

## **Bauwerksmessungen zur Verifizierung statischer Modelle und Bauwerksmonitoring am Beispiel von Brücken der DB**

**Karsten Geißler<sup>1</sup>, Ronald Stein<sup>2</sup>, Nico Steffens<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *TU Berlin, FG Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau*

<sup>2</sup> *GMG-Ingenieurgesellschaft Dresden/ Berlin*

### **Zusammenfassung:**

Im Beitrag werden die zwei wichtigsten Bereiche zur Anwendung dynamischer Messungen bei Ingenieurbauwerken der Deutschen Bahn AG – Systemmessungen und Bauwerksmonitoring – anhand von Beispielen erläutert. Die Erfahrung im Brückenbau besagt, dass gerade für die älteren Bauwerke meist deutliche Reserven bzgl. des zunächst rechnerisch angenommenen Tragverhaltens bestehen. Das Tragverhalten kann durch dynamische Messungen am Bauwerk oft besser charakterisiert und die vorhandenen Tragreserven begründet werden. Systemmessungen dienen also in erster Linie der Kalibrierung der statischen sowie dynamischen Modelle.

Bauwerksmonitoring sollte erweiternd dann eingesetzt werden, wenn detaillierte Informationen zu Einwirkungen (bzw. deren Korrelationen) oder dem Lastabtrag im Tragsystem über einen längeren Zeitraum erforderlich werden. Dabei ist die Umsetzung ergebnisorientierter Datenreduktionsmethoden besonders wichtig.

Als Ergebnis von Bauwerksmessungen stehen immer bessere Informationen zu den tatsächlichen Beanspruchungen, die innerhalb des Sicherheitskonzeptes der Nachrechnung durch Korrektur der Sicherheitselemente umgesetzt werden können. Häufig können deutlich geringere erforderliche Teilsicherheitsbeiwerte bzw. Kombinationsfaktoren für die Nachrechnung begründet werden.

## 1. EINFÜHRUNG – MESSUNGEN FÜR EISENBAHNBRÜCKEN

Im deutschen Eisenbahnnetz gibt es ca. 30.000 Brücken. Es handelt sich dabei um eine große Anzahl älterer Bauwerke, die ihre normative Nutzungsdauer bereits erreicht haben. Über 40 % der Eisenbahnbrücken sind älter als 80 Jahre, s. Abb. 1.

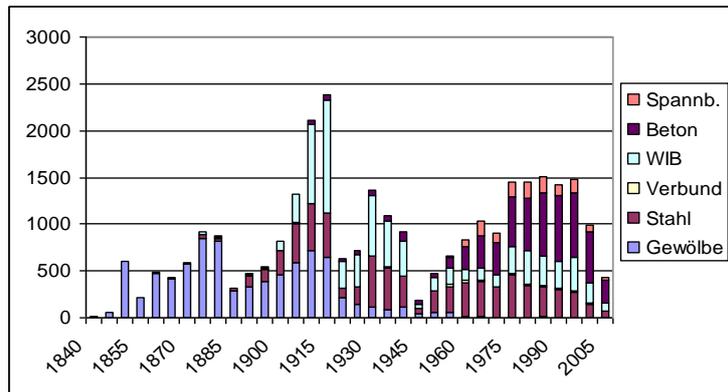


Abb. 1: Bauartenverteilung der Brücken im Bereich der DB AG, Quelle: DB AG

Die wirtschaftliche Bedeutung realitätsnaher Erkenntnisse zur Sicherheit bzw. Dauerhaftigkeit des Brückenbestandes ist als sehr hoch einzuschätzen, denn es ist aus Kostengründen nicht möglich, alle älteren bzw. nicht mehr ausreichend tragfähigen Eisenbahn- und Straßenbrücken kurzfristig zu erneuern. Auch aus ökologischer Sicht ist eine zeitlich abgestimmte Brückenerneuerung wünschenswert. Darüber hinaus stellen viele alte Stahlbrücken sowie Mauerwerksbogenbrücken eine historisch wertvolle Bausubstanz dar. Zahlreiche Bauwerke sind technische Denkmale, die so lange wie möglich erhalten und durch sorgsame Verstärkung unter Wahrung ihres äußeren Erscheinungsbildes an die aktuellen Anforderungen angepasst werden sollten.

Messtechnische Bauwerksuntersuchungen bzw. darauf aufbauende messwertgestützte Bauwerksbeurteilungen ermöglichen in der Regel eine realitätsnähere Bewertung bestehender Tragwerke als eine rein rechnerische Analyse. In der Richtlinie 805 der DB AG [1] sind die messtechnischen Bauwerksuntersuchungen explizit angesprochen und dafür Mindestanforderungen definiert. Das Vorgehen mittels messwertgestützter Bewertung entspricht bei Eisenbahnbrücken der Nachweisstufe 4 „Rechnerischer Nachweis auf der Basis messtechnischer Untersuchungen“. Vor dieser Nachweisstufe ist in jedem Fall eine rechnerische Bewertung des Bauwerkes erforderlich. Die messtechnischen Bauwerksuntersuchungen können prinzipiell unterschieden werden in (s. a. [2]):

- statische Systemmessungen meist unter definierten Lasten als die derzeit häufigste Form von Bauwerksmessungen,
- dynamische Systemmessungen durch Ermittlung von Eigenfrequenzen und -formen
- Traglastversuche für Bauwerke kleinerer Stützweite mit extremaler Belastung zur direkten Einschätzung der Tragfähigkeit,
- Dauermessungen (Bauwerksmonitoring).

## **2. SYSTEMMESSUNGEN**

### **2.1. Grundsätze / Einsatzbereich**

Systemmessungen als statische oder dynamische Messungen werden vor allem mit dem Ziel durchgeführt, das statische bzw. dynamische Berechnungsmodell einschließlich der mittragenden Querschnitte zu überprüfen bzw. anzupassen. Statische Messungen unter ruhender Belastung bzw. langsamer Überfahrt von Fahrzeugen mit definierten Lasten können zur Bestimmung von Verformungen aller Art (äußere Verschiebungen bzw. Verdrehungen und innere Dehnungen, aus denen im elastischen Bereich Spannungen abgeleitet werden können) an ausgezeichneten Punkten des Tragwerks genutzt werden. Durch Vergleich der gemessenen mit rechnerisch ermittelten Größen lässt sich das Berechnungsmodell kalibrieren. Hierbei ist bei Brückenüberbauten beispielsweise die realitätsnähere Erfassung des Zusammenwirkens von Haupttragwerk und Fahrbahn zu nennen.

Durch Systemmessungen bei Fahrten einer definierten Betriebslast in verschiedenen Geschwindigkeitsstufen können die dynamischen Eigenschaften des Tragsystems begründet werden. Weiterhin kann die Bestimmung von Schwingfrequenzen und -amplituden sowie Dämpfungsmaßen bestimmter Bauteile, z. B. der Hänger von Stabbogenbrücken, unter Erregung durch Verkehr oder Wind eine wichtige Aufgabe dynamischer Messungen sein.

Für Ermüdungsuntersuchungen sind die tatsächlichen Beanspruchungskollektive unter einer repräsentativen Verkehrs- und Windbelastung zu bestimmen. Hierbei sind die dynamischen Zuschläge mit der tatsächlichen Schwingspielzahl unter Beachtung von Ein- und Ausschwingverhalten und ermüdungsrelevanten Nebenspannungen enthalten.

Im Rahmen der messwertgestützten Bewertung der Trag- bzw. Ermüdungssicherheit sind mit den verfeinerten Modellen die Nachweise der Tragsicherheit, Ermüdungssicherheit (Restnutzungsdauer) oder Gebrauchstauglichkeit anschließend neu zu führen.

### **2.2. Beispiel Eisenbahnhochbrücke Hochdonn über den Nord-Ostsee-Kanal**

Die zweigleisige Eisenbahnhochbrücke im Zuge der Strecke Hamburg-Westerland über den Nord-Ostsee-Kanal in Hochdonn ist mit einer Gesamtlänge von 2.218 m eine der längsten Eisenbahnbrücken Deutschlands. Sie wurde im Zuge der Kanalerweiterung in den Jahren 1915-20 als genietete Stahlkonstruktion erbaut. Der Brückenzug besteht aus 19 rahmenartigen Fachwerk-Kragträgern und 20 Einfeldträgern, s. Abb. 2. Die beiden sogenannten Eilersrahmen bilden zusammen mit dem Schwebeträger das Kanalbauwerk mit einer lichten Höhe über dem Kanal von ca. 42 m.

Im Zuge der statischen Nachrechnung der Eisenbahnhochbrücke wurden an mehreren Rahmen dynamische Bauwerksmessungen mit dem Ziel einer möglichst realitätsnahen Erfassung des Systemtragverhaltens durchgeführt.



Abb. 2: Eisenbahnhochbrücke Hochdonn über den Nord-Ostsee-Kanal

Ausgangspunkt der Untersuchungen war u.a. die Frage, in welchem Maße sich das oben liegende offene Fahrbahnsystem am Lastabtrag des Fachwerk-Hauptträgers beteiligt und welche zusätzlichen Beanspruchungen in den Elementen der Fahrbahn (Querträger, Fahrbahnlängsträger, Schlingerverband) daraus resultieren. Die Tragwerke wurden mit Hilfe von räumlichen Stabwerksmodellen (ergänzt durch FEM-Detailmodelle) berechnet. Damit ist die Erfassung der Beanspruchungen zwar relativ genau möglich, allerdings sind mit der Komplexität der Berechnungsmodelle auch Unsicherheiten bei der Modellierung, z. B. Annahmen über Stabanschlusssteifigkeiten, Einfluss von Wölbbehinderung etc. zu beachten. Mit Hilfe der Messungen sollten einige wesentliche Modellierungsparameter abgesichert werden.

Aus den gemessenen Dehnungen am Obergurt und am Untergurt der Fachwerkrahmen wurden die Stabnormalkräfte berechnet. Die geringeren Druckkräfte im Obergurtstab gegenüber den höheren Zugkräften im Untergurtstab zeigen, in welchem Maße sich die Fahrbahn am Lastabtrag des Haupttragwerks beteiligt, s. Abb. 3, und den Hauptträger damit entlastet. Dem gegenüber stehen zusätzliche Beanspruchungen im Fahrbahnsystem (Querbiegung der Querträger etc.) und vor allem sehr hohe Beanspruchungen in den Kopplungselementen zwischen Haupttragwerk und Fahrbahn, die insbesondere in den Nachweisen der Restnutzungsdauer zu beachten sind.

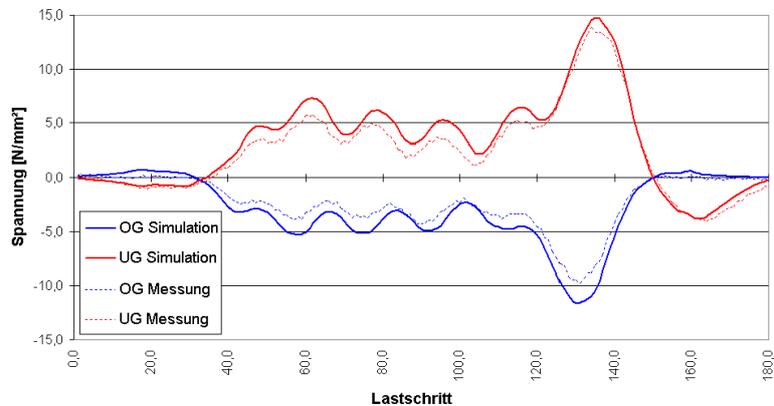


Abb. 3: Gemessene und berechnete Spannungen der (annähernd flächengleichen) Ober- und Untergurte in Feldmitte des Fachwerkträgers bei einer Zugüberfahrt

### 3. BAUWERKS-MONITORING

#### 3.1. Grundsätze / Einsatzbereich

Bauwerksmonitoring sollte – meist erweiternd zu den Systemmessungen – dann eingesetzt werden, wenn detaillierte Informationen zu Einwirkungen oder dem Lastabtrag im System über einen längeren Zeitraum erforderlich werden, z. B. wenn

- über die Zeit ein nichtlineares Tragverhalten des Bauwerks möglich ist (z. B. infolge von Temperaturabhängigkeiten, von zeitabhängigen Beanspruchungen durch Baugrundbewegungen),
- Verkehrslasten über einen längeren Zeitraum erfasst werden sollen (Erfassung der Extremwerte oder der Lastkollektive bzw. der überführten Bruttotonnage),
- Beanspruchungen infolge Windlasten für schwingungsgefährdete Bauteile erfasst werden sollen,
- Korrelationen verschiedener Einwirkungen erfasst werden sollen,
- über einen längeren Zeitraum die Mitwirkung „nichttragender“ Bauteile oder ermüdungsrelevante Nebenspannungen erfasst werden sollen, - dynamische Überhöhungen in ihrem Einfluss auf die Beanspruchungskollektive mit den Auswirkungen auf den Ermüdungsnachweis erfasst werden sollen,
- Aussagen zur Dauerhaftigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen über einen längeren Zeitraum getroffen werden sollen, z. B. Langzeitmessungen von Rissbreiten bzw. Risslängen,
- dynamische Überhöhungen bei Eisenbahnbrücken bei resonanter Anregung durch verschiedenste Züge festgestellt werden sollen,
- Beanspruchungen aus Temperatureinwirkungen erfasst werden sollen (Lateraler Versatz, Schienenspannungen).

Das Ziel der Auswertung von Dauermessungen ist die Erstellung einer bzgl. des Bauwerks bzw. Bauteils relevanten Zustandsinformation. Die Auswertung der Daten (Datenreduktion) erfolgt entweder direkt am Bauwerk oder in der Überwachungszentrale periodisch so, dass diese relevanten Zustandsinformationen zeitnah zur Verfügung stehen. Die bei

Dauermessungen anfallenden Datenmengen sind durch geeignete Auswerteverfahren auf die relevanten Daten zu reduzieren. Kenngrößen können beispielsweise folgende Werte sein:

- Extremwerte der Einwirkungen (bezogen auf einen bestimmten Zeitraum),
- Maximal- und Minimalwerte (Extremwerte) von Beanspruchungen, bezogen auf einen bestimmten Zeitraum,
- Beanspruchungskollektive (klassiert mit Hilfe des Rainflow-Verfahrens),
- Statistische Parameter (z. B. Mittelwerte und Standardabweichungen der Histogramme).

### **3.2. Beispiel Stabbogenbrücke über den Havelkanal bei Wustermark**

Brücken im Zuge von Hochgeschwindigkeits (HGV)- Strecken sind besonderen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt. Bei schnellen Überfahrten von Zügen mit regelmäßiger Achsfolge können Resonanzerscheinungen auftreten. Selbst wenn die HGV-Züge gegenüber dem Lastbild LM71 nur ca. 30 % der vertikalen Last aufweisen, können bei bestimmten kritischen Fahrgeschwindigkeiten infolge der resonanten Anregung höhere Beanspruchungen auftreten als nach Bemessung für das statische Lastbild. Weiterhin sind bei resonanter Erregung die Einflüsse auf die Ermüdung besonders zu beachten.

Die Eisenbahnüberführung im Zuge der Schnellfahrstrecke 6185 (Berlin-Hannover) über den Havelkanal bei Wustermark wurde 1998 als zweigleisige Stabbogenbrücke aus Stahl mit einer Stützweite von 86,0 m errichtet, s. Abb. 4. Die Versteifungsträger sind als Hohlkästen ausgebildet, der Oberbau ist eine feste Fahrbahn. Die maximal zulässige Geschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt beträgt 250 km/h, welche regelmäßig von den auf der Strecke verkehrenden ICE1- und ICE2-Zügen erreicht wird.



Abb. 4: Eisenbahnüberführung über den Havelkanal in Wustermark

Das Ziel der durchgeführten Messungen bestand im Wesentlichen darin, die für den dynamischen Nachweis entwickelten Berechnungsmodelle zu verifizieren. Die Frage war,

inwieweit die numerisch ermittelten Beanspruchungs-Zeit-Verläufe interessierender Bauteile (Versteifungsträger, Querträger, Hänger) der Realität entsprechen und in welchem Ausmaß und in welcher Häufigkeit Resonanzerscheinungen festgestellt werden können. Die Durchführung der Dauermessung erfolgte über einen Zeitraum von 4 Monaten. In dieser Zeit wurden ca. 7000 Überfahrten mit verschiedensten Fahrgeschwindigkeiten erfasst, vorwiegend von ICE1 und ICE2, aber auch von schweren Güterzügen. Gemessen wurden Beschleunigungen und Dehnungen von Versteifungsträger, mehreren Querträgern und Hängern. Die Identifizierung der Achsbilder und Zugtypen, der Fahrgeschwindigkeiten, der Beschleunigungen etc. erfolgte automatisiert auf Basis der Signale von Aufnehmern an den Fahrschienen.

Die Auswertung der Messungen ergab, dass bei allen gemessenen Bauteilen die maximalen Beanspruchungen unter langsam fahrenden schweren Güterzügen, d. h. ohne nennenswerte dynamische Anteile, auftraten. Am Versteifungsträger und an den gemessenen Hängern konnten bei schnell fahrenden Zügen, teilweise auch bei Güterzügen mit sehr regelmäßigen Achsfolgen (Ganzzügen), dennoch sehr deutliche Resonanzerscheinungen festgestellt werden, wobei der dynamische Anteil teilweise über dem statischen Anteil lag ( $\varphi > 2$ ). Nach Filterung der gemessenen Überfahrten über den Zugtyp kann der Geschwindigkeitsbezug der jeweiligen dynamischen Überhöhung sehr deutlich abgelesen werden, s. Abb. 5. Jeder Punkt dieses Diagramms entspricht der Überfahrt eines ICE2, die Häufung bei 200 km/h und 250 km/h ist deutlich zu erkennen. Die Geschwindigkeit 200 km/h ist mit der kritischen (Resonanz-) Geschwindigkeit dieses Zugtyps für den Versteifungsträger (mit einer Eigenfrequenz von 2,10 Hz) begründet. Bei den Hängern (mit Rechteckquerschnitt) traten vornehmlich Schwingungen um die starke Querschnittsachse auf, auch hier war nach entsprechender Filterung eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der maximalen Schwingungsamplituden feststellbar.

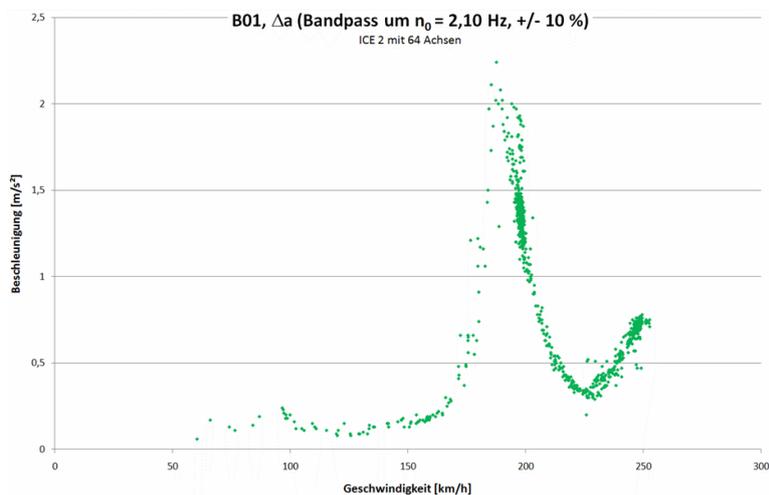


Abb. 5: Spannen der vertikalen Beschleunigungen eines Messpunktes im Viertelpunkt des Versteifungsträgers nach Bandpassfilterung um die erste Eigenfrequenz

## **4. SICHERHEITSKONZEPT IM RAHMEN DER NACHRECHNUNG**

### **4.1. Sicherheitskonzept für Bestandsbauwerke**

Von Baukonstruktionen wird eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit in der Nutzungszeit gefordert. Diese wird mit Hilfe der Versagenswahrscheinlichkeit unter Beachtung von streuenden Beanspruchungen und Widerständen begründet bzw. nachgewiesen. In den Regelwerken werden vereinfachend feste charakteristische Werte  $X_{i,k}$  definiert und durch Teilsicherheitsbeiwerte auf den Bemessungspunkt erhöht (Einwirkungen) bzw. abgemindert (Widerstände). 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 [3]. Durch Kombinationsbeiwerte  $\psi$  wird die Wahrscheinlichkeit des zeitgleichen Auftretens mehrerer zeitveränderlicher Einwirkungen berücksichtigt.

Die Richtlinie 805 zur Bewertung von Eisenbahnbrücken [1] lässt für ständige Einwirkungen unter der Voraussetzung einer genauen Mengenermittlung deutlich geringere Teilsicherheitsbeiwerte bis zu  $\gamma_f = 1,10$  zu, als es für eine Neubemessung mit  $\gamma_f = 1,35$  erforderlich wäre. Dies ist mit der Reduzierung der Unsicherheit in der Größe der Einwirkung begründet. Eine gleiche Überlegung ist auch für veränderliche Einwirkungen möglich. Bei geringeren Streuungen der Beanspruchungen sind geringere Teilsicherheitsbeiwerte gerechtfertigt. Einen Schritt in diese Richtung geht man bereits mit dem Teilsicherheitsbeiwert für vertikale Eisenbahnverkehrslasten (Neubau: 1,45; Nachrechnung: 1,30). Die Begründung des geringeren Bemessungswertes für die Nachrechnung liegt in der geringeren Streuung der zukünftigen Verkehrslasten wegen der begrenzten Nutzungszeit. Das geforderte Sicherheitsniveau bleibt trotz der Anpassung der Sicherheitselemente erhalten. Folgend wird erläutert, wie eine sicherheitsäquivalente Bewertung der Tragfähigkeit durch Integration von zusätzlichen Informationen durch Messdaten erfolgen kann.

### **4.2. Anpassung der Sicherheitselemente auf der Basis von Bauwerks-Monitoring**

Der charakteristische Wert  $E_k$  wird für Verkehrslasten i.d.R. als 98%-Quantilwert für den Bezugszeitraum von einem Jahr definiert (allerdings gibt es für bestimmte Verkehrslasten abweichende Definitionen). Der Bemessungswert  $E_d$  kann mit Hilfe probabilistischer Methoden berechnet werden [3], [4]. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist er nur vom normativen Sicherheitsindex  $\beta = 3,8$  (für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren), dem Wichtungsfaktor  $\alpha_E$  (in den Normen vereinfacht für die Einwirkungen  $\alpha_E = -0,70$ ) und der Streuung  $v$  der jeweiligen Einwirkung abhängig.

Für eine Einwirkung, die beispielsweise einer Extremwertverteilung vom Typ I unterliegt, ergibt sich der erforderliche Teilsicherheitsbeiwert zur Erhöhung des charakteristischen Wertes (als 98%-Quantilwert bezogen auf 1 Jahr) auf den Bemessungswert zu:

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

Dabei sind sowohl der Bemessungswert als auch der charakteristische Wert der Beanspruchung auf der Basis der gleichen Verteilung zu berücksichtigen, die über die Bauwerksmessung ermittelt wurde. Der Vergleich mit dem charakteristischen Wert infolge eines normativen Lastmodells ist ein separates Problem.

Die Streuung der Beanspruchung und die Streuung der Einwirkung müssen klar unterschieden werden. Die normativ definierten Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma$  setzen sich immer aus einem Faktor  $\gamma_f$  für die Streuung der Einwirkung und einem Faktor  $\gamma_{sd}$  für Unsicherheiten in den Modellannahmen zusammen, s. [5]. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Modellannahmen wird die Einwirkung zur Beanspruchung. Die gewonnenen Messwerte aus der Bauwerksmessung entsprechen meist den Beanspruchungen an einer Messstelle.

Bei mehreren zeitveränderlichen Einwirkungen ist weiterhin die Wahrscheinlichkeit deren zeitgleichen Auftretens zu beachten. Der Kombinationsbeiwert einer Einwirkung ergibt sich als Quotient aus dem Bemessungswert der Begleiteinwirkung und dem Bemessungswert bei alleiniger Wirkung zu:

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

Dabei ist wichtig, den jeweiligen Bezugszeitraum der streuenden Größen zu beachten [6]. Als Bezugszeitraum für die Begleiteinwirkung ist der kleinere Wert aus dem eigenen Grundzeitintervall oder dem nächstgrößeren Grundzeitintervall maßgebend [7].

## **Literatur**

- [1] Richtlinie 805–Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken, DB AG, 2010
- [2] Geißler, K.: Handbuch Brückenbau, Ernst & Sohn Verlag, 2013
- [3] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1987
- [4] DIN EN 1990; Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [5] Grünberg, J.: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau, Beuth Verlag, 1. Auflage 2004
- [6] Frenzel, B., Freundt, U., König, G., Mangerig, I., Merzenich, G., Novak, B., Sedlacek, G., Sukhov, D.: Bestimmung von Kombinationsbeiwerten und -regeln für Einwirkungen auf Brücken, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 715, Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, 1996
- [7] König, G.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung, Bauingenieur 57, S. 69 – 78, Springer Verlag, 1982