

Daten im Ingenieurbau – Möglichkeiten der bauwerksspezifischen Beurteilung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml *
M.Sc. Matthias Haslbeck **
Dr.-Ing. Eugen Hiller ***

* Universität der Bundeswehr München, Professor für Massivbau, Deutschland, thomas.braml@unibw.de
** Universität der Bundeswehr München, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Deutschland, matthias.haslbeck@unibw.de
*** Universität der Bundeswehr München, Wissenschaftlicher Laborleiter, Deutschland, eugen.hiller@unibw.de

Zusammenfassung

Die alternde Infrastruktur des Verkehrswegenetzes in Deutschland erfordert neue Wege in der Bewertung und Überwachung von Ingenieurbauwerken. Dieser Beitrag beschreibt zwei Beispielprojekte anhand derer die Möglichkeiten moderner Bauwerksüberwachung aufgezeigt werden. Die Art der Maßnahme wurde jeweils so gewählt, dass sich aus den spezifischen Gegebenheiten vor Ort ein optimaler Ausgleich zwischen Kosten und Nutzen eingestellt hat. Je nach projektspezifischer Besonderheit wird dabei eine Anpassung des zur Nachrechnung verwendeten Verkehrslastmodells oder die Neubewertung durch Updating des Berechnungsmodells eingesetzt.

Keywords: Monitoring, Nachrechnung, Verkehrszählung, Systemidentifikation, Verkehrslastmodelle

1 Einleitung

Die Erhaltung von Infrastrukturobjekten stellt Volkswirtschaften vor Herausforderungen, welche nur durch den Einsatz moderner Technologien zu bewältigen ist. Dabei sind nicht nur die Kosten für Ersatzneubauten zu berücksichtigen, auch die temporäre Sperrung von Verkehrswegen führt zu enormen volkswirtschaftlichen Verlusten. Zudem gewinnen Aspekte der Nachhaltigkeit an Bedeutung und können im Rahmen einer Ökobilanzierung für das Einzelprojekt berücksichtigt werden [1]. Dem gegenüber steht das menschliche Bedürfnis nach Sicherheit, welche die Basis ingenieurtechnischen Handelns darstellt.

Die Erhaltung und regelmäßige Neubewertung baulicher Infrastruktur steht sich somit im Spannungsfeld von Sicherheitsbedürfnissen der Bürger, Kosten für eine umfangreiche Nachrechnung und der Minimierung der Lebenszykluskosten. Abbildung 1 veranschaulicht diesen Konflikt.

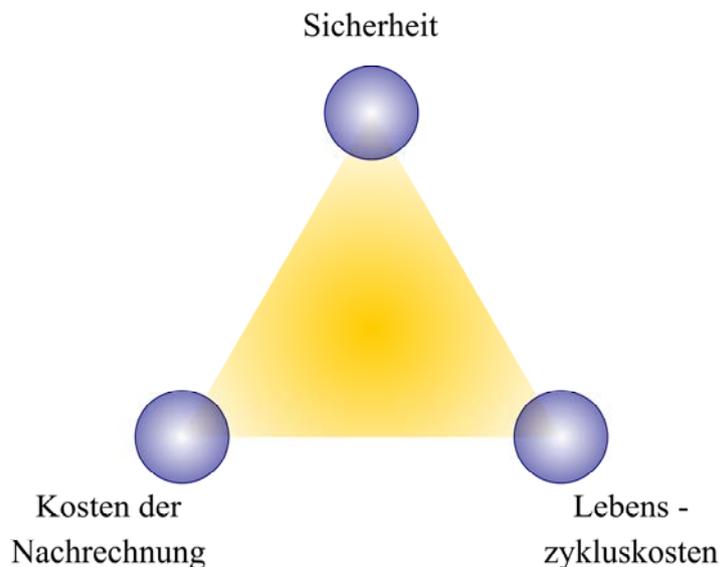


Abbildung 1: Zielkonflikt bei den Anforderungen an die Bewertung von Brückenbauwerken aus [2]

Eine der möglichen Ansätze zur Erfüllung aller drei Aspekte der ganzheitlichen Nutzungsstrategie ist die datengestützte Bewertung von Bestandsbauten. Die am Bauwerk gemessenen Systemreaktionen werden genutzt, um die Sicherheitsbewertung durch die zusätzlichen Kenntnisse anzureichern. Die hieraus resultierenden Entscheidungen ergeben sich so

aus objektspezifischen Bewertungen und erfüllen somit die Forderung nach fundierter Kenntnis der statischen Eigenschaften des Bauwerks häufig besser als eine Sicherheitsbeurteilung auf Basis augenscheinlicher Untersuchungen oder die Risikoanalyse durch das Ansetzen angenommener Systemeigenschaften.

Zu unterscheiden ist in diesem Zusammenhang zwischen der zeitlich begrenzten Datenerfassung zur datengestützten Nachrechnung von Brückenbauwerken und dem dauerhaften Monitoring. Eine einmalige Messkampagne kann beispielsweise zur Kalibrierung des statischen Modells der Brücke [2], [3] oder zur Festlegung eines bauwerkspezifischen Verkehrslastmodells anhand der bestimmten Systemreaktionen benutzt werden. Monitoring bietet im Vergleich dazu zusätzliche Möglichkeiten der dauerhaften Überwachung. Insbesondere kann die dauerhafte Überwachung zur Erstellung einer Handlungsanweisung bei Vorankündigung des Versagens oder für einen regelmäßigen „Check-up“ genutzt werden.

Innerhalb des Beitrags werden anhand eines Beispielprojekts in Bamberg Möglichkeiten zur Anpassung der rechnerisch anzusetzenden Lasten mittels am Bauwerk gemessenen Daten beschrieben. Zudem werden die Perspektiven und Grenzen moderner Überwachungsmethodik dargestellt und anhand zweier Projektbeispiele die Möglichkeiten der Datenerfassung veranschaulicht.

2 Beispielprojekt Brücke Roding

2.1 Veranlassung

Die Chancen, dies sich durch Messungen am Bauwerk für die Bewertung von Bestandsbauwerken bieten, sollen anhand der Regenbrücke in Roding aufgezeigt werden. Ziel der Messkampagne war es Eingangsdaten für das Updating des statischen Modells anhand der gemessenen Daten zu gewinnen.

2.2 Baubeschreibung

Die vorgespannte Kastenbrücke aus dem Jahr 1965 wurde als Dreifeldträger mit Feldlängen 39 m + 55 m + 39 m ausgeführt. Die Zeichnungen aus Abbildung 2 und 3 und die Ansicht aus Abbildung 4 geben eine gute Übersicht über die Brücke. Eine weitgehende Anbringung von Sensorik und spätere Untersuchung von Bauteilen war möglich, da sich das Bauwerk zum Zeitpunkt der Versuche bereits außer Betrieb befand und im Anschluss an die Messkampagne zurückgebaut wurde.

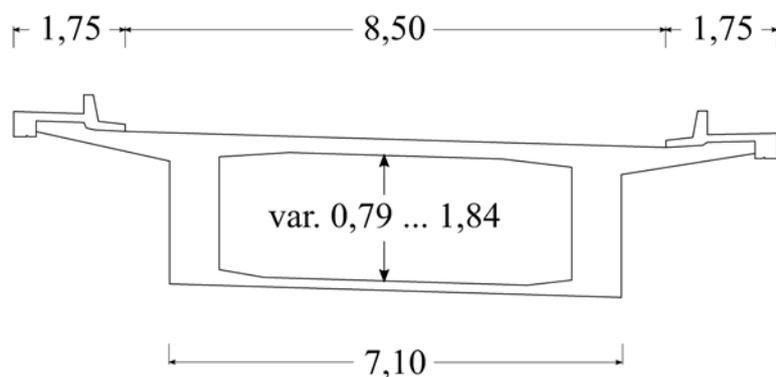


Abbildung 2: Regelquerschnitt der Versuchsbrücke aus [2]

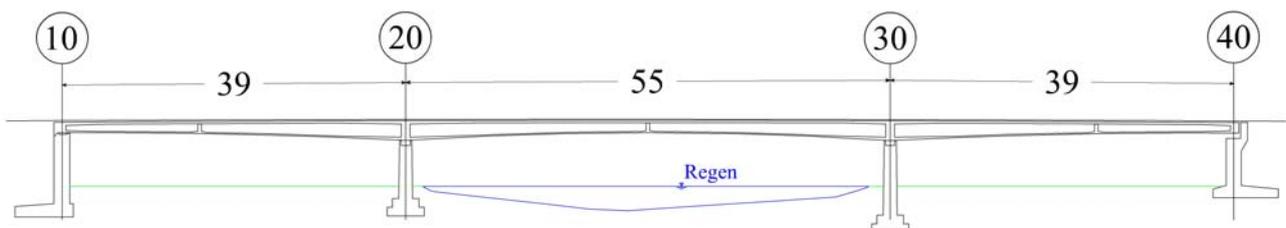


Abbildung 3: Längsschnitt der Versuchsbrücke aus [2]



Abbildung 4: Ansicht der Versuchsbrücke Roding

2.3 Angebrachte Sensorik

Das Projekt bot die Möglichkeit verschiedenste Verfahren der Bestimmung von Systemreaktionen, welche nachfolgend kurz dargestellt werden. Für ausführlichere Erläuterungen zu den Sensorpositionen, den physikalischen Messprinzipien und den Randbedingungen der Messung wird auf [2] verwiesen.

Eine der erprobten Verfahren war die Bestimmung von Durchsenkungen in den Feldmitten mittels eines Lasertrackers als auch durch reflektorlose Tachymetrie. Zudem wurde die Dehnung an ausgewählten Punkten der Brücke bestimmt. Hierbei wurden sowohl Dehnmessstreifen verwendet, welche auf elektrischen als auch solche, die auf optischen Messprinzipien beruhen. Um im Nachgang an die Messung eine Vergleichbarkeit der mit den verschiedenen Verfahren gewonnen Ergebnisse zu gewährleisten, wurden mittels verschiedenen Sensortypen Redundanzen für die Dehnungsmessung hergestellt. Eine Übersicht der angebrachten Dehnungsmesstechnik am Beispiel einer Messstelle an der Unterseite eines der Stege ist in Abbildung 5 abgebildet.

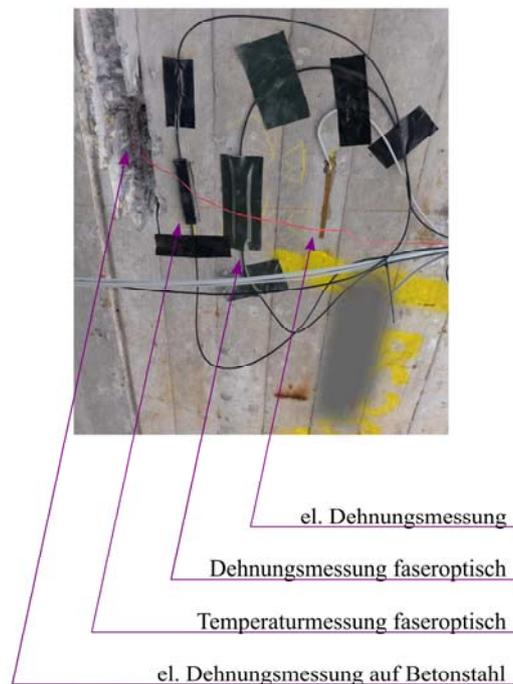


Abbildung 5: Angebrachte Dehnungssensorik an der Unterseite der Brücke aus [2]

Eine Methode, die Verformung- und Dehnungsmessung vereint und überdies berührungslos ist, ist die optische Bewegungs- und Verformungsanalyse. Das vor allem im industriellen Bereich eingesetzte Verfahren kann sowohl für die Messungen von Verformungen und Dehnungen als auch zur Bestimmung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen

eingesetzt werden. Hochauflösende Stereokameras ermöglichen dabei die Verfolgung eines festgelegten Messbereichs im Raum. Dabei lässt sich eine flächige Aufnahme der Koordinaten automatisch erkannter Oberflächenpunkte realisieren und in die gesuchten Bewehrungs- und Verformungsgrößen umrechnen. Ein Beispiel der entstehenden Verformungsvektoren und das eingesetzte Messsystem zeigt Abbildung 6.

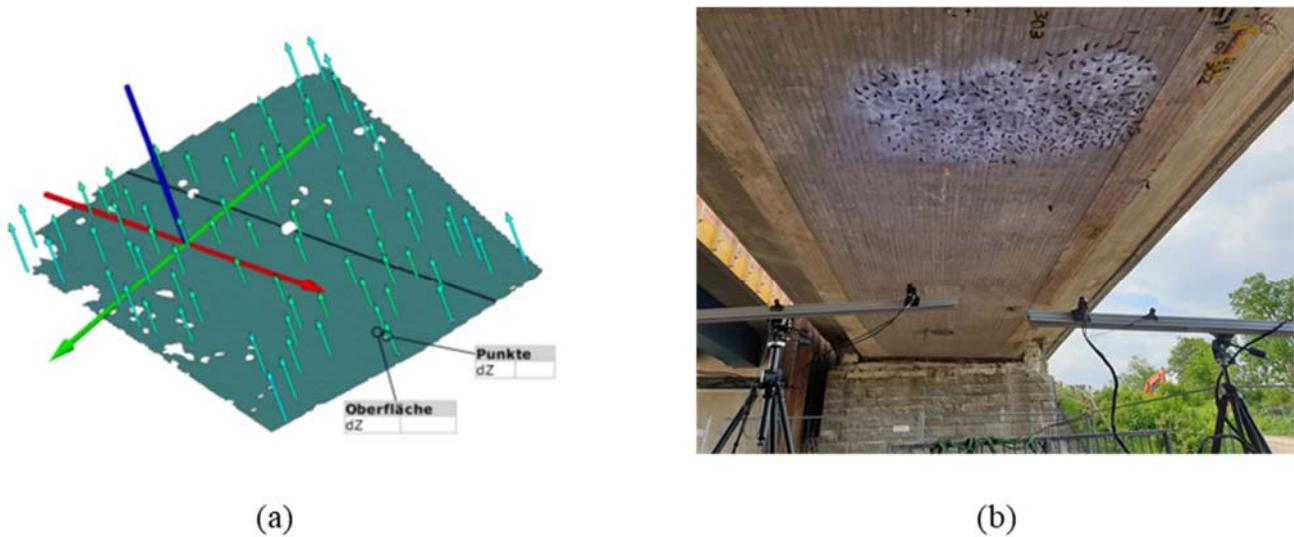


Abbildung 6: (a) Beispiel für Verformungsvektoren einer Bewegungs- und Verformungsanalyse aus [2] und (b) Eingesetztes Messsystem vom Typ ARAMIS aus [2]

Auf Grund der Anfälligkeit des Systems für Lichteinflüsse und der fehlenden Wetterbeständigkeit des Systems bietet die Optische Bewegungs- und Verformungsanalyse zwar eine Vielzahl von Möglichkeiten in der einmaligen Erfassung von Messgrößen, jedoch ist diese Methode für die Dauerüberwachung von Bauwerken nach derzeitigem Stand der Technik ungeeignet.

2.4 Versuchsfahrzeuge und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche wurde sowohl ein Panzer als auch ein mit Erdreich beladener LKW verwendet. Die aufgebrachte Belastung wurde im Fall des Bergepanzers durch Tabellenwerte bestimmt, die Last des mit Erdreich beladenen LKW wurde über eine Achslastwaage ermittelt. Die Abbildung 7(a) und (b) zeigen den Panzer und die eingesetzte Achslastwaage zur Lastbestimmung am Muldenkipper.

Für die spätere Kalibrierung des statischen Systems anhand der gewonnenen Daten wurden sowohl statische als auch dynamische Versuche durchgeführt. Dabei wurden zum einen feste Positionen an der Brücke angefahren und dabei Messung der Systemreaktion in Ruhe vorgenommen, als auch Überfahrten bei verschiedenen Geschwindigkeiten und über aufgebaute Hindernisse durchgeführt, um die entstehenden Zeitreihen auswerten zu können



Abbildung 7: (a) Panzer als Versuchsfahrzeug an der Versuchsbrücke (b) Mobile Achslastwaage

2.5 Ergänzende Untersuchung der Bauwerksgeometrie

Die Erfassung des Bauwerkszustands sollte neben sensorischer Überwachung auch die Geometrie des Bauwerks beinhalten und kann bei wiederholter Aufnahme auch Veränderungen am Bauwerk identifizieren. Zu diesem Zweck wurde durch das Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München ein terrestrischer Laserscan der Brücke durchgeführt. Einen Längsschnitt aus der entstandenen Punktwolke zeigt Abbildung 8.

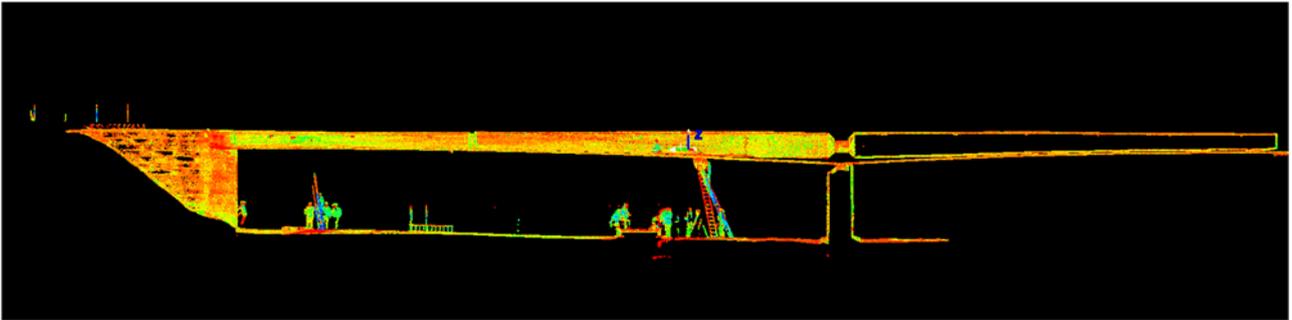


Abbildung 8: Längsschnitt durch die Punktwolke des Laserscans an der Brücke Roding

Eine weitere Möglichkeit der Erstellung dreidimensionaler Bauwerksmodelle ist die Photogrammetrie. Durch eine Vielzahl von mit handelsüblichen Digitalkameras aufgenommenen Fotos werden dabei zusammengesetzt und in Punktwolken überführt. Abbildung 9 zeigt ein Modell eines im Zuge des Abbruchs herausgetrennten Teil eines Steges.



Abbildung 9: Fotorealistische Darstellung eines der Trägereile aus [2]

3 Beispielprojekt Heinrichsbrücke Bamberg

3.1 Veranlassung

Neben der in Abschnitt 2 angesprochenen Möglichkeit der Anpassung des Berechnungsmodells an die auftretenden Systemantworten unter Verwendung bekannter Versuchslasten kann im Rahmen der Neubewertung von Bestandsbauten auch die genaue Kenntnis der auftretenden Lasten zu einer zielgerichteten Nachrechnung beitragen. Dies ist vor allem dann zu empfehlen, wenn anzunehmen ist, dass der am Bauwerk auftretende Verkehr weit unter den Annahmen der Bemessungsvorschriften für Neubauten liegt. Eine Bestimmung der tatsächlich auftretenden Verkehrslasten wurde beispielsweise an einer Stahlbrücke in Bamberg erfolgreich eingesetzt.

3.2 Bauwerksbeschreibung

Die Heinrichsbrücke in Bamberg ist eine im Jahr 1974 errichtete Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte. Die Brücke wurde als Viefeldträger mit den Spannweiten 18 m, 119 m, 56 m und 79 m ausgeführt. Eine Ansicht und der Brückenquerschnitt ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die innerstädtische Lage und die geringe Verkehrsbelastung der Brücke gaben Anlass das im Eurocode vorgeschlagene Lastniveau den bauwerksspezifischen Randbedingungen anzupassen.

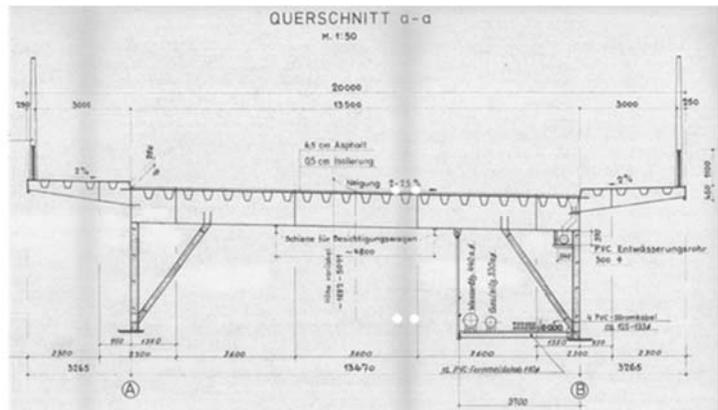


Abbildung 10: Ansicht und Querschnitt der Heinrichsbrücke in Bamberg

3.3 Ziel und Vorgehen des Monitorings

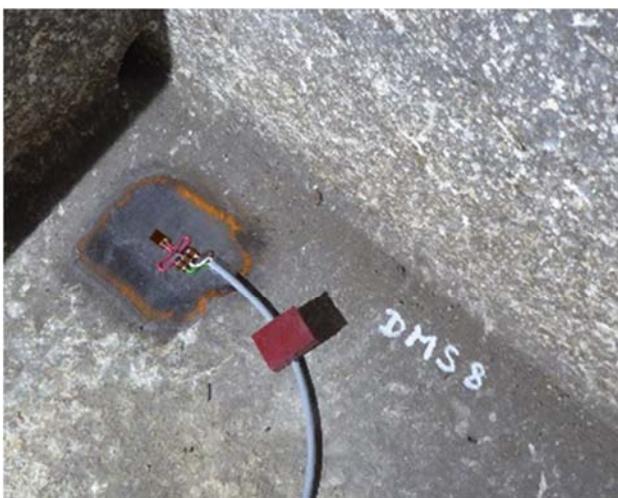
Ziel der 1-jährigen Dauermessung war die Erstellung einer Häufigkeitsverteilung der gemessenen Beanspruchungen infolge der Verkehrsbeanspruchung. Mittels der gewonnenen Daten kann so ein 99,9%-Quantil ermittelt und eine Anpassung der für das Lastmodells 1 gemäß [4] vorgeschriebenen α -Beiwerte vorgenommen werden.

In einer späteren Phase des Projekts soll zudem durch die Ermittlung der Betriebskollektive Aussagen über den Ermüdungszustand der Brücke vorgenommen werden.

3.4 Angebrachte Sensorik

An insgesamt 18 Messorten wurden über die gesamte Brücke verteilt elektrische Dehnmessstreifen zur Messung des Dehnungszustands und der Temperatur angebracht. Abbildung 11 zeigt beispielhaft zwei der angebrachten Sensoren.

Die Bereinigung der Messwerte um Temperatureinflüsse wurde im Zuge der Datenauswertung rechnerisch berücksichtigt.



(a)



(b)

Abbildung 11: (a) Sensor kurz nach Applikation und (b) Sensor nach Aufbringung der Abdeckung

3.5 Kalibrierfahrt und erste Ergebnisse

Um die Dauermessung mit einer bekannten Last vergleichen zu können, wurde eine Kalibrierfahrt mit einem 3-achsigen Muldenkipper vorgenommen. Dieser dient als Referenz um die Lastbeträge der Brücke durch Verkehr mittels des Kalibrierfahrzeugs ermitteln zu können. Das Ergebnis der Auswertung für eine Zeitreihe von einem Monat ist in Abbildung 12 dargestellt.

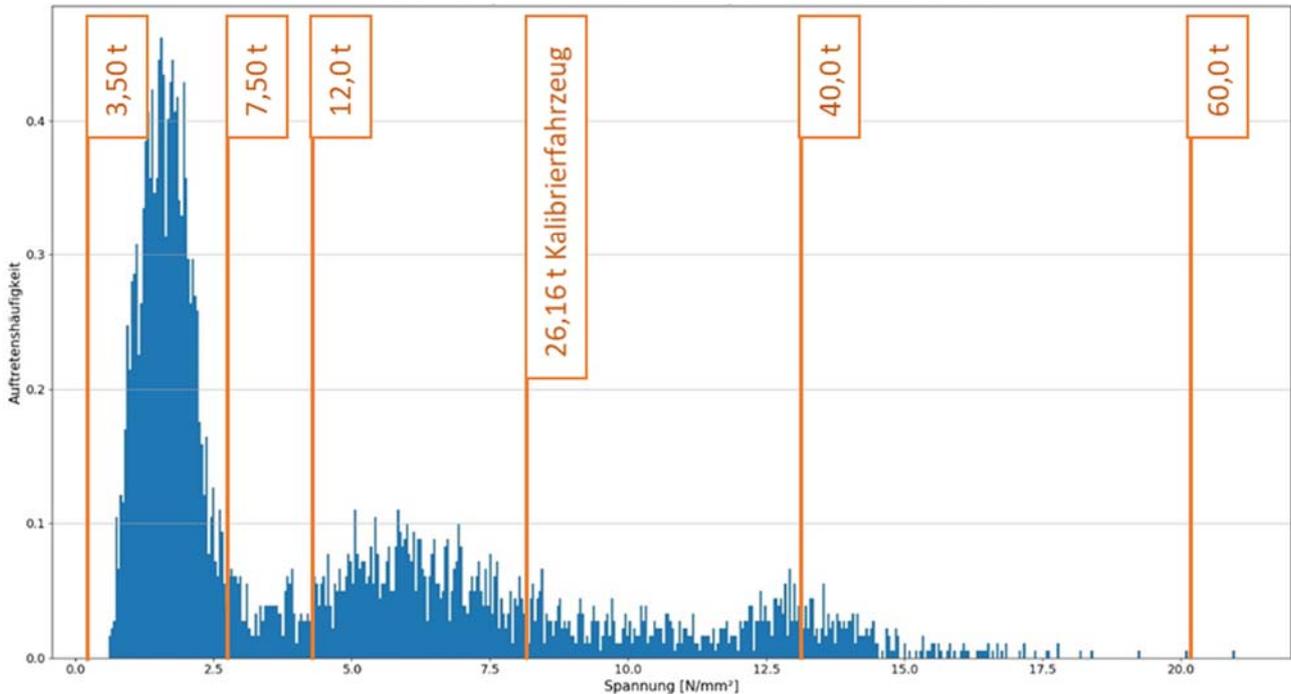


Abbildung 12: Histogramm der Stahlspannungen im Dezember 2019

4 Schlussfolgerung

Die gewonnene Erfahrung aus den in diesem Beitrag vorgestellten Projekten zeigt, dass die Gewinnung von Daten zum Zweck der Nachrechnung baulicher Strukturen zwar mit nicht zu unterschätzenden Kosten und erheblichem personellen Aufwand verbunden ist, sich eine zielgerichtete Nachrechnung lohnen kann. Die beiden vorgestellten Strategien zum Update des statischen Systems und zur Schaffung einer Datengrundlage zur Bestimmung des anzusetzenden Verkehrslastmodells sind dabei sorgfältig gegeneinander abzuwägen um das Ziel einer möglichst kosteneffizienten Bewertung der Tragstruktur zu erreichen. Obwohl das Potential der beiden Ansätze für die praktische Anwendung schon jetzt als groß eingestuft werden kann, bedarf es weiterer Forschungstätigkeit um den in Abschnitt 1 beschriebenen Zielkonflikt weiter aufzulösen und den gesellschaftlichen Mehrwert der Erhaltung von Brückenbauwerken durch Messungen weiter steigern zu können.

5 Literatur

- [1] Mensinger, M., Pfaffinger, M., Haslbeck, M.: Determination of Load Lines for Train Crossings on a Tied Arch Bridge, Fifth International Symposium on Life -Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016), 2016
- [2] Haslbeck, M., Merkl, C., Braml, Th.: Daten als Grundlage für KI-Anwendungen – Beispielprojekt Brücke Roding. Beitrag zum 4.Brückenbaukolloquium der Technischen Akademie Esslingen, 2020.
- [3] Haslbeck, M., Kraus, M.A., Braml, Th.: Bayesian Reliability Assessment and System Identification for existing Concrete Bridge Structures - Elaboration of a template for existing civil engineering structures – International Probabilistic Workshop 2019
- [4] DIN EN 1991-2:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010