

# Zum Entwurf von Eisenbahnbrücken

Ludolf Krontal

## Eine der anspruchsvollsten Aufgaben für einen Bauingenieur ist die Planung einer Eisenbahnbrücke.

Eisenbahnbrücken sind hochkomplexe Tragwerke mit hohen Nutzungsanforderungen aus dem Schienenverkehr. Sie werden dynamisch angeregt und müssen trotz großer Achslasten und horizontaler Bremslasten verformungsarm ausgebildet werden. Neben vielen Details, zum Beispiel für die Aufnahme des Gleises und die Überführung über Fugen, spielen bautechnologische Prozesse für das Bauen unter Verkehr eine sehr große Rolle für die Planung einer Eisenbahnbrücke.

Da Brücken extrem langlebig sind, haben wir Ingenieure eine enorm hohe Verantwortung an unsere gebaute Umwelt und können diese nicht gedankenlos mit lieblosen Zweckbauwerken befüllen, die nur gut „funktionieren“. Das macht den Entwurf einer Eisenbahnbrücke zu einem herausfordernden Prozess für uns Ingenieure. Die Qualität eines Entwurfes hängt davon ab, mit wie viel Sorgfalt, Mühe, Liebe, Phantasie und Wissen wir uns in diesen Prozess begeben. Bei einem guten Entwurf geht später alles auf [5]. Im Entwurfsprozess - und ich zähle die Variantenbetrachtung dazu - sind deshalb umfangreiche Untersuchungen, Skizzen, Berechnungen erforderlich, um die beste Lösung für die jeweilige Aufgabe, den jeweiligen Ort zu finden.

Seit über 150 Jahren werden in Deutschland Eisenbahnbrücken entworfen und gebaut. Damit gibt es einen enorm hohen Erfahrungsschatz auf diesem Gebiet und es haben sich gewisse Standards entwickelt, die ganz wesentlich die Qualität der Brückenbauwerke bestimmen. Aus diesem Grund kommen vorzugsweise bewährte Bauweisen mit standardisierten Regeldetails für Eisenbahnbrücken zur Ausführung. Die Standardisierung von Details ist wichtig, ermöglicht dieses doch, die Erfahrungen von vielen realisierten Projekten zu nutzen, Fehler zu vermeiden und eine hohe Funktionalität sicher zu stellen. Die Standardisierung ganzer Bauwerke jedoch führt zu Uniformität, verhindert Innovationen und verringert nicht zwangsläufig die Bau- und Planungskosten. Im Gegenteil, die Standardisierung von Bauwerken bei Ersatzneubauten erfordert oft schwierige Anpassungsplanungen der Umgebung, die aufwendig und unwirtschaftlich sind.

Vor 100 Jahren haben sich die Ingenieure sehr intensiv mit für sie neuen Bauweisen auseinander gesetzt, ohne die der heutige moderne Brückenbau nicht möglich wäre. Heute bieten sich uns Ingenieuren dagegen neue technische Möglichkeiten in der Bemessung und im Material, die vor 100 Jahren undenkbar waren. Die Umsetzung dieser neuen technischen Möglich-

keiten ist mit Projektrisiken verbunden, die vor allem in den komplizierten und zeitlich unkalkulierbaren Abläufen im technischen Genehmigungsverfahren liegen. Aber ohne das bewusste und durchdachte Eingehen von Risiken gibt es keine Weiterentwicklung! Kritisch ist deshalb zu bewerten, wenn Projektleiter die Entwurfsqualität des planenden Ingenieurs ausschließlich daran messen, dass keine zusätzlichen Risiken aus DB-internen Genehmigungen oder Zustimmungen im Einzelfall notwendig werden. Damit werden Innovationen verhindert und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der Ingenieure im internationalen Kontext schwindet. Glücklicherweise bestätigen Ausnahmen die Regel und es gibt auch in den Verwaltungen engagierte Ingenieure, die erkennen, dass bei speziellen technischen Fragestellungen immer wieder neue Wege gegangen werden müssen.

## Spezifik der Eisenbahnbrücken

In Deutschland wurden seit den 30-er Jahren des 19. Jahrhunderts Eisenbahnbrücken geplant und errichtet. Die meisten Eisenbahnbrücken stammen jedoch aus der Zeit des Baus der zahlreichen neuen Strecken in den Jahren von 1900 bis 1920. Viele dieser Brücken sind auch jetzt noch unter Betrieb. Gewölbebrücken aus dieser Zeit sind mit 28 % die eigentlichen Standardbrücken der DB und bilden noch heute aufgrund ihrer Robustheit und Dauerhaftigkeit das Rückgrat des Streckennetzes in Deutschland. Ein weiterer deutlicher Schwerpunkt in der Altersstruktur liegt zwischen 1970 und 1995. Seit den sechziger Jahren wurden zunehmend Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen errichtet. Diese nehmen 22% des Gesamtbestandes der Eisenbahnbrücken ein. Walzträger-in-Beton- und Stahlbrücken haben einen Anteil von je einem Viertel des Brückenbestandes. Im Gegensatz zu Frankreich, spielen Verbundbrücken im Eisenbahnbrückenbau in Deutschland kaum eine Rolle.

Das mittlere Alter des Brückenbestandes der DB AG liegt bei ca. 80 bis 90 Jahren und ist damit stark überaltert. Viele Bauwerke haben ein Alter erreicht, das weit über der bauartenspezifischen normativen Lebensdauer liegt. Zwar wurden in den 80-er und 90-er Jahren jährlich etwa 270 Eisenbahnbrücken gebaut, womit das durchschnittliche Lebensalter etwas verbessert werden konnte. Durch drastische Verringerung der Bundeshaushaltungsmittel und Verschiebung der Finanzierungsschwerpunkte zum Beispiel in das ESTW-Programm (Elektronische Stellwerke) wurden notwendige Investitionen im Eisenbahnbrückenbau in den letzten Jahren stark reduziert. Dieser Investitionsstau soll mit einem von der DB AG neu aufgelegten Brückenprogramm in naher Zukunft aufgelöst werden.

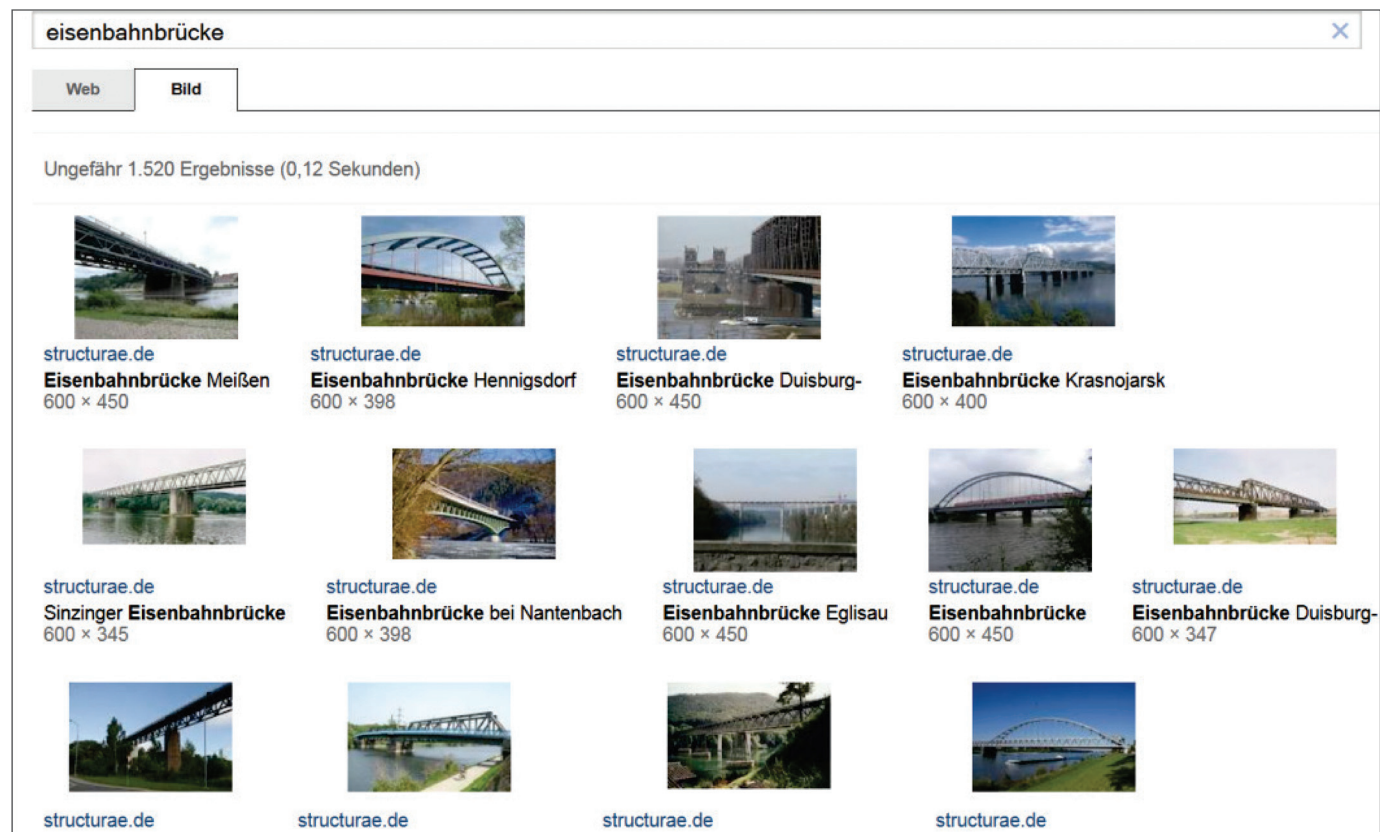


Bild 1: Eisenbahnbrücken bei Structurae (Quelle: Structurae)

Unter dem Stichwort „Eisenbahnbrücken“ erhält man bei Structurae eine erste Trefferquote wie in Bild 1 dargestellt. Man kann den Eindruck gewinnen, dass die Welt der Eisenbahnbrücken nur aus Fachwerk- und Stabbogenbrücken besteht. Das Gegenteil ist der Fall. Die meisten Bauwerke haben Stützweiten bis zu 10 m. Die Bauwerke bis 30 m Stützweite bestimmen mit 96% der Gesamtanzahl das Bild der Eisenbahnbrücken.

Eisenbahnbrücken sind trotz überwiegend kleiner Stützweiten Hochleistungstragwerke. Schon im Lastvergleich zwischen Eisenbahn- und Straßenbrücken werden die Unterschiede deutlich. Für die ersten Eisenbahnbrücken in Deutschland waren als zulässige Achslast zwei Tonnen anzusetzen. Durch die schnelle Entwicklung des Schienenverkehrs auch für Stück- und Massengüter sind die zulässigen Achslasten von Eisenbahnfahrzeugen sehr schnell erhöht worden. Ab 1920 war der Betrieb von Fahrzeugen bis 18,5 Tonnen Achslast erlaubt. Die Bauwerke in Deutschland werden heute für 22,5 Tonnen und auf besonders mit Güterverkehr beanspruchten Strecken bis 25,0 Tonnen Achslast bemessen. Die Laststeigerung von rund 20 Prozent können viele Bauwerke noch aufnehmen. Die zulässige Achslast für Straßenbrücken hat sich dagegen im gleichen Zeitraum von 6 auf 12 Tonnen verdoppelt, das zulässige Fahrzeuggesamtgewicht sogar verdreifacht. Neben neuen Anforderungen an die Querschnitte durch gestiegenes Verkehrsaufkommen müssen deshalb in den nächsten Jahren viele Straßenbrücken auch lastbedingt erneuert werden.

Im Eisenbahnbrückenbau sind vor allem die älteren Stahltragwerke durch die hohen zyklischen Lasten einer erheblichen Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt. Der schlechte Erhaltungszustand und die Ermüdungsbeanspruchungen führen dazu,

dass Stahltragwerke nach über 100 jähriger Nutzung erneuert werden müssen. Hier gilt es, adäquaten Ersatz mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln und Techniken zu schaffen.

### Horizontalkräfte – Verformungen

Neben den lateralen Kräften aus Seitenstoß und Fliehkraft sind im Eisenbahnbrückenbau die enorm hohen Längskräfte aus Bremsen und Anfahren sicher vom Bauwerk aufzunehmen. Bei zweigleisigen Brücken bis 50 m Länge sind die Lastfälle Brems- und Anfahren maßgebend. Bei größeren Bauwerkslängen sind auf beiden Gleisen Bremskräfte anzusetzen, wobei ein Gleis abgemindert wird. Das bedeutet, dass bei zweigleisigen Brücken mit Bremsinflusslängen ab 300 m Horizontalkräfte von ca. 10 MN aufgenommen werden müssen. Im Vergleich dazu werden nach [3] im Straßenbrückenbau die Horizontalkräfte auf maximal 0,9 MN begrenzt (Bild 2).

Bei lückenlosen Schienen auf den Brückenüberbauten wirken die Bremskräfte zusätzlich auch auf den Oberbau, insbesondere im Bereich von Bauwerksfugen. Damit die Beanspruchungen aus den hohen Bremskräften im Oberbau begrenzt werden, sind die Festpunkte sehr steif auszuführen. Bereits im Entwurf sind die Festpunkte im System so zu bestimmen und die Steifigkeiten der Unterbauten so zu planen, dass die zulässigen Schienenspannungen aus der Interaktion zwischen Oberbau und Tragwerk eingehalten werden (Bild 3).

### Interaktion Oberbau und Tragwerk

Der Fahrweg ist durch seine Trag- und Führungsfunktion das wichtigste Element der Eisenbahninfrastruktur. Seit jeher stel-

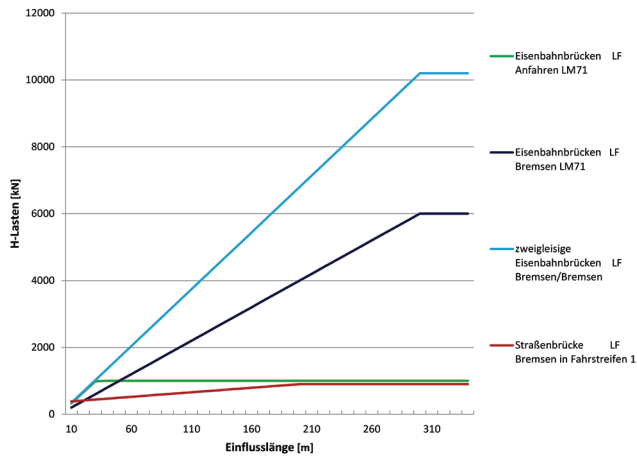


Bild 2 (li): Vergleich der Brems- und Anfahrkräfte für Eisenbahnbrücken und Straßenbrücken nach [3]

Bild 3 (re): Festpunkt der Scherkondetalbrücke Widerlager West im Bauzustand, die Gründung erfolgte mit zwei parallelen in Längsrichtung angeordneten Bohrpfahlreihen (Foto: Ludolf Krontal)

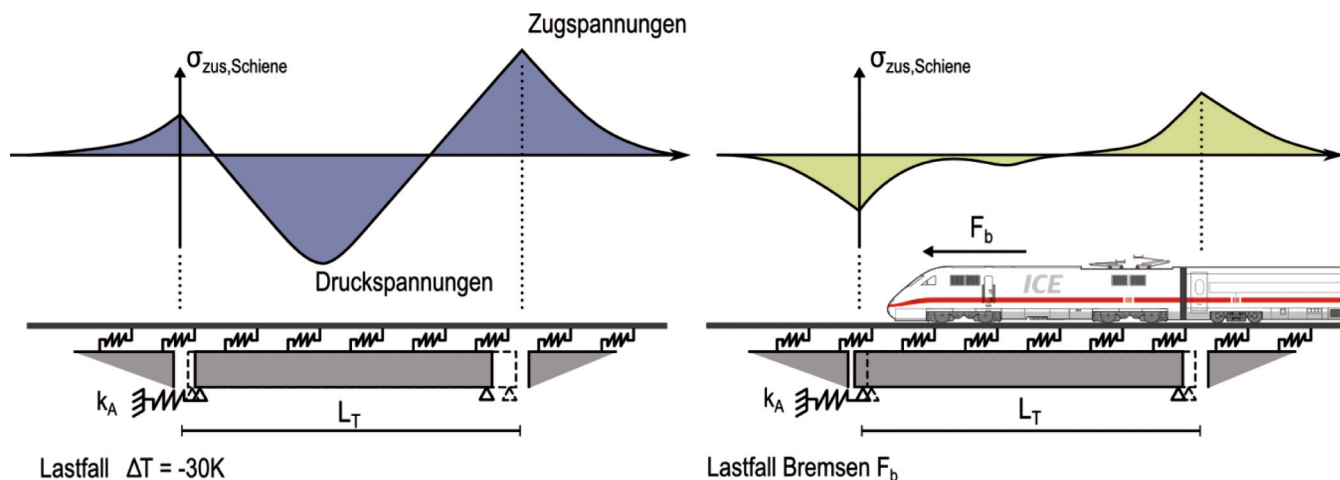
len Brückenbauwerke Unstetigkeitsstellen in der Führung des Fahrweges insbesondere hinsichtlich der fahrdynamischen Eigenschaften dar. Die Einführung des lückenlosen Gleises in der ersten Hälfte des 20. Jahrhundert war ein Meilenstein in der Entwicklung des modernen Eisenbahnbaus. Durch den Wegfall von Schienenstößen und die Umwandlung der Temperaturdehnungen der Schiene in Zwangsbeanspruchungen konnte ein kontinuierliches und durchgängiges Schienenband hergestellt werden. Insbesondere auf den Brücken führte das zu einer deutlichen Verbesserung der Fahrdynamik und zur Verringerung der Beanspruchung der Bauwerke.

Wegen der konstruktiven Ausbildung des Oberbaus aus Spannklemmen, Schwellen, Schotter oder Fester Fahrbahn entsteht eine Verbindung der Schiene mit dem Bauwerk, die bei Längsbewegungen des Tragwerkes im Falle des lückenlosen Gleises zu zusätzlichen Kräften in der Schiene führt. Unter Temperaturänderungen und Langzeitverformungen entstehen Längsverformungen im Tragwerk und im Oberbau. Die Verkürzung des Bauwerks im Winter führt im Bereich der Tragwerksenden zu zusätzlichen Zugspannungen im Schienenstrang, dessen Betrag maßgebend von der Lage des Festpunktes und der Dehnlänge beeinflusst wird (Bild 4).

Bedingt durch die Nachgiebigkeit des Festpunktes bei auftretenden Horizontalkräften (z.B. bei einem bremsenden Zug), führt die Verschiebung der Brücke zu einer Stauchung der Schiene in Bremsrichtung und zu einer Dehnung am gegenüberliegenden Überbauende (Bild 4). Auch bei einer Durchbiegung des Tragwerkes unter Verkehr oder Temperaturgradient entsteht je nach konstruktiver Ausbildung des Fahrbahnübergangs und der Bauwerkslager ebenfalls eine Störung des Spannungszustandes in der Schiene.

Um die Gebrauchstauglichkeit des Gleises und die Betriebssicherheit gewährleisten zu können, müssen die Reaktionen aus diesen zusätzlichen Beanspruchungen beschränkt werden. Für Dehnlängen von bis zu 90 m für Massiv- und Verbundbrücken und 60 m für Stahlbrücken sind in der Regel keine besonderen Maßnahmen zu treffen [1]. Bei größeren Stützweiten muss hingegen die Interaktion zwischen Gleis und Tragwerk näher untersucht werden. Können die Nachweise für die zusätzlichen Schienenspannungen und für die Relativverschiebungen zwischen Schiene und Brücke bzw. Planum nicht erbracht werden, sind Schienenauszüge anzuordnen.

Bild 4: Zusätzliche Schienenspannungen am Beispiel eines Einfeldträgers mit lückenlosem Gleis für zwei Lastfälle



Die Hintergründe der in der Norm aufgeführten Grenzkriterien hinsichtlich der Spannungen und der Verschiebungen sind auf zwei Grenzzustände zurückzuführen. Zum einen werden die vom Verkehr hervorgerufenen Spannungsschwingbreiten mit den Grundspannungen aus Temperatur und Eigenspannungen überlagert. Die dabei entstehende Abminderung der Ermüdungsfestigkeit des Schienenmaterials wird durch eine Begrenzung der zusätzlichen Zugspannungen Rechnung getragen. Andererseits führen zusätzliche Druckkräfte im Schienenstrang zu einer zunehmenden Knickgefährdung des im Schotter gebetteten Gleises. Durch die Begrenzung der zusätzlichen Druckspannungen und der Relativverschiebungen zwischen der Schiene und dem Planum wird eine übermäßige Dekonsolidierung des Schotters vermieden und eine ausreichende Verwerfungssicherheit gewährleistet.

**Dynamik von Eisenbahnbrücken**

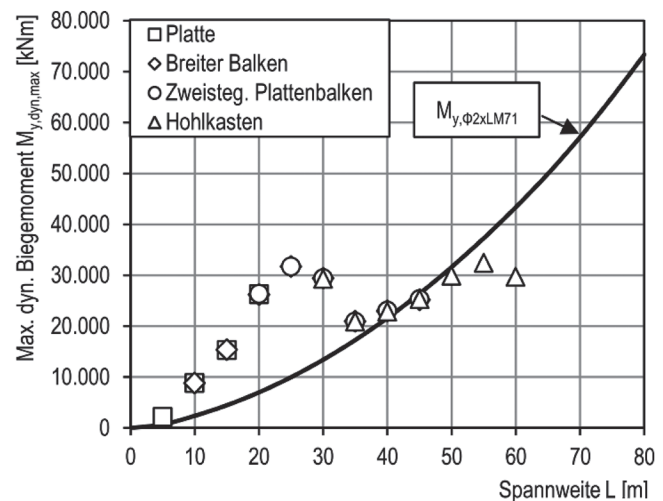
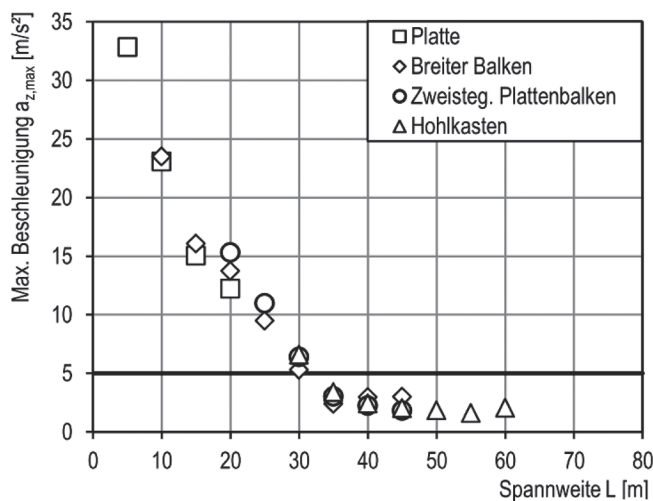
Aufgrund der bei Zügen regelmäßig angeordneten Fahrge-  
stelle sind Eisenbahnbrücken bei Zugüberfahrten hohen zyklischen Belastungen ausgesetzt, die in bestimmten Fällen zu Resonanzerscheinungen führen können. In diesem Fall bildet der Schwingbeiwert das dynamische Verhalten der Tragwerke nur unzureichend ab. Dann kann es vor allem in Hochgeschwindigkeitsnetzen zu Überlastungen und vorzeitiger Ermüdung sowie zu überproportionalem Verschleiß der Fahrbahn (weißer Schotter) auf Eisenbahnbrücken kommen. Aus diesem Grund sind generell für alle Eisenbahnbrücken die dynamischen Einflüsse aus Zugüberfahrten zu betrachten und dynamische Untersuchungen durchzuführen.

Für einige Bauwerke, wie zum Beispiel für bestimmte Rahmen, überschüttete Tragwerke und Durchlaufträger bei  $V_0 \leq 200$  km/h, greifen Ausschlusskriterien, da für die Konstruktionen eine Resonanzgefährdung auch ohne besondere dynamische Berechnung ausgeschlossen werden kann. Für Bauwerke, deren erste Eigenfrequenz sich innerhalb festgelegter Grenzen, kann ebenfalls auf eine detaillierte dynamische Berechnung verzichtet werden [1]. Um die aufwendige dynamische Berechnung zu umgehen, hat diese Vorgabe in der Vergangenheit für Einfeldträger dazu geführt, dass Bauwerke im Entwurf so „versteift“ wurden, dass die Eigenfre-

quenz innerhalb der Grenzen liegt. Die Versteifung kann beim Einfeldträger nur über die Vergrößerung der Konstruktionshöhe erzielt werden. Dieser Ansatz löst zwar das Problem, führt aber zu massiven und schwerfälligen Tragwerken. Die erforderliche Steifigkeit von Tragwerken kann viel effizienter durch Systemveränderungen, Einspannungen, Vouten und bei Mehrfeldbauwerken über die Veränderung von Stützweitenverhältnissen erreicht werden. Hier sind im frühen Entwurfsstadium, besser noch in der Vorplanung, die Parameter so zu variieren und zu verändern, dass die dynamische Stabilität für die Zuggeschwindigkeiten eingehalten und nachgewiesen werden kann. Dabei kommt der Art des statischen Systems, der Steifigkeits- und Masseverteilung sowie der Tragwerksdämpfung eine maßgebliche Bedeutung zu [2]. Wegen der Komplexität der dynamischen Reaktionen von Brückentragwerken auf die überfahrenden Züge ist es im Entwurfsprozess sehr schwierig, ohne eine aufwendige dynamische Berechnung mit Simulation der Zugüberfahrten, die qualitativen und quantitativen Auswirkungen von Änderungen am Tragwerk zu ermitteln. Deshalb wurden am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover umfangreiche Parameteruntersuchungen durchgeführt, um für typische Brückensysteme und Querschnittssituationen zukünftig den Entwurfsprozess zu vereinfachen. Zunächst wurden Einfeldträger überprüft, um eine breite Vergleichsbasis zu erhalten. Es folgten Durchlaufträger mit feldweise gleichen und unterschiedlichen Stützweiten sowie mit verschiedenen Voutenanordnungen [4].

In der Auswertung der Parameterstudie der EFT zeigte sich, dass ausschließlich Tragwerke mit Stützweiten unter 35 m sehr starke Resonanzerscheinungen im untersuchten Geschwindigkeitsbereich zeigen. Ab einer Stützweite von 35 m sinken die Beschleunigungen unter die zulässigen Werte von  $5,0$   $m/s^2$  bzw.  $3,5$   $m/s^2$ . Ab einer Stützweite von 40 m liegen auch die Biegemomente unterhalb derer, die infolge des 2-fachen Lastmodell 71 ermittelt wurden. Entsprechend den beschriebenen Abhängigkeiten sind die dynamischen Biegemomente je Spannweite unabhängig vom Querschnittstyp, da diese in der Studie für jede Spannweite die gleiche Steifigkeit besitzen [4]. Weitere Ergebnisse der Parameterstudie werden in einem Artikel der Bautechnik veröffentlicht.

Bild 5: Maximale Beschleunigung und maximale Biegemomente in Feldmitte für alle untersuchten Querschnittstypen am Einfeldträger [4]



Nach Auswertung der Studie wird deutlich, dass zum Beispiel die Scherkondetalbrücke trotz der hohen Überbauschlankheit ein sehr effektives Tragwerk für den Hochgeschwindigkeitsverkehr ist. Das wurde im Entwurf erreicht über die Abstimmung der Regelstützweiten von 44 m mit kürzeren Randfeldern und durch einen Querschnitt als breiter Balken, der in den weichen Pfeilerscheiben mit Vouten angeschlossen ist.

**Bauen unter dem rollenden Rad**

Der Planungsprozess ist für die Mehrzahl der Eisenbahnbrücken im Bestandsnetz mit der Erarbeitung einer abgestimmten Bautechnologie für das Bauen unter Eisenbahnbetrieb verbunden. Um den Wettbewerb im Schienenverkehr nicht einzuschränken, sind derzeit im Schienennetz der DB AG Vorlaufzeiten für die Anmeldung von großen Sperrpausen von bis zu 3 Jahren erforderlich. Das bedeutet, dass bereits in der Vorplanung intensive Untersuchungen zur Bautechnologie erforderlich werden und im Grobkonzept stehen müssen. Die Planung ist sehr genau auf die jeweiligen Bedürfnisse des Bahnbetriebs abzustellen und allein konstruktiv-technisch gute Varianten müssen nicht immer die Vorzugslösung sein, wenn damit der Bahnverkehr zu stark eingeschränkt wird.

Aus diesen Gründen haben sich zahlreiche hochspezialisierte Technologien für das Bauen unter Eisenbahnverkehr etabliert, die durch die planenden Ingenieure projektbezogen anzupassen sind und mit allen Beteiligten Fachplanern abgestimmt werden müssen. Das ist eine Herausforderung, die immer auch zu neuen überraschenden Lösungen führen kann, wenn Technologie, Bauwerksentwurf und Gestaltung miteinander harmonisieren.

Neben dem standardisierten Bauen unter Hilfsbrücken werden hier nachfolgend einige Verfahren benannt, die auch bei den im Heft vorgestellten Bauwerken zur Anwendung gekommen sind:

**Seitliche Vorfertigung und Einschub**

Für Überbauten oder Rahmenbauwerke ist die seitliche Vorfertigung und der Einschub über Verschubbahnen oder Verschubgerüste eine der häufigsten Technologien. Der Verschub

von Bauwerken ist immer ein sehr komplexer Vorgang, bei dem in der Ausführungsplanung auf viele Details hinsichtlich möglicher Überbeanspruchungen aus unplanmäßigen Zuständen gerechnet werden muss. Ziel ist es, Bauwerke zwangungsfrei aus der Herstelllage in die Endlage zu versetzen. Das kann durch die Anordnung der Verschubachsen im Schwerpunkt des Bauwerks oder Bauteils erfolgen. Statisch bestimmte Systeme sind je nach Verschubgewicht bereits anspruchsvoll. Bei statisch unbestimmten Systemen mit mehreren Verschubachsen und ggf. unterschiedlichen Verschubsystemen steigt die Komplexität der Planung und Ausführung. Der Erfolg eines Verschlusses ist nur sichergestellt, wenn das System über eine verformungsarme Verschubbahngründung und sehr steife Verschubgerüste verfügt. Während des Verschubvorganges ist ein absolut synchroner Verschub in allen Achsen durch weggesteuertes Einschieben sicherzustellen. Hier liegt einer der wesentlichen Punkte für die Qualitätssicherung eines Brückenverschlusses (Bild 6).

Bei allen Verschubvorgängen sind ausreichende geometrische Toleranzen für den Verschub einzukalkulieren, da Korrekturen des Verschlusses nach dem Erreichen der Endlage nur bei einigen Verfahren bedingt möglich sind. Hier empfiehlt es sich, die Regelfahrbahn um einige Zentimeter zu verbreitern und die lichte Höhe ggf. etwas zu vergrößern, um Differenzen aus dem Verschub baulich auszugleichen. Bei Rahmenbauwerken mit verformungsempfindlichen Überbauten, sollte eine horizontale Aussteifung der Widerlager während des Verschlusses eingebaut werden.

**Errichtung in Endlage**

Bei mehrgleisigen Bauwerken, zum Beispiel in Bahnhöfen ist es oft möglich, Teilbauwerke in Endlage zu errichten. Dazu sind die Bauabschnitte durch Gleislängsverbauten von einander zu trennen. Auf diese Art werden mehrgleisige Bauwerke in Einzelabschnitten hergestellt und gleisweise in Betrieb genommen. Bei Bohrpfehlgründungen ist es zwingend erforderlich, die Bauwerke gleisweise in Endlage zu errichten (Bild 8).

Daneben ist es für einige Bauvorhaben notwendig, die Neubauten neben den alten bestehenden Brücken zu errichten, da

Bild 6 (li): Die Eisenbahnbrücke Kolkbrücke wurde als Zweifeldrahmen aus der Vorfertigungslage in den Endzustand mit Fluid-Technik in einer halben Stunde verschoben (Foto: Ludolf Kröntal)

Bild 7 (re): Die Netzwerkbogenbrücke EÜ B6 in Halle wurde seitlich ca. 100 m entfernt auf einer Vorfertigungsfläche montiert und die Fahrbahn betoniert. Mit synchron fahrbaren Schwerlastmodulen wurde das fertige Bauwerk innerhalb einer Stunde von der Montagefläche in seine Endlage gebracht (Foto: Matthias Kühn DB Projekt Bau GmbH, Erfurt)



der Verkehr auf den alten Bauwerken aufrechterhalten bleiben muss. Zum Ende der Baumaßnahme werden dann die Gleise auf das neue Brückenbauwerk verschwenkt. Hier ist ein sicherer Bahnbetrieb auf dem Altbauwerk für die Bauzeit auch neben einer Baustelle zu gewährleisten. Das macht oft zusätzliche Sicherungsmaßnahmen am Übergang zwischen Alt und Neu erforderlich. Für die Allerbrücke bei Verden (Bild 9) wurde zum Beispiel als Maßnahme zur Erhöhung der Sicherheit des Bahnbetriebs auf dem Bestandsbauwerk neben der nur wenige Meter entfernten Baustelle die Einrichtung eines Monitorings am Bestandsbauwerk ausgeführt. Mit am Bauwerk installierten Sensoren wurden während der Gründungsarbeiten Setzungen, Verdrehungen und Verkippungen der bestehenden Pfeiler gemessen und ausgewertet, um auf der stark befahrenen Strecke Wunstorf – Bremerhaven den Bahnbetrieb durchgängig sicherzustellen. Derartige Verfahren geben der Bauüberwachung sehr fein abgestimmte Instrumente in die Hand, um Veränderungen aus dem Bauablauf an den in Betrieb befindlichen Bauwerken zeitnah zu erkennen und vor dem Eintreten kritischer Ereignisse reagieren zu können.

### Aktuelle Entwicklungen

Das der aktuelle Eisenbahnbrückenbau bautechnologisch und auch konstruktiv vielfältig und sehr interessant ist, wird nachfolgend anhand einiger neuerer Entwicklungen im Eisenbahnbrückenbau dargestellt.

In den letzten Jahren konnten an ausgewählten Eisenbahnbrücken durch den Einsatz neuer Konstruktionsprinzipien und Berechnungsmethoden innovative Konstruktionen realisiert werden. Die Bauwerke gehören (noch) nicht zu den Regelbauweisen, und waren deshalb auch mit schwierigen Genehmigungsprozessen verbunden, aber sie bieten durch robuste und instandhaltungsarme Bauweisen viele Vorteile für den späteren Betreiber.

### Rahmenbauwerke mit kleinen Stützweiten

Die Nutzungsdauer einer Eisenbahnbrücke liegt in der Regel bei 100 Jahren. Die Eisenbahnbrücken werden meistens zweigleisig errichtet und müssen sich nicht dem Verkehrsaufkom-

men, wie im Straßenbrückenbau, durch neue Streckengleise anpassen. Lediglich die Sicherheitsräume und geometrischen Vorgaben haben sich in den letzten 100 Jahren geringfügig geändert. Der häufigste Grund für die Erneuerung von Eisenbahnbrücken ist deshalb der schlechte Erhaltungszustand oder bei Stahlbrücken eine Kombination aus Korrosion und Ermüdung des Stahls. Aus diesem Grund muss es das Ziel sein, dauerhafte, robuste und wartungsarme Brücken zu bauen.

Schwachstellen an alten Eisenbahnbrücken sind häufig Defekte an Entwässerungssystemen, Abdichtungen, Fugen und Lagern. Durch diese defekten Bauteile, die im Zuge von Instandsetzungen mit hohem Aufwand reparabel wären, werden oft die Über- und Unterbauten geschädigt, so dass ein Ersatzneubau notwendig wird. Von den Betreibern der Eisenbahnbrücken wird deshalb immer öfter gefordert, Bauwerke möglichst lager- und fugenlos zu errichten. Für kleine Rahmenbauwerke haben sich deshalb in den letzten Jahrzehnten Standards entwickelt, die neben einer robusten dauerhaften Konstruktion auch effektive Bautechnologien zulassen.

Bei Rahmenbauwerken wird aufgrund der steifen Bauweise durch die monolithische Verbindung zwischen Überbau und Unterbau das Schwingungsverhalten und die Resonanzgefahr bei Zugüberfahrten deutlich reduziert. Die größere Steifigkeit erhöht die Eigenfrequenz des Systems. Schwingungen und Verdrehungen werden effektiv in die Rahmenstiele abgeleitet und über die Hinterfüllung das Gesamtsystem sehr wirksam gedämpft.

Weiterhin werden die Belastungen des Oberbaus bei Rahmenbauwerken durch die reduzierten Verformungen und Drehwinkel am Fahrbahnübergang und in Feldmitte minimiert. In Grenzbereichen der Schienenbeanspruchungen bei langen Bauwerken (Auszugsängen > 90 m) sind bei integralen Bauwerken geringere Schienenspannungen zu erwarten, wodurch auf den Einbau von zusätzlichen Schienenausügen verzichtet werden kann.

Neben den etablierten Einfeldrahmen wurden in den letzten Jahren zum Beispiel einige Mehrfeldrahmenbrücken errichtet, die vor allem im innerstädtischen Raum viele Vorteile bieten. Aufgrund der durchlaufenden Rahmenwirkung können bei Mehrfeldrahmen hohe Schlankheiten des Überbaus erreicht

Bild 8 (li): EÜ Flutgrabenbrücke im Knoten Erfurt, es wurde hier eine betriebliche Sperrung der Gleise genutzt, um die Bohrpfehlgründung und das Bauwerk in der Endlage herzustellen (Foto: Ludolf Krontal)

Bild 9 (re): Monitoringanlage zur Dauerüberwachung an der bestehenden EÜ Allerbrücke bei Verden. Während der Gründungsarbeiten für den Ersatzneubau in Parallellage wurden über ein Jahr Messungen mit elektronischer Schlauchwaage zur Setzungsüberwachung und Laserdistanzmessungen zur Rissüberwachung kontinuierlich durchgeführt, überwacht und ausgewertet (Foto: Ludolf Krontal)





Bild 10 (li): Vergleich anprallsichere Stütze mit Lagern am Beispiel EÜ Pausaer Straße in Plauen (Foto: Ludolf Krontal)



Bild 11 (re): eingespannte Stütze: Beispiel EÜ Friedrichshafner Straße in Leipzig (Foto: Ludolf Krontal)

und damit Gradientenanhebungen minimiert werden. Bei Stützen, die dicht an Straßen angeordnet werden, bestimmt der Anprallschutz die Geometrie der Stütze. Bei Rahmenbauwerken ist durch die Einspannung der Stützen im Überbau und im Baugrund die Tragwirkung für den Lastfall Anprall deutlich erhöht und die Stützen können schlanker ausgeführt werden (Bild 10 und 11).

Für spezielle Geländeausformungen mit Einschnitten oder Böschungen bietet sich die Anwendung von Schrägstielrahmenbrücken an. Durch die Schrägstellung der Stützen kann die Stützweite des inneren Überbaufeldes verkürzt und damit die Überbauhöhe reduziert werden. Die Stiele und die rückwärtigen Gründungsteile bilden ein Stabdreieck. Dieses bewirkt eine effektive Steifigkeit der Gesamtkonstruktion, durch welche eine hohe Schlankheit des Überbaus möglich wird. Im Straßenbrückenbau wird diese Bauweise bereits seit vielen Jahrzehnten angewandt und hat sich als robustes, effektives und optisch markantes Tragsystem bewährt, welches ebenfalls viel Potential auch für Eisenbahnbrücken bietet.

### Integrale und semiintegrale Talbrücken

Als integrale Bauwerke werden Brücken bezeichnet, die aufgrund der monolithischen Ausführung der Knotenpunkte ein kontinuierliches und fugenloses Tragwerk darstellen. Integrale

Bild 12: Die Fertigteilstützen der EÜ Vechelde wurden als Fertigteilstützen mit einem Durchmesser von 45 cm in C50/60 hergestellt und in die Widerlager und Überbauten eingespannt (Foto: Ludolf Krontal)



Brücken sind nicht erst im modernen Brückenbau bekannt. Schon die ersten römischen Brücken und Aquädukte, die als Natursteingewölbe gemauert wurden, können wegen der monolithischen Ausführung als integrale Bauwerke bezeichnet werden. In Großbritannien und in den USA werden die meisten Brücken mit Gesamtlängen von bis zu 60 m integral ausgeführt. Durch die Verbindung des Überbaus mit den Unterbauten entsteht ein robustes und redundantes System, was durch den Verzicht auf Fugen und Lager besonders instandhaltungsarm ist. Bei Temperaturbeanspruchung sowie Kriechen und Schwinden entstehen jedoch wegen der nicht freien Ausdehnung des in den Widerlagerwänden eingespannten Überbaus hohe Zwangsbeanspruchungen, die sowohl in der Berechnung als auch in der konstruktiven Durchbildung zu berücksichtigen sind. Semiintegrale Bauwerke unterscheiden sich von reinen integralen Bauwerken durch den Einbau von wenigen Lagern und/oder Fugenkonstruktionen. Durch eine sinnvolle Anordnung von Fugen wird der Überbau regelmäßig unterbrochen, um dort die Zwangsspannungen abzubauen. In Abhängigkeit von der Festpunktwahl sind viele verschiedene Tragwerkslösungen möglich.

Mit Beginn der Ära der Stahlbeton- und Spannbetonbrücken wurden semiintegrale Bauwerke vor allem in der Schweiz errichtet. Ein bedeutendes Bauwerk aus der Gründerzeit des Stahlbetonbaus ist ohne Zweifel das Langwieser Viadukt (Bild 13). Dieses 1914 fertiggestellte Bauwerk überführt die eingleisige Eisenbahnstrecke Chur-Arosa auf einer Länge von 284m. Das Tragwerk gliedert sich in drei von einander durch eine offene Fugenkonstruktion getrennte Teile. Alle Pfeiler sind monolithisch am Überbau angeschlossen. Die zwei Unterbrechungen befinden sich über den höchsten Pfeilern, was eine zwängungsarme Aufnahme der Längenänderungen des Überbaus ermöglicht. Über die drei Festpunkte an den zwei Widerlagern sowie am Bogenscheitel können die auftretenden Längskräfte aus dem Verkehr sauber abgeleitet werden.

Das 370 m lange Sembrancher Eisenbahnviadukt im Wallis (Schweiz) überquert das Tal des Flusses Drance und wurde für die Errichtung des Staudamms in Barrage du Mavoisini 1952 in Betrieb genommen (Bild 14). Später wurde die Bahnlinie Martigny-Orsières für den Schienenpersonenverkehr ausgebaut und ist noch heute unter Verkehr. Das Viadukt wurde vom Schweizer Ingenieur Alexandre Sarrasin als integrales

Zum Entwurf von Eisenbahnbrücken

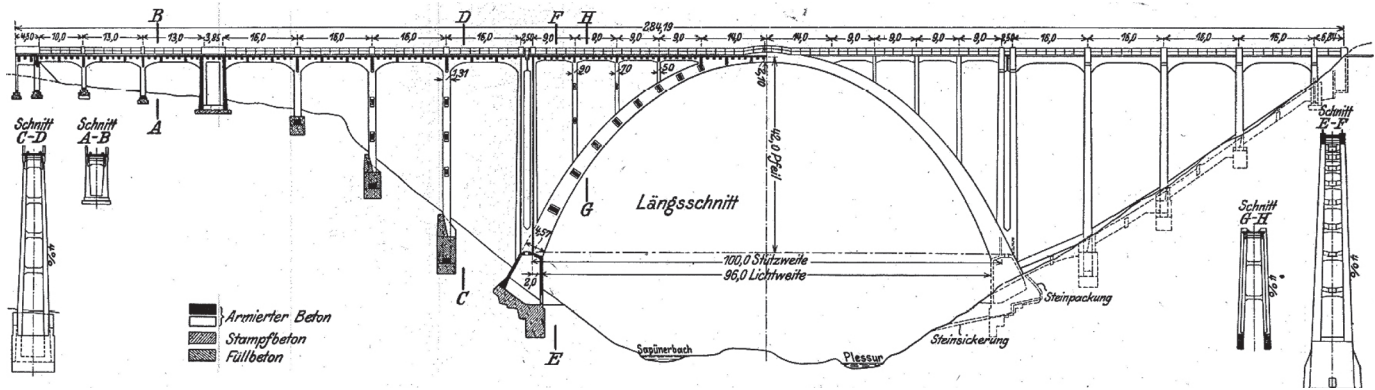


Bild 13: Langwieser Viadukt der Chur-Arosa-Bahn, 1914, aus [6]

Stahlbetonbauwerk entworfen. Der Fluss Drance wird mit einem 50 m weit stützenden Betonbogen mit rechteckigem Plattenquerschnitt überführt. Das eigentliche Viadukt wird von einer Serie aus etwa 60m langen Durchlaufträgern gebildet. Der Fahrbahnquerschnitt ist als Rechteckvollquerschnitt mit trogförmig angeordneten Kragarmen als Schotterwanne mit Randweg geformt. Die Durchlaufträger werden regelmäßig durch Dehnfugen unterbrochen. Für eine gleichmäßige Verteilung der Biegemomente sind die wandartigen Pfeiler mit veränderlichen Stützweiten angeordnet. An den Enden der Durchlaufträger sind Doppelpfeiler als Trennpfeiler angeordnet. Am Pfeilerkopf weiten sich die Pfeiler leicht auf und spannen biegesteif in die Voute des Überbaus ein. An dem schlichten Bauwerksbeispiel ist bereits der Einfluss auf die heutigen modernen integralen Talbrücken zu erkennen.

In den letzten Jahren wurden auf der Neubaustrecke Erfurt – Leipzig durch die DB AG verschiedene Eisenbahnbrücken als integrale und semiintegrale Bauwerke entworfen und gebaut. Für die DB AG bedeutet der Bau integraler Brücken im Hochgeschwindigkeitsverkehr eine neue Dimension im Talbrückenbau. Gleichzeitig knüpft die DB AG mit diesen Bauwerken an die große Tradition der historischen fugen- und lagerlosen Eisenbahnviadukte an und setzt mit der semi-integralen Bauweise moderne, innovative Entwurfs- und Bemessungskonzepte im Brückenbau um. Die Bauwerke werden

derzeit mit den eisenbahntechnischen Anlagen (Feste Fahrbahn, Oberleitung und Signaltechnik) ausgerüstet und sollen im Dezember 2015 den Regelbetrieb aufnehmen. Die in den Bildern 15 und 16 gezeigten Brücken sind hierfür gute Beispiele.

**Verbundbrückenbau**

Im Vergleich zum Straßenbau wurden bei der Bahn in Deutschland Stahlverbundbrücken bisher sehr selten ausgeführt. Dabei haben Stahlverbundbrücken gerade bezüglich der robusten Konstruktion und durch die ideale Verbindung zwischen Beton und Stahl erhebliche Vorteile für Eisenbahnbrücken. Verbundfahrbahnen sind durch ihre Ausführung als Betonbauteil deutlich robuster und dauerhafter als vergleichbare Stahlfahrbahnen. Die Erneuerung des Korrosionsschutzes auf der Fahrbahn entfällt - damit sind Stahltragwerke mit Verbundfahrbahnen im Unterhalt deutlich wirtschaftlicher für den Betreiber als zum Beispiel orthotrope Stahlfahrbahnen.

Auch baubetrieblich bieten die Verbundbrücken im Eisenbahnbau viele Vorteile. Die Hauptträger der Stahlüberbauten werden im Werk vorgefertigt und erfüllen somit hohe Qualitätsstandards. Parallel zur Vorfertigung können die Gründungsarbeiten auf der Baustelle, zum Beispiel unter Hilfsbrücken bei vollem Bahnbetrieb, durchgeführt werden. Nach der

Bild 14 (li): Sembrancher Viadukt (Foto: Ludolf Krontal)

Bild 15 (re): Die Unstruttalbrücke wurde in vier je 580 m lange Haupttragwerke mit je 10 Feldern unterteilt. Der Bogen bildet den Festpunkt jedes Haupttragwerkes. Am Übergang sind Trennpfeiler mit einer Fuge in Überbau und Pfeiler angeordnet. Die Gesamtlänge der Unstruttalbrücke beträgt 2660 m und stellt in dieser Dimension eine Landmarke dar (Foto: Ludolf Krontal)







Bild 16: Der Festpunkt der 576,5 m langen semiintegralen Scherkondetalbrücke liegt am Widerlager West (ganz rechts im Bild). Elf Pfeiler wurden monolithisch mit dem Überbau verbunden. Die beiden letzten Pfeiler und das Widerlager Ost wurden vom Überbau getrennt – hier ist der Überbau auf Kalottengleislager abgesetzt (Foto: Ludolf Krontal)

Vorfertigung werden die Überbauten auf die Baustelle verfahren, dort in die Endlage verlegt, die Fahrbahnplatte bewehrt und betoniert.

Bei Deckbrücken hat sich die VFT®-Bauweise im Straßenbrückenbau bereits etabliert. Bei den bisher errichteten VFT®-Eisenbahnbrücken konnten durch die verringerten Bauzeiten die Betriebserschwernisse im Bahnbetrieb erheblich reduziert werden. In den letzten Jahren wurden verschiedene Bauwerke als VFT®-Rahmen errichtet, weitere Projekte sind bei der DB zurzeit in Planung (Bild 17).

Neben der statischen und konstruktiven Durchbildung des Gesamtbauwerkes sind bei VFT®-Bauwerken aufgrund der großen Längen und Transportgewichte auch die Anfahrtswege zur Baustelle detailliert zu planen. Im Vorfeld ist zu recherchieren, ob über die zur Verfügung stehenden Straßen die großen Fertigteilträger antransportiert werden können. Alternativ ist auch der Transport auf Bahnwagen möglich. Dabei darf das Lichtraumprofil der Bahn nicht überschritten werden und beim Ausheben der Träger muss die ggf. vorhandene Oberleitung verschwenkt werden.

Aufgrund der deutlich höheren Achslasten als im Straßenbrückenbau sind der Anwendung von Verbundfahrbahnen im Eisenbahnbrückenbau Grenzen gesetzt. Bei Verbundbrücken mit seitlichen Stahltrögwangen wurden deshalb bisher nur eingleisige Überbauten realisiert. Diese Bauwerke können bei

Bild 17: VFT®-Rahmenbrücke, EÜ Flutgraben im Bf Erfurt (Foto: Matthias Kühn DB Projekt Bau GmbH, Erfurt)



kürzeren Stützweiten im Stück vorgefertigt, in einem Teil verlegt oder bei größeren Stützweiten seitlich hergestellt und im Querverschub in die Endlage gebracht werden. Vorteile der Bauweise sind eine hohe Qualität durch einen großen Vorfertigungsgrad und die Ausbildung eines Regelschotterbett bei minimaler Konstruktionshöhe (Bild 18, 19).

#### VFT®-Rail

Gemeinsam wurde von SSF und der DB AG in den letzten Jahren ein neues System, die sogenannte VFT®-Rail-Bauweise, entwickelt. Bei diesen Systemen wird eine externe Bewehrung aus halbierten Walzprofilen über Verbunddübel mit dem Betonquerschnitt kraftschlüssig verzahnt. Die Konstruktion ermöglicht durch die externe Bewehrung große Schlankheiten und deckt die kleinen und mittleren Spannweitenbereiche von 7 m bis 14 m ab. Im August 2011 wurde für die Deutsche Bahn als Pilotprojekt, das Zweifeldbauwerk EÜ Simmerbach, ausgeführt (Bild 20, Projektbeispiel Seite 18). Dieses Bauwerk ist sicher erst der Anfang einer neuen Entwicklung, da dieses System neben einer sehr robusten Konstruktion eine hohe Schlankheit aufweist und darüber hinaus bei effektivem Materialeinsatz sehr wirtschaftlich in der Fertigung und der Montage ist.

#### Netzwerkbogenbrücken

Im Zeitraum zwischen 2008 und 2011 wurden bei der DB AG sechs Netzwerkbogenbrücken ausgeführt. Diese Tragwerke

Bild 18: Stahltrögbauwerk mit Verbundfahrbahn – EÜ Papiermühlstraße in Leipzig (Foto: Karsten Jakisch, DB ProjektBau GmbH, Leipzig)





Bild 19: EÜ B6 in Halle – Anschluss der Verbundfahrbahn an die Hauptträger (Foto: Ludolf Krontal)

zeichnen sich durch eine hohe Effektivität auf Basis eines günstigen Verhältnisses zwischen Eigengewicht und Verkehrslasten aus. Besonders bei halbseitiger bzw. außermittiger Belastung ist das Tragverhalten effizienter als bei Stabbogenbrücken. Das wird erreicht durch mehrfach gekreuzte und geneigte Hänger zwischen dem Bogen und dem Versteifungsträger. Bei einem optimierten Entwurf des Hängernetzes sind geringere Momente und Querkräfte im Bogen und Längsträger möglich, so dass schlanke und wirtschaftliche Querschnitte erreicht werden. Darüber hinaus sind Netzwerkbogenbrücken durch die Tragwirkung des Systems deutlich steifer, was sich in geringen Verformungen und Endtangentialwinkeln der Fahrbahn bemerkbar macht. Damit erscheinen Netzwerkbogenbrücken geradezu prädestiniert für den Einsatz bei Stützweiten um 100 m und mehr. Bei den umgesetzten Netzwerkbogenbrücken der DB AG sind jedoch aufgrund der neuen Bauweise und der sehr unterschiedlichen Bautechnologien nicht alle Projekte optimal verlaufen. Deshalb sollen jetzt an den bestehenden Bauwerken Erfahrungen gesammelt werden. Dazu werden die einzelnen Bauwerke hinsichtlich ihrer konstruktiven, bautechnologischen Unterschiede analysiert und Messungen der Hängerschwingungen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen in einen Leitfaden für Netzwerkbögen einfließen, in dem Mindeststandards für die Planung und Ausführung definiert werden (Bild 21).

### Ausblick

Seit fünf Jahren liegt der vom Brückenbeirat der DB AG herausgegebene Leitfaden Gestalten von Eisenbahnbrücken vor. Einige der darin vorgeschlagenen Bauwerkssysteme wurden

Bild 20: Querschnitt VFT®-Rail (Grafik: SSF Ingenieure AG)



Bild 21: Netzwerk der EÜ B6 in Halle (Foto: Ludolf Krontal)

umgesetzt oder befinden sich jetzt in der Bauausführung. Um den Brückenbeirat ist es inzwischen ruhig geworden – wird er nicht mehr gebraucht? Ein Brückenbeirat kann Rahmenbedingungen schaffen und Grundsätze vorgeben. Die Verantwortung für die Gestaltung unserer Umwelt haben aber wir, die Ingenieure. Darum ist es umso wichtiger, dass wir jeder Entwurfsaufgabe mit Phantasie und Aufgeschlossenheit entgegenzutreten und versuchen, das Beste hinsichtlich der Technik und der Gestaltung für unsere Bauwerke herauszuholen.

In dem vorliegenden Heft „Eisenbahnbrücken“ wird eine Bandbreite von sehr interessanten Bauwerken vorgestellt, die noch nicht aus den einschlägigen Veröffentlichungen bekannt sind. Diese sollen dem Ingenieur als Anregung dienen, über den Tellerrand zu schauen und Mut zu machen, das mehr geht, als das stumpfe Übernehmen von Standardrahmenplanungen. Aus diesem Grund ist dem Verlag zu danken, mit der neuen Reihe uns Ingenieuren einen kompakten Zugang zu aktuellen Tendenzen im Ingenieurbau zur Verfügung zu stellen. Ich bin sehr gespannt auf die kommenden Veröffentlichungen und wünsche dem Verlag für dieses neue Format: Fortune!

*Ludolf Krontal,*  
Geschäftsführer Marx Krontal GmbH  
Hannover, 27.01.2013

### Literatur

- [1] Ril 804 Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten, 01.01.2013
- [2] Marx, S., Geißler, K.: Erfahrungen zur Modellierung und Bewertung von Eisenbahnbrücken mit Resonanzrisiko. Stahlbau 79 (2010), S. 188–198.
- [3] DIN EN 1991-2:2010-12 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010.
- [4] Marx, S., Schneider, S.; Entwerfen von Eisenbahnhochgeschwindigkeitsbrücken für dynamische Einwirkungen; Bau-technik 2014
- [5] Schlaich, J., Schmitt, V., Marx, S.; Leitfaden Gestalten von Eisenbahnbrücken; 12/2008
- [6] Schürch, H.: Versuche beim Bau des Langwieser Talübergangs und deren Ergebnisse; Dissertation Königl. Sächs. Technische Hochschule zu Dresden, Verlagsbuchhandlung Julius Springer, Berlin 1916