

Dynamisches Monitoring einer Eisenbahnbrücke mit Beschleunigungssensoren und Profillaserscanning

Laura LINGEL¹, Lukas SCHNEIDER², Thomas UMMENHOFER² & Corinna HARMENING¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Geodätisches Institut, corinna.harmening@kit.edu

² Karlsruher Institut für Technologie, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-022](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-022), CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für Materialien von Dritten und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.

1 Einleitung

In Deutschland zählt die alternde Infrastruktur zu den zentralen Herausforderungen der kommenden Jahre. Besonders betroffen ist die Brückeninfrastruktur: Ein signifikanter Anteil der Bauwerke weist einen kritischen Zustand auf. Allein in Baden-Württemberg befinden sich ein Zehntel der Brücken in einem sanierungsbedürftigen Zustand (Land Baden-Württemberg, 2025). Um sicherheitsrelevante Schäden frühzeitig zu erkennen, ist eine kontinuierliche Überwachung der Bauwerksszustände notwendig. In diesem Kontext gewinnt das Konzept des Structural Health Monitorings (SHM) zunehmend an Bedeutung. Das SHM befasst sich unter anderem mit der Analyse des Schwingungsverhaltens von Bauwerken. Dabei werden Veränderungen der Eigenfrequenzen, Eigenformen sowie des Dämpfungsfaktors untersucht (Neitzel & Schwarz, 2016). Zur Erfassung dieser Parameter kommen häufig Beschleunigungssensoren zum Einsatz, die punktuell am Bauwerk installiert werden und anhand der gemessenen Beschleunigungen die relevanten Größen ableiten. Die punktuelle Anbringung solcher Sensoren ist jedoch mit einem hohen planerischen, organisatorischen und personellen Aufwand verbunden. Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit das Potenzial berührungslos messender Sensorik untersucht werden, insbesondere der Einsatz terrestrischer Laserscanner (TLS) im Profilmodus. Durch die berührungslose Datenerfassung kann der Installationsaufwand erheblich reduziert werden. Zudem ermöglicht TLS eine quasi-raumkontinuierliche Erfassung entlang des Messprofils. Ein weiterer Vorteil gegenüber der punktuell messenden Beschleunigungssensoren besteht in der Möglichkeit, absolute Auslenkungen direkt zu bestimmen.

Der Einsatz von TLS im Profilmodus zur Erfassung des dynamischen Verhaltens von Brücken hat sich bereits in diversen Arbeiten als erfolgreich erwiesen. Hervorzuheben sind unter anderem die Arbeiten von Schill (2017) und von Neitzel & Schwarz (2016). In dieser Arbeit wird das Messverfahren auf eine Stabbogenbrücke übertragen, wobei der Fokus auf der Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Hänger liegt, mit dem Ziel eine Bestandsaufnahme der hängerspezifischen Eigenfrequenzen durchzuführen.

Das Paper gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden die benötigten theoretischen Grundlagen beschrieben. Kapitel 3 stellt die durchgeführte Messkampagne vor. Das vierte Kapitel beschreibt die Datenauswertung und stellt die Ergebnisse vor. Das Paper schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Untersuchungen in Kapitel 5.

2 Theoretische Grundlagen

Für die Prozessierung der erfassten Messdaten sind die nachfolgend dargestellten theoretischen Grundlagen erforderlich.

2.1 Punktwolkenmodellierung mit B-Spline-Kurven

Eine B-Spline-Kurve ist eine parametrische Kurve der Form (Piegl & Tiller, 1997):

$$\mathbf{C}(u) = \sum_{i=0}^{n_p} N_{i,p}(u) \cdot \mathbf{P}_i, \quad u = [0, \dots, 1] \quad (1)$$

Ein Kurvenpunkt $\mathbf{C}(u)$ berechnet sich demnach als das gewichtete Mittel der n_p+1 Kontrollpunkte \mathbf{P}_i . Die B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,p}(u)$ von Grad p lassen sich rekursiv berechnen und sind Funktionen des Kurvenparameters u , der $\mathbf{C}(u)$ auf der Kurve lokalisiert.

Werden B-Spline-Kurven zur Modellierung von Punktwolken verwendet, wird üblicherweise mehrstufig vorgegangen (Harmening, 2020). Im ersten Schritt werden den beobachteten Datenpunkten im Rahmen der Parametrisierung geeignete Kurvenparameter zugewiesen (s. z. B. Piegl & Tiller, 1997). Anschließend können die Kontrollpunkte in einem linearen Gauß-Markov-Modell geschätzt werden (Bureick et al., 2016). Die Bestimmung der optimalen Anzahl der Kontrollpunkte ist ein Modellselektionsproblem und kann z. B. mit Hilfe des Bayes'schen Informationskriterium (engl.: Bayesian Information Criterion, BIC) gelöst werden (Schwarz, 1978; Harmening & Neuner, 2016). Alternativ bietet sich die strukturelle Risikominimierung an, die auch die Wahl des optimalen Grades p erlaubt (Harmening, 2020). Häufig ist jedoch der Einsatz kubischer Kurven ($p = 3$) ausreichend (Piegl. & Tiller, 1997).

2.2 Multiskalenanalyse mittels Wavelets

Wavelets ψ sind eine Gruppe von Funktionen, die zur Signalanalyse eingesetzt werden können. Sie können durch den Parameter b verschoben und durch den Skalierungsfaktor a gestaucht werden, wodurch eine Lokalisierung der Frequenzanteile über die Waveletkoeffizienten W_ψ , möglich wird. Die kontinuierliche Wavelet-Transformation (engl.: continuous wavelet transform, CWT) des Signals $f(t)$ ist durch folgende Formel definiert (Blatter, 2003):

$$W_\psi f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2)$$

In diskreter Form kommt die Wavelet-Transformation bei der Multiskalenanalyse (engl. multiresolution analysis, MRA) zum Einsatz. Bei der MRA wird ein Signal rekursiv in Grobsignale (Approximationskoeffizienten) und Detailsignale (Detailkoeffizienten) zerlegt. Dabei entspricht dies einer Hoch- und Tiefpassfilterung des Signals. Die Hochpassanteile entsprechen den Waveletkoeffizienten. Die diskrete Wavelet-Transformation (DWT) bzw. die MRA kommt z. B. in der Signalverarbeitung als Denoisingverfahren zum Einsatz. (Bergh. et al. 2007)

Nach Donoho & Johnstone 1994 sind die Waveletkoeffizienten $v_{i,n}$ der ersten Skala ($i = 1$) der MRA größtenteils durch das Rauschen verursacht. Dabei steht n für die Nummerierung der Waveletkoeffizienten. In der Praxis wird für nicht stationäre Zeitreihen der Median der absoluten Abweichung (engl. median of absolute deviation, MAD) als Schätzung für die Standardabweichung des Signals verwendet:

$$MAD = \frac{\text{median}(|v_{1,n} - \text{median}(v_1)|)}{0,6745}. \quad (3)$$

2.3 Fourier-Transformation, Leistungsdichte- und Amplitudenspektrum

Signale lassen sich als additive Überlagerungen harmonischer Schwingungen auffassen. Durch die Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich können wesentliche Informationen über den Schwingungsvorgang gewonnen werden. Ein diskret abgetasteter Signalausschnitt x_k der Länge T mit N Abtastwerten kann durch die Formel der diskreten Fouriertransformation (DFT) in den Frequenzbereich transformiert werden (Kuttner 2015):

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}. \quad (4)$$

Nach dem Abtasttheorem können lediglich Frequenzen bis maximal zur Hälfte der Abtastfrequenz eindeutig dargestellt werden. Außerdem können aufgrund der Betrachtung von endlichen Zeitreihen Leaking-Effekte (Spektralverschmierungen) auftreten. Die schnelle Fouriertransformation (engl.: Fast Fourier Transform, FFT) nutzt Redundanzeigenschaften aus, um die Rechenzeit stark zu reduzieren. (Kuttner 2015)

Signale enthalten häufig auch zufällige Anteile. Um Aussagen über stochastische Signale zu treffen, wird das Leistungsdichtespektrum (LDS) verwendet, welches die Fouriertransformierte der Autokorrelationsfunktion darstellt. Im LDS können die enthaltenen Frequenzen sowie die zugehörige Leistung abgelesen werden. Eine Skalierung zum Amplitudenspektrum erlaubt die Ablesung der Schwingungsamplituden. (Parhi & Ayinala 2014)

3 Messkampagne

Ziel der Messkampagne ist die Erfassung und Analyse der Verformungen sowie des Schwingverhaltens der Hänger einer Stabbogenbrücke.

3.1 Messobjekt

Im Rahmen der Messkampagne wurde eine stählerne Eisenbahnbrücke untersucht (s. Abb. 1). Das zweigleisige Tragwerk ist als Stabbogenbauwerk ausgeführt und weist eine quer orientierte Fahrbahn auf. Die zueinander über Hohlprofilriegel versteiften Bögen sind als geschweißte Hohlkästen ausgeführt und hängen die Fahrbahn über je zwölf Flachstahlhänger ab. Die Anschlüsse der Hänger sind in Fahrtrichtung orientiert und entsprechend der Richtzeichnung nach Ril 804 – Modul 804.9010 (Richtlinie 804) ausgeführt.

Die Hänger (H) der Brücke werden in beiden Bögen mit fortlaufenden Nummern benannt (s. Abb. 1). Hierbei ist die Ost-West-Ausrichtung der Brücke maßgebend: Die Hänger im Osten beginnen mit der Nummer eins, mit aufsteigender Nummerierung in Richtung Westen. Zusätzlich wird die Bezeichnung der Hänger um die Lage des jeweiligen Bogens ergänzt (Nord-(N) bzw. Südbogen (S)).

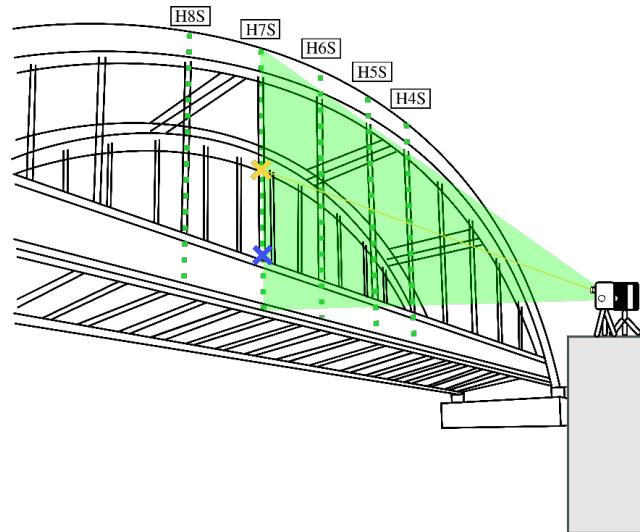


Abb. 1: Skizzenhafte Darstellung der Brücke und des Messaufbaus. Grün: Profilscan. Gelbes Kreuz: Vom Tachymeter angezielter Punkt. Blaues Kreuz: Position des Beschleunigungssensors.

3.2 Eingesetzte Sensorik und Messaufbau

Bei der Messkampagne kamen verschiedene Messinstrumente zum Einsatz: der terrestrische Laserscanner **Z+F IMAGER[®] 5016** (Zoller + Fröhlich GmbH), der triaxiale **ICP[®]-Miniatur-Vibrationssensor** (PCB PIEZOTRONICS) sowie die **Leica Nova MS60 Multistation** (Leica Geosystems AG). Der Z+F IMAGER[®] 5016 kann mithilfe des zugehörigen Software Development Kits (SDK) im Profilmodus betrieben werden. In diesem Modus erfolgt keine motorgetriebene Rotation um die Stehachse, sodass anstelle einer dreidimensionalen Punktwolke ein zweidimensionales Messprofil erfasst wird. Durch den Verzicht auf die Rotation um die Stehachse kann das Messprofil mit einer deutlich höheren Frequenz abgetastet werden. Gewählt wurde die höchste Rotationsgeschwindigkeit von 50 rps (rounds-per-seconds). Beim Koordinatensystem des Z+F IMAGER[®] 5016 handelt es sich um ein dreidimensionales rechtshändiges Koordinatensystem mit positiver Z_{TLS} -Achse in Verlängerung der Stehachse. Die Y_{TLS} -Achse ist durch die Ablenkeinheit definiert. Die X_{TLS} -Achse wird in diesem statischen Fall der Profilmessung auf null gesetzt. Aus der TLS-Messung resultieren somit Messprofile mit zugehörigen Messprofilpunkten (Y - und Z -Koordinaten) sowie einem Zeitstempel. Die MS60 wird im Streaming-Modus zur hochfrequenten Messung eines einzelnen Punktes (~ 20 Hz) eingesetzt. Aus diesen Messungen resultieren Zeitreihen eines 3D-Punktes. Die Tachymettermessungen werden reflektorlos durchgeführt, da aus sicherheitsrelevanten Gründen keine Prismen am Tragwerk angebracht werden dürfen. Als Referenz dienen Beschleunigungssensormessungen (4000 Hz), die in X_{ACC} -, Y_{ACC} - und Z_{ACC} -

Richtung vorliegen. Bei allen drei Sensoren erfolgte die Zeitstempelung auf Basis der geräteinternen Zeitmessung.

Für die Messung der Hänger werden der TLS und das Tachymeter auf einem höher gelegenen Fußgängerüberweg positioniert, um steile Auftreffwinkel zu vermeiden. Das Tachymeter wird auf die Mitte des Hängers ausgerichtet. Der Beschleunigungssensor wird in einer Höhe von 1500 mm über der Oberkante des Randalängsträgers durch einen Magneten am Hängerprofil appliziert. Exemplarisch ist der Aufbau für den Hänger H7S in Abb. 1 skizziert. Gemessen wird während zwei unterschiedlicher Anregungsszenarien: Zum einen werden die Hänger durch Hammerschläge angeregt, zum anderen erfolgt eine Anregung durch Zugüberfahrten.

4 Datenauswertung und Ergebnisse

Je nach eingesetzter Sensorik werden die Daten unterschiedlich ausgewertet. Die sensorspezifischen Auswertestrategien werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

4.1 Beschleunigungsdaten

Primäres Ziel der Beschleunigungsmessung ist die Erfassung der Eigenfrequenzen der Hänger um die schwache Achse. Bei rechteckigen Hängerprofilen wird die starke Achse in der Regel vernachlässigt, da eine händische Anregung aufgrund der signifikant höheren Steifigkeit nicht umsetzbar ist. Damit die tatsächlichen Bauteileigenfrequenzen ohne den Einfluss von Verkehrslasten bestimmt werden können, sind für die Auswertungen ausschließlich Anregungen infolge der Hammerschläge relevant. Je Hänger werden mindestens drei Ausschwingvorgänge aufgezeichnet, wobei ausschließlich die Beschleunigung um die schwache Achse, d. h. in Brückenquerrichtung (Y_{ACC}), berücksichtigt wird.

Im Rahmen der Messung eines Hängers wurde das Abklingverhalten der Schwingung nach Anregung aufgezeichnet. Anschließend wurde mit einer FFT (s. Kapitel 2.3) das Amplitudenspektrum (s. Abb. 2) berechnet, wobei aufgrund der Messfrequenz von 4000 Hz eine Frequenzauflösung von 0,03 Hz sichergestellt wurde.

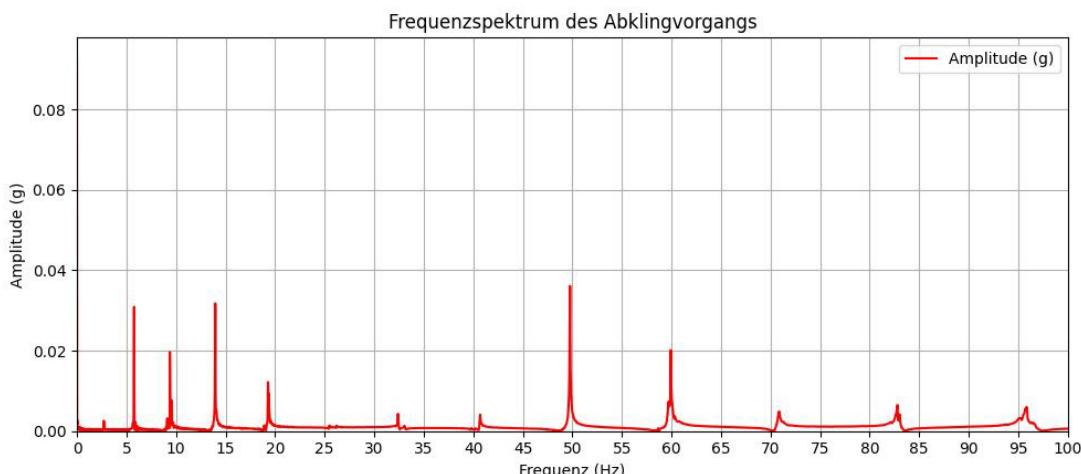


Abb. 2: Amplitudenspektrum des Hängers H6S.

Für jeden Hänger konnten aus dem Spektrum die ersten vier Eigenfrequenzen ermittelt werden; dargestellt sind später jedoch ausschließlich jene, zu denen ein Vergleich mit geodätischen Messmethoden möglich war (s. Kapitel 4.2 und 4.3 für die Ergebnisse).

4.2 Profilscans

Da keine identischen Punkte in zwei aufeinanderfolgenden Messprofilen vorliegen, ist eine räumliche Prozessierung der TLS-Daten notwendig, um aus den erfassten Messpunkten vergleichbare Punkte zu generieren. Die in dieser Arbeit angewendete Prozessierungsart stellt eine angepasste Version der raum-zeitlichen Prozessierung nach Schill (2017) dar (s. Abb. 3).

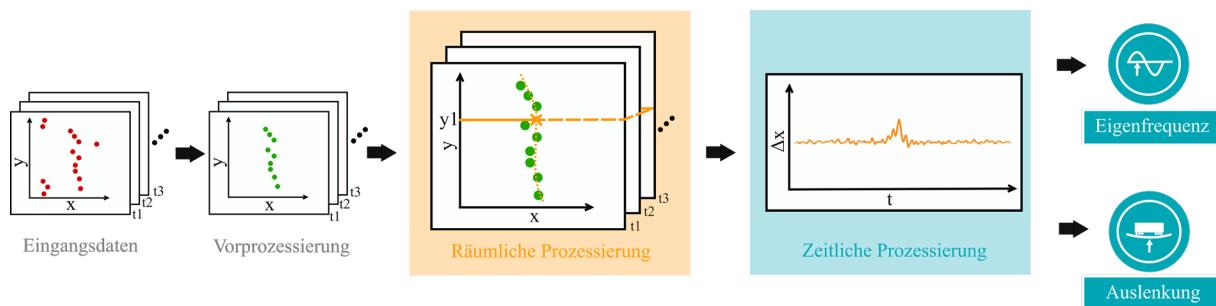


Abb. 3: Schematische Darstellung der raum-zeitlichen Prozessierung nach Schill (2017).

Vorprozessierung

Zunächst wird das Messprofil auf die tragwerksrelevanten Punkte reduziert. Bereits geringe Unebenheiten wie Schrauben im Tragwerk können zu einer zu komplexen räumlichen Approximation führen, weshalb die tragwerksrelevanten Punkte zudem bereinigt werden. Da in den hier vorgestellten Untersuchungen überwiegend glatte Oberflächen betrachtet werden, werden sowohl die Selektion als auch die Ausreißerbeseitigung manuell durchgeführt.

Räumliche Prozessierung

Eine Möglichkeit der räumlichen Approximation der erfassten Profile ist die Modellierung mittels B-Spline-Kurven (vgl. Abschnitt 2.1). Auf Grundlage der tragwerksrelevanten Profilmesspunkte wird eine B-Spline-Kurvenschätzung durchgeführt, um eine kontinuierliche Repräsentation der Profile zu erzeugen. Dieses Modell erlaubt anschließend die Konstruktion identischer Punkte in den unterschiedlichen Messepochen und damit die temporale Auswertung. Anhand der resultierenden Residuen kann zudem eine Bewertung der Approximationsergebnisse erfolgen, wodurch gleichzeitig Rückschlüsse auf mögliche Ausreißer innerhalb der Messprofile ermöglicht werden. In Abb. 4 ist exemplarisch eine solche räumliche Approximation für den Hänger H6S dargestellt. Zusätzlich sind die Messprofilpunkte entsprechend der Größe ihrer Residuen farbcodiert visualisiert.

Zeitliche Prozessierung

Auf Basis der räumlichen Approximation durch die B-Splines können aus den verschiedenen Messepochen Zeitreihen abgeleitet werden. Für die Hänger ist eine Auslenkung in Y_{TLS} -

Richtung zu erwarten, entsprechend werden die Zeitreihen für feste Höhen des Hängers bestimmt ($Z_{TLS} = \text{konst.}$, siehe Abb. 5 für dreibeispielhafte Zeitreihen).

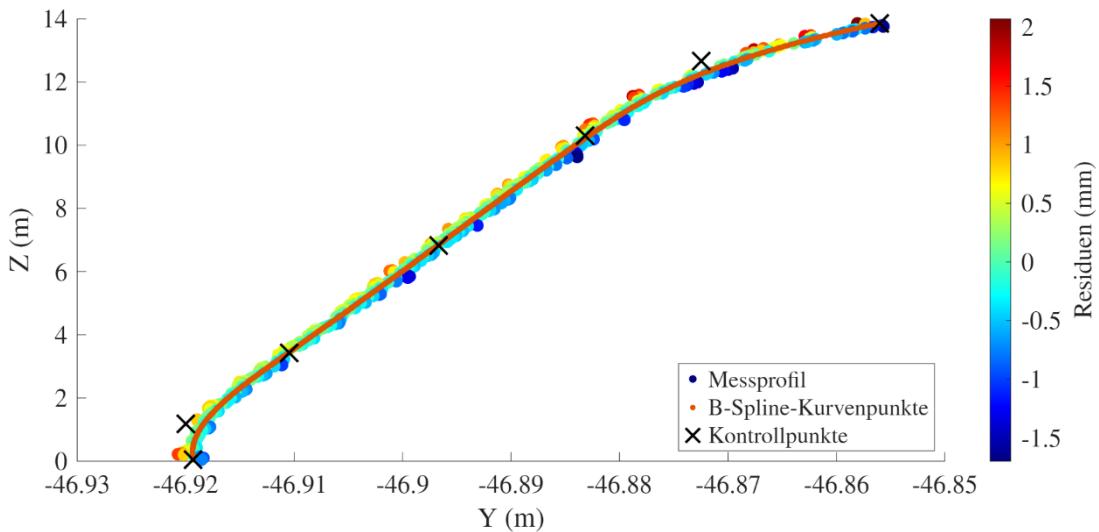


Abb. 4: B-Spline-Kurvenschätzung (rote Linie) des ersten Messprofils des Hängers H6S. Die originale Punktfolge ist nach den errechneten Residuen eingefärbt.

Bei einer Zugüberfahrt ist die Zeitreihe in drei Phasen unterteilbar, in denen unterschiedliche Eigenschaften ableitbar sind (s. Abb. 5):

- Ruhephase: Das Tragwerk befindet sich in einem ausreichenden Ruhezustand. Es sind keine systematischen Änderungen erkennbar; sowohl Mittelwert als auch Varianz der Zeitreihe bleiben über den betrachteten Zeitraum konstant. Die Genauigkeitsabschätzung kann über die Standardabweichung erfolgen.
- Zugüberfahrt: Das Tragwerk ist ausgelenkt. Es tritt eine deutliche Abweichung des Mittelwerts gegenüber der Ruhephase auf. Hier ist die größte Auslenkung zu erwarten.
- Ausschwingphase: Das Tragwerk kehrt in seine Ausgangslage zurück, der Mittelwert bleibt dabei nahezu konstant. Die Auslenkung nimmt jedoch zeitlich ab, da es sich um ein instationäres, gedämpftes Schwingungssignal handelt. Das Schwingverhalten ist auf die Eigenschwingung zurückzuführen.

Voraussetzung für die Auswertung der generierten Zeitreihen im Frequenzraum ist die Äquidistanz innerhalb der Zeitreihe, die durch lineare Interpolation erreicht wird; zudem ist eine Trendbereinigung nötig. Durch die anschließende Erstellung von Leistungs- und Amplitudenspektren (s. Abschnitt 2.3 und Abb. 5, unten) lassen sich die dynamischen Eigenschaften der Brücke ableiten.

Wie aus Abb. 5 ersichtlich wird, hängen die auftretenden dominanten Frequenzen dabei stark von der Position auf dem Hänger und der jeweiligen Phase ab.

Bei der Anregung durch den Hammerschlag kann nicht direkt in die einzelnen Phasen unterschieden werden, da die Auslenkung wesentlich geringer ist. Stattdessen erfolgt eine In-Situ-Genauigkeitsabschätzung über den MAD (s. Abschnitt 2.2).

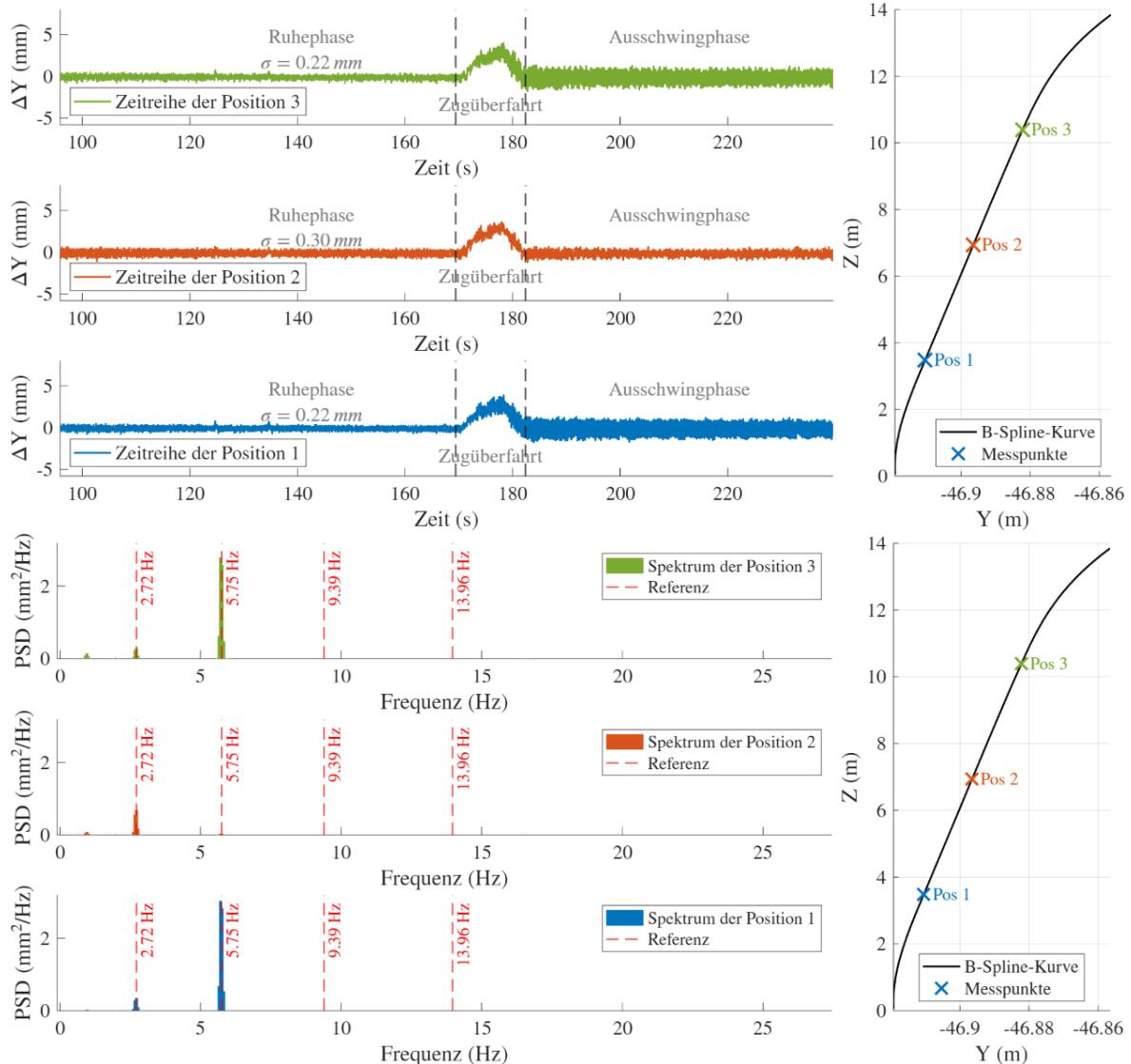


Abb. 5: Extrahierte Zeitreihen (oben) für drei Höhen (Pos. 1-3) auf dem Hänger mit zugehörigen Leistungsdichtespektren (unten).

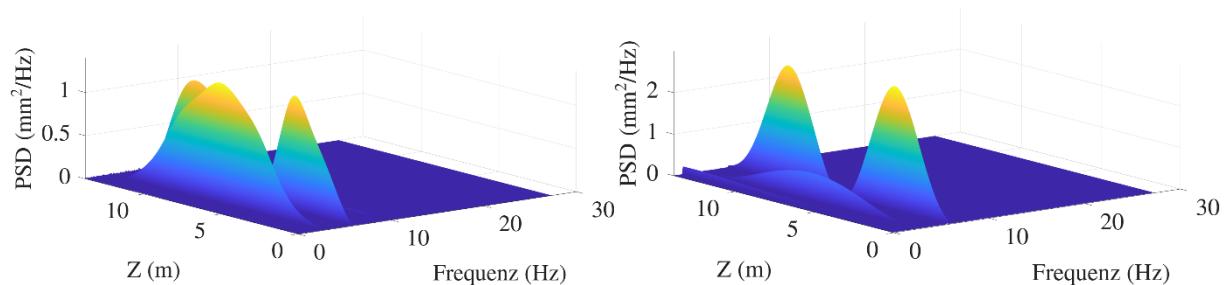


Abb. 6: Spektrogramm der Leistungsdichte aus Hammerschlag (links) und Ausschwingprozess der Zugüberfahrt (rechts)

Bei der räumlichen Prozessierung mittels B-Splines ist neben der punktuellen Auswertung auch eine quasi-raumkontinuierliche Betrachtungsweise möglich. Dabei wird für jeden ermittelten Kurvenpunkt eine eigene Zeitreihe gebildet, sodass eine ortsabhängige Analyse des zeitlichen Schwingungsverhaltens entlang der gesamten B-Spline-Kurve durchgeführt werden kann. Auf diese Weise ergeben sich 3D-Spektrogramme (s. Abb. 6).

Die Ergebnisse der TLS-Messungen sind für fünf beobachtete Hänger in Tab. 2 dargestellt. Aufgeführt sind die gemessenen Hänger sowie die jeweilige Referenzergebnisse der Beschleunigungssensormessungen. Zusätzlich sind die Standardabweichung der Ruhephase $\sigma_{Ruhephase}$ und der MAD zur Abschätzung der Koordinatenunsicherheit von einem Punkt mittig des Hängers angegeben. Auch die maximale Auslenkung ΔY_{\max} dieses Punktes ist angegeben. Neben den Eigenfrequenzen f_{eigen} werden während der Zugüberfahrt weitere Frequenzen identifiziert, die unter f_{sonst} zusammengefasst sind.

Tab. 2: Ergebnisse der TLS-Messung (Hammerschlag und Zugüberfahrt).

Hänger	Referenz	Zugüberfahrt					Hammerschlag	
		$\sigma_{Ruhephase}$	MAD	f_{eigen}	f_{sonst}	ΔY_{\max}	MAD	f_{eigen}
		(Hz)	(mm)	(mm)	(Hz)	(Hz)	(mm)	(mm)
H4S	3,49	-	-	-	-	-	0,18	3,75
H5S	3,76 7,76	0,15	0,10	3,75 1,98	0,96 1,98	3,3	-	-
H6S	2,72 5,75 9,39	0,30	0,11	2,72 5,71	0,96	3,7	0,17	2,71 5,75 9,37
H7S	3,02 Hz 6,33 Hz	0,14	0,26	2,99 6,30	0,96	11,8	0,57	3,20
H8S	3,67 Hz 7,60 Hz	0,08	0,08	3,63	0,96 1,97 3,00	3,2	0,13	3,65 7,58

4.3 Tachymeterdaten

Da die Tachymettermessung reflektorlos erfolgt, ist kein Tracking der kartesischen Koordinaten möglich; stattdessen wird ähnlich zu den TLS-Messungen die Auslenkrichtung vorgegeben. Die Auswertung erfolgt analog zur in Kapitel 4.2 beschriebenen zeitlichen und punktuellen Vorgehensweise. In Tab. 3. sind analog zu Abschnitt 4.2 die Ergebnisse der Tachymettermessung dargestellt. Zur Genauigkeitsabschätzung sind auch hier der MAD und die Standardabweichung angegeben.

4.4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten zeigen, dass sich sowohl mittels TLS als auch durch das Tachymeter Schwingungen der Hänger der Stabbogenbrücke aufdecken lassen. Die ermittelten Frequenzen zeigen insbesondere in der quasi-raumkontinuierlichen

Betrachtungsweise (s. Abb. 6) eindeutige Charakteristiken der Eigenfrequenzen bzw. deren Eigenformen. Das Amplitudenmaximum $A_{\max,1\text{EF}}$ der ersten Eigenfrequenz liegt in der Hängermitte; an der Position von $A_{\max,1\text{EF}}$ ist die Amplitude der zweiten Eigenfrequenz gleich Null. Die erste Eigenfrequenz besitzt einen Schwingungsbauch, die zweite hingegen zwei Schwingungsbäuche. Diese ermöglichen eine eindeutige Zuordnung der Eigenfrequenzen.

Tab. 3: Ergebnisse der Tachymettermessung (Hammerschlag und Zugüberfahrt).

Hänger	Referenz	Zugüberfahrt						Hammerschlag	
		$\sigma_{Ruhephase}$	MAD	f_{eigen}	f_{sonst}	ΔY_{\max}	MAD	f_{eigen}	
		(Hz)	(mm)	(mm)	(Hz)	(Hz)	(mm)	(mm)	
H4S	3,49	-	-	-	-	-	0,15 mm	3,48	
H5S	3,76	0,19	0,12	3,77	0,95 2,00	3,2	-	-	
H6S	2,72 5,75	0,42	0,27	2,72 5,75	0,96 10,14	3,3	-	-	
H7S	3,02 Hz 6,33 Hz	0,17	0,25	3,02 6,32	0,95	11,7	0,27	3,02	
H8S	3,67 Hz 7,60 Hz	0,13	0,10	3,66 7,58	0,96 2,00 3,00	4,3	0,13	3,66 7,60	

Bei den Tachymettermessungen hingegen ist diese Zuordnung über die Eigenschaften der Eigenfrequenzen nicht möglich, da die Betrachtungsweise punktuell erfolgt und auf einer Zeitreihe basiert. Dennoch sind auch hier Eigenfrequenzen detektierbar, jedoch hängen die aufgedeckten Frequenzen stark von der gewählten Position der Anzielung ab.

Die Referenzmessungen mittels Beschleunigungssensoren bestätigen die ermittelten Eigenfrequenzen. Diese Referenzmessungen liefern Ergebnisse bis zur vierten Eigenfrequenz. Mit den geodätischen Messmitteln konnte jedoch lediglich die Signifikanz der ersten beiden bzw. der ersten drei Eigenfrequenzen nachgewiesen werden. Der Grund hierfür liegt in der abnehmenden Amplitude der Eigenfrequenzen mit zunehmender Eigenfrequenzordnung.

Generell sind bis auf zwei Ausnahmen bei den Hammerschlagsversuchen (H4S und H7S) ausschließlich kleine Differenzen von ca. 0,01 bis 0,05 Hz sowohl zu den Referenzmessungen als auch zwischen den Messergebnissen von Tachymeter und TLS festzustellen. Die Messunsicherheit der Beschleunigungssensoren bei Messungen unter 10 Hz ist mit 1,1 % angegeben, womit die geodätischen Messergebnisse im Rahmen dieser Messunsicherheit liegen. Bei den geodätischen Messinstrumenten ist eine Unsicherheitsbestimmung der Frequenzbestimmung hingegen schwierig, da diese vom geräteinternen Zeitstempel abhängt, zu dem keine weiteren Informationen vorliegen. Zudem kann eine vorhandene Drift nicht

ausgeschlossen werden. Daher ist für zukünftige Arbeiten ein Zeitstempelgenerierung mittels einer GNSS-Antenne empfehlenswert.

Neben den ermittelten Eigenfrequenzen der Hänger selbst konnte bei den meisten Zugüberfahrten in den TLS- und Tachymeter-Daten eine weitere Frequenz bei ca. 1 Hz identifiziert werden. Die Amplitude dieser Frequenz nimmt mit der Höhe der Hänger zu. Aus diesem Grund konnten diese Frequenzen bei den Messungen der Beschleunigungssensoren aufgrund deren Positionierung am unteren Hängeranschlusspunkt nicht festgestellt werden. Es ist zu vermuten, dass diese Schwingung durch den Bogen induziert wird, weshalb sie im unteren Bereich der Brücke nicht bemerkbar ist. Diese Vermutung bestätigt sich durch eine weiterführende Untersuchung des Bogenabschnitts über den Hängern.

Ein weiterer relevanter Faktor ist die Auslenkung der Hänger bei einer Zugüberfahrt (ΔY_{\max} in Tab. 2 und 3). Da keine identischen Punkte bei den TLS- und Tachymetermessungen erfasst wurden und auch keine Transformation über Passpunkte realisiert wurde, ist ein Vergleich der ermittelten Auslenkungen zwischen diesen Messsystemen nur bedingt möglich. Dennoch ist grundsätzlich ein ähnliches Verhalten der Hänger festzustellen. Ein Vergleich der Auslenkungen zwischen den einzelnen Hängern ist ebenfalls nicht möglich, da keine Vergleichsmessungen unter identischer Belastung (Gewicht des Zuges, Anzahl der Waggons etc.) vorliegen.

Dennoch können anhand der Auslenkungen Aussagen über das Schwingverhalten getroffen werden. Durch die Verkehrslasten in Form der überfahrenden Züge kommt es zu einer Verdrehung (Torsion) des Randträgers sowie einer globalen vertikalen Deformation des Brückendecks. Gemeinsam mit der Bogenverschiebung werden dadurch Verschiebungen in den Anschlusspunkten der Hänger induziert. Im Zuge der dynamischen Anregung durch die überfahrenden Züge wird dann im ausgelenkten Zustand eine Schwingung im Hänger selbst hervorgerufen. Die Eigenfrequenzen der Hänger sind auch im ausgelenkten Zustand erkennbar. Nachdem der Zug die Brücke vollständig überquert hat, kehrt der Hänger in seine Ausgangsposition zurück, schwingt jedoch zunächst mit einer größeren Amplitude, die mit der Zeit abnimmt. Dieser Effekt ist durch den Dämpfungsfaktor beschrieben. Bei den meisten Hängern wurde die Dauer des Ausschwingprozesses unterschätzt, sodass die Messungen zu früh abgebrochen wurden. In zukünftigen Arbeiten kann das Potential der Identifikation dieses Faktors untersucht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde berührungslos messende geodätische Sensorik (TLS im Profilmodus und Tachymeter) zur Bestimmung dynamischer Eigenschaften einer Brücke eingesetzt und die erzielten Ergebnisse wurden mit denen von klassischen Beschleunigungssensoren verglichen. Generell konnte durch diese Arbeit nachgewiesen werden, dass die Schwingungseigenschaften eines Bauwerks mithilfe berührungslos messender geodätischer Messinstrumente identifiziert

werden können und dieses Verfahren somit zu einer erheblichen Aufwandsreduktion führt. In weiterführenden Arbeiten ist zu untersuchen, welche grundlegenden Voraussetzungen die betrachteten Bauwerke erfüllen müssen und welche Einschränkungen mit dem Einsatz dieses Verfahrens verbunden sind. Darüber hinaus bietet es sich an, im Rahmen des SHMs Bauwerke über einen längeren Zeitraum hinweg zu beobachten.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Manfred Juretzko für seine Unterstützung bei den Messungen.

Literatur

- BUREICK J., NEUNER H., HARMENING C., NEUMANN I (2016): Curve and surface approximation of 3D point clouds. Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn), 123(11-12), S. 315-327
- BLATTER C. (2003): Wavelets – Eine Einführung. 2. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden.
- BERGH J., EKSTEDT F. & LINDENBERG M. (2007): Wavelets mit Anwendungen in der Signal- und Bildverarbeitung. Springer Berlin Heidelberg New York.
- DONOHO D. & JOHNSTONE I. (1994.): Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage. Biometrika 81.3,
- HARMENING C. (2020): Spatio-temporal deformation analysis using enhanced B-spline models of laser scanning point clouds, Dissertation, TU Wien.
- HARMENING C. & NEUNER H. (2016): Choosing the optimal number of B-spline control points (Part 1: Methodology and approximation of curves). Journal of Applied Geodesy, 10 (3), S. 139-157
- KUTTNER T. (2015): Praxiswissen Schwingungsmesstechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden
- LAND BADEN-WÜRTTEMBERG (30.10.2025): Zustand der Brücken in Baden-Württemberg. Baden-Württemberg.de. URL: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mobilitaet-verkehr/auto-und-lkw/strasseninfrastruktur/zustand-der-bruecken-in-baden-wuerttemberg> (Zugriff: 22.12.2025).
- LEICA GEOSYSTEMS AG (o.D.): Leica Nova MS60 MultiStation – Datenblatt.
- PARHI K. & AYINALA M. (2014): Low-Complexity Welch Power Spectral Density Computation. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 61 (1), S. 172-182
- PIEGL L. & TILLER W. (1997): The NURBS Book. 2. Auflage. Springer.
- PCB PIEZOTRONICS (o.D.): Triaxiale ICP® -/IEPE-Miniaturvibrationssensoren- Broschüre
- SCHILL F. (2017): Überwachung von Tragwerken mit Profilscannern. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- SCHWARZ G (1978): Estimating the Dimension of a Model. The Annals of Statistics, 6, S. 461-464.
- NEITZEL F. & SCHWARZ W. (2016): Schwingungsuntersuchungen – Ein Beitrag zum Monitoring im Bauwesen. Teil des Handbuchs der Geodäsie, Band: Ingenieurgeodäsie, Springer.
- RICHTLINIE 804: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instandhalten, Modul 8014.9010 – Richtzeichnungen „Stählerne Eisenbahnbrücken, DB Netz AG, 2012.
- ZOLLER + FRÖHLICH GMBH (o.D.): Z+F IMAGER® 5016– Datenblatt.