensegments
- $t_{\text{Spalt}} = 2 \text{ mm}$ Höhe des Gleitspalts in der ebenen Gleitfläche

$h_{\text{Platte}} = 57 \text{ mm}$ Höhe der ebenen Gleitplatte

Der Gleitspalt ist ein geschätzter Wert mit geschätzter Toleranz von $\pm 0,5 \text{ mm}$. Die anderen Werte sind mit Herstelltoleranzen von $\pm 0,1$ bis $\pm 0,5 \text{ mm}$ belegt. Im ungünstigsten Fall ergibt sich eine Genauigkeit von $3,25 \mu\text{m}$ für den berechneten Gleitweg.

In der automatisierten Auswertung erfolgt eine Filterung der Messwerte. Der arithmetische Mittelwert jeder 10-minütiger Messdatei wird ermittelt. Der Einfluss des Filters auf die Messwerte kann nur mit einem besseren Sensor ermittelt werden, ist aber hier von untergeordneter Bedeutung, da die größeren Ungenauigkeiten in den Annahmen für die Eigenschaften des mechanischen Modells und der empirisch ermittelten Korrekturfunktion liegen. Diese Ungenauigkeiten sind anhand der bestehenden Messungen und Untersuchungen nicht quantifizierbar.

4 Lagerverdrehung und -verschiebung in der sphärischen Gleitfläche

4.1 Analyse der Messdaten

Die geglätteten Signale der Abstandssensoren werden verwendet, um die Verdrehung des Lagers 40/3 um die Brückenquerachse und den akkumulierten Gleitweg der gekrümmten Gleitfläche zu ermitteln (siehe Bild 26 bis Bild 28). In der Lagerverdrehung ist deutlich eine stationäre Verdrehung erkennbar, die durch fluktuierende verkehrsinduzierte Verdrehungen überlagert ist.

Die Verdrehung der Kalotte wird ermittelt:

$$\alpha_{40/3} = (d_{40/3-1} - d_{40/3-2}) / l_{AS40/3-1_40/3-2}$$

wobei

$\alpha_{40/3}$ [rad]	Verdrehung um die laterale Lagerachse
$d_{40/3-1}$ [mm]	Abstand zwischen Lagerunterteil und -oberteil auf der Seite in Richtung Achse 50
$d_{40/3-2}$ [mm]	Abstand zwischen Lagerunterteil und -oberteil auf der Seite in Richtung Achse 30
$l_{AS40/3-1_40/3-2}$ [mm]	horizontaler Abstand zwischen Sensor AS 40/3-1 und AS 40/3-2 (hier 620 mm)

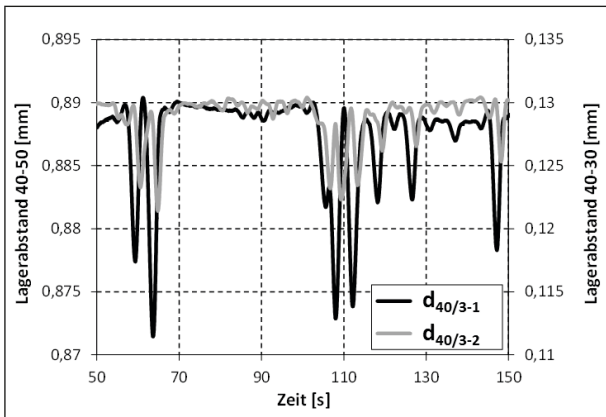


Bild 26: Abstand zwischen Lagerober- und -unterteil

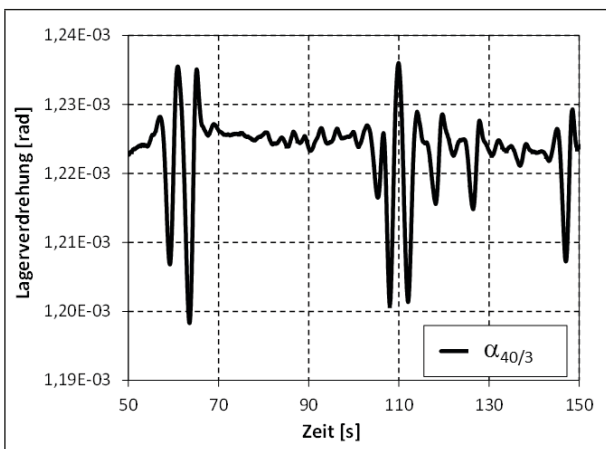


Bild 27: Lagerverdrehung bzw. Verdrehung der Kalotte

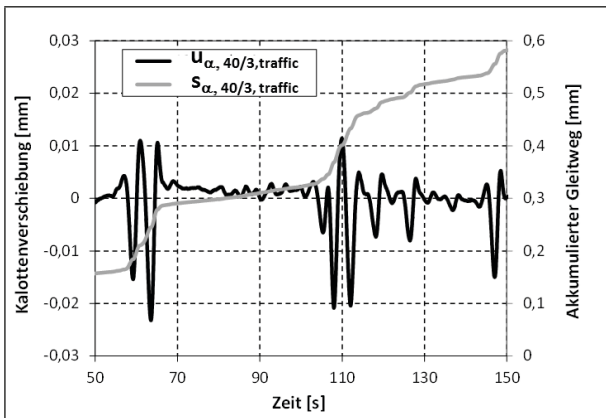


Bild 28: Verschiebung der Kalotte und zugehöriger akkumulierter Gleitweg

Der Verdrehweg der Kalotte wird berechnet:

$$u_{\alpha,40/3} = \alpha_{40/3} \cdot r_{\text{Kal}}$$

Der akkumulierter Verdrehweg der Kalotte ergibt sich zu

$$s_{\alpha,40/3}(t_i) = s_{\alpha,40/3}(t_{i-1}) + |u_{\alpha,40/3}(t_i) - u_{\alpha,40/3}(t_{i-1})|$$

wobei

$u_{\alpha,40/3}$ Lagerverschiebung in der konkaven Gleitfläche

r_{Kal} Radius der Kalotte (hier 920 mm)

$s_{\alpha,40/3}$ akkumulierter Gleitweg in der konkaven Gleitfläche

4.2 Quasi-stationäre Lagerverdrehung

Die quasi-stationäre Lagerverdrehung wird mithilfe des Modalwerts jeder Messung ermittelt (siehe $\alpha_{40/3,\text{Mean}}$ bzw. $\alpha_{40/3,\text{Mean}}$ in Bild 29). Ebenfalls wird von jeder Messung die maximale und minimale Verdrehung bestimmt (siehe $\alpha_{40/3,\text{Min}}$ bzw. $\alpha_{40/3,\text{Min}}$ und $\alpha_{40/3,\text{Max}}$ bzw. $\alpha_{40/3,\text{Max}}$ in Bild 29).

Deutlich zu erkennen ist eine jahreszeitliche Veränderung des Verdrehwinkels, wobei $\alpha_{40/3} \sim 0$ im Sommer bedeutet, dass die Lagerverdrehung dem Zustand vom Juni 2016 entspricht, als die Sensoren AS 40/3-1 und AS 40/3-2 eingestellt wurden.

Die lokalen Spitzen der maximalen Verdrehungen sind genauer zu analysieren. Mögliche Ursachen sind erhebliches Verkehrsaufkommen, Arbeiten an der Brücke oder in der Nähe der Brücke, elektronische Störungen.

Die maximale gemessene Lagerverdrehung ist $2,2 \times 10^{-3}$ rad und die minimale ist $-9,1 \times 10^{-4}$ rad bezogen auf den Einbauzustand im Juli 2016. Betrachtet man die maximale mittlere Lagerverdrehung von $1,31 \times 10^{-4}$ rad und die minimale mittlere Lagerverdrehung von $-6,25 \times 10^{-4}$ rad, so ergibt sich überschläglich eine symmetrische Lagerverdrehung von $\pm 3,78 \times 10^{-4}$ rad. Sowohl die absoluten als auch die überschläglich ermittelten Lagerverdrehungen sind deutlich kleiner als die maximal möglichen von $\alpha = \pm 5,0 \times 10^{-3}$ rad

Zur Identifizierung von nicht reversiblen Schwind- und Kriecheffekten, die eine langsame lineare Lagerverdrehung hervorrufen, wird eine lineare Trendlinie an der mittleren quasi-statischen Verdrehung $\alpha_{40/3,\text{Mean}}$ gebildet (siehe Bild 30). Die Trendlinie suggeriert eine nicht reversible Verdrehung, die durch Kriechen und Schwinden hervorgerufen sein könnte. Anzumerken ist, dass anhand des kurzen Zeitraums kein quantitativer Wert der Lagerverdrehung infolge Schwinden und Kriechen ermittelt wer-

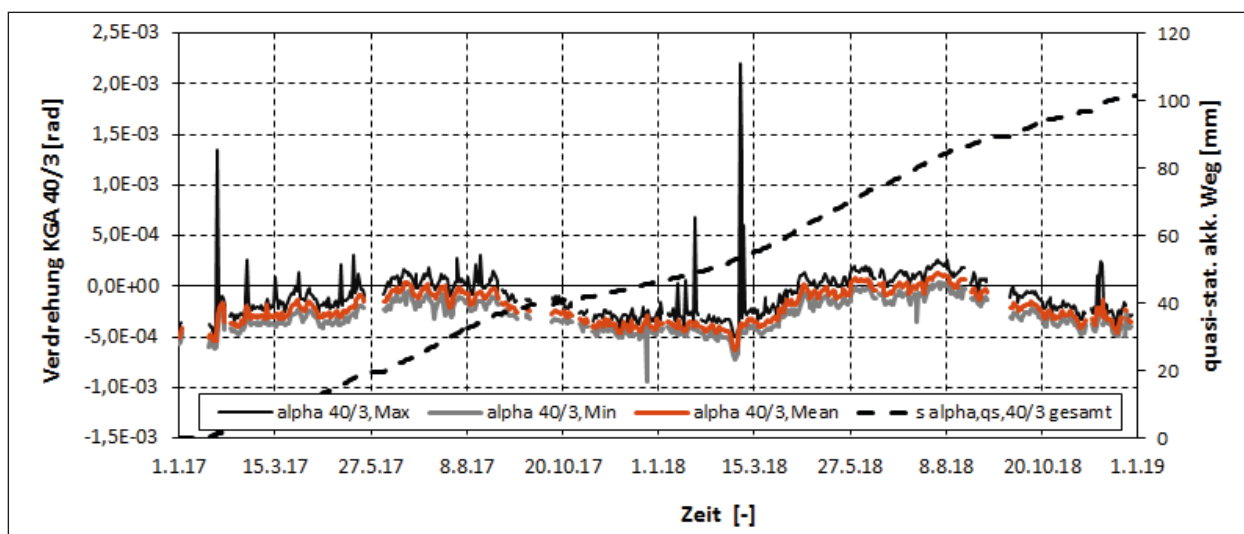


Bild 29: Quasi-stationäre Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima der Lagerverdrehung im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018

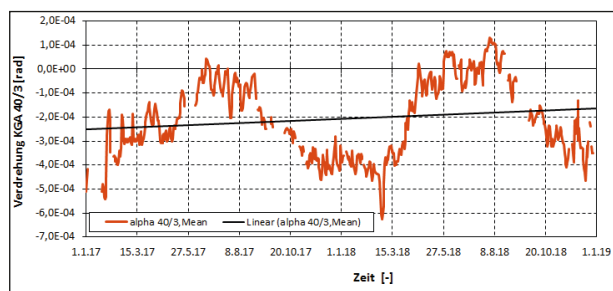


Bild 30: Quasi-stationäre mittlere Lagerverdrehung sowie lineare Trend zur Identifizierung von nicht reversiblen Langzeit-Effekten im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018

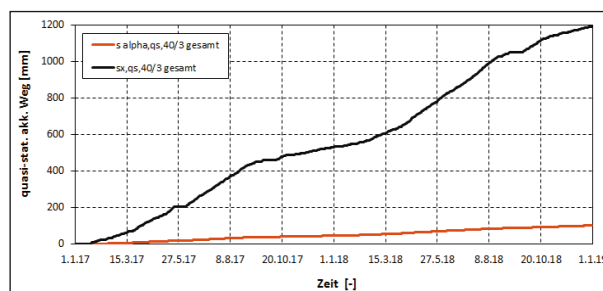


Bild 31: Quasi-stationäre akkumulierte Gleitweg in der ebenen und in der sphärischen Gleitfläche im Zeitraum von 01.01.2017 bis 31.12.2018

den kann. Der Trend kann auch durch unterschiedliche Wetterverhältnisse hervorgerufen werden.

Die Verläufe der Lagerverdrehungen pro Monat sind in Anhang C zu finden.

4.3 Quasi-stationäre sphärische Gleitwege

Die quasi-stationäre Lagerverdrehung $\alpha_{40/3, \text{Mean}}$ d. h. der Modalwert der 10-minütige Zeitreihe, 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. Bild 31 zeigt die akkumulierten Gleitwege in der ebenen und der sphärischen Gleitfläche $s_{x,40/3,qs}$ bzw. $s_{\alpha,40/3,qs}$. 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.

4.4 Fluktuierende sphärische Lagerverdrehung und Gleitwege

Anhand der fluktuierenden Lagerverdrehung, d. h. Subtraktion des Modalwerts von der Zeitreihe, wird die Verschiebungen in der sphärischen und der ebenen Gleitfläche berechnet und aufsummiert (siehe Bild 32). Die akkumulierten gesamten Lagerverschiebungen in der sphärischen Gleitebene betragen ca. 2,86 mm pro 10-minütigem Datensatz, d. h. 147,19 m pro Jahr.

Die Verläufe der akkumulierten Lagerverschiebungen pro Monat sind in Anhang D zu finden.

4.5 Gleitgeschwindigkeit

Die Gleitgeschwindigkeit in der konkaven Gleitebene wird durch numerisches Differenzieren über den zentralen Differenzenquotient wie folgt ermittelt

$$v_n = \frac{y_{n-2} - 8y_{n-1} + 8y_{n+1} - y_{n+2}}{12(t_{n+1} - t_n)} \text{ für } 2 < n < N-1$$

wobei N die Anzahl der Werte in der Zeitreihe ist.

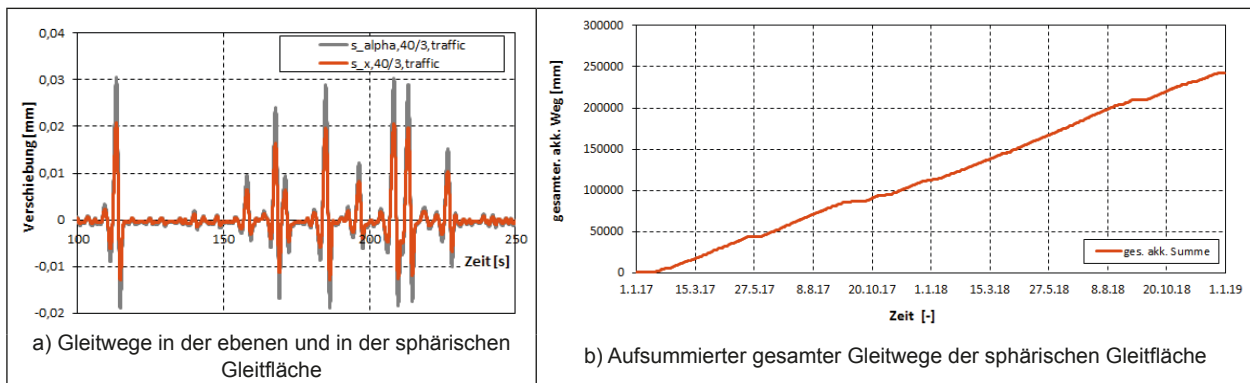


Bild 32: Sphärischer und ebener Gleitweg und akk. Gleitweg infolge Verkehrsüberfahrten

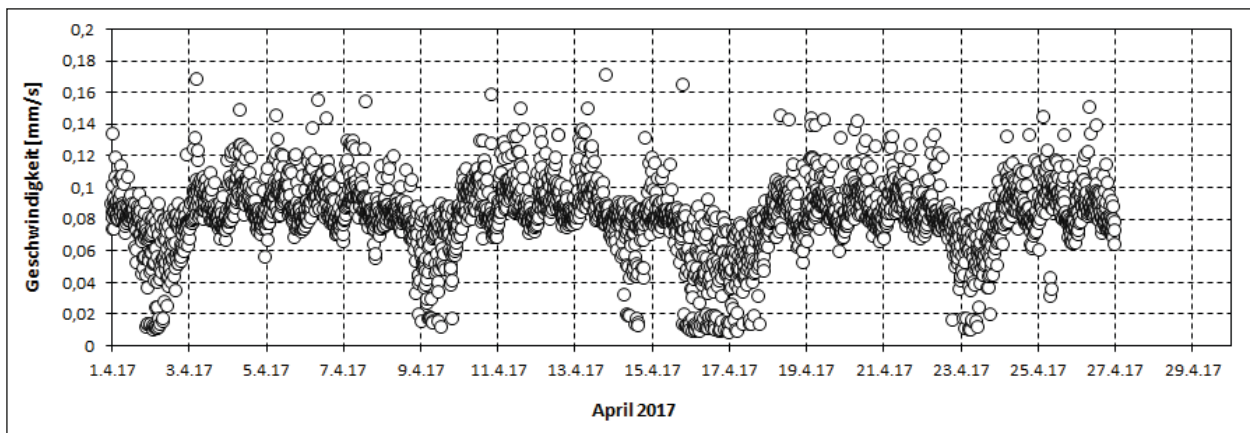


Bild 33: Absolute Maxima der Gleitgeschwindigkeit in der sphärischen Gleitfläche im April 2017

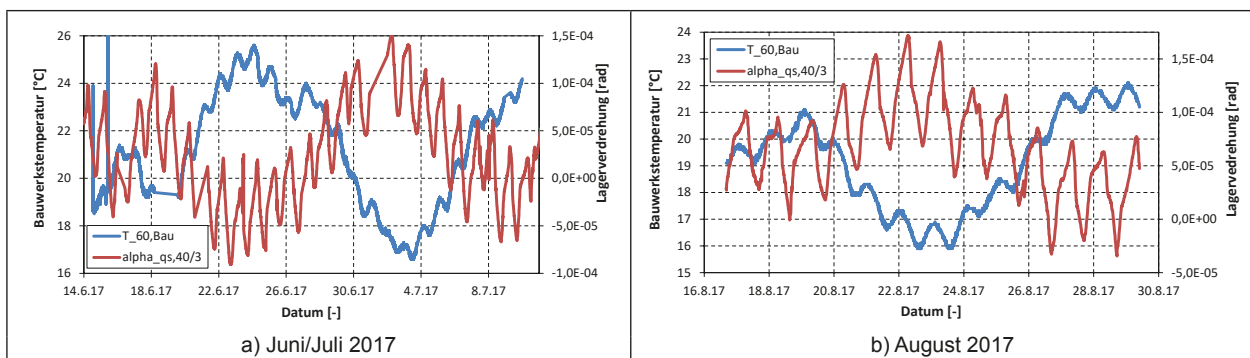


Bild 34: Bauwerkstemperatur und Verdrehung des Lagers 40/3

Die Reibung in der Gleitfläche ist ein maßgebender Parameter in der Bemessung der Kalottengleitlager und für den Verschleiß des Gleitmaterials. Die Reibung ist nicht nur vom Druck sondern auch von der Gleitgeschwindigkeit abhängig. Die bemessungsrelevanten Reibwerte wurden in Versuchen mit einer Geschwindigkeit von 0,4 mm/s ermittelt (siehe [7]). Bild 33 zeigt die ermittelten absoluten Maxima der Gleitgeschwindigkeit in der konkaven Gleitfläche. Deutlich zu erkennen ist, dass die Gleitgeschwindigkeit mit maximalen Werten von 0,2 mm/s sehr gering ist. Somit sind die vorhandenen Gleitgeschwindigkeiten so niedrig, dass ein höherer Verschleiß des Gleitmaterials ausgeschlossen werden kann.

Die Gleitgeschwindigkeit wird daher im Weiteren vernachlässigt.

4.6 Korrelation der quasi-stat. Lagerverdrehung mit der Temperatur

Für die Korrelationsanalyse werden die Temperaturdaten der UzL von Juni/Juli und August 2017 herangezogen. Bild 34 zeigt den Verlauf der Bauwerkstemperatur und der Verdrehung des Lagers 40/3, während Bild 35 die Lufttemperatur und die Verdrehung des Lagers 40/3 zeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lagerverdrehung vom Tempe-

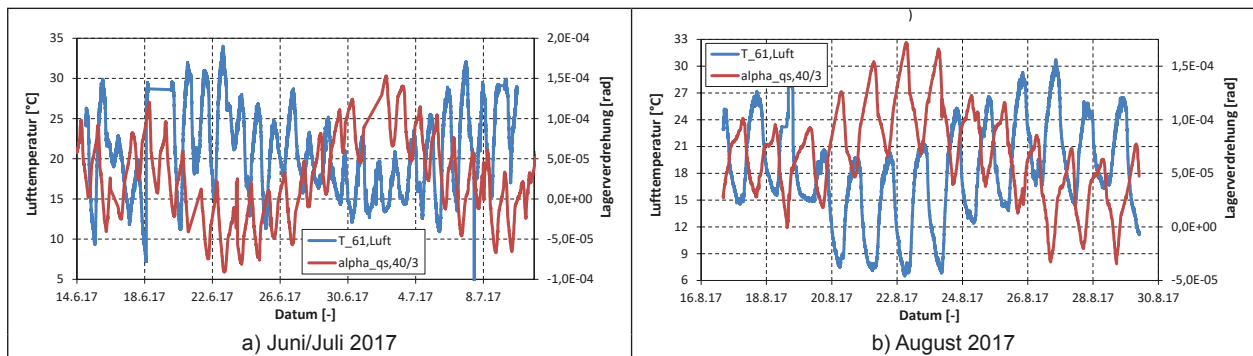


Bild 35: Lufttemperatur und Verdrehung des Lagers 40/3

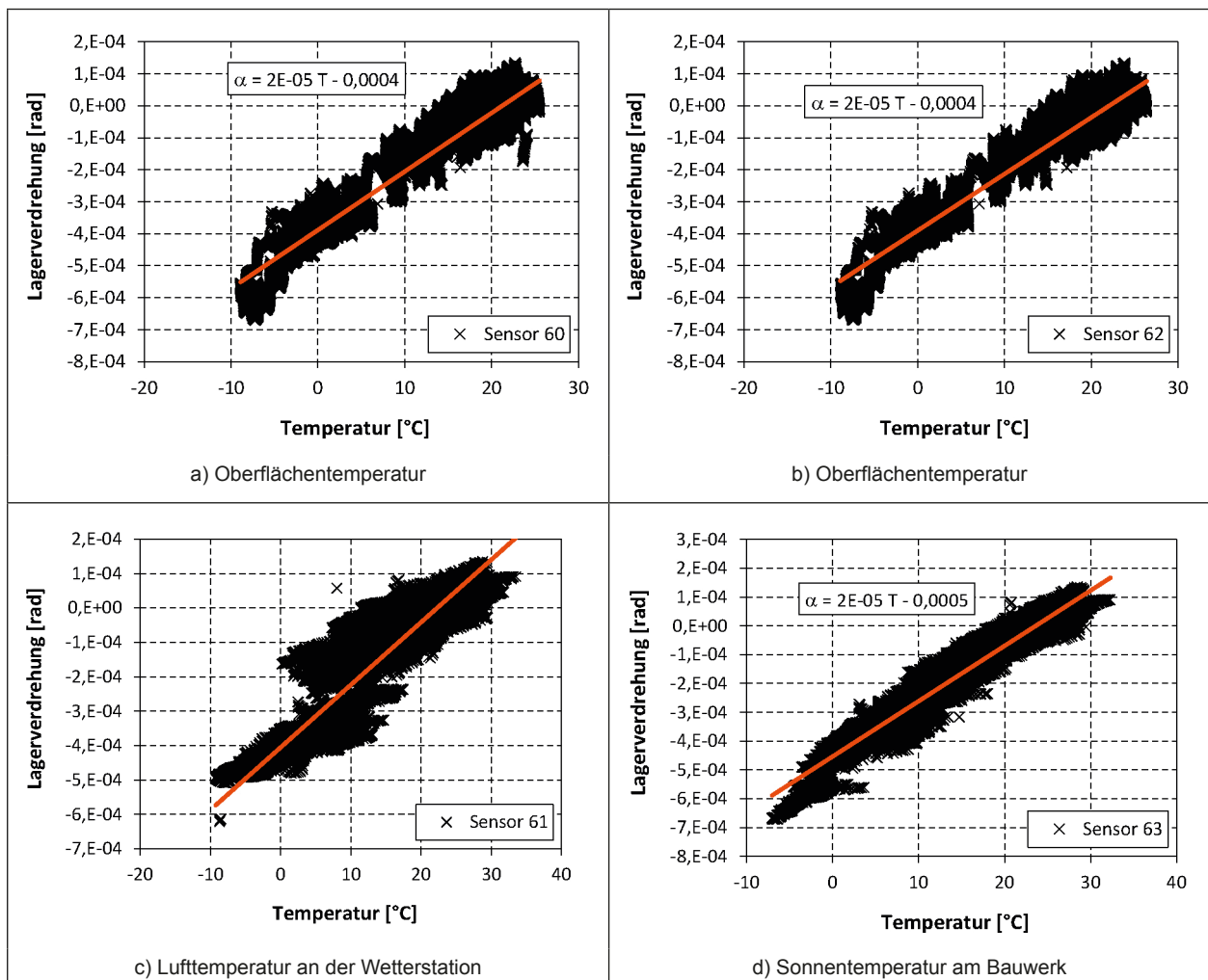


Bild 36: Bauwerks- und Lufttemperatur versus Verdrehung des Lagers 40/3 für Januar 2017 bis Mai 2018

ratertagesgang dominiert wird und weniger von der Temperatur der Großwetterlage. Der Temperaturtagessgang des Bauwerks infolge Sonneneinstrahlung führt zu einem über den Querschnitt nichtlinearen Temperaturverlauf (Brückendeck warm, Brückenunterseite kalt), die einen nichtlinearen Verformungszustand der Brücke hervorrufen, insbesondere eine Verkrümmung des Decks, was eine Verdrehung des Lagers bewirkt. Die Großwetterlage führt zu einem einheitlichen Temperaturfeld der Brücke, das

sich in einer deutlichen Änderung der Brückenlänge auswirkt (was in Kapitel 3.3 die Korrelation der Lagerverdrückung WA 40/3 mit der Bauwerkstemperatur zeigt) und lediglich in einer geringen Änderung der Lagerverdrehung. Bild 36 zeigt die Korrelation der Lagerverdrehung mit der Luft- und mit der Bauwerkstemperatur.

Bild 36 zeigt, dass die Temperatur und die Lagerverdrehung korrelieren. Die große Streubreite der

Korrelation ist bedingt durch die Ungenauigkeit der Bauwerkstemperatur. Die Lagerverdrehung wird hervorgerufen durch die Steigung des linearen Temperaturverlaufs über die Höhe des Brückenquerschnitts sowie die Größe des nichtlinearen Anteils. Die Bauwerkstemperaturen der Sensoren 60 und 61 sind lediglich punktuelle Messwerte, die den linearen Anteil nicht erfassen. Aufgrund der nicht ausreichenden Genauigkeit des Temperaturverlaufs kann eine Bereinigung der quasi-stationären Lagerverdrehung von den temperaturinduzierten Effekten nicht durchgeführt werden.

4.7 Gleitspalte der primären und sekundären Gleitflächen

Während einer Brückeninspektion werden die beiden folgenden Größen am Kalotten-Gleitlager gemessen, da sie ein Maß für die Funktionstüchtigkeit des Lagers sind (siehe Bild 37):

- Der Abstand zwischen oberem Rand der Kalotte und oberer Gleitplatte ist der Gleitspalt. Er nimmt ab bei Verschleiß des Gleitmaterials in der ebenen Gleitfläche. Die Messung wird mit einer Fühlerlehre an vorab am Lager festgelegten Punkten durchgeführt. Im Brückeninspektionbericht sind Gleitspalte zwischen 0,2 und 0,5 mm zu vermerken, Gleitspalte kleiner 0,2 mm sind als dringlich sanierungsbedürftig einzustufen. Der Gleitspalt der sphärischen Gleitebene kann nicht gemessen werden.
- Der Abstand zwischen Lageroberteil und Lagerunterteil ist der Kippspalt. Er ist ein Maß für die Verdrehung und ausreichende Verdrehmöglichkeit des Lagers. Der Kippspalt wird an drei Punkten durchgeführt. Anhand der Kippspalthöhen wird die Lagerverdrehung um die Lager-x-Achse

und -y-Achse ermittelt. Die Messung wird mit einer Fühlerlehre durchgeführt. Für die Kalottenlager 40/1 und 40/3 sind die maximal erlaubten Verdrehwinkel $\alpha = \pm 5,0 \times 10^{-3}$ rad. Verdrehwinkel $\alpha \leq \pm 3,0 \times 10^{-3}$ rad weisen eine ausreichende Kapazität auf, so dass das Lageroberteil nicht auf dem -unterteil aufsetzt.

Während die Lagerverdrehung am Lager 40/3 kontinuierlich erfasst wird, wird der Gleitspalt weder in der ebenen noch in der konkaven Gleitfläche direkt überwacht. Allerdings lässt sich über die beidseitigen Abstandsmessungen die relative Höhe der Gleitplatte bezogen auf den Punkt der Gleitplatte, der zentrisch über der Kalotte liegt, genannt LO-Abstand, wie folgt bestimmen (siehe Bild 38):

$$LO - Abstand = d_{AS40/3-1} \cdot (1 - \alpha_{40/3}^2)$$

Wobei

$d_{AS40/3-1}$ Abstand zwischen Sensor AS 40/3-1 und der Gleitplatte

$\alpha_{40/3}$ Lagerverdrehung des Lagers 40/3 um die y-Achse

Die relative Höhe zur Lageroberplatte (kurz LO-Abstand) ist abhängig vom Verdrehwinkel und ist ein Maß für die Größe beider Gleitspalte. Wird der LO-Abstand weniger, so ist es ein Indiz für die Abnahme eines Gleitspalts. Mithilfe der akkumulierten Gleitwege wird bestimmt, welche Gleitfläche einen größeren Verschleiß ausgesetzt ist.

Da das Gleitmaterial kombiniert mit der Elastomerfolie eine elastische Stauchung bei Belastung erfährt und die Steifigkeit des Gleitmaterial ein temperaturabhängiges Verhalten aufweist, kann LO-Abstand weitere Effekte beinhalten. Anhand der Auswertung des LO-Abstand bei regellosem Verkehr (siehe Bild 39) wird eine vertikale Abnahme des re-

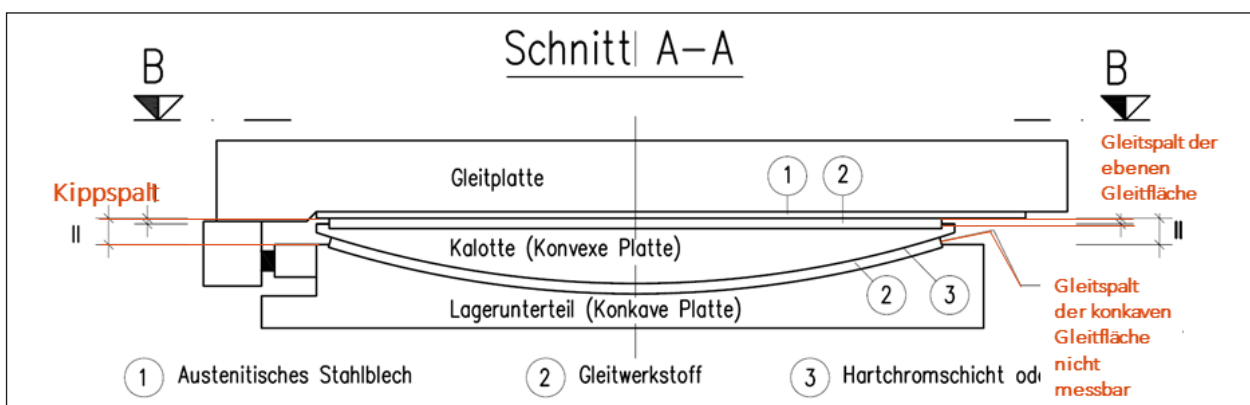


Bild 37: Kippspalt und Gleitspalte bei einem Kalottenlager [11]

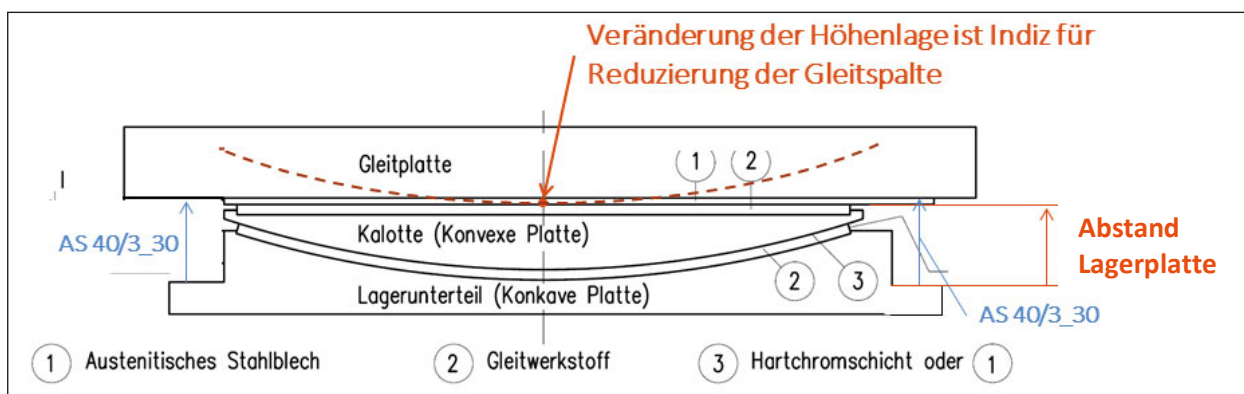


Bild 38: Bezugsmaß „Abstand zur oberen Lagerplatte“ als Maß des kombinierten Gleitspalts

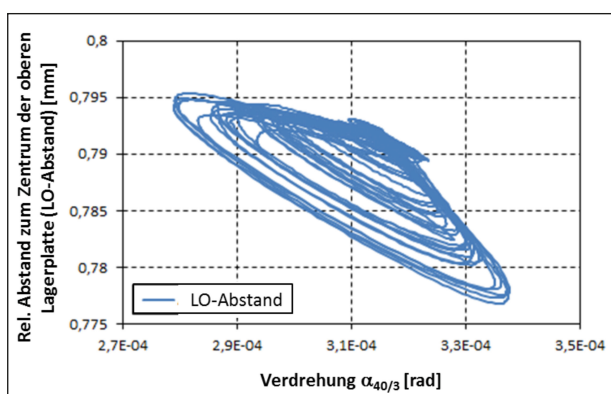


Bild 39: Relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte LO-Abstand versus Lagerverdrehung bei regellosen Verkehrsüberfahrten

lativen Abstands bei jeder Überfahrt erkennbar, welche durch die elastische Stauchung des Gleitmaterials und der Elastomerfolie verursacht wird.

Da die elastische Stauchung des Gleitmaterials bei der Überwachung der Gleitspalthöhe nicht relevant ist, wird der relative Abstand der Gleitplatte LO-Abstand mit den quasi-stationären Lagerverdrehung und den Abständen $d_{AS40/3-1}$ und $d_{AS40/3-2}$ ermittelt (siehe Bild 40 und Bild 41).

Zu erkennen ist eine Reduktion von ca. 1 mm auf 0,95 mm, die eventuell mit jahreszeitlichen Temperaturschwankungen korreliert sein könnten. Für eine Beurteilung ist ein längerer Messzeitraum erforderlich. Die geringen Schwankungen in dem Verlauf des LO-Abstand zeigen, dass andere Einflüsse (z. B. Feuchtigkeit, Verdrehung) keine starke Wirkung auf dieses Maß haben. Es wird daher als geeignet eingestuft zur Beobachtung des kombinierten Gleitspalts (ebene und konkave Gleitebene). Um den relativen Abstand zum Lageroberteil in ein absolutes Maß für den kombinierten Gleitspalt zu transformieren, ist eine Bezugsmessung am Lager, z. B. während der ersten Brückenprüfung, notwendig. Damit könnten auch Warnschwellen im Monito-

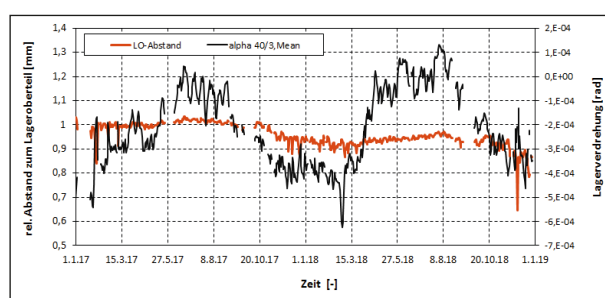


Bild 40: Quasi-stationäre Lagerverdrehung und relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte

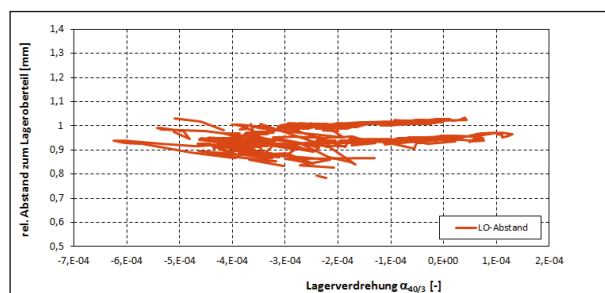


Bild 41: Relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte versus quasi-stationäre Lagerverdrehung

ring zur Eigenüberwachung der Lager in die automatische Auswertung implementiert werden. Der Gleitspalt unter Last wurde bei der Abnahme des Bauwerks nicht erfasst, da das Gleitmaterial zu diesem Zeitpunkt keine nennenswerte Belastung erfahren hat. Im Dezember 2018 zeigt sich ein Abfall der mit einem deutlichen Anstieg der Lagerverdrehung zeitlich korreliert ist. Der Anstieg der Lagerverdrehung ist an eine Temperaturerhöhung gekoppelt. Möglicherweise hat diese Temperaturerhöhung im Gleitmaterial ungleichmäßige Temperaturverteilungen hervorgerufen, die wiederum ungleichmäßige Fließvorgänge im Gleitmaterial verursacht haben. Mechanische Unregelmäßigkeiten der Gleitfläche können ebenfalls zu lokalen Störungen führen.

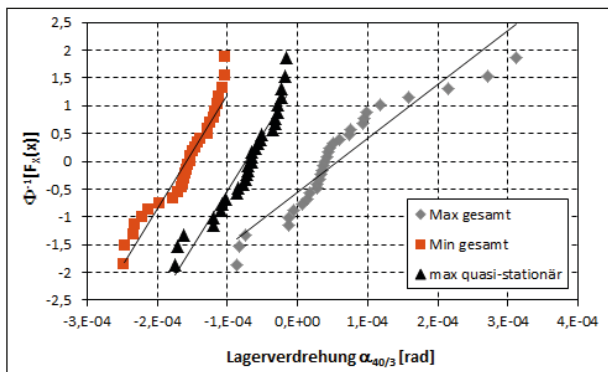


Bild 42: Normalverteilung der Tagesmax/Min der absoluten Lagerverdrehung und die Tagesmax der quasi-stationären Lagerverdrehung von August 2017

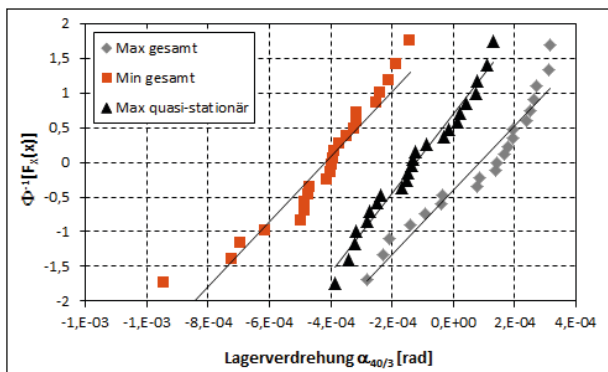


Bild 43: Normalverteilung der Monatsmax/Min von 01.2017 bis 12.2018

4.8 Statistische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten

Die Tagesmaxima und -minima der absoluten Lagerverdrehung sowie die Tagesmaxima der quasi-stationären Lagerverdrehung für August 2017 sowie die Monatsmaxima und -minima der absoluten Lagerverdrehung sowie die Monatsmaxima der quasi-stationären Lagerverdrehung werden statistisch ausgewertet und die 5%-Quantilwerte bzw. 95%-Quantilwerte ermittelt (siehe Bild 42 und Bild 43, Tabelle 3 und Tabelle 4).

Bild 42 und Bild 43 zeigen die Verteilungen auf Wahrscheinlichkeitspapier, wobei die Wahrscheinlichkeitsachse die Inverse φ^{-1} der Verteilungsfunktion $F_x(x)$ ist. Für die Lagerbemessung relevant ist eine statistische Auswertung der Jahresmaxima und -minima (siehe Tabelle 5). Die Stichprobe von $n=2$ reicht nicht aus, um einen Vergleich mit Bemessungswerten durchzuführen.

Eine statistische Auswertung der Gleitspalt-Messung ist nicht erforderlich, da dieser nicht mit Bemessungswerten und Einwirkungen verbunden ist und in der Lagerbemessung nicht betrachtet wird.

	Abs. Maxima [rad]	Abs. Minima [rad]	Quasi-stationäre Maxima [rad]
5 % Quantile	$-5,3 \cdot 10^{-5}$	$-1,90 \cdot 10^{-4}$	$-1,05 \cdot 10^{-4}$
95 % Quantile	$2,08 \cdot 10^{-4}$	$-9,74 \cdot 10^{-5}$	$-1,24 \cdot 10^{-5}$

Tab. 3: Quantilwerte der Tagesextremwerte für August 2017

	Abs. Max. $\alpha_{40/3}$ [rad]	Abs. Min. $\alpha_{40/3}$ [rad]	Quasi-stationäre Max. $\alpha_{40/3}$ [rad]
5 % Quantile	$-2,21 \cdot 10^{-4}$	$-7,20 \cdot 10^{-4}$	$-3,79 \cdot 10^{-4}$
95 % Quantile	$3,93 \cdot 10^{-4}$	$-1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$

Tab. 4: Quantilwerte der monatlichen Extremwerte für August 2017

Jahr	Abs. Max. $\alpha_{40/3}$ [rad]	Abs. Min. $\alpha_{40/3}$ [rad]	Quasi-stationäre Max. $\alpha_{40/3,qs}$ [rad]
2017	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$-9,41 \cdot 10^{-4}$	$-4,33 \cdot 10^{-5}$
2018	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$-7,21 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$

Tab. 5: Jährliche Extremwerte der quasi-stationären Lagerverdrrehung

4.9 Analyse und Bewertung des Lagerverdrehung und des akkumulierten Gleitwegs

Im folgenden wird die gemessene Lagerverdrehung getrennt nach den Ursachen analysiert und bewertet.

Irreversible Lagerverdrehung infolge Kriechen und Schwinden

Eine irreversible Lagerverdrehung aufgrund von Kriechen ist nicht detektierbar aufgrund der fehlenden Informationen zum nichtlinearen Temperaturverlauf über die Höhe des Brückenquerschnitts. Zur Ermittlung sind weitere Messstellen der Bauwerkstemperatur erforderlich sowie eine Temperaturfeldsimulation, um die Lagerverdrehung von den temperaturinduzierten Effekten zu bereinigen.

Quasi-stationäre Lagerverdrehung infolge Temperaturdehnung

Der Einfluss der Bauwerkstemperatur auf die Lagerverdrehung ist eindeutig ermittelbar anhand einer linearen Korrelation, die aber mit großen Streuungen behaftet ist. Diese Streuungen werden verursacht, weil die verwendete Bauwerkstemperatur nicht den nichtlinearen Verlauf des Temperaturzustands erfasst. Eine Erfassung des Temperaturzustands über den gesamten Querschnitt mit Berücksichtigung der Effekte durch Sonneneinstrahlung führt zu einer genaueren Bestimmung des Temperatureinflusses auf die Lagerverdrehung.

Fluktuierende Lagerverdrehung infolge Verkehrsbelastung

Überrollender Verkehr verursacht den größeren Anteil an der Lagerverdrehung. Diese Verdrehungen werden sehr gut mit den Abstandssensoren erfasst. Aufgrund der Brückensteifigkeit sind hervorgerufene Verdrehungen deutlich kleiner als die maximal möglichen. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung führen die fluktuierenden Lagerverdrehungen zu großen akkumulierten Gleitwegen und sind bei der Eigenüberwachung nicht zu vernachlässigen.

Akkumulierter Gleitweg infolge Temperaturdehnungen und Verkehrsbelastung

Der gesamte akkumulierte Gleitweg wird mithilfe der absoluten Lagerverdrehung ermittelt. Zusätzlich wird der akkumulierte Gleitweg anhand der quasi-stationären Lagerverdrehung ermittelt.

Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung ist der akkumulierte Gleitweg infolge Verkehr das ca. 150-fache des akkumulierten Gleitwegs infolge Temperatureffekte. Somit wird deutlich, dass der messtechnischen Erfassung der verkehrsinduzierten ebenen Lagerverschiebung besondere Aufmerksamkeit gebührt.

Die Prognose des akkumulierten Gleitwegs während der Lebensdauer der Brücke basierend auf den Messwerten des Zeitraums von Januar 2017 bis Dezember 2018 ergibt, dass ein Verschleiß des Gleitmaterials unwahrscheinlich ist.

Relativer Abstand zwischen Lagerunterteil und Zentrum des Lageroberteils LO-Abstand

Der relative Abstand zwischen Lagerunterteil und dem Zentrum des Lageroberteils wird mithilfe der Abstandssensoren und der Annahme eines mechanischen Kalottenlagermodell berechnet. Er ist ein Maß für den Verschleiß des Gleitmaterials. Die Werte des berechneten LO-Abstand können nur als Indiz für Verschleiß verstanden werden, da einige Einflussgrößen im mechanischen Modell vernachlässigt wurden. Der Verlauf des LO-Abstands über den zweijährigen Zeitraum basierend auf quasi-stationären Werten ergibt einen sinnvollen Verlauf mit geringer Streubreite, die durch vernachlässigte Einflussfaktoren hervorgerufen wird. Somit ist die Betrachtung des LO-Abstands eine geeignete Größe zur Eigenüberwachung des Kalottenlagers, d. h. der Verschleiß des Gleitmaterials infolge Gleitweg wird überwacht.

4.10 Genauigkeit der Ergebnisse

Die Genauigkeit der Lagerverdrehung und -verschiebung in Kapitel 3.7.2 beschrieben.

Es ergibt sich eine resultierende Genauigkeit von maximal $\pm 4,4 \mu\text{m}$ für die Messung der Abstände bzw. eine Genauigkeit von $\pm 1,4 \cdot 10^{-5}$ rad bei der Ermittlung des Verdrehwinkels.

Aufgrund von Herstelltoleranzen ergibt sich im ungünstigsten Fall eine Genauigkeit von $\pm 3,25 \mu\text{m}$ für den berechneten Gleitweg.

Zu beachten ist, dass eine relative Verdrehung zwischen Lageroberteil und -unterteil gemessen wird. Die Berechnung der Kalottenverdrehung beruht auf der Annahme, dass das Gleitmaterial keine Reibung und eine unendliche Steifigkeit besitzt, so dass jede relative Verdrehung von Lageroberteil und -unterteil ein Gleiten der Kalotte in der sphärischen Gleitebene verursacht. Diese Annahme wurde nicht überprüft. So dass eine Angabe einer quantitativen Genauigkeit für den akkumulierten Gleitweg nicht möglich ist.

5 Vertikale Lagereinwirkung

5.1 Analyse der Messdaten

Die quasi-stationären werden von den fluktuierenden Drucksignalen separiert. Für jede Messdatei wird ein Wert des quasi-stationären Drucksignals als der Modalwert ermittelt, so dass pro Tag 143 Werte des quasi-stationären Drucks gesammelt werden.

Die fluktuierende Lagereinwirkungen $F_{40/1}$ und $F_{40/3}$ werden mithilfe der Kalibrierfunktionen für fluktuierende Lasten ermittelt (siehe Kapitel 5.6.1). Die Maxima der Summe der Lagereinwirkungen 40/1 und 40/3, welche die Lkw-Einwirkungen erfasst, werden ermittelt (siehe Bild 44).

5.2 Verhalten und Ausfall der Drucksensoren

Bild 45 und Bild 46 zeigen die quasi-stationären Druckschwankungen der Sensoren von Januar 2017 bis Mai 2018. Zu erkennen ist, dass Sensor DS 40/1-1 und DS 40/1-2 eine starke Drift aufwiesen, bevor sie im Januar 2018 komplett ausgefallen

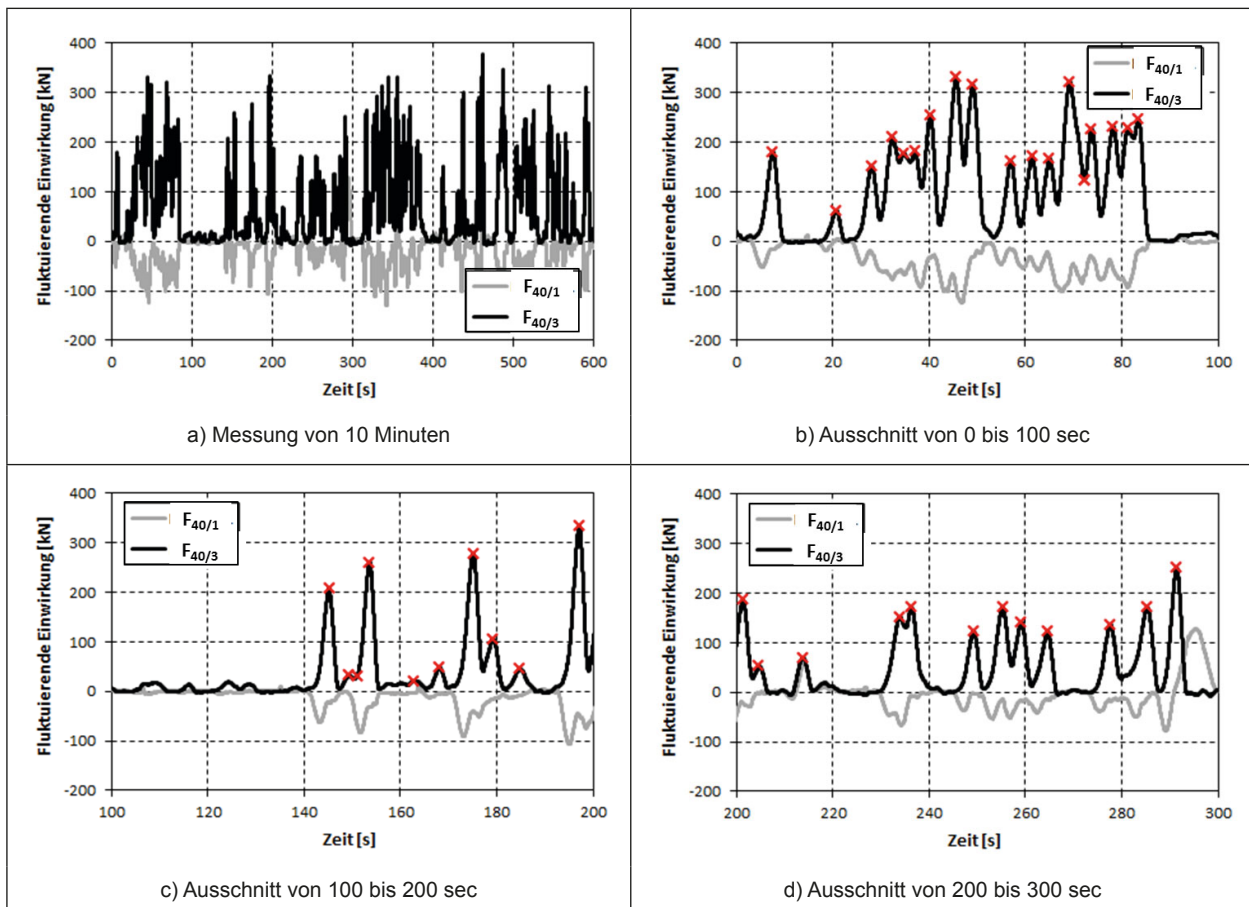


Bild 44: Fluktuierende Lagereinwirkungen

sind. Auch der Sensor DS 40/3-2 zeigt eine physikalisch nicht erklärbare Druckabnahme. Die Ursache für die Ausfälle ist nicht bekannt und wird mit dem Hersteller der Sensoren untersucht. Im Weiteren werden die Signale der Sensoren DS 40/1-3 und DS 40/3-3 vorrangig ausgewertet und interpretiert. Der Sensor DS 40/3-1 ist zwar im Lager eingebaut, wurde aufgrund begrenzter Anzahl Messkanäle der Messdatenerfassungseinheit nicht aufgezeichnet.

Um zu untersuchen, ob zwischen den später ausgefallenen Sensoren und den verbliebenen eine mathematische Beziehung steckt, wurden die Messdaten der Drucksensoren vom Lager 40/3 vom 11.5. bis 22.5.2017 zueinander in Relation gesetzt (siehe Bild 47). Sensordaten von DS 40/1-1 zu DS 40/1-3 zeigen keine ausgeprägte Korrelation (siehe Bild 47 (b)). Bei den Messdaten von DS 40/1-2 zeigt sich bereits die Drift, da in Bild 47 (c) parallel verschobenen Linien zu sehen sind.

Die Signale der Sensoren DS 40/1-3 und DS 40/3-3 sind in Form von täglichen Maxima, Minima und Mittelwerten in Bild 48 und Bild 49 (Seite 41) über den ganzen Messzeitraum von Januar 2017 bis Dezem-

ber 2018 dargestellt. Bei Sensor DS 40/1-3 zeigt sich ab Juni 2018 ein anomales Verhalten ähnlich wie bei Sensor DS 40/1-2. Allerdings ist es seit November nicht wieder entstanden. Sensor DS 40/3-3 funktioniert ohne Einschränkungen.

5.3 Quasi-stationäre Druckschwankungen und Lagereinwirkungen

5.3.1 Druck

Bild 50 bis Bild 54 (Seite 41/42) zeigen die quasi-stationären Druckschwankungen während des Monats April 2017. Sie werden ermittelt anhand der 10-minütiger Modalwerte der Signale der Drucksensoren und anhand der Kalibrierfunktionen für statische Belastung (siehe [2]) in einen quasi-stationären Druck in $[\text{N}/\text{mm}^2]$ umgerechnet. Der Drucksensor DS 40/3-1 ist nicht angeschlossen, daher liegen keine Werte vor.

Es zeigt sich, dass die quasi-stationären Drucksignale einen temperaturabhängigen Verlauf aufweisen. Ein Tagesgang ist deutlich zu erkennen. Die Änderung des Drucks während 24 h kann bis zu

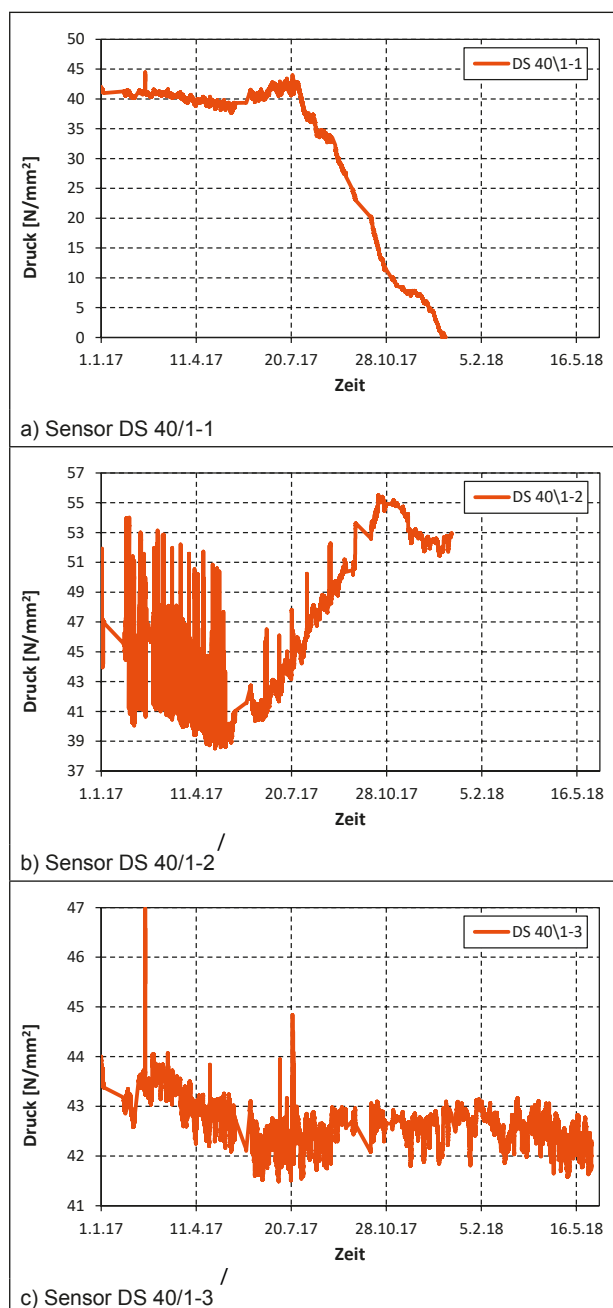


Bild 45: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/1

1 N/mm² betragen. Die Druckänderungen sind korreliert mit Zustandsänderungen der Brücke infolge Temperaturverformung als auch mit Zustandsänderungen im Lager infolge Temperaturverformung. Während die Verformung der Brücke teilweise anhand der Lagerverdrehung und -verschiebung am Lager 40/3 erfasst wird, werden die Zustandsänderungen durch z. B. Änderung der Materialeigenschaften im Lager nicht erfasst. Ein Indiz, dass die Brückenverformung maßgebenden Einfluss auf die Druckänderungen hat, ist die deutlich geringen Änderungen bei den Sensoren DS 40/1-2 und DS 40/3-2, die sich im Scheitelpunkt des konvexen La-

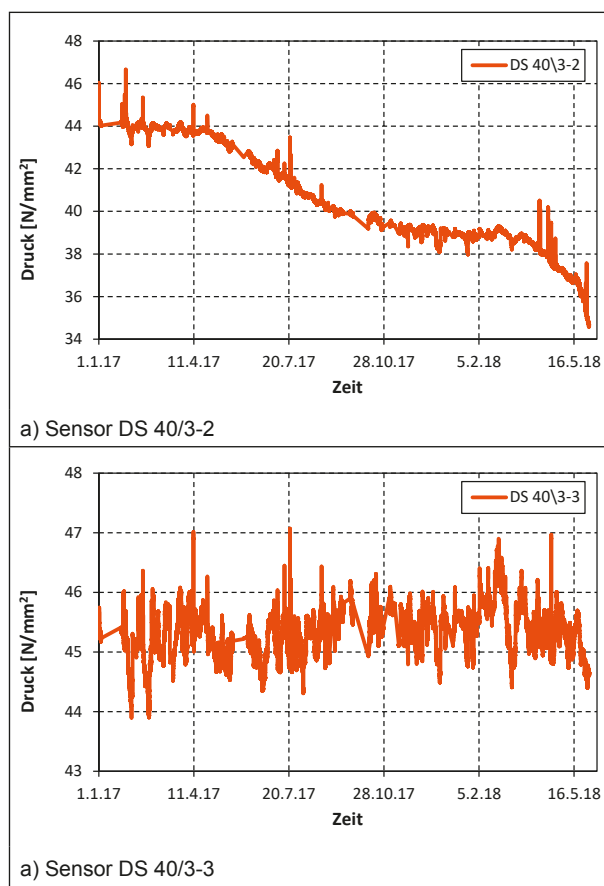


Bild 46: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/3

gerunterteilt befinden. An diesem Punkt sind am ideellen Lager der Druck unabhängig von der Verdrehung bzw. von einer Ausmittigkeit der resultierenden Lagerkraft.

Aufgrund des Ausfalls der Sensoren DS 40/1-1, DS 40/1-2 und DS 40/3-2 werden lediglich die Drücke gemessen mit den Sensoren DS 40/1-3 und DS 40/3-3 im Detail im Anhang C dargestellt.

5.3.2 Lagerkraft

Die vertikale Lagerkraft $F_{40/1}$ bzw. $F_{40/3}$ wird aufgrund des Ausfalls der Drucksensoren berechnet lediglich anhand der folgenden Beziehung

$$F_{40/1} = p_{40/1-3,qs} \cdot A_{MSM}$$

$$F_{40/3} = p_{40/3-3,qs} \cdot A_{MSM}$$

$F_{40/1}$ bzw. $F_{40/3}$ vertikale Lagerkraft am Lager 40/1 bzw. 40/3

A_{MSM} Fläche des Gleitmaterials in der ebenen Gleitfläche (hier $A_{MSM} = 204 \text{ 282 mm}^2$)

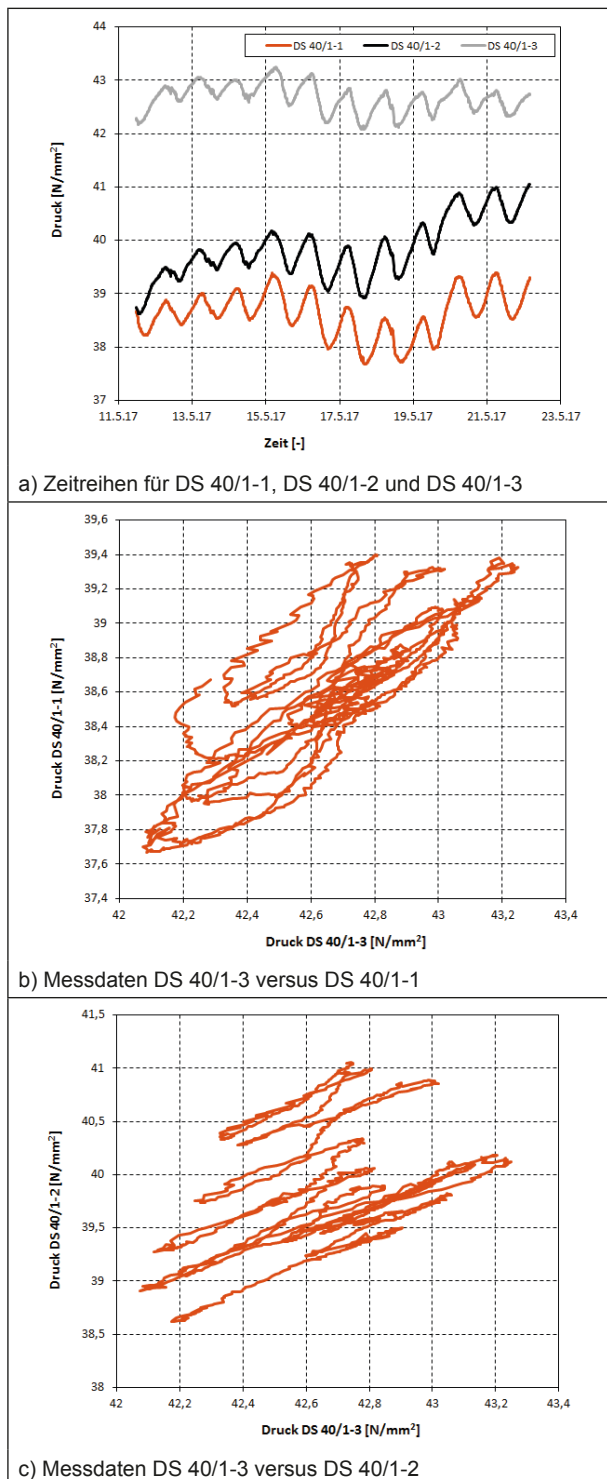


Bild 47: Analyse der Messdaten von Mai 2017 hinsichtlich Korrelationen der Sensoren untereinander

Bild 55 und Bild 56 (Seite 43) zeigen die anhand der Drucksignale DS 40/1-3 und DS 40/3-3 berechneten vertikalen Lagerkräfte für den Monat April 2017.

Die vertikalen Einwirkungen werden verwendet, um sie mit berechneten Werten zu vergleichen und um eine mögliche Kraftumlagerung aufgrund von Brückenänderungen, z. B. Steifigkeitsänderungen, La-

gersenkungen, etc., zu detektieren. Um die Temperatureffekte zu eliminieren, werden die monatlichen Mittelwerte der aus quasi-statischen Druckwerten berechneten Lagerkräfte gebildet (siehe Bild 57).

Die in der Statik [4] angegebenen charakteristischen Werte für die Summe der ständigen Lasten beträgt -7178 kN (max) und -7267 kN (min) für Lager 40/1 und -7938 kN (max) und -7955 kN (min) für Lager 40/3 (siehe Tabelle 6), zusätzlich können Setzungen Kräfte zwischen -485 und -728 kN in Lager 40/1 und zwischen -369 und -554 kN in Lager 40/3 hervorrufen.

Der Mittelwert der gemessenen Lagerkraft beträgt $8721,5 \text{ kN}$ am Lager 40/1 und $9248,8 \text{ kN}$ am Lager 40/3. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Drucksensoren von $\pm 2 \text{ N/mm}^2$, d. h. $\pm 400 \text{ kN}$, wird in Tabelle 7 die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Lasten ermittelt. Die gemessenen sind zwischen 1,04 bis 1,27 bzw. 1,22-fache größer als die berechneten, aber dennoch geringer als die γ_G -fachen berechneten ständigen Lasten. Somit bilden die Werte aus den statischen Berechnungen basierend auf normativen Materialeigenschaften die tatsächlichen Lasten gut ab.

5.4 Einfluss von Lagerverdrehung und Lagerverschiebung auf die Lagerdrücke

Es wird untersucht, ob die Druckänderungen mit der Lagerverdrehung um die y-Achse korreliert sind. Der maßgebliche Einfluss auf die Drucksignale sind die tagesbedingten Temperaturschwankungen. Ein Einfluss von Lagerverdrehung um die y-Achse und Lagerverschiebung in x-Richtung konnte weder in den langzeitlichen Verdrehungen (siehe Bild 58) noch in den Tagesgängen erkannt werden (Bild 59). Zu vermuten ist, dass die Druckänderungen durch die Verdrehung um die x-Achse hervorgerufen werden.

5.5 Korrelation der quasi-stat. Lagerwirkung mit der Temperatur

Bild 60 bis Bild 64 (Seite 45) zeigen die gemessenen Drücke im Lager 40/1 und 40/3 und die Lufttemperatur während des Monats August. Unterschiedlich stark bildet sich die Korrelation mit der Lufttemperatur aus. Während bei DS 40/1-1 und

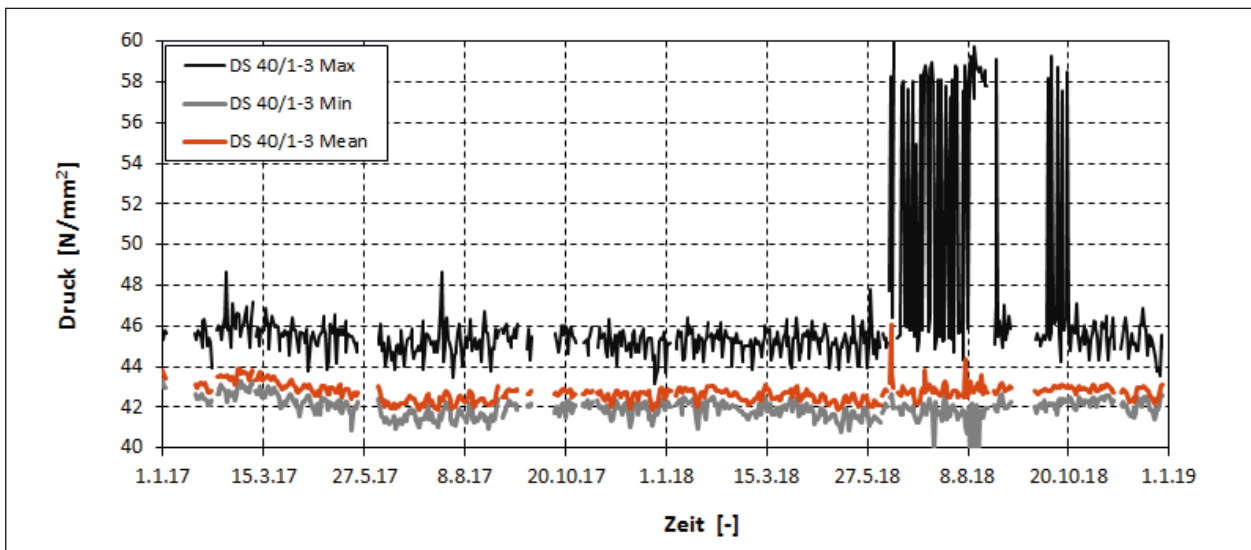


Bild 48: Gemessener Druck am Sensor DS 40/1-3 dargestellt in Form von täglichen Maxima, Minima und Mittelwerten

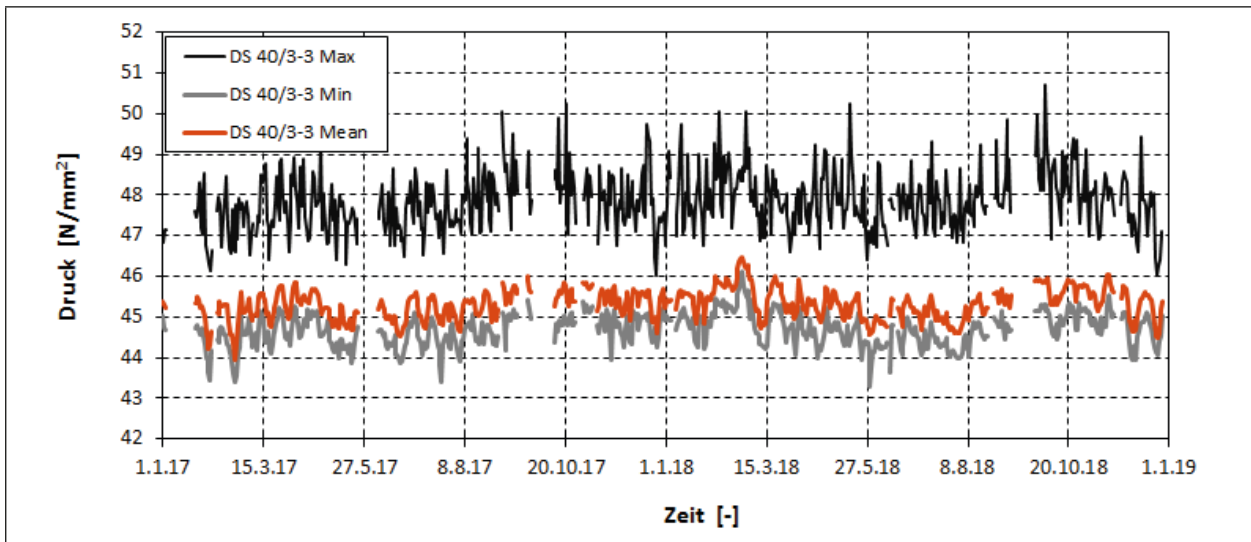


Bild 49: Gemessener Druck am Sensor DS 40/3-3 dargestellt in Form von täglichen Maxima, Minima und Mittelwerten

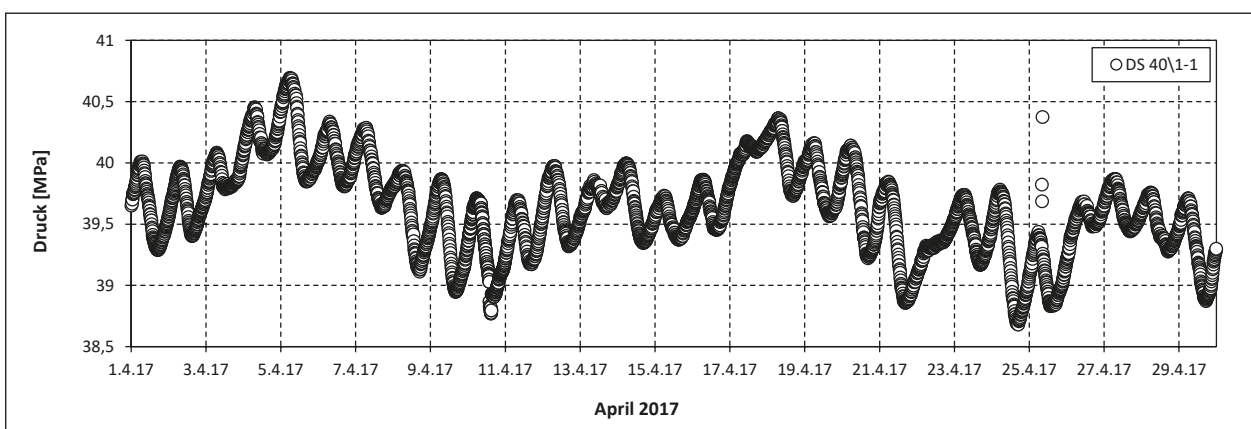


Bild 50: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/1-1 im April 2017

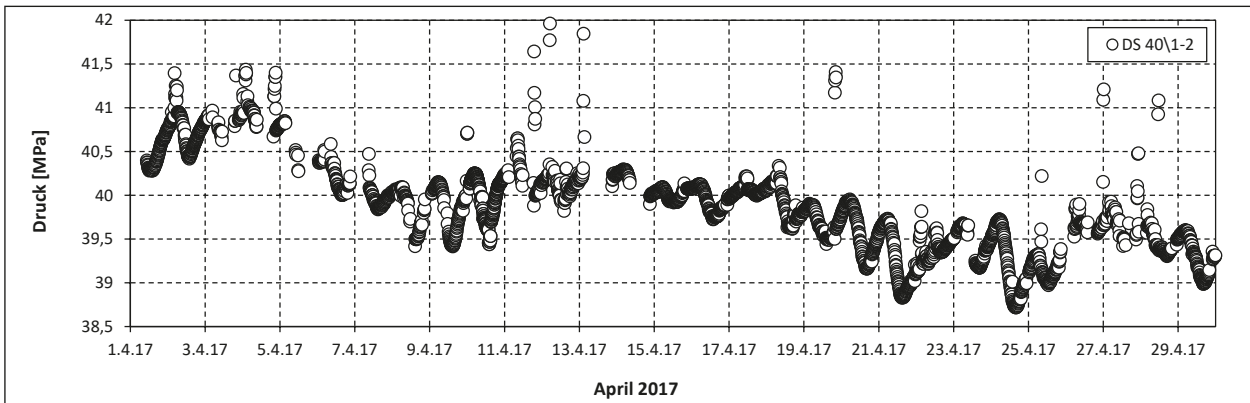


Bild 51: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40\1-2 im April 2017

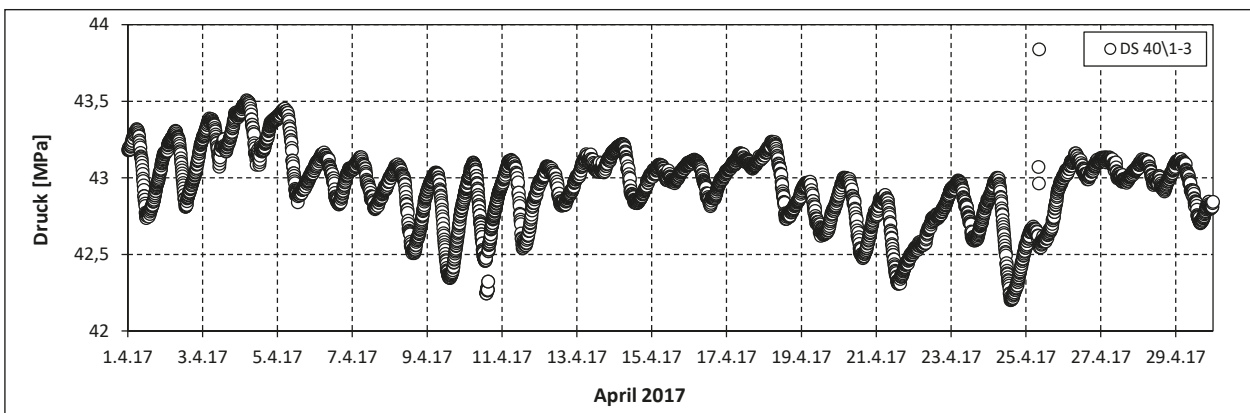


Bild 52: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40\1-3 im April 2017

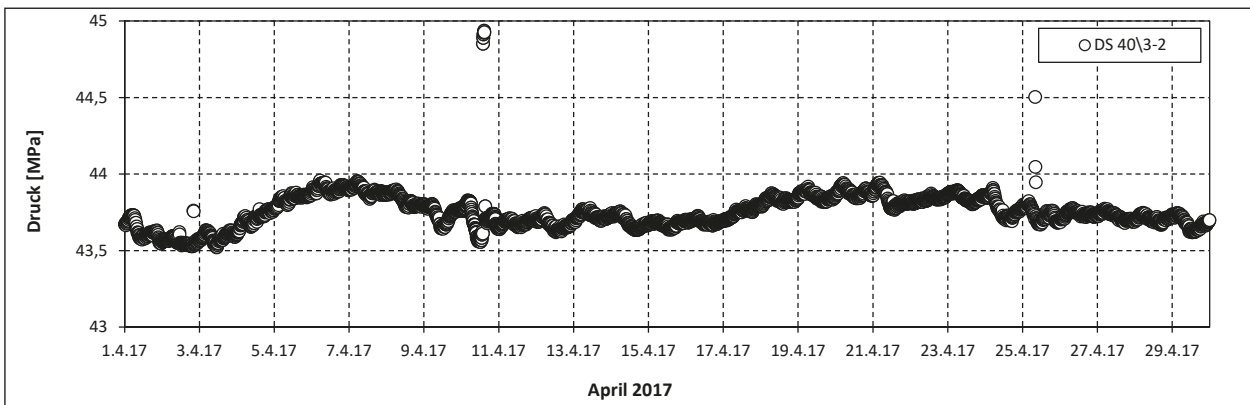


Bild 53: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40\3-2 im April 2017

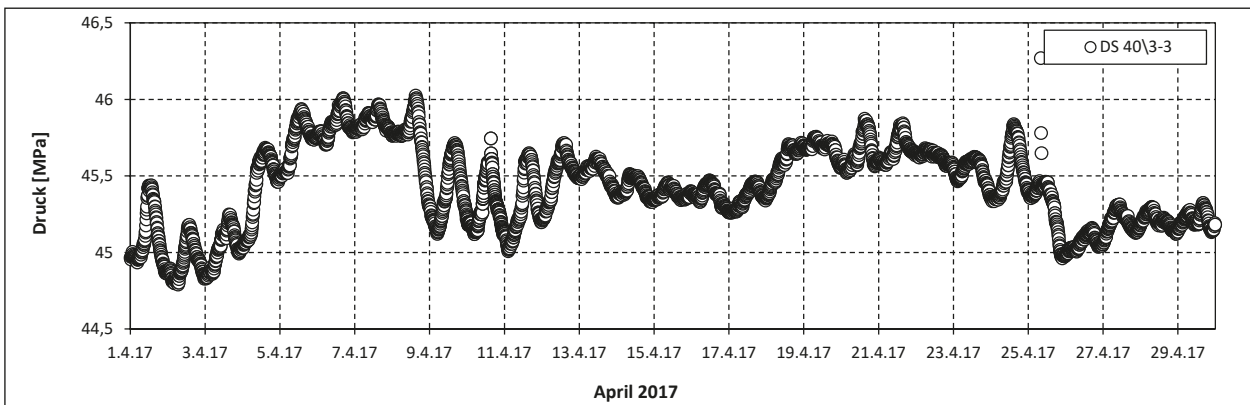


Bild 54: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40\3-3 im April 2017

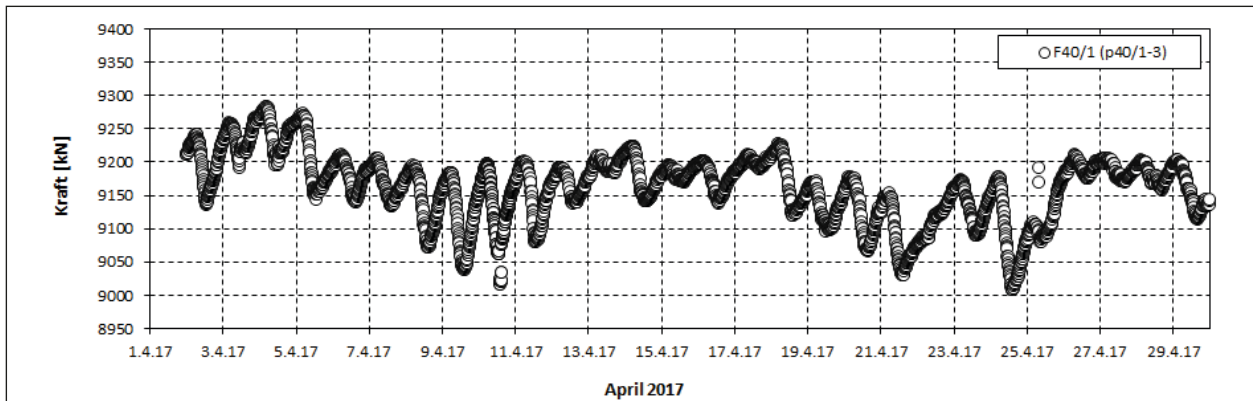


Bild 55: Quasi-stationäre berechnete vertikale Lagereinwirkung KGA 40/1 im April 2017

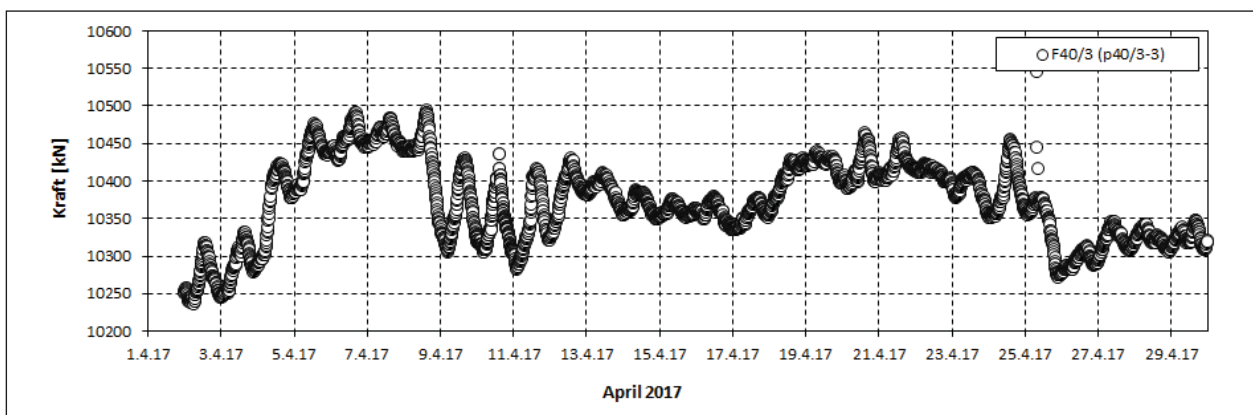


Bild 56: Quasi-stationäre berechnete vertikale Lagereinwirkung KGA 40/3 im April 2017

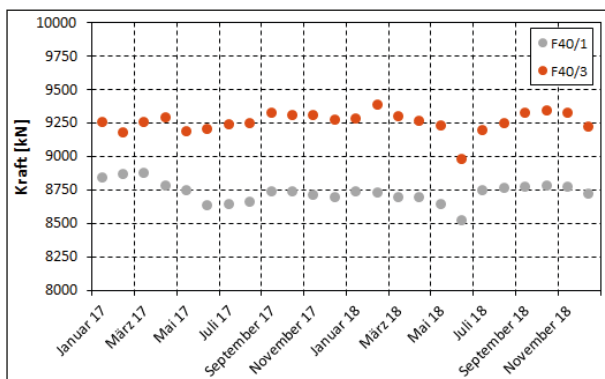


Bild 57: Monatliche Mittelwerte der quasi-stationären vertikalen Lagereinwirkung KGA 40/1 und KGA 40/3

DS 40/1-2 noch ein Einfluss der Temperatur der Großwetterlage erkennbar ist, so zeigen sich bei DS 40/1-3 und DS 40/3-2 eine schwache aber gering streuende Korrelation mit der Lufttemperatur. DS 40/3-3 zeigt fast keine Abhängigkeit von der Lufttemperatur, allerdings ist der Einfluss der Großwetterlage erkennbar.

Die unterschiedlich starken Korrelationen zwischen Drücken und Temperatur werden durch das instationäre Temperaturfeld und damit durch den Verformungszustand der Brücke beeinflusst, der lokale Druckänderungen im Lager verursacht. Die Brücke

verläuft von Nord-West nach Süd-Ost. Somit wird die die südliche Seite sich ausdehnen, während die nördliche Seite sich zusammenzieht. Das zeigt sich in der Abnahme der Korrelation zwischen DS 40/1-1, DS 40/1-2 und DS 40/1-3. Eine Temperaturfeldsimulation ist hilfreich, um diese Zusammenhänge zu quantifizieren und eine Bereinigung der Druckschwankungen von dem temperaturinduzierten Anteil vorzunehmen.

Bild 65 und Bild 66 (Seite 46/47) zeigen die Drucksignale versus Bauwerks- und Lufttemperatur für den Zeitraum Januar 2017 bis Mai 2018. Es besteht keine eindeutige quantitative Beziehung zwischen Druckänderungen und Temperatur. Die Streubreite wird von anderen Einflussfaktoren dominiert.

Aufgrund der visuell erkennbaren korrelierten Druckänderungen mit der Bauwerkstemperatur werden einige Tagesgänge vom 24.5. bis 29.4.2018 analysiert (siehe Bild 67 (Seite 47)).

Wenn sich bei einzelnen Tagesgängen eine Korrelation zeigt, die aber in der Auswertung des gesamten Messzeitraums nicht erkennbar ist, so dominieren andere Einflüsse, die bisher nicht identifiziert bzw. gemessen wurden.

Lager Achse 40 links (LR1)							Lager Achse 40 rechts (LR3)						
	Fx		Fy		Fz			Fx		Fy		Fz	
	max	min	max	min	max	min		max	min	max	min	max	min
Eigengewicht	0	0	0	0	-6636	-6636	Eigengewicht	0	0	0	0	-6896	-6896
Ausbaulasten	0	0	0	0	-1174	-1174	Ausbaulasten	0	0	0	0	-1209	-1209
Vorspannung int	0	0	0	0	374	374	Vorspannung int	0	0	0	0	98	98
Vorspannung ext	0	0	0	0	258	258	Vorspannung ext	0	0	0	0	69	69
Kriechen bis VÜ	0	0	0	0	0	-34	Kriechen bis VÜ	0	0	0	0	0	-6
Kriechen ab VÜ	0	0	0	0	0	-55	Kriechen ab VÜ	0	0	0	0	0	-11
Summe ständig	0	0	0	0	-7178	-7267	Summe ständig	0	0	0	0	-7938	-7955
Summe ständig ab LW							Summe ständig ab LW						
LM1, UDL	0	0	0	0	1445	-3743	LM1, UDL	0	0	0	0	1406	-3779
LM1, TS	0	0	0	0	312	-1181	LM1, TS	0	0	0	0	314	-1182
Bremsen	0	0	0	0	2	-2	Bremsen	0	0	0	0	1	-1
Zentrifugalkraft	0	0	0	0	17	0	Zentrifugalkraft	0	0	0	0	0	-20
Setzungen, mögl.	0	0	0	0	728	-728	Setzungen, mögl.	0	0	0	0	554	-554
Setzungen, wahrsch.	0	0	0	0	485	-485	Setzungen, wahrsch.	0	0	0	0	369	-369
Temperatur, konst	0	0	0	0	0	0	Temperatur, konst.	0	0	0	0	0	0
Temperatur, linear	0	0	0	0	362	-220	Temperatur, linear	0	0	0	0	108	-66
Wind	0	0	0	0	70	-70	Wind	0	0	0	0	77	-77
Reibung (design)	0	0	0	0	0	0	Reibung (design)	0	0	0	0	0	0
Design-Werte							Design-Werte						
GZT	0	0	0	0	-3198	-17852	GZT	0	0	0	0	-4592	-18436
GZG	0	0	0	0	-4485	-12968	GZG	0	0	0	0	-5663	-13449

Tab. 6: Lagerlasten für Achse 40 [4]

	$F_{40/1,min}$	$F_{40/1,max}$	$F_{40/1,min}$ [kN]	$F_{40/1,max}$ [kN]
Gemessene Lagerkraft [kN]	8721,5 - 400	8721,5 + 400	9248,85-400	9248,85+400
Ständige Lasten [kN]	7178	7267	7938	7955
Setzungen [kN]	Wahrscheinlich 485	Maximal 728	Wahrscheinlich 369	Maximal 554
gemessen/berechnet	$\frac{8321,5}{7267 + 728} = 1,04$	$\frac{9121,5}{7178} = 1,27$	$\frac{8848,85}{7995 + 554} = 1,04$	$\frac{9648,85}{7938} = 1,22$

Tab. 7: Abweichung gemessenen von berechneten Lagerlasten [4]

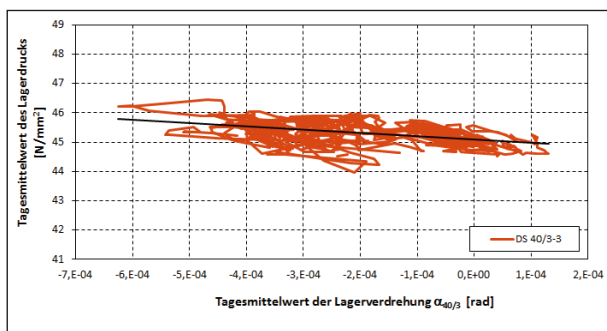


Bild 58: Tagesmittelwert der Lagerverdrehung versus Tagesmittelwert des Lagerdrucks im Zeitraum von Januar 2017 bis Dezember 2018

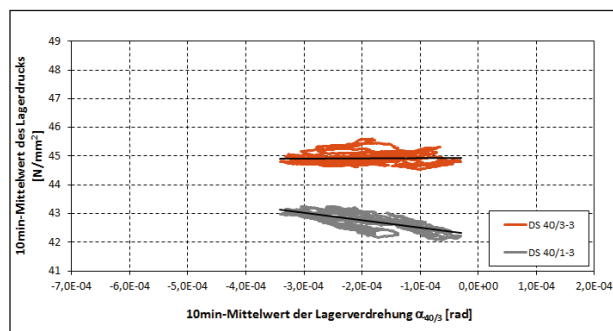


Bild 59: 10-minütiger Mittelwert der Lagerverdrehung versus 10-minütiger Mittelwert des Lagerdrucks im Zeitraum von 11.05. bis 23.05.2017

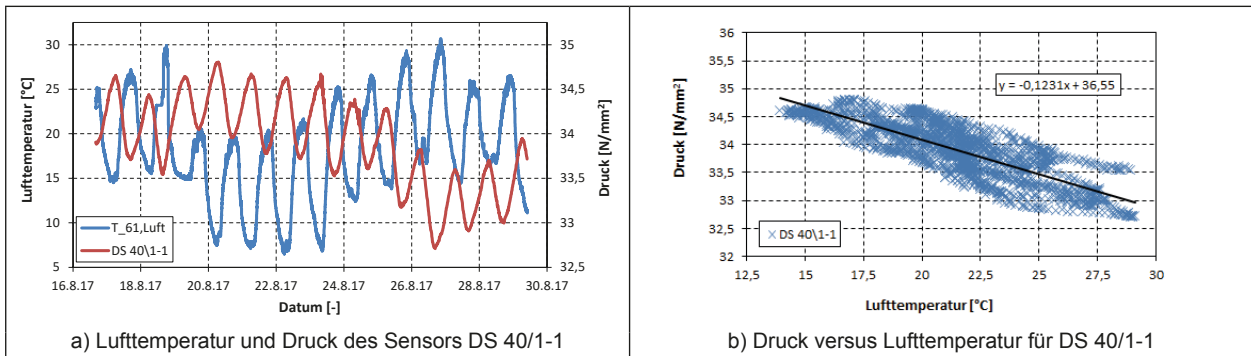


Bild 60: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-1 im August 2017

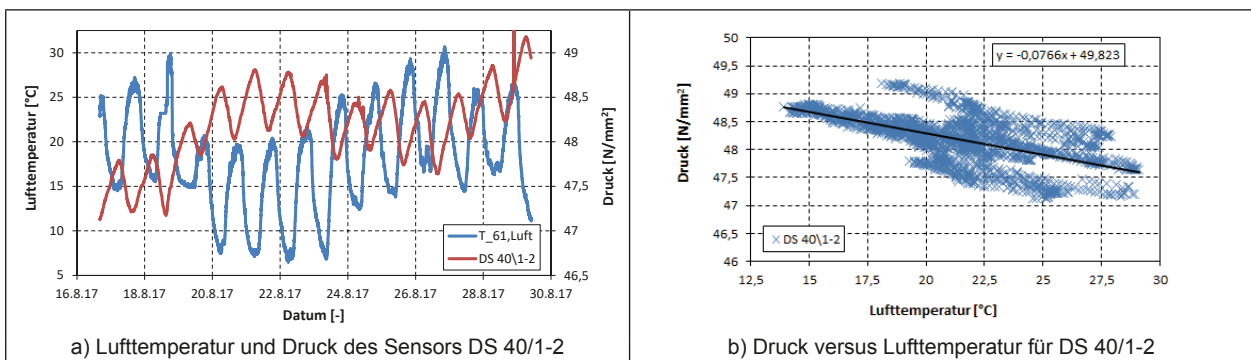


Bild 61: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-2 im August 2017

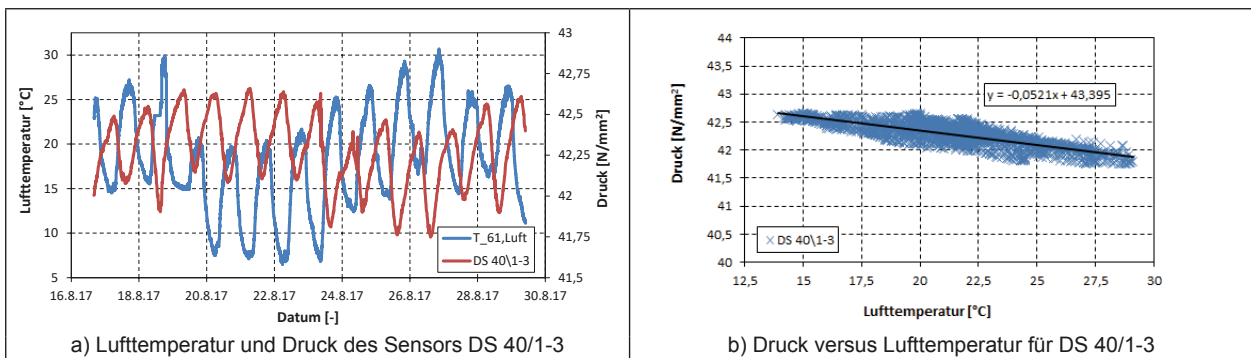


Bild 62: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-3 im August 2017

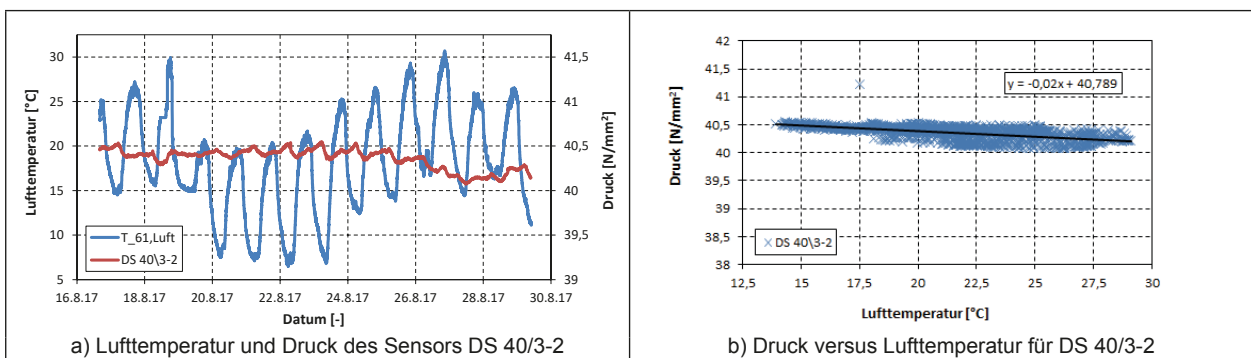


Bild 63: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/3-2 im August 2017

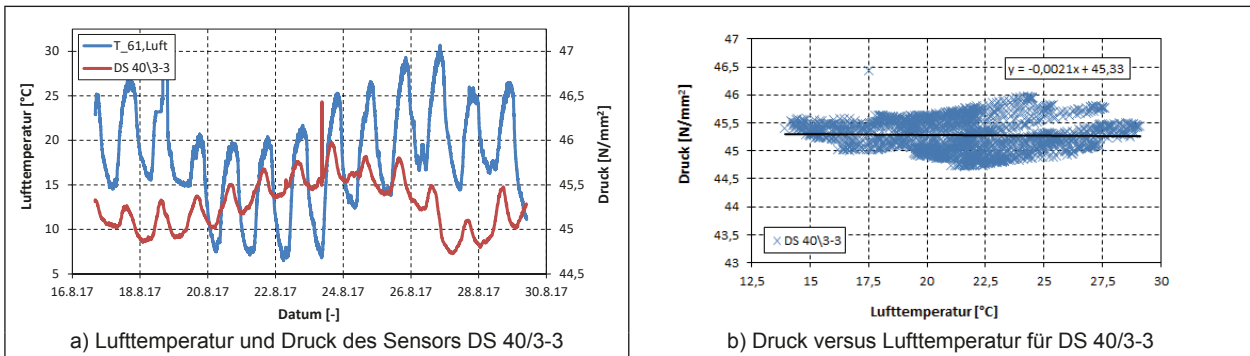


Bild 64: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/3-3 im August 2017

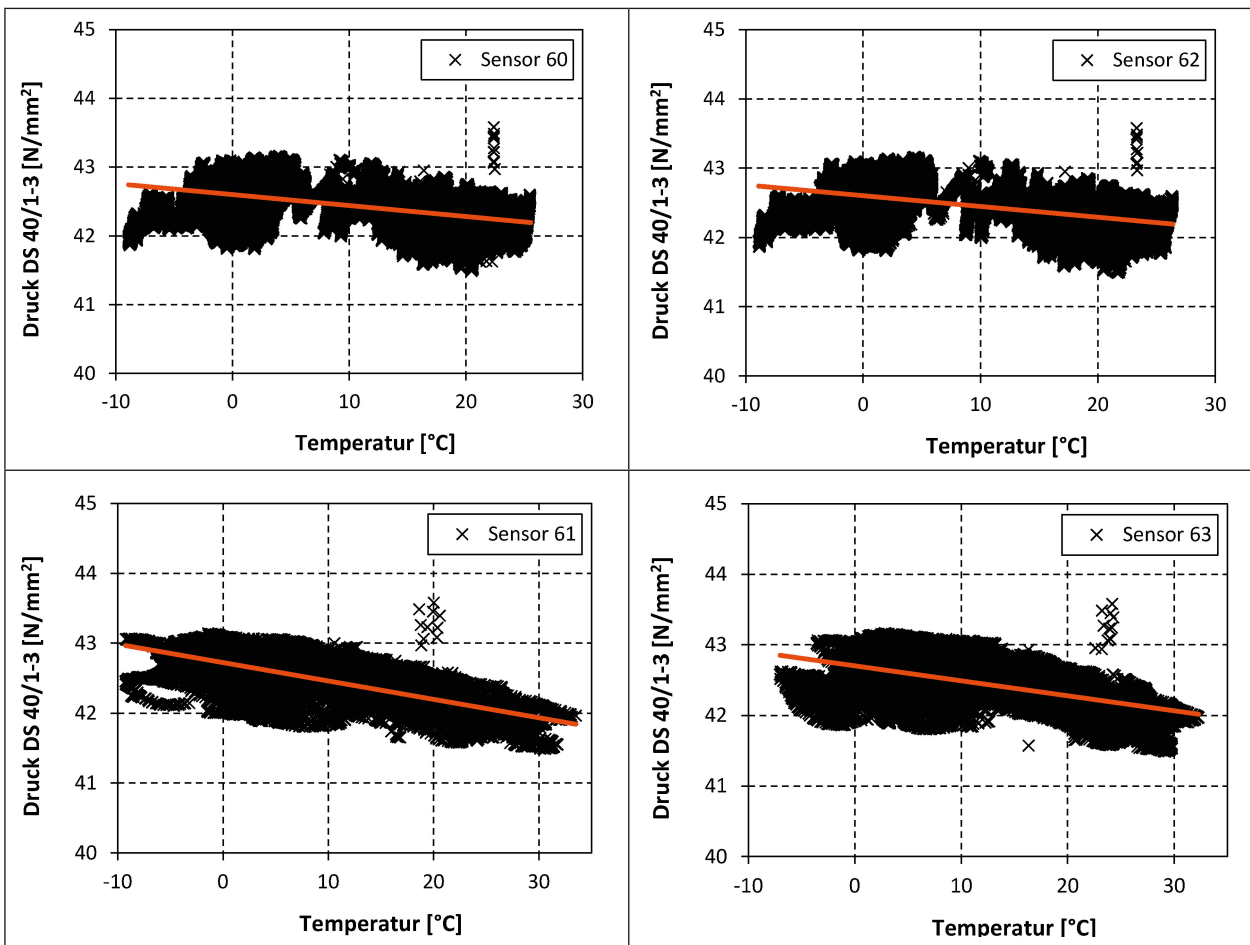


Bild 65: Druck DS 40/1-3 versus Luft- und Bauwerkstemperatur

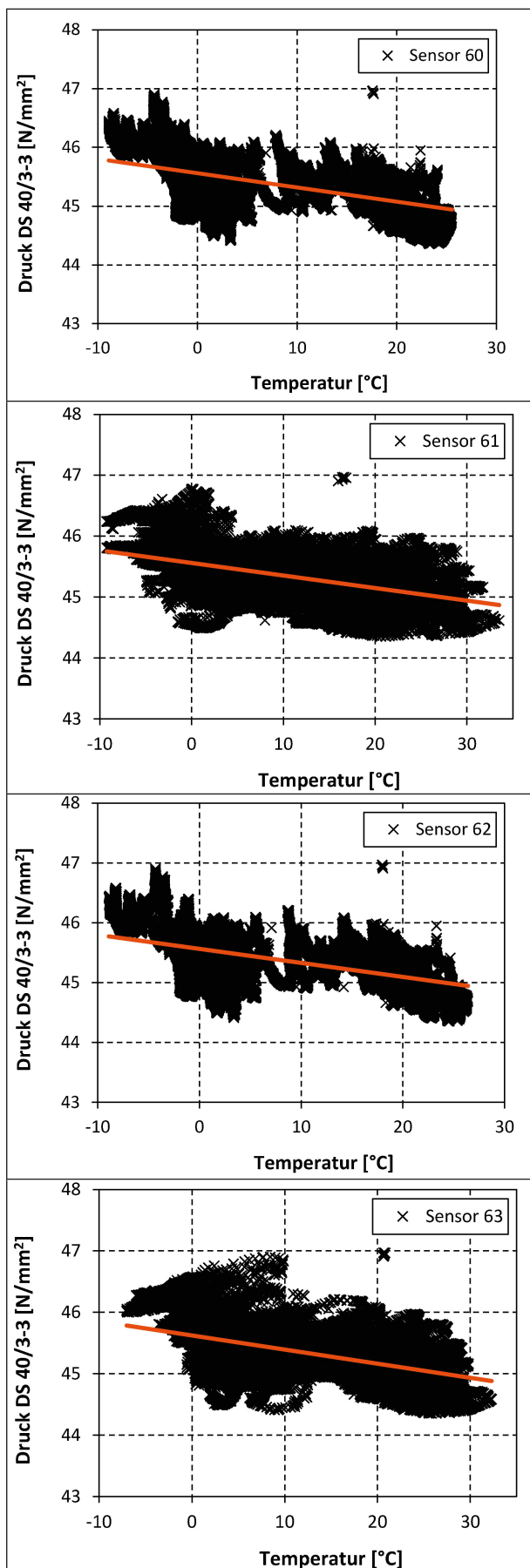


Bild 66: Druck DS 40/3-3 versus Luft- und Bauwerkstemperatur

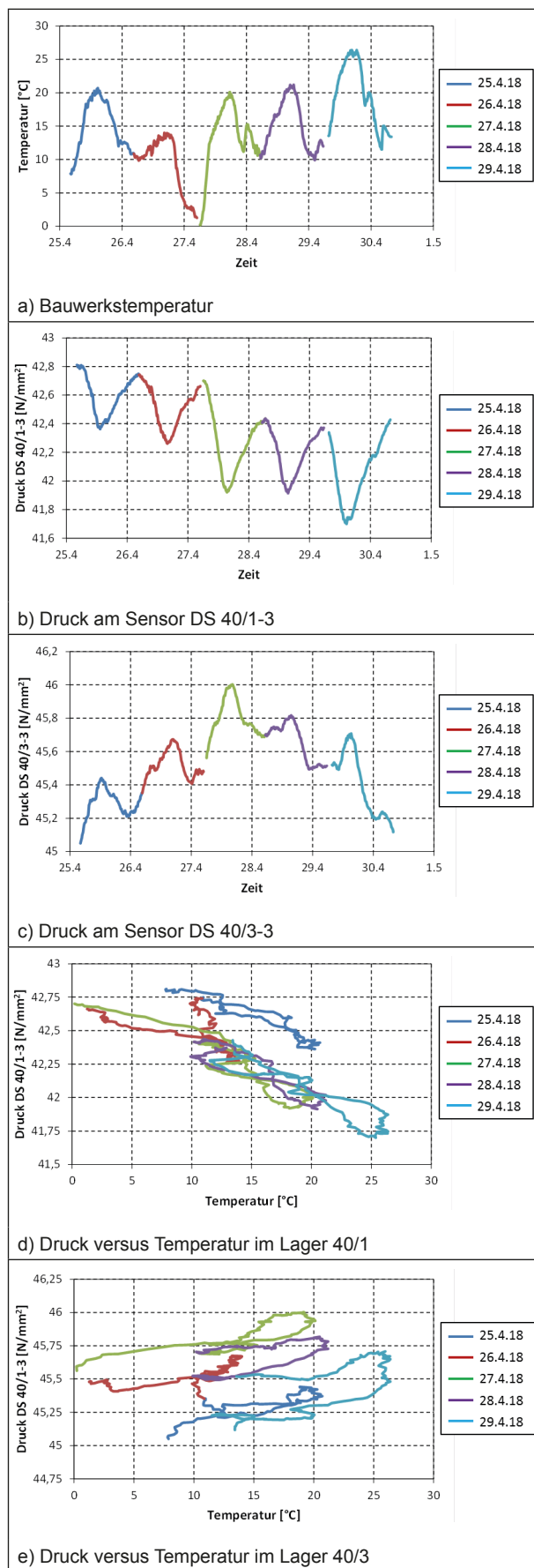


Bild 67: Tagesgänge der Druckänderungen versus Bauwerkstemperatur

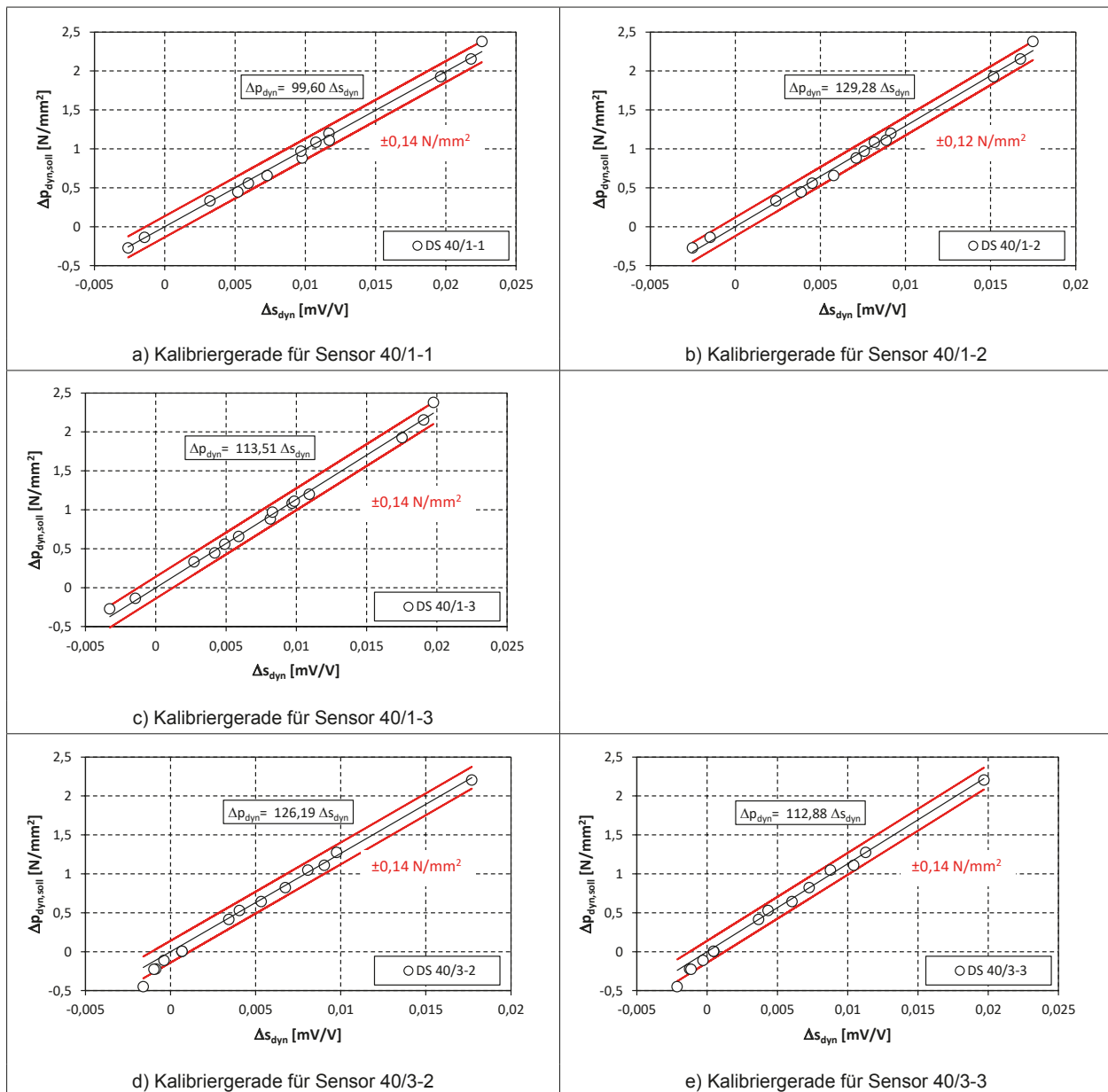


Bild 68: Kalibrierfunktionen für fluktuierende Druckschwankungen

5.6 Verkehrsinduzierte Lagerkraft

5.6.1 Kalibrierfunktionen zur Bestimmung der verkehrsinduzierten Lagerkraft

Die mit den Kalibrierfunktionen aus dem Labor (siehe Bericht [2]) ermittelten Druckänderungen infolge der Referenzfahrten von September 2016 ergeben zu kleine Drücke und damit zu kleine Lagereinwirkungen infolge Verkehr. Während im Labor die Lager mit dynamischen Schwellendruckbeanspruchungen mit $\pm 3 \text{ N/mm}^2$ belastet wurden, liegen die durch realen Verkehr hervorgerufene Druckschwankungen bei 0,5 bis 1,5 N/mm^2 . Daher sind die im Labor ermittelten Kalibrierfunktionen für diesen geringen Druckbereich nicht geeignet. Anhand der Messda-

ten der Referenzfahrten vom September 2016 wurden erneut Kalibrierfunktionen für die fluktuierenden Druckschwankungen infolge Verkehr ermittelt. Bild 68 zeigt die Ermittlung der Kalibrierfunktionen anhand der Messwerte sowie die zugehörige Toleranz.

Kalibrierfunktionen:

$$\Delta p_{dyn,40/1-1} = 99,60 \cdot \Delta s_{dyn,40/1-1}$$

$$\Delta p_{dyn,40/1-2} = 129,28 \cdot \Delta s_{dyn,40/1-2}$$

$$\Delta p_{dyn,40/1-3} = 113,51 \cdot \Delta s_{dyn,40/1-3}$$

$$\Delta p_{dyn,40/3-2} = 126,19 \cdot \Delta s_{dyn,40/3-2}$$

$$\Delta p_{dyn,40/3-3} = 112,88 \cdot \Delta s_{dyn,40/3-3}$$

Mit	t	Zeit
$\Delta s_{dyn,40/1-1}$ [mV/V]	fluktuierendes Signal des Drucksensors KGA 40/1-1	A_{MSM} Fläche des Gleitmaterials MSM
$\Delta s_{dyn,40/1-2}$ [mV/V]	fluktuierendes Signal des Drucksensors KGA 40/1-2	$\Delta p_{dyn,40/1-1}$ [mV/V] fluktuierender Druck des Drucksensors KGA 40/1-1
$\Delta s_{dyn,40/1-3}$ [mV/V]	fluktuierendes Signal des Drucksensors KGA 40/1-3	$\Delta p_{dyn,40/1-2}$ [mV/V] fluktuierender Druck des Drucksensors KGA 40/1-2
$\Delta s_{dyn,40/3-2}$ [mV/V]	fluktuierendes Signal des Drucksensors KGA 40/3-2	$\Delta p_{dyn,40/1-3}$ [mV/V] fluktuierender Druck des Drucksensors KGA 40/1-3
$\Delta s_{dyn,40/3-3}$ [mV/V]	fluktuierendes Signal des Drucksensors KGA 40/3-3	$\Delta p_{dyn,40/3-2}$ [mV/V] fluktuierender Druck des Drucksensors KGA 40/3-2
$\Delta p_{dyn,40/1-1}$ [mV/V]	fluktuierende Druck des Drucksensors KGA 40/1-1	$\Delta p_{dyn,40/3-3}$ [mV/V] fluktuierender Druck des Drucksensors KGA 40/3-3
$\Delta p_{dyn,40/1-2}$ [mV/V]	fluktuierende Druck des Drucksensors KGA 40/1-2	
$\Delta p_{dyn,40/1-3}$ [mV/V]	fluktuierende Druck des Drucksensors KGA 40/1-3	
$\Delta p_{dyn,40/3-2}$ [mV/V]	fluktuierende Druck des Drucksensors KGA 40/3-2	
$\Delta p_{dyn,40/3-3}$ [mV/V]	fluktuierende Druck des Drucksensors KGA 40/3-3	

Die gemessene Lagerkraft während der Referenzfahrten vom September 2016 sind in Anhang B dargestellt.

5.6.2 Ermittlung der Verkehrslast

Addition der Mittelwerte der fluktuierenden Lagerkräfte berechnet aus den Drucksignalen von Lager 40/1 und 40/3

$$Q_{v,dyn}(t) = \left(\frac{\Delta p_{40/1-1} + \Delta p_{40/1-2} + \Delta p_{40/1-3}}{3} + \frac{\Delta p_{40/3-2} + \Delta p_{40/3-3}}{2} \right) \cdot A_{MSM}$$

Aufgrund der Sensorausfälle wird die fluktuierende Lagerkraft wie folgt berechnet

Mit

$Q_{v,dyn}$ vertikale Lagereinwirkung infolge Verkehr auf die Lager der Achse 40

5.6.3 Ergebnisse

Aus der Summe der fluktuierenden Lagerkräfte von Lager 40/1 und 40/3 werden lokale Maxima, die größer als 20 kN (d. h. 2038 kg) sind, ermittelt (siehe Bild 69). Der untere Grenzwert von 20 kN wird gewählt, da 2,8 t Gesamtgewicht als Grenze zwischen Pkw und Transporter angesetzt wird (siehe TLS [10]). Zu beachten ist, dass Fahrzeuge, die gleichzeitig die Achse 40 überfahren, mit einer einfachen Peaksuche nicht separiert erfasst werden können. Wird die Lagerkraftmessung mit einer Verkehrserfassung (Fahrzeug, Geschwindigkeit) kombiniert, so würde das erfasste Kraftmaximum auf die Anzahl der gleichzeitig fahrenden Fahrzeuge verteilt werden können.

Bei der Peaksuche werden im geringen Verkehr auch Peaks erkannt, die bei der Belastung des ersten Brückenfelds an den Lagern der Achse 40 entstehen (siehe Bild 69) und die Einflusslinien im Kapitel 8. Bei höherem Verkehrsaufkommen werden diese Maxima durch die gleichzeitige Belastung der Brücke mit mehreren Lkws reduziert. Zu einer Steigerung der Genauigkeit der Erfassung des Lkw-Gesamtgewichts im regellosen Verkehr ist eine Berücksichtigung der Einflusslinien bei der Ermittlung des Lkw-Gesamtgewichts empfehlenswert.

Bild 70 zeigt eine Peak-Klassifizierung für den Zeitraum Oktober 2017 bis Mai 2018.

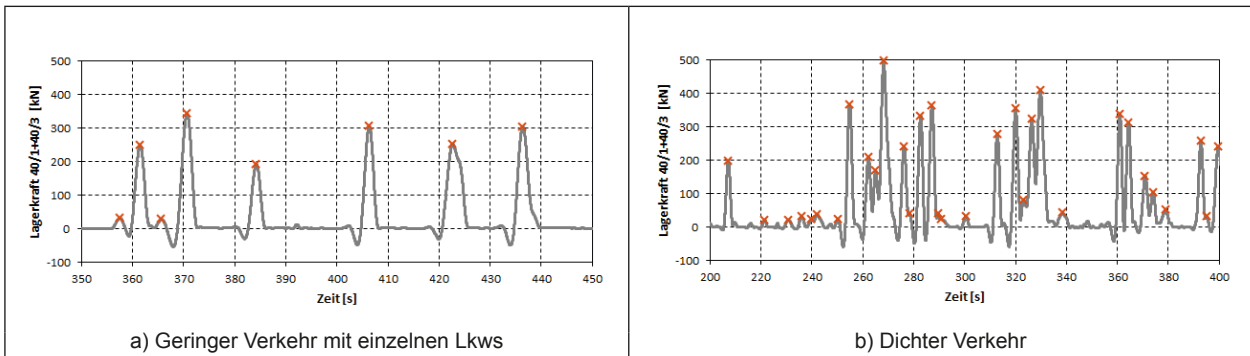


Bild 69: Peak-Suche in der Lagerkraftsumme

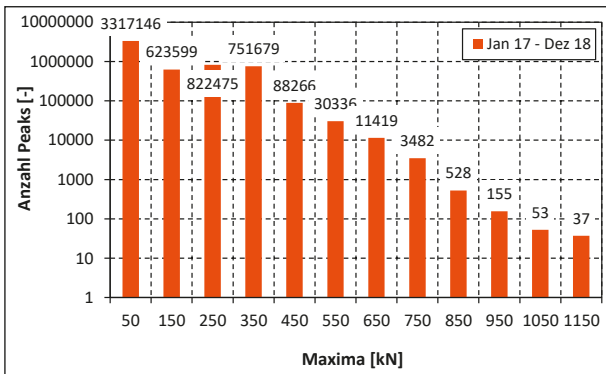


Bild 70: Peak-Klassifizierung für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2018

5.7 Statische Auswertung und Vergleich mit Bemessungswerten

5.7.1 Statistische Auswertung des quasi-stationären Verhalten der Lagerreaktionen

Die monatlichen Mittelwerte der quasi-stationären Lagerreaktion (siehe Bild 57) werden verwendet zur Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung (siehe Tabelle 8).

Die Standardabweichung ist so gering, dass die Änderung der quasi-stationären Lagerreaktion im Bereich der Genauigkeitstoleranz der Messlager liegt. Eine statistische Auswertung erscheint nicht sinnvoll.

5.7.2 Statistische Auswertung der verkehrsinduzierten Anteile der Lagerreaktionen

Die Monatsmaxima der Lagerkraftsumme werden verwendet, um eine 95 %-Quantile der Lagerkraft zu bestimmen (siehe Bild 71). Dieser Wert gibt lediglich einen Hinweis und kann nicht zum Vergleich mit Bemessungswerten verwendet werden, da die statistische Basis nicht ausreichend ist. Die 95 %-Quantilwerte betragen 1137 kN und 1021 kN.

	$F_{40/1}$	$F_{40/3}$
Mittelwert	8721,5 kN	9249 kN
Standardabweichung	76,5 kN	78 kN

Tab. 8: Mittelwert und Standardabweichung der monatl. Mittelwert der Lagerkraft für den Zeitraum Jan. 2017 bis Dez. 2018

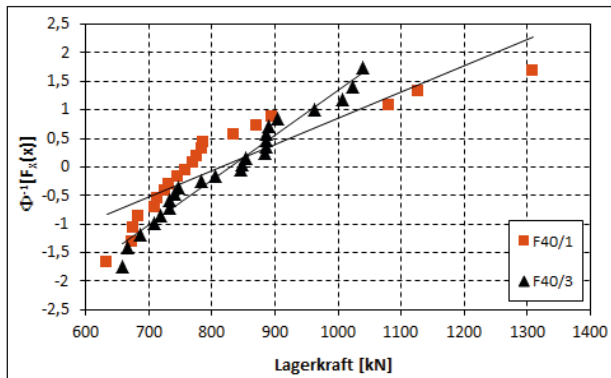


Bild 71: Statistische Auswertung der monatlichen Maxima der fluktuierenden Lagerkraftsumme für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2018

Der charakteristische Wert der Lagerkraft pro Lager mit dem Lastmodell LM 1, TS beträgt 1181 kN und mit LM1, UDL beträgt 3743 kN.

5.8 Analyse und Bewertung der Lagerreaktionen

Quasi-stationäre Lagerreaktionen

Es ist sehr anspruchsvoll, die quasi-stationäre vertikale Lagereinwirkung mit zufriedenstellender Genauigkeit in einem Kalottenlager zu messen. Die Verwendung von Drucksensoren erlaubt eine punktuelle Ermittlung des Drucks. Anhand dieser auf eine vertikale Auflast zu schließen, ist nur möglich, wenn die Druckzustände im Kalottenlager bekannt sind. Aufgrund der elasto-plastischen Materialeigenschaft des Gleitmaterials, den Herstellertoleranzen der konvexen Kalotte und dem konkaven Lagerunterteil sind die Druckzustände nicht ein-

heitlich. Eine Kalibrierung der Lager im Labor ist notwendig. Bei den Lagern 40/1 und 40/3 wurde durch die Kalibrierung eine Genauigkeit von $\pm 2 \text{ N/mm}^2$ erreicht, dies entspricht einer Genauigkeit der Lagereinwirkung von $\pm 410 \text{ kN}$.

In Bild 45 und Bild 46 ist deutlich zu erkennen, dass die Druckänderungen einen Tagesgang aufweisen. Es konnte keine ausreichende Korrelation zwischen gemessenen Luft- und Bauwerkstemperaturen (siehe Bild 65 und Bild 66) als auch der Lagerverdrehung um die y-Achse (siehe Bild 58 und Bild 59) ermittelt werden, um die gemessenen Drücke von den Tagesschwankungen zu bereinigen. Es wird vermutet, dass die Schwankungen durch eine temperaturinduzierte Lagerverdrehung um die x-Achse hervorgerufen werden aber, dass auch Einflüsse auf die Materialeigenschaften des Gleitmaterials und der Elastomerfolie zu Druckänderungen führen können. Eine Korrelationsanalyse mit Verdrehungen um die x-Achse sowie eine Temperaturfeldsimulation ist sinnvoll, um die dreidimensionalen Verformungs- und Spannungszustände zu erfassen, und anhand dieser die Druckänderungen im Lager zu plausibilisieren.

Die Lagerreaktion infolge Eigengewicht wird als monatlicher Mittelwert der quasi-stationären Lagereinwirkungen ermittelt. Der Mittelwert über die 24 Monate ergibt Lagerreaktionen infolge Eigengewicht, die größer sind als die Charakteristischen. Aufgrund der Genauigkeit der Sensoren und der Unkenntnis, ob Lagersetzungen eingetreten sind, sind die Abweichungen zwischen 1,04 und 1,27 akzeptabel, da sie geringer sind als der Teilsicherheitsbeiwert γ_G von 1,35.

Die Messung der vertikalen Lagerkraft infolge Eigengewicht mithilfe der instrumentierten Kalottenlager führt zu plausiblen und sinnvollen Ergebnissen. Es sind quasi-stationäre Anteile in der Lagerkraft detektierbar, die einen 24 h-Turnus aufweisen. Eine Bestimmung der Lagerkraft infolge Eigengewicht ist mit einer Genauigkeit von $\pm 410 \text{ kN}$ möglich. Allerdings führt der Vergleich mit Bemessungswerten aus statischen Berechnungen nur zu einem „Korridor“-Vergleich, da nicht separiert werden kann, welche Systemveränderungen, z. B. Stützensenkungen bereits eingetreten sind, bzw. den Einfluss der Herstelltoleranz des Bauwerks auf die Lagereinwirkungen.

Es wird empfohlen, die Genauigkeit der Lagermessung auf $\pm 0,5$ bis $\pm 1 \text{ N/mm}^2$ zu reduzieren und die

Lagerkraftmessung so früh wie möglich zu beginnen, um Bauwerksveränderungen, die zu Beginn eintreten, zu erfassen.

Fluktuierende Lagerreaktionen

Anhand der Drucksensoren lassen sich fluktuierende Lagerreaktionen infolge Verkehr gut und ausreichend genau erfassen. Da der Verkehr eine transiente Belastung hervorruft, bei denen das Gleitmaterial sich elastisch verhält, ist eine Kalibrierung der fluktuierenden Drucksignale anhand von Lkw-Referenzfahrten geeignet und ausreichend. Die Lkw-Gesamtgewichte werden mit einer Genauigkeit von $\pm 7 \%$ erfasst (siehe Bild 127).

Neben der Erfassung von permanenten und quasi-stationären Lagereinwirkungen ist die Erfassung der Verkehrslasten mit o. g. Genauigkeit eine neue Erkenntnis, die am BW402e gewonnen werden konnte.

5.9 Genauigkeit der Ergebnisse

Die durch Laborkalibrierung ermittelte Genauigkeit der Drucksensoren beträgt für statische Lasten $\pm 2 \text{ N/mm}^2$. Diese Genauigkeit dominiert die Genauigkeiten von dem Messdatenerfassungssystem, welches somit vernachlässigbar ist.

Aufgrund der hohen Anzahl ausgefallener Sensoren und das zwischen Juni und Oktober 2018 anormale Verhalten des Drucksensors DS 40/1-3 ist eine Untersuchung des Zustands der eingebauten Sensoren erforderlich, um die Ursache für den Ausfall zu finden. Derzeit konnte die Ursache noch nicht identifiziert werden. Deshalb werden an baugleichen Sensoren Alterungs- und Belastungstest durchgeführt.

So lange die Ursache für den Ausfall der Sensoren nicht bekannt ist, muss damit gerechnet werden, dass die Verbleibenden evtl. auch ausfallen.

Die fluktuierenden Drücke liefern eine Genauigkeit von $\pm 0,5 \text{ N/mm}^2$, was bei den wiederholten Referenzfahrten im April 2018 zu einer Genauigkeit von $\pm 7 \%$ bei der Bestimmung des Fahrzeuggesamtgewichts führt.

6 Brückeneigenfrequenz

6.1 Allgemeines

Die Brückeneigenfrequenzen sind eine Kenngröße für die Steifigkeit der Brücke. Mithilfe der Messung der Verdrehung der Kalotte bzw. der Abstände zwischen Lageroberteil und -unterteil wird das Schwingungsverhalten der Brücke erfasst.

6.2 Peak-picking Methode

Die peak-picking Methode ist eine elementare Frequenzbereichsmethode, die auf gemittelten normalisierten spektralen Leistungsdichten basiert.

Die gemittelten normalisierten spektralen Leistungsdichte werden in folgenden Schritten erzeugt:

1. Aufteilung der gemessenen Zeitreihe in mehrere Kapitel
2. Bearbeitung jedes Abschnitts mit einer Fensterfunktion (hier Hanning-Fenster), um den Leakage-Effekt zu reduzieren

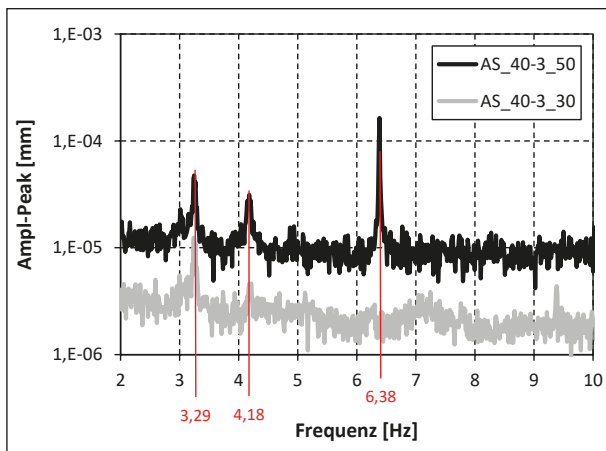


Bild 72: Gemittelte Frequenzspektren der Abstandsmessungen

3. Berechnung der diskreten Fouriertransformation jedes Kapiteles mithilfe einer FFT

4. Mittelung der Spektren aller Kapitel

Wenn die Anregung keine künstlichen periodischen Anteile enthält und wenn die Eigenfrequenzen des Bauwerks ausreichenden Abstand voneinander haben, dann stimmen die Maxima der mittleren spektralen Leistungsdichte mit den Eigenfrequenzen des dynamischen Systems überein.

Die Signale der Abstandsmessungen werden verwendet, um anhand gemittelter Spektren die Eigenfrequenzen zu ermitteln. In Bild 72 sind deutlich 3 Maxima zu erkennen. Während die ersten beiden Frequenzen gut mit den in [5] gemessenen übereinstimmen, ist die Frequenz von 6,38 Hz nicht eindeutig einer Eigenfrequenz zuzuordnen.

Bild 73 zeigt die ermittelten Eigenfrequenzen der Messdateien. Die Eigenfrequenzen werden durch peak-picking der Maxima im Spektrum im Bereich von 3-3,4 Hz für die 1. Eigenfrequenz, 4-4,4 Hz für die 2. Eigenfrequenz und 6,2-6,6 Hz für die 3. Eigenfrequenz ermittelt. Die große Streuung im Bereich der 3. Eigenfrequenz zeigt, dass dies keine tatsächliche Eigenfrequenz ist (siehe auch Ergebnisse in Kapitel 6.3, Bild 74). Die 1. und 2. Eigenfrequenz zeigen dagegen geringe Streuungen auf.

6.3 SSI-Cov Methode

Die Methode zur Bestimmung des stochastischen Unterraums basierend auf der Kovarianzmatrix (engl. Stochastic Subspace Identification method based on Covariance matrices - SSI-Cov) beruht auf einem diskreten stochastischen Modell des Zustandsraums. Bei diesem wird angenommen, dass

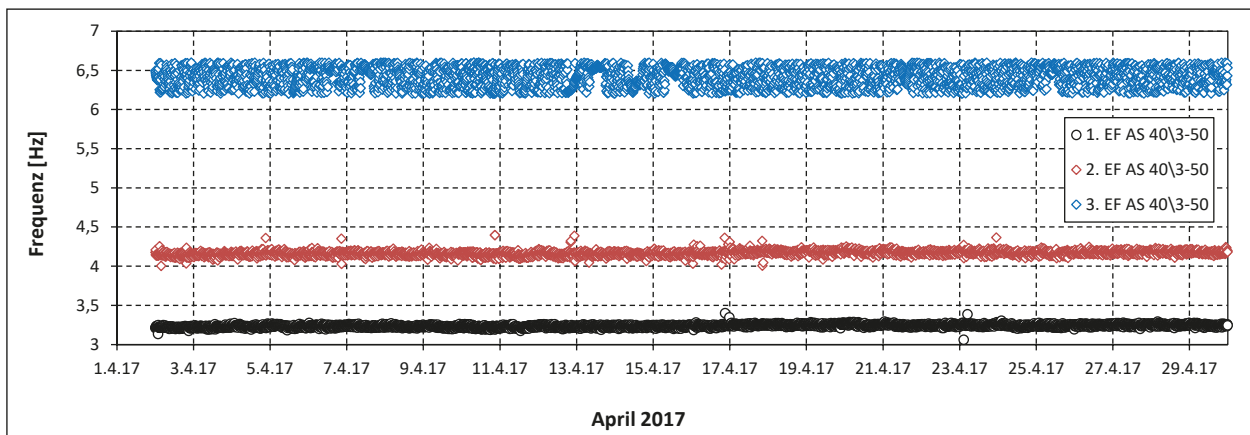


Bild 73: Eigenfrequenzen durch Peak-Picking der Abstandsmessung AS 40/3-50 im April 2017

die Anregung aus einem weißen Rauschen besteht. Mit folgenden Gleichungen wird der stochastische Zustandsraum beschrieben:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + w_k$$

$$y_k = C \cdot x_k + v_k$$

wobei

y_k Spaltenvektor mit l Elementen (Anzahl der gemessenen Antworten), der die Antwort des Systems zur Zeit k beschreibt

x_k Zustandsvektor mit n Elementen (Dimensionen des Zustandsraums)

w_k stellt das Rauschen dar, welches zur Nachbildung der ambienten Anregung und der Modellungenauigkeiten verwendet wird

v_k stellt das Rauschen dar, welches den Fehler abbildet, der von den Messsystemen und auch von der ambienten Anregung eingeleitet wird

A Zustandsübergangsmatrix ($n \times n$), die vollständig die dynamischen Eigenschaften des Systems beschreibt

C Ausgangsmatrix ($l \times n$), die angibt, wie die inneren Zustände in die Antworten transformiert werden

Die über die Kovarianzmatrix gesteuerte SSI-Cov Methode benutzt die Korrelationen der gemessenen Bauwerksantworten, um die Matrizen A und C zu ermitteln. Die Bestimmung der Matrizen A und C basiert auf der Faktorzerlegung der Korrelation und auf den mathematischen Operationen der Singulärwertzerlegung und der Moore-Penrose Pseudoinversen [1].

Nach der Bestimmung des Zustandsraummodells können die modalen Eigenschaften aus den Matrizen A und C bestimmt werden. Die Eigenwertzerlegung von A ergibt:

$$A = \Psi \cdot \Lambda_d \cdot \Psi^{-1}$$

wobei

Ψ Matrix der Eigenvektoren ($n \times n$)

Λ_d Diagonalmatrix ($n \times n$), die die Eigenwerte mit des diskreten Zustandsraummodells enthält.

Die Eigenfrequenzen i und die Dämpfungsmaße ξ_i werden ermittelt mit

$$\mu_i = e^{\lambda_i \Delta t} \quad \lambda_i, \lambda_i^* = -\xi_i \cdot \omega_i \pm j \sqrt{1 - \xi_i^2} \cdot \omega_i$$

wobei

λ_i Eigenwerte des kontinuierlichen Zustandsraummodells

Δt Zeitintervall als Inverse der Abtastrate

Die Modalformen V ($l \times n$) werden mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$V = C \cdot \Psi$$

wobei

i Eigenwerte des kontinuierlichen Zustandsraummodells

t Zeitintervall als Inverse der Abtastrate

Die Modalformen V ($l \times n$) werden mit der folgenden Gleichung berechnet:

Zur Bestimmung des Zustandsraummodells ist eine Modellordnung erforderlich. Da es jedoch nicht möglich ist, bei realen Bauwerken die Modellordnung, die mit den Messdaten übereinstimmt und realistisch das dynamische Verhalten des Bauwerks beschreibt, vorherzusagen, werden zunächst die modalen Parameter geschätzt, indem verschiedene Modellordnungen betrachtet werden. Die ermittelten modalen Größen werden in einem Stabilitätsdiagramm dargestellt (siehe z. B. Bild 74), welches die mit größer werdender Ordnung stabilen modalen Größen erkennbar macht. Diese haben eine physikalische Bedeutung, während die anderen numerische Moden sind, die zur Modellierung des Rauschens, was in den Messdaten vorhanden ist, erforderlich sind.

Da die geschätzte Modellordnung nicht unbedingt mit der realen übereinstimmt, wird bestimmt

- ein Teil der Moden, wenn der geschätzte Wert der Modellordnung zu klein ist, oder
- ein Teil der tatsächlichen Moden zuzüglich scheinbarer, nicht realer Moden, wenn der geschätzte Wert der Modellordnung zu groß ist.

Die Bestimmung wird für Modellordnungen von 4 bis 50 durchgeführt. Falls dieselben Frequenzen für verschiedene Modellordnungen ermittelt werden,

sind diese relevant. Andernfalls sind es scheinbare Moden. Ein Dämpfungsmaß und eine Modalform gehören auch zu jeder dieser Frequenzen.

Ein Stabilisationsdiagramm zeigt, ob eine Frequenz stabil ist oder nicht, indem die ermittelten Frequenzen für jede Modellordnung dargestellt werden. Die Stabilität der Frequenz wird geprüft, indem ein Vergleich der Ergebnisse mit der vorhergehenden Modellordnung durchgeführt wird:

- Wenn von der vorhergehenden Modellordnung dieselbe Frequenz mit einer Genauigkeit von 1 %, das Dämpfungsmaß mit einer Genauigkeit von 5 % und die Modalform mit einer Genauigkeit von 3 % gefunden werden, dann ist es ein frequenz-, dämpfung- und modalformstabiler Pol. Dieser wird mit '•' dargestellt.
- Wenn von der vorhergehenden Modellordnung dieselbe Frequenz mit einer Genauigkeit von 1 % und das Dämpfungsmaß mit einer Genauigkeit von 5 % gefunden werden, dann ist es ein frequenz- und dämpfungsstabiler Pol. Dieser wird mit '•' und einem 'd' dargestellt.
- Wenn von der vorhergehenden Modellordnung dieselbe Frequenz mit einer Genauigkeit von 1 % gefunden wird, dann ist es ein frequenzstabiler Pol. Dieser wird mit '•' und einem 'v' dargestellt.
- Wenn von der vorhergehenden Modellordnung dieselbe Frequenz mit einer Genauigkeit größer als 1 % gefunden wird, dann ist es ein neuer Pol. Dieser wird mit '•' dargestellt.

Wenn die Messdaten eine gute Qualität aufweisen, dann sollten die realen, physikalischen Eigenfre-

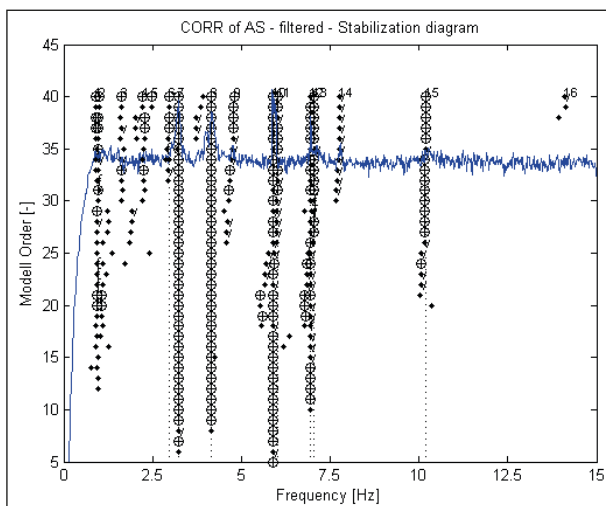


Bild 74: Stabilisationsdiagramm der Abstandsmessung zwischen Lageroberteil und -unterteil

quenzen deutlich als vertikale Linien mit Kreisen erscheinen. Falls eine harmonische Anregung wirkt, können dort gerade Linien sein, die aber nicht zu einer Eigenfrequenz gehören.

Bild 74 zeigt das Stabilisationsdiagramm der Abstandsmessungen mit AS 40/3-30 und AS 40/3-50 zu einer verkehrsarmen Zeit (insgesamt 3 Überfahrten während 10 Minuten). Hier sind ebenfalls deutlich als Eigenfrequenzen zu erkennen 3,24 Hz und 4,16 Hz. Allerdings ist die dritte Frequenz bei 5,88 Hz. Die Abweichung zu den Ergebnissen der Peak-picking Methode sind noch weiter zu untersuchen.

7 Datenaustausch und -vergleich mit RTMS

7.1 Allgemeines

Die aufgezeichneten Messdaten der Lagerverschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung am Lager 40/1 und 40/3 vom 8.12.2017 von RTMS (Road Traffic Management System vom Ingenieurbüro Freundt) und mmS (Maurer Monitoring Systems) werden verglichen und analysiert bzgl. zeitlicher Synchronität (siehe Kapitel 7.2) und Übereinstimmung der Messgrößen (siehe Kapitel 7.3).

7.2 Synchronisierte Datenerfassung von RTMS und Maurer

7.2.1 Zeitkanal in Relativzeit

Seit dem 12.10.2017 wird für eine Zeitsynchronisation der verschiedenen Messsysteme eine NTP-Synchronisierung durchgeführt (siehe Zwischenbericht FE 15.0631, Kapitel 2.4). Die Genauigkeit durch NTP-Synchronisierung wird mit 20 ms angegeben.

Tabelle 9 listet die Eigenschaften der beiden Systeme RTMS und mmS bezüglich der Zeiterfassung auf. mmS führt die NTP-Synchronisierung alle 256 sec durch, RTMS alle 64 sec bis 128 sec. Während mmS jeweils 10 Minuten aufzeichnet und eine Datei erzeugt, speichert RTMS alle 60 Minuten eine Messdatei. In den Messdateien besteht der Zeitkanal aus relativen Werten, d. h. bei mmS läuft die Zeit jeweils von 0 bis 600 sec bei RTMS von 0 bis 3601,93359 sec. Während bei mmS zwischen den Messdateien jeweils 10 sec nicht aufgezeichnet wird aufgrund eines Reset-Vorgangs der Ladungs-

	RTMS	MMS
NTP-Synchronisationsintervall	64 bis 128 sec	256 sec
Aufzeichnungsintervall	60 min	10 min
Zeitlicher Versatz zwischen Aufzeichnungsintervall	-2 sec (überlappende Aufzeichnung)	10 sec (Datenverlust)
Abtastrate	75 Hz	50 Hz
Format des Zeitkanals	Relative Zeit von 0 bis 3601,93 sec (Real32)	Relative Zeit von 0 bis 599,98 sec (Real32)
Format der Uhrzeit am Ende der Messung	DD.MM.YYYY hh:mm:ss	DD.MM.YYYY hh:mm:ss
Maximale zeitliche Abweichung	+ 1 sec	+ 1 sec

Tab. 9: Systemeigenschaften von RTMS und mmS zur Erfassung der Zeit

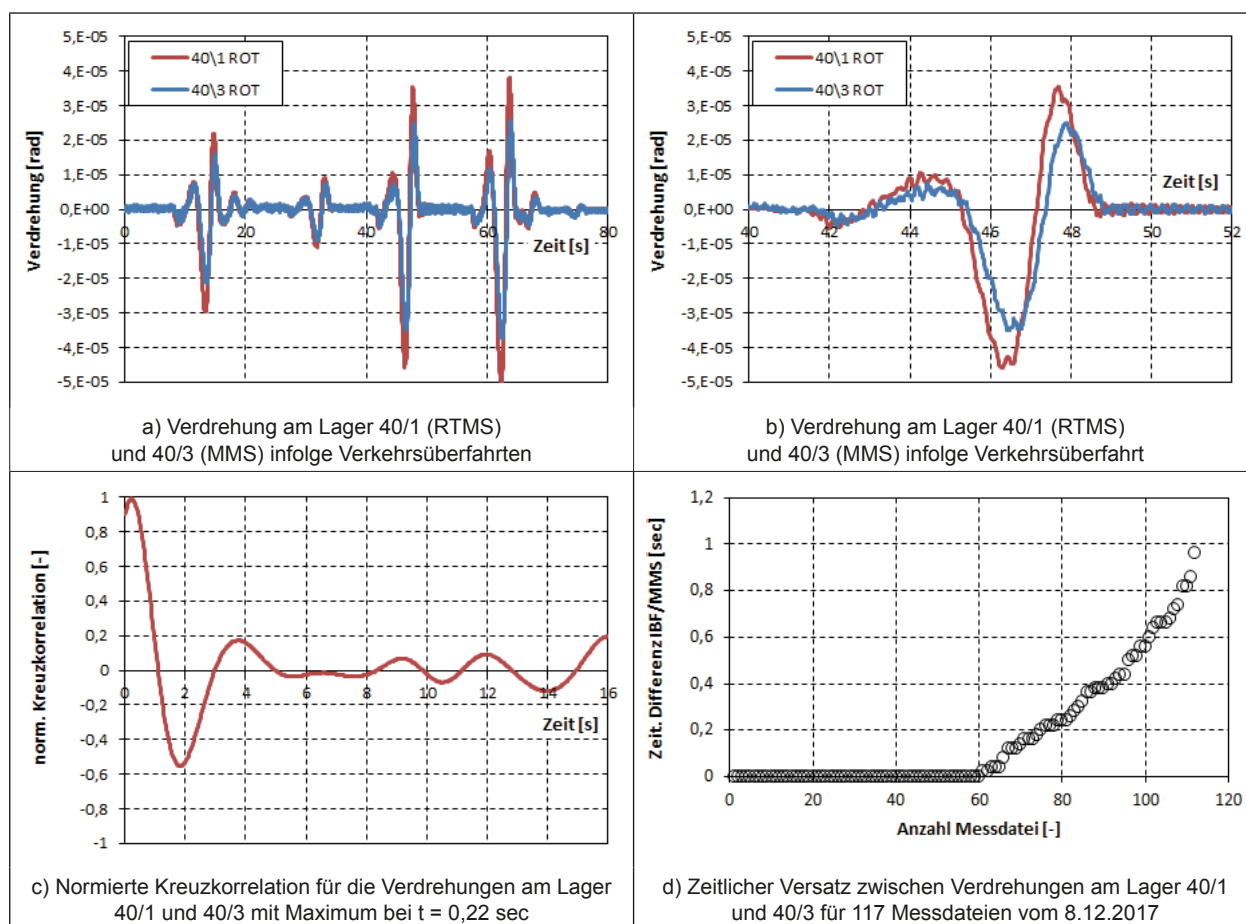


Bild 75: Verdrehung von Lager 40/1 und 40/3, zugehörige Kreuzkorrelation und zeitlicher Versatz zwischen RTMS und mmS aus 10-minütigen Messdateien

verstärker der Kraftmessringe, wird bei RTMS ca. 2 sec überlappend aufgezeichnet. Die Abtastrate beträgt bei mmS 50 Hz und bei RTMS 75 Hz. Beide Systeme speichern die Uhrzeit am Ende der Messung im Format „dd.mm.yyyy hh:nn:ss“. Beide Systeme speicherten bis Januar (RTMS) bzw. April (MMS) 2018 einen Zeitkanal mit relativer Zeit, d. h. in jeder Messdatei fängt der Zeitkanal bei 0 sec an. Anhand dieser Uhrzeit und der relativen Zeit aus der Messdatei lässt sich die Uhrzeit zu jedem Messwert ermitteln, allerdings mit einer absoluten Genauigkeit von ± 1 sec, da der Bezug nur auf das Format „DD.MM.YYYY hh:mm:ss“ geht.

Für die Messdaten vom 8.12.2017, die zwischen 0 Uhr und 18:53 Uhr von mmS und RTMS aufgezeichnet wurden, wird der zeitliche Versatz der Messdateien anhand der verkehrsinduzierten Lagerverdrehung um die y-Achse ermittelt. Unter der Annahme, dass die Lagerverdrehung infolge Verkehr an beiden Lagern zeitsynchron auftritt, lässt sich am Maximum der Kreuzkorrelation zwischen Lagerverdrehung 40/1 (RTMS) und Lagerverdrehung 40/3 (MMS) die Zeitverschiebung zwischen den Messdateien ermitteln (siehe Bild 75). Um eine Kreuzkorrelation zu ermitteln, ist es notwendig die Zeitreihen der Lagerverdrehungen auf dieselben

zeitlichen Stützstellen zu beziehen. Dafür werden die RTMS-Messdaten linear interpoliert auf die Stützstellen der mmS-Zeitkanäle.

Die Untersuchung zeigt, dass bei der Hälfte der Messdateien kein zeitlicher Versatz festzustellen ist. Der zeitliche Versatz zwischen den übrigen Messdateien streut zwischen 0,02 sec und 0,98 sec. Der zeitliche Versatz wird von der niedrigeren Abtastrate (hier 50 Hz) bestimmt. Da der maximale zeitliche Versatz von dem Format der Speicherzeit als Referenzuhrzeit bestimmt wird, wird deshalb mmS und RTMS umgestellt, sodass der Zeitkanal der Messdateien eine absolute Uhrzeit in Sekunden ab Zeitpunkt 01.01.YYYY als Gleitkommazahlen enthält. Damit soll eine deutliche Erhöhung der zeitlichen Synchronität mit deutlich geringerer Streuung erreicht werden. Außerdem wird die NTP-Synchronisation so eingerichtet, dass RTMS und mmS vorrangig mit der NAS synchronisieren. Bei Ausfall der NAS werden sich RTMS und mmS untereinander über NTP synchronisieren.

7.2.2 Zeitkanal in Echtzeit

Bei RTMS wurde im Januar 2018 und im Maurer System Anfang April 2018 Zeitkanäle in Echtzeit eingestellt (siehe 2. Zwischenbericht zu Projekt FE 15.0615 [3]). Jede Messdatei besitzt Zeitkanäle, die die Anzahl der Sekunden seit 01.01.0000 als Dezimalzahlen aufweisen. Die Echtzeit ist über NTP synchronisiert (siehe Kapitel 7.2.1). Die synchrone Zeiterfassung ist jetzt nur noch durch die unterschiedlichen Abtastraten bedingt.

7.3 Verschiebung und Verdrehung am Lager 40/1 und 40/3

7.3.1 Beschreibung der Sensoren

Für die folgenden Vergleiche der Verschiebung und Verdrehung werden die Messdaten der Wegsensoren der Lager 40/1 von RTMS und die der Wegsensoren am Lager 40/3 von Maurer vom 8.12.2017, die zwischen 0 Uhr und 18:53 Uhr ausgewertet, verwendet. Tabelle 10 listet die Eigenschaften der Wegsensoren auf.

7.3.2 Verschiebung der ebenen Gleitfläche

In Bild 76 ist deutlich zu erkennen, dass die Genauigkeit und Auflösung des Sensors MS30h gegenüber WA 40/3 besser ist. Während das Rauschen im Signal von WA 40/3 eine Größenordnung von ca. $\pm 0,02$ mm beträgt, so ist es im Signal von MS30h bei ca. $\pm 0,001$ mm. Aufgrund der Genauigkeit und Auflösung erfasst der Sensor MS30h kurzzeitige Spitzen, die durch Verkehr hervorgerufen sind.

In Bild 77 a) wird die quasi-stationäre Verschiebung als 10-minütiger Mittelwert dargestellt. Während die maximale relative horizontale Verschiebung am Lager 40/1 ca. 0,15 mm beträgt, stellt sich am Lager 40/3 eine relative horizontale Verschiebung von 0,40 mm ein. Dieser Unterschied zeigt sich auch im akkumulierten Gleitweg in Bild 77 b). Die maßgebende Ursache liegt in der nicht-einheitlichen Temperaturverformung der Brücke.

Aufgrund der Genauigkeit und der Auflösung des Messsignals von MS30h werden die verkehrsinduzierten ebenen Lagerverschiebungen am Lager 40/1 untersucht. Während Bild 78 a) das Tiefpassgefilterte Messsignal von MS30h am Lager 40/1 zeigt, wird in Bild 78 b) die aus der Verdrehung be-

Messgröße	Horizontale relative Bewegung zwischen Lageroberteil und -unterteil		Vertikale relative Bewegung zwischen	
			Brückendeck und Lagersockel	Lageroberteil und -unterteil
System	RTMS	MMS	RTMS	MMS
Sensorbezeichnung	MS30h 40/1	WA 40/3	MS29v, MS28v, MS27v	AS 40/3-30, AS 40/3-50
Lage	Lager 40/1	Lager 40/3	Lager 40/1	Lager 40/3
Sensortyp	Induktiver Wegaufnehmer	Magneto-resistiver Wegaufnehmer	Induktiver Wegaufnehmer	Kapazitiver Abstandssensor
Messbereich	0...50 mm	0...250 mm	0...2 mm	0...2 mm
Nullzustand	30mm ausgefahren in der KW 27/2016	angepasst an Lager-skala am 07.07.2016	jeweils 0,3mm Abstand zum Überbau in der KW 27/2016	Jeweils 1mm Abstand zur oberen Lagerplatte am 07.07.2016

Tab. 10: Beschreibung und Eigenschaften der Wegsensoren

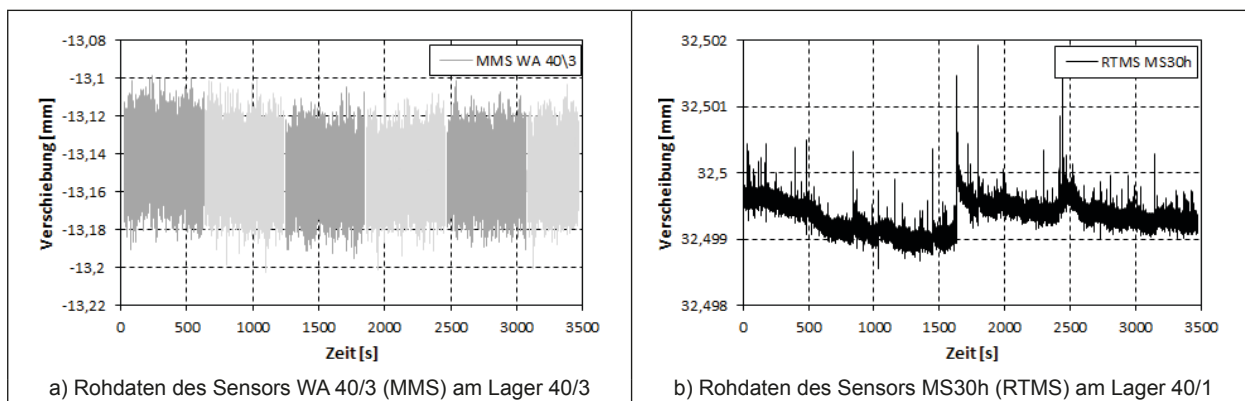


Bild 76: Rohdaten der Sensoren zur Erfassung der relativen horizontalen Verschiebung

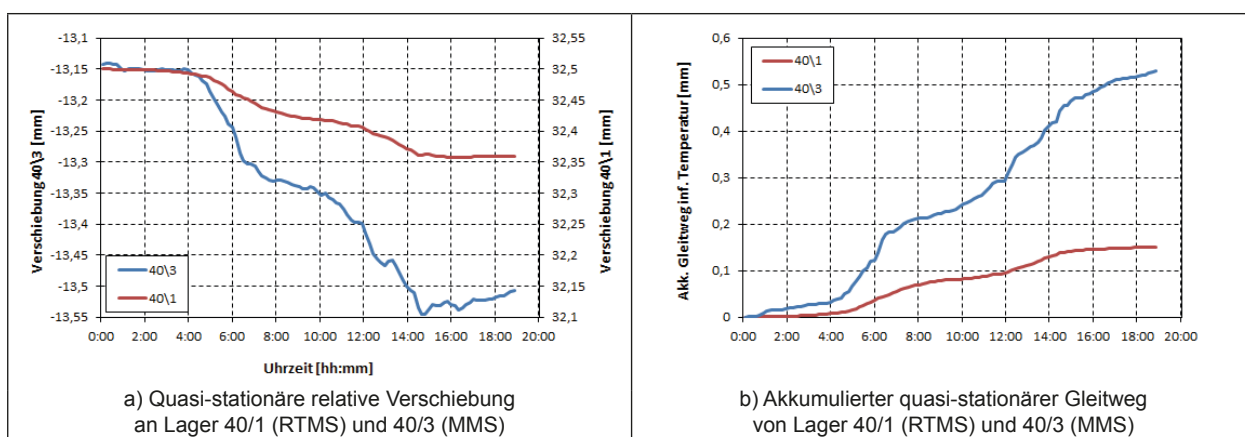


Bild 77: Quasi-stationäre Verschiebungen und akkumulierte quasi-stationäre Gleitwege von Lager 40/1 und 40/3

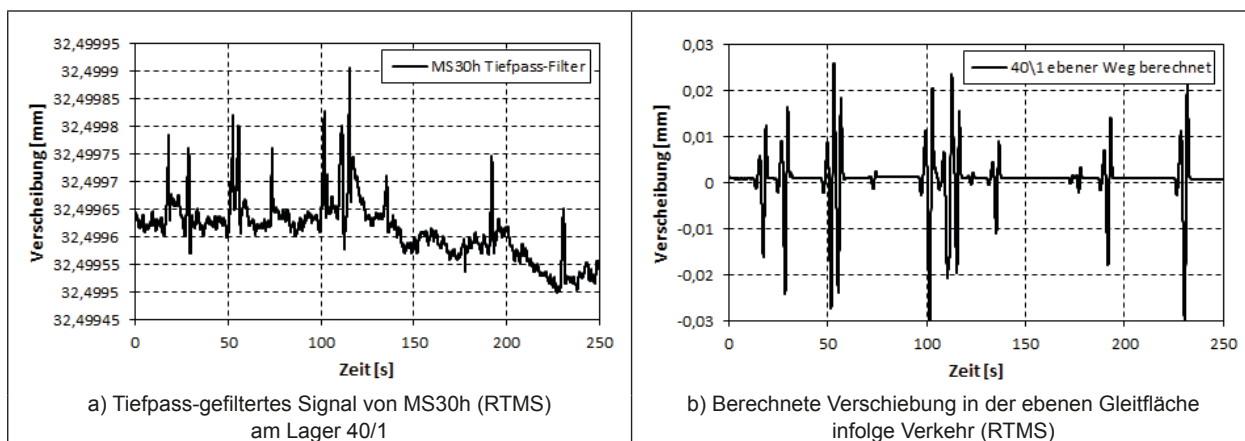


Bild 78: Gemessene und berechnete Verschiebung der ebenen Gleitfläche infolge Verkehr

rechnete ebene Lagerverschiebung gezeigt. Zu erkennen sind große Unterschiede. Während MS30h Verschiebungen von ca. $+0,0002$ mm registriert, so sind die am idealen Kalottenlagermodell (ohne Reibung ohne Elastizität) um ein hundertfaches größer ($\pm 0,002$ mm). Folgende Überlegungen ergeben sich bei der Analyse:

- Zum einen können die Maxima im MS30h durch eine Erschütterung des Tasters hervorgerufen

und nicht durch den Ausgleich der Verdrehung in der ebenen Gleitfläche.

- Die Verschiebung der ebenen Gleitfläche durch Verdrehung ist eine „schräge“ Ausgleichbewegung, die u. U. von dem horizontalen Sensor nicht erfasst wird.
- Die berechnete Verschiebung ist durch Vernachlässigung von Reibungseffekten und der Elastizität des Lagers konservativ.

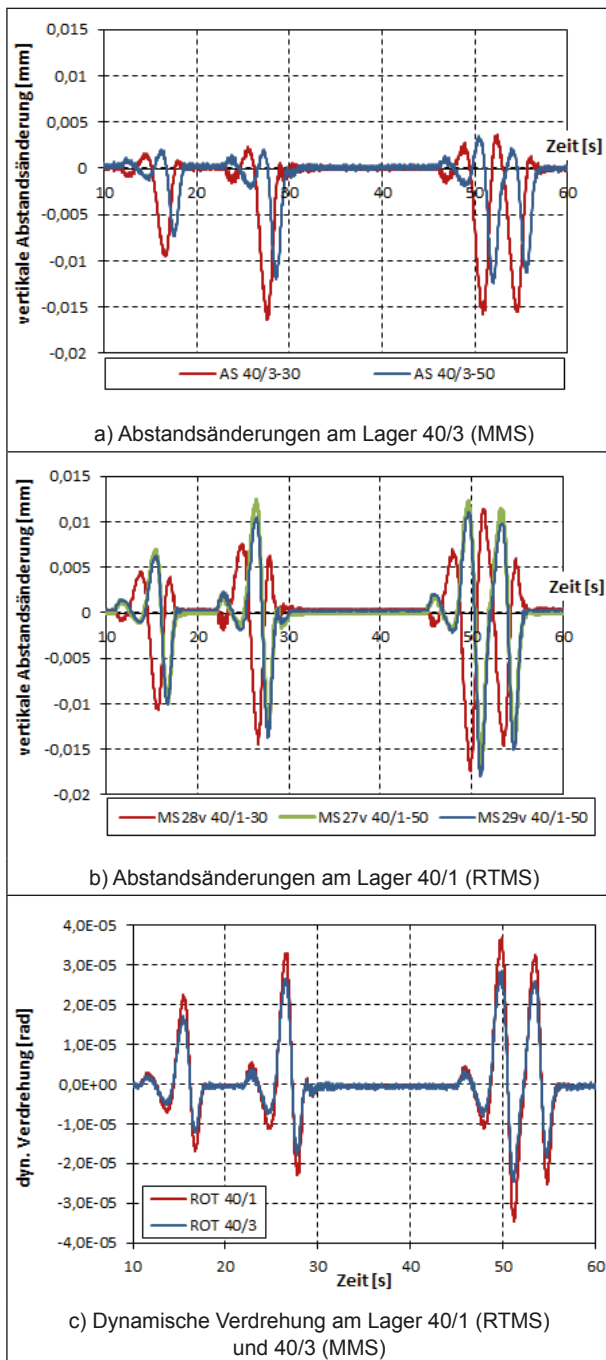


Bild 79: Abstandsmessungen am Lager 40/1 und 40/3 und berechnete Verdrehungen

Eine Überprüfung der berechneten Verschiebung ist nur durch weitere Sensoren möglich.

7.3.3 Verdrehung der Lager

Bild 79 zeigt die Abstandsmessungen sowie die berechneten Lagerverdrehungen am Lager 40/1 und 40/3. Zu erkennen ist, dass die Abstandsverringernungen, d. h. Brückendeck senkt sich, bei dem System mmS in einer ähnlichen Größenordnung sind wie bei dem Systems RTMS. Allerdings fallen die

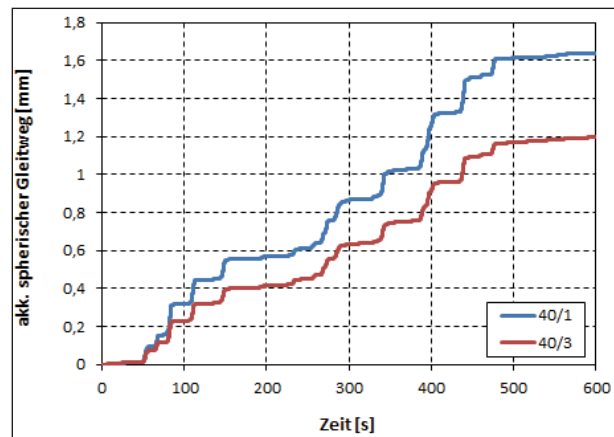


Bild 80: Akkumulierter Gleitweg in der konkaven Gleitebene infolge verkehrsinduzierten Verdrehungen für Lager 40/1 (RTMS) und 40/3 (MMS)

Abstandsvergrößerungen, d. h. Brückendeck hebt sich, bei dem System mmS deutlich kleiner aus als bei dem System RTMS. Die Sensoren RTMS zeigen eine deutlich größere Hebung an. Die berechnete Verdrehung allerdings verläuft bei beiden Systemen sehr ähnlich. Die Maxima und Minima beim System RTMS sind ca. 10 bis 20 % größer als die vom System mmS.

Während das System RTMS den Abstand zwischen Lagersockel und Überbau misst und damit das Verhalten des Brückendecks, werden beim System mmS der Abstand zwischen unterer und oberer Lagerplatte gemessen. Während die Brücke ein elastisches Materialverhalten aufweist, wirkt im Lager zusätzlich das elastoplastische Gleitmaterial MSM. Die geringeren Abstandsänderungen insbesondere bei Hebung können durch das elastoplastische Gleitmaterial kompensiert werden. Die durch überrollenden Verkehr hervorgerufene Verdrehung des Brückendecks erzeugt im Gleitmaterial eine veränderliche exzentrische Druckverteilung. Das Gleitmaterial wird in Abhängigkeit der Druckverteilung elastisch gestaucht und plastische Fließvorgänge zum Ausgleich der exzentrischen Druckverteilung setzen ein. Diese Vorgänge erzeugen eine Stauchung und verringern eine Streckung des Gleitmaterials. So wird die Verdrehung der Brücke durch das Gleitmaterial abgemindert. Weitere Abweichungen könne bedingt sein durch die Einbautoleranzen der Sensoren, der Toleranzen bei der Ausrichtung der Lager auf die Brückenachsen und der Einfluss der gekrümmten Brücke auf die Verdrehungen am Lager 40/1 und 40/3.

Bild 80 zeigt, dass infolge der größeren Verdrehungen am Lager 40/1 gegenüber dem Lager 40/3 auch der akkumulierte Gleitweg infolge verkehrsinduzierten

duzierten Verdrehungen um ca. 30 % in der konkaven Gleitfläche am Lager 40/1 größer ist. Da die Sensoren im Lager 40/3 die Bewegung der Kalotte erfassen, sind die akkumulierten Gleitwege des Lager 40/3 exakter.

8 Auswertung der verkehrsin- duzierten Anteile anhand Si- mulation

8.1 Allgemeines

Das Bauwerk BW402e ist eine zweispurige Spannbetonbrücke. Die vierfeldrige Brücke überspannt eine Länge von 155,75 m (siehe Bild 81). Die Breite des Überbaus beträgt inklusive Kappen 16,20 m. Es liegt eine Krümmung im Grundriss mit dem Radius 818,3 m vor. Die Brücke weist einen konstanten Hohlkastenquerschnitt auf. Lediglich an den Umlenk- und Stützstellen ist der Querschnitt verstärkt. Die Vorspannung erfolgt über externe Spannlieder.

Da an dem Bauwerk BW402e lediglich die beiden Lager der Achse 40 instrumentiert sind, ist es erforderlich zur Bestimmung der Genauigkeit der Auflastmessung an einem FE-Modell der Brücke Untersuchungen durchzuführen.

Zur Überprüfung der gemessenen verkehrsinduzierten Lagereinwirkungen mit der tatsächlichen Belastung aus Verkehr werden die Referenzfahrten (d. h. Kalibrierfahrten) an einem FE-Modell der Brücke mit kontinuierlich wandernden Einzellasten nachgebildet.

Dafür ist es notwendig, das FE-Modell so anzupassen, dass es mit dem tatsächlichen statischen und

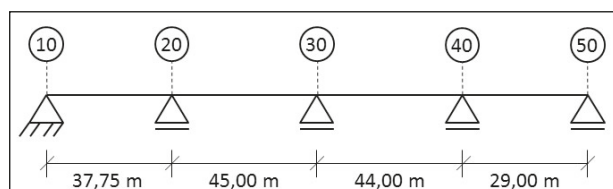


Bild 81: Statisches System der Brücke

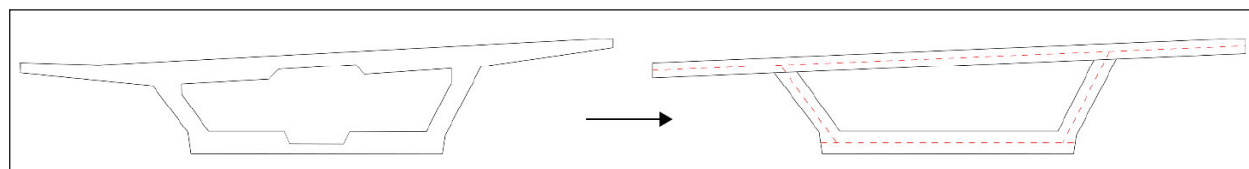


Bild 82: Vereinfachung der Geometrie des Querschnitts

dynamischen Verhalten der Brücke übereinstimmt, sowie das Lager im FE-Modell ausreichend genau darzustellen, um den Einfluss der Last-Exzentrizität und der Kalottenverdrehung auf die lokalen Drücke im Lager zu ermitteln.

8.2 Modellierung der Brücke

Die numerische Modellbildung erfolgt mit der Software ANSYS Workbench 19.0. Im Folgenden wird der Modellaufbau unterteilt in Geometrie, Material, Vernetzung und Randbedingungen beschrieben.

8.2.1 Geometrie

Für das numerische Modell wird die Geometrie der Brücke weitestgehend vereinfacht. Bild 82 zeigt auf der linken Seite den Regelquerschnitt der Brücke und auf der rechten Seite den vereinfachten Querschnitt für das Modell. Für diese Vereinfachung wurde jeweils die mittlere Höhe von Decke, Boden und Wänden des Hohlkastens gewählt (s. Anhang A). Die Maße des Querschnitts entsprechen denen in Bild 83. Aus diesem Querschnitt ergeben sich die in Rot dargestellten Mittelflächen, welche als Geometrie für das Modell dienen.

Über den Stützen entspricht der Hohlkastenquerschnitt einem Vollquerschnitt. Die Aussparung zur Begehung der Brücke bleibt im Modell unbeachtet. Das Modell der gesamten Brücke ist in Bild 84 veranschaulicht.

Zur Berücksichtigung der Kinematik der Lager werden an der Unterseite des Hohlkastenbodens kreisförmige Flächen eingepreßt (siehe Bild 85). Diese weisen den Radius der jeweiligen Kalotte auf und dienen zur Lagerung der Brücke (siehe Kapitel 8.2.4).

8.2.2 Material

Die Spannbetonbrücke wird vereinfacht mit einem Materialmodell mit den Eigenschaften von Stahlbeton C40/50 simuliert. Die dazugehörigen Eigenschaften sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Das Modell der Brücke hat mit der vorgegebenen Dichte ein Eigengewicht von 5.211.700 kg. Im Vergleich zur Statik mit 5.540.265 kg weist das Modell 6 % weniger Gewicht auf. Der Unterschied resultiert daraus, dass im Simulationsmodell Kappen, Geländer und Asphalt unberücksichtigt bleiben (+406.350kg). Zudem werden die Aussparungen im

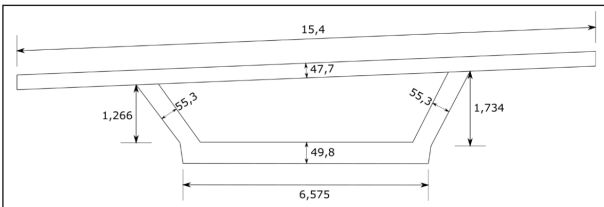


Bild 83: Maße des vereinfachten Brückenquerschnitts

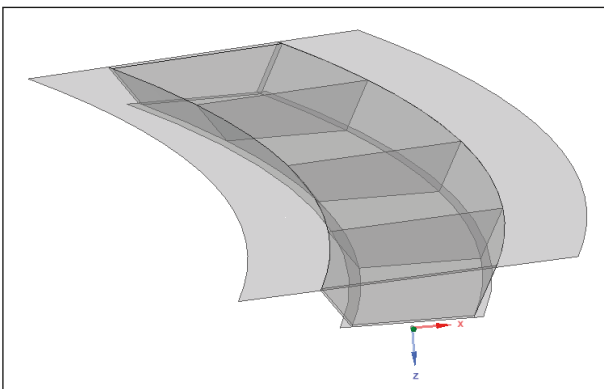


Bild 84: Schalenmodell der Brücke

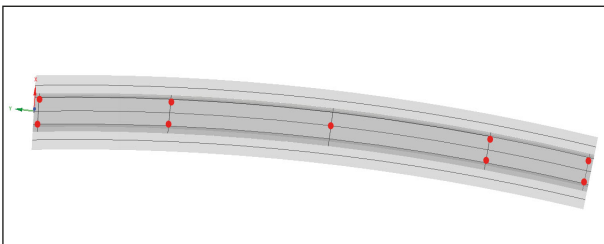


Bild 85: Auflagerflächen

Eigenschaft	Einheit	Wert
ρ	kg/m ³	2300
E	N/mm ²	35000
ν	-	0,18
f_{ck}	N/mm ²	40
f_{ctm}	N/mm ²	5

Tab. 11: Materialeigenschaften des Betons

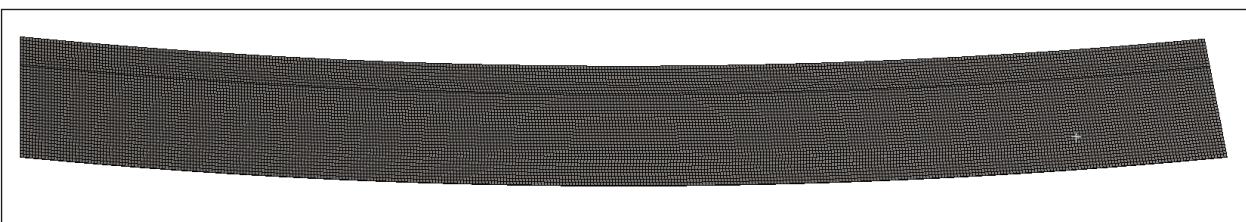


Bild 86: Vernetzung auf der Fahrbahn

Stützenquerschnitt vernachlässigt (-51.060 kg). Beide Faktoren entsprechen circa einem Gewichtszuwachs von 6,8 %, der in der Simulation nicht berücksichtigt ist.

8.2.3 Vernetzung

Die Vernetzung der Geometrie erfolgt mit quadratischen Schalenelementen. Das Netz besteht größtenteils aus Hexaedern um effektive sowie qualitative Ergebnisse zu erhalten (s. Bild 86). Zudem kann das so entstandene „Raster“ auf der Fahrbahn gleichzeitig zur besseren Lasteinleitung verwendet werden (Vernetzung im Kontaktbereich). Lediglich um die kreisförmigen Flächen der Lager sind Tetraeder-Elemente vorhanden (s. Bild 87).

Zur Beurteilung der gewählten Vernetzung können in ANSYS beispielsweise Qualität, Seitenverhältnis und Verzerrung der Elemente ausgegeben werden. Die Statistik in Bild 88 zeigt die Verteilung der Qualität des erzeugten Netzes. Der Wert 1,0 entspricht einem perfekten Würfel und entspricht dem Maximum. Die Qualität der Elemente wird über folgende Gleichung berechnet (ANSYS Inc., 2018):

$$\text{Qualität} = C \times \text{Fläche} / \Sigma(\text{Kantenlänge})^2$$

Sie entspricht für zweidimensionale Schalenelemente dem Verhältnis der Fläche zu der Summe der Kantenlängen. Der Faktor C hängt von der Elementform ab. Für die im Modell enthaltenen Vierecke entspricht C=4 und für die Dreiecke ist C=6,93 (ANSYS Inc., 2018).

Das erzeugte Netz hat eine gemittelte Qualität von 0,98, was als sehr gut zu bewerten ist. Dies ist wichtig für die Bewertung der Ergebnisse, da die Netzqualität die Ergebnisqualität beeinflusst.

Insgesamt besteht das Netz aus circa 30.000 Elementen und 90.000 Knoten.

8.2.4 Randbedingungen

Der aus Schalen bestehende Querschnitt ist über „Share Topology“ verbunden. Dadurch wird die Brü-

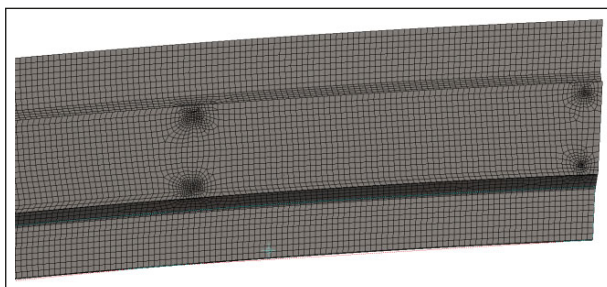


Bild 87: Vernetzung im Auflagerbereich



Bild 88: Elementqualität

ACHSE \ LAGERREIHE	⑩	②①	③①	④①	⑤①
1	○	⊕		⊕	⊖
2			⊕		
3	⊕	⊕		⊕	⊕

Bild 89: Lagersystem [4]

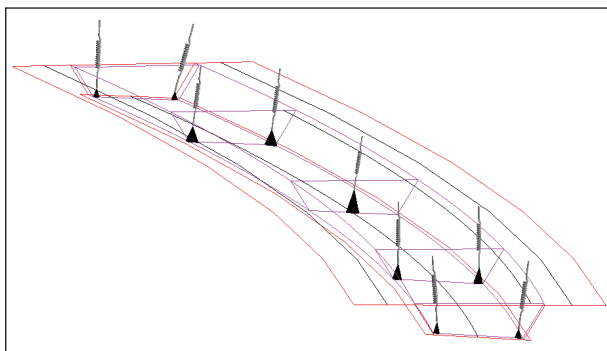


Bild 90: Lagerung über externe Punkte und Federn

cke bei der Berechnung als eine Komponente betrachtet und es sind keine Kontaktdefinitionen nötig.

Das Lagersystem ist in Bild 89 dargestellt. Im Modell erfolgt die Lagerung über externe Punkte. Diese sind starr mit den kreisförmigen Flächen verbunden und befinden sich im Drehpunkt der Kalotten (s. Bild 91). Die externen Punkte ermöglichen die Bild der Lagerkinematik. Alle drei Rotationsfreiheitsgrade bleiben frei. Bis auf die Lager 10/1 und 50/1 sind die Verschiebungen in Längs- sowie Querrichtung ebenfalls frei. Zur Berücksichtigung der Steifigkeit

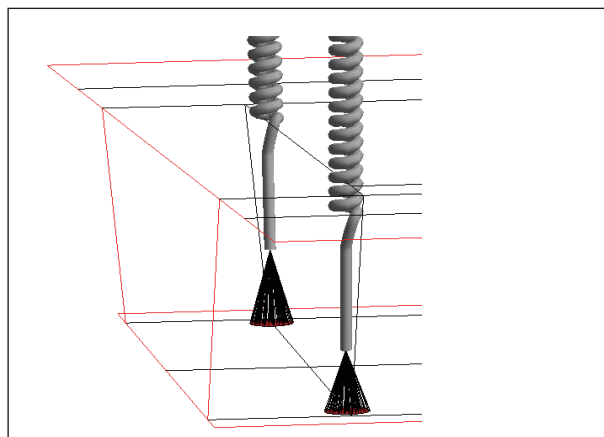


Bild 91: Detailansicht der Lagerung

der Lager werden vertikale Verschiebungen über lineare Federelemente gesteuert (s. Bild 90). Diese weisen eine Steifigkeit von 15384 kN/mm, was ein Ergebnis des statischen Belastungstests bei der Kalibrierung im Labor ist, auf. Die gewählte Lagermodellierung berücksichtigt keine Reibung innerhalb der Lager, weshalb auch kein Feststellmoment vorhanden ist.

Die Vorspannung wird für das numerische Modell vernachlässigt, da sich die Brücke im endgültigen Zustand befindet. Zudem ist von einer Verformung im Zustand I (ungerissen) auszugehen.

Untersucht werden die Belastungen der Brücke unter Verkehrslast. Als Referenz dafür dienen die im September 2016 durchgeführten Kalibrierfahrten mit Lkws. Hierbei sind jeweils ein Drei- und ein Fünf-Achser mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Spurlage über die Brücke gefahren. Die daraus entstandenen Messdaten dienen zur Validierung des Modells.

Die Modellierung der aus den Lkws resultierenden Belastung erfolgt mittels sechs bzw. zehn Würfeln (s. Bild 93 bzw. Bild 95). Diese repräsentieren die Radaufstands- sowie die Lastausbreitungsfläche und haben eine Kantenlänge von 40 cm. Auf die Würfel wirkt die bei der Kalibrierung gemessene Last entsprechend Bild 92 bzw. Bild 94. Um die Interaktion zwischen Brücke und Würfeln zu erfassen sind Kontaktflächen definiert. Die Eigenschaft der Kontakte ist als Verbund eingestellt, sodass keine Bewegung stattfindet. Für die statische Belastungssituation ist diese Kontaktdefinition ausreichend.

Die Referenzfahrten wurden für unterschiedliche Spurlagen der Lkws auf der Fahrbahn durchgeführt. Diese Spurlagen sind mit laufenden Nummern durch-

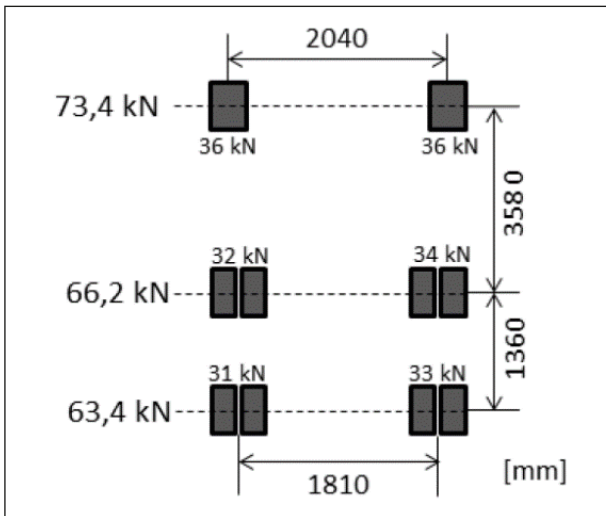


Bild 92: Referenzfahrzeug 3-Achser

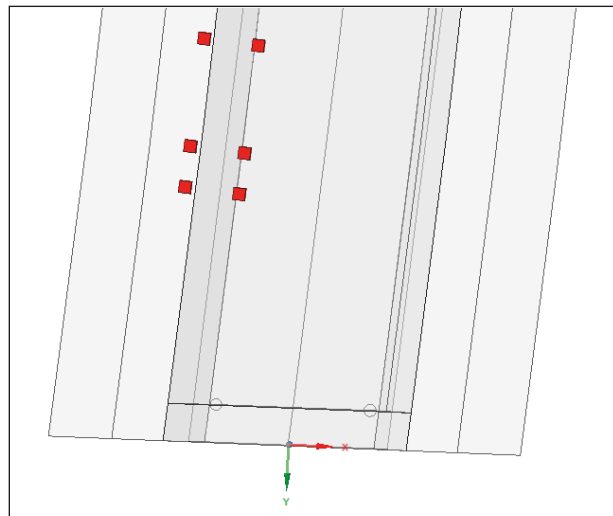


Bild 93: Umsetzung 3-Achser in FEM

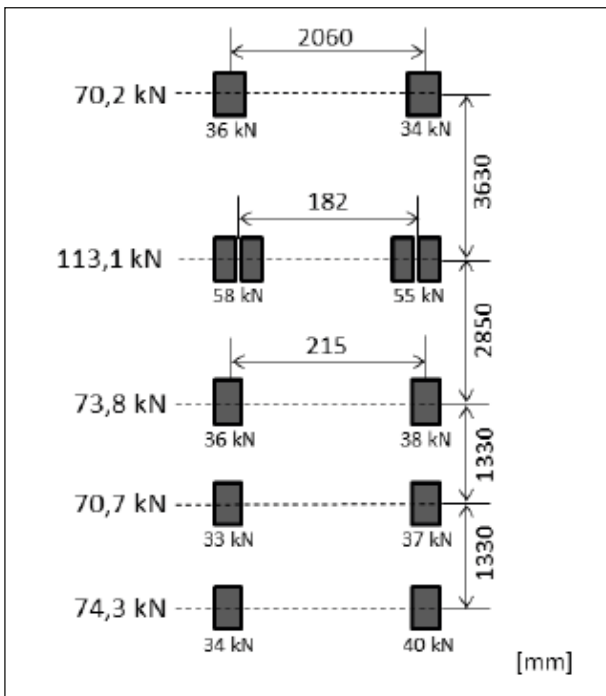


Bild 94: Referenzfahrzeug 5-Achser

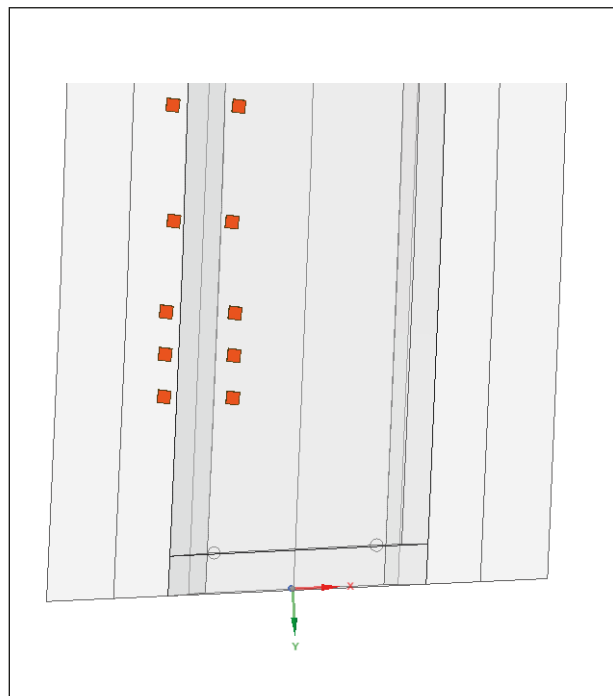


Bild 95: Umsetzung 5-Achser in FEM

Lfd.-Nr.	Lkw	Fahrspur	Spurlage
1	3-Achser	links	Mitte
2	5-Achser	rechts	Mitte
3	5-Achser	links	Mitte
4	3-Achser	rechts	Mitte

Tab. 12: Definition lfd.-Nr.

nummeriert. In Tabelle 12 sind die Spurlagen der im folgenden untersuchten Nummern aufgelistet.

8.3 Validierung

Das Simulationsmodell wird anhand von Messdaten validiert. Dazu werden die gemessenen Eigen-

frequenzen und Eigenformen sowie das Verhalten unter Verkehrslast untersucht.

Zum Vergleich wurde ein Modell mit Spanngliedern (Federelemente) erstellt. Die Ergebnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede, weshalb im Folgenden auf die Modellierung verzichtet wird.

8.3.1 Modalanalyse

Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen wird eine Modalanalyse mittels ANSYS durchgeführt. Damit können die Eigenwerte der Bewegungsgleichung des Systems bestimmt werden. Für diese Berechnung werden zusätzlich die Freiheitsgrade x und y

Eigenform	Messung [Hz]	FEM [Hz]	Abweichung [%]	FEM mit vertikalen Federn [Hz]	Abweichung [%]
1	3,1	3,07	1,0	3,07	1,0
2	3,9	4,13	5,9	4,07	4,4
3	4,2	4,47	6,4	4,33	3,1
4	4,7	5,11	8,7	5,04	7,2
5	6,8	7,54	10,9	7,44	9,4

Tab. 13: Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen

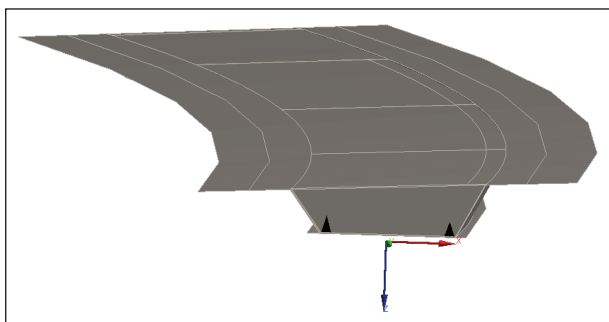


Bild 96: Koordinatensystem des FEM-Modells

an den Lagerstellen gesperrt, da die Messung (siehe [5]) nur vertikale Eigenfrequenzen wiedergibt. Die Ergebnisse betrachten die ersten fünf Eigenformen und Eigenfrequenzen. Tabelle 13 fasst die Ergebnisse und die Unterschiede zur Messung zusammen. In [5] sind die zugehörigen Eigenformen dargestellt. Die Eigenformen 1, 2, 4 und 5 entsprechen Biegeschwingungen, wohingegen die dritte einer Torsionsschwingung entspricht.

Die Abweichung der ersten drei Eigenfrequenzen liegt bei Berücksichtigung der Lagersteifigkeit (mit Feder) jeweils unter 5 %. Auch die fünfte Eigenfrequenz weicht weniger als 10 % von der Messung ab. Dies entspricht einer ausreichenden Annäherung an die Realität.

8.3.2 Statische Analyse

Zur Auswertung der Ergebnisse werden die Federkräfte als Lagerreaktion herangezogen. Die Verdrehung wird mittels zweier Abstandssensoren in Längsrichtung gemessen (s. Bild 4). Zum Vergleich mit dem FE-Modell wird dort die Rotation der externen Punkte um die x-Achse (Querrichtung) ausgewertet, um die Bewegung in Längsrichtung zu erfassen (s. Bild 96).

Das Eigengewicht bleibt bei den Berechnungen unberücksichtigt. Es wird lediglich das Verhalten unter Verkehrslast untersucht. Dadurch können z. B. abhebende Kräfte auftreten, die im realen Belastungsfall nicht vorliegen.

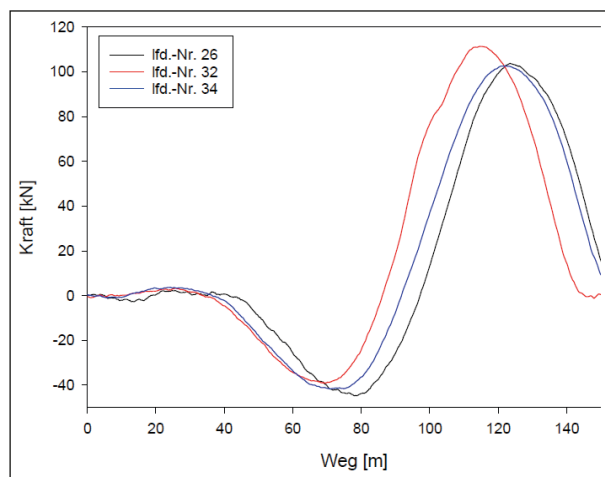


Bild 97: Gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/1 lfd.-Nr. 26, 32, 34

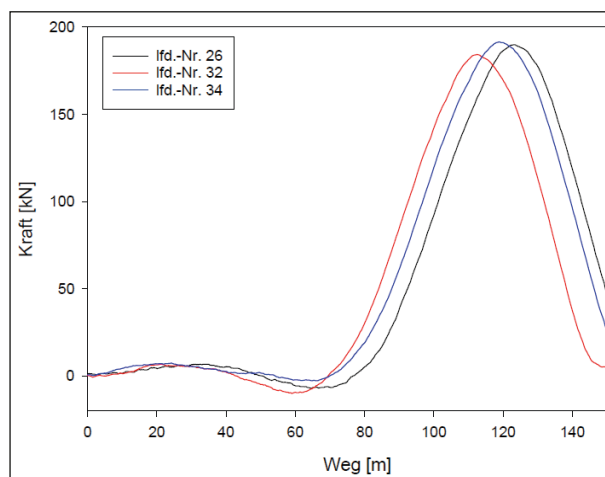


Bild 98: Gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/3 lfd.-Nr. 26, 32, 34

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Einfluss dynamischer Effekte

Bild 97 bis Bild 100 vergleichen die Messdaten für identische Positionierung und unterschiedliche Geschwindigkeiten. Daraus ist ersichtlich, dass keine maßgeblichen dynamischen Effekte bei Regelverkehr vorliegen. Die maximalen Lagerreaktionen unterscheiden sich höchstens um 15 kN. Deshalb ist eine statische Belastung zur Validierung ausreichend.

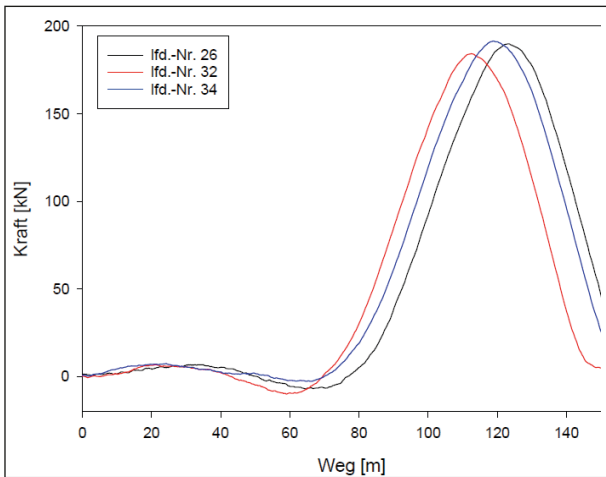


Bild 99: gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/1 lfd.-Nr. 23, 29, 36

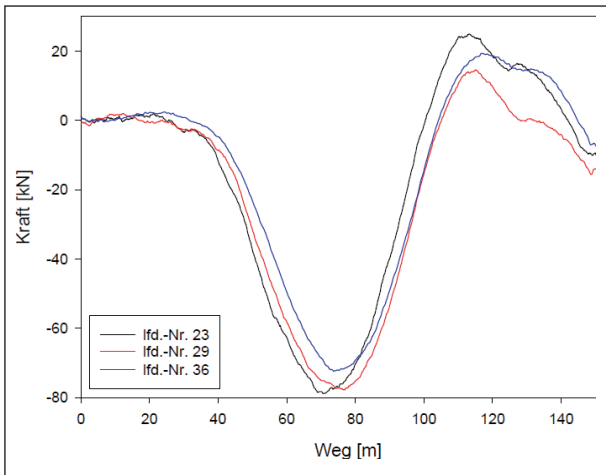


Bild 100: gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/3 lfd.-Nr. 23, 29, 36

8.4.2 Drehsteifigkeit

Zur Untersuchung der Drehsteifigkeit des Modells bzw. der Brücke wird an den externen Punkten der Lager KGA 40/1 und KGA 40/3 jeweils ein Moment von 10 nmm um die x-Achse aufgebracht. Im Anschluss wird die Verdrehung ausgewertet. Es ergibt sich eine Drehsteifigkeit von $1,80e13$ nmm/rad.

8.4.3 Einflusslinien

Der Einfluss aus des in Brückenlängsrichtung variabel positionierten Lkws auf Lagerkraft und Verdrehung kann mithilfe von Einflusslinien dargestellt werden. Die Auswertungsstelle ist die Achse 40 (s. Bild 101). Die Einflussfunktion entspricht dem Quotienten aus verschieblicher Zustandsgröße geteilt durch die Belastung, in diesem Fall die Gewichtskraft des Lkws. Auswertbare Zustandsgrößen sind Kraft und Verdrehung.

Einflussfunktion =

$$\frac{\text{Zustandsgröße}}{\text{Belastung}} = \frac{\text{Auflagerreaktion}}{\text{Gewichtskraft des Lkws}}$$

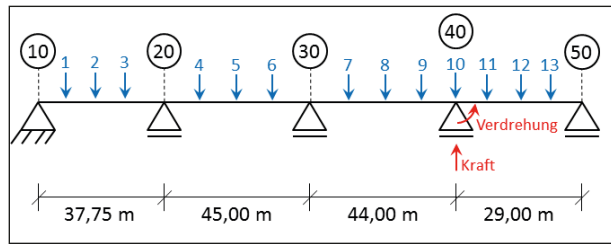


Bild 101: Auswertepositionen und Zustandsgrößen für die Einflusslinien

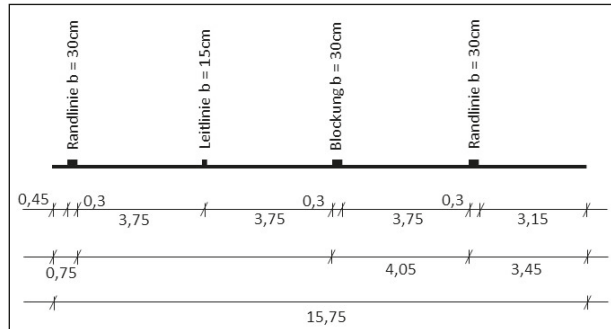


Bild 102: Trassierung Schnitt A-A2

Zur Bestimmung der Einflusslinien werden insgesamt 13 Positionen des Lkws in Längsrichtung untersucht. Die Positionen sind jeweils in den Viertelpunkten und in der Mitte des jeweiligen Felds sowie auf der Achse 40. Die Positionen sowie die Zustandsgrößen Auflagerkraft und -verdrehung sind in Bild 101 dargestellt.

Zur Bestimmung der Position in Querrichtung wird die Trassierung in Schnitt A-A2 verwendet (s. Bild 102).

Die Bilder Bild 103 bis Bild 110 veranschaulichen die Einflusslinien für 3- und 5-Achser. Dabei entsprechen Lfd.-Nr. 1 und 4 einer mittigen Spurlage des 3-Achсers und 3 und 2 entsprechend des 5-Achсers.

Die Ergebnisse zeigen identische Einflüsse aus 3- und 5-Achсer. Die Verdrehung fällt bei der Fahrt über die rechte Spur (4 und 2) leicht größer aus. Auch die Verschiebung in Längsrichtung ist größer, wenn der Lkw sich im vierten Feld auf der rechten Spur befindet.

Das Maximum der Summe der Einflusslinien ist annähernd 1 (~0,99). Daher ist die Instrumentierung der Lager in Achse ausreichend zur Fahrzeuglastermittlung.

8.4.4 Laststellung in Längsrichtung

Die Ergebnisse der Einflusslinien werden in diesem Kapitel als Vergleich des FEM Modells zur Messung

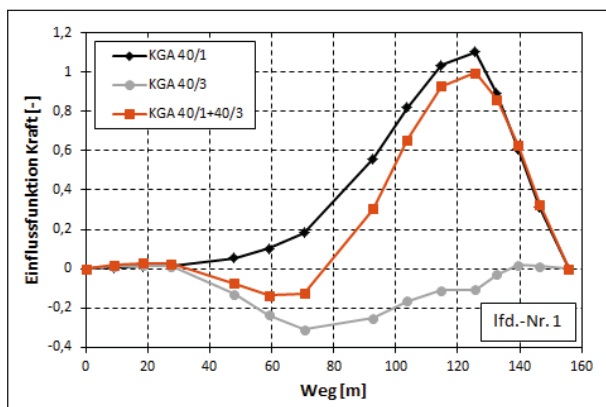


Bild 103: Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 1

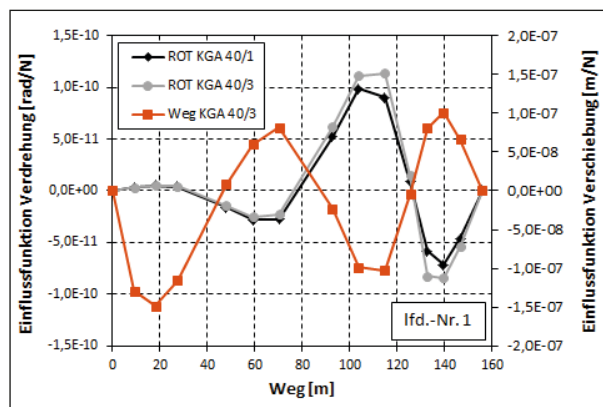


Bild 104: Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 1

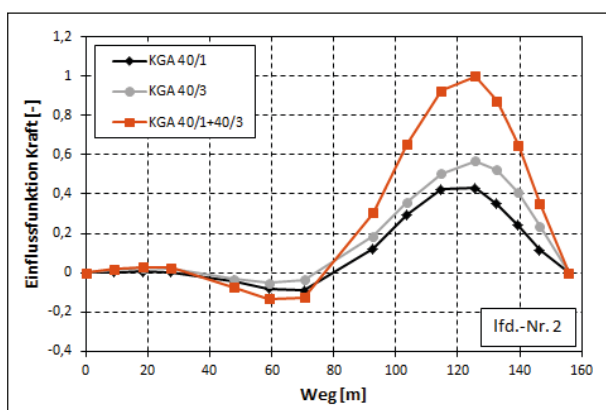


Bild 105: Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr.2

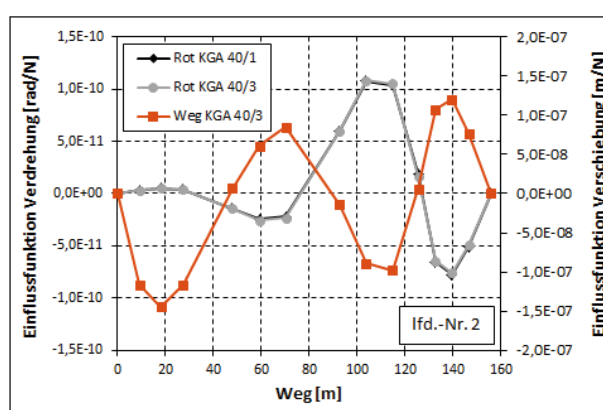


Bild 106: Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr.2

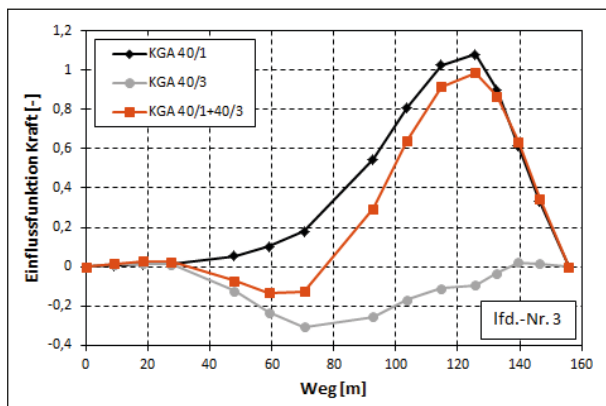


Bild 107: Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 3

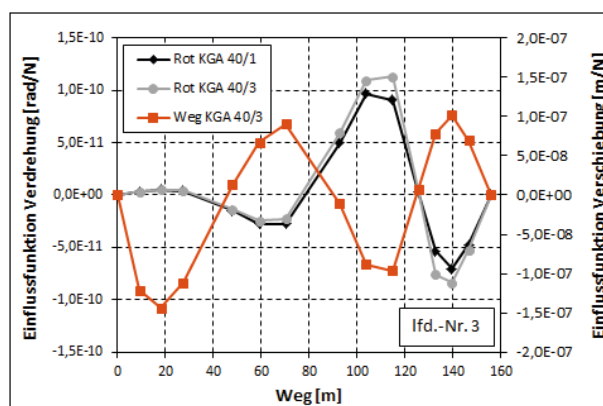


Bild 108: Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 3

genutzt. Die Schrittweite ist somit identisch zu der im vorherigen Kapitel. Verglichen werden zunächst die Auflagerkräfte. Hierbei werden beide Lager sowie die Summe der Reaktionen betrachtet und mit dem Gesamtgewicht des Lkws verglichen. Die Fahrt lfd.-Nr. 4 wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt da die Überfahrt nicht vollständig aufgezeichnet wurde.

Bild 111 veranschaulicht die Kraftreaktion in beiden Lagern über der normierten Zeit. Der Vergleich zwi-

schen FE-Modell und Messung zeigt eine Übereinstimmung für Lager 40_1. Im Verlauf von 40_3 sind zwischen 0,6 bis 1,0 Abweichungen erkennbar (Feld 3-Feld 4). Dies zeigt sich auch in der Summe der Kräfte. Die Messung liegt in Summe circa 10 kN über dem Gesamtgewicht des 3-Achser bei 213 kN. Das Ergebnis des Simulations-Modells entspricht in Summe den 202 kN des Lkws.

Die Ergebnisse für den 5-Achser zeigen die gleiche Tendenz. In Bild 112 ist die Lagerreaktion für die

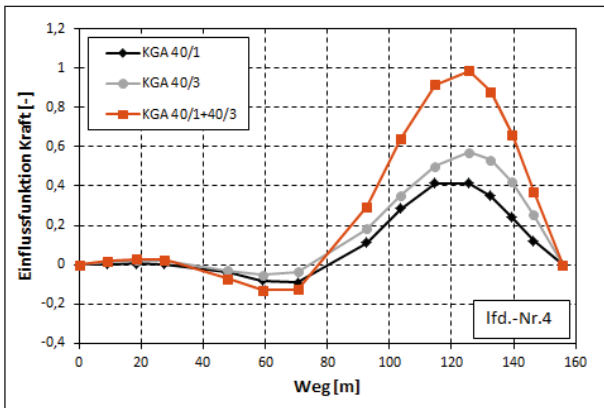


Bild 109: Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 4

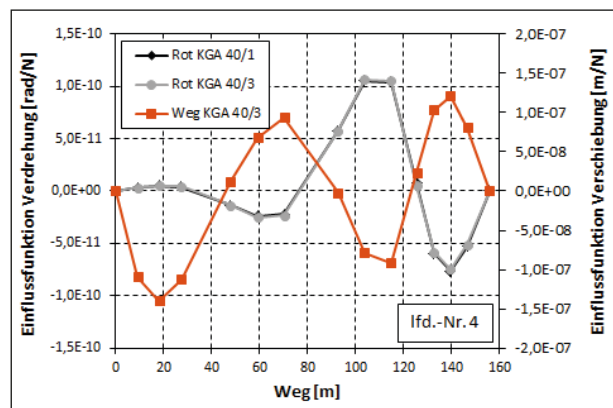


Bild 110: Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 4

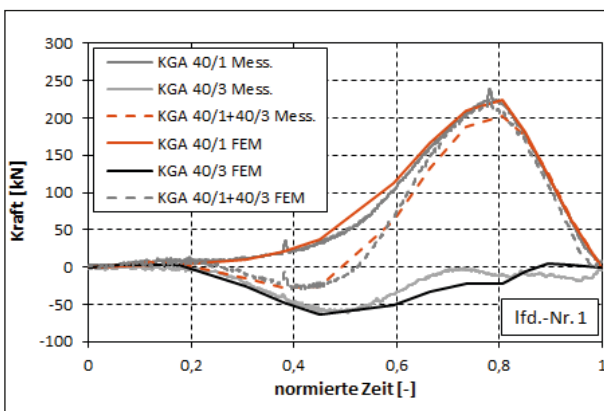


Bild 111: Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für lfd.-Nr. 1

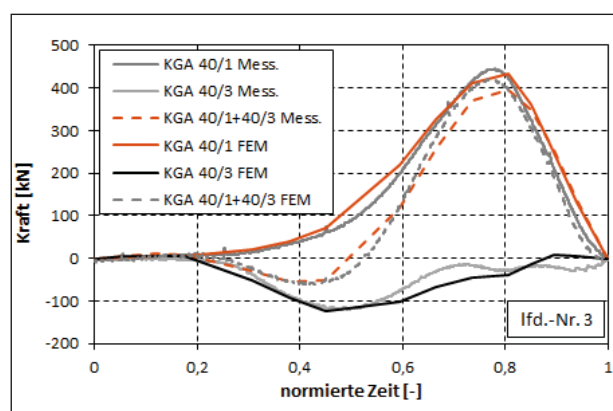


Bild 112: Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für lfd.-Nr. 3

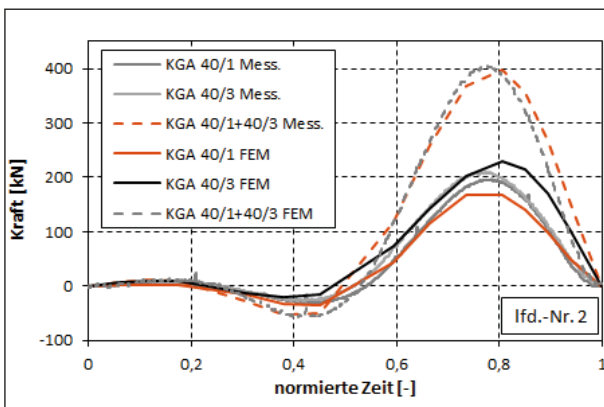


Bild 113: Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für lfd.-Nr. 2

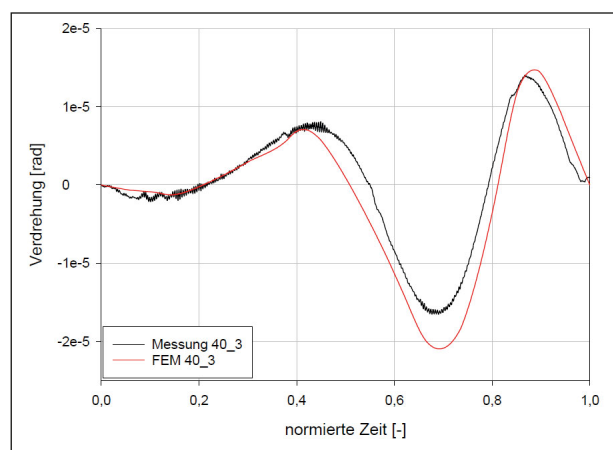


Bild 114: Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für lfd.-Nr. 1

Lfd.-Nr. 3 dargestellt, welche mit der Position in Querrichtung von Nr. 1 übereinstimmt. Auch hier liegt die Messung in Summe über dem Gewicht des Lkws (8 kN) und die FEM genau darauf.

Bei Lfd.-Nr. 2 stimmen beide Kraftverläufe von 40/1 und 40/3 nicht überein (s. Bild 113). Die Abweichungen fallen hier größer aus als bei den zuvor betrachteten Positionen. Die Summe der Kräfte ist allerdings fast identisch und nur leicht versetzt. Somit stimmen beide Summen mit dem Fahrzeuggewicht überein.

Die Bilder 114 bis 116 zeigen den Vergleich der Verdrehungen. Bei Lfd.-Nr. 1 stimmen Verlauf und Maximum der Simulation mit der Messung überein. Das Minimum unterscheidet sich um circa 7 %.

Der Vergleich der Verdrehung für die Referenzfahrt 3 zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung des Verlaufs. Die Abweichung der Simulation zur Messung beträgt 10 % beim Minimum und 20 % beim Maximum.

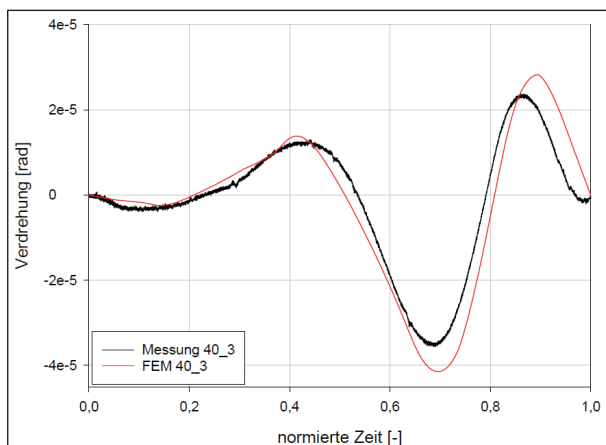


Bild 115: Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für Lfd.-Nr. 3

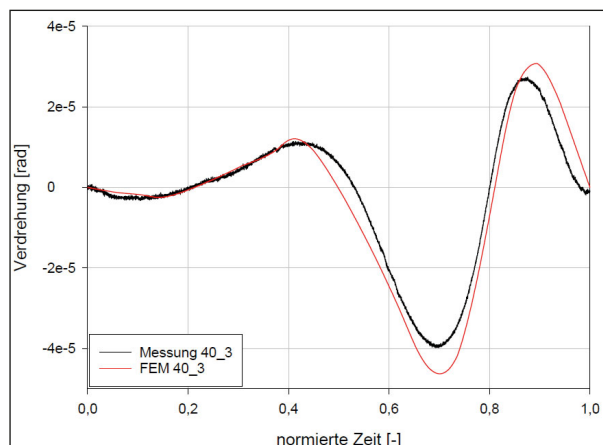


Bild 116: Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für Lfd.-Nr. 2

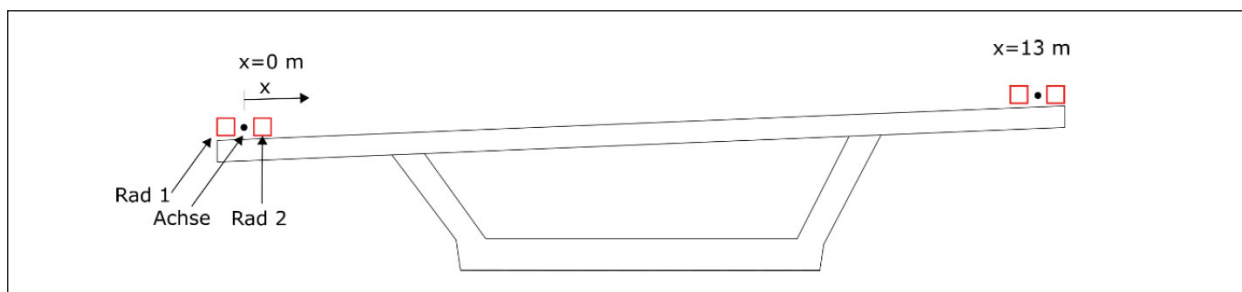


Bild 117: Definition und Richtung der Querverschiebung

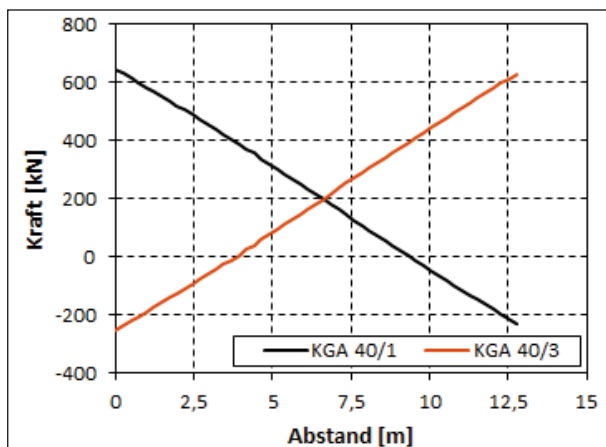


Bild 118: Lagerreaktion bei Querverschiebung

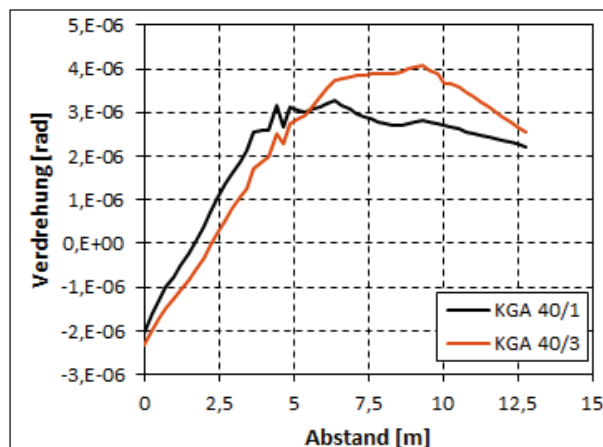


Bild 119: Lagerverdrehung bei Querverschiebung

Auch bei Lfd.-Nr. 2 entspricht der berechnete Verlauf dem gemessenen. Die Abweichungen liegen hier zwischen 6 % beim Minimum und 10 % beim Maximum.

8.4.5 Laststellung in Querrichtung

Zur Überprüfung an welcher Position ein Vorzeichenwechsel in den Kraftreaktionen stattfindet wird der 5-Achser in Längsrichtung direkt über der Achse 40 fixiert (max. Auflagerkraft) und in Querrichtung jeweils um 0,25 m verschoben (s. Bild 117).

Bild 118 zeigt den Verlauf der Lagerkraft. Der Schnittpunkt der Kurven, wenn beide Auflager die gleiche Last aufnehmen ist bei 6,7 m. In Bild 120 ist diese Position in grün dargestellt. Die Nullstelle der Kraft KGA 40/3 ist in orange und die der Kraft KGA 40/1 in schwarz hervorgehoben. Die Verdrehung beider Lager ist nahezu identisch, da die Verformung auf beiden Seiten gleich ist (s. Bild 119).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein Vorzeichenwechsel in den Lagerkräften vorliegt. Der Wechsel findet statt sobald der Lkw direkt über dem jeweiligen Auflager steht, sodass eine Seite keine Last aufnimmt.

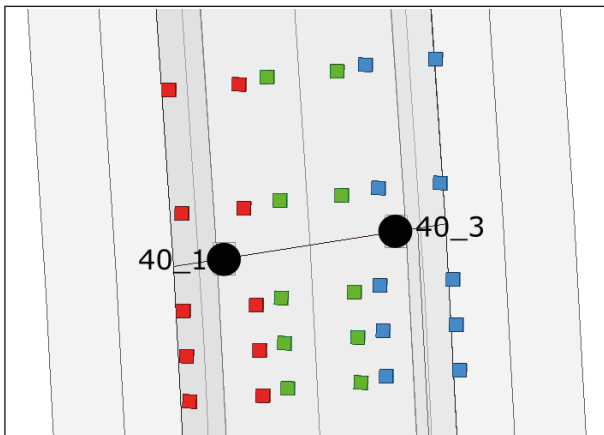


Bild 120: Laststellungen bei Nullstellen (rot und blau) und bei Schnittpunkt (grün)

8.5 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchung war der Vergleich zwischen numerisch ermittelten Auflasten infolge der Referenz-Lkws mit den gemessenen Auflasten, um die Eignung der instrumentierten Kalottenlager zur Verkehrslastermittlung zu ermitteln und die Qualität der Messergebnisse zu evaluieren. Dazu wurde ein Schalenmodell mit vereinfachtem Querschnitt erstellt. Die Lagerung des Modells erfolgte über externe Punkte und Federn mit der entsprechenden Lagersteifigkeit. Auftretende Reibung im Lager wurde vernachlässigt.

Die Belastung erfolgte über Würfel, welche als Volumen modelliert wurden. Diese repräsentieren die Reifenaufstands- inklusive der Lastausbreitungsfläche. Zwischen Fahrbahn und Rädern wurde ein Verbundkontakt definiert.

Die Validierung erfolgte über den Vergleich des Simulationsmodells zu Messdaten. Ausgewertet wurden Eigenfrequenzen und Referenzfahrten. Die Ergebnisse zeigen eine plausible Annäherung an die Messungen. Die Instrumentierung der Lager in Achse 40 ist ausreichend zur Erfassung der vollen Verkehrslast von Lkws.

9 Qualitätssicherung der Messwerte

9.1 Allgemeines

Da sich sowohl die Brücke als auch die Lager im Betrieb so verändern können, dass die Kalibrierfunktionen für die Sensoren nicht mehr zu ausreichend genauen Messgrößen führen, ist nach ca. 1

Jahr Betriebszeit eine Untersuchung zur Qualitätssicherung der Sensorsignale erforderlich.

Während eine Qualitätssicherung der Wegsensoren und Abstandssensoren durch zusätzliche temporäre Sensorik möglich ist, ist eine vergleichende Kontrollmessung der Drucksensoren aufwendiger. Eine Referenzbelastung von oben durch mindestens zwei Fahrzeuge mit bekannten Achslasten ist erforderlich zur Kontrolle der zeitlich veränderlichen Lagereinwirkung. Eine Qualitätskontrolle der Messwerte für die quasi-stationären Lagereinwirkungen, d. h. Einwirkung infolge Brückeneigengewicht, ist möglich durch eine Entlastung der Lager mit hydraulischen Pressen. Da bei Entlastung in einer Achse aufgrund der Steifigkeit des Oberbaus eine Lastumverteilung einhergeht, ist es erforderlich, nacheinander die Lager an mehreren Achsen zu entlasten und die Auflaständerung in den intelligenten Kalottenlagern hinsichtlich der Lastverteilung zu analysieren. Die Ergebnisse sollten mit vergleichenden FE-Berechnungen verglichen werden, um die Messergebnisse bei Entlastung der Achse 40 richtig zu interpretieren und zu einer Aussage über die Qualität der Messsignale der Drucksensoren zu treffen.

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Betreuerkreis und dem Auftraggeber wird festgelegt, dass eine Wiederholung von Referenzfahrten als Belastung zur Qualitätssicherung der Drucksensoren durchgeführt wird.

Es wurde nicht als notwendig betrachtet, die Abstandssensoren AS 40/3-30 und AS 40/3-50 und den Wegsensor WA 40/3 zu prüfen, da einerseits diese mit den Messwerten von RTMS am Lager 40/1 verglichen worden sind und plausible Werte liefern und andererseits die Genauigkeit, Auflösung und mechanische Robustheit qualitativ hochwertig sind, so dass keine Alterungserscheinungen, die sich auf das Messergebnis auswirken könnten, zu erwarten sind.

Eine zusätzliche Wegmessung an der ebenen Gleitfläche wird zur Erfassung der verkehrsinduzierten Gleitwege durchgeführt.

9.2 Referenzfahrten

9.2.1 Allgemeines

Die Autobahndirektion Nordbayern ermöglichte in der Nacht vom 21.4. auf den 22.4.2018 ein Zeit-



a) 3-Achs-Lkw Mercedes Arocs



b) 5-Achs-Lkw MAN TGX

Bild 121: Lkw für Referenzfahrten



Bild 122: Ladungsverteilung, 3-Achs-Lkw im Hintergrund, 5-Achs-Lkw im Vordergrund

fenster von ca. 6 h für kontrollierte Überfahrten unter Vollsperrung des Brückenbauwerkes.

Zur Qualitätssicherung der Messwerte und um den Vergleich mit den früheren Messfahrten am 28.09.2016 zu erleichtern, wurden ähnliche Lkws, d. h. ein jeweils vollbeladener drei- und ein fünfschiger Lkw als Referenzfahrzeuge verwendet werden.

9.2.2 Fahrzeuge und Beladung

Für die Versuchsfahrten wurden zwei Lkw mit Kippmulde von der Firma Breitenbach-Tech. GmbH bereitgestellt.

Als dreiachsiger Lkw stand ein Mercedes Arocs (im folgenden „Lkw 1“, siehe Bild 121 a)), als fünfschiger ein MAN TGX-Sattelzug mit Auflieger („Lkw 2“, siehe Bild 121 b)) zur Verfügung.

Beide Lkw haben blattgefederte Vorderachsen. Der 3-Achs-Lkw besitzt an den Hinterachsen eine blattgefederte Doppelachskombination (Walking Beam). Der 5-Achs-Lkw ist an den Hinterachsen mit Luftfedern ausgestattet.

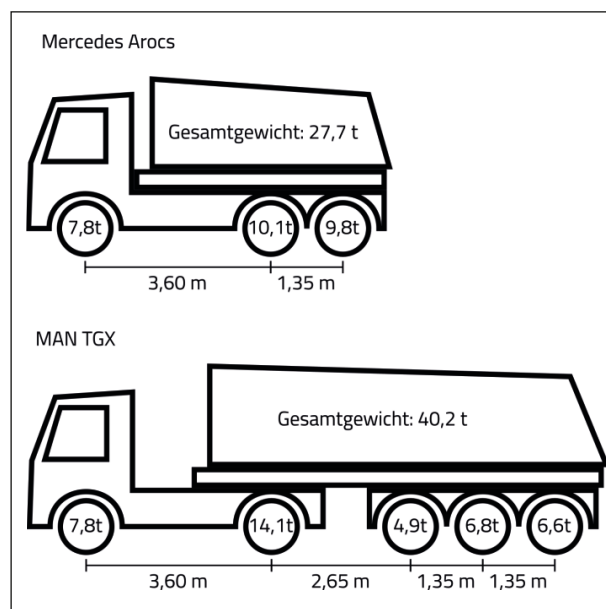


Bild 123: Achsabstände und -lasten der Messfahrzeuge

Beide Lkw wurden bis zu ihrer nominellen Ladekapazität mit Kies beladen (siehe Bild 122). Während die Ladung bei dem 3-Achs-Lkw gleichmäßig in der Kippmulde verteilt war, wurde bei dem 5-Achs-Lkw eine Anhäufung im vorderen Bereich direkt oberhalb der Hinterachse des Zugfahrzeuges festgestellt.

Da nach Aussage der Kraftfahrer eine derart ungleichmäßige Verteilung der Ladung in der Praxis nicht ungewöhnlich ist, wurde die Ladung so belassen.

Bild 123 zeigt das Ergebnis der Vermessung und Verwiegung beider Fahrzeuge. Es wurde festgestellt, dass die Last des 5-Achs-Lkws deutlich auf der zweiten Achse konzentriert ist. Ebenso wurden

bei dem 5-Achs-Lkw deutlich unterschiedliche Werte für die drei Achsen des Aufliegers gemessen. Da die Luftfedern miteinander kommunizieren, wäre im Rahmen der Messgenauigkeit derselbe Wert für alle Einzelachsen zu erwarten. Da zum Rangieren für die Verwiegung die erste Achse des Aufliegers angehoben wurde, ist es wahrscheinlich, dass das Absenken der Achse zum Zeitpunkt des Verwiegens nicht ganz abgeschlossen war. Für weitere Betrachtungen wird daher angenommen, dass die Achsen jeweils die gleiche Last in Höhe des Mittelwertes von 6,1 Tonnen tragen.

Für eine möglichst aussagekräftige Bestimmung der dynamischen Einflüsse auf die Messgrößen wurden mehrere Geschwindigkeitsniveaus als Sollvorgabe definiert:

- 5 km/h zur Bestimmung der quasistatischen Messwerte
- 60 km/h

- 90 km/h als Maximalgeschwindigkeit der Lkw

Die einzelnen Geschwindigkeitsniveaus sollten dabei zur Berücksichtigung einer erwarteten Streuung der Messwerte von jedem Lkw auf jeder Fahrspur mindestens dreimal gefahren werden. Die quasista-



Bild 124: Temporär befestigter Wegsensor mit Messbereich 0...2 mm

lfd.-Nr.	Spur	Lkw-Typ	v_{soll} [km/h]	Uhrzeit bei Achse 50
1	Links	3-Achser	5	00:54
2	Rechts	5-Achser	5	00:59
3	Links	3-Achser	5	01:01
4	Links	5-Achser	5	01:06
5	rechts	3-Achser	5	01:08
6	Links	5-Achser	60	01:15
7	Links	3-Achser	60	01:18
8	Links	5-Achser	60	01:25
9	Rechts	3-Achser	60	01:26
10	Links	5-Achser	60	01:30
11	Rechts	3-Achser	60	01:31
12	Rechts	3-Achser	60	01:36
13	Rechts	5-Achser	60	01:39
14	Links	3-Achser	60	01:40
15	Rechts	5-Achser	60	01:43
16	Links	3-Achser	60	01:44
17	Rechts	5-Achser	60	01:47
18	Rechts	5-Achser	90	01:51
19	Links	3-Achser	90	01:53
20	Rechts	5-Achser	90	01:57
21	Links	3-Achser	90	01:59
22	Rechts	5-Achser	90	02:02
23	Links	3-Achser	90	02:04
24	Links	5-Achser	90	02:10
25	Rechts	3-Achser	90	02:12

lfd.-Nr.	Spur	Lkw-Typ	v_{soll} [km/h]	Uhrzeit bei Achse 50
26	Links	5-Achser	90	02:17
27	Rechts	3-Achser	90	02:19
28	Links	5-Achser	90	02:26
29	Rechts	3-Achser	90	02:27
30	Rechts	5-Achser	90	02:43
31	Links	3-Achser	90	02:44
32	Rechts	5-Achser	90	02:50
33	Links	3-Achser	90	02:50
34	Links	5-Achser	90	02:55
35	Rechts	3-Achser	90	02:56
36	Links	5-Achser	90	03:03
37	Rechts	3-Achser	90	03:03
38	Links	5-Achser	90	03:09
39	Rechts	3-Achser	90	03:09
40	Links	5-Achser	90	03:15
41	Rechts	3-Achser	90	03:15
42	Links	5-Achser	90	03:20
43	Rechts	3-Achser	30	03:25
	Llinks	5-Achser		
44	Rechts	5-Achser	30	03:30
	Links	3-Achser		
45	Rechts	3-Achser	60	03:35
	Links	5-Achser		
46	Rechts	5-Achser	90	03:40
	Links	3-Achser		

Tab. 14: Abfolge der Referenzfahrten relevant für die Lagermessung

tischen Überfahrten wurden jeweils nur einmal, die bei Höchstgeschwindigkeit jeweils sechsmal durchgeführt, um der erwarteten dynamikabhängigen Streubandbreite Rechnung zu tragen.

Somit ergibt sich folgender Fahrtenplan:

- 4 x 5 km/h
- 12 x 30 km/h (nur über den Fahrbahnübergang)
- 12 x 60 km/h
- 24 x 90 km/h

Ergänzend wurden noch Fahrten durchgeführt, bei denen beide Lkw gleichauf die gesamte Länge der Brücke überfahren haben, um die Wirkung der Fahrspurentrennung beurteilen zu können. Die Fahrten wurden mit 30 und 60 km/h, jeweils einmal mit wechselnden Fahrspuren durchgeführt. Somit ergeben sich planmäßig 56 Fahrten (bzw. 60 Fahrten bei individueller Zählung der Parallelfahrten). Tabelle 14 listet die für die Lager relevanten Fahrten.

9.2.3 Instrumentierung des Lagers 40/3

Das Lager 40/3 wird zusätzlich für die Referenzmessungen mit einem Wegsensor instrumentiert, der einen Messbereich von 0 bis 2mm hat (siehe Bild 124). Damit kann die relative Verschiebung zwischen Lageroberteil und Lagerunterteil infolge Verkehrsüberfahrten erfasst werden. Damit wird ein Korrekturfaktor für die berechnete ebene Lagerverschiebung infolge Verkehrsüberfahrten ermittelt (siehe Kapitel 3.4).

9.3 Verkehrslasterfassung

Die fluktuierenden Anteile der Signale der Drucksensoren werden von den quasi-stationären getrennt und mit den Kalibrierfunktionen nach Kapitel 5.6.1 in Druckschwankungen umgerechnet. Durch Multiplikation mit der Fläche des Gleitmaterials ergibt sich die fluktuierende Lagerkraft.

Deutlich zu erkennen in den ungefilterten Signalen sind Resonanzeffekte durch Überfahrten des 3-Achs-Lkws (siehe Bild 125)). Es wird vermutet, dass die Blattfederung der Hinterachsen übereinstimmt mit der ersten Eigenfrequenz des Bauwerks. Die Überfahrten mit dem 5-Achs-Lkw führte zu keinen resonanten Lagerreaktionen (siehe Bild 125)). Die resonanten Lagerreaktionen bei Parallelfahrt sind deutlich geringer (siehe Bild 125)). Es wird ver-

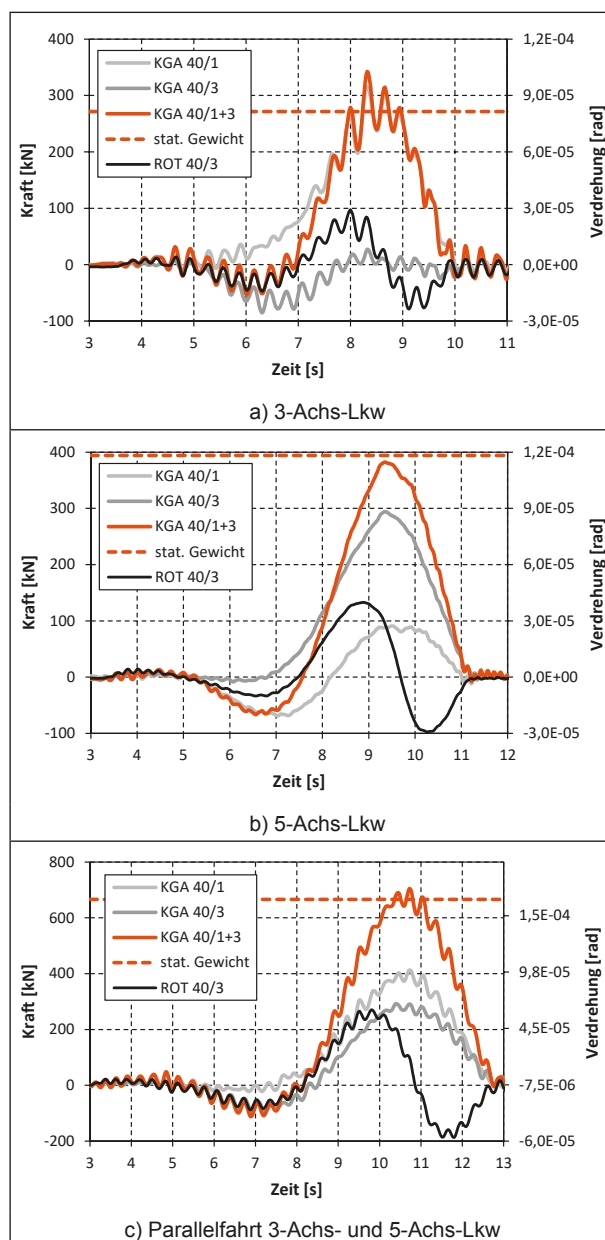


Bild 125: Ungefilterte fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt mit 3-Achs-Lkw, mit 5-Achs-Lkw und mit Parallelfahrt

mutet, dass solche resonanten Lagerreaktionen im regellosen Verkehr kaum hervorgerufen werden, da mehrere Lkws in verschiedenen Phasenlagen den harmonischen Schwingungszustand stören bzw. dämpfen.

Eine Tiefpassfilterung der Messsignale eliminiert die resonanten Überhöhungen (siehe Bild 126).

Zur Überprüfung der Genauigkeit der erfassten Verkehrslasten werden die gemessenen und gefilterten Lagerreaktionen pro Überfahrt ausgewertet. Die Summe der Auflagerkräfte wird mit der statischen Gewichtskraft des Lkws verglichen (siehe Bild 128 bis Bild 131).

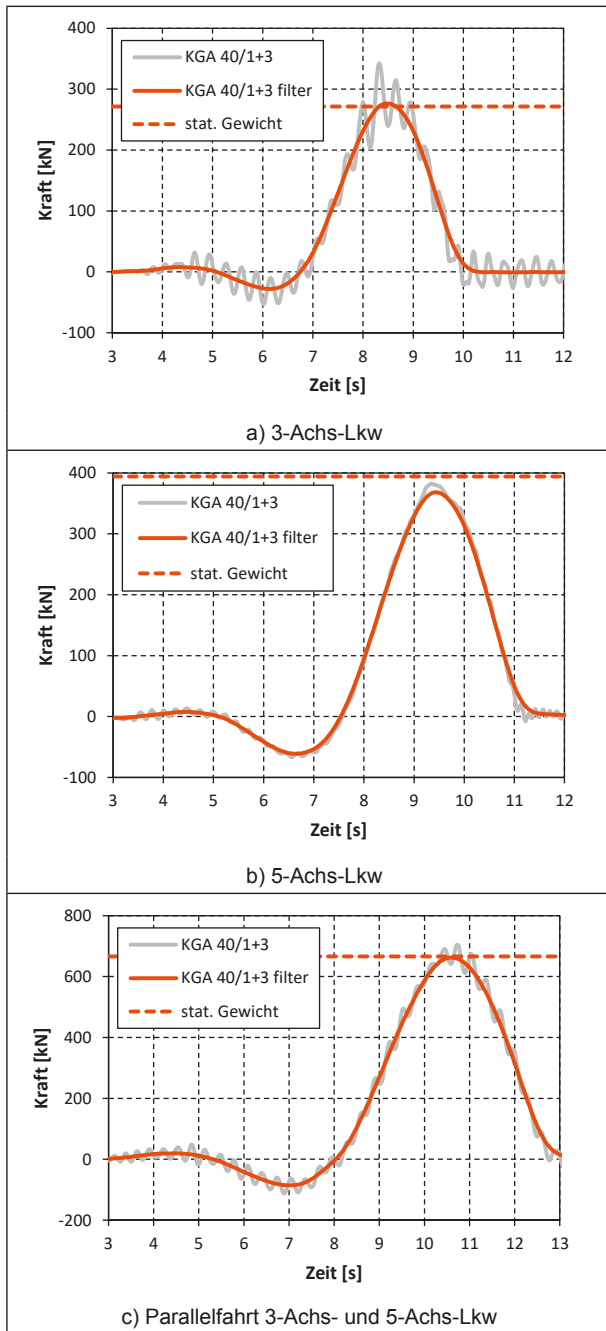


Bild 126: Gefilterte Gesamtlagerkraft bei Überfahrt mit 3-Achs-Lkw, mit 5-Achs-Lkw und mit Parallelfahrt

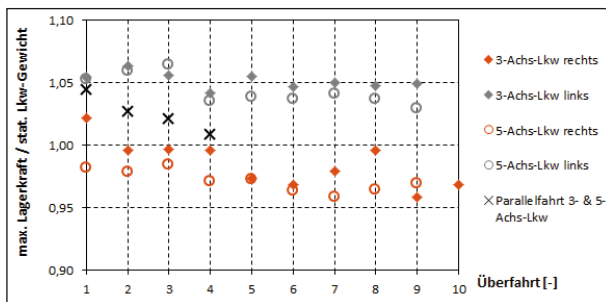


Bild 127: Gemessene maximale Lagerkraft versus statisches Lkw-Gewicht

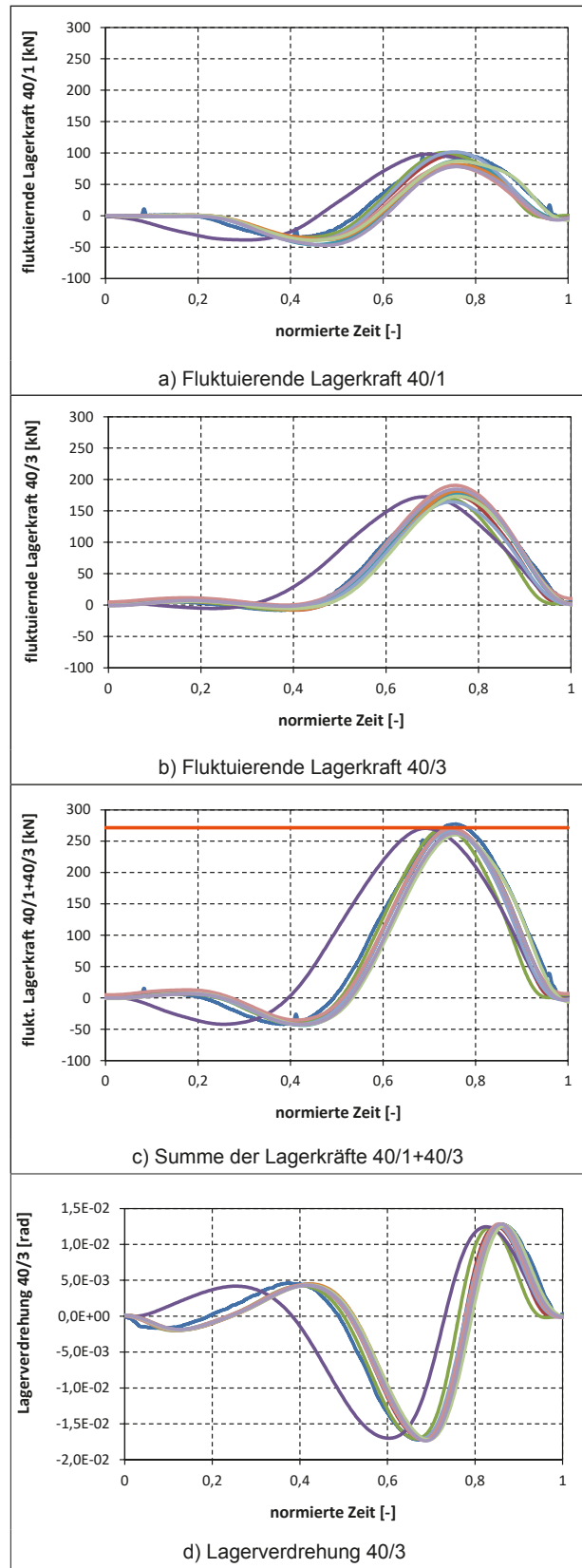


Bild 128: Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 3-Achs-Lkws auf der rechten Fahrspur

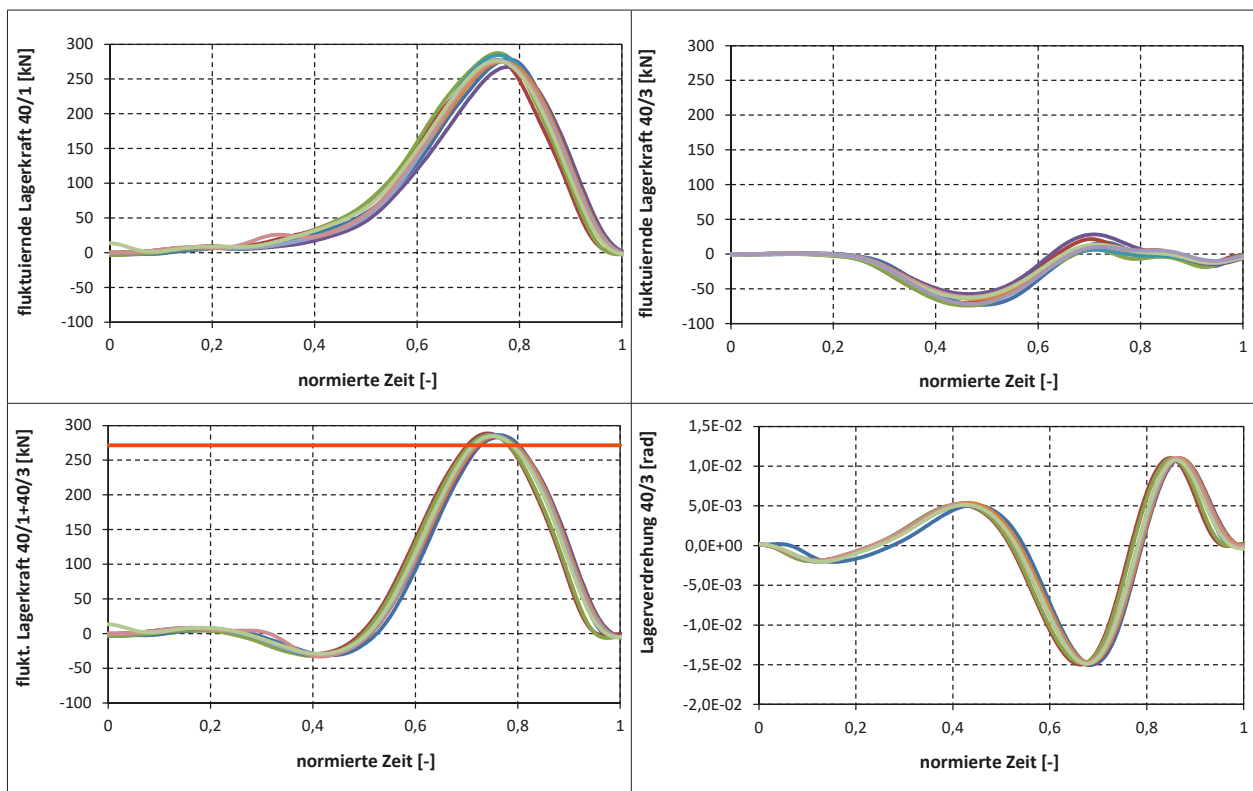


Bild 129: Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 3-Achs-Lkws auf der linken Fahrspur

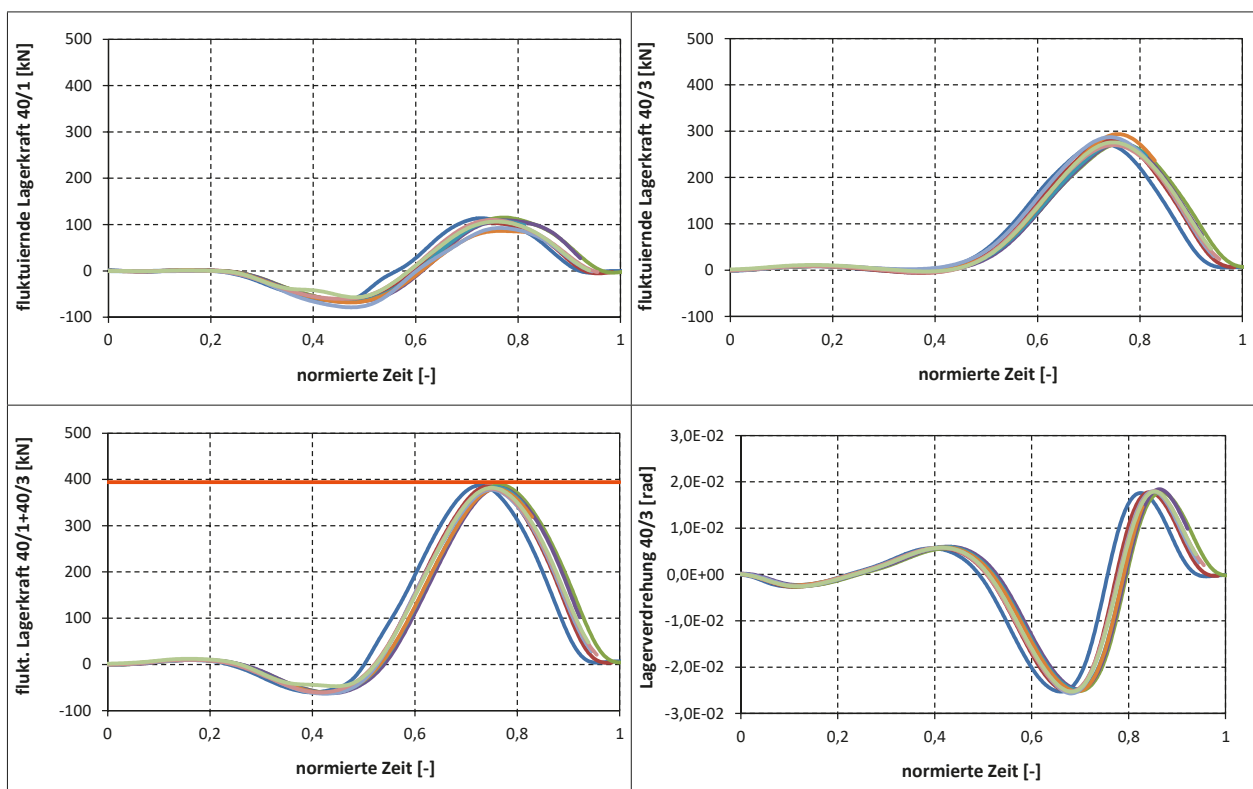


Bild 130: Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 5-Achs-Lkws auf der rechten Fahrspur

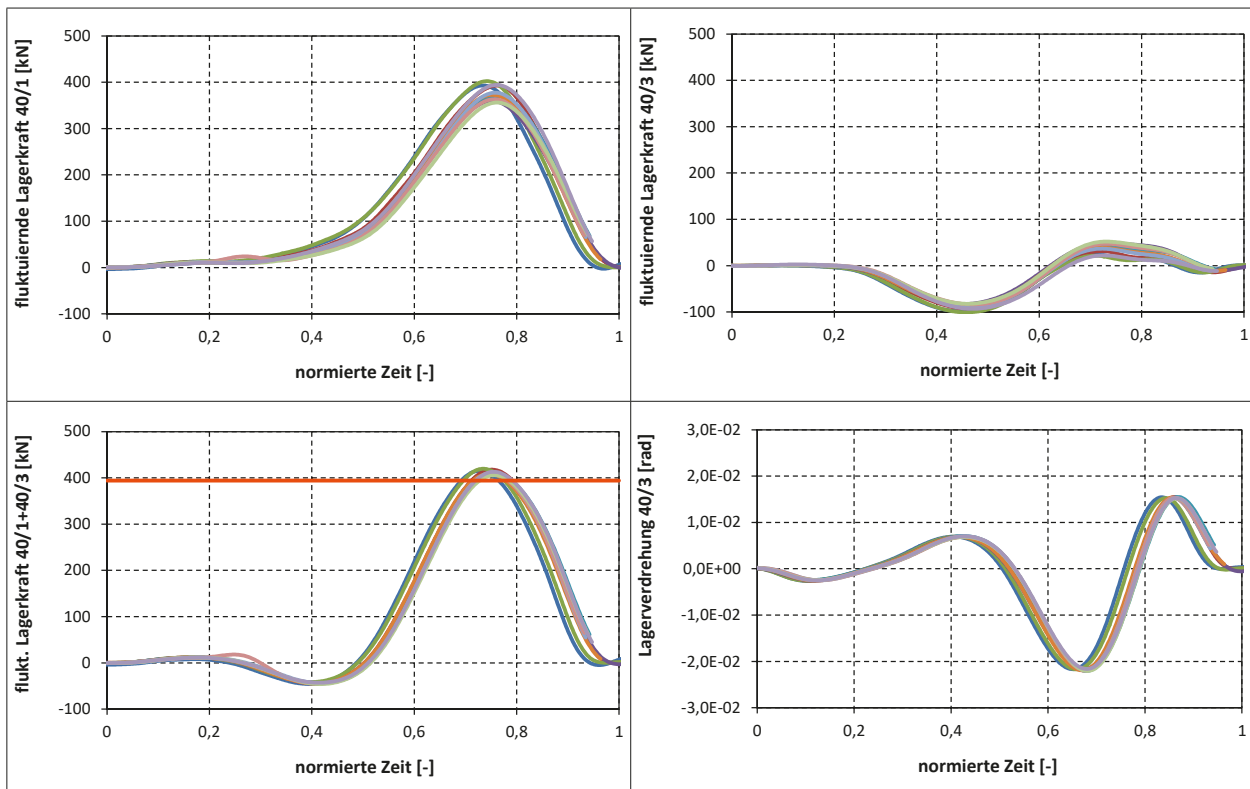


Bild 131: Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 5-Achs-Lkws auf der linken Fahrspur

Ein Vergleich der maximalen Lagerkraft mit dem statischen Lkw-Gewicht zeigt, dass bei den Überfahrten auf der rechten Fahrspur ein geringeres Gewicht ermittelt wurde, während bei den Überfahrten auf der linken Fahrspur ein etwas größeres Gewicht ermittelt wurde (siehe Bild 127). Insgesamt ist die Genauigkeit der Verkehrslastermittlung bei $\pm 7\%$ und damit zufriedenstellend. Die Qualität der erfassten Verkehrslasten ist auch weiterhin vorhanden.

9.4 Vereinfachte Kalibrierprozedur

Der Betrieb der instrumentierten Kalottenlager am Bauwerk BW402e zur Überwachung des Eigengewichts und der Verkehrslasten zeigt, dass die Genauigkeit der Messwerte von dem Umfang der Kalibrierung abhängt.

Zu unterscheiden bei der Kalibrierung sind die Ermittlung quasi-stationärer Lasten infolge Eigengewicht und fluktuierende Lasten infolge Verkehr.

Die Kalibrierung der Lager zur Messung des Eigengewichts sollte idealerweise in einem Labor stattfinden, da das Lager mit Lasten im Bereich des berechneten Eigengewichts belastet werden sollte.

Falls eine Kalibrierung der Lager im Labor nicht möglich ist bzw. zur Qualitätssicherung der eingebauten Lager können auch stationäre Belastungen im eingebauten Zustand durchgeführt werden. Dabei sollte der Schwerpunkt von 2 bis 3 40-Tonner-Lkws auf der Lagerachse für 2 h belastet werden. Druckunterschiede von 2 bis 6 N/mm² pro Lager sollten mit Schwerlastfahrzeugen erzeugt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Kalibrierung besteht aus einer Entlastung der Lager durch den Ansatz von Pressen, die von unten das Brückendeck anheben. Allerdings sollte nur eine Teilentlastung mit minimaler Anhebung des Brückendecks erfolgen. Die Anhebung sollte kleiner als 0,5 mm betragen, damit der Kontakt des Gleitmaterials mit dem Gleitpartner nicht aufgehoben wird. Sowohl die Pressenkraft als auch der Pressenweg ist mit ausreichender Genauigkeit zu dokumentieren. Während der Pressenweg von einem zusätzlich befestigten Wegsensor mit hoher Genauigkeit (z. B. 0,5 %) erfasst werden kann, so sind handelsübliche Hublastzylinder, die bei einem Lagerwechsel verwendet werden, nicht ausreichend genau geeicht. Es ist erforderlich die verwendeten Hublastzylinder vorab im Labor mit einer kalibrierten Kraftmessdose zu kalibrieren, um eine Genauigkeit der Hublast von 1-2 % zu erreichen.

Die Kalibrierung zur Messung von Verkehrslasten kann an den installierten Lagern erfolgen durch Kalibrierfahrten mit Lastwagen. Mindestens zwei verschiedene Lastwagen sollten verwendet werden. Die Dokumentation sollte insbesondere die Fahrspur der Lkws in Bezug zu den Lagern genau erfasst werden (Genauigkeit +/-10cm). Resonanzeffekte durch die Fahrzeugschwingungen sollten zunächst vermieden werden, sind aber im zweiten Schritt hilfreich, um die Genauigkeit infolge Post-processing Methoden (z. B. Filterung, Glätten) zu quantifizieren.

9.5 Vorschlag für die Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung der Drucksignale zur Verkehrserfassung sollte alle 2 Jahre durchgeführt werden, da sich die Zustände im Lager aufgrund von Setzungen im Material, im Bauwerk und/oder im Untergrund zu lokalen Druckunterschieden im Lager führen können. Zu empfehlen sind Überfahrten mit bekannten Lkws. Dies geht auch in verkehrssarmen Zeiten mit üblichen Lkw-Geschwindigkeiten ohne Vollsperrung der Brücke.

Die Qualitätssicherungen der Messungen des Eigengewichts sind aufwendiger. Eine teilweise Entlastung mit Pressen von unten ist der statischen Belastung mit bekannten Lkws vorzuziehen. Die teilweise Entlastung sollte stufenweise erfolgen, wobei die Dauer jeder Stufe mind. 2 h betragen sollte.

10 Automatisierte Auswertung

10.1 Verwendete Systeme

10.1.1 NI Diadem®

Die Software Diadem von National Instruments stellt eine Vielzahl an Werkzeugen zur Verwaltung, Aufbereitung und Darstellung von Messdaten zur Verfügung. Mit einer VBA-Programmierschnittstelle ist es möglich, die Auswertungsvorgänge zu automatisieren. Für die Auswertung der Messdaten bis Ende 2018 wurde Diadem verwendet, für die automatisierte Auswertung wurden die in Diadem teilweise vorhandenen Algorithmen portiert.

10.1.2 Python / NumPy

Für eine weitestgehende Unabhängigkeit von Soft- und Hardwareherstellern wurde als Entwicklungsplattform für die Auswertungssoftware, die quelloffene Programmiersprache Python (derzeit in der Version 3.6.5) verwendet. Für die Analyse und Bearbeitung der großen Datenmenge werden Funktionen der NumPy-, der SciPy-, der Copy- und der Pickle-Bibliothek verwendet. Sowohl Python als auch die Bibliotheken stehen unter Lizenzen, welche die unentgeltliche Nutzung und Verbreitung auch für kommerzielle Zwecke gestatten. Keine der Lizenzen fordert ein „Copyleft“, somit ist eine Offenlegung des im Rahmen des Forschungsprojektes geschaffenen Programmcodes nicht zwingend erforderlich.

Die folgenden Funktionen der NumPy-Bibliothek werden verwendet:

- savetxt
- arctan
- max
- min
- abs
- linspace
- array
- pi
- ones
- zeros
- linalg.lstsq
- square
- sum
- diff
- tan
- mean
- where
- median
- fromstring
- concatenate
- reshape
- histogram

Die folgenden Funktionen der SciPy-Bibliothek werden verwendet:

- butter
- Welch
- sosfilt
- find_peaks

Die folgenden Funktion der CoPy-Bibliothek wird verwendet:

- deepcopy

Die folgenden Funktionen der pickle-Bibliothek werden verwendet:

- dump
- load

Zusätzlich werden folgende Funktionen der Maurer-Bibliothek „maurer_utils“ verwendet:

- modalValue
- findPeakAdaptProm
- calcApproximation
- readBinary
- PolynomCoeff

10.2 Auswerteprozeduren

Um die Messergebnisse vor Ort und zeitlich parallel zu deren Erfassung auswerten zu können, wurden die einzelnen Auswerteprozeduren in einer modularen Struktur aufgebaut, welche von dem zentralen Modul „Main“ aus gesteuert werden. Durch die modulare Struktur ergibt sich nicht nur eine Schonung der zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen (RAM-Belegung < 1GB bei Rohdatengröße von 400 MB), sondern auch eine einfache Möglichkeit, die Funktionalität zu erweitern.

Die einzelnen Bestandteile der Auswerteprozedur sind in Kapitel 10.2.1 bis 10.2.4 beschrieben.

10.2.1 Steuermodul „Main“

Dieses Modul überwacht ein spezifiziertes Verzeichnis auf dem Auswertecomputer periodisch auf den Eingang neuer Messdaten. Wenn ein geeigneter Datensatz zur Verfügung steht, wird dieser eingelesen, verarbeitet und die Ergebnisse der Auswertung in die Ausgabedatei geschrieben.

Neben der Ein- und Ausgabeverwaltung und dem Aufruf der Auswertung wird in diesem Modul auch die Fehler- und Ausnahmebehandlung verarbeitet, sodass unvollständige oder beschädigte Datensätze nicht zu Abstürzen oder Ausfällen führen. Im Fall eines Fehlers wird die verursachende Eingangsdatei übersprungen und für eine spätere Analyse markiert sowie eine Diagnosemeldung in der Statusdatei abgelegt. Für eine schnelle Statuskontrolle wird eine fortlaufende Bildschirmausgabe generiert (Bild 132).

```

C:\Windows\system32\cmd.exe - cmd.bat - python main.py
Startzeit: 2018-12-14 15:07:32
Intelligente Brücke
- Auswertung der instrumentierten Dehnfuge
MAIRER Engineering GmbH - 2018
2018-12-14 15:07:41 Check auf neue Daten...
2018-12-14 15:08:01 Check auf neue Daten...
2018-12-14 15:08:21 Check auf neue Daten...
D:\Messdaten_Int_Fuge\Indir\180409_2200_BW402e_MMS_ZIP_7z
180409_2200_BW402e_MMS_ZIP_7z In 10 Sekunden verarbeitet
2018-12-14 15:08:41 Check auf neue Daten...
2018-12-14 15:09:01 Check auf neue Daten...
D:\Messdaten_Int_Fuge\Indir\180409_2211_BW402e_MMS_ZIP_7z
180409_2211_BW402e_MMS_ZIP_7z In 10 Sekunden verarbeitet
2018-12-14 15:09:21 Check auf neue Daten...

```

Bild 132: Bildschirmausgabe der Auswertesoftware

In aller Regel ist die Bearbeitungszeit der Datensätze deutlich kürzer als das Intervall, in dem aktualisierte Daten zur Verfügung gestellt werden. Sollte es in Ausnahmefällen zu Verzögerungen kommen, kann das Programm diese durch das sequenzielle Abarbeiten aller im Verzeichnis befindlicher Dateien diese wieder aufholen. Bild 133 zeigt das Ablaufdiagramm des Moduls „Main“, welches sowohl die Auswertung der Messdaten der intelligenten Dehnfuge in den Modulen „Statusüberwachung Dehnfuge“ und „Verkehrserkennung“ ansteuert als auch die Auswertung der Messdaten der intelligenten Kalottenlager im Modul „Lagerauswertung“.

10.2.2 Eingabemodul „Read7-Zip“

Um die automatisierte Auswertung zu beschleunigen, wird der Datensatz direkt in komprimierter (*.7z-Format) Form eingelesen. Die Daten werden in die entsprechenden Kanäle aufgeteilt und übergeben. Ist ein Datensatz fehlerfrei eingelesen, wird er aus dem Eingangsverzeichnis entfernt. Bild 134 zeigt das Ablaufdiagramm des Eingabemoduls „Read7-Zip“.

10.2.3 Verarbeitungsmodul „Lagerauswertung“

Die Auswertung der lagerspezifischen Größen erfolgt mit den in Kapitel 3 bis 6 angegebenen Formeln. Aus jeder 10-minütigen Messdatei werden die Ergebnisse in einem Zwischenspeicher gelegt und am Ende des jeweiligen Tages in einer Tagesdatei abgespeichert (siehe auch Kapitel 10.2.4).

Bild 135 zeigt das Ablaufdiagramm für das Modul „Lagerauswertung“. In Tabelle 15 sind die Ausgabeparameter angegeben. Die Ausgabeparameter dienen sowohl der Sensorüberwachung als auch der Überwachung der Lagerfunktion und -lebensdauer sowie der Überwachung des Bauwerks. Für die Analyse des Zustandes von Messsystem und Lager wird für die sensorbezogenen Parameter der Maximal-, Minimal- und Modalwert eines Tages zurückgegeben. Darüberhinaus werden die akkumulierten Gleitwege und der Gleitpalt ermittelt. Der Vergleich mit üblichen bzw. sinnvollen Werten erlaubt eine Aussage, ob das Messsystem zuverlässige Werte liefert, bzw. ob das Lager technisch in fehlerfreiem Zustand ist.

Zur Überwachung der Brücke werden die ersten beiden Eigenfrequenzen und die mittleren quasi-

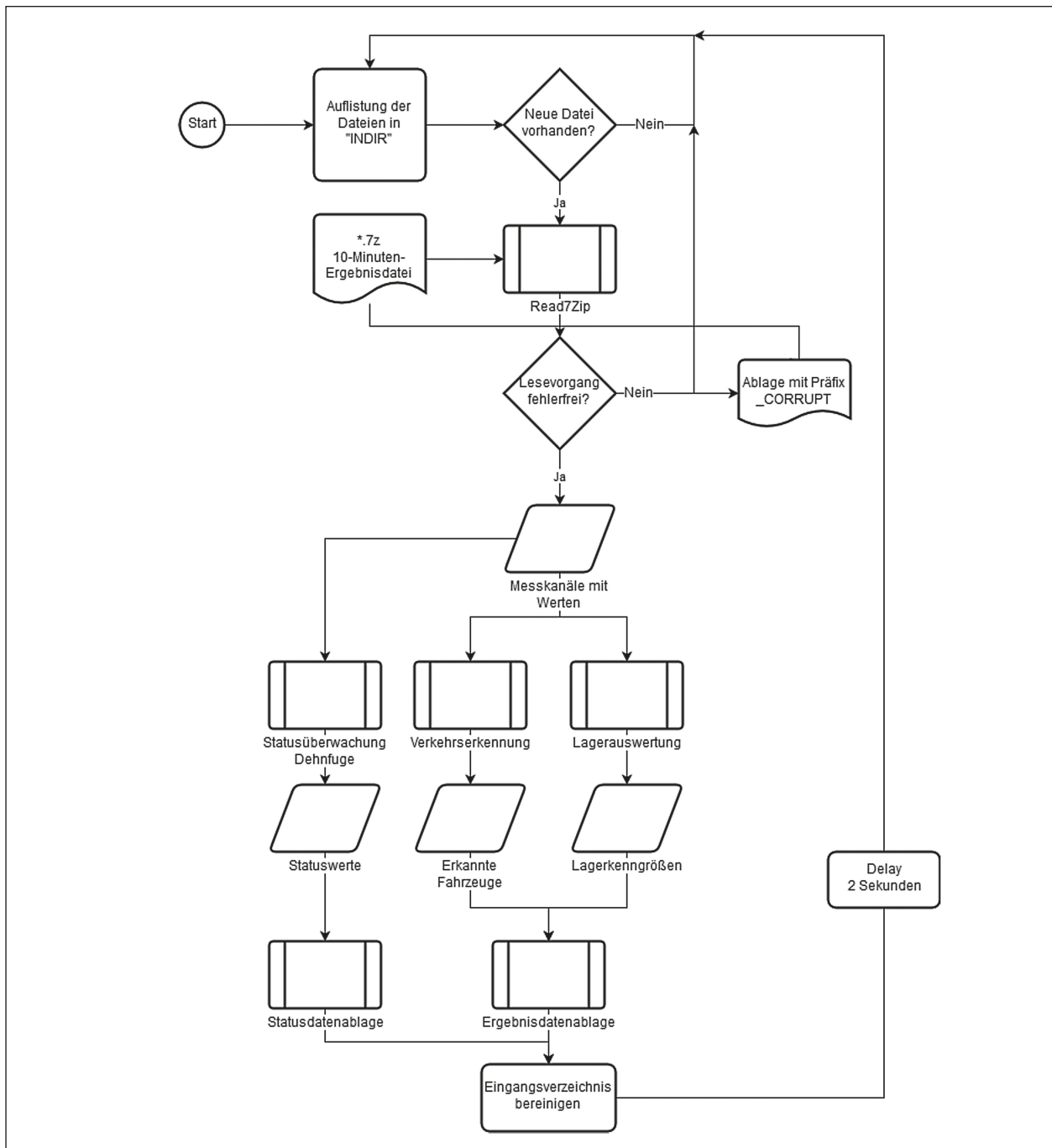


Bild 133: Ablaufdiagramm des Moduls „Main“

stationären Lagerlasten ausgewertet und ausgegeben.

10.2.4 Ausgabemodule „Ergebnisdatenablage“

Bild 136 zeigt das Ablaufdiagramm für das Ausgabemodul „Ergebnisdatenablage“. Nach der Auswertung jedes einzelnen Intervalls werden die Ergebnisse in tabellarischer Form (*.csv-Format) in einem definierten Ausgabeverzeichnis abgelegt. Zusätzlich werden die Verkehrsbelastung als ein Peak-

Histogramm pro Tag in einer eigenen Datei abgelegt. Die Struktur der Daten wurde so gewählt, dass sowohl eine Aufnahme in die zentrale Ergebnisdatenbank als auch eine manuelle Auswertung möglichst einfach stattfinden kann. Am Ende eines Monats wird aus den Tagesdateien eine Monatsdatei erstellt.

Ebenso werden im Bedarfsfalle die im Programmablauf auftretenden Fehlermeldungen in eine fortlaufende Protokolldatei abgespeichert.

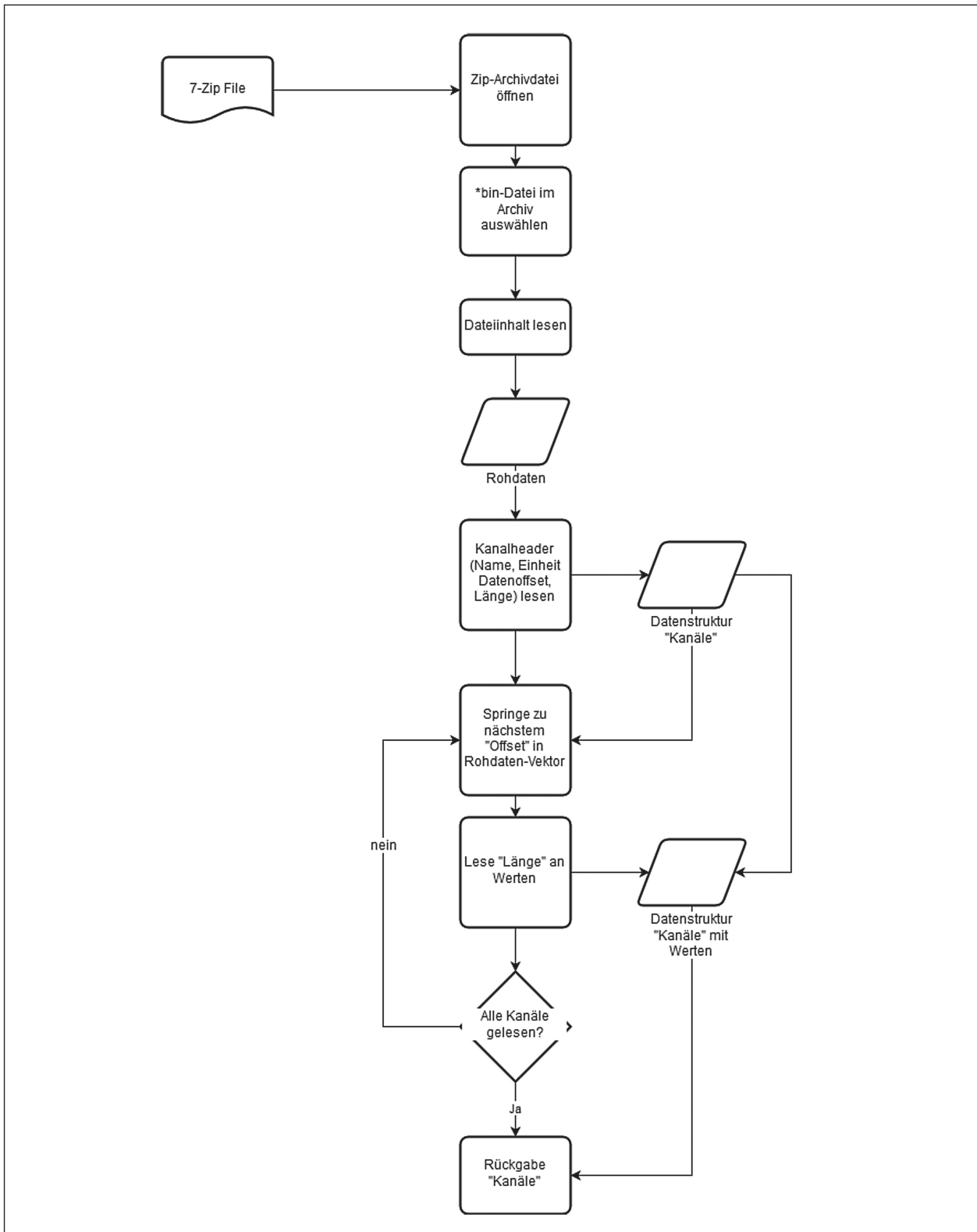


Bild 134: Ablaufdiagramm des Eingabemoduls „Read7-Zip“

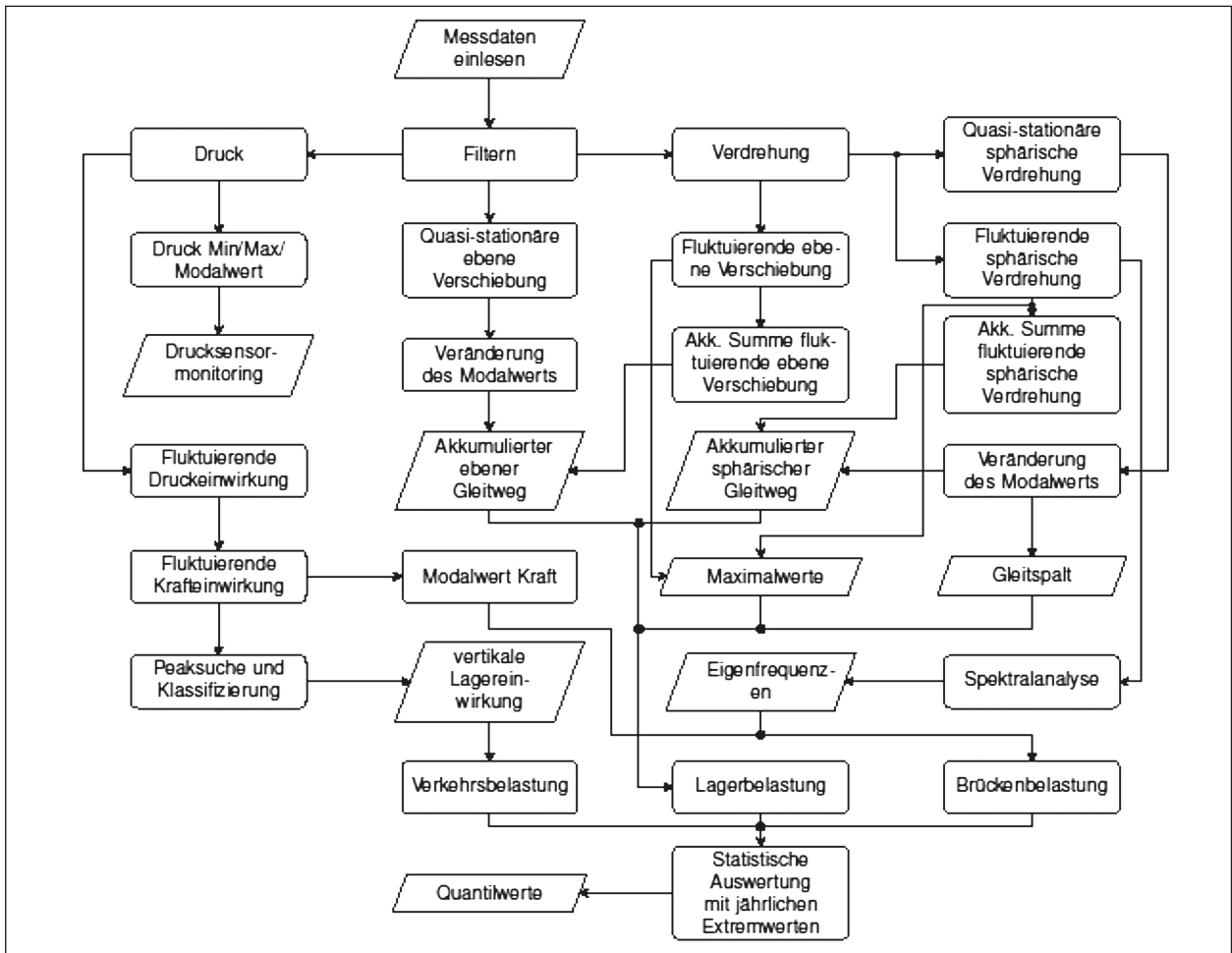


Bild 135: Ablaufdiagramm des Verarbeitungsmodul „Lagerauswertung“

Ausgabe-parameter	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 x 10 ⁴	Differenzensumme der Modalwerte der Lagerverschiebung Differenzensumme der berechneten absoluten Verschiebungen infolge Verdrehung		X		
Akk. sphärischer GW	mm	AS 40/3-1, AS 40/3-2	< 5 x 10 ⁴	Differenzensumme der berechneten absoluten Verschiebungen infolge Verdrehung		X		

Tab. 15: Ergebnisse der automatisierten Auswertung

Ausgabe-parameter	Einheit	Sensor-input	Grenzwerte	Beschreibung	Überwachung			Ausgabeintervall
					Sensor	Lager	Bauwerk	
Gleitspalt	mm	AS 40/3-1, AS 40/3-2	> 0,2	Mittelwert des zentrischen Abstands zwischen Lageroberplatte und Abstandssensoren		X		Täglich
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. 15: Ergebnisse der automatisierten Auswertung (Fortsetzung)

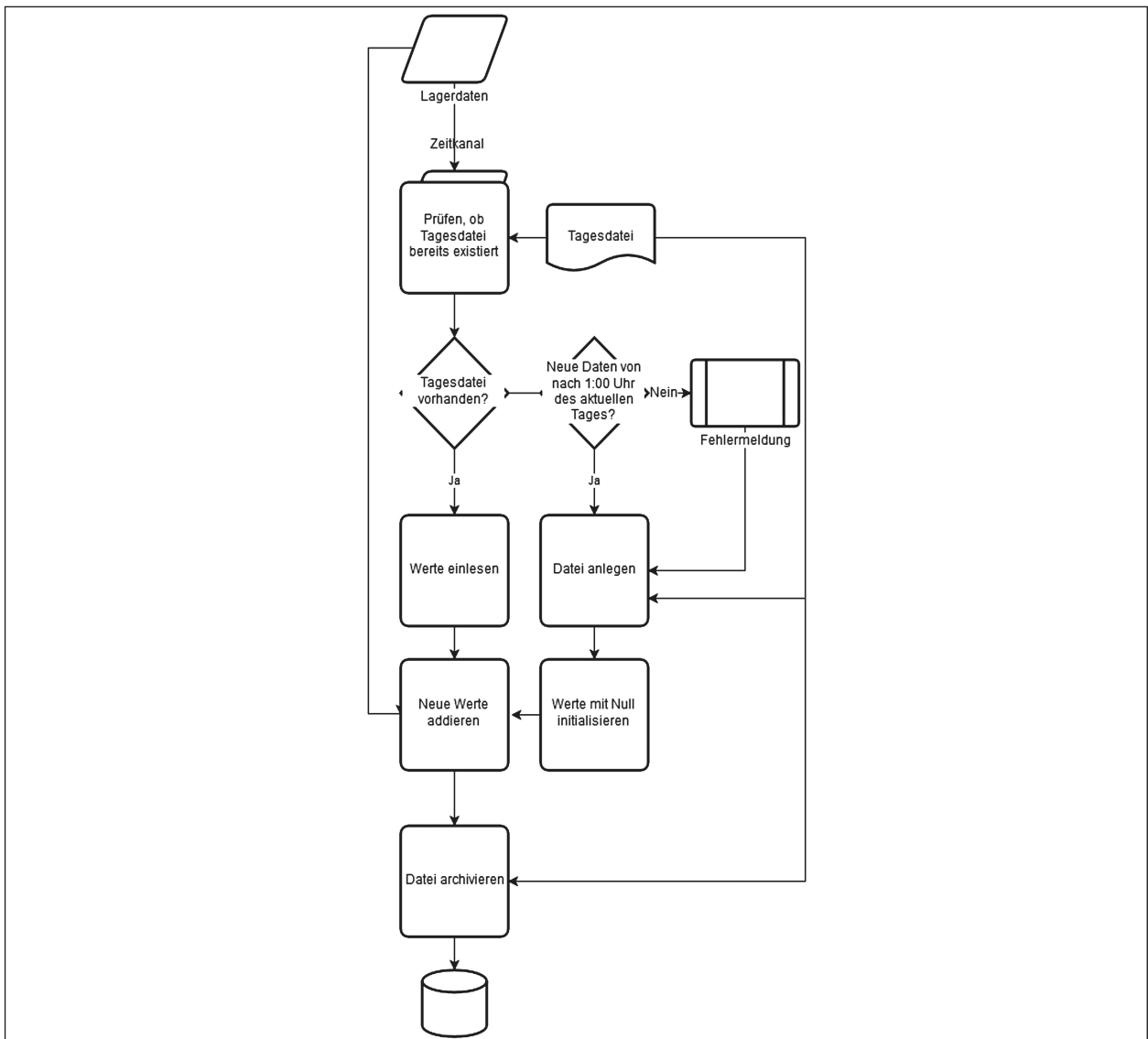


Bild 136: Ablaufdiagramm des Ausgabemoduls „Ergebnisdatenablage“

10.3 Implementierung und Erprobung

Die automatisierte Auswertung läuft auf dem zusätzlich im Bauwerk installierten Rechner seit 10.02.2019.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager“ wurden die nachfolgend überblicksmäßig dargestellten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse erarbeitet.

- Die Auswahl der Sensoren und die Messwerterfassungssystem liefern qualitativ hochwertige Messdaten, mit denen quasi-stationäre und fluktuierende Anteile der vertikalen Lagereinwirkung, horizontalen Verschiebung und Lagerverdrehung erfasst werden können. Die Sensoren und das Messwerterfassungssystem laufen bis auf 3 Drucksensoren seit 2 Jahren sehr stabil und sind robust. Wiederholte Referenzfahrten nach 1,5 Jahren Betriebszeit zeigen unverändert genaue Messergebnisse der fluktuierenden Druckschwankungen infolge Verkehr.
- Zur Selbstüberwachung der Lager:
 - werden akkumulierte Gleitwege infolge verkehrsinduzierten Belastungen und infolge quasi-stationären temperaturbedingten Verschiebungen in der ebenen und in der sphärischen Gleitebene ermittelt. Diese sind ein Maß für die Beanspruchung der Lager und können frühzeitig ein Indiz für kritischen Verschleiß des Gleitmaterials liefern.
 - wird eine Methode zur Bestimmung des kombinierten Gleitspalt bestehend aus dem ebenen und dem konkaven Gleitspalt entwickelt und bewertet.
 - werden Maxima und Minima der Lagerver-schiebung und Verdrehung infolge quasi-stationärer Einwirkungen und infolge Verkehrseinwirkungen ausgewertet und mit der Verschiebe- und Verdrehkapazität der Lager verglichen. Bei einer Überschreitung könnte die Funktions-tüchtigkeit eingeschränkt werden. Die jährlichen Maxima und Minima werden verwendet, um den statistisch berechnete bemessungsre-

levante Quantilwerte zu berechnen. Diese Quantilwerte werden mit denen aus den statischen Berechnungen verglichen.

- werden Maxima und Minima der vertikalen Druckeinwirkung ausgewertet und mit zulässigen Werten verglichen. Eine Überschreitung könnte das Gleitmaterial schädigen, eine Unterschreitung könnte zu einer klaffenden Fuge führen. Die jährlichen Maxima und Minima werden verwendet, um den statistisch berechnete bemessungsrelevante Quantilwerte zu berechnen. Diese Quantilwerte werden mit denen aus den statischen Berechnungen verglichen.
- Zur Überwachung der Brücke
 - werden die ersten beiden Brückeneigenfrequenzen ermittelt. Eine Änderung der Eigenfrequenz kann ein Indiz für eine Änderung der Brückensteifigkeit oder Änderung des Lagersystems sein.
 - werden die monatlichen Mittelwerte der quasi-stationären Lagerkräfte ermittelt und mit Bemessungswerten verglichen. Eine Änderung könnte ein Indiz für eine Systemänderung im Bauwerk sein, z. B. Stützensenkung, Steifigkeitsänderung.
- Zur Erfassung der Verkehrseinwirkung werden aus den fluktuierenden Lagerkräfte in Peak-Histogramme berechnet.
 - Quasi-stationäre vertikale Lagereinwirkungen. Eine Änderung kann ein Indiz für eine Änderung der Brückensteifigkeit oder Änderung des Lagersystems sein.
- Zur Überwachung der Brückenbelastung werden ermittelt:
 - Maxima der fluktuierenden Lagereinwirkung als Größe der Verkehrseinwirkung auf das Lager.
- Automatisierte Auswertelgorithmen für die oben genannten Kenngrößen werden implementiert, erprobt und liefern kontinuierliche Ergebnisse.

Die intelligenten Kalottenlager wurden durch Messdatenanalyse, Entwicklung geeigneter Algorithmen und Implementierung einer automatisierten Auswertung zu einem effektiven Baustein einer „Intelligenten Brücke“. Sie liefern kontinuierlich relevante Informationen sowohl zu Eigenüberwachung, Bauwerksüberwachung als auch Einwirkungserfas-

sung. Somit können die Ergebnisse eingebunden werden in Prognose- und Strukturmodelle und damit eine Grundlage für ein zuverlässigkeitsorientiertes und präventives Erhaltungsmanagement schaffen.

Weitere Ergebnisse des Vorhabens sind:

- Ermittlung der Synchronität der Daten vom intelligenten Kalottenlager und RTMS sowie Analyse der Lagerbewegungen von Lager 40\1 (RTMS) und 40\3 (Maurer)
- Korrelation zwischen quasi-stationären Lagergrößen und der Bauwerks- und Lufttemperatur
- FEM-Berechnungen an einem Brückenmodell zur Bestimmung der Eignung zur Erfassung der Verkehrslast am BW 402 mithilfe von instrumentierten Kalottenlager in Achse 40.

Für die derzeit eingebauten intelligenten Kalottenlager sind folgende Aspekte zur Verbesserung der Ergebnisqualität sinnvoll

- Ursachenforschung für die Ausfälle der Drucksensoren,
- Bestimmung von Fahrzeuggesamtgewichten mithilfe von Einflusslinien der Lagerkraft, der gemessenen fluktuierenden Lagerkräfte sowie einer Fahrzeugerkennung anhand der Messdaten der Intelligenten Dehnfuge.
- Bereinigung der quasi-stationären Drücke um die tagesgangabhängigen Einflüsse, basierend auf einer Korrelationsanalyse zwischen Verdrehung um Lager-x-Achse für Lager 40/1, zur Verbesserung der Lagerkraft infolge Eigengewicht.

Für neue instrumentierte Kalottenlager sollte Folgendes angestrebt werden:

- Verbesserung der Genauigkeit der statischen Auflastmessung auf $\leq \pm 1$ bzw. $\pm 0,5\text{N/mm}^2$,
- Auswahl und Installation von Sensortechnik, so dass verkehrsinduzierte Lagerverschiebungen in der ebenen Gleitfläche unmittelbar gemessen werden können.

Literatur

- [1] PEETERS, B.: System Identification and Damage Detection in Civil Engineering; PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000
- [2] BUTZ, C.: Intelligente Kalottenlager - Auswertung der Kalibrierfahrten und des regellosen Verkehrs, 2017
- [3] BUTZ, C., FREUNDT, U., FISCHER, M. et al.: 2. Zwischenbericht zu FE 15.0615/2015/ARB „Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke-Untersuchungsprogramm“, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018 (unveröffentlicht)
- [4] 1. Ergänzung zur Statischen Berechnung, Ersatzneubau BW 402e, Block 1-1.2 - Lagerkräfte und -wege, HFR Ingenieure GmbH, 19.07.2015
- [5] PRAHL, C.: Analyse und Bewertung von mmS Kalotten-Gleitlagern zur Erfassung der Verkehrslast der intelligenten Brücke im digitalen Testfeld Autobahn, Masterarbeit (unveröffentlicht), RWTH Aachen, 2017
- [6] Europäische Technische Bewertung „Kalotten- und Zylinderlager mit besonderem Gleitwerkstoff aus UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene)“, ETA-06/0131, Deutsches Institut für Bautechnik, 24. Mai 2018
- [7] European Assessment Document „Spherical and cylindrical bearing with special sliding material made of UHMWPE (ultra high molecular weight polyethylene)“, EAD 050004-00-0301, Dezember 2017, EOTA
- [8] Maurer MSM®-Gleitlager, Produktbroschüre, Maurer Söhne GmbH & Co. KG, (zu finden auf https://www.zulul.com/public/yncatalogues_flipbook/83/16/166d_2829.pdf am 12.03.2019)
- [9] BUTZ, C.; MANGERIG, I; FRIEDL, R.; ADAM, A.: Intelligente Schwenktraversendehnfuge und intelligentes Kalottenlager, Schlussbericht (unveröffentlicht), FE-Nr. 88.110-88.112, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2017
- [10] TLS 2012- Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012, Bundesanstalt für Straßenwesen

[11] Richtzeichnung Lag 2, Bundesanstalt für Straßenwesen, Dezember 2009

zeitraum Januar 2017 bis Mai 2018

Bilder

- Bild 1: Einbauorte der instrumentierten Lager im BW402e
- Bild 2: Koordinatensystem und Position der Drucksensoren in KGA 40/1
- Bild 3: Eingebautes KGA 40/1 im Bauwerk
- Bild 4: Koordinatensystem und Position der Druck-, Abstands- und Wegsensoren im KGA 40/3
- Bild 5: Eingebautes KGA 40/3 im Bauwerk
- Bild 6: Erfasste Messdaten zwischen Januar 2017 und Dezember 2018
- Bild 7: Horizontale Lagerverschiebung $u_{x,40/3}$ in Brückenlängsrichtung
- Bild 8: Fluktuierende Auflagerkräfte in Achse 40
- Bild 9: Abstandsmessung am Lager 40/3 Richtung Achse
- Bild 10: Horizontale Lagerverschiebung und akkumulierter Gleitweg für einen Tag
- Bild 11: Quasi-stationäre horizontale Lagerverschiebung und akk. Gleitweg von Januar 2017 bis Dezember 2018
- Bild 12: Horizontale Lagerverschiebung von Januar 2017 bis Dezember 2018 und linearer Trend zur Identifizierung von Schwinden
- Bild 13: Um temperaturbedingte Verschiebungen bereinigte Lagerverschiebung
- Bild 14: Zeiträume der gemessenen Klimadaten von UzL vom 14.6.2017 bis 31.5.2018
- Bild 15: Oberflächentemperatur der Brücke gemessen mit Sensor 60 und Lufttemperatur an der Wetterstation gemessen mit Sensor
- Bild 16: Oberflächentemperatur der Brücke gemessen mit Sensor 60 und horizontale Verschiebung am Lager 40/3
- Bild 17: Oberflächentemperatur der Brücke und Lufttemperatur versus ebene Verschiebung am Lager 40/3 für den Erfassungs-
- Bild 18: Verschiebung der ebenen Gleitplatte infolge Rotation der Kalotte
- Bild 19: Bezeichnung der geometrischen Größen und der Freiheitsgrade des idealisierten Kalottenlagers
- Bild 20: Ebene berechnete Lagerverschiebung infolge Verkehr am idealisierten Kalottenlager
- Bild 21: Ebene gemessene relative Lagerverschiebung infolge Verkehr
- Bild 22: Ebene gemessene relative Lagerverschiebung infolge Verkehr
- Bild 23: Summe der ebenen relative Lagerverschiebung infolge fluktuierender und quasi-stationärer Lagerverschiebungen für den Zeitraum von 1.1.2017 bis 31.12.2018
- Bild 24: Normalverteilung der Tagesmax/Min im Monat August 2017 und der Monatsmax/Min von 01.2017 bis 12.2018
- Bild 25: Abweichung der Mittelwerte über die ganze Messdatei und einzelne unbelastete Intervalle der horizontalen Lagerverschiebung
- Bild 26: Abstand zwischen Lagerober- und -unterteil
- Bild 27: Lagerverdrehung bzw. Verdrehung der Kalotte
- Bild 28: Verschiebung der Kalotte und zugehöriger akkumulierter Gleitweg
- Bild 29: Quasi-stationäre Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima der Lagerverdrehung im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018
- Bild 30: Quasi-stationäre mittlere Lagerverdrehung sowie lineare Trend zur Identifizierung von nicht reversiblen Langzeit-Effekten im Zeitraum vom 1.1.2017 bis 31.12.2018
- Bild 31: Quasi-stationäre akkumulierte Gleitweg in der ebenen und in der sphärischen Gleitfläche im Zeitraum von 01.01.2017 bis 31.12.2018
- Bild 32: Sphärischer und ebener Gleitweg und akk. Gleitweg infolge Verkehrsüberfahrten

- Bild 33: Absolute Maxima der Gleitgeschwindigkeit in der sphärischen Gleitfläche im April 2017
- Bild 34: Bauwerkstemperatur und Verdrehung des Lagers 40/3
- Bild 35: Lufttemperatur und Verdrehung des Lagers 40/3
- Bild 36: Bauwerks- und Lufttemperatur versus Verdrehung des Lagers 40/3 für Januar 2017 bis Mai 2018
- Bild 37: Kippspalt und Gleitpalte bei einem Kalottenlager [11]
- Bild 38: Bezugsmaß „Abstand zur oberen Lagerplatte“ als Maß des kombinierten Gleitpalts
- Bild 39: Relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte LO-Abstand versus Lagerverdrehung bei regellosen Verkehrsüberfahrten
- Bild 40: Quasi-stationäre Lagerverdrehung und relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte
- Bild 41: Relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte versus quasi-stationäre Lagerverdrehung
- Bild 42: Normalverteilung der Tagemax/Min der absoluten Lagerverdrehung und die Tagesmax der quasi-stationären Lagerverdrehung von August 2017
- Bild 43: Normalverteilung der Monatsmax/Min von 01.2017 bis 12.2018
- Bild 44: Fluktuierende Lagereinwirkungen
- Bild 45: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/1
- Bild 46: Quasi-stationäre Druckschwankungen im Lager 40/3
- Bild 47: Analyse der Messdaten von Mai 2017 hinsichtlich Korrelationen der Sensoren untereinander
- Bild 48: Gemessener Druck am Sensor DS 40/1-3 dargestellt in Form von täglichen Maxima, Minima und Mittelwerten
- Bild 49: Gemessener Druck am Sensor DS 40/3-3 dargestellt in Form von täglichen Maxima, Minima und Mittelwerten
- Bild 50: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/1-1 im April 2017
- Bild 51: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/1-2 im April 2017
- Bild 52: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/1-3 im April 2017
- Bild 53: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/3-2 im April 2017
- Bild 54: Quasi-stationärer Druck des Sensors DS 40/3-3 im April 2017
- Bild 55: Quasi-stationäre berechnete vertikale Lagereinwirkung KGA 40/1 im April 2017
- Bild 56: Quasi-stationäre berechnete vertikale Lagereinwirkung KGA 40/3 im April 2017
- Bild 57: Monatliche Mittelwerte der quasi-stationären vertikalen Lagereinwirkung KGA 40/1 und KGA 40/3
- Bild 58: Tagesmittelwert der Lagerverdrehung versus Tagesmittelwert des Lagerdrucks im Zeitraum von Januar 2017 bis Dezember 2018
- Bild 59: 10-minütiger Mittelwert der Lagerverdrehung versus 10-minütiger Mittelwert des Lagerdrucks im Zeitraum von 11.05. bis 23.05.2017
- Bild 60: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-1 im August 2017
- Bild 61: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-2 im August 2017
- Bild 62: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/1-3 im August 2017
- Bild 63: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/3-2 im August 2017
- Bild 64: Lufttemperatur und Druckschwankungen des Sensors DS 40/3-3 im August 2017
- Bild 65: Druck DS 40/1-3 versus Luft- und Bauwerkstemperatur
- Bild 66: Druck DS 40/3-3 versus Luft- und Bauwerkstemperatur
- Bild 67: Tagesgänge der Druckänderungen ver-

	sus Bauwerkstemperatur	Bild 87:	Vernetzung im Auflagerbereich
Bild 68	Kalibrierfunktionen für fluktuierende Druckschwankungen	Bild 88:	Elementqualität
Bild 69:	Peak-Suche in der Lagerkraftsumme	Bild 89:	Lagersystem [4]
Bild 70:	Peak-Klassifizierung für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2018	Bild 90:	Lagerung über externe Punkte und Federn
Bild 71:	Statistische Auswertung der monatlichen Maxima der fluktuierenden Lagerkraftsumme für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2018	Bild 91:	Detailansicht der Lagerung
Bild 72:	Gemittelte Frequenzspektren der Abstandsmessungen	Bild 92:	Referenzfahrzeug 3-Achser
Bild 73:	Eigenfrequenzen durch Peak-Picking der Abstandsmessung AS 40/3-50 im April 2017	Bild 93:	Umsetzung 3-Achser in FEM
Bild 74:	Stabilisationsdiagramm der Abstandsmessung zwischen Lageroberteil und -unterteil	Bild 94:	Referenzfahrzeug 5-Achser
Bild 75	Verdrehung von Lager 40/1 und 40/3, zugehörige Kreuzkorrelation und zeitlicher Versatz zwischen RTMS und MMS aus 10-minütigen Messdateien	Bild 95:	Umsetzung 5-Achser in FEM
Bild 76	Rohdaten der Sensoren zur Erfassung der relativen horizontalen Verschiebung	Bild 96:	Koordinatensystem des FEM-Modells
Bild 77	Quasi-stationäre Verschiebungen und akkumulierte quasi-stationäre Gleitwege von Lager 40/1 und 40/3	Bild 97:	gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/1 lfd.-Nr. 26, 32, 34
Bild 78	Gemessene und berechnete Verschiebung der ebenen Gleitfläche infolge Verkehr	Bild 98:	Gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/3 lfd.-Nr. 26, 32, 34
Bild 79	Abstandsmessungen am Lager 40/1 und 40/3 und berechnete Verdrehungen	Bild 99:	Gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/1 lfd.-Nr. 23, 29, 36
Bild 80:	Akkumulierter Gleitweg in der konkaven Gleitebene infolge verkehrsinduzierten Verdrehungen für Lager 40/1 (RTMS) und 40/3 (MMS)	Bild 100:	Gemessener Kraft-Weg-Verlauf 40/3 lfd.-Nr. 23, 29, 36
Bild 81:	Statisches System der Brücke	Bild 101:	Auswertepositionen und Zustandsgrößen für die Einflusslinien
Bild 82:	Vereinfachung der Geometrie des Querschnitts	Bild 102:	Trassierung Schnitt A-A2
Bild 83:	Maße des vereinfachten Brückenquerschnitts	Bild 103:	Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 1
Bild 84:	Schalenmodell der Brücke	Bild 104:	Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 1
Bild 85:	Auflagerflächen	Bild 105:	Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr.2
Bild 86:	Vernetzung auf der Fahrbahn	Bild 106:	Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr.2
		Bild 107:	Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 3
		Bild 108:	Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 3
		Bild 109:	Einflusslinien der Kräfte für Fahrt lfd.-Nr. 4
		Bild 110:	Einflusslinien der Verdrehung und Verschiebung für Fahrt lfd.-Nr. 4
		Bild 111:	Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für lfd.-Nr. 1
		Bild 112:	Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für lfd.-Nr. 3
		Bild 113:	Vergleich Lagerreaktion Messung zu

	FEM für lfd.-Nr. 2
Bild 114:	Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für lfd.-Nr. 1
Bild 115:	Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für lfd.-Nr. 3
Bild 116:	Vergleich Lagerverdrehung Messung zu FEM für lfd.-Nr. 2
Bild 117:	Definition und Richtung der Querverschiebung
Bild 118:	Lagerreaktion bei Querverschiebung
Bild 119:	Lagerverdrehung bei Querverschiebung
Bild 120:	Laststellungen bei Nullstellen (rot und blau) und bei Schnittpunkt (grün)
Bild 121:	Lkw für Referenzfahrten
Bild 122:	Ladungsverteilung, 3-Achs-Lkw im Hintergrund, 5-Achs-Lkw im Vordergrund
Bild 123:	Achsabstände und -lasten der Messfahrzeuge
Bild 124:	Temporär befestigter Wegsensor mit Messbereich 0...2mm
Bild 125:	Ungefilterte fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt mit 3-Achs-Lkw, mit 5-Achs-Lkw und mit Parallelfahrt
Bild 126:	Gefilterte Gesamtlagerkraft bei Überfahrt mit 3-Achs-Lkw, mit 5-Achs-Lkw und mit Parallelfahrt
Bild 127:	Gemessene maximale Lagerkraft versus statisches Lkw-Gewicht
Bild 128:	Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 3-Achs-Lkws auf der rechten Fahrspur
Bild 129:	Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 3-Achs-Lkws auf der linken Fahrspur
Bild 130:	Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 5-Achs-Lkws auf der rechten Fahrspur
Bild 131:	Fluktuierende Lagerreaktionen bei Überfahrt des 5-Achs-Lkws auf der linken Fahrspur
Bild 132:	Bildschirmausgabe der Auswertesoftware
Bild 133:	Ablaufdiagramm des Moduls „Main“

Bild 134:	Ablaufdiagramm des Eingabemoduls „Read7-Zip“
Bild 135:	Ablaufdiagramm des Verarbeitungsmoduls „Lagerauswertung“
Bild 136:	Ablaufdiagramm des Ausgabemoduls „Ergebnisdatenablage“

Tabellen

Tab. 1:	Anzahl der Sensoren pro Lager
Tab. 2:	Jährliche Extremwerte der quasi-stationären Lagerverschiebung
Tab. 3:	Quantilwerte der Tagesextremwerte für August 2017
Tab. 4:	Quantilwerte der monatlichen Extremwerte für August 2017
Tab. 5:	Jährliche Extremwerte der quasi-stationären Lagerverschiebung
Tab. 6:	Lagerlasten für Achse 40 [4]
Tab. 7:	Abweichung gemessenen von berechneten Lagerlasten [4]
Tab. 8:	Mittelwert und Standardabweichung der monatl. Mittelwert der Lagerkraft für den Zeitraum Jan. 2017 bis Dez. 2018
Tab. 9:	Systemeigenschaften von RTMS und MMS zur Erfassung der Zeit
Tab. 10:	Beschreibung und Eigenschaften der Wegsensoren
Tab. 11:	Materialeigenschaften des Betons 78
Tab. 12:	Definition lfd.-Nr.
Tab. 13:	Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen
Tab. 14:	Abfolge der Referenzfahrten relevant für die Lagermessung
Tab. 15:	Ergebnisse der automatisierten Auswertung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2016

B 123: **Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**

Geißler, Krohn € 15,50

B 124: **Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: **Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: **Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: **Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**

Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: **Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 131: **Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**

Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: **Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: **Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: **Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erüchtigungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: **Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: **Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: **Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: **Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: **Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: **Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: **Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennerberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: **Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: **Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: **8. BAsT-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: **Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blofeld, 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**

in Vorbereitung

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack

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**

Lehardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager

Butz

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.