

DIN CEN/TR 17231



ICS 91.010.30; 93.040

**Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –
Verkehrslasten auf Brücken –
Gleis-Brücken-Interaktion;
Deutsche Fassung CEN/TR 17231:2018**

Eurocode 1: Actions on Structures –
Traffic Loads on Bridges –
Track-Bridge Interaction;
German version CEN/TR 17231:2018

Eurocode 1: Actions sur les structures –
Actions sur les ponts, dues au trafic –
Interaction voie-pont;
Version allemande CEN/TR 17231:2018

Gesamtumfang 110 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 17231:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-57-03 AA „Lastannahmen für Brücken (SpA zu CEN/TC 250/SC 1/WG 3)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Technische Reporte sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Zum vorliegenden Technischen Report wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an nabau@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10787 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin).

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Deutsche Fassung

**Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke —
Verkehrslasten auf Brücken —
Gleis-Brücken Interaktion**

Eurocode 1: Actions on Structures —
Traffic Loads on Bridges —
Track-Bridge Interaction

Eurocode 1: Actions sur les structures —
Actions sur les ponts, dues au trafic —
Interaction voie-pont

Dieser Technische Bericht wurde vom CEN am 16. April 2018 angenommen. Er wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 erstellt.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Beschreibung der technischen Aufgabenstellung	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Axiale Effekte	11
5.2.1 Ursprung von axialen Kräften und Verschiebungen	11
5.2.2 Kraftübertragung zwischen dem Gleis und den Enden des Überbaus	11
5.2.3 Schienenspannungen	12
5.2.4 Auf den Festpunkt einwirkende Kräfte (z. B. Lagerkräfte)	14
5.2.5 Interaktion mit der Unterkonstruktion	15
5.3 Vertikale Effekte	15
5.3.1 Auswirkung von vertikalen Kräften und Verschiebungen	15
5.3.2 Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus	15
5.4 Abgrenzung der Erfordernisse einer detaillierten Berechnung	16
5.5 Berechnung mehrkomponentiger Belastungssituationen	17
5.6 Auswirkung von Brückenverformungen	17
5.6.1 Auswirkung auf die Gleisgeometrie	17
5.6.2 Auswirkung auf die Stabilität des Schotteroberbaus	18
5.6.3 Auswirkung der Zerstörung des Schotters über Bauwerksfugen	18
5.7 Auswirkungen auf die Gleiskonstruktion und Instandhaltungsmaßnahmen	19
6 Geschichte und Hintergrund	19
6.1 Bestehende Vorschriften und Normen	19
6.2 Unterschiede zwischen nationalen Vorschriften	21
7 Fallstudien	21
7.1 Schelde-Brücke (Belgien)	21
7.2 Ausgewiesene Hochgeschwindigkeitsstrecken in Frankreich und Spanien	21
7.3 Olifants River Brücke (Südafrika)	21
7.4 Brücken in Denver RTD (USA)	22
7.5 Historische Brücken in Mitteleuropa	22
7.6 Semi-integrale Brücken auf deutschen Hochgeschwindigkeitsstrecken	22
8 Überlegungen zum Entwurf des Gleises	23
8.1 Darstellung des axialen Verhaltens des Gleises	23
8.2 Verstehen des Schotterverhaltens	24
8.2.1 Eigenschaften des Schotters	24
8.2.2 Bedeutung einer wirksamen Schotterhalterung	25
8.3 Beschreibung/Anwendungsgrenzen von verfügbaren Gleisbauelementen zur Minderungen von Auswirkungen	25
8.3.1 Grundsätzliches	25
8.3.2 In der Praxis angewandte Lösungen	27
8.4 Beschreibung/Grenzen des Brückenentwurfs zur Minimierung von Auswirkungen	31

8.4.1	Allgemeines	31
8.4.2	„Steuerstäbe“ und virtuelle Festpunkte.....	32
8.4.3	Dämpfersysteme.....	32
8.5	Auswirkungen von Gleiskrümmungen, Weichen und Kreuzungen.....	32
9	Planungskriterien	33
9.1	Allgemeines	33
9.1.1	Schienenspannung.....	33
9.1.2	Schienenbruchbegrenzung	33
9.2	Grenzwerte für die Verschiebung	34
9.3	Unterscheidung zwischen Traglast und Gebrauchslast	35
9.4	Sicherheitsfaktoren	35
9.5	Unterschiede zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn.....	36
9.6	Berechnungen für Konfigurationen mit Schienenausügen.....	36
10	Berechnungsverfahren.....	37
10.1	Verfahren nach EN 1991-2:2003	37
10.1.1	Allgemeines	37
10.1.2	Software basierend auf UIC 774-3R.....	38
10.1.3	Lineare Analyse mit manueller Intervention (LAMI).....	38
10.2	Lastkonfigurationen.....	40
10.3	Sensitivitätsanalyse.....	41
10.4	Numerische Vergleiche von Berechnungsverfahren.....	42
11	Informations- und Prozessmanagement	46
12	LEITFADEN – Gegenwärtige bewährte Vorgehensweise.....	47
12.1	Prinzipien der Brückenplanung	47
12.2	Prinzipien der Gleisplanung.....	47
12.2.1	Schotteroberbau	47
12.2.2	Feste Fahrbahn.....	48
12.2.3	Spezielle Schienenbefestigungssysteme	48
12.2.4	Schienenausüge	48
12.2.5	Herleitung des Verhaltens	49
13	Empfehlungen für die Erarbeitung zukünftiger Normen	50
14	Empfehlungen für die zukünftige Forschung und Entwicklung.....	50
14.1	Allgemeines	50
14.2	Verbesserte Eingangsdaten für bestehende Berechnungsverfahren	50
14.3	Erweiterung bestehender Modelle, um andere Gleiskonfigurationen einzuschließen	51
14.4	Datenerhebung für eine bessere Verifizierung analytischer Modelle.....	51
14.5	Bereitstellen einer Grundlage für die Entwicklung neuer, präziserer Modelle.....	51
Anhang A (informativ)	Berechnung der Bruchlücke.....	52
A.1	Bruchlücke bei einem Gleis mit konventionellen Befestigungen (nicht auf einer Brücke).....	52
A.2	Bruchlücke für Gleise auf einer Brücke mit konventionellen Befestigungen.....	53
A.3	Bruchlücke bei Gleis mit gleitenden Befestigungen (Durchschubwiderstand null)	55
A.4	Grenzwerte für die Bruchlücke	55
Anhang B (informativ)	Algebraische Untersuchungen der Gleiseigenschaften in Längsrichtung	56
B.1	Algebraische Darstellung des Verhaltens	56
B.1.1	Gleitbewegung.....	56
B.1.2	Die k -Funktion	57
B.1.3	Temperaturänderung.....	58
B.1.4	Temperaturgradienten	68
B.1.5	Gleisfedern.....	68
B.1.6	Fugenbewegungen	72
B.1.7	Aus Fugenbewegungen resultierende Gleiskräfte	74

B.2	Verfahren mit zwei Tabellenkalkulationen.....	79
B.2.1	Allgemeines	79
B.2.2	Die Tabellenkalkulation der Temperaturspannung (TSS, en: Temperature Stress Spreadsheet)	80
B.2.3	Die Tabellenkalkulation für die zusätzliche Spannung (ASS, en: Additional Stress Spreadsheet)	82
Anhang C (informativ) Beispiele für Berechnungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion.....		85
C.1	Einführung in die Berechnungsverfahren.....	85
C.2	Beispiel 1: Einfach gelagerter Überbau ohne Schienenauszug.....	85
C.3	Beispiel 2: Reihe von durchgehenden Überbauten ohne Schienenauszug.....	88
C.4	Durchgehender Überbau mit Schienenauszug	90
Anhang D (informativ) Alternatives Verfahren zur Bestimmung der gemeinsamen Antwort von Bauwerk und Gleis auf veränderliche Einwirkungen		94
Anhang E (informativ) Vorgeschlagene Überarbeitung von EN 1991-2:2003, 6.5.4		95
E.1	Allgemeines	95
E.2	Gemeinsame Antwort von Tragwerk und Gleis auf veränderliche Einwirkungen.....	95
E.2.1	Allgemeine Prinzipien	95
E.2.2	Parameter, die das gemeinsame Verhalten des Bauwerks und des Gleises betreffen.....	96
E.2.3	Zu berücksichtigende Einwirkungen	98
E.2.4	Modellierung und Berechnung des gemeinsamen Gleis-/Tragwerkssystems.....	99
E.2.5	Entwurfskriterien.....	101
E.2.6	Berechnungsverfahren.....	103
Literaturhinweise.....		107

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 17231:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Einleitung

Das Thema der Gleis-Tragwerk-Interaktion ist besonders wichtig geworden im Hinblick auf Eisenbahnbrücken mit längeren Spannweiten und Viadukte, insbesondere wenn sie von Hochgeschwindigkeitszügen befahren werden. Allerdings haben Untersuchungen, die zu diesem spezifischen Thema durchgeführt wurden, Gesichtspunkte ergeben, die für alle Arten von Eisenbahnbrücken relevant sind. Daher soll der Inhalt dieses Technischen Berichts für alle Arten von Eisenbahnbrücken gelten, sowohl mit Schotteroberbau als auch mit Fester Fahrbahn, und für alle Arten von Zügen (z. B. konventionelle Züge, Stadtbahnsysteme sowie Hochgeschwindigkeitszüge).

Ganz offensichtlich hat die seit der Erarbeitung der Grundlagen für die bestehenden Vorschriften in den 1990er Jahren gestiegene Verfügbarkeit von computergestützten Analyseverfahren es ermöglicht, Berechnungsansätze zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion in Betracht zu ziehen, deren Einsatz bei Routineaufgaben damals nicht zu erwarten war.

In den letzten Abschnitten dieses Technischen Berichts werden die drei wesentlichen Ergebnisse dargelegt. Dies sind:

- 1) Leitfaden für die mit der Bemessung und Instandhaltung von Eisenbahngleisen und -tragwerken betrauten Personen, um diesen Hilfestellung bei der Übernahme der gegenwärtigen bewährten Vorgehensweise hinsichtlich der Berücksichtigung der Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion zu geben (Abschnitt 12 dieses Berichts);
- 2) Empfehlungen für die zukünftige Erarbeitung von Normen, insbesondere für die Überarbeitung des maßgeblichen Abschnitts des Eurocode EN 1991-2:2003, 6.5.4, (Abschnitt 13 und Anhang E dieses Berichts);
- 3) Identifizierung Es wird aufgezeigt, in welchen Bereichen neue Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind, um eine weitere Verbesserung der Ansätze zur Gleis-Tragwerk-Interaktion zu erreichen (Abschnitt 14 dieses Berichts).

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument überprüft die gegenwärtige Praxis in Bezug auf Bemessung, Bau und Instandhaltung Brückenbauteilen und Gleisen in Bereichen, in denen die Eisenbahnschienen über Unstetigkeitsstellen der gleistragenden Strukturen hinweg verlegt sind. Gegenwärtige Normen und Leitfäden für die Praxis werden untersucht und einige spezielle Fälle hinsichtlich ihrer historischen Entwicklung überprüft.

Das Dokument dient als Leitfaden in Bezug auf die gegenwärtige bewährte Vorgehensweise und gibt Empfehlungen für die Erarbeitung zukünftiger Normen und es identifiziert Bereiche, in denen weiterführende Forschung und Entwicklung nötig sind.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

Gleis-Tragwerk-Interaktion

Umstände, unter denen Kräfte und/oder Verschiebungen in einem Eisenbahngleis und dem das Gleis tragende Brückentragwerk durch die Tatsache beeinflusst werden, dass die Schienen über Diskontinuitäten in einem Brückentragwerk hinweg verlaufen, z. B. konstruktiv erforderliche Bewegungsfugen oder Enden des Brückenüberbaus

3.2

zusätzliche Beanspruchung

Beanspruchung in einem Gleiselement (z. B. Schiene und Schienenbefestigung) auf einer Brücke, verglichen mit der Beanspruchung, die in diesem Element zu erwarten wäre, wenn das gleiche Gleissystem, außerhalb einer Brücke installiert, den gleichen Lasteinwirkungen ausgesetzt wäre

Anmerkung 1 zum Begriff Das Wort „zusätzlich“ wird in demselben Sinne verwendet, um zusätzliche Spannungen, zusätzliche Kräfte und zusätzliche Verformungen zu beschreiben.

3.3

thermischer Festpunkt

Punkt im Tragwerk der Brücke, ohne das Gleis, von dem angenommen wird, dass er sich bei einer Temperaturänderung nicht verschiebt (auch als „Mittelpunkt der thermischen Verschiebung“ oder „thermischer Mittelpunkt“ bezeichnet)

3.4

Überbaulänge

L_D

Abstand zwischen Bewegungsfugen im Brückenüberbau

3.5

Stützweite

L_s

Abstand zwischen vertikalen Auflagern, z. B. Pfeilern und Widerlagern

3.6

Auszugslänge, L_T eines Überbaus

Abstand zwischen dem thermischen Festpunkt und dem freien Ende des Überbaus

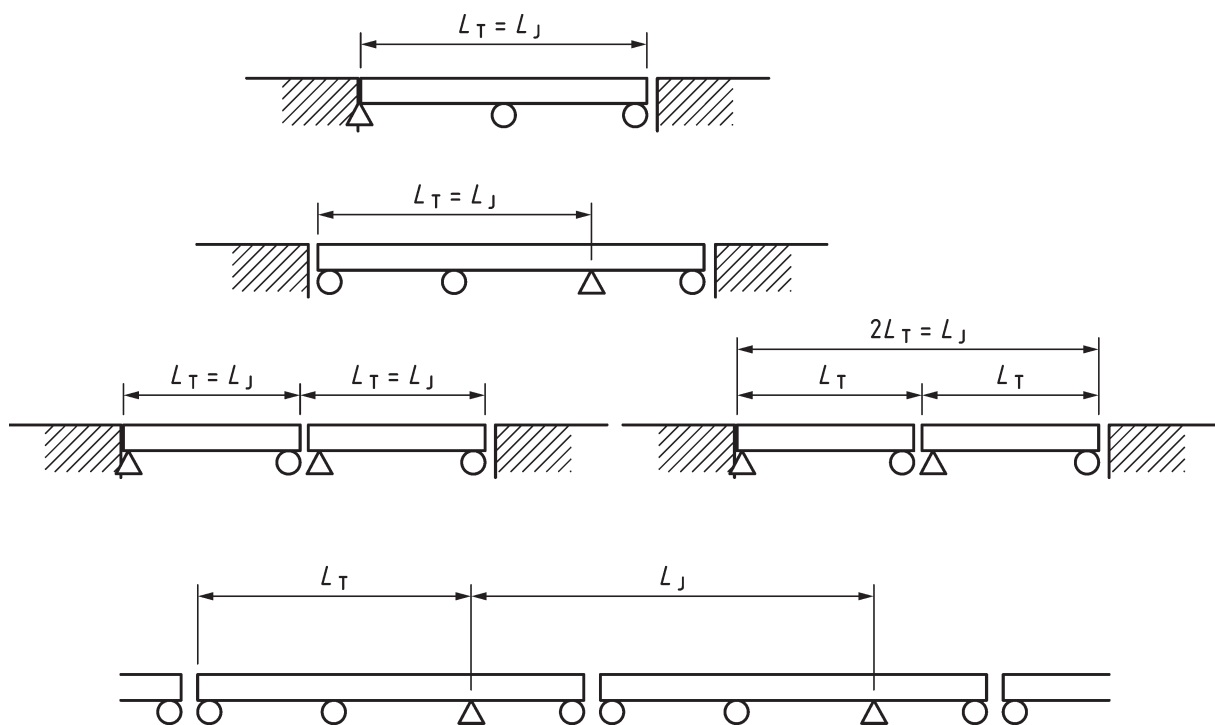
Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Brückenentwürfen, bei denen der thermische Festpunkt weder an einem Ende noch am Mittelpunkt des Überbaus liegt, wird der Abstand vom thermischen Festpunkt bis zum weiter entfernten freien Ende als L_T angegeben (siehe Bild 1).

3.7

wirksame Auszugslänge, L_J an einer Fuge

Summe der Abstände von der Fuge zum thermischen Festpunkt für die zwei an die Fuge angrenzenden Brückenüberbauten

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe Bild 1.



Legende

△ Zeichen für Festlager

○ Zeichen für bewegliches Lager

Bild 1 — Beispiele für die Auszugslängen L_J und L_T

3.8

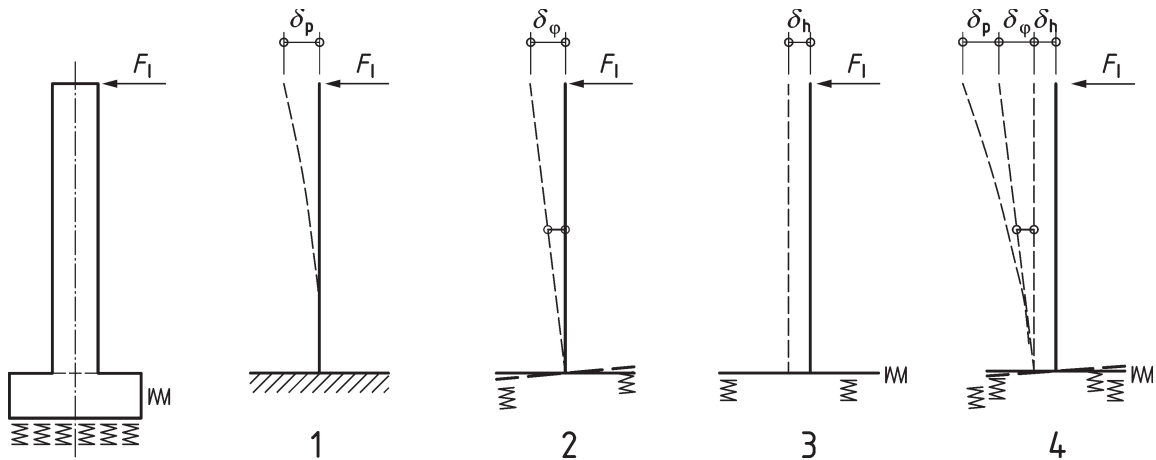
Auflagersteifigkeit

Längssteifigkeit eines einzelnen Pfeilers, angegeben als

$$K = \frac{F}{\delta_p + \delta_\varphi + \delta_h}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: In Abhängigkeit von der Art der verwendeten Lager kann es nötig sein, das Lagerspiel und die Schersteifigkeit bei der Berechnung der Längssteifigkeit zu berücksichtigen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bild 2 enthält den dargestellten Fall als Beispiel.



Legende

- (1) Biegung des Pfeilers
- (2) Verdrehung der Gründung
- (3) Verschiebung der Gründung
- (4) Gesamtverschiebung des Pfeilerkopfes

Bild 2 — Beispiel für die Bestimmung der äquivalenten Längssteifigkeit an Lagern

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole und Abkürzungen.

E	Elastizitätsmodul („Young-Modul“). Für Schienen wird davon ausgegangen, dass $E = 210 \text{ GN/m}$.
F	Längskraft
K	Längssteifigkeit an einem einzelnen Pfeiler (siehe Abschnitt 3, Begriff 7)
L_D	Überbaulänge (siehe Abschnitt 3, Begriff 4)
L_f	wirksame Auszugslänge an einer Fuge (siehe Abschnitt 3, Begriff 6)
L_S	Stützweite (siehe Abschnitt 3, Begriff 5)
L_T	Auszugslänge (siehe Abschnitt 3, Begriff 4)
SFT	spannungsfreie Temperatur (Temperatur, bei der die Axialspannung in der Schiene bei unbelastetem Gleis null beträgt)
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (siehe Definition nach EN 1990:2002 ¹ , 1.5.2.14)
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit (siehe Definition nach EN 1990:2002 ² , 1.5.2.13)
$\alpha, \alpha^{\text{th}}$	Temperaturausdehnungskoeffizient. Für Schienen wird davon ausgegangen, dass $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

1 Geändert bzw. korrigiert durch EN 1990:2002/A1:2005 und EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

2 Geändert bzw. korrigiert durch EN 1990:2002/A1:2005 und EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

δ_B	axiale Verschiebung des Brückenüberbaus aufgrund von Anfahr- oder Bremskräften
δ_h	Längsverschiebung aufgrund der Starrkörperverschiebung des Pfeilers (siehe Bild 2)
δ_p	Längsverschiebung aufgrund der Biegung des Pfeilers (siehe Bild 2)
δ_V	axiale Verschiebung des Brückenüberbaus aufgrund vertikaler Belastung
$\delta_{\theta D}, \delta_{\theta R}$	Verschiebungen aufgrund Verdrehung des freien Endes des Überbaus
δ_φ	Längsverschiebung aufgrund der Verdrehung des Fundamentes des Pfeilers (siehe Bild 2)
λ	Verhältnis von Stützweite (L_S) zur Konstruktionshöhe des Brückenüberbaus
θ_{TD}	Rotationswinkel des freien Endes des Brückenüberbaus aufgrund eines Temperaturunterschieds

5 Beschreibung der technischen Aufgabenstellung

5.1 Allgemeines

Die Interaktion zwischen der Gleiskonstruktion und dem Brückentragwerk (d. h. die Auswirkungen des Verhaltens einer dieser Konstruktionen auf die andere) tritt auf, weil sie physisch miteinander verbunden sind, ungeachtet dessen, ob die Schienen direkt befestigt sind oder ob es ein Schotterbett zwischen Gleis und Brücke gibt. Die Interaktion führt dazu, dass Kräfte auf das Gleis (Schienen, Befestigungen und Schotter) und die Brückenunterkonstruktion (Gründungen, Pfeiler, Widerlager, Lager) aufgebracht werden. Diese Kräfte treten zusätzlich zu den bei einer gesonderten Analyse von Gleis und Brücke zu erwartenden Kräften auf.

Falls diese zusätzlichen Kräfte zu hoch sind, kann das zu Versagensarten führen, einschließlich Schienenbruch, seitlicher Verwerfung des Gleises, Scherversagen von Brückenlagern, Versagen der Unterkonstruktion der Brücke in Längsrichtung oder Abheben von Gleiselementen. Diesen Kräften muss bei der Beurteilung sowohl des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit (GZG) als auch des Grenzzustands der Tragfähigkeit (GZT) des Tragwerks Rechnung getragen werden, obwohl nur GZG-Bedingungen bei der Berechnung der Schienenspannungen (siehe 9.3 und 9.4) berücksichtigt werden sollten.

Grundsätzlich bevorzugen Oberbauingenieure Brücken, die so bemessen sind, dass der Einfluss der Brücke auf das Gleis auf ein Minimum reduziert wird. Bestehende und vorgeschlagene Normen und Vorschriften legen maximale Grenzwerte für Spannungen, Kräfte und Verformungen fest. Bei spezifischen Projekten kann die bevorzugte Bemessungspraxis darauf abzielen, Werte zu erreichen, die deutlich unterhalb dieser Grenzwerte liegen.

In der Vergangenheit wurde das Problem der Gleis-Tragwerk-Interaktion jedoch gelöst, indem auf längeren Brücken Schienenauszüge in der Nähe der Bewegungsfugen eingebaut wurden. Schienenauszüge sind in Installation und Instandhaltung teuer, besonders auf Hochgeschwindigkeitsstrecken, auf denen die an Schienenstößen mit Imperfektionen auftretenden Stoßkräfte zur Zerstörung des Gleises und des Tragwerks führen. Bei vielen innerstädtischen Eisenbahnen ist es nötig, die Anzahl der Schienenauszüge zu verringern, um eine Lärmquelle zu beseitigen, auch wenn die Geschwindigkeiten der Züge geringer sind.

Die Lösung dieses bestehenden Interessenkonfliktes zwischen Brückenbau- und Oberbauingenieur*innen muss auf dem Verständnis der wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Lösungsansätze gründen. Auf dem einfachsten Niveau erfordert das ein Verständnis der relativen Bau- und Instandhaltungskosten für z. B. das Installieren von Schienenauszügen im Vergleich zur Änderung des Brückentragwerks (z. B. Längssteifigkeit der Unterkonstruktionen) und/oder das Akzeptieren höherer beim Betrieb auftretenden Spannungen in den Schienen. Aus den Änderungen an der Detailplanung oder sogar der Gesamtkonfiguration von Brückentragwerken können jedoch noch größere ökonomische Vorteile erwachsen.

Um die Instandhaltungskosten zu verringern, werden die Gleise heutzutage so bemessen, dass in den Schienen und einigen anderen Bauteilen niedrigere Spannungen auftreten als noch vor einigen Jahren. So war es beispielsweise bei den Gleisen der meisten europäischen Hauptstrecken vor 50 Jahren üblich, Schienen von 50 kg/m bis 56 kg/m mit Schwellen im Abstand von 650 mm bis 700 mm zueinander zu verwenden. Bei gleichen maximalen Achslasten verwenden dieselben Eisenbahnen nun Schienen von 60 kg/m aus Stahl von höherer Festigkeit und mit Schwellen im Abstand von 600 mm bis 650 mm zueinander. Das bedeutet, dass es einen größeren Spielraum zwischen den Schienenspannungen im Betrieb und den Grenzbedingungen bei Versagen gibt.

Vielen der in diesem Bericht beschriebenen Fälle liegt das Prinzip zugrunde, dass es an einigen kritischen Stellen wünschenswert sein kann, diesen Spielraum zu nutzen, indem höhere beim Betrieb auftretende Spannungen in durchgehenden Schienen zugelassen werden (bei gleichzeitiger Akzeptanz einer kürzeren Lebensdauer der Schiene), um den Einbau von Schienenauszügen zu verhindern.

5.2 Axiale Effekte

5.2.1 Ursprung von axialen Kräften und Verschiebungen

Es wird in diesem gesamten Technischen Bericht davon ausgegangen, dass zu berücksichtigende Gleiskonfigurationen ebenfalls dort verwendet werden können, wo keine Brücke vorhanden ist, z. B. bei Erdbauwerken usw. und dass in diesen Situationen das Gleis in zulässiger Weise funktioniert. Dem liegt auch das Verständnis für die Tatsache zugrunde, dass Temperaturänderungen nicht dazu führen, dass sich lückenlos verschweißte Gleise (CWR, en: Continuous Welded Rail) ausdehnen oder zusammenziehen. Die Länge von lückenlos verschweißten Gleisen bleibt bei Temperaturänderung gleich, weil der Durchschubwiderstand in Längs- oder Querrichtung, der durch den Schotter oder die Feste Fahrbahn erzielt wird, die Bewegung des Gleises verhindert. Der Spannungszustand in der Schiene ändert sich selbstverständlich temperaturabhängig.

Der Hauptzweck dieses Berichts besteht darin, zusätzliche Kräfte und Verformungen zu berücksichtigen, die an Brücken auftreten, insbesondere die Längskräfte infolge von sämtlichen Einwirkungen, durch deren Wirkung sich der Spalt an konstruktiven Bewegungsfugen öffnen oder schließen kann. Ursächlich können sein:

- Temperaturänderungen (mittlere Temperatur und Temperaturgradienten);
- Aufbringung von Anfahr- und Bremskräften;
- Aufbringung von vertikalen Kräften;
- Kriechen und Schwinden von Betonelementen.
- Bewegung des thermischen Festpunkts, z. B. aufgrund einer setzungsbedingten Verdrehung der Pfeilergründungen.

5.2.2 Kraftübertragung zwischen dem Gleis und den Enden des Überbaus

Im Text der vorgeschlagenen Überarbeitung von EN 1991-2 zeigt Bild E.4 die Kennlinien des k -Werts, welcher der Verschiebewiderstand des Gleises in Längsrichtung (Kraft pro Meter) ist, der vom Gleis auf den Überbau oder in den Oberbau übertragen wird, aufgetragen über der relativen Längsverschiebung u zwischen dem Gleis und dem Überbau oder dem Oberbau. Dies wird als elastisch-plastische Funktion dargestellt, es muss aber zur Kenntnis genommen werden, dass dies eine starke Vereinfachung der gemessenen und über der relativen Verschiebung u angetragenen Kennlinien von k zu Berechnungszwecken darstellt. Es wird darauf hingewiesen, dass der Parameter k in der jüngeren Vergangenheit mitunter für die allgemeine Kraft verwendet wird (wie in UIC 774-3R, Bild 5) und noch häufiger speziell für den Plateauwert der Kraft. Daher wurde der Begriff „ k -Funktion“ übernommen, um den Längsverschiebewiderstand des Gleises über den elastisch-plastischen Bereich darzustellen und k wird für den Plateauwert verwendet.

Die Werte von k und u_0 sind in Tabelle E.1 festgelegt. Die Tatsache, dass diese Werte für Schotteroberbau und Feste Fahrbahn in derselben Tabelle enthalten sind, verschleiern das sehr unterschiedliche Verhalten zwischen diesen beiden Fällen. Bei einem (nicht belasteten) Schotteroberbau kennzeichnet u_0 die Relativbewegung, wenn die Schwellen beginnen, sich im Schotter zu bewegen. Der Schotter schert auf Höhe der Unterseite der Schwelle ab und der Schotter zwischen den Schwellen wird mit den Schwellen bewegt. Bei einer Festen Fahrbahn, tritt die Relativbewegung in den Schienenbefestigungen auf und bei größeren Bewegungen gleitet die Schiene durch die Befestigungen. Das Gleiten in den Befestigungen kann bei belastetem Schotteroberbau auftreten, wenn der Verschiebewiderstand des Schotters größer ist als der Durchschubwiderstand der Befestigung.

5.2.3 Schienenspannungen

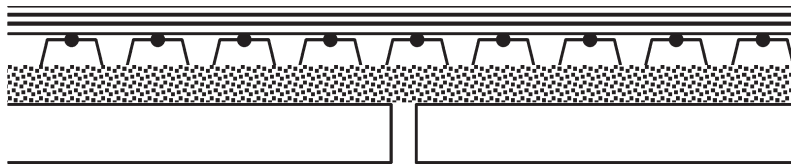


Bild 3 — Typische Gleiskonfiguration über einer Fuge

Bild 3 zeigt schematisch eine typische Situation, in der eine durchgehende Schiene über einer Diskontinuität im Tragwerk befestigt wird. Dabei können hohe örtliche Schienenspannungen erzeugt werden, prinzipiell durch zwei Mechanismen:

- Öffnen und Schließen der Fuge durch axiale Verschiebung der Enden des Brückenüberbaus, oder
- Bewegung der Fuge aufgrund Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus.

Das thermische Ausdehnen oder Zusammenziehen des Tragwerks führt prinzipiell zu Längsverschiebungen der freien Enden der tragenden Bauteile, wobei sich der Spalt an der Fuge öffnet oder schließt.

Das Verhältnis zwischen der Bewegung der Fuge und der Spannung in der Schiene ist abhängig von der elastischen oder nichtelastischen (z. B. Gleiten) Schersteifigkeit der Komponenten zwischen Schiene und Tragwerk. In qualitativem Sinne wird dieses Verhalten sehr gut von Oberbauingenieuren verstanden, weil es grundlegend für die Bemessung des lückenlosen Gleises unter Berücksichtigung der seitlichen Gleislagestabilität (d. h. Widerstand gegen Verwerfung) ist. Brückenbauingenieure sind weniger damit vertraut.

Wenn es genug Spielraum für die relative Bewegung zwischen Brücke und Schiene gibt, wird sich die Brücke mit Temperaturänderungen ausdehnen und zusammenziehen und die Schiene wird einfach in Position bleiben, ohne Verschiebung und ohne Spannungsänderung. Wenn es nicht „genug“ Spielraum für die relative Bewegung zwischen Brücke und Schiene gibt, wird die Schiene durch den sich bewegenden Brückenüberbau mitgezogen. Unter diesen Umständen wird die relative Verschiebung zwischen Schiene und Brückenüberbau verringert, aber die absolute Verschiebung der Schiene wird erhöht. Aufgrund der Bewegung der Fuge wird eine zusätzliche Dehnung auf die Schiene aufgebracht (gleich dem Anstieg der Kurve der absoluten Schienenverschiebung in Abhängigkeit von der Position entlang der Schiene) und das führt zu einer zusätzlichen axialen Spannung in der Schiene. Dieser Mechanismus ist in Bild 4 dargestellt.

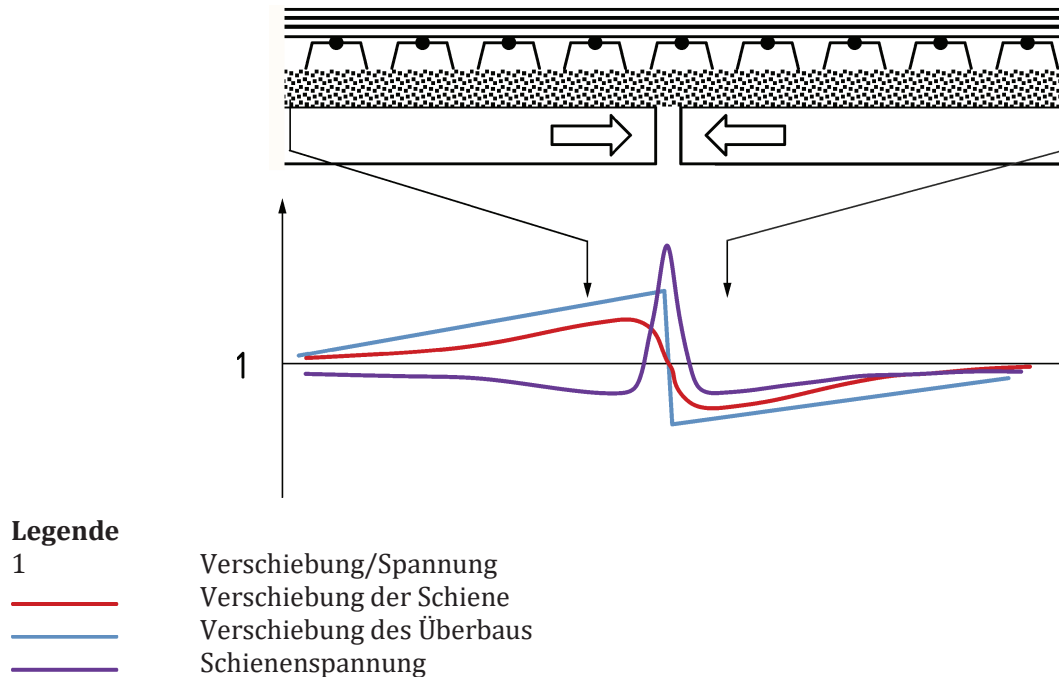
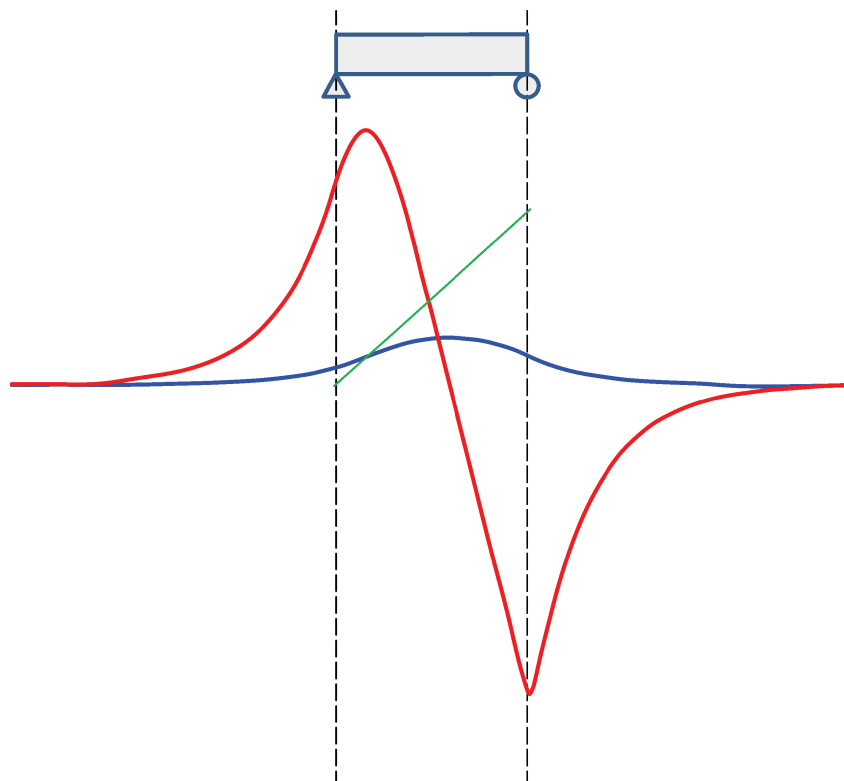


Bild 4 — Auswirkung von Fugenbewegungen in Längsrichtung auf die Schienenspannung

Für die Erstellung jeder Art von Berechnungsmodell ist es notwendig, dieses Verhalten mathematisch zu beschreiben. Die meisten Modelle stellen das Verhalten mit einer einfachen bilinearen (elastisch-plastisch) Kraft-Verschiebung-Kurve, wie in 8.1 beschrieben, dar, d. h. es wird angenommen, dass die Längsverschiebung der Schiene (linear und elastisch) zur aufgebrachten Kraft zunimmt, bis sie eine kritische relative Verschiebung, u_0 erreicht, ab der die Schiene mit einer konstanten Widerstandskraft k durch das Befestigungssystem rutscht. Die Auswirkungen auf die Berechnungen zur Tragwerksplanung werden eingehender in 10.2 dieses Berichts berücksichtigt.

Die bilineare Darstellung ist eine nützliche Annäherung, aber das wahre Verhalten der Gleisbauteile ist viel komplexer. Die Bauteile, die sich auf das Verhalten auswirken können, umfassen Schienenbefestigungssysteme, besohlte Schwellen oder Unterschottermatten und den Schotter selbst.

Für ein reales Brückentragwerk kann die Verteilung der Schienenspannung aus den ersten Prinzipien berechnet werden, die für die numerische Analyse das Gleis, die Brücke und die Verbindung zwischen ihnen als eine einzige Konstruktion behandeln. Bild 5 stellt eine übliche Form der axialen Spannungsverteilung in der Schiene bei einer einfachen Einfeldbrücke dar. Ein anzumerkender Punkt ist, dass obwohl die Verschiebungen des Überbaus auf die Länge der Brücke begrenzt sind, die Verschiebungen und Spannungen der Schiene über einen gewissen Abstand über die Enden der Brücke hinaus beeinflusst werden.



Legende

- Schienenspannung
- Verschiebung der Schiene
- Verschiebung der Brücke

Bild 5 — Schienenspannung bei einer einfachen Einfeldbrücke aufgrund der Temperaturänderungen der Brücke

5.2.4 Auf den Festpunkt einwirkende Kräfte (z. B. Lagerkräfte)

Die Längskräfte, die durch die Lager auf den Brückenüberbau übertragen werden, sind abhängig vom Detailentwurf des Lagers, der Schersteifigkeit der Lager und der tragenden Unterkonstruktion. Im allgemeinen Sinne wird die Schersteifigkeit der Lager, die eine Bewegung in Längsrichtung zulassen mit null angesetzt, aber für präzisere Berechnungen sollte die elastische Steifigkeit einiger Arten von Verformungslagern (z. B. Elastomerlager) berücksichtigt werden.

Die Steifigkeit K des Auflagers einschließlich seiner Gründung wird in Bezug auf die Verschiebung entlang der Längsachse der Brücke, die durch eine horizontale Kraft F verursacht wird, angegeben durch

$$K = \frac{F}{\sum \delta_i}$$

Dabei ist $\sum \delta_i$ die Summe der horizontalen Verschiebungen aufgrund elastischer Schubverformung des Lagers, Verschiebung und Biegung des Pfeilers (siehe 3.7).

5.2.5 Interaktion mit der Unterkonstruktion

Auf die Unterkonstruktion wirkende Kräfte werden durch das Vorhandensein oder Fehlen von Schienenauszügen, die Steifigkeit des thermischen Festpunkts und eine Anzahl anderer Parameter beeinflusst. Um den Anforderungen an das Vermögen zur Aufnahme von Längs Kräften zu entsprechen, muss die Unterkonstruktion eine hohe Längssteifigkeit aufweisen. Bei den Widerlagern beruht ein Großteil der Steifigkeit auf der Hinterfüllung (insbesondere, wenn die Längsbewegung in Richtung der Hinterfüllung erfolgt), und dies muss unter Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Zug und Druck quantifiziert werden. Im Bereich der fern der Widerlager liegenden Innenfelder eines Überbaus müssen der Festpfeiler und seine Gründungen für die nötige Steifigkeit bemessen sein, und das kann die Verwendung von A-Böcken (en: A-frames) oder schubsteifen Scheiben erfordern.

Die Steifigkeit des Bodens kann auch von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen und kann bei dynamischen Lastfällen, z.B. bei Zugbremsungen, höher sein. Bei größeren Brücken sollte dieser Faktor von Geotechnikern festgelegt und bei jeder Analyse berücksichtigt werden.

5.3 Vertikale Effekte

5.3.1 Auswirkung von vertikalen Kräften und Verschiebungen

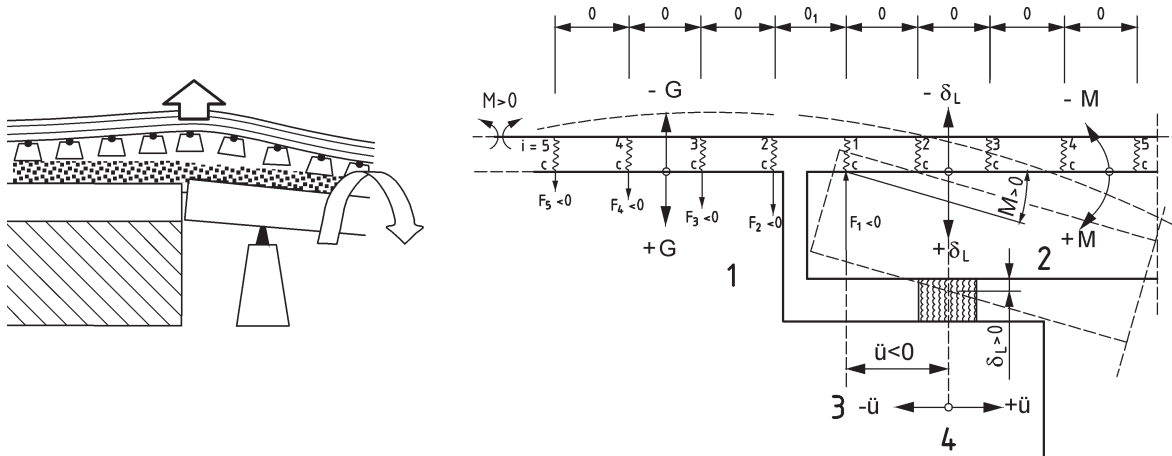
Die axialen Kräfte und Schienenspannungen werden durch die auf das Gleis aufgebrachten vertikalen Lasten und die daraus resultierenden Kräfte vom Gleis auf den Überbau beeinflusst. Die Auswirkungen, die durch auf das Gleis aufgebrachte Lasten hervorgerufen werden, sind die gleichen wie außerhalb der Brücke, d. h. sie tragen nicht zur zusätzlichen Spannung nach 3.2 bei. Die Brückenbemessung für vertikale Lasten basiert jedoch im Allgemeinen auf spezifischen Lastmodellen, die im Eurocode definiert sind (z. B. „Lastmodell 71“ als ein Modell, das die Verkehrsbedingungen auf europäischen Hauptstrecken darstellt), während die Gleisfestigkeit außerhalb von Brücken bestimmt werden kann, indem andere Annahmen bezüglich der aufgebrachten vertikale Lasten getroffen werden (z. B. „Kategorien der Schienenbefestigung“ in der Normenreihe EN 13481). Die beiden Ansätze ergeben ähnliche, aber nicht notwendigerweise identische Ergebnisse.

Die Auswirkungen der Kräfte vom Gleis auf den Überbau müssen berücksichtigt werden. Insbesondere die Verdrehungen der Überbauenden müssen berechnet werden, um $\delta_{\theta D}$ und $\delta_{\theta R}$ zu bewerten. Diese Auswirkungen können überall auf der Brücke beobachtet werden. Die Auswirkungen sind an den freien Enden des Überbaus am signifikantesten.

5.3.2 Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus

An den freien Überbauenden führt die Biegung der Brücke unter vertikaler Belastung durch einen Zug und unter vertikalem Temperaturgradienten zu einer Relativverdrehung der tragenden Bauteile. Die Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus führt zu einer vertikalen und horizontalen Bewegung (siehe Bild 6). In diesem Fall, wenn die Schiene über die Bewegungsfuge durchläuft, ist die Spannung in der Schiene und anderen Gleisbauteilen abhängig vom Widerstand des Gleises gegen Abheben und von der Biegesteifigkeit der Schienen. Die zusätzlichen Biegespannungen in der Schiene werden vernachlässigt, aber bei Fester Fahrbahn müssen die Auswirkungen der Abhebekräfte auf das Schienenbefestigungssystem berücksichtigt werden. Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Biegespannung vor dem ersten Rad aufgrund dieser Wirkung in die entgegengesetzte Richtung zur Biegung aufgrund der Masse des Zuges verläuft. Im Fall von Schotteroberbau ist der Abhebewiderstand einfach die Kraft, die erforderlich ist, um das Gleis (Schienen, Schwellen usw.) aus dem Schotter zu heben. Diese Einwirkung kann zur Zerstörung des Schotters führen. Für Feste Fahrbahn ist dies von den Abhebeeigenschaften des Schienenbefestigungssystems abhängig. Der Mechanismus des Abhebens ist in Bild 6 dargestellt.

Grundsätzlich sollte die Auswirkung der Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus unter Verwendung des vertikalen Lastfalls berechnet werden, der auch für die allgemeinen Berechnungen zur Brückenbemessung angewendet und an der ungünstigsten Stelle angeordnet wird. In der Praxis können ausreichend präzise Analysen üblicherweise unter Verwendung einer gleichförmig verteilten Last z. B. 80 kN/mm anstelle des Lastmodells 71 durchgeführt werden.



Legende

- 1 Widerlager
- 2 Brückenüberbau
- 3 Position der letzten Schienenbefestigung auf dem Überbau
- 4 Achse des Brückenlagers
- $\delta = \delta_L + \varphi \cdot \ddot{u}$

Bild 6 — Wirkung der Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus

5.4 Abgrenzung der Erfordernisse einer detaillierten Berechnung

Es ist die unterschiedliche Bewegung zwischen Gleis und Konstruktion, die die zusätzlichen Spannungen erzeugt. Bei kurzen Auszugslängen an steifen Brücken ist die Bewegung an Bewegungsfugen sehr gering und daher ist es nicht notwendig, am Gleis irgendwelche Maßnahmen zur Minderung der Schienenspannungen vorzunehmen. Es besteht keine allgemeine Einigkeit über die Definitionen von „kurzen“ und „steifen“ Brücken, aber auf der Grundlage langjähriger Erfahrung fordern die meisten Eisenbahnverwaltungen keinen Einbau von Schienenausügen an Brücken mit Auszugslängen unter einem festgelegten Wert – üblicherweise etwa 30 m. Es wird daher vorgeschlagen, dass detaillierte Berechnungen für Deckbrücken mit Schotteroberbau mit wirksamen Auszugslängen L_j unter 30 m nicht erforderlich sind. Für diese Fälle können die Lagerkräfte mit ausreichender Genauigkeit unter Anwendung des „vereinfachten Verfahrens“ nach EN 1991-2:2003, 6.5.4.6.1 berechnet werden.

Jüngere Erfahrungen lassen darauf schließen, dass sogar bei einer Auszugslänge von mehr als 30 m ein lückenlos verschweißtes Gleis ohne den Einbau von Schienenausügen sicher verwendet werden kann, dass jedoch mit steigender Auszugslänge größere Sorgfalt bei der Bemessung aufgewendet werden muss. Für Brücken mit Schotteroberbau mit lückenlos verschweißtem Gleis auf einem einzelnen Überbauabschnitt und mit einer effektiven Auszugslänge L_j von mehr als 30 m, aber weniger als 60 m bei Stahlbrücken oder 90 m bei Betonbrücken, ist es noch nicht notwendig, detaillierte Berechnungen für die Schienenspannungen durchzuführen, es ist aber eine detailliertere statische Berechnung erforderlich, um die Lagerkräfte und die Steifigkeitsanforderungen zu bestimmen.

Bei längeren Brückenüberbauten ist es erforderlich, detaillierte Berechnungen für Schienenspannungen und Lagerkräfte durchzuführen und die Verwendung von Detaillösungen zu erwägen, die bei der Bemessung dazu genutzt werden können, die Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion abzumindern.

Bei sehr langen Auszugslängen gibt es keine Alternative zur Verwendung von Schienenausügen. Auf UIC 774-3R basierende Berechnungen weisen darauf hin, dass die Spannungen in lückenlos verschweißten Gleisen wahrscheinlich die maximalen Grenzwerte, ungeachtet von Maßnahmen zur Abminderung, überschreiten, wenn die wirksame Auszugslänge L_j größer als etwa 140 m ist. In diesem Fall werden an mindestens einer Bewegungsfuge Schienenausüge notwendig. Falls L_j für jede Bauwerksbewegungsfuge größer als 140 m ist, sind Schienenausüge an jeder Brückenfuge notwendig und eine detaillierte Analyse der Schienenspannung ist nicht notwendig (siehe 8.3.2).

Für Feste Fahrbahnen gelten dieselben Grundsätze, aber es stehen weniger Erfahrungswerte zur Verfügung, um eine Grundlage für die Empfehlung bestimmter Werte für die Auszugslänge abzugeben, oberhalb derer eine detailliertere Berechnung erforderlich ist. Einige der Fallstudien in Abschnitt 7 dieses Technischen Berichts legen nahe, dass die Begrenzung von Auszugslängen für Betonbrücken mit Festen Fahrbahnen möglicherweise denjenigen für Schotteroberbau auf Stahlbrücken ähnelt.

Bei steifen Brücken mit kurzen Spannweiten können die Auswirkungen der Endverdrehung des Brückenüberbaus vernachlässigt werden. Wenn die vertikale Verformung in Feldmitte weniger als $L_s/3\,000$ beträgt, wie dies bei Hochgeschwindigkeitsbrücken erforderlich ist (siehe 5.6.1), ist im Allgemeinen der Verdrehwinkel am Überbauende sehr klein und falls die Lagerposition nahe am freien Überbauende liegt (d. h. es gibt einen sehr geringen Überstand) können die sich daraus ergebenden Verschiebungen vernachlässigt werden.

5.5 Berechnung mehrkomponentiger Belastungssituationen

In den Vorschriften für die Analyse der Gleis-Tragwerk-Interaktion gibt es mehrere Lastfälle (Temperaturauswirkungen, Anfahr- und Bremswirkung, Wirkungen der Überbaudurchbiegung usw.), die kombiniert werden müssen, um das Gesamtverhalten zu beurteilen. Eine Alternative ist, jeden Fall als unabhängige Wirkung zu analysieren und dann eine einfache lineare Überlagerung anzuwenden, um die Ergebnisse zu kombinieren. Diesem Ansatz wird in EN 1991-2:2003 zugestimmt.

Ein weiterer Ansatz ist, eine strengere Analyse durchzuführen, die der Nichtlinearität Rechnung trägt. Bei diesem Ansatz werden die Einwirkungen in der Reihenfolge ihres Auftretens berücksichtigt und das Endergebnis aus der Analyse der einen Einwirkung wird die Anfangsbedingung für die Analyse der nächsten Einwirkung. Diese Analysen werden üblicherweise mit nichtlinearer Spezialsoftware durchgeführt, gute Ergebnisse können aber mit Tabellenkalkulationen (siehe Anhang B) erzielt werden.

Der Vergleich der zwei Ansätze an Viadukten auf deutschen Hochgeschwindigkeitsstrecken hat ergeben, dass dieses zweite Verfahren geringere Spannungsspitzen vorhersagt als der Standardansatz mit linearer Überlagerung. Die Differenz entsteht aufgrund der Nichtlinearitäten bei der Antwort der Konstruktion auf die aufgebrachte Last. Im Allgemeinen ergibt die Anwendung der nichtlinearen Analyse niedrigere berechnete Schienenspannungen, aber höhere Lagerkräfte.

5.6 Auswirkung von Brückenverformungen

5.6.1 Auswirkung auf die Gleisgeometrie

Es sollte darauf geachtet werden die möglichen Auswirkungen der Brückenverformung auf die Gleisgeometrie zu überprüfen, insbesondere die Möglichkeit von Gleisverwindung und Überhöhungsdifferenzen bei schiefwinkligen Brücken und Brücken im Gleisbogen. Annehmbare Toleranzen für neuen (oder vor kurzem erneuerten) belasteten Schotteroberbau sind in EN 13231-1:2013, Tabelle 1 und in EN 1990:2002³, A.2.4.4.2.2 angegeben. Im Rückschluss bedeutet das, dass wenn ein Teil der Toleranz zur Aufnahme von Brückenverformungen erforderlich ist, ist es notwendig sicherzustellen, dass andere Auswirkungen, wie Konstruktionstoleranzen und die Verformung des Gleises selbst verringert werden, um ein akzeptables kombiniertes Systemverhalten zu erreichen.

Es sollte zur Kenntnis genommen werden, dass im Eurocode (EN 1990:2002⁴) als eine allgemeine Anforderung die maximale Vertikalverformung des Brückenüberbaus in Feldmitte auf $L_s/600$ begrenzt wird, aber in EN 1990:2002⁵, Anhang A.2, engere Grenzwerte, z. B. $L_s/3\,000$ für Hochgeschwindigkeitsstrecken,

3 Geändert bzw. korrigiert durch EN 1990:2002/A1:2005 und EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

4 Geändert bzw. korrigiert durch EN 1990:2002/A1:2005 und EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

5 Geändert bzw. korrigiert durch EN 1990:2002/A1:2005 und EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010.

hauptsächlich auf Grundlage von Kriterien des Reisendenkomforts, enthalten sind. Diese Werte werden gegenwärtig überprüft und zukünftige Normen könnten engere Beschränkungen zu maximalen Verformungen erfordern, insbesondere für Hochgeschwindigkeitsstrecken.

5.6.2 Auswirkung auf die Stabilität des Schotteroberbaus

Im Fall des Schotteroberbaus können sich Brückenverformungen auch auf das Risiko von seitlicher Instabilität des Gleises auswirken. Es bestehen keine speziellen Anforderungen im Eurocode, diesem Risiko Rechnung zu tragen, aber es wird in einigen nationalen Vorschriften behandelt. Zum Beispiel ist in Deutschland die Längsverschiebung einer Brücke mit Schotteroberbau unter Bremslasten auf 4 mm begrenzt.

Das ist ein besonderes Problem bei Diskontinuitäten des Überbaus. Weiterführende Informationen können dem Merkblatt UIC 776-2 entnommen werden.

Es ist auch wichtig zur Kenntnis zu nehmen, dass Änderungen in der Gleiskonfiguration nicht nur dann wichtig sein können, wenn sie auf der Brücke auftreten, sondern auch wenn sie nahe der Brücke auftreten. Wenn zum Beispiel eine zweigleisige Eisenbahnstrecke sich über eine Brücke hinweg auf ein Gleis verengt, kann die Lage der Weichen signifikant sein: An der Weiche wird die Axialkraft von zwei Gleisen (vier Schienen) in ein einzelnes Gleis (zwei Schienen) übertragen. Wenn das Gleis auf der eingleisigen Seite der Weiche ausreichend lang ist, wird die zusätzliche Kraft durch Schubübertragung über den Schotter abgeleitet, aber wenn die Weiche zu nah an der Brücke ist, kann die größere Kraft in der Schiene über der Bewegungsfuge des Brückenendes weiterhin erheblich sein.

5.6.3 Auswirkung der Zerstörung des Schotters über Bauwerksfugen

Wiederholte Bewegung von Bauwerksfugen und Überbauenden können die Zerstörung oder Wanderung des Schotters bewirken, was langfristig zu einem Verlust der vertikalen und seitlichen Gleisgeometrie führt, sofern als Abhilfe keine Instandsetzungsarbeiten ausgeführt werden. Falls nicht möglich ist, große Bewegungen der Fugen zu verhindern, können besondere Maßnahmen erforderlich sein, um sicherzustellen, dass der Schotter zurückgehalten wird (siehe 8.2.2).

In Eurocode EN 1991-2:2003 gibt es eine Anforderung, sicherzustellen, dass die Bewegung in Längsrichtung über einer Fuge der Brücke aufgrund von Anfahr- und Bremskräften, δ_B , 5 mm nicht überschreitet. Dieser Zahlenwert wurde aufgenommen, um die Auswirkung der Bewegung der Brückenüberbauenden auf die Zerstörung des Schotters zu begrenzen. Aus demselben Grund, gibt es eine Anforderung, die Bewegung über einer Fuge, die aus der vertikalen Biegung des Brückenüberbaus, δ_V , resultiert, auf 8 mm zu begrenzen. Diese Zahlenwerte erweisen sich als erhebliche Einschränkungen für die Bemessung von Brücken mit langen Stützweiten auf Hochgeschwindigkeitsstrecken. Insbesondere zwei Fragen werden aufgeworfen:

Erstens, wenn die vertikale Biegung auf Hochgeschwindigkeitsstrecken aus Gründen wie dem Reisendenkomfort begrenzt wird (siehe vorstehend 5.6.1), ist es unwahrscheinlich, dass der δ_H -Grenzwert von 8 mm jemals erreicht wird. Es gibt daher ein starkes Argument, den Gedanken zu unterstützen, dass es anstatt der Forderung, dass $\delta_B < 5$ mm und $\delta_H < 8$ mm sind, eine Anforderung geben könnte, dass $(\delta_B + \delta_H) < 13$ mm und $\delta_H < 8$ mm sind.

Zweitens gibt es ein Argument für die Änderung dieser Anforderungen an Brücken, die für Feste Fahrbahn entworfen wurden, bei denen die Zerstörung des Schotters kein Thema ist. Die gegenwärtigen Grenzwerte beruhen auf annehmbaren Bewegungen im Schotter. Logischerweise gibt es Grenzwerte für die Größe der Bewegung, die an Befestigungssystemen für Feste Fahrbahn annehmbar ist, aber diese wurden noch nicht quantifiziert. Für Standard-Befestigungsmittel können die Grenzwerte strenger sein als bei Schotteroberbau, es können jedoch spezielle Befestigungssysteme verwendet werden, um viel größere Verschiebungen aufzunehmen.

Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts gibt es unzureichende Nachweise, um zu bestätigen, dass eine dieser vorgeschlagenen Änderungen zur Bemessung sicherer Tragwerke und instandhaltbarer Gleise führen würde und darüber hinaus sind keine Daten verfügbar, die als Basis für die Anwendung unterschiedlicher Bedingungen für Feste Fahrbahn dienen können. Daraus folgt, dass diesbezüglich keine Änderungen in die Empfehlungen für die nächste Überarbeitung des Eurocode in Anhang E aufgenommen wurden. Das bleibt ein Bereich, in dem es Spielraum für die zukünftige Überarbeitung des Eurocode oder für die Anwendung von Ausnahmen vom Eurocode gibt, falls und sobald in Zukunft bessere Nachweise verfügbar werden.

5.7 Auswirkungen auf die Gleiskonstruktion und Instandhaltungsmaßnahmen

Wenn das Gleis zuerst auf der Brücke verlegt wird, sollten die Schienen, insbesondere bei Fester Fahrbahn, mit einer spannungsfreien Temperatur eingebaut werden, die der Temperatur des Brückentragwerks zu dem Zeitpunkt Rechnung trägt. Idealerweise sollte die Schienenspannung für die übliche (nationale) spannungsfreie Temperatur auf null eingestellt werden, wenn sich die Brücke in ihrer Nullposition (z. B. spannungsfreie Temperatur in Nordeuropa von 23 °C bis 27 °C, wenn die Brückentemperatur bei etwa 10 °C liegt) befindet.

Es sollten Schritte unternommen werden, um die Anordnung von Schienenschweißungen im Bereich von Bewegungsfugen, wo die Schienenspannungen aufgrund der aus der Gleis-Tragwerk-Interaktion resultierenden Kräfte erwartungsgemäß hoch sind, zu verhindern.

Einige Gleisinstandhaltungsmaßnahmen können zu temporären Änderungen der durch die Gleis-Tragwerk-Interaktion bedingten Kräfte führen. Wenn die Schienen z. B. vor dem Austausch von Schienen oder der Gleiserneuerung geschnitten werden, kann sich das auf die Lagerkräfte der Brücke auswirken.

6 Geschichte und Hintergrund

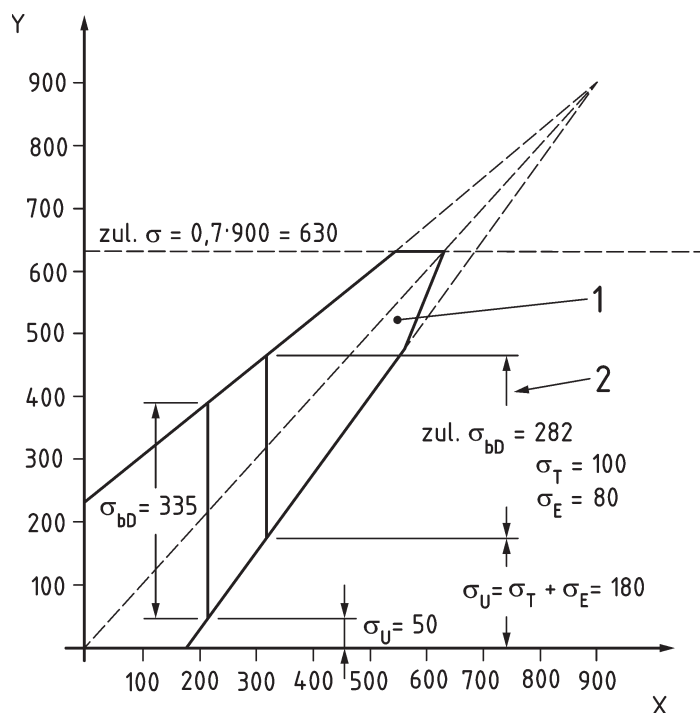
6.1 Bestehende Vorschriften und Normen

Im Grunde wird die gegenwärtige Praxis in Europa von der Norm EN 1991-2:2003, 6.5.4, bestimmt, die wiederum auf dem Merkblatt UIC 774-3R beruht, das zuletzt im Jahr 2001 durch die UIC überarbeitet wurde. Einige Einblicke in die Hintergründe der Erarbeitung dieser Planungsdokumente geben ein Aufsatz, der von Forschern der TU Delft im Jahr 1990 veröffentlicht wurde (siehe [1]), sowie die (inzwischen überholte) Brückenplanungsvorschrift DS 804 der Deutschen Bahn (siehe [2]).

Die Bemessungsnormen (EN 1991-2 und DS 804) und die Anwendungsvorschrift (UIC 774-3R) beruhten auf konventionellen Brücken- und Gleiskonfigurationen, d. h. Brücken mit „festen“ oder „beweglichen“ Lagern auf steifen Pfeilern, die Gleise mit Betonschwellen im Schotteroberbau tragen. Wenn neuere Entwicklungen, wie die Verwendung von integralen Brücken und Feste Fahrbahn zum Einsatz kommen, müssen die Planer einkalkulieren, dass sie sich auf vielerlei Arten von den Konzepten entfernen, auf denen diese Dokumente basieren.

Alle diese Dokumente enthalten die Anforderung, dass die zusätzliche axiale Spannung in der Schiene, die sich aus den Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion ergibt, unter Zugbeanspruchung 92 MPa und unter Druckbeanspruchung 72 MPa nicht überschreiten sollte. Diese Grenzwerte gelten für den sehr spezifischen Fall eines Schotteroberbaus mit „schweren“ Betonschwellen in Abständen von 650 mm und UIC60-Schiene mit einer Festigkeit von mindestens 900 MPa (unter der Annahme, dies repräsentiere die „Standard“-Gleiskonfiguration). Es gibt jedoch keinen Leitfaden, wie mit anderen Gleiskonfigurationen zu verfahren ist. Es ist deshalb wichtig, etwas vom Ursprung dieser Zahlenwerte zu verstehen. Einige der ursprünglich verwendeten Daten wurden nun in den öffentlichen Bereich übertragen, siehe [3].

Der Ausgangspunkt für die Schätzung dieser zulässigen zusätzlichen Spannungen war das Goodman-Smith-Diagramm für die relevante Schienenart. Zur Veranschaulichung ist in Bild 7 das Diagramm für neue (wie gewalzt) Schienen mit 60E1-Profil und Stahlsorte R260 dargestellt. In [3] sind ebenfalls Daten für einen leichteren Schienenquerschnitt sowie für korrodierte und verschlissene Schienen enthalten. Allen diesen Faktoren wird bei der Auswahl der empfohlenen Grenzwerte für die Gleis- und Brückenbemessung Rechnung getragen.



Legende

X σ_u, σ_o (schwingende Beanspruchung) (MPa)

Y σ_m (Mittelspannung) (MPa)

1 zulässiger Spannungsbereich

2 zulässige Ermüdungsbiegespannung am Mittelpunkt des Schienenfußes (2×10^6 Zyklen)

Bild 7 — Goodman-Smith-Diagramm für eine 60E1-Schiene, Stahlsorte R260

Es wurde ein Schätzwert der Schienenspannungen aufgestellt, die in einem Gleis außerhalb einer Brücke für diese „Standard“-Konfiguration erwartet werden und die Ergebnisse wurden von den zulässigen Spannungen im Goodman-Smith-Diagramm subtrahiert. Nur um diesen Punkt zu unterstreichen: das Goodman-Smith-Diagramm bezieht sich auf die Werkstoffeigenschaften des Schienenstahls. Die vorhergesagte Spannung für ein Gleis außerhalb einer Brücke bezieht sich auf das Schienenprofil, den Schwellenabstand und die allgemeine Konfiguration des Gleises. Daraus folgt, dass die auf diese Weise geschätzte zulässige zusätzliche Spannung ausschließlich für diese spezielle Schienenstahlsorte und Gleiskonfiguration gilt.

Für die Standard-Gleiskonfiguration beträgt der Schätzwert der zulässigen zusätzlichen Spannung 112 MPa bei Zugbeanspruchung, wobei die potentielle Versagensart Schienenermüdung ist, und 72 MPa bei Druckbeanspruchung, wobei die potentielle Versagensart Gleisverwerfung ist. Von dem Zugspannungswert wurden weitere 20 MPa subtrahiert, was den erwarteten „ungünstigsten Fall“ für den Anstieg der axialen Spannung in der Schiene aufgrund der (vertikalen) Verformung des Brückenüberbaus darstellt. Das führt somit zu den weit verbreiteten Werten von 92 MPa bei Zugbeanspruchung und 72 MPa bei Druckbeanspruchung als zulässige zusätzliche Axialspannung in den Schienen aufgrund der Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion in Längsrichtung [4].

Die Verwendung der Näherung von 20 MPa für die Auswirkungen der Durchbiegung war wichtig, als Planer sich auf einfache eindimensionale Modelle stützten, aber mit der breiten Verfügbarkeit von zwei- und dreidimensionalen Modellierungen ist es im Allgemeinen besser, eine detailliertere Analyse durchzuführen. Es sollte zur Kenntnis genommen werden, dass bei weichen Brücken mit großen Spannweiten und bei Stabbogenbrücken der Anstieg der axialen Schienenspannung aufgrund der Brückendurchbiegung mehr als 20 MPa betragen kann.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Verwendung eines Grenzwerts von 112 MPa, wenn die Durchbiegung des Brückenüberbaus explizit berechnet wird, im Widerspruch zu den Empfehlungen nach UIC 774-3R, 17.2, steht, aber widerspruchsfrei zur Analyse nach [4] ist.

6.2 Unterschiede zwischen nationalen Vorschriften

Nationale Vorschriften für die Gleisbemessung gehen in der Regel von der Annahme aus, dass die einzige mögliche Gegenmaßnahme zur Verhinderung von Gleisversagen über Tragwerksfugen der Einbau von Schienenauszügen ist. Derartige Vorschriften sind im Allgemeinen sehr konservativ, um alle möglichen Planungs- und Instandhaltungsbedingungen für Gleise zu berücksichtigen. Im Vereinigten Königreich gibt es z. B. eine Anforderung in den Vorschriften von Network Rail (siehe [5]), dass alle Gleise auf Brücken mit Auszugslängen von mehr als 30 m mit Schienenauszügen auszustatten sind.

7 Fallstudien

7.1 Schelde-Brücke (Belgien)

Die Brücke für die Hochgeschwindigkeitseisenbahnstrecke über den Fluss Schelde bei Antoing in Belgien trägt Schotteroberbau mit lückenlos verschweißtem Gleis. Die längste Spannweite der Brücke hat eine Auszugslänge von 120 m. Für drei Fälle wurden Berechnungen unter Anwendung der Verfahren nach UIC 774-3R durchgeführt: Für lückenlos verschweißte Gleise und ohne Maßnahmen zur Minderung, für lückenlos verschweißte Gleise und Schienenbefestigungen mit einem freien Durch Schub (ZLR, en: zero longitudinal restraint) in der Nähe der Bewegungsfugen und für Gleise mit Schienenauszügen. Die Berechnungen wurden 1995 veröffentlicht, siehe [6], und zeigen deutlich, dass diese Maßnahmen zur Minderung zur Verringerung der Schienenspannungen wirksam sein würden, um eine Position gut innerhalb der Grenzwerte nach UIC 774-3R zu halten. Messungen im Feld ergaben jedoch, dass die realen Gleiskräfte viel niedriger als die vorausgesagten waren. Die Messungen ergaben ebenfalls, dass das lineare Verhältnis zwischen Gleiskräften und Temperatur, das in der Modellierung nach UIC 774-3R vorausgesetzt wurde, übermäßig konservativ ist. Schließlich wurde das Gleis auf der Brücke ohne Vorrichtungen zur Minderung installiert. Während der ersten 20 Betriebsjahre gab es keine ungewöhnlichen Instandhaltungsprobleme auf dieser Brücke.

7.2 Ausgewiesene Hochgeschwindigkeitsstrecken in Frankreich und Spanien

Die Hochgeschwindigkeitseisenbahnnetze in Frankreich und Spanien umfassen eine erhebliche Anzahl von langen Brücken mit Schotteroberbau. Aufgrund anderer Anforderungen an die Bemessung von Hochgeschwindigkeitseisenbahnen weisen derartige Brücken nur Kurven mit sehr großem Radius auf und verfügen auch über gut konsolidierte, gut instandgehaltene Gleise. Es wurde nachgewiesen, dass Brücken mit Auszugslängen von bis zu 200 m ohne Schienenauszüge zufriedenstellend funktionierten, ohne dass die Grenzwerte für die Schienenspannungen nach UIC 774-3R, siehe [7], überschritten wurden.

Auf sehr langen Viadukten wurden spanische Hochgeschwindigkeitsstrecken im Allgemeinen mit einer kleinen Anzahl von sehr großen Schienenauszügen geplant, siehe [8], von denen jede eine Schienenbewegung in Längsrichtung von bis zu 1,2 m ermöglicht.

7.3 Olifants River Brücke (Südafrika)

Die Brücke über den Olifants River auf der Eisenerzexportstrecke („OrEx“) in Südafrika trägt eine eingleisige Schwerlasteisenbahn mit Schotteroberbau mit Auszugslängen von fast 500 m. 1988 entgleiste ein Zug auf der Brücke als sich das Gleis bei heißem Wetter verwarf, siehe [9]. Dieser Fall zeigt eindrücklich, dass diese Art von Gleisversagen mehr als einen theoretischen Zustand darstellt und dass die Folgen eines derartigen Ausfalls sehr schwerwiegend sein können.

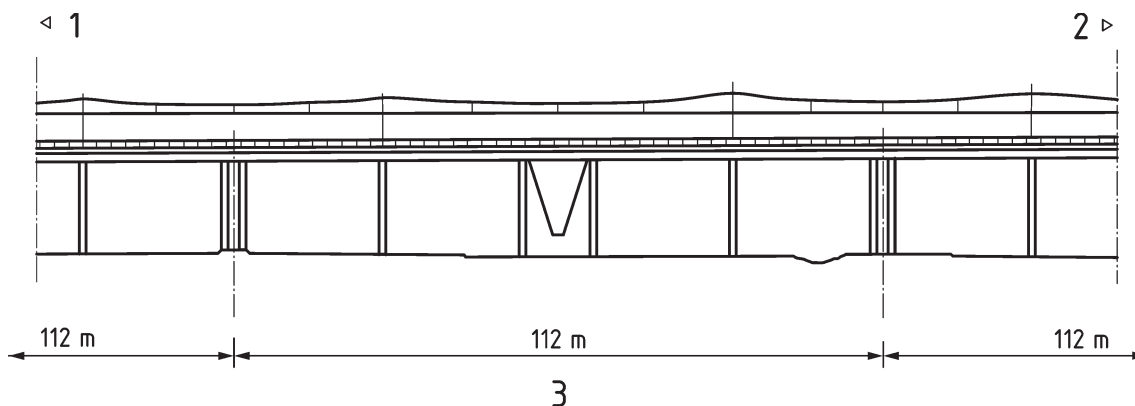
7.4 Brücken in Denver RTD (USA)

Die Details von zwei langen Light Rail-Viadukten (die „Median Flyover Bridge“ und die „Colfax Bridge“) im Denver RTD-System wurden veröffentlicht (siehe [10]) und bieten einen nützlichen Einblick in den Ansatz der Tragwerksplanung in den Vereinigten Staaten. Die beschriebenen Konstruktionen haben Auszugslängen von bis zu 220 m. Die Lagerkräfte und die Brückenbelastung wurden detailliert berechnet und die Länge des Spalts in der Schiene, der sich bei einem Bruch der Schiene ergeben würde (durch die Spezifikation auf 75 mm begrenzt) wurde viel kommentiert. Es scheint keine Anforderung an die Begrenzung der Schienenspannung bestanden zu haben und es liegen keine Berechnungen der Schienenspannung vor, d. h. die Folgen eines Schienenversagens sind detailliert berücksichtigt, aber es scheint keinen Prozess zu geben, mit dem das Risiko eines derartigen Versagens minimiert wird. Die für dieses Projekt verwendete Schiene ist jedoch „115RE“ (57 kg/m) und die maximale Radsatzlast beträgt weniger als 100 kN, so dass die Schiene über eine erhebliche Kapazität verfügt, höheren Spannungen an den Brückenfugen standzuhalten.

7.5 Historische Brücken in Mitteleuropa

Die Arbeiten, die zur Modernisierung von Gleisen auf historischen Brücken in der Tschechischen Republik ausgeführt wurden (siehe [11]), basierten auf einem Bereich von Grenzwerten für verschiedene Arten von Brücken, die ohne Schienenauszüge in einem Bereich von 20 m für direkt befestigte Gleise bis 180 m mit 65 kg/m schweren Schienen im Schotteroberbau auf Betonbrücken zulässig sind.

7.6 Semi-integrale Brücken auf deutschen Hochgeschwindigkeitsstrecken



Legende

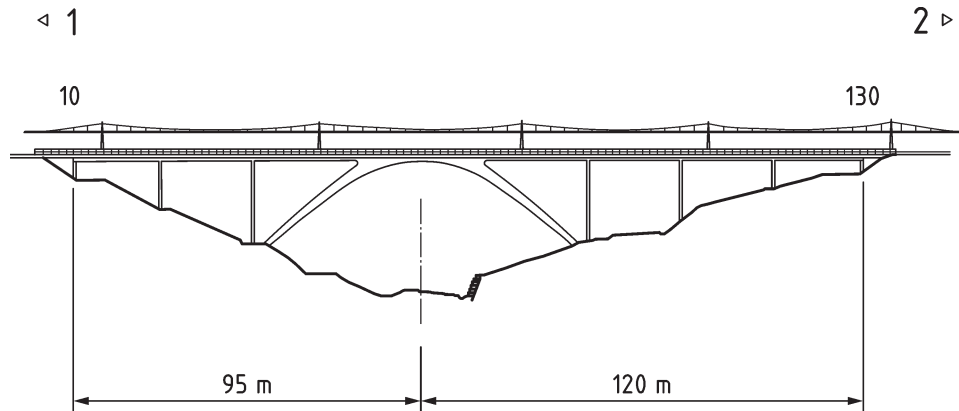
- 1 Erfurt
- 2 Leipzig
- 3 mittlerer Block

Bild 8 — Gänsebachtalbrücke

Sämtliche Einzelheiten dieser Fälle wurden vor kurzem veröffentlicht, siehe [12]. Die Gänsebachtalbrücke ist ein 1 001 m langes Eisenbahnviadukt auf der neuen Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Erfurt und Leipzig. Die Gänsebachtalbrücke ist als semi-integrale Rahmenbrücke mit Fester Fahrbahn ausgelegt. Das Thema der Gleis-Tragwerk-Interaktion war eines der wichtigsten Themen bei der Auswahl des statischen Systems in der Planungsphase der Brücke. Die Auszugslänge der durchgehenden Überbausegmente und die Längssteifigkeit der Unterkonstruktion wurden optimiert, um die zusätzlichen Schienenspannungen auf ein Niveau unterhalb der zulässigen Spannungsgrenze von 92 N/mm² zu senken.

Das Ergebnis des Bemessungsprozesses war eine Reihe von acht „mittleren Blöcken“ von jeweils 112 m und zwei „Begrenzungsblöcken“ von 52,5 m. Mit diesem Entwurf wurde die 1 001 m lange Konstruktion ohne jegliche Lager und ohne Schienenauszüge gebaut.

Diese Brücke mit ihrem sehr innovativen Design und niedrigen Instandhaltungskosten war der Gewinner des Deutschen Brückenbaupreises 2014.



Legende

- 1 Nürnberg
- 2 Erfurt

Bild 9 — Grubentalbrücke

Die Grubentalbrücke ist ein Eisenbahnviadukt, welches die Feste Fahrbahn für die neue Hochgeschwindigkeitsstrecke zwischen Nürnberg und Erfurt trägt. Die Brücke überspannt ein 215 m breites Tal. Eine Besonderheit dieser Strecke ist das Bestreben der Deutschen Bahn, innovative Brücken zu errichten, um die Dauerhaftigkeit zu verbessern, den Instandhaltungsaufwand zu verringern und um Entwürfe von hoher ästhetischer Qualität zu ermöglichen.

Die Grubentalbrücke ist eine semi-integrale Konstruktion. Ein Bogen und schlanke Pfeiler tragen den durchgehenden Überbau. Beide sind monolithisch mit dem Überbau verbunden, so dass Lager ausschließlich an den Widerlagern erforderlich sind.

Wegen der maßgebenden Auszugslänge von 120 m überschreiten die berechneten zusätzlichen Schienenspannungen den zulässigen Grenzwert von 92 N/mm², weshalb ein Schienenauszug bei Achse 130 erforderlich wäre. Um diese kostspielige Vorrichtung zu vermeiden und um eine Beeinträchtigung der Kontinuität der Schiene zu verringern, wurden spezielle Maßnahmen zur Kompensation dieser Überschreitung ergriffen:

- Überwachung der Brückentemperatur bei Verbindung der Schiene mit der Brücke;
- Senken der Neutraltemperatur der Schiene, um die Zugspannungen in der Schiene zu verringern (das Risiko von Schienenverwerfung besteht aufgrund ihrer Verbindung mit der Festen Fahrbahn nicht);
- langfristige Überwachung der Schienenspannungen, um die tatsächlichen Spannungen in der Schiene in Abhängigkeit der Zeit zu bestimmen;
- Möglichkeit, in Zukunft die Schiene von der Brücke zu entkoppeln.

8 Überlegungen zum Entwurf des Gleises

8.1 Darstellung des axialen Verhaltens des Gleises

Die Übertragung von Axialkräften zwischen der Schiene und dem Brückenüberbau ist abhängig von dem Gesamtverhalten der Gleiskonstruktion unter Belastung mit vertikaler Scherkraft. Wenn eine Messung an einem Gleisabschnitt durchgeführt wird, stellt sich heraus, dass das Verhältnis von Last zu Verschiebung üblicherweise dem in Bild 20 dargestellten entspricht. Bei Schotteroberbau wird dieses Verhältnis durch das Schotterverhalten dominiert. Bei Fester Fahrbahn ist das Verhältnis beinahe vollständig durch das Verhalten des Schienenbefestigungssystems bestimmt.

Zum Zweck der Durchführung einer Analyse wird das Verhältnis von Kraft zu Verschiebung üblicherweise durch ein einfaches bilineares Diagramm dargestellt. Die anfängliche „elastische“ Verschiebung findet bis zu einem Grenzwert von u_0 statt. Wenn die Verschiebung größer ist als u_0 wird angenommen, dass die Kraft zwischen Schiene und Brückenüberbau einen konstanten Wert k aufweist. In diesem Bericht wird k durchgängig als die Gesamtkraft in zwei Schienen je Meter Gleislänge verwendet, d. h. dieser besitzt die Einheit Kraft je Längeneinheit, ist aber KEINE Steifigkeit.

Bei langen Mehrfeldbrücken mit Oberbauarten, die niedrige Werte von u_0 aufweisen (z. B. konventionelle Feste Fahrbahn) darf eine weitere vereinfachende Annahme getroffen werden, indem ein vollplastisches Modell verwendet wird, d. h. in der Tat wird $u_0 = 0$ gesetzt. Dadurch wird ermöglicht, Berechnungen mit einem Mindestumfang an Rechenleistung (siehe Anhang B) sehr schnell auszuführen, die Anwendung sollte jedoch mit Vorsicht und ausschließlich für die Vorbemessung verwendet werden und nicht für die Beurteilung der endgültigen Bemessung.

8.2 Verstehen des Schotterverhaltens

8.2.1 Eigenschaften des Schotters

Im Gegensatz zu Schienen, Schwellen oder Befestigungsmitteln ist Schotter kein Material mit exakt definierten Eigenschaften.

Die Eigenschaften des Schotters schwanken beträchtlich und ändern sich sogar im Laufe der Zeit und mit Luftfeuchte und Temperatur. Beispielsweise ist der Verschiebewiderstand des Gleises in Querrichtung bei frisch gestopftem Schotter verglichen mit konsolidiertem Schotter um 50 % reduziert. Daher sind exakte Berechnungen auf Grundlage eines einzelnen Werts des Eingabeparameters im Allgemeinen nicht verwendbar. Ein angemessener Bereich von möglichen Ergebnissen muss berücksichtigt werden und die Sensitivität der Ergebnisse muss untersucht werden. Die Ergebnisse dienen als Eingabeparameter für weiterführende Berechnungen (wie Brückenbemessung), bei denen der gesamte Bereich berücksichtigt werden muss.

Der Schotter besteht aus einer Ansammlung von körnigen Einzelteilen mit vielen Kontaktpunkten, die sich über den senkrechten und tangentialen Widerstand an den Kontakten zwischen den Körnern gegeneinander abstützen. Der Schotter kann daher ausschließlich Druckkräfte übertragen, denen an den Kontaktpunkten Widerstand geleistet wird, aber er kann keine Zugkräfte übertragen, die tendenziell den Widerstand zwischen den Schottersteinen verringern. Unter einer statischen Druckbelastung verhält sich der Schotter wie ein Festkörper. Wenn die Formation des Schotters steif ist, ist auch der Schotter steif. Wenn die Formation sich auf elastische Weise verhält, ist auch der Schotter elastisch. Die Grundsätze der Bodenmechanik müssen unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Schotters und seines Gefüges angewendet werden. Unter einer dynamischen Last können Schwingungen zum Fließen und zur Destabilisierung des Schotters führen, so dass die Gleislagestabilität gefährdet ist und sich auch die Kurvenüberhöhung verringern kann.

Falls keine oder nur eine geringe vertikale Last wirkt und eine genügend große axiale Kraft entweder auf den Brückenüberbau (z. B. thermische Auswirkungen) oder auf die Schiene (z. B. Anfahr- und Bremswirkungen) aufgebracht wird, werden die Schwellen im Schotter zu gleiten beginnen, d. h. falls bei unbelastetem Schotteroberbau $u > u_0$ ist, ist der die Kraft k am wahrscheinlichsten bestimmende Faktor die Fähigkeit des Schotters, die Schwellen in Position zu halten. Falls eine genügend große vertikale Last aufgebracht wird, werden sich die Schottersteine „gegenseitig sperren“ und der Wert von k erhöht sich. In diesem Fall ist es wahrscheinlicher, dass die Schiene relativ zur Schwelle gleitet, d. h. falls bei belastetem Schotteroberbau $u > u_0$ ist, ist der Faktor, der die Kraft k am wahrscheinlichsten bestimmt, die Fähigkeit des Schienenbefestigungssystems, die Schiene zurückzuhalten.

8.2.2 Bedeutung einer wirksamen Schotterhalterung

Um eine ausreichende und gleichmäßige Abstützung des Gleises auf Brücken mit Schotteroberbau sicherzustellen, sollten Maßnahmen ergriffen werden, um eine geeignete Rückhaltung des Schotters und der Schotterböschungen an Bewegungsfugen und Brückenüberbauenden sicherzustellen. Im Jahr 2012 initiierte SNCF eine Untersuchung von europäischen Eisenbahnen, die von UIC, siehe [13], durchgeführt wurde, um zu bestätigen, dass derartige Maßnahmen, soweit sie angebracht waren, angewendet wurden und dass sie wirksam waren. Die Untersuchung wurde von SNCF initiiert und der Fragebogen richtete sich hauptsächlich an Eigentümer von Eisenbahnbrücken mit großen Eisenbahnviadukten, die Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Schotteroberbau und lückenlos verschweißtem Gleis tragen.

8.3 Beschreibung/Anwendungsgrenzen von verfügbaren Gleisbauelementen zur Minderungen von Auswirkungen

8.3.1 Grundsätzliches

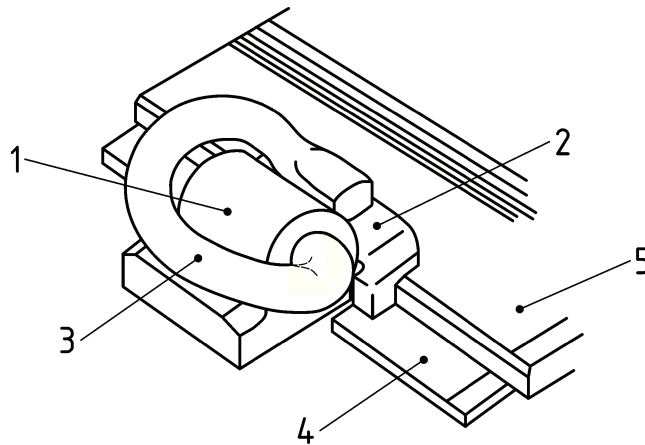
Das Schienenbefestigungssystem wird definiert als die Baugruppe aus allen Bauteilen, die gemeinsam die Schiene an der Schwelle oder an anderen Untergründen (z. B. Grundplatte oder Gleistragplatte) befestigen. Eine übliche Baugruppe aus Bauteilen für ein elastisches Schienenbefestigungssystem ist in Bild 10 dargestellt.

Der Zweck von Schienenbefestigungssystemen ist:

- die vertikalen und längs gerichteten Schienenkräfte elastisch aufzunehmen und sie von der Unterstützung weiterzuleiten;
- verkehrsbedingte Schwingungen zu isolieren oder zu dämpfen;
- die Spurweite und die Schienenneigung innerhalb bestimmter Toleranzen zu halten;
- als elektrische Isolierung zwischen Schiene und Auflager zu dienen.

Das Schienenbefestigungssystem besteht im Allgemeinen aus:

- 2 elastischen Bauteilen (Federbügel), die eine vertikale nach unten gerichtete Kraft auf den Schienenfuß aufbringen. Die durch die Federbügel erzeugte Spannkraft beträgt etwa 20 kN je Schienenaufleger. Die Spannkraft ist hauptsächlich abhängig von der Bauart der Federbügel.
- 2 seitliche Isolatoren, die auf jeder Seite des Schienenfußes angeordnet werden. Die seitlichen Isolatoren dienen der elektrischen Isolierung der Schiene und der Regulierung der Spurweite.
- 1 Zwischenlage, die zwischen dem Schienenfuß und dem Auflager angeordnet wird. Die Funktionen der Zwischenlage sind die elektrische Isolierung der Schiene vom Auflager, die Bereitstellung der vertikalen Elastizität für das Gleis und die Erhöhung des Widerstandes gegen das Wandern der Schiene in Längsrichtung relativ zum Auflager.



Legende

- 1 Schulter oder Anker
- 2 Isolator
- 3 Federbügel
- 4 Zwischenlage
- 5 Schienenfuß

Bild 10 —Bestandteile eines typischen elastischen Schienenbefestigungssystems

Die Kombination aus Spannkraft und Zwischenlage ermöglicht, dass der Widerstand in Längsrichtung im Verhältnis zur Längssteifigkeit des Auflagers erreicht werden kann. Der Durchschubwiderstand der Befestigung in Längsrichtung kann unter Einhaltung des Prüfverfahrens nach EN 13146-1 gemessen werden. Indem eine Federbügelbauart und/oder Gleitfläche zwischen dem Schienenfuß und dem Schienenaufleger verwendet wird, kann der Durchschubwiderstand des Befestigungssystems in Längsrichtung verringert werden. Eine derartige Lösung kann verwendet werden, um die Schienenspannung auf Brücken aufgrund der Gleis-Tragwerk-Interaktion zu verringern.

In Fällen, in denen die Berechnungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion in Längsrichtung auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) beruhen, hat die vertikale Steifigkeit der Schienenbefestigung keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung. Die Werte der vertikalen Steifigkeit und der Abhebesteifigkeit sind bei der Berechnung der Auswirkungen der Verdrehung der Enden des Brückenüberbaus auf das Befestigungssystem jedoch von erheblicher Bedeutung.

Als Teil des Analyse- und Bemessungsverfahrens für Gleise auf Brücken sollte eine Bauwerksbeurteilung durchgeführt werden, um nachzuweisen, dass das vollständige System den Leistungsspezifikationen entspricht.

Die Übereinstimmung mit den Bemessungsgrenzwerten der Gleis-Tragwerk-Interaktion wird bevorzugt erreicht, indem der nicht modifizierte Standardoberbau auf der Brücke verwendet wird oder falls erforderlich, indem ein Gleis mit zusätzlichen Oberbauelementen verwendet wird, die eine Abminderung derjenigen Effekte ermöglichen, die für die nicht konforme Situation ursächlich sind.

Oberbauelemente, die Minderungen ermöglichen, bestehen hauptsächlich aus (einer Kombination von):

- Bauteilen zur Verringerung der Schienenspannung;
- Bauteilen, die das Auftreten von Ausgleichsbewegungen in Längsrichtung ermöglichen;
- Bauteilen (bei Fester Fahrbahn), die das Auftreten von seitlicher Bewegung ermöglichen.

8.3.2 In der Praxis angewandte Lösungen

Eine Reduzierung der Schienenspannung kann durch die Verwendung von Schienenbefestigungen mit einem reduzierten Durchschubwiderstand oder freien Durchschub auf Schwellen im Schotteroberbau oder bei Fester Fahrbahn erreicht werden. Das wird durch eine Kombination von Zwischenlagen mit geringer Reibung und einer geringen Spannkraft und/oder Isolatoren mit geringer Reibung erreicht, mit denen die konventionellen Zwischenlagen, Spannklemmen und Isolatoren ersetzt werden.

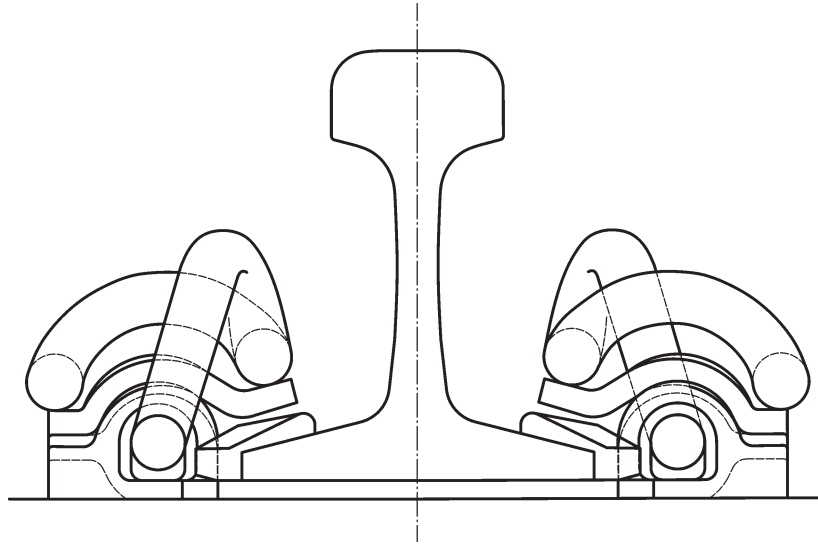


Bild 11 — Schienenbefestigung ohne Durchschubwiderstand in Längsrichtung für Schotteroberbau

Bei Fester Fahrbahn verwenden Schienenbefestigungssysteme mit reduziertem Durchschubwiderstand oder freiem Durchschub eine Kombination aus reibungsarmen Zwischenlagen und Federbügeln mit niedriger Spannkraft und / oder reibungsarmen Isolatoren.

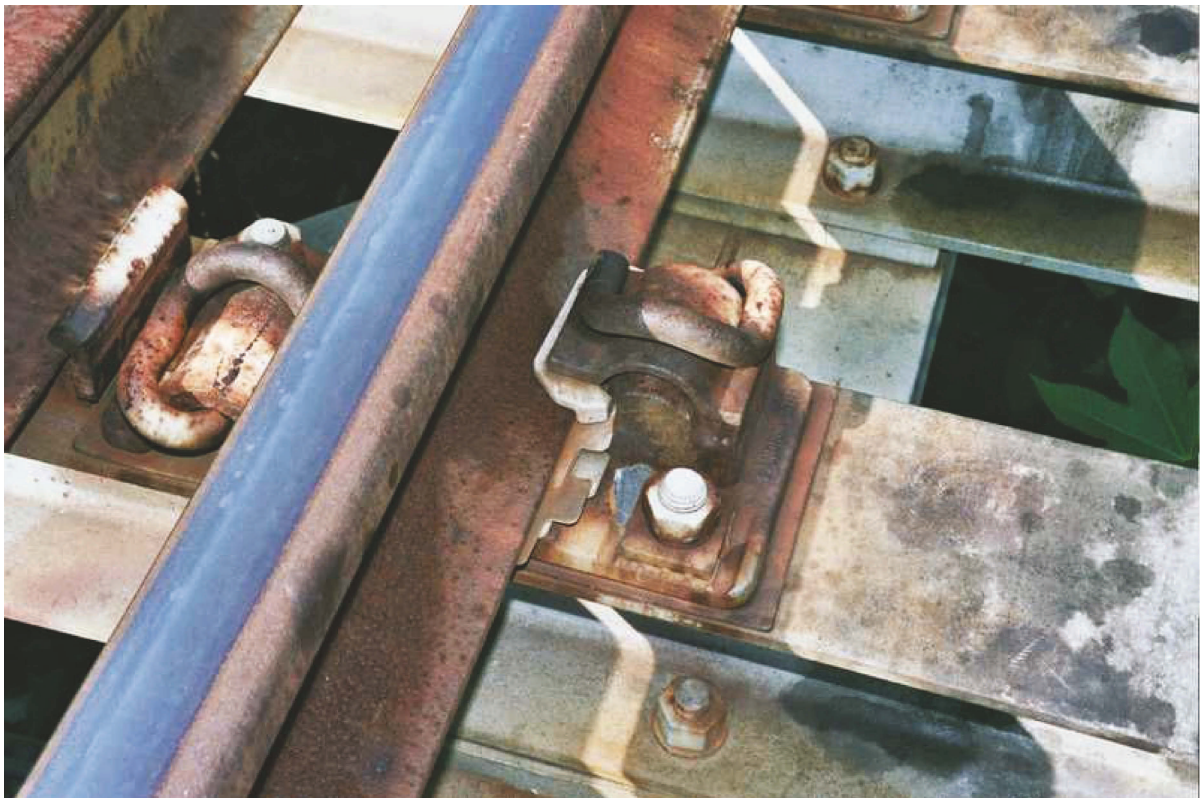


Bild 12 — Schienenbefestigung ohne Durchschubwiderstand in Längsrichtung für Feste Fahrbahn

Alternativ dazu und in Fällen, in denen die vorstehend beschriebenen Verfahren zu keiner ausreichenden Verringerung der Schienenspannungen führen können, ist die Beseitigung der axialen Schienenspannung eine Möglichkeit. Diese kann durch Bereitstellung eines Schienenauszugs oder einer anderen Art von Schienenauszugsvorrichtung erreicht werden. In der Praxis kann die Längskraft nicht auf null reduziert werden, weil es stets einige Reibungseffekte gibt, aber sie kann auf ein Niveau reduziert werden, das so gering ist, dass es in der Analyse vernachlässigt werden kann.

Schienenauszüge dürfen auf Strecken mit Schwerverkehr oder mit starker Überhöhung nicht ohne Zustimmung des verantwortlichen Oberbauingenieurs/der verantwortlichen Oberbauingenieurin verwendet werden. Der/die Oberbauingenieur/in darf die Verwendung von Schienenauszügen auf Hochgeschwindigkeitsstrecken oder an lärmkritischen Orten auf städtischen Eisenbahnen beschränken (oder sogar verbieten).

Standard-Schienenauszüge besitzen eine Auszugslänge von bis zu 120 mm und erstrecken sich üblicherweise über eine Länge von etwa 4,8 m, d. h. über bis zu 8 Schienenstützpunkte.



Bild 13 — Schienenauszug bei Schotteroberbau

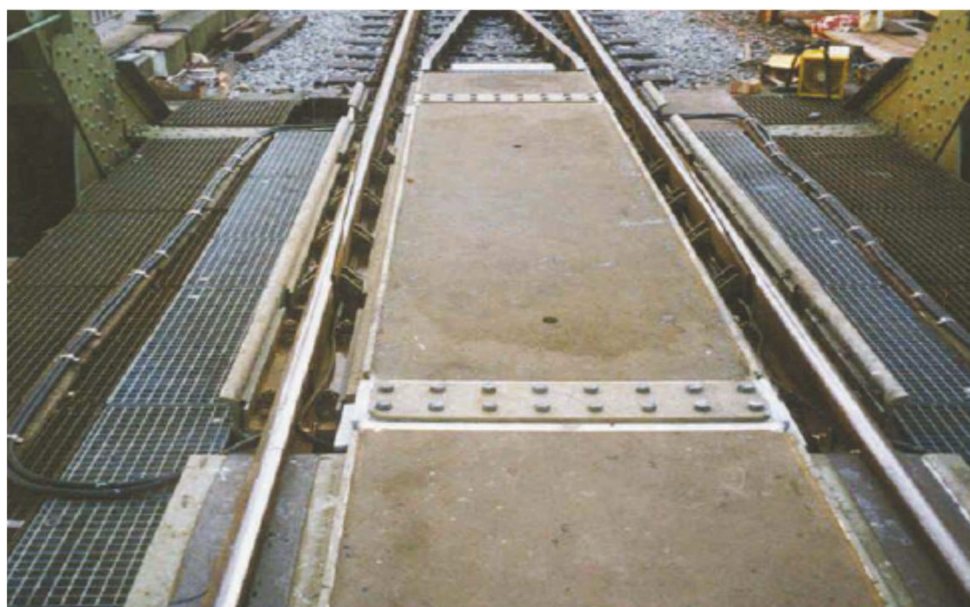


Bild 14 — Schienenauszug bei eingebetteten Schienen



Bild 15 — Schienenauszug bei Fester Fahrbahn



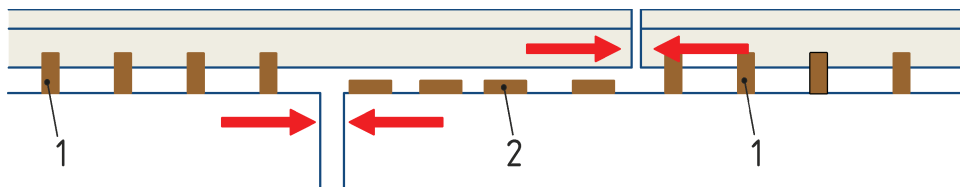
Bild 16 — Spezieller Schienenauszug bei einer Festen Fahrbahn

Spezielle Schienenauszüge können eine größere Auszugslänge aufweisen. Ein wichtiger Unterschied zwischen konventionellen Schienenauszügen und speziellen Schienenauszügen ist die Fähigkeit der Letzteren, unterschiedliche Verschiebungen der beiden Schienenenden aufzunehmen. Ein Schienenauszug benötigt eine größere Länge, um die erhöhte Bewegungskapazität aufzunehmen. Einzelheiten von Schienenauszügen und anderen Schienenauszugsvorrichtungen werden in EN 13232-8 behandelt.

Wenn eines der vorstehenden Verfahren angewendet wird, sollten die für die Berechnung der Schienenspannungen und Lagerkräfte verwendeten Eingangsparameter unter Verwendung charakteristischer Werte durchgeführt werden, die für die fraglichen Bauteile gemessen wurden. Es ist ebenfalls ratsam, zusätzliche

Berechnungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass der sich im Fall eines Schienenbruchs auftuende Spalt nicht übermäßig groß ist (siehe 8.5.2).

Es dürfen auch Kombinationen von Vorrichtungen verwendet werden. Schienenauszüge im Abstand weniger Meter von Bewegungsfugen anzuordnen, bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Dies bietet eine bessere Unterstützung des Schienenauszugs und verhindert außerdem, dass Stoßlasten, die an der Schienenfuge auftreten, Schäden an der Bauwerksfuge verursachen. In diesen Fällen muss die Schiene frei zwischen den beiden Fugen gleiten können, z. B. durch Verwendung von Schienenbefestigungen ohne Durchschubwiderstand (siehe Bild 15).



Legende

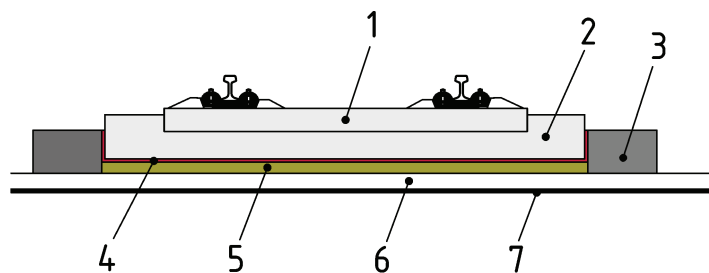
- 1 konventionelle Schienenbefestigungen
- 2 Schienenbefestigungen mit freiem Durchschub

Bild 17 — Beispiel für eine Kombination von Schienenauszug und Befestigungen mit freiem Durchschub

Eine Lösung, die für einige Extremfälle übernommen werden kann, ist schließlich das Konzept der „gleitenden Festen Fahrbahn“, bei dem ein kurzer Abschnitt einer Festen Fahrbahn aus Beton vom Brückentragwerk entkoppelt wird.

Das Prinzip der gleitenden Festen Fahrbahn besteht darin, das Gleis von der Brückenunterkonstruktion in Längsrichtung zu entkoppeln [14]. Die Auswirkungen der Gleis-Tragwerk-Interaktion können beinahe abgestellt werden. Das Prinzip ist in dem Patent [15] und in [14] detailliert ausgeführt. Diese Gleislösung wird in Deutschland für Feste Fahrbahn auf einigen kurzen Brücken (Länge < 25 m) verwendet.

Die Feste Fahrbahn ist über die gesamte Länge der Brücke fugenlos und hinter den Widerlagern verankert. Seitliche Kräfte werden von Betonhöckern auf der Seite der Platte aufgenommen (siehe Bild 18). Um das Gleis und die Brücke voneinander zu entkoppeln wird eine Gleitschicht (im Allgemeinen 2 Schichten Kunststoffolie und 2 Schichten Bitumenpappe) dazwischen eingefügt.



Legende

- 1 eingebettetes Gleiselement
- 2 Gleistragplatte
- 3 Betonhöcker
- 4 Gleitschicht
- 5 Hartschaumstoffschicht
- 6 Betonschutzschicht
- 7 Brückenabdichtung

Bild 18 — In Längsrichtung gleitende Feste Fahrbahn auf einer kurzen Brücke (DB AG)

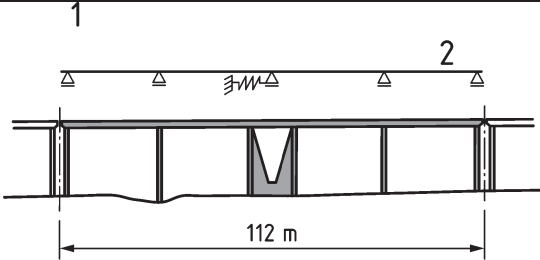
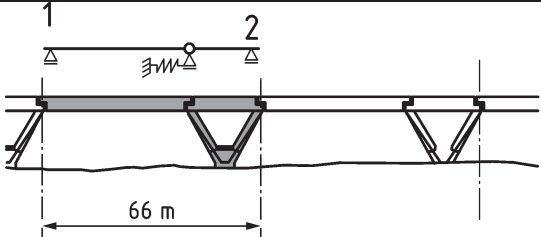
Das Prinzip der gleitenden Festen Fahrbahn wurde in China auf langen Brücken der Hochgeschwindigkeitsstrecke Beijing–Tianjin gebaut (Bögl Integral). Eine ähnliche Technik wurde für den Dammbereich des Bahnhofs St. Pancras Station in London angewendet, als neue Gleise für den Anschluss an die Hochgeschwindigkeitsstrecke nach Frankreich gebaut wurden. In diesem Fall machte es der beschränkte Platz, der für die Gestaltung der Verbindungsstelle zur Verfügung stand, notwendig, Weichen und Kreuzungen einzubauen, die teilweise auf Brücken und teilweise auf Erdbauwerken lagen. Ein kurzer Abschnitt Feste Fahrbahn wurde in diesem speziellen Gleisbereich erstellt, sodass er wieder von der Brücke entkoppelt werden konnte.

ANMERKUNG Bei langen Brücken sind einige Lösungen für gleitende Feste Fahrbahn Gegenstand von Patentrechten.

8.4 Beschreibung/Grenzen des Brückenentwurfs zur Minimierung von Auswirkungen

8.4.1 Allgemeines

Wie in der Fallstudie in 7.6 dargestellt, sind das statische System der Brücke, die Lage der Festpunkte und die Länge der Brücke die bestimmenden Parameter für die Verteilung und den Wert der Schienenspannungen. Das Thema der Gleis-Tragwerk-Interaktion muss in einer sehr frühen Phase der Brückenbemessung berücksichtigt werden. Durch Auswahl einer Brückenkonstruktion, die zur Verringerung der Schienenspannungen angepasst wurde, ist es möglich Schienenauszüge zu vermeiden oder ihre Anzahl auf ein Mindestmaß zu beschränken [16].

Beispiel 1: Gänsebachthalbrücke Schnellfahrstrecke (SFS) Erfurt-Leipzig/Halle (Deutschland)	Beispiel 2: Viaduc de la savoureuse SFS Rhin-Rhône (Frankreich)
 Photographie © MarxKrontal	 Photographie © SNCF
 1 statisches System 2 Betonüberbau	 1 statisches System 2 Stahlüberbau