

Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr und andere Einwirkungen für Eisenbahnbrücken nach Eurocode

M. Hennecke, T. Mölter

Zusammenfassung Der Artikel gibt einen kurzen Überblick über die Regelungen zu den Einwirkungen auf Eisenbahnbrücken. Die Einwirkungen müssen aus den verschiedenen Teilen des Eurocode 1 zusammengestellt werden. In den einzelnen normativen Regelungen finden sich viele kleine Spezifikationen, so dass der Anwender ohne die Originaltexte keine vollständige Berechnung durchführen kann. Wesentliche Punkte in den neuen Eurocodes sind die Betrachtung der dynamischen Effekte.

Actions from Railway Traffic and other Actions for Railway Bridges according to Eurocode

Abstract This paper gives an overview of the specifications for the actions on railway bridges. These actions should be put together from the various documents of Eurocode 1. Each part of the Eurocode provides numerous detailed specifications. As a result, without the original text, the user cannot carry out a thorough calculation. A significant aspect of the new Eurocode is the manner in which it treats with dynamic action effects.

1 Einleitung

Moderne Eisenbahnbrücken müssen einem stetig vergrößerten Anforderungsspektrum genügen. Verschiedene Punkte spielen dabei eine Rolle. Ein besonderes Merkmal des Schienenverkehrs ist, dass lokale Störungen im Fahrweg in der Regel nur über das Netz aufgefangen werden können. Lokale Schäden, zum Beispiel Brückenschäden, wirken sich damit unmittelbar auf eine ganze Netzstruktur aus. Die Folgen sind Zugausfälle und Verspätungen. Hieraus stellt sich die Notwendigkeit, dass die hohe Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit eines jeden Elementes der Eisenbahninfrastruktur zu gewährleisten ist. Diese Aufgabe ist vor dem Hintergrund der Veränderung der Unternehmensstrukturen im Eisenbahnverkehr zu sehen. Ehemals sehr stark national geprägte Unternehmen, die das gesamte Spektrum des Eisenbahnverkehrs – Verkehrsweg und Betrieb – in ihrem Verantwortungsbereich hatten, werden nach dem Willen des Europäischen Rates aufgeteilt in Betriebe der Infrastruktur und der Verkehrsleistung [2]. Dem Erbringer von

Verkehrsleistung soll ein freier Zugang auf den Infrastrukturen möglich sein. In dem technischen System Eisenbahnverkehr ergeben sich damit Schnittstellen, die möglichst klar definiert sein müssen. Die Schnittstelle für Eisenbahnbrücken sind die Einwirkungen.

Die Europäische Gemeinschaft hat die Vorgaben für die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in Richtlinien für konventionelle Eisenbahnsysteme und Hochgeschwindigkeitsbahnsysteme zusammengefasst [3][4][5]. Ziel ist ein durchgehender Zugbetrieb. Diese Forderungen betreffen folgerichtig auch die Eisenbahnbrücken. Durch diese Entwicklung wird der nationale Erfahrungsbereich verlassen. Einheitliche europäische Normen sind vor diesem Hintergrund eine wichtige Grundlage. Die transeuropäischen Strecken werden über internationale Zertifizierungen abgenommen. Auf den Schienenverkehrswegen wird in den nächsten Jahren eine Zunahme des Güterverkehrs erwartet. Um die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Strecken anzupassen, ist auch eine Steigerung der Achslasten in der Diskussion. In der Weiterentwicklung der Normen wird dieser Aspekt von Bedeutung sein [1].

Die Steigerung der Reisegeschwindigkeit von Zügen – Personen- und Güterzüge – ist im Gegensatz zum Straßenverkehr eine politische Zielsetzung. In Deutschland startete der Fahrgastbetrieb mit Hochgeschwindigkeitszügen 1991 mit der Inbetriebnahme der ICE 1. Hochgeschwindigkeitsnetze sind inzwischen ein internationaler Trend. Diese Entwicklung berührt nicht nur die Fahrzeug-, Regelungstechnik und Oberbau sondern auch die Ingenieurbauwerke. Die hohen Geschwindigkeiten erfordern eine vertiefte Betrachtung dynamischer Effekte von Brückenbauwerken.

Ausgangspunkt für die Erarbeitung der Eurocodes war die Vorgabe, die Grundlagen für einen europäischen Markt für Bauprodukte zu schaffen. Die Eurocodes für die Einwirkungen auf Verkehrswegebauwerke und insbesondere für Eisenbahnbrücken schaffen jedoch einen Teil der Grundlagen für transeuropäische Eisenbahnnetze. Es werden nicht Bauprodukte über Grenzen gehandelt, sondern der Betrieb eines Verkehrsmittels über die Grenzen ermöglicht. Der Zugwechsel von Reisenden an Grenzen oder der Austausch von Zugmaterial wird in Zukunft außerhalb unseres Vorstellungsvermögen liegen.

In dem vorliegenden Artikel werden die wesentlichen Einwirkungen auf Eisenbahnbrücken in ihren Grundlagen vorgestellt. Der Anwender muss sich für die Bemessung einer Eisenbahnbrücke in den verschiedenen Teilen des Eurocode 1 orientieren. Wesentliche Inhalte sind in:

- DIN EN 1991–2 Einwirkungen auf Tragwerke
 Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
- DIN EN 1991–1–4 Eurocode1: Einwirkungen auf
 Tragwerke
 Teil 1–4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten und
 Nationaler Anhang
- DIN EN 1991–1–5 Eurocode1: Einwirkungen auf
 Tragwerke

Tristan Mölter

DB Netz AG, Zentrale
Konstruktiver Ingenieurbau (I.NVT 42)
Arbeitsgebietsleiter I.NVT 42 (L) Lärmschutz
Brückenausrüstung, Hilfsbrücken
Richelstraße 3, 80634 München
tristan.moelter@deutschebahn.com

Markus Hennecke

Zilch + Müller Ingenieure GmbH
Erika-Mann-Str. 63, 80636 München
hennecke@zm-i.de

Teil 1–5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen und Nationaler Anhang

- DIN EN 1991–1–7 Eurocode1: Einwirkungen auf Tragwerke

Teil 1–7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen und Nationaler Anhang

2 Rückblick

Zu Zeiten der nationalen Bahnen mit hoheitlichen Rechten waren technischen Grundlagen in unternehmensinternen Richtlinien festgelegt. Die Deutsche Bundesbahn hat ihre Regelungen unter anderem in der DS 804, Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, veröffentlicht.

Mit der Einführung der europäischen Vornormen im Brückenbau und der Veröffentlichung der DIN Fachberichte konnten diese Regelungen reduziert werden. Viele Regelungen der internen Vorschriften tauchten in den DIN Fachberichten auf. Mit der Neuordnung des Eisenbahnwesens obliegt heute dem Eisenbahnbundesamt (EBA) die Bauaufsicht für Betriebsanlagen des Bundes. In dieser Funktion veröffentlicht das EBA die Eisenbahnspezifische Liste der Technischen Baubestimmungen (ELTB) [6]. Sie basiert auf der Musterliste der Technischen Baubestimmungen des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) und ist somit vergleichbar mit den eingeführten Technischen Baubestimmungen der Länder. Analog zu diesen finden sich auch in der ELTB Bestimmungen, Regelungen und Hinweise, die in der Musterliste der Technischen Baubestimmungen nicht enthalten sind. Für die technische Bearbeitung einer Eisenbahnbrücke ist die Kenntnis der ELTB notwendig. Da die ELTB öfter überarbeitet wird als die Normen, können über diesen Weg technische Neuerungen schneller umgesetzt werden als über die Normen. Einige Regelungen, die in DIN EN 1991–2 [8] gegenüber DIN Fachbericht 101 [7] neu sind, sind bereits über die ELTB eingeführt.

3 Ständige Einwirkungen

Für den Hochbau sind Eigengewichtslasten in der DIN EN 1991–1–1 [10] geregelt. In der Norm ist vermerkt, dass für den Brückenbau im nationalen Anhang Regelungen aufgenommen werden sollen. An der Stelle finden sich jedoch keine ausreichenden Angaben für den Eisenbahnbrückenbau, da zum einen Sonderbauteile (Oberleitung, Signale,...) vorhanden sind und zum anderen Elemente (z.B. Schotteroberbau), für die es aufwendig ist, aus verschiedenen Quellen, die Lasten zusammenzustellen. Der DIN Fachbericht 101 stellt im Anhang M eine hilfreiche Aufstellung für charakteristische Lasten des Regelschotteroberbaus. Lastangaben für die Oberleitung sind in der Richtlinie 804.2101 – Einwirkungen zu finden.

4 Veränderliche Einwirkungen

Die Einwirkungen aus Verkehr auf Eisenbahnbrücken sind in Deutschland erstmals mit Einführung des DIN Fachberichts 101 im Jahr 2005 in einer von den Normenausschüssen des Deutschen Instituts für Normung bearbeiteten Norm erschienen. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die Regelungen in den unternehmensinternen Richtlinien der Deutschen Bundesbahn bzw. der Deutschen Bahn veröffentlicht.

In DIN EN 1991–2 werden die Einwirkungen für Normal- und Breitspurbahnen der europäischen Hauptstrecken aufgeführt. Dies sind die Lasten für die allgemein als Vollbahnen bezeichneten Eisenbahnverkehre. Einwirkungen für Schmalspurbahnen, Straßenbahnen, Museumsbahnen, Zahnradbahnen und Standseilbahnen sind nicht gegeben. Für diese Bahnen werden typischerweise projektspezifische Angaben gemacht.

4.1 Vertikale Einwirkungen für die statische Berechnung

Für die Regelbemessung sind vier Lastmodelle definiert:

- **LM 71** stellt den Regelverkehr dar. Das Lastmodell LM 71 wurde ab Mitte der 1950'er Jahre vom Union International des Chemins de Fer (UIC) entwickelt auf der Basis der verschiedenen Betriebslastenzüge der nationalen Bahnen. Zum damaligen Zeitpunkt waren lokgezogene Züge auch im Personenverkehr die Regel. In der DS 804 hieß das Lastmodell UIC 71. Das Lastmodell wird entsprechend der für den Bemessungspunkt relevanten Einflusslinie auf dem Bauwerk aufgeteilt.
- **SW/0** ergänzt das Lastmodell LM 71 für Durchlaufträger, da diese bei der Entwicklung des Lastmodells UIC 71 nicht betrachtet wurden. Das Lastmodell SW/0 wird immer ungeteilt angesetzt.
- **SW/2** wird auf Strecken mit Schwerlastverkehr eingesetzt. Es unterscheidet sich zum Lastmodell SW/0 in den Lastordinaten und den geometrischen Abmessungen.
- Für Nachweise der Gesamtstabilität gibt es das Lastmodell „unbelasteter Zug“. Es ist eine gleichmäßig verteilte Last von $q = 10$ [kN/m] anzusetzen.

Die Einwirkungen aus dem Zugverkehr sind auch bei Geradeausfahrt nicht gleichmäßig auf beide Schienen verteilt. In der Draufsicht schlingert der Zug um die Gleisachse. Der Verlauf kann mit einer Sinuswelle beschrieben werden. Zur Vereinfachung werden die vertikalen Einwirkungen mit einer Exzentrizität durch ein Verhältnis der beiden Radlasten aller Achsen von 1,25 auf die Gleisachse angesetzt. Die Exzentrizität wird bei den Lastmodellen LM 71 und SW/0 berücksichtigt.

Für Strecken mit einem gegenüber dem Regelverkehr schweren oder leichteren Verkehr ist ein Lastklassenbeiwert α benannt. Zur Wahl stehen folgende Werte:

0,75 – 0,85 – 0,91 – 1,00 – 1,10 – 1,21 – 1,33 – 1,46.

Die Lastklassenbeiwerte α dienen dazu, auch für einen zukünftigen Anstieg der Achslasten nachhaltig zu bauen, da das Lastmodell LM 71 keine Reserven mehr hat. Im Nationalen Anhang ist festgelegt, dass für Ingenieurbauwerke auf Strecken der Eisenbahn des Bundes der Lastklassenbeiwert $\alpha = 1,21$ anzuwenden ist. Bei reinen Schnellbahnverkehren (S-Bahnen) kann $\alpha = 0,8$ gewählt werden. Im Bauzustand kann $\alpha = 1,0$ angesetzt werden, wenn der Schwerverkehr ausgeschlossen ist.

Im Gegensatz zu den Lastmodellen für den Straßenverkehr ist beim Eisenbahnverkehr ein Schwingbeiwert anzusetzen. Für die statische Berechnung der Brückentragwerke sind hierzu die statischen Lastmodelle (LM 71, SW/0 und SW/2) mit einem dynamischen Beiwert zu multiplizieren. Mit dem dynamischen Beiwert werden die Erhöhungen der Spannungen und Verformungen erfasst. Resonanzerscheinungen und übermäßige Schwingungen können mit dem Ansatz nicht untersucht werden. Die dynamischen Beiwerte sind

auch nur Brücken anwendbar, deren Eigenfrequenzen in einem spannenweitenabhängigen Spektrum liegen. Gemäß Nationalem Anhang ist ein sorgfältig unterhaltenes Gleis anzunehmen.

Sorgfältig unterhaltenes Gleis

$$1,0 \leq \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82 \leq 1,67$$

Gleise mit normaler Unterhaltung

$$1,0 \leq \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73 \leq 2,0$$

Die maßgebende Länge L_Φ ist abhängig von den nachzuweisenden Bauteilen. Im Nationalen Anhang ist eine umfangreiche Tabelle vorhanden, in der verschiedene Systeme beschrieben sind.

Für überschüttete Tragwerke ist ein reduzierter dynamischer Beiwert definiert. In den Nachweisen der Unterbauten und Gründung entfällt der dynamische Beiwert, wenn ein bestimmter Schlankheitsgrad nicht überschritten wird.

Im Eisenbahnbrückenbau sind die Beiwert unterschiedlich zu beachten. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die Anwendung der verschiedenen Faktoren bei einzelnen Lastmodellen bzw. Lastsituationen. Der rote Schalter markiert die jeweilige Anwendung des Faktors.

4.2 Vertikale Einwirkungen für die dynamischen Berechnungen

Im Hochgeschwindigkeitsverkehr hat es sich als notwendig erwiesen, für bestimmte Brücken dynamische Berechnungen durchzuführen. Mit den dynamischen Berechnungen werden folgende Effekte untersucht:

- Schnelle Belastungswechsel, welche aus Komfortgründen und wegen möglicher Instabilität des Schotterbettes ausgeschlossen sein müssen,
- Resonanzerscheinungen, die auftreten, wenn viele Achsen im gleichen Abstand über ein Tragwerk rollen und die Frequenz des Lastauftrags in der Nähe einer Eigenfrequenz des Überbaus liegt.

Zur Überprüfung der Notwendigkeit einer dynamischen Berechnung ist in DIN EN 1991-2 ein Ablaufdiagramm dargestellt. Mit dem Ablaufdiagramm wird entschieden, ob eine dynamische Berechnung erforderlich ist und wenn dies der Fall ist, ob die Torsion und die Biegung untersucht werden müssen.

Die Aussage des Ablaufdiagramms kann vereinfacht zusammengefasst werden. Eine dynamische Untersuchung entfällt bei Geschwindigkeiten $v \leq 200$ [km/h] auf

Durchlaufträgerbrücken und bei Einfeldträgerbrücken mit $L \geq 40$ [m], wenn das Eigenfrequenzkriterium eingehalten ist. In allen weiteren Fällen ist eine differenzierte Betrachtung der Eigenfrequenzen der Eigenformen der Torsion und der Biegung notwendig. **Bild 1** gibt die Grenzwerte der ersten Eigenfrequenz an.

Die dynamische Berechnung wird prinzipiell mit den charakteristischen Lasten der Betriebszüge (BZ) geführt. Die Betriebszüge werden festgelegt anhand der zugelassen Zugtypen. Um diese Abhängigkeit von den Betriebsangaben zu entschärfen, werden für die dynamische Berechnung in DIN EN 1991-2 die Lastmodelle HSLM-A und HSLM-B. bereitgestellt

Tabelle 1. Zusammenstellung der anzusetzenden Lastfaktoren
Table 1. Collection of the required safety factors

	Lastklassenbeiwert α	Schwingbeiwert Φ	Exzentrizität	Faktor f
Vertikallasten	LM 71	■	■	■
	SW/0	■	■	■
	SW/2		■	
	HSLM Betriebszüge (BZ)			
	Züge der Ermüdungsberechnung „unbelasteter Zug“			
	Erdbauwerke/Erddrücke	■		
	Entgleisungslasten	■		
Horizontallasten	Seitenstoß	■		
	Bremsen/Anfahren	■		
	Fliehkräfte	■		■
	Zentrifugalkräfte	■		
Schienenspannung (Tragwerk – Oberbau – Interaktion)		■		

Die obere Grenze von n_0 wird durch den dynamischen Zuwachs aufgrund von Gleislagefehlern bestimmt und lautet:

$$n_0 = 94,76L^{-0,748} \quad (6.1)$$

Die untere Grenze für n_0 wird durch dynamische Anregungskriterien bestimmt und lautet:

$$n_0 = 80/L$$

für $4m \leq L \leq 20m$

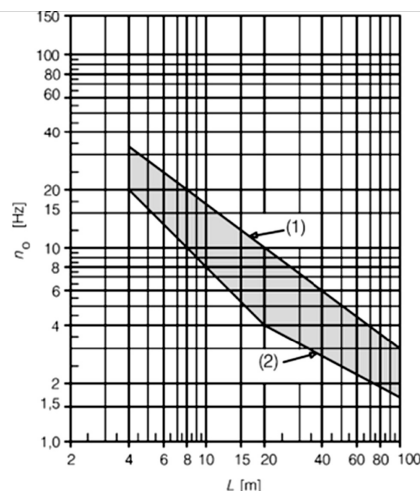
$$n_0 = 23,58L^{-0,592}$$

für $20m < L \leq 100m$ (6.2)

Dabei ist

n_0 die erste Eigenfrequenz der Brücke unter ständigen Lasten;

L die Spannweite für Einfeldträgerbrücken oder L_Φ für andere Brückentypen.



Legende

- (1) obere Grenze der Eigenfrequenz
- (2) untere Grenze der Eigenfrequenz

Bild 1. Grenzwerte der ersten Eigenfrequenz
Fig. 1. Limits of the natural frequency

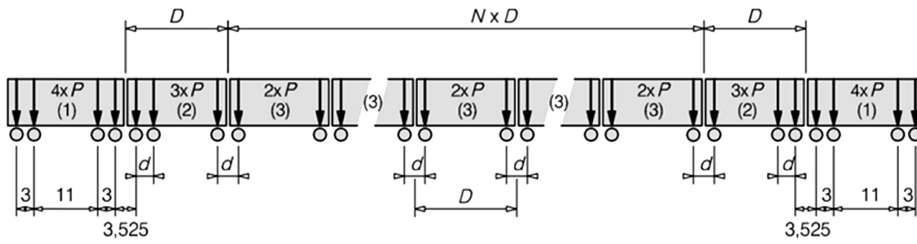


Bild 2. Lastbild HSLM-A
Fig. 2. Load Model HSLM-A

Tabelle 2. Parameterzusammenstellung für Lastmodell HSLM-A
Table 2. Collection of the parameters for Load Model HSLM-A

Modellzug	Anzahl der Mittelwagen <i>N</i>	Wagenlänge <i>D</i> [m]	Drehgestell- achsenabstand <i>d</i> [m]	Einzellast <i>P</i> [kN]
A1	18	18	2,0	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	20	2,0	180
A4	15	21	3,0	190
A5	14	22	2,0	170
A6	13	23	2,0	180
A7	13	24	2,0	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2,0	210
A10	11	27	2,0	210

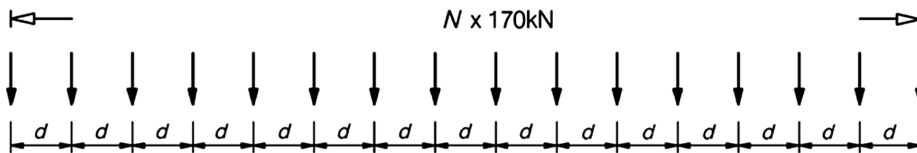


Bild 3. Lastbild für HSLM-B
Fig. 3. Load Model HSLM-B

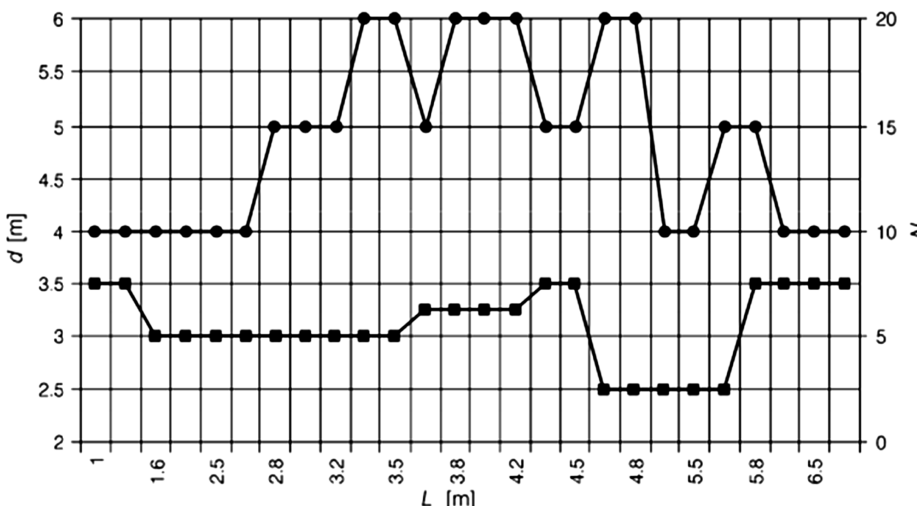


Bild 4. Parameter für Lastmodell HSLM-B
Fig. 4. Parameters of Load Model HSLM-B

Diese Lastmodelle sind stark parametrisiert, um alle möglichen Erregerfrequenzen mit den verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen generieren zu können.

HSLM-A besteht aus 10 Modellzügen mit unterschiedlichen Wagenlängen, Drehgestellabständen und Einzellasten (Lastbild **Bild 2**, Lastzusammenstellung **Tabelle 2**).

HSLM-B ist eine Reihe mit äquidistanten Abständen von Einzellasten $P = 170$ [kN], deren Anzahl und Abstand variiert in Abhängigkeit von der Spannweite. Für die Berechnung eines konkreten Bauwerks ergibt sich ein Lastmodell. Das Anwendungsgebiet ist die Einfeldträgerbrücke mit $L \leq 7$ [m]. Bei diesen Brücken ergibt sich die Erregerfrequenz aus der einzelnen Radlast. Bei längeren Brücken werden die Lasten und Abstände der Drehgestelle relevant (Lastbild **Bild 3**, Parameter **Bild 4**).

Sollte die dynamische Berechnung von Brücken mit einer Streckengeschwindigkeit $v \leq 200$ [km/h] erforderlich sein, sind die Betriebszüge und die Zugtypen des Anhangs D der DIN EN 1991-2 anzusetzen.

Die dynamischen Berechnungen sind zu führen für das Geschwindigkeitsspektrum 40 [m/s] $\leq v_i \leq$ Entwurfsgeschwindigkeit

Die Entwurfsgeschwindigkeit ist das 1,2-fache der örtlich zulässigen Geschwindigkeit.

Die Güte der Ergebnisse der dynamischen Berechnung ist abhängig von verschiedenen Parametern:

- Dämpfung des Tragwerks
- Masse des Tragwerks
- Steifigkeit.

DIN EN 1991-2 gibt zu diesen Parametern detaillierte Angaben.

Die Grenzzustände nach DIN 1992-2 inklusive der Ermüdung sind zu führen für:

$$(1 + \varphi'_{dyn} + \varphi''/2) \times \begin{pmatrix} \text{HSLM} \\ \text{oder} \\ \text{BZ} \end{pmatrix}$$

oder $\emptyset \times$ (LM71+“SW/0 mit:

φ_{dyn} dynamische Überhöhung aus der dynamischen Berechnung
 $\varphi''/2$ Zuwachs der dynamischen Lastauswirkungen resultierend aus Gleisstörungen und Fahrzeugunregelmäßigkeiten

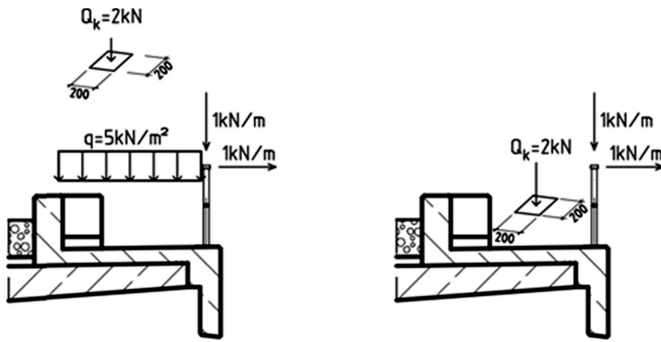


Bild 5. Einwirkungen auf Dienstwegen
Fig. 5. Actions on service walkways

Grundsätzlich ist in jedem Fall eine statische Berechnung mit den Lastmodellen LM71 sowie SW/0 und SW/2 zu führen. Die Ergebnisse der dynamischen Berechnung müssen mit denen der statischen Berechnung abgeglichen werden. Für die Bemessung sind die maßgebenden Schnittgrößen heranzuziehen.

4.3 Dienstwege

Dienstwege dienen ausschließlich den betrieblichen Belangen. Auf den Dienstwegen sind die Einwirkungen gemäß Bild 5 anzusetzen.

5 Horizontale Einwirkungen

5.1 Fliehkräfte

In Kurvenfahrten wirken Fliehkräfte, die den Zug radial nach außen beschleunigen. Die Kräfte greifen im Schwerpunkt des Zuges an. Sie sind abhängig von der Trassierung, der Zuggeschwindigkeit und der Masse des Zuges. Da konkrete Zugmassen für die Bemessung nicht vorliegen, werden die Fliehkräfte aus den vertikalen Lastmodellen, LM 71, SW/0 und SW/2 berechnet

Charakteristische Werte der Fliehkräfte:

$$Q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times Q_{vk}) = \frac{V^2}{127r} (f \times Q_{vk})$$

$$q_{tk} = \frac{v^2}{g \times r} (f \times q_{vk}) = \frac{V^2}{127r} (f \times q_{vk})$$

Mit

v [m/s]; V [km/h] örtlich zulässige Geschwindigkeit
 r Radius im Gleisbogen

Im Hochgeschwindigkeitsverkehr fahren Zuggattungen, die geringere Massen haben, als die Betriebszüge, die den vertikalen Lastmodellen als Grundlage dienen. Dies wird bei der Berechnung der Fliehkräfte durch einen Abminderungsfaktor berücksichtigt.

$$0,35 \leq f = \left[1 - \frac{V - 120}{1000} \left(\frac{814}{V} + 1,75 \right) \left(1 - \sqrt{\frac{2,88}{L_f}} \right) \right] \leq 1$$

Durch den Abminderungsfaktor f werden auf Strecken mit hohen Geschwindigkeiten die Fliehkräfte stark abgemindert (Bild 6). Damit dadurch die Kräfte für Schwerverkehre mit geringeren Geschwindigkeiten, der im

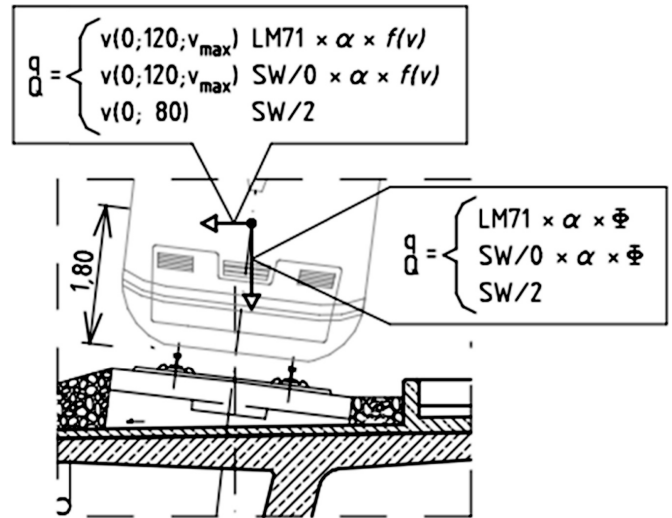


Bild 6. Fliehkräfte
Fig. 6. Centrifugal force

Mischverkehr auch auf diesen Stecken fährt, nicht unterschätzt werden, wird zusätzlich die Geschwindigkeit $V = 120$ [km/h] betrachtet.

5.2 Seitenstoß

Aus der Schlingerfahrt des Zuges über die Gleise resultieren horizontale Kräfte auf die Schienenköpfe. Im Brückenbau werden diese Schlingerkräfte als Seitenstoß bezeichnet. Da der Seitenstoß aus dem Fahrbetrieb resultiert, ist er immer mit den vertikalen Lastmodellen zu kombinieren.

$$Q_{sk} = 100 \text{ [KN]}$$

5.3 Anfahren – und Bremsen

Anfahr- und Bremskräfte sind eine bedeutende Einwirkung auf Eisenbahnbrücken, insbesondere für Lager und Unterbauten. Die Kräfte werden ermittelt aus den vertikalen Lastmodellen (Tabelle 3).

Für die Lastmodelle LM 71 und HSLM ist $l_{a,b}$ die Einflusslänge und für SW/0 und SW/2 die Länge des Lastmodells. Für Einflusslängen größer 300 m sind gesonderte Festlegungen notwendig. Bei Schienen, die über die Überbauten entweder an einem oder an beiden Widerlagern hinausgehen (durchgehend geschweißte oder gelaschte Schienen), wirken Schiene und Überbau gemeinsam zum Abtragen der Beschleunigungskräfte. Zur Bestimmung der Reaktionskräfte am Überbau, insbesondere an den Lagern, sind die gemeinsame Antwort Tragwerk und Gleis zu berechnen. Im Nationalen Anhang ist ergänzt, dass dieser Nachweis bei zwei- und mehrgleisigen Brücken auch für den Fall zu untersuchen ist, dass nur ein Gleis über die Widerlager durchgängig ist.

In Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen sind bei mehrgleisigen Überbauten verschiedene Kombinationen der Anfahr- und Bremskräfte zu betrachten (Tabelle 4).

Tabelle 3. Berechnung der Anfahr- und Bremslasten für die verschiedenen Lastmodelle
Table 3. Calculation of the traction and braking forces of the different load models

	LM 71	SW/0	HSLM	SW/2
Anfahren	$Q_{lak} = 33[\text{kN/m}]L_{a,b}[\text{m}] \leq 1.000[\text{kN}]$			
Bremsen	$Q_{lbk} = 20[\text{kN/m}]L_{a,b}[\text{m}] \leq 6.000[\text{kN}]$		$Q_{lbk} = 35[\text{kN/m}]L_{a,b}[\text{m}]$	

Tabelle 4. Zusammenstellung der Kombinationsbeiwert für mehrgleisige Brücken
 Table 4. Collection of the combinations factors for multi-rail bridges

Belastungsbilder	Bremsen Bremsen (SW/2)	Anfahren
	1,0	
	0,5	
	1,0	1,0
		1,0
		0,5

kungen. Um einen Schienenbruch zu vermeiden, steht dem Brückenbau nur ein gewisser freier Normalspannungsanteil zur Verfügung, der nachgewiesen werden muss.

Die zulässigen Normalspannungen für einen Schotteroberbau sind:

Druckspannungen 72 [N/mm²]

Zugspannungen 82 [N/mm²]

Für die rechnerischen Nachweise stehen in DIN EN 1992-2 nicht nur die Einwirkungen zur Verfügung, sondern auch die Parameter für die statische Berechnung.

Die Einwirkungen sind:

- Anfahr- und Bremskräfte
- Thermische Auswirkungen (DIN EN 1992-1-5) beim gemeinsamen Tragwerks- und Gleissystem (ΔT_N mit $\gamma, \Psi = 1,0$); vereinfacht kann $\Delta T = \pm 35$ [K] gesetzt werden
- Verformungen aus klassifizierten vertikalen Verkehrslasten (LM71, SW/0, SW/2)
- Verformungen aus Kriechen, Schwinden, Temperaturgradient

Der Lastabtrag über Schiene und Überbau erfolgt nach Bild 7.

6 Interaktion Überbau – Gleis

Zwischen Oberbau und Überbau werden Kräfte übertragen. Im Schotteroberbau geschieht dies über Reibungskräfte zwischen dem Schotter und der Betonoberfläche und bei der Festen Fahrbahn über Schubnocken zwischen dem Schutzbeton und den Tragplatten der Festen Fahrbahn. Infolge dieser Verbindungen verursachen unterschiedliche Verformungswege der Schienen und des Überbaus aus Temperaturunterschieden, Kriechen oder Schwinden Spannungen in den Schienen und Lagerreaktionskräfte. Brems- und Anfahrkräfte verteilen sich gemäß den Steifigkeitsverhältnissen auf Schiene und Überbau. Auch lokal begrenzte Verformungsunterschiede, die zum Beispiel am Überbauende aus dem Endtangentialdrehwinkel des Überbaus auftreten, ergeben Spannungen in den Schienen.

Schienen werden aus hochfesten Stählen hergestellt. Im Wesentlichen erfahren sie aus dem Zugbetrieb dynamische Belastungen. Die Unterspannung der Schiene wird beeinflusst durch Temperatur- und Eigenspannungen in der Schiene. Auf Brücken addieren sich die bereits benannten Einwirkungen.

In DIN EN 1992-2 und dem Nationalen Anhang finden sich umfangreiche Hinweise zur Berechnung und zu Grenzwerten. Angaben beinhalten nicht nur Einwirkungen, sondern auch Berechnungsgrundlagen und Annahmen für die statische Modellbildung. Dies geht über den üblichen Umfang einer Norm über Einwirkungen hinaus.

Bei der Festen Fahrbahn sind weitere Regelungen und Grenzwerte zu beachten. Angaben hierzu finden sich in den Richtlinien der DB Netz AG.

7 Ermüdung

Ermüdungsnachweise habe wegen den hohen Verkehrslasten, beschrieben über die Jahrestonnage, eine große Bedeutung im Eisenbahnbrückenbau. In der Regel wird der Ermüdungsnachweise über die Spannungsschwingbreite infolge $\Phi \cdot LM 71$ geführt. Zur Bestimmung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite enthält DIN EN 1992-2 im Anhang NN die erforderlichen Informationen.

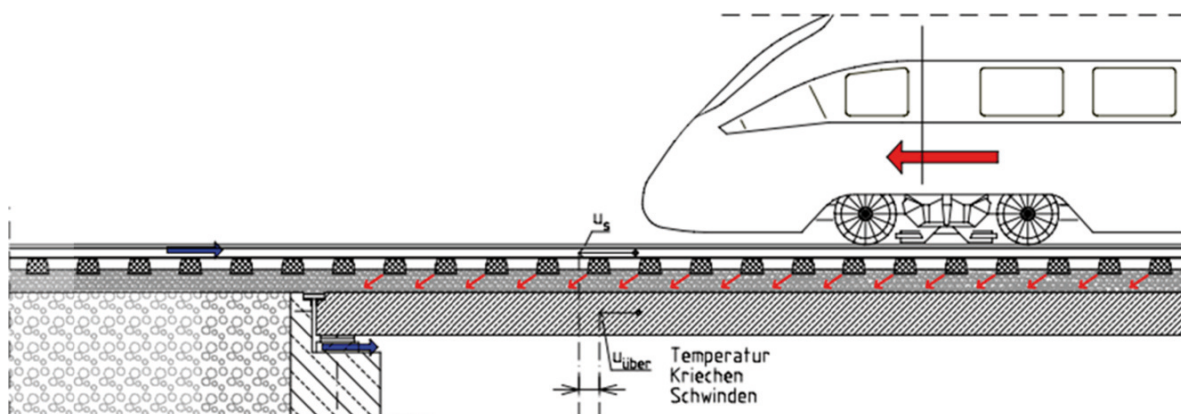


Bild 7. Lastabtrag über Schiene und Überbau
 Fig. 7. Force transfer from rails and structure

Tabelle 5. Zusammenstellung der geometrischen Anordnung der Lastmodelle auf Brücken
 Table 5. Geometrical classification of load models on bridges

	1 Gleis	2 Gleise	n Gleise	
LM 71	1	1 oder 2	1 oder 2	n x 0,75
SW/0	1	1 oder 2	1 oder 2	n x 0,75
SW/2	1	1 + (LM71 oder SW/0)	1 + (LM71 oder SW/0)	1+0,75 x (LM71 oder SW/0)
Unbeladener Zug	1	Nicht relevant		

524

Anzahl der Gleise auf Bauwerk			Lastgruppen			Vertikalkräfte			Horizontalkräfte			Bemerkungen
						6.3.2/6.3.3	6.3.3	6.3.4	6.5.3	6.5.1	6.5.2	
1	2	≥ 3	Anzahl belastete Gleise	Lastgruppe ^h	belastetes Gleis	LM 71 ^a SW/0 ^{a,b} HSLM ^{f,g}	SW/2 ^{a,c}	Unbeladener Zug	Anfahren, Bremsen ^a	Fliehkraft ^a	Seitenstoß ^a	
[Diagramm: 1 Gleis]	[Diagramm: 2 Gleise]	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	1	gr11	T ₁	1			1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e	Max. vertikal 1 mit max. längs
			1	gr12	T ₁	1			0,5 ^e	1 ^e	1 ^e	Max. vertikal 2 mit max. quer
			1	gr13	T ₁	1 ^d			1	0,5 ^e	0,5 ^e	Max. längs
			1	gr14	T ₁	1 ^d			0,5 ^e	1	1	Max. quer
		1	gr15	T ₁			1		1 ^e	1 ^e	Seitenstabilität mit „unbeladenem Zug“	
		1	gr16	T ₁			1		1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e	SW/2 mit max. längs
		1	gr17	T ₁			1		0,5 ^e	1 ^e	1 ^e	SW/2 mit max. quer
		2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1			1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e	Max. vertikal 1 mit max. längs
	T ₂				1		1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e			
		2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1			0,5 ^e	1 ^e	1 ^e	Max. vertikal 2 mit max. quer
	T ₂				1		0,5 ^e	1 ^e	1 ^e			
		2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1 ^d			1	0,5 ^e	0,5 ^e	Max. längs
	T ₂				1 ^d		0,5 ^e	1	1			
		2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1 ^d			0,5 ^e	1	1	Max. quer
	T ₂				1 ^d		0,5 ^e	1	1			
		2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1			1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e	SW/2 mit max. längs
T ₂				1		1 ^e	0,5 ^e	0,5 ^e				
	2	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	T ₁		1		1	0,5 ^e	1 ^e	1 ^e	SW/2 mit max. quer	
T ₂				1		0,5 ^e	1 ^e	1 ^e				
	≥ 3	[Diagramm: ≥ 3 Gleise]	gr31	T ₁		0,75			0,75 ^e	0,75 ^e	0,75 ^e	zusätzlicher Lastfall

Bild 8. Ausschnitt der Tabelle der Lastgruppen in Din EN 1991-2
 Fig. 8. Part of the table specifying the load groups in the standard DIN EN 1991-2

Für die Ermüdungsnachweise sind drei Verkehrszusammenstellungen definiert:

- Regelverkehr
- Schwerverkehr mit 25t Achse
- Nahverkehr.

Die Verkehre unterscheiden sich in ihrer unterschiedlichen Zugzusammensetzung, die in DIN EN 1991-2 Anhang D beschrieben ist. Die Jahrestonnage auf jedem Gleis der Brücke ist für alle Zusammensetzungen nahezu gleich und beträgt $25 \cdot 10^6$ Tonnen.

8 Anwendung der Verkehrslasten auf Eisenbahnbrücken

Die Eisenbahnverkehrslasten sind in allen geometrisch möglichen Gleislagen nach **Tabelle 5** auf den Brücken anzuordnen.

Die Einwirkungen aus Eisenbahnverkehr setzen sich wie aufgezeigt aus mehrteiligen Einwirkungen zusammen. Diese mehrteiligen Einwirkungen werden für die weitere Bemessung in Lastgruppen nach **Bild 8** zusammengefügt, die für die weiteren Nachweise als einzelne veränderliche cha-

rakteristische Einwirkung angesehen werden kann. Den Lastgruppendefinitionen liegt eine empirische Abschätzung zugrunde, mit der das gleichzeitige Auftreten verschiedener Einwirkungen abgeschätzt wird. Die Lastgruppen sind jeweils auf die Maximierung einer Wirkungsrichtung der Kraft maximiert.

9 Außergewöhnliche Einwirkungen

Außergewöhnliche Bemessungssituationen infolge Eisenbahnverkehrslasten können in Gruppen unterteilt werden.

1. Entgleisen auf Brücken
 2. Anprall auf stützende Konstruktion infolge Entgleisen auf einer unterführten Eisenbahnstrecke
- Die Lastansätze für Entgleisen sind in DIN EN 1991-2 aufgeführt. Es wird unterschieden in zwei Fälle:
- Bemessungssituation I: Entgleistes Fahrzeug wird durch benachbarte Schienen oder dem Randbalken auf dem Überbau zurückgehalten
 - Bemessungssituation II: Entgleistes Fahrzeug „balanciert“ auf der Kante des Überbaus.

Tabelle 6. Lastmodelle für das Entgleisen von Zügen
Table 6. Load Modell for Derail of Trains

Bemessungssituation I	Bemessungssituation II
Q_{A1d} und q_{A1d} infolge $\alpha \times 1,4 \times \text{LM71}$	q_{A1d} infolge $\alpha \times 1,4 \times \text{LM71}$ mit $L = 20,0[\text{m}]$

Für die Züge wird das vertikale Lastmodell LM71 nach **Tabelle 6** angesetzt:

Für Eisenbahnbrücken über Straßen gelten die Anpralllasten infolge Straßenverkehrs. Für den Fall, dass eine Eisenbahnbrücke über eine Eisenbahnstrecke geführt wird, sind die Anpralllasten aus Eisenbahnfahrzeugen zu beachten. Diese sind in DIN EN 1991-1-7 geregelt.

10 Wind

Windeinwirkungen auf Brücken sind in DIN EN 1991-1-4 geregelt. Die Regelungen sind umfassender als die bisher vertrauten, insbesondere gegenüber DIN1072. Eine vergleichbar einfache Handhabung ermöglicht der Anhang N.2 des Nationalen Anhangs zu DIN EN 1991-1-4. Hier sind die Tabellen aus dem DIN Fachbericht 101 übernommen. Die neue Norm bietet die Möglichkeit in besonderen Fällen detaillierter vorzugehen.

11 Aerodynamische Einwirkungen aus dem Zugverkehr

Aerodynamische Einwirkungen aus dem Zugbetrieb sind bei der Bemessung von Bauten neben Eisenbahngleisen zu berücksichtigen. Infolge der Vorbeifahrt eines Zuges trifft am Zugkopf und am Zugende jeweils eine Druck- Sogwelle auf. Diese ist abhängig im Wesentlichen von der Geschwindigkeit des Zuges und dem Abstand des Bauwerks von der Gleisachse. Weitere Faktoren sind die aerodynamischen Eigenschaften des Zuges, die Form des Bauwerks. Insbesondere durch die hohen Geschwindigkeiten im Personenfernverkehr stellt sich der Bedarf dar, die Beschreibung dieser Einwirkungen weiter zu entwickeln. Dieses betrifft insbesondere die Lärmschutzwände, da diese an der freien Strecke stehen, die auch mit den hohen Geschwindigkeiten befahren werden und sehr nahe zum Gleis angeordnet sind. Durch die aerodynamischen Einwirkungen können die Lärmschutzwände durch ihre Reaktionen die Einwirkungen dynamisch erhöhen. Im Modul 804.5501 ist ein Verfahren aufgeführt, mit denen aus den quasi-statischen Ersatzlasten des DIN Fachberichts, die den Einwirkungen der DIN EN 1991-2 entsprechen, die Einwirkungen generiert werden zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte.

12 Schnee

DIN EN 1991-1-3 enthält keine Angaben über Schnee auf Brücken. Für den Eisenbahnbrückenbau sind Schneelasten in den überwiegenden Fällen nicht bemessungsrelevant. Ausnahmen können Bauzustände sein. Hier ist der Tragwerksplaner aufgefordert, eine sinnvolle Annahme auf der Basis der vorliegenden Normen zu treffen.

13 Fazit

Die stetig steigenden Anforderungen an die Verkehrsinfrastruktur erfordern Anpassungen auch in den Normen. Die wesentlichen Herausforderungen an Eisenbahnbrücken er-

geben sich aus höheren Reisegeschwindigkeiten. Die Folge sind schnelle Belastungswechsel und Resonanzerscheinungen, die sich negativ auf den Fahrkomfort, die Betriebssicherheit und die Standsicherheit auswirken können. Hierdurch stellt sich die Notwendigkeit von dynamischen Berechnungen mit wirklichkeitsnäheren Lastmodellen. Das traditionelle Modell der statischen Berechnung mit Schwingbeiwerten genügt nicht. Für diese erweiterten Aufgaben in den Festigkeitsnachweisen der Brücken gibt die DIN EN 1991-2 Angaben nicht nur zur Einwirkungen sondern auch zur Modellbildung.

Weitere detaillierte Spezifikationen gibt es für die Frage der Tragwerk-Oberbau-Interaktion. Das schadloze Zusammenwirken des Oberbaus mit dem Überbau ist eine wichtige Voraussetzung für die Betriebssicherheit. Je anspruchsvoller die Anforderungen an den Fahrweg werden, desto genauer müssen diese Fragen behandelt werden.

Eine grundlegende politische Zielsetzung für die europäische Normung war die Schaffung eines gemeinsamen Marktes für Bauprodukte. Bei den Eisenbahnbrücken steht jedoch nicht der freie Warenverkehr der Brücken im Vordergrund, sondern der freie Eisenbahnverkehr über die nationalen Grenzen hinweg. Für die transeuropäischen Strecken ist eine gleiche Leistungsfähigkeit der Infrastruktur ohne nationale Einschränkungen dringend notwendig. DIN EN 1991-2 stellt die technischen Grundlagen zur Verfügung. Mit diesem Prozess hat Deutschland vor über 100 Jahren seine Erfahrungen sammeln können, als die Bahnen der Länder in eine Reichsbahn überführt wurden.

Literatur

- [1] *Freystein, H.*: Entwicklungen und Tendenzen im Eisenbahnbrückenbau, in: Der Prüfmgenieur, Bundesvereinigung der Prüfmgenieure. April 2011
- [2] Rat der Europäischen Gemeinschaften: Richtlinie 91/440/EWG vom 29.07.1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft
- [3] Richtlinie 2008/57/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft, 17.06.2008
- [4] Richtlinie 96/48/EG des Rates über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems, 23.06.1996, zuletzt geändert durch Richtlinie 2007/32/EG vom 1.06.2007
- [5] Richtlinie 2001/16/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des konventionellen Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft, 19.03.2001, zuletzt geändert durch Richtlinie 2007/32/EG vom 1.06.2007
- [6] Eisenbahnbundesamt. Eisenbahnspezifische Liste der Technischen Baubestimmungen (ELTB). Januar 2012
- [7] DIN Fachbericht 101. Einwirkungen auf Brücken
- [8] DIN EN 1991-2 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken

- [9] DIN EN 1991-2/NA Nationaler Anhang – Nationale festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
- [10] DIN EN 1991-1-1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewichte und Nutzlasten im Hochbau
- [11] DIN EN 1991-1-1/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1.1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichte, Eigengewichte und Nutzlasten im Hochbau
- [12] DIN EN 1991-1-3: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten
- [13] DIN EN 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [14] DIN EN 1991-1-4/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [15] DIN EN 1991-1-5 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen
- [16] DIN EN 1991-1-5/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen
- [17] DIN EN 1991-1-7 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen
- [18] DIN EN 1991-1-7/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen
- [19] DB Netz AG. Modul 804.2101. Einwirkungen
- [20] DB Netz AG. Modul 804.5501. Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken