

KIB trifft Oberbau

Feste Fahrbahn auf Brücken erfordert angepasste Brückenplanung – eine Erläuterung.

MARKUS HENNECKE | TRISTAN MÖLTER

Das Kerngeschäft eines Eisenbahnbetriebs ist der Transport von Personen und Gütern. Dazu müssen Züge zuverlässig fahren. Die Eisenbahninfrastruktur muss so geplant und gebaut werden, dass ein störungsfreier Betrieb möglich ist. Für den Hochgeschwindigkeitsbereich haben sich in verschiedenen Ländern Feste-Fahrbahn (FF)-Systeme entwickelt. Die Deutsche Bundesbahn (DB) baute 1972 im Bahnhof Rheda die erste Teststrecke. Für die FF auf Brücken sind besondere technische Aspekte zu berücksichtigen. Die meisten Eisenbahnbrückenplaner gehen immer noch davon aus, dass die Voraussetzungen für Eisenbahnbrücken stets die gleichen sind. In Zeiten von reinem Schotteroberbau hat gerade dieser sehr viele Bewegungen und Belastungen der Brücke kompensiert. Der Oberbau wunderte sich allerdings immer darüber, dass gerade an den Brückenenden meist sog.

„Weißer Schotter“ auftrat. In jüngerer Vergangenheit hat sich durch den Einsatz der FF oder auch direkten Schienenbefestigung gezeigt, dass gerade diese Brücken anders geplant werden müssen. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, welche Punkte der Brückenplaner beachten muss, damit die Brücke für die FF geeignet ist.

Einleitung

Eisenmann veröffentlichte 1998 im EI – DER EISENBAHNINGENIEUR einen Beitrag über die „Verdrehungen der Brückenenden“ [1]. In dem Beitrag beschreibt der Autor die negativen Folgen großer Endtangentialdrehwinkel ϕ an den Brückenenden im Hinblick auf die Beanspruchung der Schienenstützpunkte im Bereich der Übergänge und auf den Fahrkomfort der Reisenden. Unter dem Begriff „Endtangentialdrehwinkel“ wird der Winkel der Tangente an die vertikale Biegelinie des Brückenträgers am Brückenende verstanden (Abb. 1).

In den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung gültigen Richtlinien der DB waren Regeln für den Bau der FF auf Brücken noch nicht enthalten. Erstmals wurde in Deutschland das System FF auf einer Brücke im Jahr 1994 als Pilotprojekt ausgeführt (EÜ Amperbrücke in der Strecke München – Lindau).

Das System FF ist heute in einigen Bahnstrecken der DB Netz AG eingebaut. Tab. 1 gibt einen Überblick über aktuell verbaute FF auf Brücken im Fernverkehrsnetz. Weitere Anwendungen gibt es am Berliner Hauptbahnhof und an wenigen Bauwerken auf sonstigen Strecken.

FF auf Brücken

Die FF auf Brücken wird unterteilt in:

- FF auf kurzen Brücken (Abb. 2)
- FF auf langen Brücken (Abb. 3).

Der grundsätzliche Unterschied zwischen den beiden Systemen ist, dass die FF auf kurzen Brücken aus einer langen Gleistragplatte besteht, die in Längsrichtung schwimmend über die Brücke geführt wird. Bei Rahmenbauwerken wird die Gleistragplatte sogar über die Brückenenden hinausgeführt. Damit sind Brücke und Gleistragplatte in Längsrichtung entkoppelt.

Auf langen Brücken werden die Gleistragplatten in etwa 5 m langen Elementen segmentiert, die mit den Überbauten über Höckerplatten verbunden sind. Daraus folgt, dass die Verformungen der Brücke den Oberbau beeinflussen. Die Grenze zwischen kurzen und langen Brücken [3] liegt bei 25 m. Die nachfolgenden Betrachtungen betreffen im Wesentlichen die langen Brücken.

Technische Hintergründe

Brücken sind Störstellen im Gleis. Das Gleis hat im Vergleich zum Straßenoberbau eine Steifigkeit, die sich in vertikaler Richtung aus der Steifigkeit der Schienen und horizontal aus dem Zusammenwirken von Schienen und Schwellen ableitet. Die Steifigkeit der Schienen im Zusammenhang mit der Steifigkeit des Oberbaus verteilt einwirkende

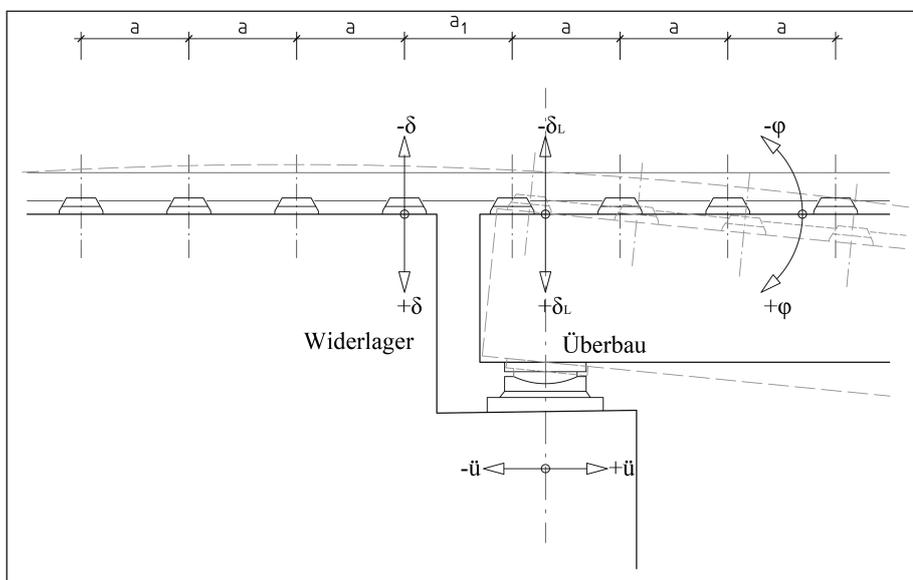


Abb. 1: Geometrische Zusammenhänge

Quelle: [2]

Strecke	Strecken Nr.	Inbetriebnahme (Jahr)	Brücken		Betriebsart
			kurze	lange	
Oebisfelde – Berlin (Spandau)	6185	1988	22	2	Personenverkehr
Köln – Rhein/Main	2690	2002	23	20	Personenverkehr
Ingolstadt – Nürnberg	6721	2006	30	6	Mischverkehr ¹
Nürnberg – Erfurt – Halle/Leipzig	VDE 8.2	2015	18	10	Mischverkehr

¹ aktuelle nur für Personenverkehr in Nutzung

Tab. 1: Zusammenstellung Brücken mit Fester Fahrbahn

Kräfte aus dem Eisenbahnverkehr in Längsrichtung. In der Statik wird das System als „elastisch gebetteter“ Balken bezeichnet. Aus dem System folgt andererseits, dass Verformungen des Untergrunds Schnittgrößen in den Schienen und den Schienenstützpunkten verursachen. Im Gegensatz zu den direkten Lastenwirkungen aus dem Überrollen des Rades werden die Verformungen als indirekte Einwirkungen bezeichnet.

In Abb. 4 ist der Kräfteverlauf eines Schienenstützpunktes infolge der Zugüberfahrt eines Güterzuges mit 22,5 t Achslasten und einer Geschwindigkeit von 80 km/h über eine 45 m lange Modellbrücke dargestellt. Es ist der zweite Schienenstützpunkt in Fahrtrichtung des Zuges hinter der zweiten Bauwerksfuge. Es stellt sich als erstes die Zugkraft infolge des Endtangentialdrehwinkels des Überbaus ein und mit zwei Sekunden Verzögerung die Abhebewelle des Rades.

Abb. 4 zeigt deutlich, dass sich bei der Überfahrt zwei Vorgänge überlagern. Der erste Vorgang ist die Schienenstützpunktkraft, die sich aus der Formänderung des belasteten Feldes ergibt (rote Linie). Diese Kraft ist über die gesamte Dauer des Aufenthaltes des Zuges im Feld eingepreßt. Die Kraft wird durch die einzelnen Reaktionen aus den Radsätzen überlagert, die zwischen Druck und Zug alternieren (blaue Linie).

Ein Schienenstützpunkt ist ein komplexes statisches System. Die Schiene liegt auf einer Schwelle bzw. einer Tragplatte. Dazwischen ist eine elastische Lagerung vorgesehen, um Stoßlasten zu vermeiden: Durch die Einfederung der Zwischenlage können die Verkehrslasten über mehrere Stützpunkte verteilt werden, ohne hohe lokale Belastung zu erzeugen. Durch Verbindungselemente wie z.B. Klemmplatte, Spannklemme, Schraube/Dübel-Kombination werden die Schiene, die Zwischenlage und die Schwelle bzw. die Tragplatte formschlüssig unter Vorspannung zusammengeschraubt. Bei einer Druckbelastung werden die Kräfte direkt über die Einfederung der Zwischenlagen verteilt und anschließend in den Untergrund weitergeleitet. Die Vorspannkraft im Spannelement fällt durch die Einfederung der Zwischenlage leicht ab. Die durch die Schiene hervorgerufenen Zugkräfte hingegen wirken ungünstig auf die Spannschrauben. Insbesondere ab dem Zeitpunkt des Berührens der Mittelschleife einer Spannklemme am Schienenfuß steigt die Kraft überproportional an.

Die elastische Zwischenlage ist ein Elastomer. Elastomere verändern ihre Steifigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und der Belastungsfrequenz. Je höher die Frequenz und je tiefer die Temperaturen, desto steifer sind die Elastomere.

Verschiebungen an den Fugen

Vertikale Verschiebungen

Im Übergangsbereich vom Erdbauwerk über das Widerlager zum Überbau wechseln die

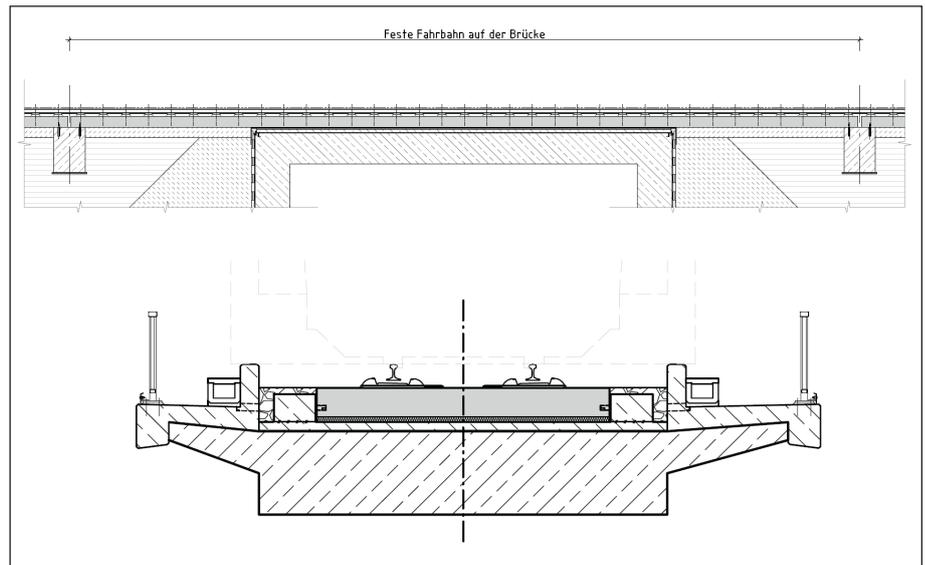


Abb. 2: Systembild kurze Brücke

Quelle: [4]

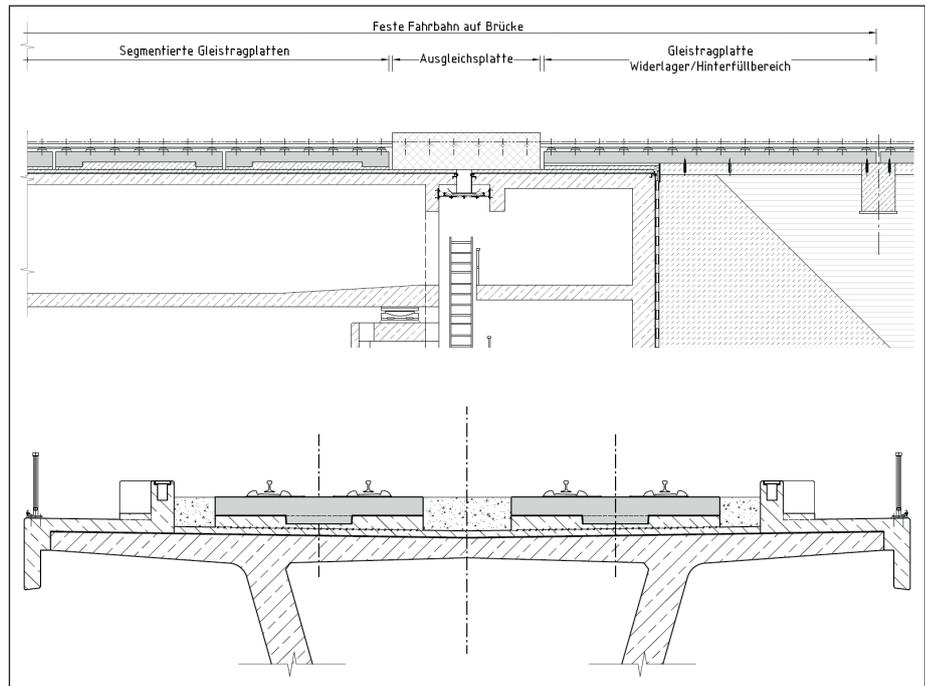


Abb. 3: Systembild lange Brücke

Quelle: [4]

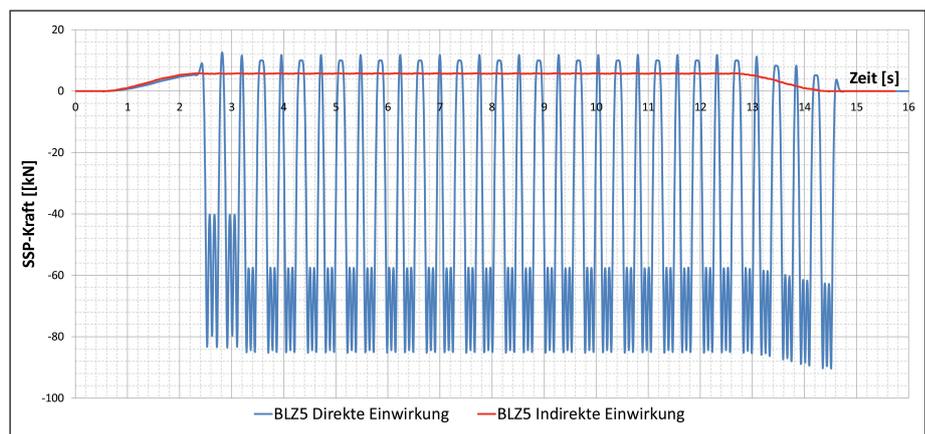


Abb. 4: Schienenstützpunktkraft infolge Zugüberfahrt

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Zilch + Müller Ingenieure /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DW Media Group GmbH

Steifigkeiten des Untergrundes. Die vertikale Steifigkeit des Widerlagers ist in der Regel größer als die des Erdbauwerks. Der Brückenüberbau selbst stellt für den Fahrweg einen weicheren Untergrund dar, dessen „Verformungsmulde“ sich über eine Feldlänge erstreckt. An den Fugen zwischen Widerlager und Überbau oder zwischen zwei Überbauten treffen unabhängige Tragsysteme und damit unabhängige Biegelinien aufeinander. Es sind ein Knick und Versatz vorhanden. Das darüber geführte Gleis gleicht die Diskontinuitäten zwar aus, erfährt dadurch jedoch örtlich größere Belastungen [5, 6]. Der Knick setzt sich aus dem Endtangentialdrehwinkel der anschließenden Biegelinien zusammen. In den über die Fuge durchlaufenden Schienen bilden sich je nach Drehrichtung des Endtangentialdrehwinkels Kuppen oder Wannen mit

kleinen Ausrundungsradien aus. Eine Kuppe stellt sich ein, wenn zwei „konvexe“ Biegelinien aufeinandertreffen, und eine Wanne bei zwei „konkaven“. In einer Kuppe erhalten die beiden ersten Schienenstützpunkte eine Druckkraft und die folgende eine Zugkraft. In der Wanne ist es umgekehrt. (Abb. 5)

Der Versatz hat fünf Ursachen:

1. Ungleichmäßige Einsenkung der Lager der Brücke beidseits der Fuge
2. Verkippung der Lagerbank, auf der die Überbauten lagern infolge Pfeilerkopfverdrehung oder Verkippung des Pfeilerfundaments
3. Vertikale Verschiebung des Brückenendes infolge des Endtangentialdrehwinkels der Biegelinie des Überbaus
4. Vertikale Verschiebung infolge von Längenänderung des Überbaus bei einer Trassierung mit Längsneigung
5. Durchbiegung der Widerlagerdecke. (Abb. 6)

(Abb. 6)

Für die Abb. 7 wurde die Abhebekraft der Schienenstützpunkte infolge Einheitsverdrehung für unterschiedliche Senkfedersteifigkeiten untersucht. Eine wichtige Erkenntnis war, dass aus einem (vertikalen) Versatz eine größere Kraft folgt als aus den Verdrehungen. Daraus folgt, dass die Begrenzung des Versatzes wesentlich ist.

Versatz und Verdrehung sind über den Abstand des erste Schienenstützpunktes vom Lager korreliert. Abb. 8 stellt die Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und den Verformungen dar. Die Verschiebungen und Verdrehungen an den Fugen sind für die Schotterfahrbahn und für die FF von Bedeutung. In der Schotterfahrbahn zeigen sich die Auswirkungen an sogenannten weißen Stellen im Schotter.

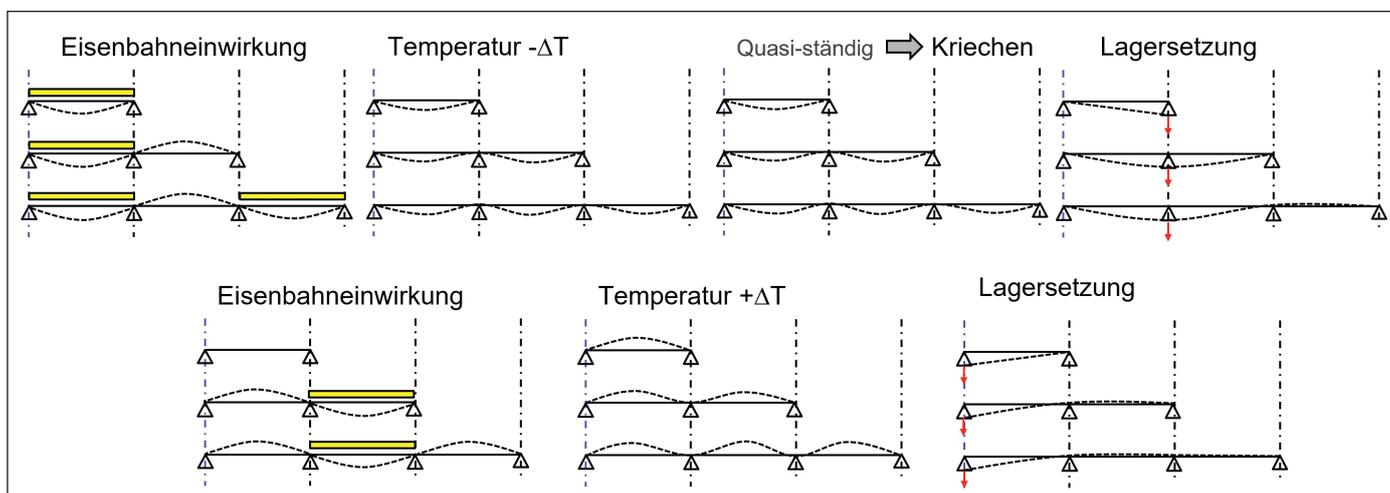


Abb. 5: Schematische Biegelinien infolge maßgebender Einwirkungen

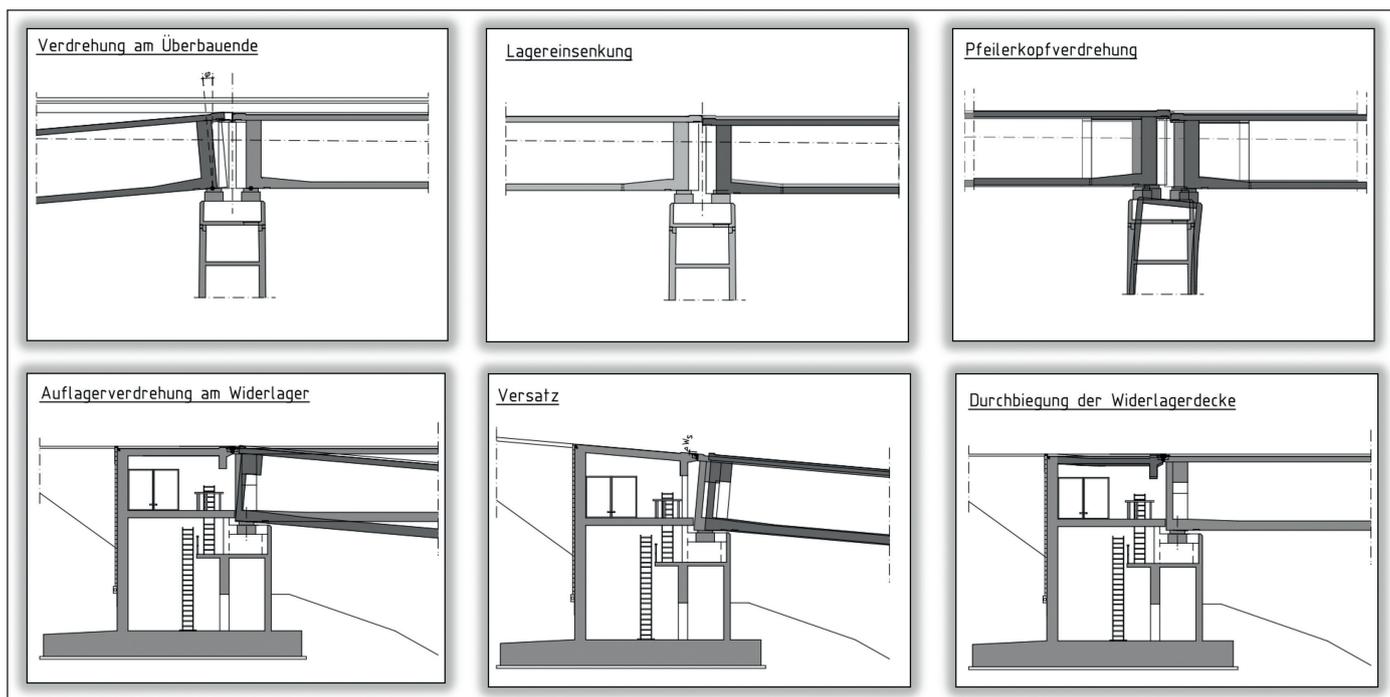


Abb. 6: Versatz am Überbauende

Quelle: [2]

Zwischen FF und Schotterfahrbahn gibt es grundlegende technische Unterschiede. In der Schotterfahrbahn heben sich infolge der Zugkräfte die Schwellen an. Die maximale Zugkraft, welche in einem Schotteroberbau-Schienenstützpunkt entstehen kann, ist die Kraft durch das Eigengewicht der unterliegenden Schwelle. Bei einer 350 kg schweren Betonschwelle mit zwei Stützpunkten ist die maximale Zugkraft wie folgt zu ermitteln:

$$(350 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ N/kg}) / 2 = 1,72 \text{ kN}$$

Bei der FF hängt das Gewicht der Gleistragplatte der FF an den Schienenstützpunkten, die je nach Konstruktion an den Brückenebenen mit dem Überbau durch Verbindungsmittel kraftschlüssig verbunden ist. Die gängigen Befestigungssysteme, welche im Gleisbereich in großer Anzahl anzuwenden sind, sind nicht für hohe zusätzliche Zugkraft in den Verbindungselementen dimensioniert. Die bisherigen Entwicklungen diesbezüglich zielen rein darauf ab, das technische und wirtschaftliche Optimum zu finden. Sonderstützpunkte mit kompletten Konstruktionen sind nur bei Sonderfällen einzusetzen.

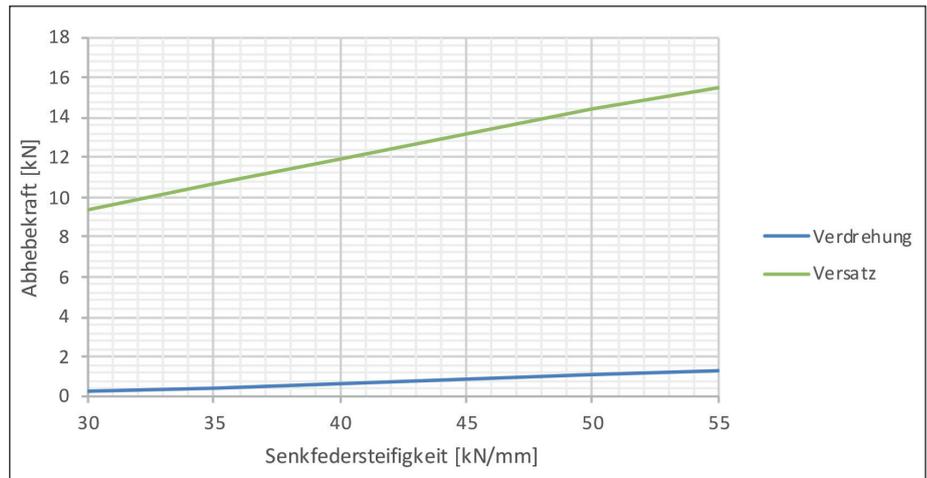


Abb. 7: Abhängigkeit von Abhebekraft und Federsteifigkeit

Längsverschiebungen an den Fugen

Brückenüberbauten bewegen sich nicht nur vertikal, sondern auch horizontal längs und quer zur Gleisachse.

In Gleislängsrichtung verlängert oder verkürzt sich der Überbau je nachdem, ob

dieser wärmer oder kälter wird. Betonkonstruktionen verkürzen sich zusätzlich infolge Schwindens und Kriechens. Weiterhin verschiebt sich der gesamte Überbau als Starrkörper, wenn sich die Unterbauten, auf denen Festhaltungen sind, aufgrund der Ho-



E.C.O. Group

Engineering.
Consulting.
Operations.

We are part of DB E.C.O. Group:
DB Engineering & Consulting | ESE Engineering und Software-Entwicklung |
infraView | Deutsche Bahn International Operations

Interested in transforming the future of mobility?

Follow us on  **LinkedIn**

Sign up for our newsletter.

www.db-eco.com



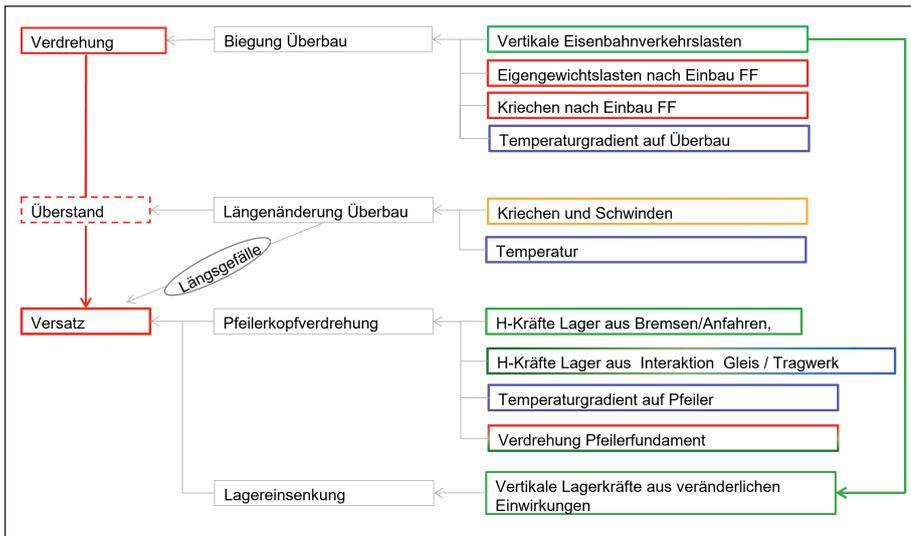



Abb. 8: Zuordnung der Einzellastfälle zu Verdrehung und Verformung Quelle: [2]

horizontalen Kräfte aus Bremsen/Anfahren und infolge Differenzverformungen zwischen Überbau und Schienen verformen [7]. Diese Verformungen und Verschiebungen summieren sich auf und treten als Wege (Dilatation) in den Bauwerksfugen zwischen Überbau und Widerlager in Erscheinung. In den Schienen, die über diese Fuge lückenlos geführt werden, entstehen Kräfte. Entscheidend für die Schnittgrößen in den Schienen ist die Länge, auf denen sich diese Wege verteilen. Die Länge ist wiederum abhängig von der Steifigkeit der Verbindung zwischen Überbau und Schienen. Wäre die Steifigkeit sehr groß und damit die Länge sehr klein, würden die Schienen brechen. Mit einer sehr großen Länge könnten die Zwangskräfte sehr klein gehalten werden. Die Länge ist jedoch zu begrenzen, da ansonsten die Kräfte infolge von Bremsen und Anfahren in den Schienen

zu groß würden, da sie nicht in die Brücken geleitet werden. Bei der Schotterfahrbahn ergibt sich die Verformungsfähigkeit durch den Schotter selbst. Im System FF kann sich die Konstruktion gegenüber der Brücke nicht verschieben, daher ist es notwendig, dass die Schienen sich gegenüber der Gleistragplatte verschieben können. Voraussetzung dafür sind Schienenstützpunkte mit reduziertem Durchschubwiderstand, sodass der Schienenfuß ab einer bestimmten Einwirkung in horizontaler Richtung durch die Schienenbefestigung rutscht. Schienen werden in einem regelmäßigen Abstand gestützt, der nicht größer als 65 cm sein darf. An den Fugen verändert sich der Abstand zwischen den Stützpunkten infolge der Dilatation. Bei der Planung der Brücke muss daher darauf geachtet werden, dass die Dilatationen begrenzt werden.

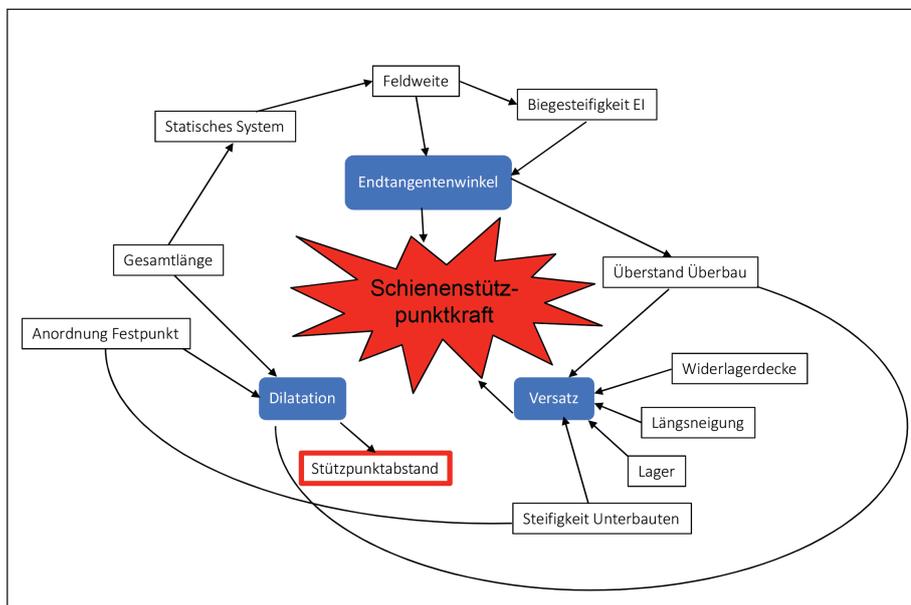


Abb. 9: Zusammenwirken von Entwurfsparametern auf die kritischen Verformungen

Laterale Verformungen

Brückenüberbauten werden über Lager mit seitlichen Festhalterungen geführt. Aus fertigungstechnischen Gründen gibt es zwischen dem Lager und der Führung einen Spalt. An den Fugen der Überbauten kann sich hieraus ein lateraler Versatz in der Gleisachse ergeben. Dieser Versatz beträgt bei Lagern, die mit normativen Herstellungstoleranzen gefertigt werden, 2,00 mm. Im Schotteroberbau sind diese Wege ohne Relevanz. Im Gegensatz dazu können sie bei der FF kritisch sein, daher sind Lager mit hoher Fertigungstoleranz herzustellen.

Brückenentwurf

Die Kernaufgabe einer Eisenbahnbrücke ist, das Gleis sicher über ein Hindernis zu führen. Für die Brückenplanung hat dies zur Konsequenz, dass ergänzend zu den rechnerischen Nachweisen zu Standsicherheit und Dauerhaftigkeit des Brückenbauwerks weitere Nachweise zu führen sind, die die Unversehrtheit des Gleises gewährleisten. Schienen und Brücke bilden ein gemeinsames statisches System, das über die Schienenstützpunkte verbunden ist. Um die Kräfte in den Schienen und den Schienenstützpunkten zu berechnen, müssen Steifigkeiten und Geometrie der Schienenbefestigung bekannt sein. Diese sind jedoch abhängig von den Komponenten des Oberbaus, die in der Regel erst nach Abschluss der Brückenarbeiten definiert werden. Die Interaktion zwischen Oberbau und Brücke führt bei den Schienenspannungen auch zu Kräften, die in den Nachweisen der Lager und Unterbauten zu berücksichtigen sind. Um das Dilemma zu beheben, dass die für die Berechnungen notwendigen Parameter noch nicht bekannt sind, aber eine spätere „Heilung“ eventueller Unverträglichkeiten höheren Aufwand verursacht, wurde ein ingenieurtechnischer Ansatz gewählt mit generischen Kraft-Verschiebungs-Beziehungen für die Schienenspannungen. Es ist offensichtlich, dass die vereinfachten Ansätze nicht alle Einflüsse berücksichtigen können. Aus dem ertragbaren Spektrum der ertragbaren Spannungen der Schienen wird dem Brückenbau ein Fenster zugewiesen, um seine Nachweise zu führen. Der Schienenspannungsnachweis ist im Wesentlichen ein Leistungsnachweis für die Brücke und kein Nachweis für die Schiene. Die Schienenstützpunktkräfte sind für Brücken unschädlich, da die Schienenstützpunkte oder die Schienen eher versagen als die Brücke. Die Schienenstützpunkte werden belastet durch die Abhebewelle des Rades und die Verformungen der Brücke. Die Abhebewelle des Rades ist unabhängig von der Brücke. Für die Verformungen ist der Brückenplaner verantwortlich. Wesentliche Entwurfsparameter zur Begrenzung des Versatzes sind (Abb. 9):

- ausreichend steife Überbauten, damit die Durchbiegung infolge vertikaler Eisenbahnlasten klein ist

- ausreichend steife Unterbauten, damit die Verformungen infolge horizontaler Einwirkungen (Bremsen, Anfahren, Interaktion Schiene / Überbau) klein sind
- kleine Überstände der Brückenenden, damit der vertikale Versatz aus dem Endtangentialdrehwinkel klein ist
- Begrenzung der Überbaulänge, damit die Dilatation (Längenänderung infolge Temperatur, Kriechen, Schwinden) gering ist.

Fazit

Gleise und Brückenüberbau bilden ein gemeinsames statisches System. Insbesondere die Verformungen der Brücken können Oberbaukomponenten Schäden zuführen, wenn die aufgezwingenen Schnittgrößen die Widerstände überschreiten. FF und Schotteroberbau sind davon unterschiedlich betroffen. Im Schotteroberbau stellen sich bei Überschreiten von Grenzwerten Verformungen und Zerstörungen im Schotter ein. Die Oberbaukomponenten selbst sind weniger bzw. nur sekundär betroffen. Dem

gegenüber können bei der FF, die größere Kräfte aufnehmen kann, Beschädigungen am Oberbau auftreten. Der Brückenplaner muss diese oberbaukonform konstruieren. Dazu gehören neben einer ausreichenden Steifigkeit sowie möglichst geringen Überständen der Brückenenden über den Lagern auch ausreichend steife Unterbauten. In den aktuellen Regelwerken [2, 3, 4] finden sich die entsprechenden Regelungen. ■

QUELLEN

- [1] Eisenmann, J.: Verdrehung der Brückenenden, EI – DER EISENBAHN-INGENIEUR 05/1998, S. 21 -22
- [2] DB Netz AG: RIL 804.5402. Bemessungsgrundlagen für die Feste Fahrbahn auf Brücken
- [3] DB Netz AG: RIL 804.9070, RIZ Feste Fahrbahn auf Brücken
- [4] DB Netz AG: RIL 804.5401. Grundsätze und allgemeine konstruktive Anforderungen für die Feste Fahrbahn auf Brücken
- [5] Liu, J., Lechner, B.; Freudenstein, S.: Theoretische Untersuchungen zum Verformungsverhalten der Schiene. In EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 09/2013. S. 35-40
- [6] Liu, J., Lechner, B. u. Freudenstein, S.: Experimentelle Untersuchungen zum Verformungsverhalten der Schiene. In EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2013. S.6-17
- [7] Frey Stein, H.: Interaktion Gleis/Brücke – Stand der Technik. In Stahlbau (79). S. 220-231

VDEI Fachausschuss
KONSTRUKTIVER INGENIEURBAU

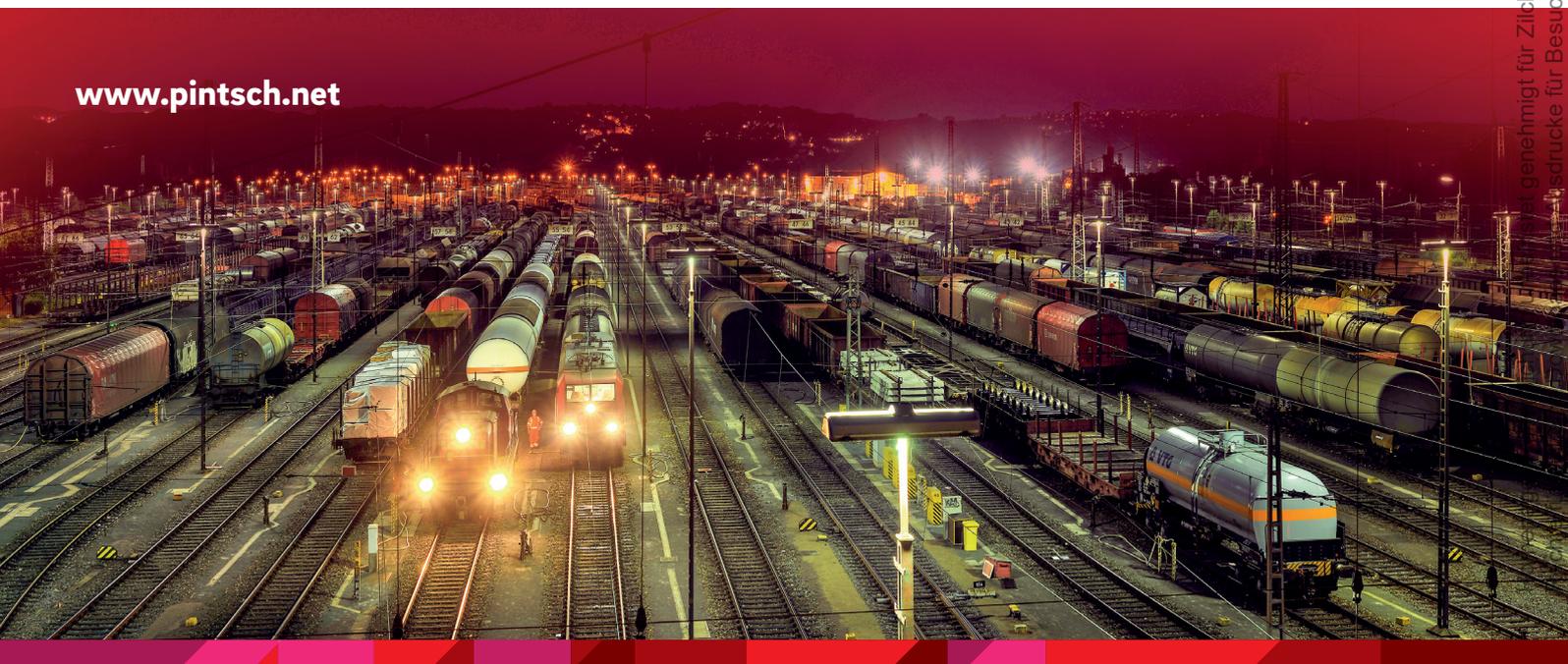


Dr.-Ing. Markus Hennecke
Geschäftsführender Gesellschafter
Zilch + Müller Ingenieure, München
markus.hennecke@zm-i.de



Tristan Mölter
Bauartverantwortung
Brückenbau u. LS-Anlagen Technik
I.NAI 421
DB Netz AG, München
tristan.moelter@deutschebahn.com

www.pintsch.net



Systemlösungen für die Bahninfrastruktur

- Bahnübergangstechnik
- Achszähltechnik
- Stellwerkstechnik
- Rangiertechnik
- Digitalisierung & Diagnose, Service

