

# Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleitlager

FA 15.632

Forschungsstelle: Maurer Engineering GmbH, München  
 Bearbeiter: Butz, C.  
 Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)  
 Abschluss: September 2019

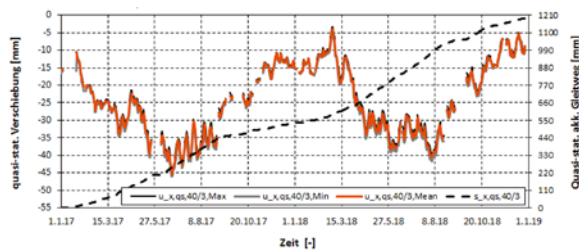
## 1 Intelligente Kalotten-Gleitlager

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 Informationen über den Zustand und die Belastung der Brücke zu liefern. Unter anderem wurden zwei instrumentierte, allseits bewegliche Kalotten-Gleitlager mit integrierter Messtechnik eingebaut.

In dem Projekt wird die Eignung der instrumentierten Kalottenlager zur Erfassung der Einwirkungen aus Eigengewicht, Verkehr und Temperatur sowie zur Selbstüberwachung ermittelt und eine automatisierte Auswertung der Messgrößen entwickelt. Es sind jeweils drei Drucksensoren im Lager 40/1 und 40/3 im Lagerunterteil integriert. Im Lager 40/3 sind zusätzlich zwei Abstandssensoren und ein Wegaufnehmer installiert.

## 2 Lagerverschiebung in der ebenen Gleitfläche

Die horizontale Lagerverschiebung zwischen Lageroberteil und Lagerunterteil wird mit einem Wegsensor erfasst. Die temperaturinduzierte, quasi-stationäre Verschiebung der ebenen Gleitfläche zwischen Lageroberteil und -unterteil wird anhand der 10-min-Mittelwerte ermittelt. Als Maß für die Beanspruchung des Gleitmaterials wird anhand der Verschiebung der akkumulierte quasi-stationäre Gleitweg der ebenen Gleitfläche ermittelt (siehe Bild 1).



**Bild 1: Horizontale Lagerverschiebung und akk. Gleitweg von Januar 2017 bis Dezember 2018**

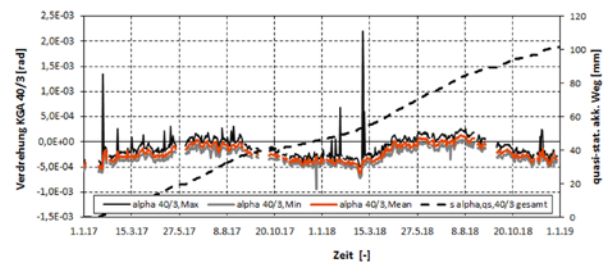
In Bild 1 erkennt man deutlich den jahreszeitlichen Einfluss, das heißt, im Sommer dehnt sich die Brücke aus, im Winter zieht sie sich zusammen. Im Bezugszeitraum betragen die Extremwerte des gemittelten Verschiebewegs 41,5 mm zwischen dem Minimum von -45,5 mm und dem Maximum von -4,00 mm. Aufgrund einer 82%igen Datenerfassung während des Messzeitraums wird der durchschnittliche akkumulierte Gleitweg pro 10-min-Datensatz zu 0,01405 mm ermittelt. Der damit berechnete akkumulierte Gleitweg für den Zeitraum von zwei Jahren beträgt 1446,2 mm. Wird die Entwurfslebensdauer der Brücke von 100 Jahren betrachtet, ergibt sich ein akkumulierter quasi-stationärer Gleitweg von 72,31 m.

Eine Korrelationsanalyse von Lagerverschiebung und Bauwerkstemperatur zeigt, dass die tatsächliche Wärmeausdehnung ca. 85 bis 90 % der mit normativen Werten berechneten ist. Es ergibt sich ein Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  für die Brücke von  $0,9 \times 10^{-5}$  beziehungsweise  $0,85 \times 10^{-5}$  [1/K].

Aufgrund der kinematischen Bewegungsmöglichkeit der Kalottenlager wird bei einer durch Verkehr hervorgerufenen Lagerverdrehung eine damit einhergehende ausgleichende Lagerverschiebung hervorgerufen. Die verkehrsinduzierte Verschiebung der ebenen Gleitfläche lässt sich mithilfe der zeitlich veränderlichen Rotation des Lagers ermitteln. Bei Vernachlässigung der Elastizität und der Reibung des Gleitwerkstoffs ergeben sich durch modellbasierte Berechnungen konservative verkehrsinduzierte Verschiebungen. Mit Messungen wird eine empirische Korrekturfunktion ermittelt, die Reibungs- und Elastizitätseffekte erfasst, um die berechneten Lagerverschiebungen zu korrigieren. Der durchschnittliche fluktuierende akkumulierte Gleitweg beträgt 1,96 mm pro 10-min-Datensatz. Anhand dieses Werts und des durchschnittlich ermittelten quasi-stationären Gleitwegs ergibt sich ein gesamter Gleitweg von 203 189,2 mm über den 2-Jahres-Zeitraum. Unter Annahme, dass der Verkehr sich nicht ändert, beträgt der prognostizierte akkumulierte Gleitweg nach 100 Jahren 10 160 m. In den Zulassungsversuchen wurde das Gleitmaterial MSM® einem akkumuliertem Gleitweg von 50 km ohne augenscheinlichen Verschleiß ausgesetzt. Demzufolge würde das Lager 40/3 in der ebenen Gleitfläche keinen nennenswerten Verschleiß während der gesamten Lebensdauer der Brücke erfahren.

## 3 Lagerverdrehung und -verschiebung in der sphärischen Gleitfläche

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. In der Lagerverdrehung ist deutlich eine stationäre jahreszeitlich veränderliche Verdrehung erkennbar, die durch fluktuierende verkehrsinduzierte Verdrehungen überlagert ist (siehe Bild 2).  $\alpha_{40/3} \sim 0$  im Sommer bedeutet, dass die Lagerverdrehung dem Zustand vom Juni 2016 entspricht, als die Sensoren eingestellt wurden. Mögliche Ursachen für die lokalen Spitzen der maximalen Verdrehungen sind erhebliches Verkehrsaufkommen, Arbeiten an der Brücke oder in der Nähe der Brücke und elektronische Störungen.



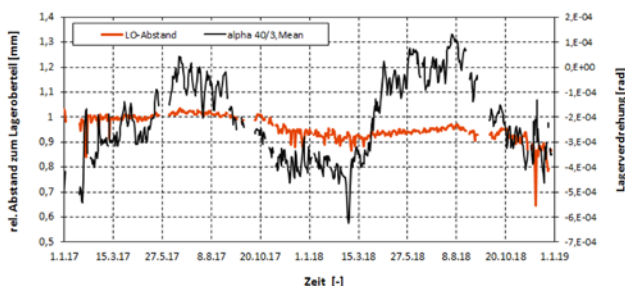
**Bild 2: Quasi-sta. Lagerverdrehung sowie Maxima und Minima vom 01.01.2017 bis 31.12.2018**

Die maximale 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 und minimale mittlere Lagerverdrehung von  $1,31 \times 10^{-4}$  rad und  $-6,25 \times 10^{-4}$  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  $\pm 5,0 \times 10^{-3}$  rad.

Die quasi-stationäre Lagerverdrehung wird verwendet, um den Gleitweg in der sphärischen Gleitebene und damit den akkumulierten Gleitweg infolge Temperaturverformung des Brückendecks zu berechnen. Es ergibt sich ein akkumulierter Gleitweg von  $1,2 \times 10^{-3}$  mm pro 10-min-Datensatz, das heißt 61,8 mm pro Jahr. Anhand der fluktuierenden Lagerverdrehung werden die Verschiebungen in der sphärischen und der ebenen Gleitfläche berechnet und aufsummiert. Die akkumulierten gesamten Lagerverschiebungen in der sphärischen Gleitebene betragen ca. 2,86 mm pro 10-min-Datensatz, das heißt 147,19 m pro Jahr. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung führen die fluktuierenden Lagerverdrehungen zu großen akkumulierten Gleitwegen und sind bei der Eigenüberwachung nicht zu vernachlässigen. Die Prognose des akkumulierten Gleitwegs während der Lebensdauer der Brücke ergibt 14,725 km, sodass mit keinem nennenswerten Verschleiß des Gleitmaterials zu rechnen ist.

## 4 Gleitpalte der primären und sekundären Gleitflächen

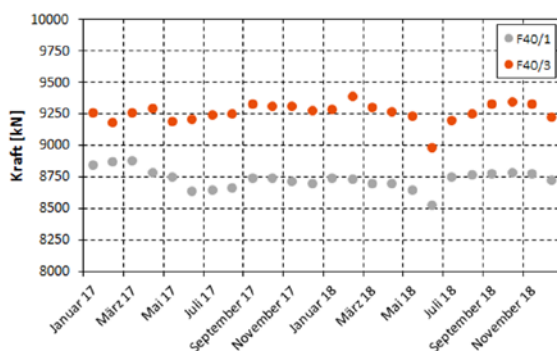
Der relative Abstand zwischen Lagerunterteil und dem Zentrum des Lageroberteils wird mithilfe der Abstandssensoren und der Annahme eines mechanischen Kalottenlagermodells berechnet. Die Werte des berechneten LO-Abstands können als Indiz für Verschleiß verstanden werden, da einige Einflussgrößen im mechanischen Modell vernachlässigt werden. Der Verlauf des LO-Abstands über den zweijährigen Zeitraum basierend auf quasi-stationären Werten ergibt einen sinnvollen Verlauf mit geringer Streubreite, die durch vernachlässigbare Einflussfaktoren hervorgerufen wird. Somit ist die Betrachtung des LO-Abstands eine geeignete Größe zur Eigenüberwachung des Kalottenlagers, das heißt, der Verschleiß des Gleitmaterials infolge Gleitweg wird überwacht. In Bild 3 ist eine Reduktion des Abstands von ca. 1 auf 0,95 mm, die eventuell mit jahreszeitlichen Temperaturschwankungen korreliert sein könnte, zu erkennen. Für eine Beurteilung, ob die Abnahme durch Verschleiß des Gleitmaterials oder durch Setzungen des Betons oder Durchbiegungen hervorgerufen wird, ist ein längerer Messzeitraum erforderlich.



**Bild 3:** Quasi-stationäre Lagerverdrehung und relative Höhe der Gleitplatte zentrisch über der Kalotte

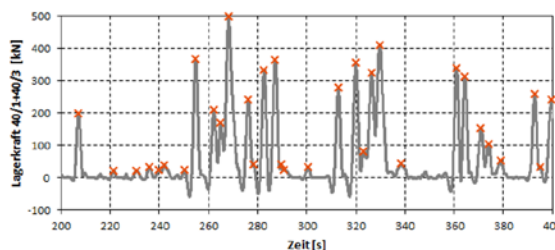
## 5 Vertikale Lagereinwirkung

Die gemessenen vertikalen quasi-stationären Lagerkräfte werden mit berechneten Werten verglichen, um eine mögliche Kraftumlagerung aufgrund von Brückenänderungen, zum Beispiel Steifigkeitsänderungen, Lagensenkungen etc., zu detektieren. Bild 4 zeigt die monatlichen Mittelwerte der aus quasi-statischen Druckwerten berechneten Lagerkräfte. Der Mittelwert der gemessenen Lagerkraft beträgt 8 721,5 kN am Lager 40/1 und 9 248,8 kN am Lager 40/3. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Drucksensoren von  $\pm 2$  N/mm<sup>2</sup> wird die Abweichung zwischen gemessenen und in der Brückenstatik berechneten Lasten ermittelt. Die gemessenen Lasten sind zwischen 1,04 bis 1,27 beziehungsweise um das 1,22-Fache größer als die Berechneten, aber dennoch geringer als die  $\gamma_G$ -Fachen berechneten ständigen Lasten. Somit bilden die Werte aus den statischen Berechnungen basierend auf normativen Materialeigenschaften die tatsächlichen Lasten gut ab. Der Vergleich mit Bemessungswerten führt nur zu einem "Korridor"-Vergleich, da nicht separiert werden kann, welche Systemveränderungen, zum Beispiel Stützensenkungen, bereits eingetreten sind beziehungsweise den Einfluss der Herstelltoleranz des Bauwerks auf die Lagereinwirkungen.



**Bild 4:** Monatliche Mittelwerte der quasi-stationäre vertikale Lagereinwirkung KGA 40/1 und KGA 40/3

Anhand der Drucksensoren lassen sich fluktuierende Lagerreaktionen infolge von Verkehr gut und ausreichend genau erfassen. Die Lkw-Gesamtgewichte werden mit einer Genauigkeit von  $\pm 7$  % erfasst (siehe Bild 8). Aus der Summe der fluktuierenden Lagerkräfte von Lager 40/1 und 40/3 werden lokale Maxima, die größer als 20 kN (das heißt 2038 kg) sind, ermittelt (siehe Bild 5). Diese werden mit einer Peak-Klassifizierung zusammengefasst und liefern somit wertvolle Informationen über die Einwirkung infolge von Verkehr auf die Brücke (siehe Bild 6).



**Bild 5:** Peak-Suche in der Lagerkraftsumme bei dichtem Verkehr

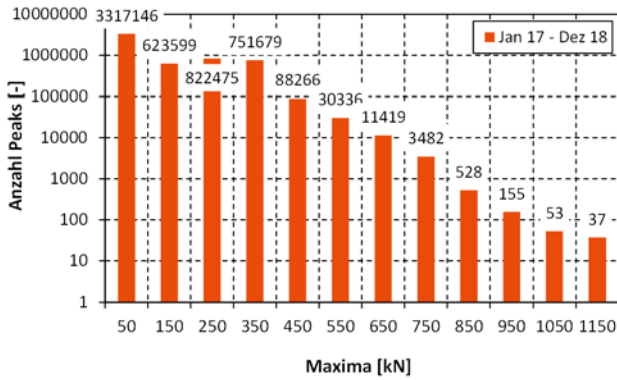


Bild 6: Peak-Klassifizierung für den Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2018

### 6 Brückeneigenfrequenz

Die Brückeneigenfrequenzen sind Kenngrößen für die Steifigkeit der Brücke. Mithilfe der Messung der Verdrehung der Kalotte beziehungsweise der Abstände zwischen Lageroberteil und -unterteil werden das Schwingungsverhalten der Brücke erfasst und die Eigenfrequenzen ermittelt.

### 7 Auswertung der verkehrsinduzierten Anteile anhand Simulation

Da lediglich die beiden Lager der Achse 40 instrumentiert sind, ist es erforderlich, zur Bestimmung der Genauigkeit der Verkehrseinwirkung an einem FE-Modell der Brücke Untersuchungen durchzuführen. Zur Überprüfung der gemessenen verkehrsinduzierten Lagereinwirkungen mit der tatsächlichen Belastung aus Verkehr werden die Referenzfahrten an einem FE-Brückenmodell mit kontinuierlich wandernden Einzellasten nachgebildet. Die Ergebnisse (siehe Bild 7) zeigen eine gute Ähnlichkeit mit den Messungen. Die Lager sind in der Lage, die volle Verkehrslast von Lkw zu erfassen.

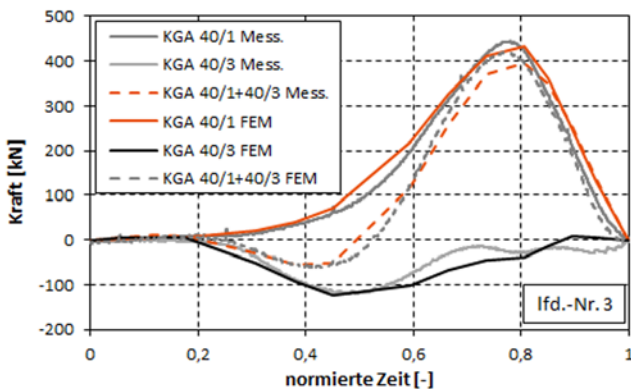


Bild 7: Vergleich Lagerreaktion Messung zu FEM für Kalibrierfahrt lfd.-Nr. 3

### 8 Qualitätssicherung der Messwerte

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, wurde nach ca. 1,5 Jahren Betriebszeit eine Untersuchung zur Qualitätssicherung der Sensorsignale durchgeführt. Es wurden Referenzfahrten mit ähnlichen Lkw und Geschwindigkeiten

wiederholt und die fluktuierenden Lagerkräfte mit dem Lkw-Gesamtgewicht verglichen (siehe Bild 8). Insgesamt ist die Genauigkeit der Verkehrslastermittlung bei  $\pm 7\%$  und damit weiterhin sehr zufriedenstellend. Die Kalibrierung der Lager zur Messung des Eigengewichts sollte in einem Labor stattfinden. Die Kalibrierung zur Messung von Verkehrslasten kann an den installierten Lagern erfolgen durch Kalibrierfahrten mit Lastwagen. Die Qualitätssicherung der Drucksignale zur Verkehrserfassung sollte alle zwei Jahre durchgeführt werden. Die Qualitätssicherungen der Messungen des Eigengewichts sind aufwendiger. Eine teilweise Entlastung mit Pressen von unten ist zu empfehlen.

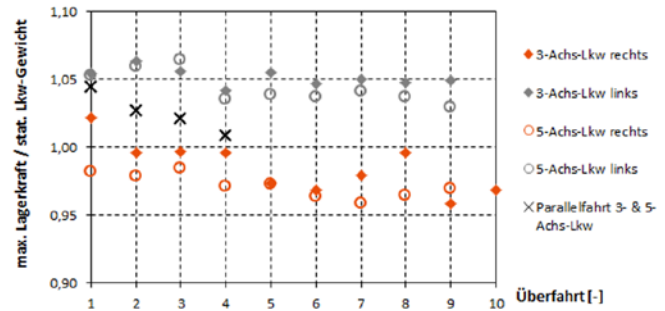


Bild 8: Gemessene max. Lagerkraft vs. statisches Lkw-Gewicht

### 9 Automatisierte Auswertung und Zeitsynchronität von Messsystemen

Bei allen Messsystemen, die an der intelligenten Brücke installiert sind und betrieben werden, werden Zeitkanäle in Echtzeit, die über NTP synchronisiert werden, abgespeichert. Damit ist ein Austausch und eine Weiterverarbeitung der Messdaten zwischen allen Messsystemen möglich. Um die Messergebnisse vor Ort und zeitlich parallel zu deren Erfassung auswerten zu können, wurde eine automatisierte Auswertung implementiert und ist seit Februar 2019 in Betrieb. Sie liefert täglich Ergebnisse der relevanten Parameter, die sowohl der Sensorüberwachung als auch der Überwachung der Lagerfunktion und -lebensdauer sowie der Überwachung des Bauwerks dienen.

### 10 Zusammenfassung

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