



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 40



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

8. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**8. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 40

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 42 77
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Kathrin Dietz
Probelastung an Fahnenstangen am Goldenen Reiter in Dresden

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf www.qucosa.de

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, September 2015

ISSN 1613-6934

Inhalt

DAfStb-Sachstandbericht <i>Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung bestehender Bauwerke</i> <i>Jürgen Schnell, Michael Weber</i>	5
Dynamik von Stahlbetonbrücken – Messprojekte aus dem Eisenbahn- und Straßenverkehr <i>Lutz Auersch, Samir Said</i>	17
Messtechnische Überlegungen bei Fallversuchen <i>Tino Kühn</i>	31
Identifikation dynamischer Strukturparameter von Eisenbahnbrücken mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie <i>Jens Schneider, Matthias Becker, Andrei Firus, Jiny Pullamthara, Michael Drass</i>	47
Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse im Bauwesen <i>Stephan Pirskawetz, Julia Wolf, Wolfram Schmidt, Andreas Rogge</i>	61
Hochgenaue 3D-Referenzmessungen als ein Beitrag der Geodäsie zur experimentellen Untersuchung des Systemverhaltens neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann</i>	73
Experimentelle Untersuchung zum Systemtragverhalten neugotischer Gewölbekonstruktionen <i>Jens Piehler, Michael Hansen, Gerd Kapphahn</i>	81
Tragfähigkeitsuntersuchungen an historischen Fahnenmasten <i>Silke Scheerer, Sabine Wellner, Torsten Hampel, Bernd Eckoldt</i>	93
Pont Lagunaire, Togo – Experimentelle Tragwerksanalyse einer Stahlfachwerkbrücke zum Nachweis der Restnutzungszeit <i>Marc Gutermann, Werner Malgut, Klaus Ammermann</i>	103
Experimenteller Nachweis der Tragfähigkeit an der Kettenbrücke im Goethepark in Weimar <i>Erik Meichsner, Phillip Johann Jung, Oliver Hahn, Stefan Finke</i>	117
Untersuchungen und Maßnahmen an setzungsauffälligen Pfeilern der Saale-Elster-Talbrücke der Eisenbahnstrecke Erfurt–Leipzig/Halle <i>André Koletzko, Sandra Christein</i>	123
Bewertung bestehender Brücken unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung durch Bauwerksmonitoring <i>Nico Steffens, Karsten Geißler, Ronald Stein</i>	135

Lagrange-Multiplikator-Test zur Detektierung von zunehmender Strukturschädigung:
Experimentelle Verifikation

Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Petra Kubowitz, Werner Daum,

Detlef Hofmann, Frank Basedau 147

Zustandsbewertung von Stahlbetonbauteilen mithilfe der dynamischen Eigenschaften

F. Weisleder, M. Waltering..... 159

Softwareunterstützte Nachrechnung und Ertüchtigung von Brückenbauwerken

Stefan Kimmich, Eckhard Held 175

Bewertung bestehender Brücken unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung durch Bauwerksmonitoring

Nico Steffens¹, Karsten Geißler², Ronald Stein³

Kurzfassung. Die realistische Bewertung bestehender Brückenbauwerke nimmt einen immer größeren Stellenwert ein. Für die Bewertung können ergänzend Bauwerksmessungen durchgeführt werden, um zusätzliche Informationen zum Tragwerk oder den Beanspruchungen zu erhalten. Bisher ungeklärt ist die Frage, inwiefern die gewonnenen zusätzlichen Informationen zu den Beanspruchungen im Rahmen des Sicherheitskonzepts zu berücksichtigen sind. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie durch Integration der Messdaten in das Sicherheitskonzept modifizierte Sicherheitselemente begründet werden können.

Assessment of existing bridges under particular consideration of measured stresses – Abstract. *The realistic assessment of existing bridges becomes more and more important. Structural measurements can be used additionally to obtain more information about the structure and actual stresses. However, it still has to be clarified, to which extent the additional information obtained by structural monitoring and measurements have to be used within the structural safety concept. In this paper an approach is introduced, with which the additional information obtained by structural measurements can be used within the structural safety concept using modified safety factors.*

1 Zustand und Bewertung bestehender Brücken

In Deutschland existieren etwa 38.000 Brückenbauwerke im Fernstraßennetz und etwa 30.000 Brücken im Eisenbahnnetz [1]. Aufgrund der teilweise bereits langen Nutzungszeiten und – vor allem bei Straßenbrücken – zugleich steigenden Beanspruchungen infolge Verkehrslasten, steigt in den nächsten Jahrzehnten der Handlungsbedarf im Umgang mit den bestehenden Bauwerken. Für einen ökonomischen Umgang mit diesen Bauwerken können Bauwerksmessungen für eine realitätsnahe Bewertung sehr hilfreich sein.

1.1 Bewertung der Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit einer Brücke wird mit der Brückenklasse (je nach nachgewiesenem Lastmodell) ausgedrückt. In Bild 1 ist der prozentuale Anteil der Brückenklassen für Bundesautobahnen bzw. -fernstraßen in Deutschland dargestellt [2]. Der weitaus größte Teil wird den Brückenklassen 60 und 60/30 mit geringerer Tragfähigkeit als heute allgemein erforderlich zugeordnet.

1 Dipl.-Ing., FG Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau, Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin

2 Prof. Dr.-Ing., FG Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau, Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin

3 Dipl.-Ing., GMG Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

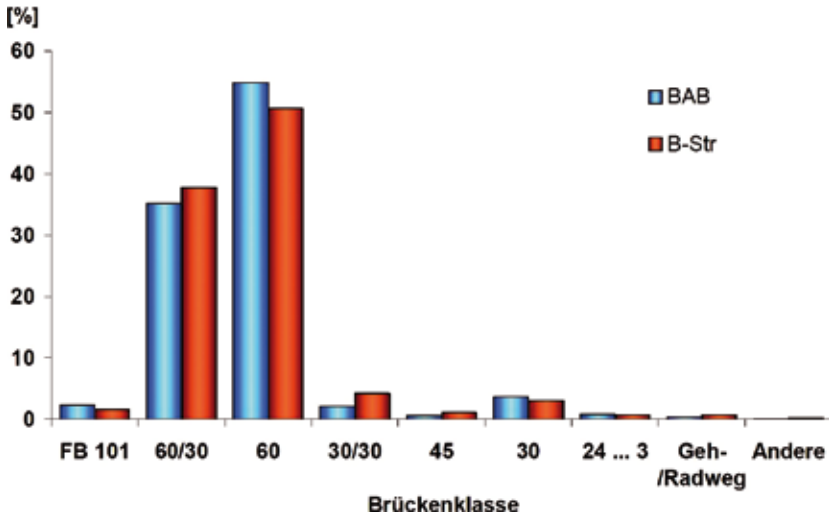


Bild 1: Prozentualer Anteil der Brückenklassen (Straße) in Deutschland, [2]

Bestehende Bauwerke wurden mit den seinerzeit gültigen Lastmodellen bemessen. Bei Nachrechnungen wird das Ziellastniveau für die Verkehrslast in Abhängigkeit des Anteils des Schwerverkehrs am Gesamtverkehr (DTV-SV) und der Verkehrsart (je nach Verkehrszusammensetzung) definiert [3]. Fehlen diese Informationen, wird möglicherweise (auf der sicheren Seite) ein zu schweres Lastmodell gewählt. Die Festlegung des Ziellastniveaus ohne genauere Untersuchungen des vorhandenen Verkehrs führt bei der Nachrechnung daher häufig zu rechnerischen Defiziten, obwohl die Bauwerke noch in gutem Zustand sind. Für eine realitätsnahe Bewertung können Messungen zu den realen Verkehrslasten bzw. den resultierenden Beanspruchungen sehr wichtig sein.

1.2 Bewertung der Ermüdungssicherheit

Ein großer Teil der Brücken in Deutschland hat bereits eine lange Nutzungszeit hinter sich. Für den Nachweis der Ermüdungssicherheit spielt die Belastungsgeschichte (bspw. die Anzahl und Schwere der Überfahrten) eine wichtige Rolle. Da in den meisten Fällen genaue Informationen fehlen, sind in den Regelwerken näherungsweise Vorgaben enthalten (s. bspw. für Straßenbrücken [4] und Tabelle 1).

Mit den in Tabelle 1 angegebenen Werten kann u. U. die tatsächliche LKW-Belastung erheblich falsch eingeschätzt werden. Als Folge ergeben sich bspw. rechnerisch eine nicht ausreichende Ermüdungssicherheit und eine reduzierte Restlebensdauer. Die realen ermüdungswirksamen Beanspruchungen bleiben hinsichtlich Anzahl und Größe mit dem herkömmlichen Ansatz unberücksichtigt.

Tabelle 1: Anzahl erwarteter Lastkraftwagen N_{obs} pro Jahr für einen LKW-Fahrstreifen, [4]

Verkehrskategorie	N_{obs} pro Jahr und LKW-Fahrstreifen
1: Autobahnen und Straßen mit 2 oder mehr Fahrstreifen je Fahrtrichtung mit hohem LKW-Anteil	$2 \cdot 10^6$
2: Autobahnen und Straßen mit mittlerem LKW-Anteil	$0,5 \cdot 10^6$
3: Hauptstrecken mit geringem LKW-Anteil	$0,125 \cdot 10^6$
4: Örtliche Straßen mit geringem LKW-Anteil	$0,05 \cdot 10^6$

1.3 Bauwerksmessungen in den Nachrechnungsrichtlinien

Für die Bewertung bestehender Straßenbrücken wird die *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand* (Nachrechnungsrichtlinie), [3], angewandt. Für die Bewertung bestehender Eisenbahnbrücken gilt die *Richtlinie 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken* (Ril 805), [5]. Beide Regelwerke enthalten vier Bewertungsstufen, wobei der Aufwand und die Genauigkeit von Stufe zu Stufe steigen. In beiden Regelwerken sind in höheren Bewertungsstufen Bauwerksmessungen zugelassen. Durch Bauwerksmessungen stehen zusätzliche Informationen bereit, die eine realitätsnähere Bewertung ermöglichen und im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden sollten.

2 Sicherheitskonzept im Bauwesen

Ein Bauwerk gilt als sicher, wenn der Bemessungswert der Beanspruchung kleiner oder gleich dem der 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 (Bild 2). In den Regelwerken werden vereinfachend feste charakteristische Werte $X_{i,k}$ definiert und durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht (Einwirkungen) bzw. abgemindert (Widerstände).

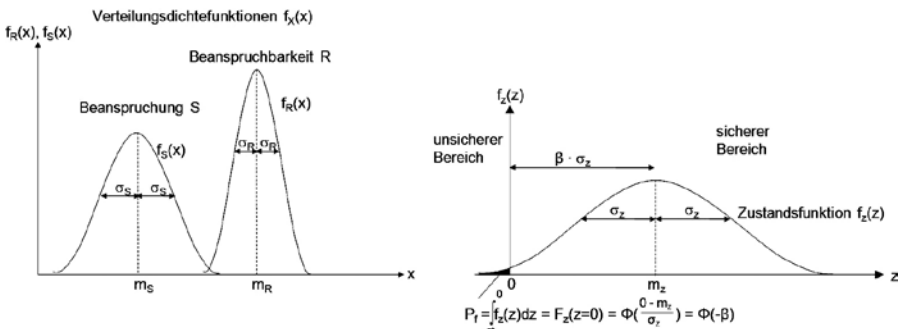


Bild 2: Versagenswahrscheinlichkeit für zwei normalverteilte Größen

2.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

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

$$E_d = \gamma \cdot \psi \cdot E_k \quad (1)$$

Die im Rahmen von Nachrechnungen anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte orientieren sich zum großen Teil an den für Neubauten erforderlichen Sicherheitsanforderungen, s. Bild 3.

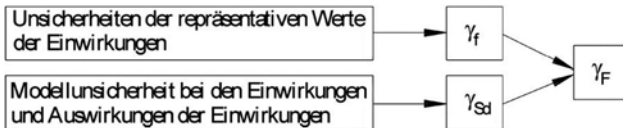


Bild 3: Zusammensetzung des einwirkungsseitigen Teilsicherheitsbeiwertes, [6]

Der partielle Teilsicherheitsbeiwert γ_f zur Berücksichtigung der Streuung der Einwirkung lässt sich mit der Kenntnis deren statistischer Verteilung mit den Methoden der Zuverlässigkeitstheorie begründen. In [7] sind Anhaltswerte für Variationskoeffizienten v veränderlicher Einwirkungen angegeben. Der partielle Teilsicherheitsbeiwert γ_{sd} zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit wird nicht immer wissenschaftlich begründet. In der Literatur schwanken die Werte für γ_{sd} zwischen 1,05 und 1,1 [7].

2.2 Grenzzustand der Ermüdung

Die Grundlagen für den Nachweis einer ausreichenden Ermüdungssicherheit beruhen auf dem Wöhlerlinienkonzept und der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren/Miner. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Spannungswechsel $\Delta\sigma_i$ einen Teilschaden d_i am Bauteil verursacht. Der Gesamtschaden ergibt sich aus der Summe aller Einzelschäden.

$$D_{ges} = \sum d_i = \sum \frac{n_i (\Delta\sigma_i)}{N_{Ri} (\Delta\sigma_i)} \quad (2)$$

Die zweifach abgeknickte Wöhlerlinie mit horizontalem Ast stellt eine mögliche Näherung zur rechnerischen Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsbereiches dar. Der vereinfachte Ermüdungsnachweis wird für Bauteile von Tragkonstruktionen, so auch für Brücken, im Regelfall unter Ansatz eines Bezugslastmodells (Ermüdungslastmodell ELM) über die schädigungsäquivalente Spannungsschwingbreite geführt. Diese verursacht für eine definierte Anzahl von Spannungsspielen ($N = 2,0$ Mio. für Stahl- bzw. $N = 1,0$ Mio. für Betonkonstruktionen) die gleiche Schadenssumme wie das reale Beanspruchungskollektiv. Der Betriebslastfaktor λ stellt

den Bezug zwischen der aus dem normativen (Bezugs-)Lastmodell ermittelten Schwingbreite $\Delta\sigma_{ELM}$ und der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{equ}$ her.

$$\Delta\sigma_{equ,d} = \gamma_{Ft} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma_{ELM} \quad (3)$$

Die Ermüdungssicherheit wird auf Gebrauchslastniveau nachgewiesen. Der einwirkungsseitige Teilsicherheitsbeiwert wird daher pauschal mit $\gamma_{Ft} = 1,0$ angesetzt. Dieser ist bisher nicht auf zuverlässigkeitstheoretischer Basis begründet.

2.3 Spezifika des Sicherheitskonzepts für Bestandsbauwerke

Sowohl die Verteilung der Einwirkungen als auch die Verteilung der Modellunsicherheit stellen sich bei Bestandsbauwerken grundsätzlich anders dar als für Neubauten. Unsicherheiten, die während der Planung bestehen, sind bei Bestandsbauwerken i. d. R. nicht mehr in dem Maße vorhanden wie bei Neubauten. Das betrifft vor allem das (u. a. durch Messungen überprüfbare) Modell vom Tragsystem. Außerdem sind sowohl für ständige Lasten als auch für Verkehrslasten die Unsicherheiten geringer. Sowohl in der Nachrechnungsrichtlinie [3] als auch in der Ril 805 [5] geht man für ständige Lasten bereits einen Schritt in diese Richtung. Wenn durch eine genaue Mengenermittlung das Eigengewicht bestimmt wird, darf für ständige Lasten ein geringerer Teilsicherheitsbeiwert angesetzt werden:

- Straßenbrücken aus Stahl-/Spannbeton: $\gamma_G = 1,2$ statt 1,35;
- Eisenbahnbrücken: $\gamma_G = 1,1$ statt 1,35.

Dies ist mit der Reduzierung der Unsicherheit der Größe der Einwirkung begründet. Für vertikale Eisenbahnverkehrslasten darf bei Nachrechnungen ebenfalls mit einem geringeren Teilsicherheitsbeiwert gerechnet werden ($\gamma_G = 1,3$ statt 1,45). Hier liegt die Begründung in der geringeren Streuung der zukünftigen Verkehrslasten wegen der begrenzten Nutzungszeit. Bei Neubauten mit einer Nutzungsdauer von häufig ca. 100 Jahren müssen für zukünftige Verkehrsentwicklungen höhere Sicherheitsreserven berücksichtigt werden als bei Bestandsbauwerken, die ggf. nur für eine begrenzte Restnutzungsdauer zu beurteilen sind. Ähnliches wäre auch für Straßenverkehrslasten denkbar.

Für Bestandsbauwerke lassen sich außerdem die erforderlichen Ziellastniveaus genauer festlegen, da der vorhandene Verkehr etwas exakter bestimmt werden kann. In der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken [5] sind geringere Verkehrslastmodelle zugelassen, sofern sichergestellt wird, dass die Beanspruchungen daraus tatsächlich nicht überschritten werden (vgl. 1.1).

3 Modifizierte Sicherheitselemente durch Bauwerksmonitoring

3.1 Methoden

Grundsätzlich lassen sich die in Tabelle 2 dargestellten Bauwerksmessungen unterscheiden. Systemmessungen werden über einen Zeitraum von wenigen Tagen durchgeführt. Die Beanspruchungen am Tragwerk werden bei wenigen Überfahrten definierter Probelasten gemessen und können mit den rechnerischen Beanspruchungen verglichen werden.

Tabelle 2: Differenzierung verschiedener Bauwerksmessungen

Systemmessung	Bauwerksmonitoring
Kurzzeitmessung, z. B. 1–3 Tage	Langzeitmessung, z. B. 3–12 Monate
❑ Erfassung von Systemeigenschaften durch Probelastung bzw. bekannte Betriebslasten: ❑ Steifigkeiten ❑ Lastverteilung ❑ Lastabtrag ❑ Anpassung des Berechnungsmodells	❑ Erfassung der realen Beanspruchungen z. B. infolge: ❑ Temperatur ❑ Verkehrslasten ❑ Wind ❑ Berücksichtigung zusätzlicher statistischer Informationen zu den Beanspruchungen im Nachweis

Im Rahmen eines Bauwerksmonitorings über einen längeren Zeitraum werden die realen Beanspruchungen erfasst. Diese zusätzlichen Informationen können genutzt werden, um die normativen Sicherheitselemente auf zuverlässigkeitstheoretischer Basis an die realen Bedingungen anzupassen. 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 (Bild 4).

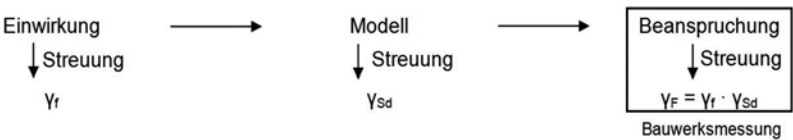


Bild 4: Sicherheitselemente für Einwirkung, Modell und Beanspruchung

Die am Tragwerk zu untersuchenden Messpunkte ergeben sich i. d. R. aus den Ergebnissen einer Nachrechnung des Tragwerks. Die im Folgenden vorgestellten modifizierten Sicherheits-



Bild 5: DMS mit 10 mm Messbasis und Temperaturkompensation an einer Stahlbrücke Foto: Nico Steffens



Bild 6: IWA mit 50 cm Messbasis mittels Verlängerungsstab aus Carbon Foto: Nico Steffens

elemente gelten zunächst für die Messstelle. Um die Ergebnisse auf das gesamte Tragwerk zu übertragen, sind geeignete Übertragungsfaktoren zu bestimmen oder ggf. ergänzende Messstellen zu wählen. Die Wahl der Sensoren hängt neben der gewünschten Zielgröße u. a. auch vom Baustoff ab. Die Homogenität von Stahl erlaubt für die Erfassung von Dehnungen den Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS, Bild 5).

Aufgrund der größeren Inhomogenität von Beton ist für die Erfassung von zuverlässigen Dehnungswerten eine weitaus größere Messbasis erforderlich. Zur Rissüberbrückung können bspw. induktive Wegaufnehmer (IWA, Bild 6) gewählt werden, für die mittels Verlängerungsstab eine Messbasis von mehreren Zenti- bzw. Dezimetern erreicht wird.

3.2 Messwertgestützter Nachweis der Tragfähigkeit

3.2.1 Anpassungsfaktor für ein objektspezifisches Lastmodell

Der charakteristische Wert der Verkehrslast für die Bemessung bzw. Nachrechnung wird i. d. R. den Normen entnommen. Für Neubauten ist dies aktuell das Lastmodell 1 (vormals LMM) nach EC 1-2 [4]. Bei Nachrechnungen bestehender Bauwerke können u. U. abgestufte Lastmodelle angesetzt werden, wenn die Verkehrsart bekannt ist und ein geringeres Ziellastniveau zulässt. Durch eine Bauwerksmessung lässt sich das aktuell vorhandene Beanspruchungsniveau infolge der Verkehrslasten besser bestimmen, wobei natürlich eine gewisse Streuung bleibt und zu beachten ist. Beanspruchungen infolge Verkehrslasten werden i. d. R. durch Extremwertverteilungen (z. B. Typ I/Gumbel) beschrieben. Wenn durch Messungen die Extremwertverteilung der Beanspruchung an einer kritischen Stelle bestimmt wurde (μ , σ , ν), lässt sich der objektspezifische charakteristische Wert bspw. als 98-%-Quantilwert der Jahresextremwertverteilung bestimmen. Der Anpassungsfaktor α für das (normativ) ange-setzte Lastmodell ergibt sich aus dem Quotienten von messwertgestütztem und normativem charakteristischem Wert $E_{k, \text{mess}}$ und $E_{k, \text{norm}}$, Gl. (4).

$$\alpha_{LM} = \frac{E_{k, \text{mess}}}{E_{k, \text{norm}}} \quad (4)$$

Mit dem Ansatz einer Extremwertverteilung Typ I [8] für die Jahresextremwerte ergibt sich der folgende Anpassungsfaktor α_{LM} für das Lastmodell.

$$\alpha_{LM} = \frac{E_{k, \text{mess}}}{E_{k, \text{norm}}} = m_1 \cdot \frac{1 - 0,78 \cdot \nu_1 \cdot (0,58 + \ln\{-\ln 0,98\})}{E_{k, \text{norm}}} \quad (5)$$

$$\alpha_{LM} = m_1 \cdot \frac{1 + 2,59 \cdot \nu_1}{E_{k, \text{norm}}} \quad (6)$$

3.2.2 Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Streuung einer Beanspruchung

Der Teilsicherheitsbeiwert γ einer Einwirkung ergibt sich ebenfalls als Quotient aus dem Bemessungswert und dem charakteristischen Wert. Der charakteristische Wert E_k wird i. d. R.

als 98-%-Quantilwert für den Bezugszeitraum von einem Jahr definiert. Der Bemessungswert E_d kann mit Hilfe probabilistischer Methoden berechnet werden [8]. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist er vom Sicherheitsindex $\beta = 3,8$ (Nutzungsdauer: 50 Jahre), dem Wichtungsfaktor α_E und der Streuung v der Einwirkung bzw. Beanspruchung abhängig. Der Wichtungsfaktor α_E kann gemäß EC 0, Anhang C [6] vereinfacht mit $\alpha_E = -0,70$ angenommen werden, wodurch Einwirkungs- und Widerstandsseite voneinander entkoppelt werden. Für eine Einwirkung, die einer Extremwertverteilung Typ I unterliegt, ergibt sich der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert zur Erhöhung des charakteristischen Wertes auf den Bemessungswert zu:

$$\gamma = \frac{E_d}{E_k} = \frac{m_{50} \cdot \left[1 - 0,78 \cdot v_{50} \cdot \left(0,58 + \ln \left(-\ln \phi \left(-\alpha_E \cdot \beta_{50} \right) \right) \right) \right]}{m_{50} \cdot \left[1 - 0,78 \cdot v_{50} \cdot \left(0,58 + \ln \left(-\ln 0,98^{50} \right) \right) \right]} \quad (7)$$

In Bild 7 ist der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert einer Beanspruchung in Abhängigkeit des gemessenen Variationskoeffizienten der Beanspruchung dargestellt.

3.2.3 Kombinationsbeiwert zur Berücksichtigung der Beanspruchung bei zeitgleichem Auftreten einer Begleiteinwirkung

Der Kombinationsbeiwert ψ 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 nach Gl. (8).

$$\psi = \frac{Q_{d,Begleit,50}}{Q_{d,50}} = \frac{m_{50} \left[1 - 0,78 \cdot v_{50} \cdot \left[0,58 + \ln \left(-\ln \left(\phi \left[-\alpha_E \cdot \phi^{-1} \cdot \frac{\phi(\alpha_E \cdot \beta_{50})}{n} \right] \right)^n \right) \right] \right]}{m_{50} \cdot \left[1 - 0,78 \cdot v_{50} \cdot \left(0,58 + \ln \left(-\ln \phi \left(-\alpha_E \cdot \beta_{50} \right) \right) \right) \right]} \quad (8)$$

Bei der Berechnung des Kombinationsbeiwertes ist die Wiederholungsrate n der Begleiteinwirkung zu beachten. Die Wiederholungsrate gibt an, wie oft sich der Wert der zweiten veränderlichen Beanspruchung während der Nutzungszeit ändert und ergibt sich aus dem

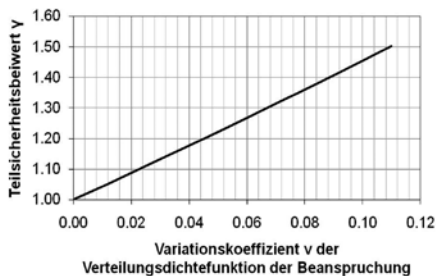


Bild 7: Erforderlicher Teilsicherheitsbeiwert in Abhängigkeit des gemessenen Variationskoeffizienten der Beanspruchung

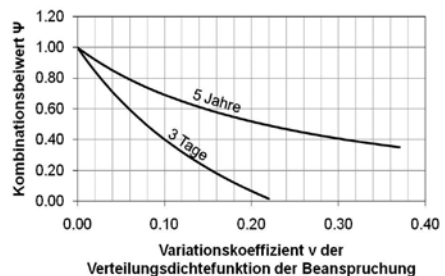


Bild 8: Erforderlicher Kombinationsbeiwert in Abhängigkeit des gemessenen Variationskoeffizienten und des maßgebenden Grundzeitintervalls

Quotienten aus der Nutzungszeit (z. B. 50 Jahre) und dem Bezugszeitraum. Als Bezugszeitraum für die Begleiteinwirkung ist der kleinere Wert aus dem eigenen Grundzeitintervall oder dem nächstgrößeren Grundzeitintervall maßgebend. Das Grundzeitintervall drückt die Dauer aus, in der eine Einwirkung idealisiert als konstant angesehen werden kann. In Bild 8 ist der erforderliche Kombinationsbeiwert einer Beanspruchung in Abhängigkeit des gemessenen Variationskoeffizienten und des Grundzeitintervalls dargestellt.

3.3 Messwertgestützter Nachweis der Ermüdungssicherheit

3.3.1 Objektspezifisches Ermüdungslastmodell bzw. Betriebslastfaktor

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

$$\Delta\sigma_{\text{equ}} = \Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{\sum_i \frac{n_i (\Delta\sigma_i)}{N_{Ri} (\Delta\sigma_i)}} \quad (9)$$

Mit der bekannten messwertgestützten schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite kann ein objektspezifischer Betriebslastfaktor λ berechnet werden.

$$\lambda = \frac{\Delta\sigma_{s,\text{equ}}}{\Delta\sigma_{\text{ELM},k}} = \frac{\Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{D_{\text{Mess}}}}{\Delta\sigma_{\text{ELM},k}} = \frac{\Delta\sigma_C \cdot \sqrt[3]{\sum_i \frac{n_i (\Delta\sigma_i)}{N_{Ri} (\Delta\sigma_i)}}}{\Delta\sigma_{\text{ELM},k}} \quad (10)$$

Der objektspezifische Betriebslastfaktor λ stellt den Bezug zwischen dem normativ anzusetzenden Ermüdungslastmodell und den realen ermüdungsrelevanten Beanspruchungen her (für den betrachteten Zeitraum).

3.3.2 Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Änderung des Kollektivs

Der messwertgestützte Betriebslastfaktor setzt das durch die Messung erfasste Kollektiv als konstant voraus. Eine Streuung des Beanspruchungskollektivs wird nicht berücksichtigt. Der Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungsbeanspruchungen γ_{Ff} berücksichtigt eine mögliche Abweichung des Kollektivs. Ein verallgemeinerter einwirkungsseitiger Wichtungsfaktor α für die Ermüdungsbeanspruchung ergibt sich aus vollprobabilistischen Berechnungen der Grenzzustandsgleichung. Die Grenzzustandsgleichung für Ermüdung kann über die Schädigungssumme D formuliert werden.

$$g(x) = D_{\text{Grenz}} - D_{\text{vorh}} = D_{\text{Grenz}} - \sum_i \frac{n_i (\Delta\sigma_i)}{N_{Ri} (\Delta\sigma_i)} \quad (11)$$

Unter Berücksichtigung der einfachsten Form der Wöhlerkurve (geradliniger Verlauf bis zur Abszisse nach Corten/Dolan) lässt sich beispielhaft folgende Grenzzustandsgleichung formulieren [8]:

$$g(x) = D_{\text{Grenz}} - \frac{N(T)}{N_C \cdot \Delta\sigma_C^m} \cdot \int_0^\infty f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma \quad (12)$$

Die Verteilungsdichtefunktion der (gemessenen) Spannungsschwingbreiten $f(\Delta\sigma)$ kann mit einer Extremwertverteilung Typ III der Kleinstwerte (Weibull) mit den Formparametern k und λ beschrieben und das Integral anschließend in eine Gamma-Funktion überführt werden [8].

$$f(\Delta\sigma) = \lambda \cdot k \cdot \Delta\sigma^{k-1} e^{(-\lambda \cdot \Delta\sigma^k)} \quad (13)$$

$$\int_0^{\infty} f(\Delta\sigma) \cdot \Delta\sigma^m \cdot d\Delta\sigma = \lambda^{\frac{m}{k}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right) \quad (14)$$

Die zu lösende Grenzzustandsgleichung lautet dann:

$$g(x) = D_{\text{Grenz}} - \frac{N(T)}{N_c \cdot \Delta\sigma_c^m} \cdot \lambda^{\frac{m}{k}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{k}\right) \quad (15)$$

Durch die Lösung der Grenzzustandsgleichung mit der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung (FORM) stehen das vorhandene Sicherheitsniveau (Sicherheitsindex β) und die Wichtungsfaktoren α der streuenden Größen zur Verfügung. Der Wichtungsfaktor α_{Ef} gibt den Einfluss des Beanspruchungskollektivs auf den Versagenszustand an. Damit lässt sich der erforderliche einwirkungsseitige Teilsicherheitsbeiwert begründen. Um eine Streuung des Kollektivs zu berücksichtigen, wird der Formparameter k der Weibullverteilung als streuend angesetzt. Unter Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung für den Formparameter k ergibt sich der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert für das Beanspruchungskollektiv.

$$\gamma = \frac{k_d}{k_k} = \frac{m_x \cdot e^{-0,5 \cdot v^2 + v \cdot \Phi^{-1}(\Phi(-\alpha \cdot \beta))}}{m_x \cdot e^{-0,5 \cdot v^2 + v \cdot \Phi^{-1}(0,5)}} \quad (16)$$

4 Zusammenfassung

Für die Bewertung bestehender Brücken werden zunehmend Bauwerksmessungen bzw. Bauwerksmonitoring eingesetzt, um genauere Informationen zu den Beanspruchungen und dem Tragsystem zu gewinnen und in der Bewertung angemessen zu berücksichtigen. In den Richtlinien zur Bewertung bestehender Brückenbauwerke sind diese Bauwerksmessungen mit ihren vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten grundsätzlich zugelassen. Ein häufig wiederkehrendes Problem bei der Bewertung bestehender Brücken ist die unzureichende Kenntnis über die tatsächlichen Beanspruchungen infolge der veränderlichen Lasten. Bisher ungeklärt ist allerdings die Frage, inwiefern die zusätzlich gewonnenen Informationen im Sicherheitskonzept zu berücksichtigen sind.

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie durch Integration der Messdaten in das Sicherheitskonzept die normativen Sicherheitselemente der Einwirkungsseite modifiziert werden können. Das normativ geforderte Sicherheitsniveau bleibt dabei erhalten. Durch die realistischere Bewertung (d. h. Aufdeckung rechnerischer Tragwerksreserven vor allem auf der Basis von Bauwerksmessungen) können bestehende Bauwerke länger genutzt und erforderliche Investitionen auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden.

Danksagung

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

5 Literatur

- [1] Geißler, K.: Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- [2] Kaschner, R.: Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen. Teil 1. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt, Hrsg.): Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen, Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 68, 2009, S. 17–62.
- [3] BMVBS (Hrsg.): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, Ausgabe 05/2011.
- [4] DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010. Berlin: Beuth, 12/2010.
- [5] DB Netz AG: Richtlinie 805 – Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken. Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz, 2012.
- [6] DIN EN 1990: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Berlin: Beuth, 2005.
- [7] Grünberg, J.: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Beuth, 2004.
- [8] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. 2. Aufl., Wien: Springer, 1992.