Deutscher
Ausschuß für
Stahlbau

DASt

Leibniz
Universität
Hannover

19. DASt-Forschungskolloquium
27. - 28. Oktober 2014

Institut für Stahlbau
Leibniz Universität Hannover

© EIN PRODUKT DER FREHNER CONSULTING

19. DASt-Forschungskolloquium in Hannover

Modifizierte Sicherheitselemente bei der Bewertung bestehender Brücken unter Nutzung von Bauwerksmonitoring

Nico Steffens und Karsten Geißler

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau, Gustav-Meyer-Allee 25, TU Berlin, Deutschland
E-Mail: nico.steffens@tu-berlin.de, karsten.geissler@tu-berlin.de

ZUSAMMENFASSUNG

Nach einem Überblick über den Zustand der bestehenden Brücken und deren Nachrechnung und Bewertung, wird auf die Spezifika der Bestandsbauwerke im Gegensatz zu Neubauten eingegangen. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie zusätzliche Informationen aus Bauwerksmonitoring im Rahmen des Sicherheits-konzepts bei der Nachrechnung bestehender Brücken einfließen können. An einem Beispiel wird gezeigt, wie Sicherheitselemente für den Nachweis der Tragfähigkeit unter Nutzung von Bauwerksmonitoring modifiziert werden können.

1 Zustand und Bewertung bestehender Brücken

In Deutschland existieren etwa 38.000 Brückenbauwerke im Fernstraßennetz und etwa 30.000 Brücken im Eisenbahnnetz [Geißler, 2014]. Sowohl bei den bestehenden Straßen- als auch Eisenbahnbrücken handelt es sich um eine große Anzahl älterer Bauwerke. Die teilweise bereits langen Nutzungszeiten und vor allem bei Straßenbrücken zugleich steigenden Beanspruchungen infolge Verkehrslasten stellen die bewertenden Ingenieure zunehmend vor Probleme bei der Frage nach der Zukunftsfähigkeit der bestehenden Bauwerke.

Die wirtschaftliche Bedeutung realitätsnaher Erkenntnisse zur Sicherheit bzw. Dauerhaftigkeit des Brückenbestandes ist als sehr hoch einzuschätzen. Aus Kostengründen ist es nicht möglich, alle älteren bzw. nicht mehr ausreichend tragfähigen Brücken kurzfristig zu erneuern. Dies zeigt den großen Bedarf nach einem ökonomischen Umgang mit den bestehenden Bauwerken, wobei Bauwerksmessungen für eine realitätsnahe Bewertung sehr hilfreich sein können.

Werden die für Neubauten ausgelegten Regelwerke auf Bestandsbauwerke angewandt, führen Nachrechnungen in vielen Fällen zu rechnerischen Defiziten. Für die Bewertung bestehender Straßenbrücken wird die "Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand" (Nachrechnungsrichtlinie) [BMVBS, 2011] angewandt. Für die Bewertung bestehender Eisenbahnbrücken gilt die "Richtlinie 805 - Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken" (Ril 805) [DB Netz AG, 2012]. Beide Regelwerke enthalten vier Bewertungsstufen, wobei der Aufwand und die Genauigkeit von Stufe zu Stufe steigen.

2 Sicherheitskonzept in den Normenwerken

Ein Bauwerk gilt als sicher, wenn die Beanspruchung kleiner als die Beanspruchbarkeit ist. Da Beanspruchung und Beanspruchbarkeit keine festen Größen sind, wird eine ausreichend hohe Sicherheit bzw. Zuverlässigkeit mit Hilfe der Versagenswahrscheinlichkeit unter Beachtung der streuenden Größen nachgewiesen. In den Regelwerken werden vereinfachend feste charakteristische Werte Xi,k definiert und durch Teilsicherheitsbeiwerte auf den Bemessungspunkt erhöht (Einwirkungen) bzw. abgemindert (Widerstände).

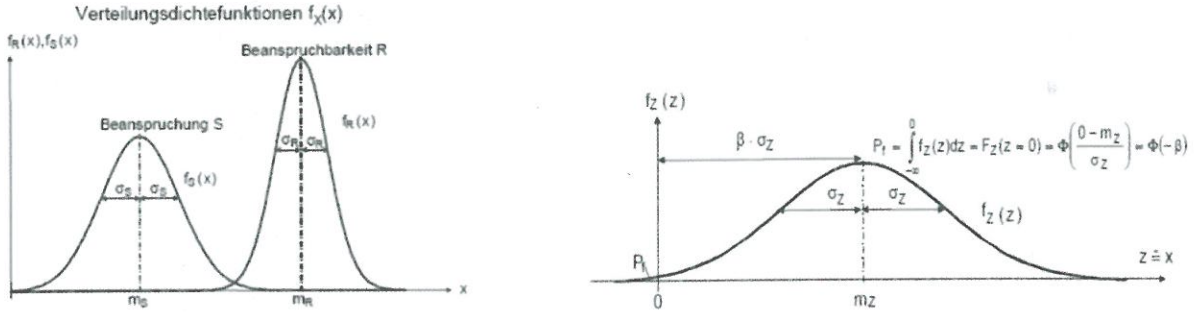

Abbildung 1: Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit für zwei normalverteilte Größen

Die probabilistische Berechnung der operativen Versagenswahrscheinlichkeit für die verschiedenen möglichen Versagensfälle (Grenzzustände) in Verbindung mit dem Einfluss der einzelnen zufälligen Größen bildet die Grundlage zur Festlegung der normativen Teilsicherheitsbeiwerte. Durch Kombinationsbeiwerte wird die Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Auftretens mehrerer zeitveränderlicher Einwirkungen berücksichtigt. Beispielsweise ergibt sich der Bemessungswert einer Einwirkung zu:

$$E_d = \gamma \cdot \psi \cdot E_k \tag{1}$$

Die normativ definierten Teilsicherheitsbeiwerte γ setzen sich aus einem Faktor γ_f für die Streuung der Einwirkung und einem Faktor γ_{sd} für Unsicherheiten in den Modellannahmen zusammen [Grünberg, 2004].

3 Spezifika des Sicherheitskonzepts für Bestandsbauwerke

Unsicherheiten, die während der Planung bestehen, sind bei Bestandsbauwerken i.d.R. nicht mehr in dem Maße vorhanden wie bei Neubauten. Dies gilt für ständige Lasten und für Verkehrslasten. Sowohl in der Nachrechnungsrichtlinie als auch in der Ril 805 geht man bereits für ständige Lasten einen Schritt in diese Richtung. Wenn durch eine genaue Mengenermittlung das Eigengewicht bestimmt wird, darf für ständige Lasten ein geringerer Teilsicherheitsbeiwert angesetzt werden (Straßenbrücken: γ_G = 1,2 statt 1,35; Eisenbahnbrücken: γ_G = 1,1 statt 1,35). Dies ist mit der Reduzierung der Unsicherheit in der Größe der Einwirkung begründet. Für vertikale Eisenbahnverkehrslasten darf bei Nachrechnungen ebenfalls mit einem geringeren Teilsicherheitsbeiwert gerechnet werden (γ_Q = 1,3 statt 1,45). Hier liegt die Begründung in der geringeren Streuung der zukünftigen Verkehrslasten wegen der begrenzten Nutzungszeit.

Nachrechnungen bestehender Straßenbrücken mit den für Neubauten anzusetzenden Einwirkungen führen durch das stetig steigende Gewicht der Verkehrslasten (real und normativ) häufig zu rechnerischen Defiziten. In der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken sind geringere Verkehrslastmodelle zugelassen, sofern sichergestellt wird, dass die Beanspruchungen daraus tatsächlich nicht überschritten werden.

4 Anpassung der Sicherheitselemente auf Basis von Bauwerksmonitoring

Lässt sich in den ersten Bewertungsstufen keine zufriedenstellende Sicherheit der Bauwerke nachweisen, können Bauwerksmessungen durchgeführt werden. Die dadurch gewonnenen Informationen können in die Bewertung der Bauwerke einfließen. Dies wird im Folgenden für die beiden Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und der Ermüdung erläutert.

Nachweis der Tragfähigkeit

Der Teilsicherheitsbeiwert einer Einwirkung ergibt sich als Quotient aus dem Bemessungswert und dem charakteristischen Wert. Der charakteristische Wert E_k wird für Verkehrslasten i.d.R. als 98%-Quantilwert für den Bezugszeitraum von einem Jahr definiert. Der Bemessungswert E_d kann mit Hilfe probabilistischer Methoden berechnet werden [Spaethe, 1987]. Im GZT ist er vom Sicherheitsindex β = 3,8 (Nutzungsdauer: 50 Jahre), dem Wichtungsfaktor α_E und der Streuung v der Einwirkung bzw. Beanspruchung abhängig. Der Wichtungsfaktor α_E kann gem. EC 0 vereinfacht mit α_E = -0,70 angenommen werden, um Einwirkungs- und Widerstandsseite zu entkoppeln. Eine vollprobabilistische Lösung der Grenzzustandsgleichung liefert teilw. abweichende Wichtungsfaktoren. Für eine Einwirkung, die einer Extremwertverteilung Typ I unterliegt, ergibt sich der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert zur Erhöhung des charakteristischen Wertes (98%-Quantilwert bezogen auf 1 Jahr) auf den Bemessungswert zu:

$$\gamma = \frac{E_d}{E_k} = \frac{m_{50} \cdot [1 - 0{,}78 \cdot v_{50} \cdot (0{,}58 + \ln\{-\ln \phi(-\alpha_E \cdot \beta_{50})\})]}{m_{50} \cdot [1 - 0{,}78 \cdot v_{50} \cdot (0{,}58 + \ln\{-\ln 0{,}98^{50}\})]} \tag{2}$$

Dabei muss unterschieden werden zwischen der Streuung der Beanspruchung und der Streuung der Einwirkung. Unter Berücksichtigung der Modellannahmen wird die Einwirkung zur Beanspruchung. Die gewonnenen Messwerte aus der Bauwerksmessung entsprechen meist den Beanspruchungen an der Messstelle (Abbildung 2).

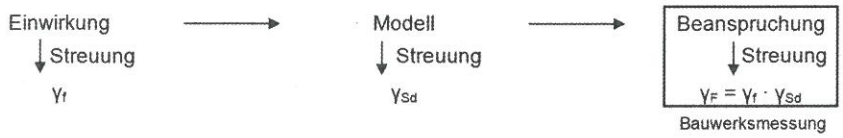

Abbildung 2: Sicherheitselemente für Einwirkung, Modell und Beanspruchung

Der Kombinationsbeiwert einer Einwirkung ergibt sich beim Ansatz einer Extremwertverteilung vom Typ I als Quotient aus dem Bemessungswert der Einwirkung als Begleiteinwirkung und dem Bemessungswert derselben Einwirkung bei alleiniger Wirkung zu:

$$\psi = \frac{Q_{d,Begleit,50}}{Q_{d,50}} = \frac{m_{50}\left(1 - 0{,}78 \cdot v_{50} \cdot \left(0{,}58 + \ln\left\{-\ln\left(\phi\left(-\alpha_{Ei} \cdot \phi^{-1}\left(\frac{\phi(\alpha_E \cdot \beta_{50})}{n}\right)\right)\right)^n\right\}\right)\right)}{m_{50} \cdot [1 - 0{,}78 \cdot v_{50} \cdot (0{,}58 + \ln\{-\ln \phi(-\alpha_E \cdot \beta_{50})\})]} \tag{3}$$

Dabei ist wichtig, den jeweiligen Bezugszeitraum der streuenden Größen zu beachten. Als Bezugszeitraum für die Begleiteinwirkung ist der kleinere Wert aus dem eigenen Grundzeitintervall oder dem nächstgrößeren Grundzeitintervall maßgebend [König, 1982].

Nachweis gegen Ermüdung

Der vereinfachte Ermüdungsnachweis wird unter Ansatz eines normativen Lastmodells über die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite geführt. Diese verursacht für eine definierte Anzahl von Spannungsspielen die gleiche Schadenssumme wie die realen Betriebslasten. Der Betriebslastfaktor λ stellt den Bezug zwischen der aus dem normativen Lastmodell ermittelten Schwingbreite $\Delta\sigma_{ELM}$ und der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{equ}$ her.

$$\Delta\sigma_{equ} = \lambda \cdot \Delta\sigma_{ELM} \tag{4}$$

Wenn die vorhandenen Spannungsschwingbreiten aus den realen Verkehrslasten aus Messungen bekannt sind, lässt sich die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{equ}$ z.B. für ein geschweißtes Detail mit einem Wöhlerlinienanstieg m = 3,0 direkt berechnen:

$$\Delta\sigma_{equ} = \Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{\sum_i \frac{n_i(\Delta\sigma_i)}{N_{Ri}(\Delta\sigma_i)}} \tag{5}$$

Die berechnete schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite enthält die (gemessene) Verteilung der Beanspruchungen, die Verteilung des Ermüdungswiderstandes ist nicht erfasst. Weitere Modifikationsmöglichkeiten können sich aus der Lösung der Grenzzustandsgleichung und der Berechnung des Zuverlässigkeitsindexes β ergeben. Die Grenzzustandsgleichung für Ermüdungsnachweise kann beispielsweise über die Schädigungssumme D formuliert werden:

$$g(x) = D_{Grenz} - D_{vorh} = D_{Grenz} - \sum_i \frac{n_i(\Delta\sigma_i)}{N_{Ri}(\Delta\sigma_i)} \tag{6}$$

Unter Berücksichtigung der einfachsten Form der Wöhlerkurve (geradliniger Verlauf bis zur Abszisse nach Corten/Dolan) lässt sich beispielhaft folgende auszuwertende Grenzzustandsgleichung formulieren [Geißler, 1995]:

$$g(x) = D_{Grenz} - \frac{N(T)}{N_C \cdot \Delta\sigma_C^m} \cdot \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma \tag{7}$$

5 Anwendungsbeispiel

An einem Überführungsbauwerk der Autobahnabfahrt Berlin-Tegel wurden mittels induktiven Wegaufnehmern über ein Jahr alle Überfahrten kontinuierlich erfasst und ausgewertet. Die Messstelle befand sich an einer Koppelfuge des mehrfeldrigen vorgespannten Überbaus.

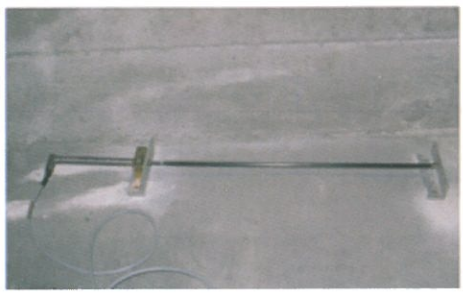

Abbildung 3: AFT-Überführung in Berlin, induktiver Wegaufnehmer mit 0,5 m Messbasis

Die aus der Bauwerksmessung gewonnenen Verteilungen der Tages- und Wochenextremwerte aus den Verkehrslasten sind in Abbildung 4 dargestellt.

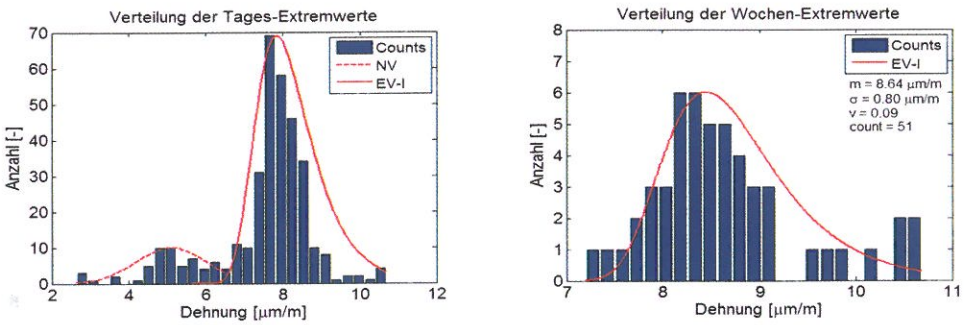

Abbildung 4: Statistische Verteilung der Tages- und Wochen-Extremwerte infolge Verkehr

Die Berechnung des erf. Teilsicherheitsbeiwertes zur Erhöhung des charakteristischen Wertes ist nachfolgend gezeigt. Die statistischen Kennwerte der Jahresextremwertverteilung für die Dehnungen am Untergurt der betrachteten Koppelfuge aus Verkehrslasten ergeben sich wie folgt:

$$m_{50} = 8{,}64 + 0{,}80 \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \ln \frac{50}{1/52} = 13{,}54 \ \frac{\mu m}{m} \tag{8}$$

$$v_{50} = \frac{\sigma}{m_{50}} = \frac{0{,}80}{13{,}54} = 0{,}06 \tag{9}$$

Der messwertgestützte charakteristische Wert ergibt sich damit zu

$$\varepsilon_{k,meas} = 13{,}54 \ \frac{\mu m}{m} \cdot \left(1 - 0{,}45 \cdot 0{,}06\right) = 13{,}2 \ \frac{\mu m}{m} \tag{10}$$

Der erf. Teilsicherheitsbeiwert zur Erhöhung der messwertgestützten charakteristischen Verkehrsbeanspruchung kann als Quotient von Bemessungswert (mit $\alpha_E = -0{,}70$ und $\beta = 3{,}8$) und charakteristischem Wert der gleichen (messwertgestützten) Verteilung ermittelt werden zu:

$$\gamma = \frac{1 + 3{,}87 \cdot 0{,}06}{1 - 0{,}45 \cdot 0{,}06} = 1{,}27 \tag{11}$$

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten werden von der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt begleitet und zu großen Teilen finanziert, wofür besonderer Dank ausgesprochen werden soll.

7 Literatur

BMVBS (2011), "Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Abteilung Straßenbau, Ausgabe 05/2011

DB Netz AG (2012), "Richtlinie 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken", Deutsche Bahn AG Geschäftsbereich Netz, Ausgabe 2012

Geißler, K. (1995), "Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken". Dissertation, TU Dresden

Geißler, K. (2014), "Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung", Ernst & Sohn, Berlin

Grünberg, J. (2004), "Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau", Beuth Verlag

König, G. (1982), "Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung", *Bauingenieur 57*, S. 69–78

Spaethe, G. (1987), "Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen", VEB Verlag für Bauwesen, Berlin