DOI: 10.1002/bate.202300010

Johannes Diers, Marc Wenner, Bohdana Slovák, Steffen Marx

SONDERDRUCK

Zulässige Schienendruckkräfte für den Nachweis der Gleis-Tragwerks-Interaktion bei Fester Fahrbahn

Beim modernen Oberbau mit lückenlos verschweißter Schiene entstehen auf Brücken durch die Interaktion mit dem Bauwerk höhere axiale Beanspruchungen der Schiene als auf dem Damm. Beim Schotteroberbau gilt es die Druckkräfte in der Schiene zu begrenzen, um Gleisverwerfungen zu vermeiden. Dazu wurden in den 1980er-Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, woraus ein Grenzwert für die zulässigen zusätzlichen Druckspannungen von 72 MPa definiert wurde. Bei der Festen Fahrbahn liegen jedoch keine Erfahrungen zum Verhalten unter großen Druckkräften vor und der erhöhte Grenzwert von 92 MPa beruht auf keiner wissenschaftlich nachvollziehbaren Basis. Für den Fall der EÜ Itztal auf der Neubaustrecke Ebensfeld–Erfurt konnte der Nachweis der zusätzlichen Druckspannungen mit dem Grenzwert von 92 MPa nicht erbracht werden. Um fallspezifisch einen neuen Grenzwert festlegen zu können, wurden Untersuchungen vorgenommen, die in diesem Aufsatz vorgestellt werden. Das Verhalten des Systems unter großen Druckkräften wurde rechnerisch und experimentell untersucht. Für den Nachweis einer ausreichenden Sicherheit des Systems bei großen Schienendruckkräften wurden Grenzzustände festgelegt und für abgesicherte Einwirkungskombinationen nachgewiesen. Das Fallbeispiel zeigt die Reserven des Systems auf und legt eine mögliche Methode für eine grundsätzliche Überarbeitung des Grenzwerts der Schienendruckspannungen beim System Feste Fahrbahn vor.

Stichworte Schienenspannungen; Gleisverwerfung; Gleis-Tragwerks-Interaktion; Feste Fahrbahn; Eisenbahnbrücke; nichtlineare Finite-Elemente-Analyse; Großversuch

Allowable compressive rail force due to track-bridge-interaction for ballastless track

On modern continuously welded railway tracks on bridges the rails are exposed to additional axial stresses due the interactions between the track and the bridge. On ballasted track the total compressive force within the rail must be limited to prevent rail buckling. In the 1980s extensive theoretical and experimental research was conducted and a limit value for the additional compressive rail stress of 72 MPa was introduced. For the more ridged ballastless track systems this limit value was raised to 92 MPa. However, this was done without any transparent scientific basis. For the case of the Itz Valley Bridge on the new highspeed line between Ebensfeld and Erfurt the calculated additional stresses due to the track-bridge-interaction could not be verified with these limit values. To determine a new case specific limit value for the additional compressive rail stresses extensive investigations were conducted and are presented within this article. The behaviour of the ballastless track system under high compressive rail forces was analysed numerically and experimentally. As a result, failure mechanisms and limit states were defined and verified for secure combinations of input parameters. This example shows the potential of the system to withstand high compressive rail forces and presents a possible method to define new limit values for the additional compressive rail stresses for ballastless track systems on bridges.

Keywords rail stresses; rail buckling; track bridge interaction; ballastless track; railway bridge; nonlinear finite element analysis; large-scale test

1 Einleitung

Durch die Verlegung des lückenlosen Gleises auf Brückenbauwerken entstehen aus Interaktionseffekten zusätzliche Kräfte in der Schiene. Im Vergleich zur Verlegung auf dem Damm erfährt die Schiene deshalb auf Brücken eine größere Beanspruchung. Der Betrag der zusätzlichen Schienenspannungen muss zur Sicherung der Integrität des Fahrwegs und zur Gewährleistung einer sicheren Betriebsführung beschränkt werden [1, 2].

Bei hohen Temperaturen entstehen große Schienendruckkräfte, die durch die Zwangskräfte im lückenlosen Gleis sowie durch zusätzliche Interaktionskräfte hervorgerufen werden. Beim Schotteroberbau können große Längsdruckkräfte in der Schiene zu einer Verwerfung des Gleises führen. Am Anfang des 20. Jahrhunderts war die Charakterisierung des Stabilitätsversagens des Gleises unter Druckkräften durch Versuche und theoretische Untersuchungen schon der Schlüssel zur Etablierung des lückenlosen Gleises als Regelbauart [1]. In den 1980er-Jahren wurde die Theorie durch weitere Untersuchungen für den modernen Schotteroberbau kalibriert, woraus eine zulässige zusätzliche zentrische Längsdruckspannung für die Interaktionseffekte infolge des Längskraftabtrags auf Brücken (Gleis-Tragwerks-Interaktion) von 72 MPa abgeleitet wurde [2], wobei dieser Wert empirisch erfasste Sicherheitszuschläge enthält [3]. Dieser Wert ist in den aktuellen nationalen sowie internationalen Regelwerken [4–6] Stand der Technik. Für den Fall des Schotteroberbaus wurden seitdem weitere Erkenntnisse im Rahmen von Forschungsarbeiten gewonnen [7–9], allerdings wurde der Grenzwert im Regelwerk nicht angepasst.

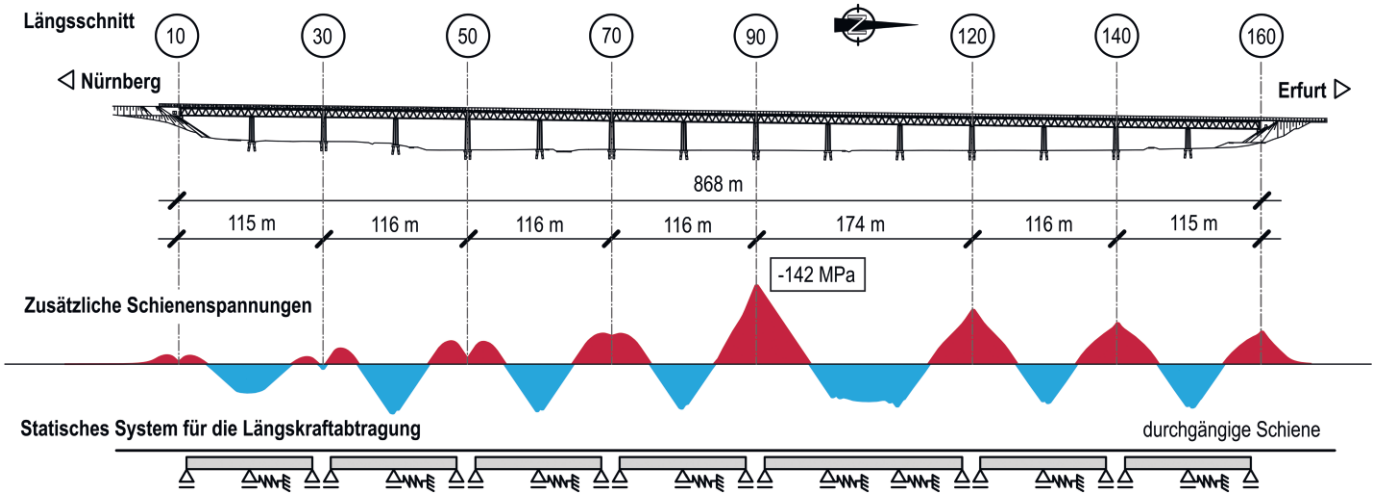


Bild 1 Längsschnitt der EÜ Itztal, statisches System und zusätzliche Schienendruckspannungen, maßgebender Lastfall, Einwirkungen (Temperatur, Verkehr) gem. Ril 804 [4], Stand der Berechnung: 2018
Longitudinal section of the Itz valley bridge, structural system and additional compressive rail stresses, decisive load case, loads acc. to Ril 804 [4], state from 2018

Die Feste Fahrbahn wird seit den 1960er-Jahren in Japan und seit den 1990er-Jahren in Deutschland als bevorzugte Bauweise für Hochgeschwindigkeitsstrecken verbaut [10]. Die verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn zeigen im Vergleich zum Schotteroberbau eine deutlich größere laterale Gleisroststeifigkeit, sodass ein steiferes Verhalten sowie ein höherer Widerstand gegenüber Stabilitätsversagen bei großen Druckkräften zu erwarten sind. In den deutschen Regelwerken [5, 11] wird eine zulässige zusätzliche Schienendruckspannung von 92 MPa bei Druckbeanspruchung vorgegeben, wobei für diesen Wert keine wissenschaftliche Basis bekannt ist. Durch die fehlenden Grundlagen ist daher eine Quantifizierung der vorhandenen Reserve und eine systembezogene Grenzwertanpassung bisher nicht möglich gewesen.

Bei der Eisenbahnüberführung (EÜ) Itztal auf der Neubaustrecke Ebensfeld–Erfurt (VDE 8.1) wurde im Zuge der Ausführungsplanung der Festen Fahrbahn festgestellt, dass der Nachweis der Schienenspannungen erheblich überschritten ist [12, 13]. Für den Nachweis der zu hohen zusätzlichen Zugspannungen konnten neue Erkenntnisse aus [14–17] herangezogen werden. Für den Nachweis der zentrischen zusätzlichen Schienendruckspannungen war die Bauwerksachse 90 mit –142 MPa maßgebend (Stand 2018) (Bild 1) und somit eine bauwerksbezogene Analyse der Schienendruckspannung notwendig. Die zusätzlichen Schienenspannungen wurden gem. Ril 804 [4] mit den dort beschriebenen Lasten (Bauwerkstemperatur, Verkehrslasten) berechnet. Zur Ermittlung eines neuen Grenzwerts wurden notwendige Untersuchungen durchgeführt, die in diesem Aufsatz vorgestellt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nur für das untersuchte System gelten und nicht unmittelbar auf weitere Feste-Fahrbahn-Systeme oder Brücken übertragbar sind. Die gewählte Vorgehensweise sowie die Größenordnung der nachgewiesenen Widerstände lassen sich jedoch aus Sicht der Autor:innen übertragen.

2 Untersuchtes System und Randbedingungen

2.1 Feste Fahrbahn im Bereich von Brücken

Die in diesem Aufsatz vorgestellten Untersuchungen beziehen sich auf die Bauart „Feste Fahrbahn ÖBB-PORR“, die auf Brückenbauwerken der Neubaustrecke VDE 8.1 verbaut wurde. Es handelt sich dabei um elastisch gelagerte Gleistragplatten (GTP). Der formschlüssige Verbund dieser schlaff bewehrten Fertigteilplatten mit dem darunterliegenden Ausgleichsbeton und dem Bauwerk wird über den Verguss von konisch ausgebildeten Öffnungen erreicht (zwischen den Schienen in Bild 2 zu erkennen), wobei eine 3 mm dicke Gummigranulatschicht an der Plattensohle sowie in den Vergussöffnungen für eine elastische Bettung der Platten sorgt [10].

Quelle: Marc Wenner

Bild 2 Feste Fahrbahn auf Brücken auf der Neubaustrecke Ebensfeld–Erfurt–Leipzig/Halle, System Feste Fahrbahn ÖBB-PORR
Ballastless track for bridges of the new high speed railway section Ebensfeld–Erfurt–Leipzig/Halle

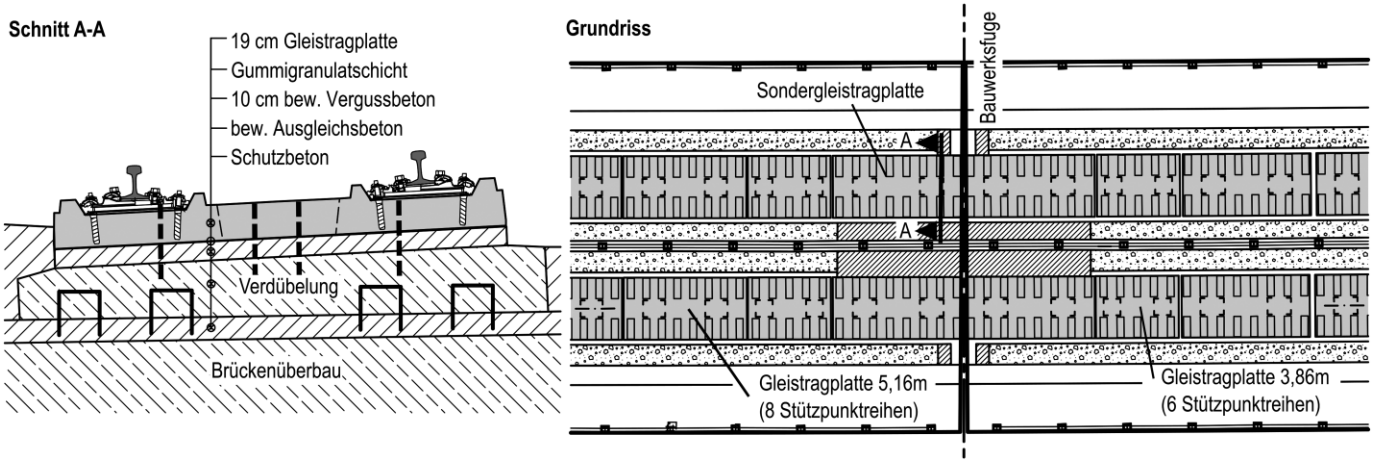


Bild 3 Querschnitt und Grundriss (Ausschnitte) des Systems Feste Fahrbahn ÖBB-PORR auf Brücken der VDE 8.1. (nachgezeichnet)
Cross section and top view of the ballastless track system ÖBB-PORR in bridges of the VDE 8.1

Die Fertigteilelemente wurden in verschiedenen Ausführungsvarianten von 2,56 m und 4 Stützpunktreihen bis 5,16 m und 8 Stützpunktreihen hergestellt (Bild 3). Im Bereich der Brücken der VDE 8.1 wurden der Ausgleichsbeton und der Vergussbeton bewehrt ausgeführt und Stützpunkte mit reduziertem Durchschubwiderstand verbaut (System 300-1 mit Skl B15 (Bild 4), Durchschubwiderstand = 30 kN/m unbelastetes Gleis, 60 kN/m belastetes Gleis).

Im Bereich von Brückenfugen müssen i. d. R. Gleistragplatten mit speziellen Brückenstützpunkten (Bild 4) eingebaut werden, um die erhöhten Stützpunktbeanspruchungen aus dem auftretenden Lateral-, Höhenversatz und den relativen Verdrehungen im Übergangsbereich aufnehmen zu können. Deshalb unterscheidet sich die Fahrbahnkonstruktion unmittelbar neben der Übergangskonstruktion von den restlichen Bereichen (Bild 3). Es wurde beidseits der Fuge eine Sondergleistragplatte mit einer zusätzlichen Verdübelung zur Aufnahme der Brückenstützpunkte eingebaut.

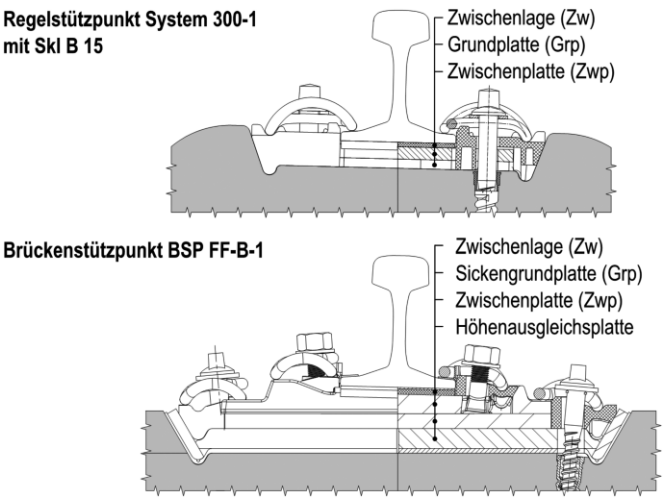


Bild 4 Verwendete Stützpunkte im Bereich von Brücken (nachgezeichnet aus Plänen der Firmen Vossloh und Schwihag)
Fastening devices on bridges (from drawings of Vossloh and Schwihag)

2.2 Die Brückenfuge als maßgebender Bereich

Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung des Systemwiderstands unter großen Druckkräften. Die Brückenfuge stellt aus zwei Gründen den maßgebenden Bereich für die Nachweisführung dar:

a) Bereich mit den größten Einwirkungen

Im Bereich der Brückenfugen treten die maßgebenden zusätzlichen Schienenlängsdruckkräfte infolge der Interaktion mit dem Bauwerk auf (Bild 1). Durch die relative Bewegung der benachbarten Überbauten (Lateralversatz, Höhenversatz, Endtangentenverdrehung, Verwindung) entstehen darüber hinaus zusätzliche Beanspruchungen sowohl in der Schiene als auch in den Stützpunkten.

b) Bereich mit dem geringsten Widerstand

Durch die erwähnten Relativverformungen der Brückenenden im Fugenbereich entstehen auch zusätzliche Verformungen der Schiene [18], die als ungünstige Imperfektionen den Widerstand des Systems unter Druckbeanspruchung herabsetzen. Darüber hinaus besitzen die im Bereich der Fugen eingebauten Brückenstützpunkte eine geringere Steifigkeit gegenüber Querbewegungen der Schiene im Stützpunkt und ein größeres Verformungsvermögen als die Regelstützpunkte (Bilder 4, 5), sodass auch dadurch eine schnellere Verformungs- und Beanspruchungszunahme im System bei Steigerung der Längsdruckkraft auftritt.

3 Vorgehensweise zur Ermittlung der zulässigen Schienendruckkraft

3.1 Gewählte Methode bei der Untersuchung

Es wurde im Vorfeld davon ausgegangen, dass eine mögliche Erhöhung der zulässigen Druckmittelspannung in der Schiene zu keiner ungünstigen Beeinflussung der Ermüdungsfestigkeit der Schiene führt, da bereits bekannt ist,

dass eine höhere Druckmittelspannung die Ermüdungsfestigkeit tendenziell begünstigt [19]. Es wurden somit im Rahmen dieses Projekts keine Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit der Schiene unter erhöhter Druckbeanspruchung durchgeführt, da andere Versagensmechanismen (siehe Grenzzustände) als maßgebend erachtet wurden.

Zur Ermittlung einer zulässigen Schienendruckkraft wurden mehrstufige Untersuchungen vorgenommen, die sich nach folgender Methode untergliedern lassen:

1. Charakterisierung des mechanischen Verhaltens des Systems und seiner Komponenten sowie Erstellung eines Analysemodells zum Verhalten des Systems unter Druckbeanspruchung und Durchführen von ersten numerischen Analysen (Voruntersuchung).
2. Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen zur Verifizierung des Modells (Laborversuch an der Leibniz Universität Hannover [20], Großversuch an einem nachgebauten Oberbauabschnitt [21]).
3. Definition von Grenzzustandskriterien und Grenzwerten sowie Überlegungen zu einem möglichen Sicherheitskonzept für die Nachweise der Grenzzustände.
4. Ermittlung einer noch zulässigen Gesamtdruckkraft in der Schiene sowie Ableitung der zulässigen zusätzlichen Druckspannung infolge Gleis-Tragwerks-Interaktion spezifisch für den untersuchten Fall.

3.2 Grenzzustände, Grenzkriterien und Grenzwerte

Beim Schotteroberbau beschränkt sich das Grenzkriterium für die zulässige Schienendruckkraft auf das Stabilitätsversagen des Oberbausystems. Bei den hier vorgenommen Untersuchungen an der Festen Fahrbahn wurden weitere Kriterien berücksichtigt, die für die Sicherheit des Betriebs schon vor Erreichen des Stabilitätsversagens von Relevanz sein können. Dabei wurde sich zur Klassifizierung der Kriterien und zur späteren Beurteilung deren Überschreitung an die Philosophie der Bemessung nach Grenzzuständen aus dem Bauwesen angelehnt.

Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Mit dem Nachweis des GZT wird eine ausreichend große Sicherheit gegenüber Stabilitätsverlust (Ausknicken) bzw. dem Versagen von einzelnen Systemkomponenten (Schiene, Stützpunkt, Beton im Fahrbahnaufbau) nachgewiesen.

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Für die Gebrauchstauglichkeit des Oberbaus sind plastische Längsdehnungen in der Schiene zu vermeiden. Daher wird im GZG nachgewiesen, dass die Schienenlängsspannungen die Streckgrenze des Schienenstahls nicht überschreiten. Neben den Spannungen aus Längsdruckkraft sind auch Biegespannungen infolge Radlasten zu berücksichtigen.

Grenzzustand Fahrsicherheit (GZF)

Die Gleislagequalität spielt eine maßgebende Rolle für die hervorgerufenen Fahrzeugreaktionen. Sie wird im Regelwerk der DB durch die Parameter Längshöhe, Verwindung, Spurweite, gegenseitige Höhenlage und Pfeilhöhe beschrieben [22]. Unzulässige Gleisverformungen können bereits deutlich vor dem Erreichen der Tragfähigkeit einzelner Komponenten auftreten. Der GZF wird daher als Zustand definiert, bei dessen Überschreitung der vorhandene Gleislagerfehler zu einer Beeinträchtigung des sicheren Fahrzeuglaufs führen kann. Das notwendige Sicherheitsniveau sollte für diesen Grenzzustand nach Ansicht der Autor:innen über dem des GZG liegen und wird daher analog zum GZT angesetzt.

4 System Feste Fahrbahn mit großen Schienendruckkräften

4.1 Berechnungsmodell

Für die rechnerischen Untersuchungen des Systems Feste Fahrbahn unter hohen Schienendruckkräften wurde mit dem Softwarepaket SOFiSTiK ein Finite-Elemente-Modell erstellt, mit dem das Verhalten der Schiene im untersuchten System bei großen zentrischen Längsdruckkräften unter Berücksichtigung der verschiedenen nichtlinearen Randbedingungen (Steifigkeiten, Theorie 2. Ordnung) berechnet werden konnte. Das Modell enthält eine Schiene des Profils 60E2 und der Schienengüte R260 sowie mehrere Gleistragplatten System ÖBB-PORR (Bild 5). Die Schiene wird als Stab abgebildet, der vertikal und lateral mit Federn festgehalten wird, die den Steifigkeitseigenschaften der Stützpunkte und Gleistragplattenauflagerungen entsprechen. Die Steifigkeit der Gleistragplatten selbst wird im Vergleich zu den restlichen Komponenten als ideal starr angenommen. Die Schiene wird in ihrer Längsrichtung an den Rändern des Modells mit einer großen Druckkraft belastet. Zudem können Verformungszwänge, die zwischen den Gleistragplatten an Bauwerksfugen durch unterschiedliche Bewegungen der angeschlossenen Tragwerke (z. B. Lateralversatz) entstehen, entsprechend aufgebracht werden.

Die Berechnung des Systems erfolgt nach Theorie 2. Ordnung. Weitere Nichtlinearitäten ergeben sich durch das Verformungsverhalten der Stützpunkte (Federkennlinien in Bild 6) und das Materialgesetz der Schiene. Da der Schienenstahl keine ausgeprägte Streckgrenze aufweist, ergibt sich hier bereits eine Reduktion der Steifigkeit vor dem Erreichen der definierten Streckgrenze (0,2 %-Dehngrenze (Bild 6)). Dies wird zudem durch die Eigenspannungen im Schienenprofil verstärkt, da diese für eine frühere Steifigkeitsabnahme sorgen, als es bei einer eigenspannungsfreien Zugprobe des Schienenstahls der Fall ist. Die Steifigkeiten der Festhaltungen in den Stützpunkten werden für vertikale Kräfte (Abheben oder Eindrücken der Schiene) und laterale Kräfte (seitliches Ausweichen) getrennt berücksichtigt.

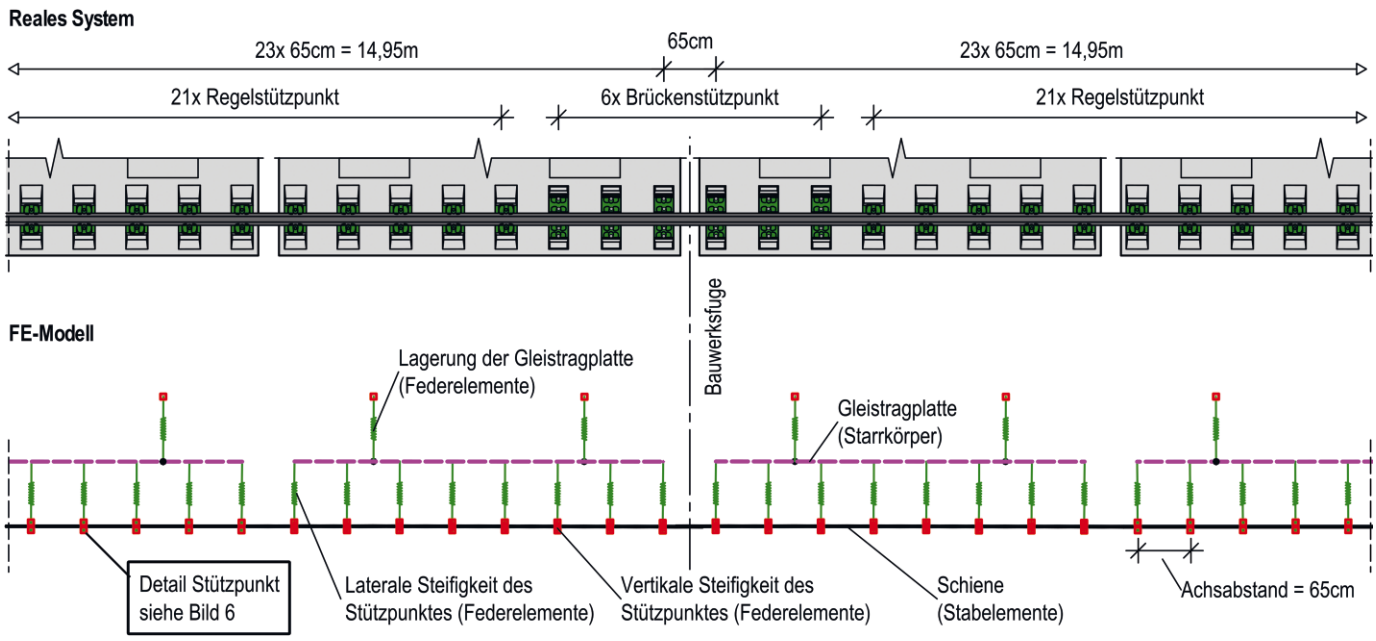


Bild 5 Grundrissdarstellung des betrachteten Systems der Festen Fahrbahn und Prinzipdarstellung des zugehörigen FE-Berechnungsmodells
Top view of the ballastless track system and schematics of the corresponding finite element model

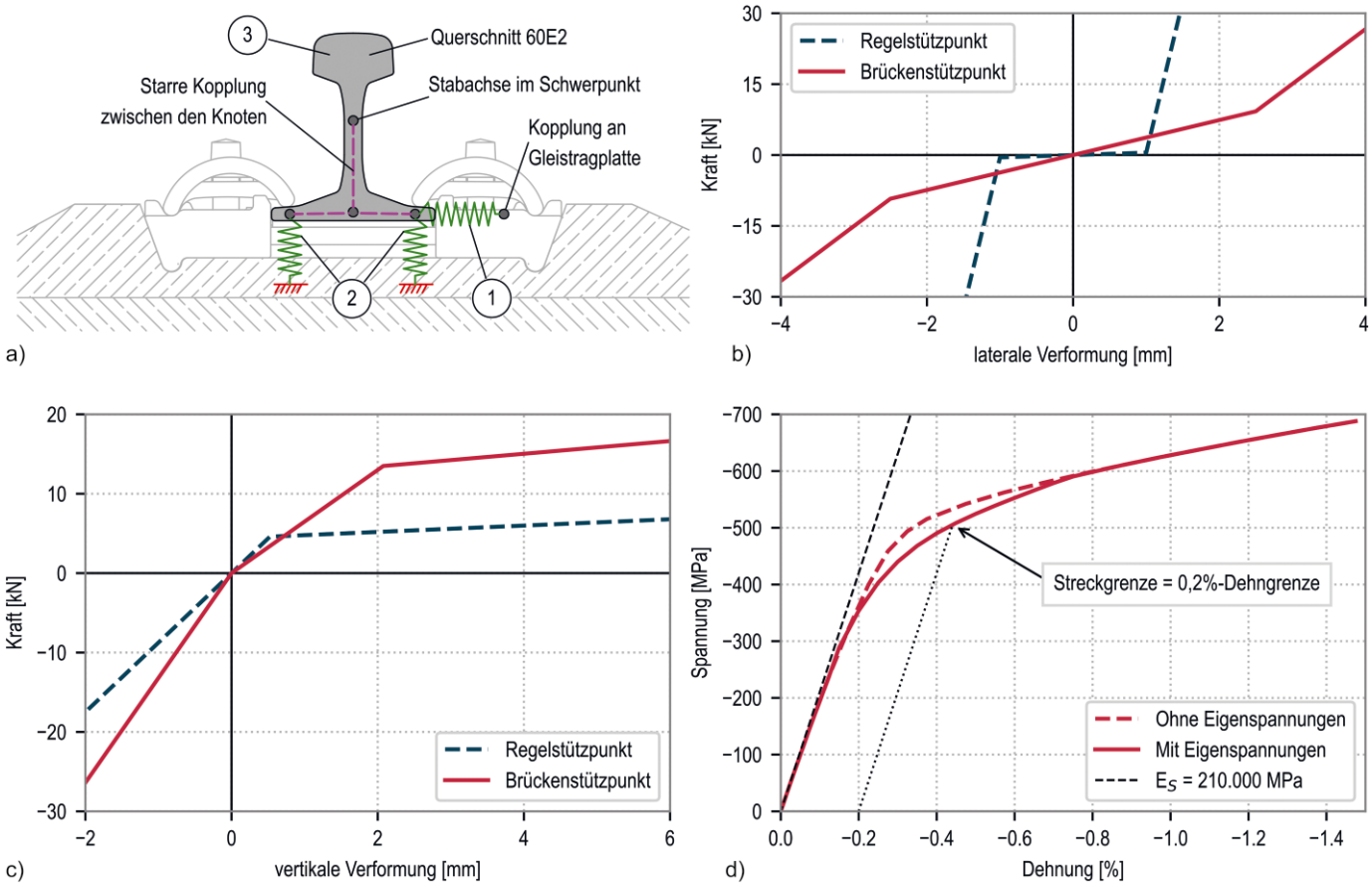


Bild 6 Querschnitt von Schiene und Festhaltung im Stützpunkt (a), Federkennlinien der Festhaltungen (b, c), Materialkennlinie der Schiene (d)
Cross section of the rail and fastening device (a), spring characteristics of the fastening (b, c), material characteristics of the rail (d)

In der vertikalen Richtung wird die Schiene im Stützpunkt durch die Spannklemmen nach unten gespannt, die im Modell auch durch zwei Federn abgebildet sind, um die Torsionseinspannung zu berücksichtigen. In der lateralen Richtung ist zwischen Schiene und Stützpunktaufbau ein planmäßiges Spiel von wenigen Millimetern vorhanden. Die Sonderstützpunkte (Brückenstützpunkte) an der Bauwerksfuge besitzen zudem weniger Steifigkeit als die Regelstützpunkte. Die Biegesteifigkeit des Schienenprofils fällt für vertikale Biegung ca. sechsmal größer aus als für Querbiegung (Querschnittswerte gem. [23]). Insgesamt ergibt sich so in der

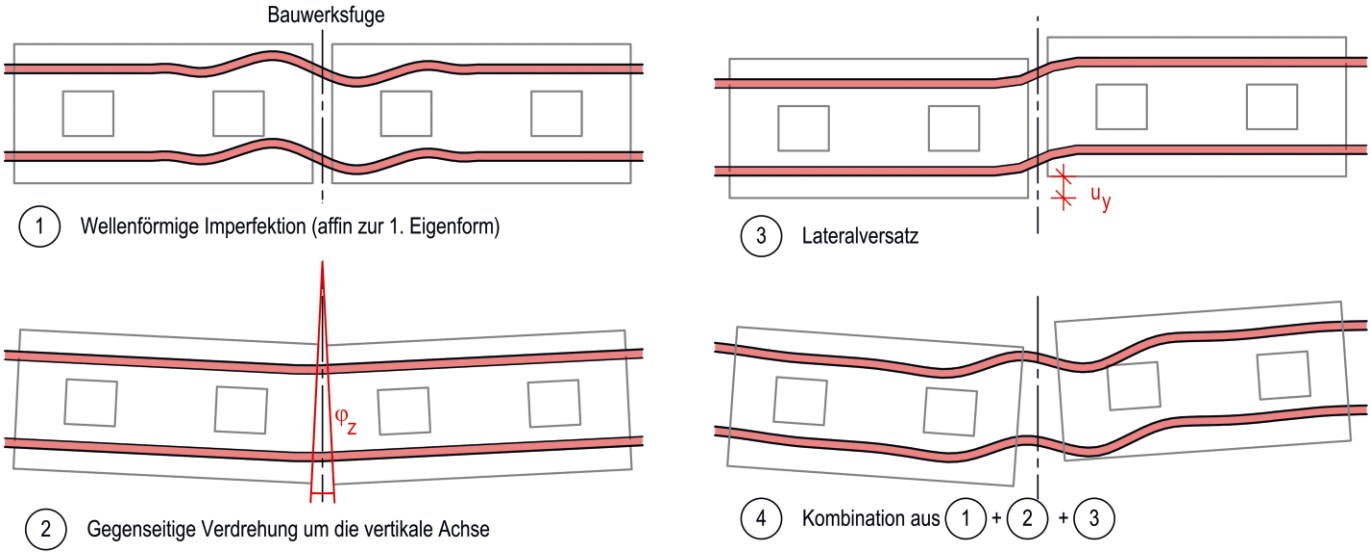


Bild 7 Betrachtete laterale Vorverformung des Systems an der Bauwerksfuge (überhöhte qualitative Darstellung)
Considered lateral pre-deformation of the system at the construction joint (exaggerated qualitative presentation)

lateralen Richtung ein im Vergleich zur vertikalen Richtung deutlich weicheres Systemverhalten. Das im Modell angesetzte Materialgesetz für die Schiene sowie die Arbeitslinien der Stützpunktfedern basieren auf Versuchsdaten. Mögliche Streuungen dieser Steifigkeitseigenschaften waren Teil der Untersuchungen.

4.2 Vorverformungen

Bei der nichtlinearen Berechnung nach Theorie 2. Ordnung wird die Systemantwort neben der einwirkenden Druckkraft und den materiellen Eigenschaften der Komponenten auch maßgeblich durch die angesetzten Vorverformungen beeinflusst. Da es sich bei dem untersuchten Oberbauabschnitt um eine Bauwerksfuge handelt, kommen neben einer möglichen Krümmung im Grundriss infolge der Trassierung (angesetzter Radius lag hier bei 2200 m) weitere (Zwangs-)Vorverformungen durch Bauwerksverformungen hinzu (z. B. laterale und vertikale Relativverformungen zwischen zwei Gleistragplatten (Bild 7)). Diese werden im Modell als Auflagerverschiebungen aufgebracht und damit indirekt über die Stützpunktfedern auf die Schiene übertragen.

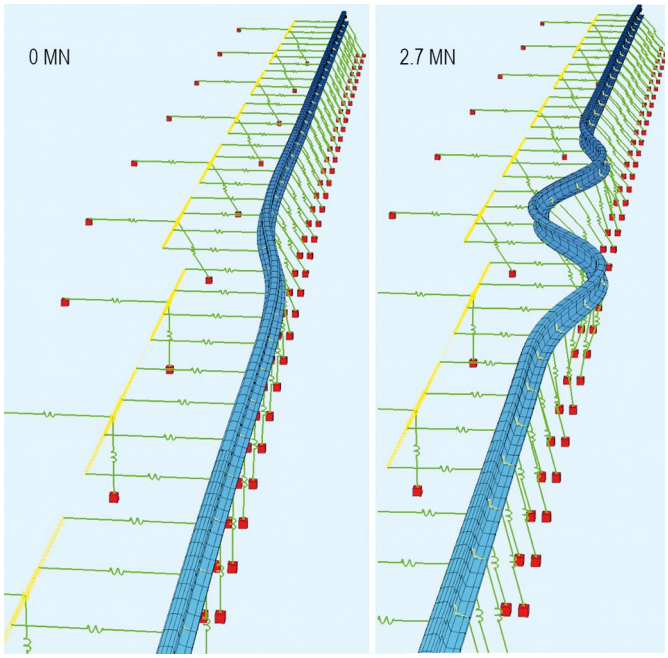


Bild 8 Finite-Elemente-Modell mit Lateralversatz als Vorimperfektion (Verformung skaliert mit Faktor 100)
Finite-element-model with lateral displacement as imperfection (deflection scaled by factor of 100)

4.3 Modellverhalten bei großen Längsdruckkräften

Durch die großen Steifigkeitsunterschiede zwischen der vertikalen und lateralen Richtung ergeben sich durch die Schienendruckkraft erwartungsgemäß sehr kleine Veränderungen der vertikalen Verformungen (< 0,5 mm), sodass diese bei der weiteren Auswertung von untergeordneter Bedeutung waren. Ein Ausweichen der Schiene unter Druck findet folglich in der horizontalen Ebene statt. Dieses Verhalten wurde für verschiedene mögliche Ausgangsimperfektionen untersucht (Bilder 8, 9). In allen Fällen wird das Verhalten ab einer rechnerischen Druckkraft von ca. 3,4 MN (= 444 MPa) instabil.

Kurz vor dem Erreichen dieses Lastniveaus nimmt die Verformungsfigur zudem unabhängig von der gewählten Ausgangsimperfektion eine Form an, die affin zur 1. asymmetrischen bzw. symmetrischen Eigenform ist. Die symmetrische Eigenform kann nur entstehen, wenn auf beiden Seiten der Fuge exakt gleiche Steifigkeiten und Vorverformungen herrschen und spielte daher bei den weiteren Betrachtungen eine untergeordnete Rolle. Die größten zusätzlichen Verformungen infolge der Druckkraft treten im Bereich der Brückenstützpunkte nahe der Bauwerksfuge auf, da diese eine geringere Steifigkeit bei größeren Lateralkräften besitzen als die regulären Stütz-

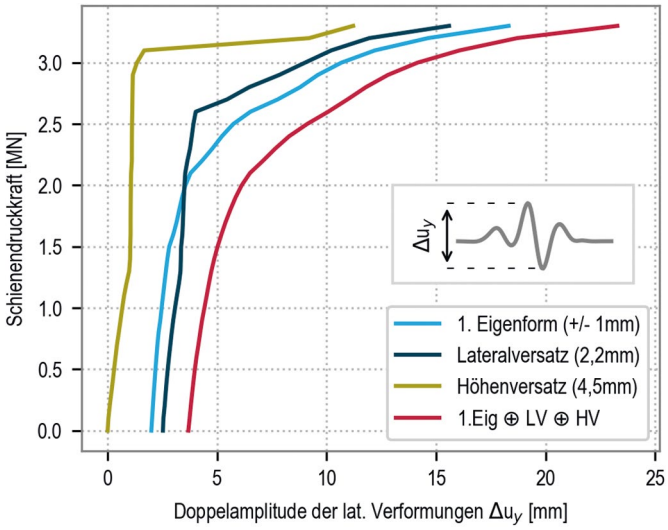


Bild 9 Last-Verformungs-Kurven der maximalen lateralen Doppelamplitude für verschiedene Vorverformungen
Load-deflection-curves of the maximum lateral double amplitude for different pre-deformation shapes

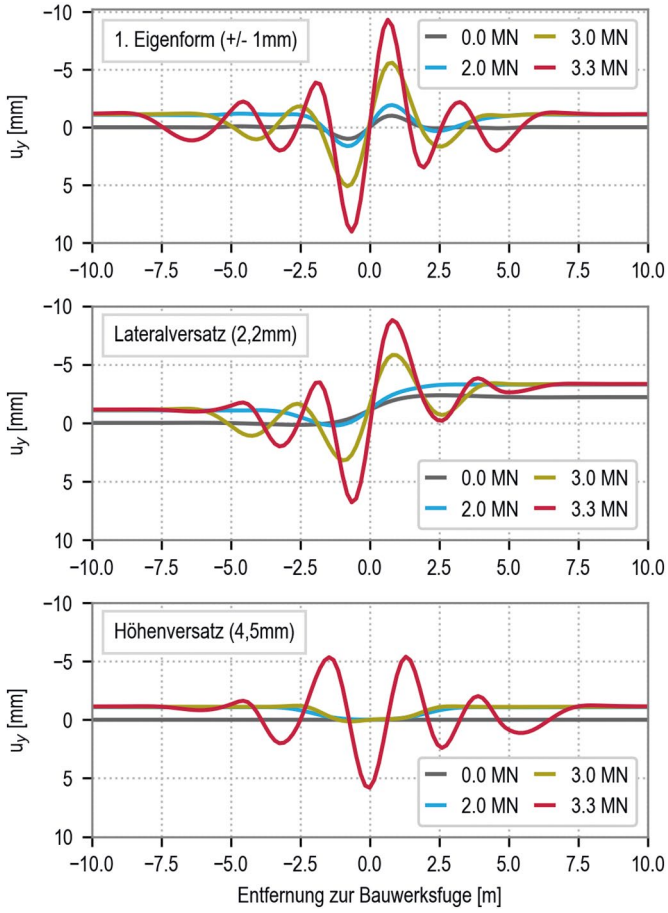
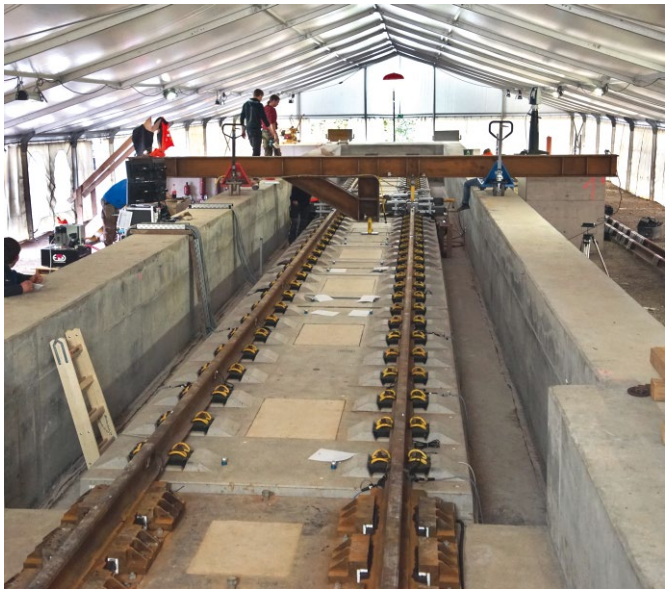


Bild 10 Laterale Verformungsfiguren der Schiene für verschiedene Vorverformungen und Laststufen der Schienendruckkraft
Lateral deflection shapes of the rail for different levels of the compressive rail force and pre-deformation shapes

punkte (Bild 10). Die geringste Systemsteifigkeit wird erwartungsgemäß dann erreicht, wenn die Ausgangsimperfektion bereits affin zur 1. Eigenform (asymmetrische Wellenform) gewählt wird.



Quelle: MKP GmbH

Bild 11 Großversuch zu Schienendruckkräften am System Feste Fahrbahn [21]
Large-scale-test of the ballastless track under high compressive rail forces [21]

4.4 Erkenntnisse aus den Versuchen

Zur Verifizierung des berechneten Systemverhaltens wurden zwei Versuche durchgeführt. Ein erster Laborversuch wurde an der Leibniz Universität Hannover an einem kleinen Systemausschnitt durchgeführt [20] und diente der Überprüfung der Machbarkeit des Versuchskonzepts. In einem weiteren Großversuch (Bild 11) wurden anschließend an einem dafür hergestellten, ca. 30 m langen Abschnitt der Festen Fahrbahn 2 × 2 Schienen in einem festgelegten Versuchsprogramm mit bis zu 3,5 MN Längsdruckkraft (= 458 MPa) je Schiene belastet [21]. Das reale System enthielt gewählte Vorverformungen wie einen Lateralversatz der Gleistragplatten und eine gezielte Einprägung der 1. Knickeigenform in die Schiene. Während der Versuche konnten weder ein Stabilitätsversagen noch offensichtliche Schäden an den Systemkomponenten festgestellt werden. Die Auswertung der Versuchsdaten zeigte, dass die vier geprüften Schienen bereits bei geringeren Druckkräften als ursprünglich angenommen ein deutlich nichtlineares Materialverhalten zeigten. Als Grund dafür wurde der Einfluss der vorhandenen Eigenspannungen im Schienenprofil identifiziert, durch den sich Abweichungen zum Verhalten von eigenspannungsfreien Zugproben ergeben. Diese Eigenspannungen schwanken im Schienenprofil nach [2] im Bereich ± 200 MPa [17]. Die während des Versuchs gemessenen Schienenverformungen konnten mit dem Modell insgesamt gut abgebildet werden. Das Modell wurde auf Basis der Versuchsergebnisse kalibriert. Weitere Einzelheiten sind [21] zu entnehmen.

5 Sicherheitskonzept und Nachweisführung

5.1 Grundlagen

Die Parameter, die das Verhalten des untersuchten Systems unter Druckkräften beeinflussen (Steifigkeiten, Vorverformungen), unterliegen über die Nutzungsdauer und die Streckenführung unvermeidbaren Variationen. Die so entstehenden Unsicherheiten dieser Parameter müssen durch ein geeignetes Sicherheitskonzept berücksichtigt werden.

Für den Schotteroberbau wurde der Wert der zulässigen Schienendruckspannungen von 72 MPa deterministisch mithilfe von empirisch erfassten geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitszuschlägen ermittelt [2, 24]. Ab den 1990er-Jahren wurden zunehmend wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen zur Quantifizierung der Ausfallwahrscheinlichkeit unternommen [23, 25, 26]. In [24] wurde auf Basis einer semiprobabilistischen Methode für den Wert von 72 MPa die Ausfallwahrscheinlichkeit für unterschiedliche Oberbauarten bewertet.

Für die durchgeführten Untersuchungen am System Feste Fahrbahn haben die Autor:innen sich an das semiprobabilistische Sicherheitskonzept des Eurocode [27] angelehnt, um mögliche Unsicherheiten der Eingangsparameter ausreichend abzudecken.

5.2 Größenordnung der nachzuweisenden Schienendruckkraft

Die Schiene unterliegt im Bereich von Brücken unterschiedlichen Einwirkungen. Die zentrische Schienendruckkraft aus Temperaturzwang des lückenlosen Gleises sowie aus den Interaktionseffekten mit dem Bauwerk stellt die Leiteinwirkung im untersuchten System dar. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden zwei Situationen betrachtet:

- *Charakteristisches Lastniveau*: Ansatz von charakteristischen Einwirkungen nach aktuell gültigen Regelwerken [4, 5] oder Einwirkungen, die ein vergleichbares Sicherheitsniveau erfüllen.
- *Bemessungslastniveau*: Erhöhung der charakteristischen Einwirkungen mit Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten nach aktuell gültigen Regelwerken [4, 5] oder Einwirkungen, die ein vergleichbares Sicherheitsniveau erfüllen.

Die Schienendruckkraft setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, die für den Fall der EÜ Itztal wie folgt angenommen wurden:

Anteil aus Schienentemperaturänderung

Beim lückenlosen Gleis führt eine Änderung der Schienentemperatur (ΔT_S) gegenüber der Verspanntemperatur zu einer Zwangsspannung im Schienenstrang. Im aktuellen Nachweis der Schienendruckspannungen für den Schotteroberbau wird in Deutschland eine maximale Temperaturänderung der Schiene von 50 K angesetzt [2, 25], wobei nicht definiert ist, ob es sich hier um ein charakteristisches Niveau oder um ein Bemessungsniveau handelt.

- Die mittlere Verspanntemperatur der Schiene wurde zu 23 °C angenommen und liegt damit mittig im zulässigen Bereich gem. [28] (20–26 °C).
- In [3] wird ausgehend von einer maximalen Lufttemperatur von 38 °C die maximale Schienentemperatur zu 58 °C angenommen (Lufttemperatur + 20 K). Dieser Zusammenhang konnte durch die Auswertung von Luft- und Schienentemperaturen, die an der EÜ Itztal gemessenen wurden, bestätigt werden. Aus historischen Wetterdaten für den Standort der EÜ Itztal wurde weiterhin eine charakteristische Lufttemperatur von 38,5 °C bestimmt (98 %-Fraktilwert der Extremwertverteilung mit Bezugszeitraum von 1 Jahr gem. [27]). Die charakteristische Schienentemperatur infolge von Umgebungseinflüssen ergab sich damit zu 38,5 °C + 20 K = 58,5 °C (Unterschied zur Verspanntemperatur = 35,5 K).
- Durch Einsatz der linearen Wirbelstrombremse (LWB, derzeit nur ICE 3) findet eine zusätzliche Erwärmung der Schiene statt [25]. Spezifische Simulationen seitens DB Systemtechnik für den Streckenabschnitt der EÜ Itztal [29] ergaben ausgehend von einer Schienentemperatur von 58 °C eine erhöhte Schienentemperatur zwischen 61,9 °C und 68,4 °C (je nach Betriebsprogramm und Szenario). Da für die EÜ Itztal im regulären Betrieb kein Einsatz der LWB vorgesehen ist, wurde dieser Einfluss auf dem charakteristischen Niveau nicht angesetzt. Für das Bemessungsniveau wurde der Unterschied zur Verspanntemperatur mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 erhöht und zusätzlich zur Berücksichtigung einer außergewöhnlichen Einwirkung aus der LWB mit 10,4 K beaufschlagt (resultierender Unterschied zur Verspanntemperatur = 58 K).

Anteil aus Gleis-Tragwerks-Interaktion (GTI)

Die zusätzlichen Schienendruckspannungen wurden zum Zeitpunkt der Begutachtung für die EÜ Itztal rechnerisch zu 142 MPa ermittelt (charakteristische Lasten gem. Ril 804 [4] (Bild 1)). Neben der Temperaturänderung des Bauwerks werden damit auch Verkehrslasten (Bremsen/Anfahren) abgedeckt. Werden die Lasten mit Teilsicherheitsbeiwerten (1,35 für Bauwerkstemperaturänderung ΔT_B und 0,8 · 1,50 = 1,20 für Verkehr Q) auf das Bemessungsniveau angehoben, ergeben sich nach nichtlinearer Berechnung 155 MPa zusätzliche Schienendruckspannungen. Der relativ geringe Anstieg der Spannungen resultiert daraus, dass der nichtlineare Durchschubwiderstand der Schienenstützpunkte nach oben hin begrenzt ist (30 kN/m für unbelastetes Gleis und 60 kN/m für belastetes Gleis).

Tab. 1 Zusammenfassung zur Schienendruckkraft auf der EÜ Itztal (Oberbausystem Stand 2018)
Summary of the compressive rail force for the Itz valley bridge

Lastniveau	Einwirkung	Spannung [MPa]	Kraft [kN]
Charakteristisches Niveau	Erwärmung ($\Delta T_{S,k}$ = 36 K)	86	656
	Interaktion ($\Delta T_{B,k}$, Q_k)	142	1089
	Summe E_k	228	1745
Bemessungsniveau	Erwärmung ($\Delta T_{S,d}$ = 58 K)	141	1078
	Interaktion ($\Delta T_{B,d}$, Q_d)	155	1184
	Summe E_d	296	2262

Die resultierende Schienendruckkraft für die beiden betrachteten Situationen ist Tab. 1 zu entnehmen.

5.3 Absicherung der Eingangsparameter

Neben der Schienendruckkraft beeinflussen weitere Eingangsparameter (Steifigkeiten, Vorverformungen) das Verhalten des Systems unter großen Druckkräften maßgeblich. Für die Nachweise der Grenzzustände mussten diese Parameter ebenfalls ausreichend abgesichert werden. Für die Beurteilung der erforderlichen Sicherheitsanteile jeder Eingangsgröße wurde die Sensitivität der Systemreaktionen hinsichtlich möglicher Streuungen der Eingangsparameter untersucht. Mit der First Order Reliability Method (FORM [27]) lassen sich Wichtungsfaktoren ermitteln, mit denen die gesamte Zielzuverlässigkeit auf die einzelnen Parameter aufgeteilt werden kann. Dies erlaubt eine entkoppelte Betrachtung der Systemreaktionen (Einwirkungen) und Grenzwerte (Widerstände). Da es sich um ein nichtlineares System handelt, wurden ergänzend Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, bei denen die Systemreaktionen für 10.000 zufällige Kombinationen der Eingangsparameter berechnet wurden.

Eine notwendige Grundlage für die Anwendung der genannten probabilistischen Verfahren ist die Beschreibung der Eingangsparameter mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Für den Fall der EÜ Itztal konnten die maßgebenden Eingangsparameter mithilfe von am Bauwerk gewonnenen Messdaten sowie aus Sicht der Autor:innen sinnvoll getroffenen Annahmen und Berechnungen probabilistisch beschrieben werden (Tab. 2). Für eine Verallgemeinerung der anzusetzenden Parameter wären jedoch noch weitere Untersuchungen an mehr Bauwerken mit einer größeren Datengrundlage erforderlich.

Die Nachweiskombinationen der Eingangsparameter (Bemessungswerte) wurden auf Grundlage eines Zuverlässigkeitsindex von β = 3,8 (Tragfähigkeit) bzw. 1,5 (Gebrauchstauglichkeit) und mit vereinfachten festen Wichtungsfaktoren α_E nach [27] gewählt (Tab. 3). Die Schienendruckkraft stellte dabei die Leiteinwirkung dar.

Tab. 2 Parameter zur probabilistischen Beschreibung der Eingangsgrößen
Parameters for the probabilistic modelling of the input variables

Eingangsgröße	Einheit	Verteilung	m	s	V
Schienendruckkraft	kN	Gumbel	1799	120	0,067
Amplitude Eigenform	mm	Normal	0,65	0,21	0,323
Lateralversatz	mm	Gumbel	2,30	0,22	0,096
Verdrehung z-Achse	mrad	Gumbel	0,68	0,07	0,103
Streckgrenze Schienenstahl (0,2 %-Dehngrenze)	MPa	Normal	500	32,5	0,065
Laterale Steifigkeit Brückenstützpunkt	kN/mm	Normal	11,6	1,16	0,100

Tab. 3 Kombinationen der Eingangsgrößen für die Nachweise der Grenzzustände
Parameter combinations for verification of the limit states

Parameter	Einheit	α_E	GZT/GZF (β = 3,8)	GZG (β = 1,5)
Schienendruckkraft (Leiteinwirkung)	kN	0,70	2262	1917
Amplitude Eigenform	mm	0,28	0,88	0,74
Lateralversatz	mm	0,28	2,52	2,35
Höhenversatz	mm	0,28	5,22	4,85
Verdrehung y-Achse	mrad	0,28	5,34	4,95
Verdrehung z-Achse	mrad	0,28	0,75	0,70
Streckgrenze Schienenstahl (0,2 %-Dehngrenze)	MPa	+/– 0,28	465	514
Laterale Steifigkeit Brückenstützpunkt	kN/mm	+/– 0,28	10,4	11,1

Zur Kontrolle der gewählten Kombinationen nach Tab. 3 wurden die Ergebnisse der auf Basis von Tab. 2 durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen statistisch ausgewertet. Die Fraktilwerte der Systemreaktionen (maximale Stützpunktkräfte und Verformungen), die dem entkoppelten Zielzuverlässigkeitsniveau der Einwirkungsseite entsprechen ($P[x \leq x_d] = \Phi(0{,}7 \cdot \beta)$ = 99,6 % für den GZT [27]), lagen unterhalb der Reaktionen, die sich mit Bemessungskombinationen nach Tab. 3 ergeben (Bild 12). Die gewählten Bemessungskombinationen lagen damit im Vergleich auf der sicheren Seite.

5.4 Nachweis des Systems (GZT, GZG)

Beim Nachweis der Festen Fahrbahn selbst steht v. a. die Tragfähigkeit im Fokus. Eine ausreichende Knickstabilität der Schiene ist für die nachzuweisende Kraft von 2,26 MN (Tab. 3) gegeben, erst bei Druckkräften > 3 MN werden die Systemreaktionen zunehmend instabil (Bild 9). Für den

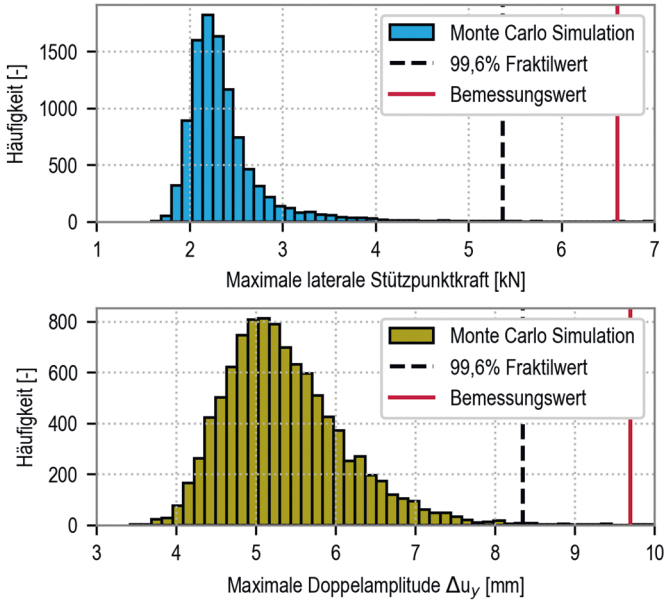


Bild 12 Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen mit $n = 10.000$ Simulationen
Results from the Monte Carlo simulations with $n = 10'000$ samples

Nachweis der Auflagerkräfte (Reaktionen an Stützpunkten und Auflagern der Gleistragplatten) sind die lateralen Kräfte maßgebend, da die Druckkraft in der vertikalen Richtung nur sehr geringe Veränderungen hervorruft. Für das nachzuweisende Bemessungsniveau der Druckkraft von 2,26 MN liegt die maximale laterale Stützpunktkraft bei 6,6 kN und die maximale laterale Kraft der Auflager der Gleistragplatten bei 22 kN (Bild 13).

Der Bemessungswert der Widerstandsreserve (inkl. üblicher Sicherheiten für den GZT) eines Vergusshöckers der Gleistragplatten betrug im vorliegenden Fall gem. Ausführungsstatik 110 kN. Beim einzelnen Stützpunkt lag kein expliziter Bemessungswert des Widerstands vor, im Vergleich zu anderen Einwirkungen (Seitenwind, Fliehkräfte, Seitenstoß) fällt die Lateralkraft infolge 2,26 MN Schienendruckkraft mit 6,6 kN jedoch vernachlässigbar gering aus. Bei alleiniger Betrachtung der Tragfähigkeit des Systems könnten voraussichtlich noch deutlich größere Druckkräfte als die angesetzten 2,26 MN aufgenommen werden, jedoch müssten die Tragwiderstände der Stützpunkte dafür näher bekannt sein.

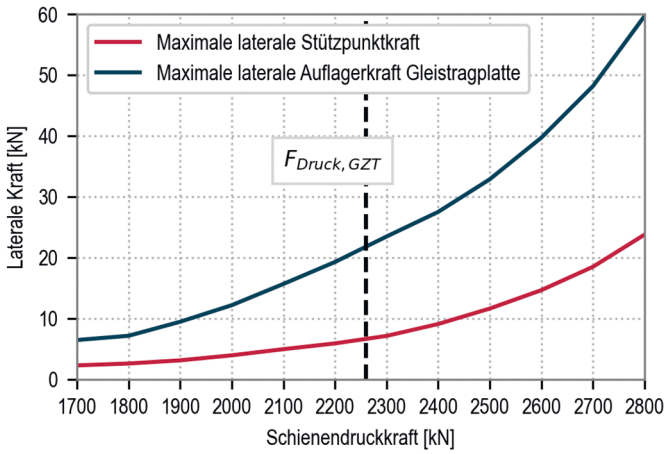


Bild 13 Maximale laterale Kräfte von Stützpunkten und Gleistragplattenauflager bei variierender Schienendruckkraft
Maximum lateral forces of the fastening devices and slab bearings at different levels of the compressive rail force

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Vermeidung plastischer Längsdehnungen in der Schiene) konnte gezeigt werden, dass die Schienenlängsspannungen infolge der für den GZG festgelegten Schienendruckkraft von 1,917 MN (= 251 MPa) unter Einbeziehung von Biegespannungen infolge Theorie 2. Ordnung und Radlasten (125 kN) noch unterhalb der Streckgrenze bleiben.

5.5 Nachweis der Schienenverformungen (GZF)

Neben der Tragfähigkeit des Systems wurden auch die auftretenden Verformungen der Schiene bei steigender Längskraft beurteilt, da diese das Fahrzeugverhalten beeinflussen und ggf. die Gefahr einer Zugentgleisung erhöhen. Da es sich bei den hier vorliegenden Verformungen um sehr kurzwellige Gleislagefehler lokal an den Bauwerksfugen handelt, lagen keine expliziten Grenzwerte vor. Die in der Richtlinie 821.2001 [22] genannten SR-Werte gelten für längerwellige Gleislagefehler und können für die vorliegende Situation nicht angesetzt werden. Die Beeinflussung von Fahrdynamik und Entgleisungssicherheit musste daher anhand von Mehrkörpersimulationen (MKS) spezifisch untersucht und beurteilt werden. Diese wurden mit der Software SIMPACK seitens DB Netz durchgeführt [30]. Die zeitlich veränderlichen Prüfgrößen (Radführungskräfte, Seitenbeschleunigung, Radanhebung bzw. Aufkletterweg) müssen während der simulierten Überfahrt unterhalb der zum Fahrzeug gehörigen Grenzwerte (Tab. 4) bleiben.

Es wurden verschiedene Fahrzeuge betrachtet und der leere zweiachsige Güterwagen (Hcceerrs) als maßgebend identifiziert, was auf die Kombination aus Laufwerkeigenschaften, Geschwindigkeit, Fahrzeuggewicht und dem kurzwelligen Charakter der hier betrachteten Schienenverformungen (Gleislagefehler bzw. Anregung aus dem Fahrweg) zurückgeführt wurde. Die dynamischen Reaktionen eines Hochgeschwindigkeitszugs (ICE 3) fielen im Vergleich deutlich geringer aus.

Tab. 4 Grenzwerte der dynamischen Fahrzeugreaktionen aus [31]
Limit values for the dynamic vehicle reactions from [31]

Parameter	Grenzwert für	
	Mittelwagen ICE 3	Güterwagen Hcceerrs
Radführungskraft	80 kN	80 kN
Summe der Radführungskräfte	53,5 kN	29,8 kN
Seitenbeschleunigung	3 m/s^2	4 m/s^2
Entgleisungskriterium Y/Q	0,8	0,8
Radanhebung	5 mm	5 mm

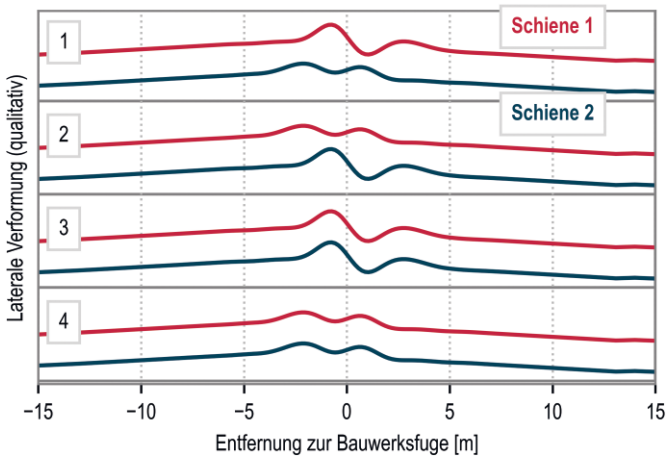


Bild 14 Mögliche Kombinationen von berechneten lateralen Schienenverformungen für die Nutzung als Gleislagefehler in den MKS
Possible combination of calculated lateral rail deflection curves to use as track geometry defects for the multi body simulations

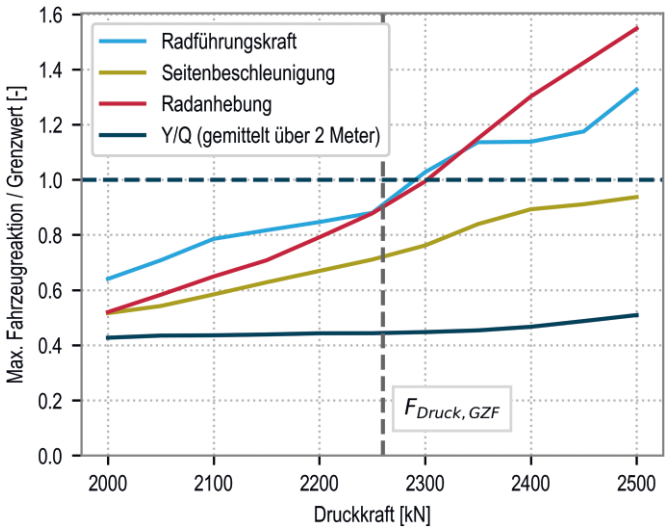


Bild 15 Auslastung der berechneten Fahrzeugreaktionen für unterschiedliche Niveaus der Schienendruckkraft
Utilization of the limits for the calculated vehicle reactions at different compressive rail loads

In einer iterativen Vorgehensweise wurden Schienenverformungen für variierende Vorverformungen und Druckkraftniveaus berechnet (Abschn. 4.1) und mit der MKS hinsichtlich der Fahrzeugreaktionen bewertet. Dazu wurden die lateralen Verformungen am Schienenkopf (inkl. Anteil aus Verdrehung um Längsachse) je Schiene berechnet, miteinander kombiniert und schließlich als Gleislagefehler in die Gleisgeometrie der Trassierung eingebettet (Bild 14). Durch die Kombination verschiedener Vorverformungen wurden so z. B. auch Spurweitenänderungen berücksichtigt.

Schließlich wurde für die maßgebende Kombination von Vorverformungen das Druckkraftniveau, bei dem die Grenzwerte der Fahrzeugreaktionen noch eingehalten waren, zu ca. 2300 kN bestimmt (Bild 15). Das nachzuweisende Lastniveau lag bei 2260 kN (Tab. 3).

6 Fazit und Ausblick

Durch die Untersuchungen, die sowohl auf numerischer als auch auf versuchstechnischer Basis stehen, konnte gezeigt werden, dass das System Feste Fahrbahn (hier am Beispiel ÖBB-PORR mit Brückenstützpunkten im Bereich der EÜ Itztal) prinzipiell in der Lage ist, deutlich höhere Schienenlängsdruckkräfte abzutragen, als derzeit im Regelwerk verankert sind. Dies ist in der im Vergleich zum Schotteroberbau deutlich größeren Steifigkeit des Systems bezüglich lateraler Verformungen begründet. Erst bei sehr großen Schienendruckkräften (> 3 MN) wurde die Tragfähigkeit des Systems (Nachweis der Festhaltungen und Knickstabilität der Schiene) relevant. Für den vorliegenden Fall ergaben sich jedoch ab einer Schienendruckkraft von ca. 2,3 MN laterale Schienenverformungen, bei denen die rechnerischen Fahrzeugreaktionen auf eine erhöhte Entgleisungsgefahr schließen lassen. Die Beurteilung der Interaktion zwischen Fahrzeug und verformter Schiene stellte den schwierigsten Teil der Untersuchungen dar, da bislang nur sehr wenige Erkenntnisse zur Auswirkung von Gleislagefehlern mit so kurzen Wellenlängen vorliegen. Die Bewertung der Verformungen erfolgte in Zusammenarbeit mit DB Netz anhand von Mehrkörpersimulationen.

Der in den Untersuchungen nachgewiesene Bemessungswert der Schienendruckkraft von 2,26 MN impliziert eine noch zulässige charakteristische zusätzliche Schienendruckspannung von 142 MPa, die deutlich oberhalb des aktuell geregelten Grenzwerts von 92 MPa liegt. Dieses Ergebnis gilt jedoch spezifisch für die EÜ Itztal und lässt sich nicht ohne Weiteres auf andere Bauwerke, Systeme oder Randbedingungen übertragen. Es zeigt jedoch, dass sich das System Feste Fahrbahn unter großen Druckkräften deutlich gutmütiger verhält, als es beim Schotteroberbau der Fall ist. Die angewandte Methode kann zudem um weitere Datengrundlagen, Randbedingungen und Szenarien erweitert werden, um eine Verallgemeinerung zu erreichen. Hier sehen die Autor:innen weiteren Forschungsbedarf, um den Grenzwert der zusätzlichen Schienendruckspannungen für das System Feste Fahrbahn grundsätzlich zu erhöhen. Durch eine größere Reserve auf der Druckseite könnte eine Senkung der zulässigen Verspanntemperaturen und damit eine Verringerung der Zugmittelspannungen erreicht werden, was eine Vergrößerung der Ermüdungssicherheit der Schiene zur Folge hätte.

Zusätzlich zur hier vorgestellten Erhöhung der zulässigen Schienendruckspannungen wurden an der EÜ Itztal neue Entwicklungen zu Schienenstützpunkten getestet, durch die die zusätzlichen Schienenspannungen im Vergleich zu dem hier gezeigten Stand weiter gesenkt werden konnten. Mit der Kombination aus dem Einsatz dieser neu entwickelten Stützpunkte und den in diesem Aufsatz gezeigten höheren zulässigen Schienendruckspannungen konnte die Verträglichkeit der Gleis-Tragwerks-Interaktion im Fall der EÜ Itztal erfolgreich nachgewiesen werden.

Literatur

[1] Wenner, M.; Lippert, P.; Plica, S.; Marx, S. (2016) *Längskraftabtragung auf Eisenbahnbrücken, Teil 1: Geschichtliche Entwicklung und Modellbildung.* Bautechnik 93, H. 2, S. 59–67. https://doi.org/10.1002/bate.201500107

[2] Wenner, M.; Lippert, P.; Plica, S.; Marx, S. (2016) *Längskraftabtragung auf Eisenbahnbrücken, Teil 2: Hintergründe des Nachweises.* Bautechnik 93, H. 7, S. 470–481. https://doi.org/10.1002/bate.201600034

[3] Leykauf, G. (1999) *Stellungnahme zur Gleisstabilität bei Einsatz der Wirbelstrombremse.* München.

[4] DB Netz AG (2021) *Ril 804.3401* in: DB Netz AG [Hrsg.] *Handbuch 80400 – Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten*.

[5] DIN EN 1991-2:2010-12 (2010) *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2010.

[6] PD CEN/TR 17231:2018-08-09 (2018) *Technischer Bericht zu Eurocode 1 Kapitel Gleis-Brücken Interaktion*. Berlin: Beuth.

[7] Wilkin, D.; Mißler, M.; Zacher, M. (2021) *Neue Erkenntnisse zur Lagestabilität von Schottergleisen*. Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2022, S. 41–63.

[8] Iliev, D. (2012) *Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlten Schwellen* [Dissertation]. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München.

[9] Pospischil, F. (2015) *Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen – Eine Betrachtung der Gleisstabilität* [Dissertation]. Fakultät für technische Wissenschaften, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

[10] Darr, E.; Fiebig, W. (2006) *Feste Fahrbahn – Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn*. Hamburg: Eurailpress.

[11] DIN EN 1991-2/NA:2012-08 (2012) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Berlin: Beuth. Ausgabe August 2012.

[12] Selig, R. (2018) *Brückenbau im Großprojekt VDE 8 – Umgang mit technischen Herausforderungen.* Brückenbau 10, H. 1/2, 18. Symposium Brückenbau in Leipzig, S. 98–103.

[13] Wenner, M.; Meier, T.; Wedel, F.; Marx, S. (2018) *Versuchsgestützte Ermittlung der Unterbausteifigkeit einer großen Eisenbahnbrücke.* Bautechnik 96, H. 2, S. 99–111. https://doi.org/10.1002/bate.201800019

[14] Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S. (2020) *Experimental investigation on rail fatigue resistance of track/bridge interaction.* Engineering Structures 216, 110747. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110747

[15] Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S. (2021) *Background investigation on the permissible additional rail stresses due to track/bridge interaction.* Engineering Structures 228, 111505. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111505

[16] Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S. (2021) *Experimental investigation on the fatigue behaviour of rails in the transverse direction.* Construction and Building Materials 272, 121666. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121666

[17] Kang, C.; Wenner, M.; Marx, S. (2021) *Experimental investigation on the rail residual stress distribution and its influence on the bending fatigue resistance of rails.* Construction and Building Materials 284, 122856. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122856

[18] Lai, Z.; Jiang, L.; Liu, X.; Zhang, Y.; Zhou, W. (2021) *Analytical investigation on the geometry of longitudinal continuous track in high-speed rail corresponding to lateral bridge deformation.* Construction and Building Materials 268, 121064. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121064

[19] Haibach, E. (2006) *Betriebsfestigkeit.* 3. Aufl. Berlin: Springer Verlag.

[20] Kang, C.; Bode, M.; Wenner, M.; Marx, S. (2019) *Experimental and numerical investigations of rail behaviour under compressive force on ballastless track systems.* Engineering Structures 197, 109413. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109413

[21] Wenner, M.; Diers, J.; Marx, S. (2018) *Admissible additional compressive stresses for ballastless track on railway viaducts: experiment and numeric analyses* in: Hiller, E. [ed.] *12th Japanese German Bridge Symposium München*. München, 4.–7. Sept. 2018.

[22] DB Netz AG (2022) *Ril 821.2001* in: DB Netz AG [Hrsg.] *Handbuch 82101 – Oberbau inspizieren*.

[23] DIN EN 13674-1:2017-07 (2017) *Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m.* Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 2017.

[24] Freystein, H. (2012) *Untersuchungen zu den zulässigen zusätzlichen Schienenspannungen aus Interaktion Gleis/Brücke* [Dissertation]. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin.

[25] Eisenmann, J. (2002) *Gleisstabilität von HGV-Strecken unter Berücksichtigung der linearen Wirbelstrombremse.* EI – Eisenbahningenieur 53, H. 5, S. 12–18.

[26] European Rail Research Institute (1999) *ERRI D202 RP12 – Verbesserung der Kenntnis der Kräfte im lückenlosen Gleis – Schlussbericht*. Utrecht.

[27] DIN EN 1990:2021-10 (2021) *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.* Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 2021.

[28] DB Netz AG (2022) *Ril 824.5010* in: DB Netz AG [Hrsg.] *Handbuch 82401 – Oberbauarbeiten durchführen*.

[29] DB Netz AG (2018) *Schienentemperaturen auf der Neubaustrecke VDE 8 bei Nutzung der Wirbelstrombremse des ICE 3 für Betriebsbremsungen Betrachtung der Verhältnisse an EÜ Itztal.* Bericht DB Systemtechnik.

[30] DB Netz AG (2021) *Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Fahrsicherheit auf der EÜ Itztal.* Bericht DB Netz AG.

[31] DIN EN 14363:2022-10 (2022) *Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche.* Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 2022.

Autor:innen
Johannes Diers, M. Sc. (Korrespondenzautor)
johannes.diers@marxkrontal.com
MKP GmbH
Werftstraße 17
30163 Hannover

Dr.-Ing. Marc Wenner
marc.wenner@marxkrontal.com
MKP GmbH
Zum Hospitalgraben 2
99425 Weimar

Dr.-Ing. Bohdana Slovák
bohdana.slovak@deutschebahn.com
DB Netz AG
Messtechnik und Rad-Schiene-System, I.NAI 414
Arnulfstraße 126
80636 München

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
steffen.marx1@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Massivbau
DB Netz AG – Stiftungsprofessur für Ingenieurbau
August-Bebel-Str. 30/30a
01062 Dresden

Zitieren Sie diesen Beitrag

Diers, J.; Wenner, M.; Slovák, B.; Marx, S. (2023) *Zulässige Schienendruckkräfte für den Nachweis der Gleis-Tragwerks-Interaktion bei Fester Fahrbahn.* Bautechnik 100, H. 8, S. 463–475.
https://doi.org/10.1002/bate.202300010

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 27. Januar 2023; angenommen: 15. Juni 2023.