

Schwingungs- und Lärmstehung an der Oberkasseler Brücke in Düsseldorf

Im nachfolgenden Beitrag werden Teilergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Adaptive Reduzierung der Lärmabstrahlung von Stahlbrücken insbesondere beim Befahren durch Schienenfahrzeuge“ vorgestellt, welches von der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Düsseldorf koordiniert und mit Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung Essen finanziell unterstützt wurde. Für die Untersuchungen wurde die Oberkasseler Rheinbrücke in Düsseldorf als Referenzobjekt ausgewählt. Zur Analyse der Lärmstehung wurden Schwingungs- und Schallmessungen durchgeführt sowie das dynamische Strukturverhalten mit Finite-Elemente-Modellen berechnet. Durch die Kombination dieser Untersuchungsmethoden konnten die Ursachen für die Lärmstehung gefunden und Schlussfolgerungen zu allgemeinen Maßnahmen der Lärmverminderung abgeleitet und in Bezug zur ausgewählten Brücke bewertet werden.

Die Autoren

Dr.-Ing. Michael Markworth ist Geschäftsführer der IGAM Ingenieurgesellschaft für angewandte Mechanik mbH, Doz. Dr. rer. nat. habil. Friedemann Laugwitz ist Leiter des Lehrstuhls Adapttronik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dr.-Ing. Walter Ungerer ist Leiter der Abteilung Anlagen- und Systemtechnik des BFI Betriebsforschungsinstitut Düsseldorf

Der Werkstoff Stahl hat im Brückenbau einen wichtigen Platz, der jedoch vom Beton stark bedrängt wird. Speziell durch die akuter werdende Problematik der Schallabstrahlung von Brücken, die sich in Wohn- oder Freizeitgebieten befinden und von Kraftwagen und Schienenfahrzeugen genutzt werden, kann der Beton aufgrund seiner höheren Materialdämpfung und der massiveren Bauweise von Vorteil sein. Um dem Stahl bessere Ausgangsmöglichkeiten zu verschaffen, sind die Ursachen der Lärmentwicklung und die Schallwege zu analysieren und daraus abgeleitet bewährte Methoden der Schallreduktion einzusetzen und neue zu entwickeln.

Ziel des Projektes war die exemplarische Untersuchung der Schallabstrahlung von Stahlbrücken und das Aufzeigen von Möglichkeiten zu deren Verminderung. Am Beispiel einer repräsentativen Brücke sollte die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lärmursachen gezeigt werden. Grundlage dafür sind Berechnungen des Schwingungsverhaltens der Brücke sowie Messungen der Strukturmechanik und der Schallemission.

Beschreibung des Untersuchungsobjekts

Für die Untersuchungen wurde die Oberkasseler Rheinbrücke in Düsseldorf als Referenzobjekt ausgewählt, weil sie eine typische Bauweise hat und durch Lärm beim Überfahren durch Schienenfahrzeuge Konzerte in der benachbarten Tonhalle beeinträchtigt.

Die Oberkasseler Brücke [1] ist eine Mittelträgerschrägelbrücke mit einer Län-

ge von 590 m und einer Pylonhöhe von 100 m. Die Stützweiten betragen 5x52 m im Bereich der linksrheinischen Vorlandöffnungen, 258 m in der Stromöffnung und 75 m über der rechtsrheinischen Uferstraße (Abb. 1). Sie hat eine Breite von 35 m, die Bauhöhe des Balkens beträgt konstant 3,15 m. Im mittleren Bereich befinden sich die Schienen für die Stadtbahn, daneben die jeweils zwei Richtungsfahrbahnen für den Straßenverkehr sowie die beiden Gehwege.

Der Querschnitt der Brücke besteht im Überspannungsbereich (Sektion 1 bis 10 und 12 bis 21) aus einem dreizelligen Hohlkasten (geschlossenes Profil), der im Abstand von 26 m durch Vollwandscheiben ausgesteift ist. In der rechtsrheinischen Seitenöffnung (Sektion 23 bis 25) wechselt die Querschnittsform zu zwei voneinander getrennten Kastenträgern (offenes Profil), die in den Drittelpunkten durch vollwandige Querscheiben zu einem torsionssteifen Gesamtquerschnitt verbunden sind.

Die Schienenbefestigung erfolgt ohne Schotterbett. Auf das Deckblech sind im Abstand von 625 mm Unterlegplatten mit je vier Stehbolzen geschweißt. Die Schienenstühle sind mit Epoxidharz-Klebmörtel untergossen, durch Bettung der Rippenplatte in Gummi wird eine elastische Schienenlagerung nach unten und seitlich erzielt. Die Fahrbahnen haben einen bituminösen Belag mit einer Gesamtdicke von 70 mm.

Beim Befahren der Oberkasseler Brücke durch die Stadtbahn tritt signifikanter Lärm auf, welcher nach subjektiver Bewertung seit der Verkehrsfreigabe der Brücke im Jahre 1973 stärker geworden

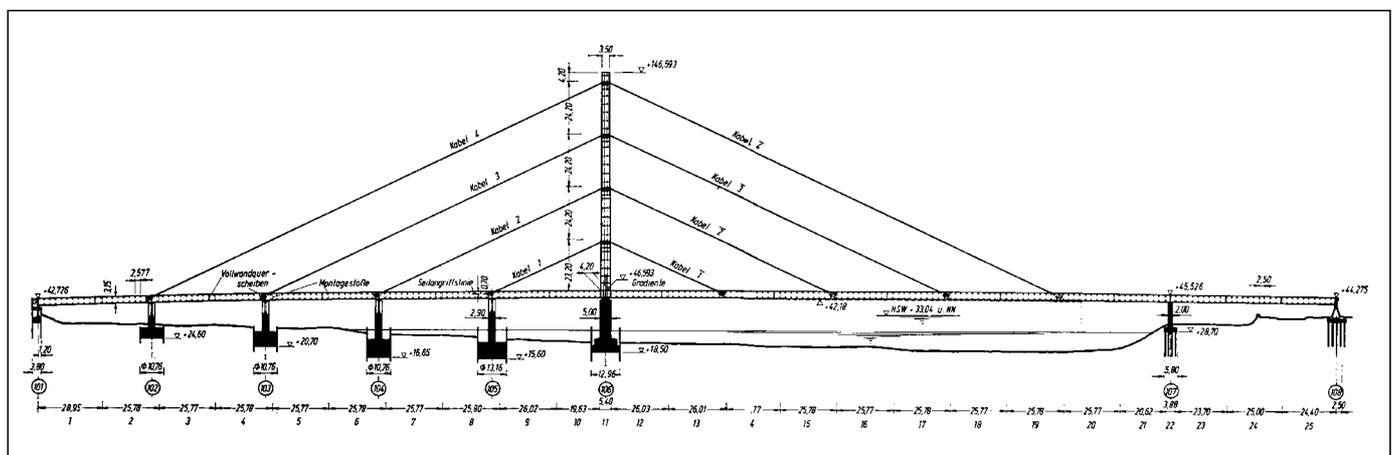


Abb. 1: Längsschnitt der Oberkasseler Rheinbrücke Düsseldorf

ist. Dieser steigende Lärmpegel ist auch deshalb problematisch, weil sich in unmittelbarer Nachbarschaft zur Brücke ein Konzertsaal, die Düsseldorfer Tonhalle, befindet. Auftretende Störungen waren bereits vor diesem Projekt Anlass von Schall- und Erschütterungsmessungen vor und in der Tonhalle. Um in Zukunft einen ungestörten Konzertbesuch in dem denkmalgeschützten Gebäude zu gewährleisten, sind Stadt und Rheinbahn aufgefordert, den Schallpegel entsprechend zu senken.

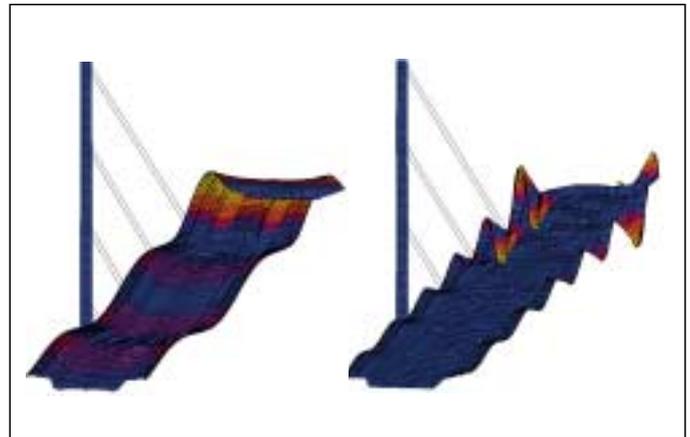
Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente

Ausgehend von den Konstruktionsdaten der Oberkasseler Brücke wurde ein Finite-Elemente-Modell aufgestellt, mit dem die Eigenschwingungen der Brücke berechnet wurden. Das Modell setzt sich aus Schalelementen zusammen, mit denen alle wesentlichen Konstruktionsteile modelliert wurden, die lokalen Verrippungen auf den einzelnen Blechfeldern wurden durch an die Schalen gekoppelte Balkenelemente, die der Steifigkeit und Masse der aufgeschweißten Profile entsprechen, abgebildet. Der Fahrbelag wurde als Masse modelliert.

Das Modell der gesamten Brücke ist sehr komplex. Es konnte abgeschätzt werden, dass die ersten 450 Eigenfrequenzen im Bereich von bis zu 20 Hz auftreten. Bis zu den interessierenden 150 Hz existieren ca. 4000 Eigenformen (modale Dichte: ca. 25 Moden je Hz). Die Frequenzen bis etwa 15 Hz haben vorrangig globale Schwingformen (Abb. 2).

Die maximalen Schwingungsamplituden bei vielen Moden treten in den Bereichen der Fußgängerwege auf. Eine Vielzahl von Formen werden durch Schwingungen der Querscheiben geprägt. Große Amplituden wurden bei vielen Eigenformen im Bereich des offenen Querschnitts berechnet. Die modale Dichte der Brücke ist aufgrund der sich wiederholenden Geometrie jedoch derartig hoch, dass ein Modellupdate mit den Messdaten unrealistisch war. Für die

Abb. 2: Beispiele globaler Schwingformen der Brücke: links 1,9 Hz, rechts 6,5 Hz



Planung der messtechnischen Untersuchungen konnten jedoch prinzipielle Aussagen, z.B. für die Wahl der Messpunkte, abgeleitet werden.

Zur weiteren Berechnung wurden in Anlehnung an das globale Finite-Elemente-Modell verfeinerte Modelle der verschiedenen Sektionen aufgestellt. In Abb. 3 sind als Beispiele zwei Eigenformen dargestellt, welche die für viele Formen typischen Biegeschwingungen von Blechfeldern im Tunnelbereich zeigen. Bis zu einer Frequenz von 200 Hz wurden etwa 1000 Eigenformen berechnet, wodurch sich ein mittlerer Frequenzabstand von 0,2 Hz zwischen den Moden ergibt. Eine Korrelation mit einer Messung kann somit nicht über die Eigenformen erfolgen, sondern nur über einen direkten Vergleich der gemessenen Betriebsschwingungen mit berechneten Schwingungen unter äquivalenten Lastbedingungen. Das FE-Modell

wurde deshalb mit Kräften, die mit 3000 kg je Rad der Belastung durch eine Bahn entsprechen, angeregt und der Frequenzgang von 0 bis 200 Hz berechnet. Abb. 4 zeigt am FE-Modell einer Sektion des offenen Querschnitts die Anregungspunkte und die Betriebsschwingform mit den maximalen Amplituden, die bei einer Frequenz von 76 Hz berechnet wurde.

Messung der Schallabstrahlung mit der „Akustischen Kamera“

In Vorbereitung der Messungen von Schallabstrahlung und Strukturodynamik erfolgte zunächst die Auswertung der vorangegangenen Untersuchungen, wie einer Immissionsmessung im Bereich der Tonhalle [6], der FE-Berechnung sowie einer Übersichtsmessung von Schwingung und Schall im Brückenkasten [9]. Das Ergebnis war eine Konzentration auf die rechtsrhei-

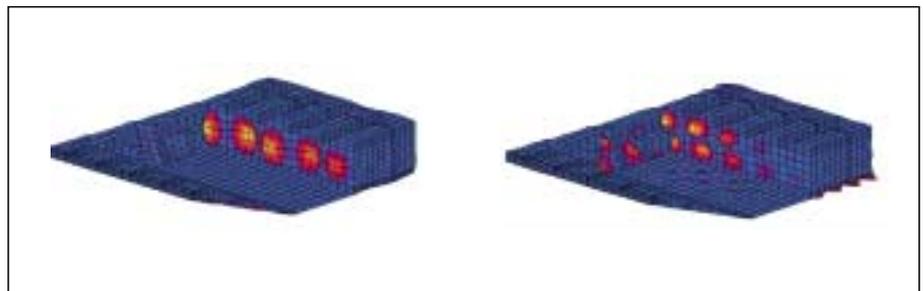


Abb. 3: Beispiel für lokale Eigenschwingformen: links Modell mit Anregung, rechts dominante Schwingform

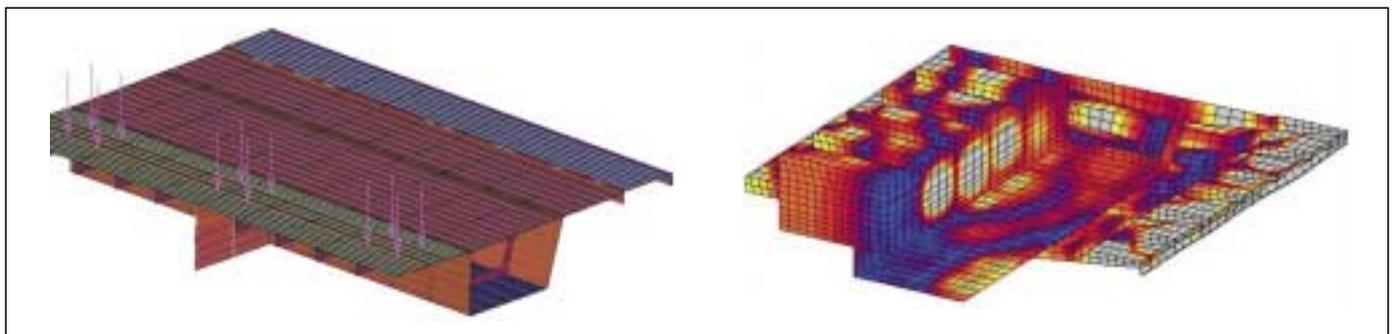


Abb. 4: Betriebsschwingungsanalyse: links Modell mit Anregung, rechts: dominante Schwingform bei 76 Hz

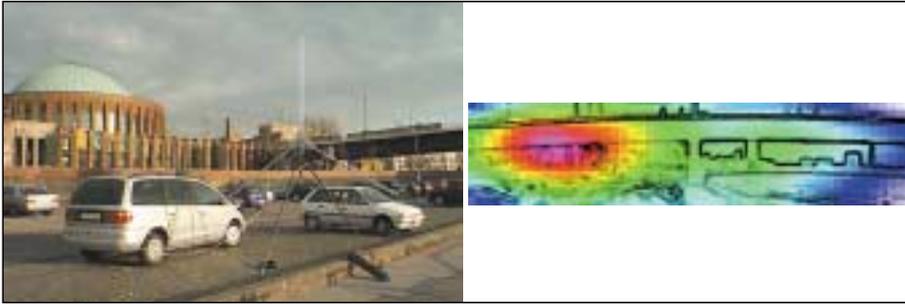


Abb. 5: Messsystem „Akustische Kamera“ vor der Tonhalle und Brücke sowie Schallemission aus 100 m Entfernung

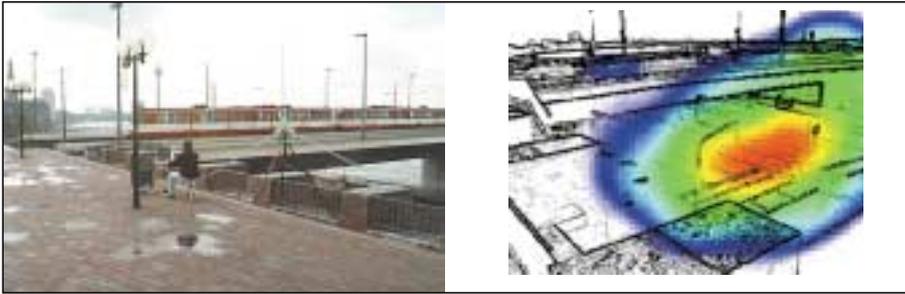


Abb. 6: Messort vor der Tonhalle und gemessene Schallemission bei Bahnüberfahrt

nische Hälfte der Brücke, insbesondere auf den Abschnitt mit offenem Querschnitt und einem relevanten Frequenzbereich von bis zu 200 Hz. Die Messung der Schallabstrahlung sowie

die Übertragung des Schalls zur Tonhalle wurde mit der „Akustischen Kamera“, einem Messsystem mit sternförmiger Anordnung von 33 Studio-Mikrofonen, durchgeführt [8]. Insgesamt wurde zur

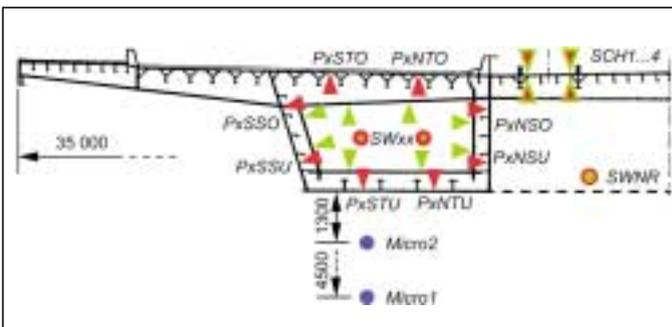


Abb. 7: Darstellung der Messpunkte am Querschnitt des offenen Profils

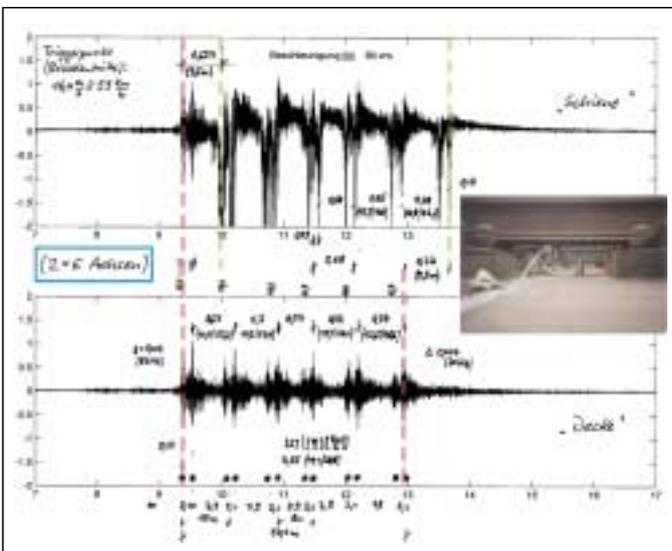


Abb. 8: Zeitsignale von „Schiene“ und „Decke“ beim 6-Achser

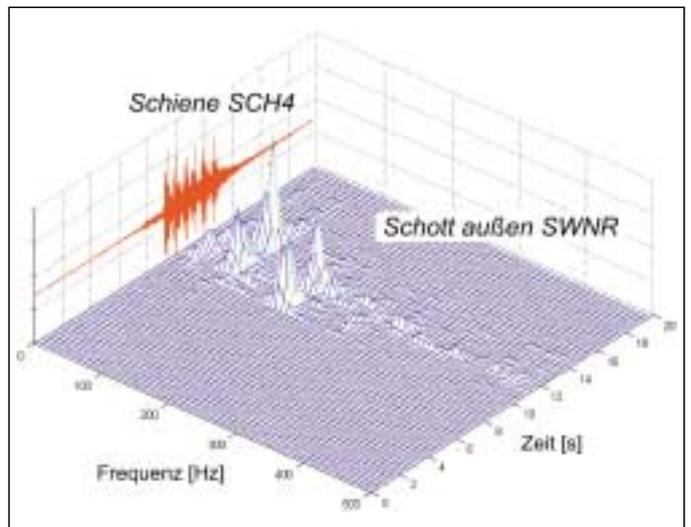


Abb. 9: Wasserfalldarstellung der Leistungsspektren bei Bahnüberfahrt Datensatz 90

Lokalisierung der dominierenden Schallquellen von sechs verschiedenen Messorten aus, in unterschiedlicher Entfernung von der Brücke sowie unterhalb und direkt vor der Tonhalle, gemessen.

Abb. 5 zeigt die Messsituation in 100 m Abstand zur Brücke sowie eine ermittelte Emissionskarte, die das Auftreten der maximalen Schallabstrahlung im Bereich des offenen Querschnittes und an der Brückenunterseite deutlich macht. Aus Abb. 6, welche die Messung vor der Tonhalle zeigt, ist zu erkennen, dass nicht der direkte Schall der Bahnen dominant ist, sondern der vom Brückenkörper durch Anregung der Bahnen entstehende, d.h. die Schallabstrahlung vom Rad-Schiene-Kontakt ist wesentlich geringer als die Schallabstrahlung durch die Brücke und dabei insbesondere nach unten. Die maßgebliche Geräusentwicklung im Bereich der Tonhalle entsteht dann aufgrund von Reflexion der abgestrahlten Emissionen an der Straßenoberfläche. Die größten Amplituden treten in den Frequenzbereichen 60 bis 70 Hz und 120 bis 180 Hz auf.

Messung des dynamischen Verhaltens der Brücke

Zur Vermessung wurde der südliche Brückenkasten der Sektion 23 festgelegt. Die Messpunkte in einer der drei Messebenen innerhalb dieser Sektion zeigt Abb. 7. In Summe wurden mit einer Abtastrate von je 1000 Hz die Schwingbeschleunigungen an 82 Stellen sowie die Schallabstrahlung mit zwei Mikrofonen unter dem offenen Querschnitt der Brücke gemessen. Es wurden 107 Fahrten der Bahn in Richtung Altstadt erfasst und ausgewertet.

Die Anregung der Brücke erfolgte durch die Bahnüberfahrten, d.h. es wurden Be-

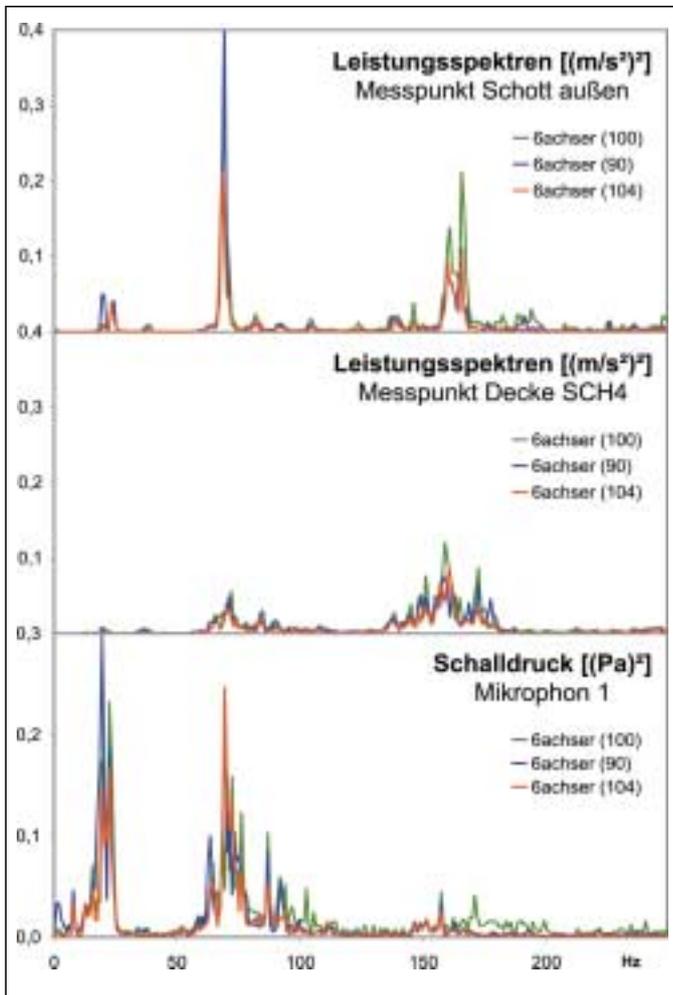


Abb. 10: Vergleich von Leistungsspektren und Schalldruck beim Überfahren von drei 6achsigen Zügen

triebsschwingungen und keine Eigenschwingungen gemessen. Betrachtet wurden Bahnfahrten aus Richtung Oberkassel in Richtung Altstadt bei denen sich die Bahnen direkt über den Messpunkten im südlichen Brückenkasten bewegten. Die Anregungen durch Autos und Lkw haben im interessierenden Frequenzbereich einen

zu vernachlässigenden Einfluss auf das Brückenverhalten. Die Rheinbahn setzt verschiedenartige Züge ein. Während der Messung waren jeweils zu Doppelzügen gekoppelte Wagen von zwei Baureihen im Einsatz. Die Wagen der älteren Baureihe GT8-SU haben je 8 Achsen und die der Baureihe B80-Alu je 6

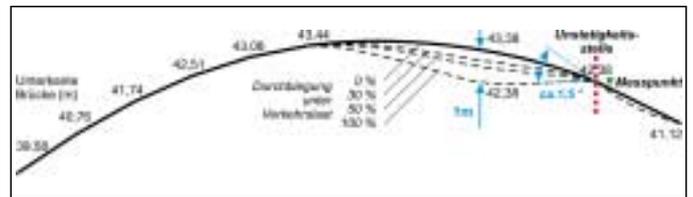


Abb. 12: Maßstäblich überhöhte Darstellung der Brückendurchbiegung unter Verkehrsast

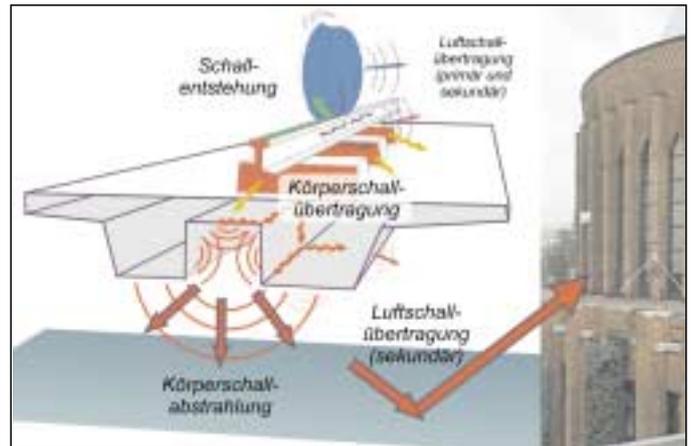


Abb. 13: Schallentstehung und -ausbreitung an der Oberkasseler Rheinbrücke

Achsen. Die Fahrgeschwindigkeit auf der Brücke beträgt maximal 60 km/h, im Bereich der Messung erfolgt aber schon eine Reduzierung auf ca. 55 bis 45 km/h für die Einfahrt in den Haltestellenbereich. Die Bahn regt die Brücke sowohl harmonisch als auch stochastisch an. Die Impulsfolge durch den Rad-Schiene-Kontakt stellt eine breitbandige Anregung bis zu hohen Frequenzen dar. Durch die Überfahrt ergeben sich aber aus den unterschiedlichen Abständen der Achsen, Drehgestelle und Schwellen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit auch harmonische Anteile, welche die Brücke in diesen Frequenzen und auch deren Vielfache zu Schwingungen anregen.

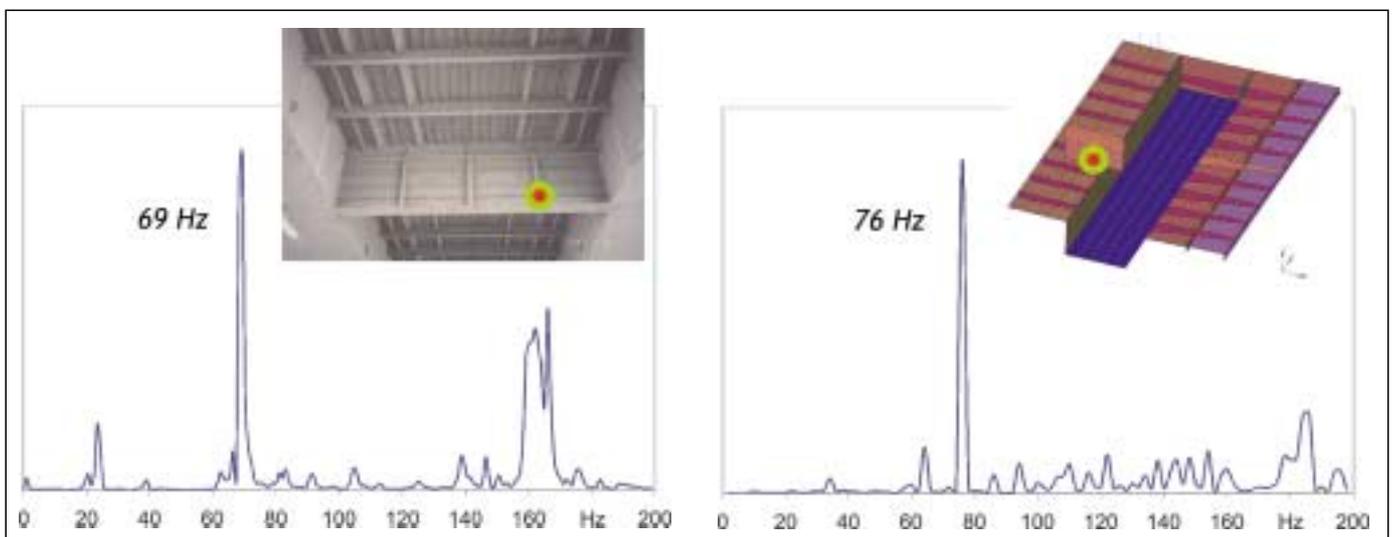


Abb. 11: Gemessenes Leistungsspektrum (links) und berechneter Frequenzgang „Schott außen“

Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens wurden verschiedene Darstellungsarten im Zeit- und Frequenzbereich herangezogen. Als Beispiel zeigt Abb. 8 den Zeitverlauf der beiden Messsignale „Schiene“ und „Decke“, Abb. 9 ein Wasserfalldiagramm der Leistungsspektren des Messpunktes SWNR am Schott außen in Bezug zum Zeitsignal an der Schiene SCH4.

Bei der Auswertung erfolgte auch ein Vergleich mehrerer „6achser“ und „8achser“ sowie auch zwischen den beiden Varianten. Abb. 10 zeigt als Beispiel von drei Messsignalen Beschleunigung „Decke“ (SCH4), Beschleunigung „Schott“ (SWNR) und Schalldruck (Mikro1) jeweils von drei Überfahrten die Summen-Leistungsspektren. Diese drei Signale sind jeweils nahezu identisch, d.h. bei den gleichen Wagentypen sind die Messergebnisse für verschiedene Datensätze bis auf geringe Abweichungen in den Amplituden reproduzierbar. Sowohl die Beschleunigungssignale als auch die Schallsignale zeigen im Zeit- und Frequenzbereich die gleiche Charakteristik. Zwischen den 6- und 8achsers gibt es am Signal „Decke“ Unterschiede, am „Schott“ sowohl in Amplitude als auch Frequenzverteilung weniger. Die Frequenz von 69 Hz ist immer dominierend. Beim Schalldruck sind die Maxima jeweils bei ca. 20 Hz und um die 70 Hz. Im Frequenzbereich 25 bis 60 Hz tritt nahezu keine Schallemission auf. Die 6achser haben aufgrund höherer Achslast größere Amplituden bei ca. 20 Hz, die 8achser bei 70 Hz und auch im Bereich 120 bis 180 Hz und sind dementsprechend lauter.

Bei den Messungen an einem senkrechten Blechfeld in Sektionsmitte in Richtung offener Querschnitt sind deutlich auch lokale Effekte zu erkennen, d.h. in den einzelnen Teilblechen treten Maxima bei unterschiedlichen Frequenzen auf.

Ergebnisse hinsichtlich der Schwingungs- und Lärmstehung

Obwohl die Brückenschwingungen bei einer hohen modalen Dichte sehr komplex sind, wurde im Vergleich von FE-Berechnungen und Messungen für wichtige Aussagen eine qualitative Übereinstimmung erreicht. So konnten die Biegeschwingungen der Blechfelder als relevante Schallverursacher im störenden Frequenzbereich nachgewiesen werden. Des Weiteren konnte die bei der Betriebsschwingungsanalyse mit Bahnanregung berechnete dominante Schwingform bei ca. 76 Hz auch bei der Messung als Hauptschwingungsfrequenz mit 69 Hz bestätigt werden (Abb. 11).

In Auswertung der Berechnungen und Messungen konnte folgender Entstehungsmechanismus für die störende Lärmabstrahlung ermittelt werden: Durch den Rad-Schiene-Kontakt, dessen direkte Lärmabstrahlung sehr gering ist, erfolgt die Anregung mit einer Impulsfolge. Es werden dementsprechend alle Frequenzen angeregt. Harmonische Anteile treten in den tieferen Frequenzbereichen auf. Deutlich wird z.B. die Frequenz von ca. 22 Hz resultierend aus dem Schwellenabstand, außerdem erfolgt eine Modulation mit der Frequenz des Drehgestell-Abstandes von ca. 1,5 Hz, die im gesamten betrachteten Frequenzbereich bis 500 Hz auftritt und eine weitere Modulation mit einer Frequenz von ca. 6,5 Hz, die der Drehfrequenz der Räder und auch der Frequenz vom Achs-Abstand entspricht. Die Schwingung der Schiene wird in Amplitude und Frequenz direkt auf die Brückenstruktur übertragen, d.h. die eigentlich zur Dämpfung eingebauten Kunststoff-Unterlagen der Befestigungselemente erfüllen nicht (mehr) ihren Zweck. Die Brückenstruktur führt dann Schwingungen mit einer Vielzahl von Frequenzen aus, insbesondere in der dominierenden Eigenfrequenz der Blechfelder von 69 Hz aber auch im Bereich von 160 Hz, die Ursache für die Lärmabstrahlung sind. Die Schallemission erfolgt fast ausschließlich nach unten und ist im Bereich des offenen Brückenquerschnitts, der aufgrund seiner Geometrie wie ein Lautsprecher wirkt, besonders groß. Durch Reflexion des abgestrahlten Luftschalls an der Straße wird der Lärm zur Tonhalle übertragen, eine Einleitung von Schwingungen über die Fundamente konnte ausgeschlossen werden.

Wesentlich für die hohe Lärmentwicklung ist dabei folgende Besonderheit an der Oberkasseler Brücke: Die Gegenüberstellung der Signale von „Schiene“ und „Decke“ in Abb. 8 lässt die Amplitudenvergrößerungen der Zeitsignale jeweils bei Überfahren durch ein Rad erkennen. Am Anfang weisen beide ein identisches, aufgrund der Sensoranordnung gegenphasiges Verhalten auf. In einem Abstand von 0,637 s (entspricht einer Strecke von ca. 9,5 m) nach dem Impuls des ersten Rades treten beim Signal „Schiene“ weitere, insgesamt nochmals sechs Doppel-Impulse mit stark einseitigem Ausschlag (nach oben) auf. Der letzte Impuls erfolgt in einem Abstand von 0,74 s (auch ca. 9,5 m) nach dem letzten Impuls im Signal „Decke“. Dieses Verhalten tritt bei jeder Überfahrt auf, bei den 8achsers ist Analoges zu beobachten. Ursache sind deutliche Schläge, die bei der Fahrt in Richtung Altstadt je Rad beim Überrollen einer Stelle ca. 2 m hinter Pfeilermitte entstehen. Bei

der Fahrt in Richtung Oberkassel erfolgen die Schläge analog ca. 2 m vor Pfeilermitte. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass in der Brückenkonstruktion eine „Unstetigkeitsstelle“ vorhanden ist. Durch diese Schläge an der Unstetigkeitsstelle erfolgt die eigentliche Anregung der Brücke zu Schwingungen und damit zur Lärmabstrahlung.

Die „Unstetigkeit“ ist eine Stelle mit stark veränderter Biegeachgiebigkeit in der Brücke beim Übergang von der Vorbrücke zur Brücke. Durch die ständig wechselnde Verkehrslast und sich dadurch ergebender unterschiedlicher Durchbiegung hat sich eine Art „Festkörpergelenk“ ausgebildet (Abb. 12).

Schlussfolgerungen für Maßnahmen zur Lärmreduktion

Der mess- und rechentechnisch ermittelte Entstehungs- und Ausbreitungsmechanismus des Lärms an der Oberkasseler Rheinbrücke ist in der Übersicht in Abb. 13 schematisch dargestellt. Daraus lassen sich die nachfolgend aufgeführten allgemeinen Maßnahmen zur Verminderung des Lärms an Stahlbrücken sowie Ansatzpunkte für konkrete Änderungen an der untersuchten Brücke ableiten.

Vermeidung der Ursache der Lärmstehung

Die Hauptursache für die Lärmstehung ist der Rad-Schiene-Kontakt. Grundsätzlich ließe sich der Schallpegel senken durch zeitliches Dehnen der Wechselkräfte (Verminderung der Fahrgeschwindigkeit), durch Verringerung der Amplituden der Kräfte (Nutzung leichterer Fahrzeuge), durch Verringerung der Wechselkräfte im Kontaktbereich (Minderung der relevanten Massen, z.B. durch Änderung von Material oder Geometrie der Räder [5]) oder durch Erhöhung der Eingangsimpedanz (d.h. Verwendung schwerer Schienen mit z.B. breiterem Steg [3]). Weitere Maßnahmen sind die Reduzierung der Schwingbeschleunigungen durch Minimierung der Oberflächenrauigkeiten bzw. Wellen oder Riffel auf Schienen und Rädern sowie Vermeidung von Unstetigkeitsstellen in den Schienen wie z.B. Schläge bzw. Stöße in Geometrie oder Materialeigenschaft.

Im untersuchten Fall ist die direkte Schallabstrahlung am Rad-Schiene-Kontakt von untergeordneter Bedeutung. Die Brücke unterliegt jedoch im Bereich des Pfeilers durch die Verkehrslast einer ständigen Wechselbiegung. Diese wird über die Befestigungselemente auch auf die Schienen übertragen. In gewisser Zeit, die von der Steifigkeit der Schienenlagerungen und

vom Lastprofil abhängt, entsteht in der Schiene eine Unstetigkeitsstelle, bei deren Überfahren eine impulsartige Anregung der Brücke erfolgt. Dieses und die Tatsache, dass dadurch anregbare und akustisch relevante Eigenschwingungen der Brücke existieren, sind wesentliche Merkmale für die Lärmursache an der Oberkasseler Brücke. Kann man diesen Impuls vermeiden, wird die Lärmabstrahlung enorm gesenkt.

Kurzfristig lässt sich diese Anregung dadurch beheben, dass die Lagerungen und auch die Schienen selbst erneuert werden. Mittelfristig wird das Problem durch die Brückendynamik jedoch wieder entstehen. Als längerfristige Maßnahme erscheint hier eine lokal begrenzte aktive Entkopplung der Schiene nicht nur technisch machbar sondern auch unabdingbar zu sein. Denkbar ist zum Beispiel die Installation aktiver Dämpfer im Bereich $\pm 1,5$ m der Knickstelle, was mit ca. 20 Lagerungspunkten auch eine ökonomisch realisierbare Größenordnung darstellt.

Verminderung von Schienenschwingungen

Der Rad-Schiene-Kontakt führt zu Schwingungen der Schienen, die selbst Schall abstrahlen oder zur Schallabstrahlung beitragen können. Resonanzerscheinungen führen nicht nur zur Ausbreitung des Schalls in der Schiene selbst sondern beeinflussen auch die Brückenstruktur. Möglichkeit zur Verminderung von Schienenschwingungen ist die Dämpfung durch zusätzliches, punktuell oder stückweise seitlich befestigtes Dämmmaterial, durch Verbundbauweise der Schienen mit seitlicher Dämmschicht und Metallmantel [10], durch vollelastische Einbettung der Schiene [11] sowie durch Absorber bzw. Schwingungstilger an den Schienenstegen [12]. Die Lärmausbreitung über Schienenschwingungen ist bei der Oberkasseler Rheinbrücke vergleichsweise gering.

Reduzierung der Schalleinleitung in die Struktur

Die Schwingungen aus dem Rad-Schiene-Kontakt werden über die Schiene und deren Befestigungen in die Brückenstruktur übertragen. Aufgrund der hohen dämpfenden Wirkung von Schotterbettung ist hier die Schallabstrahlung am geringsten, bei einem Aufbau mit fester Fahrbahn treten höhere Schallpegel auf. Besonders problematisch ist die direkte Schienenbefestigung am Deckblech der Brücke über spezielle Halterungen [4].

Mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Schwingungseinleitung insbesondere im Fall der direkten Schienenbefestigung sind die Verwendung einer dämmenden

Schicht zwischen Schiene und Brückenstruktur zur passiven Entkopplung und Vermeidung von Schallbrücken, wie Schrauben und Federn oder auch der Einsatz einer vollelastischen Einbettung der Schiene [11]. Ergänzend zur Dämmschicht kann eine aktive Entkopplung von Schiene und Brücke durch entsprechende adaptive Systeme erfolgen, die den quasistatischen Kraftfluss realisieren aber eine Übertragung der für die Lärmmentstehung relevanten Frequenzen vermindern [9]. Weiterhin sind Unstetigkeitsstellen bei der Schienenbefestigung, z.B. durch Realisierung fließender Übergänge bei sich änderndem Unterbau, durch entsprechende Anpassung der Steifigkeiten und Dämpfungen der Halterungen zu vermeiden.

Auch bei der Rheinbrücke ist die Verminderung der Schwingungsübertragung von der Schiene in die Brückenkonstruktion als wesentlicher Ansatzpunkt für eine effiziente Lärmreduktion einzustufen. Auf der gesamten Brücke sollten hier Schienenbefestigungen mit dämmenden Zwischenschichten unter Vermeidung von Körperschallbrücken oder ggf. komplette elastische Schieneneinbettungen realisiert werden. In besonderen Problembereichen, wie der konstruktionsbedingten Unstetigkeitsstelle in Pfeilernähe, erscheint es sinnvoll und auch technisch möglich, diese passive Dämmung durch eine aktive Schienenentkopplung im akustisch relevanten Frequenzbereich zu ergänzen.

Reduzierung der Schallabstrahlung von der Struktur

Eine Brückenkonstruktion wird in verschiedensten Frequenzen zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Stahlblechkonstruktionen haben im relevanten Frequenzbereich i.a. eine Vielzahl von schwach gedämpften Eigenfrequenzen, von denen mehrere durch die Schienenfahrzeuge zu Resonanzschwingungen anregbar sind und davon wiederum einige eine hohe Schallabstrahlung verursachen können. Insbesondere große, freie Blechfelder ohne Belag und wenig Verrippung in ungünstiger Anordnung sind in der Lage, große und nur langsam abklingende Schallpegel zu erzeugen.

Eine Reduzierung der Schallabstrahlung ist durch eine Dämpfung der Strukturschwingungen möglich. Liegen keine genauen Kenntnisse des dynamischen Verhaltens der Brückenstruktur vor, können zur allgemeinen Dämpfungserhöhung an allen Blechfeldern vollflächig absorbierende Materialien, wie z.B. bituminöse Anstriche, schalldämpfende Schäume, Mineralfasermatten oder auch elastomere Bitumenschwerfolien und Verbundsysteme, aufgebracht werden [2, 13].

Ist das Schwingungs- und Schallabstrahlungsverhalten der Struktur bekannt, können ökonomischere und effizientere Maßnahmen durch eine Konzentration auf die wesentlichen Bereiche vorgenommen werden. Kann z.B. eine dominierende Schwingform vermieden werden, wird eine drastische Lärmreduktion erreicht.

Bei örtlich bekannten und begrenzten Schallquellen kann eine Dämpfung erreicht werden durch lokale Abschirmung mit schallabsorbierenden Materialien, durch Auftragen von Dämmschichten mit abgestimmten Eigenschaften auf die Blechfelder mit den höchsten Schwingungsamplituden, durch Dämpfung mit lokalen Absorbern bzw. Tilgern [7, 12], durch zusätzliche aktive Schallreduktion durch Strukturberuhigung oder auch Antischallerzeugung durch adaptive Systeme sowie letztlich durch Änderungen der Brückenkonstruktion zur Eliminierung der schallrelevanten Schwingformen (z.B. durch zusätzliche Streben und Rippen) oder zur Ausnutzung des akustischen Kurzschlusses (z.B. durch lokale Durchbrüche oder Beugungshilfen).

An der Oberkasseler Brücke erscheint eine Reduzierung der Körperschallabstrahlung in Folge begrenzter resonanter Blechschwingungen durch konstruktive Änderungen der Brücke, durch Aufbringen zusätzlicher Dämmschichten auf die Blechfelder sowie auch durch Verminderung der Schwingungen mit aktiven Systemen sowohl aus technischer als auch aus ökonomischer Sicht nicht realisierbar.

Vermeidung der Schallübertragung

Die Verringerung des Schallpegels ist immer dann von besonderer Bedeutung, wenn sich in der Nähe der lärmverursachenden Brücke Wohnviertel, Freizeitgebiete oder andere geräuschsensible Einrichtungen befinden. Prinzipiell möglich sind also zusätzlich zu der Schallvermeidung auch eigenständige Maßnahmen zur Verminderung oder Vermeidung der Schallübertragung, wie z.B. Einhausung der Brücke oder deren relevante Bereiche, Errichtung von Schallschutzanlagen entlang oder auf der schallabstrahlenden Brücke, Abschirmung der zu schützenden Einrichtung durch entsprechende lärmreduzierende Maßnahmen, wie Schallschutzbauten oder schallisolierende Fenster.

Die Verhinderung insbesondere der sekundären Luftschallübertragung von der Brücke zur Tonhalle mit Hilfe einer Einhausung der Brücke oder die Errichtung von Lärmschutzbauten ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich. Das Schließen des offenen Brückenquerschnittes durch schalldämmendes Material könnte jedoch eine effektive Maßnahme sein.

Literatur

- [1] *Beyer, E.; Volke, E.; von Gottstein, F.; Ramberger, G.:* Neubau und Querverschub der Rheinbrücke Düsseldorf-Oberkassel; Sonderdruck aus DER STAHLBAU. Düsseldorf (1977)
- [2] *Hanel, J.J.; Seeger, T.:* Schallgedämpfte Stahlkonstruktionen; TH Darmstadt (1977)
- [3] *Kalivoda, M.:* (Psycho-) Akustische Wirkung der schalloptimierten Schiene; Untersuchungsbericht, erstellt im Auftrag der ÖBB, Perchtoldsdorf (1996)
- [4] *Nowak, R.:* Elastische Schienenbefestigungssysteme als schallmindernde Maßnahme bei Stahlbrücken ohne Schotterbett; ETR 47 (1998) 4, S.215-222
- [5] *Löffler, M.:* Reduzierung der Geräusche bei rollenden Systemen. Railway Noise '99; Warschau (1999)
- [6] *Lenz, U. u.a.:* Schall- und schwingungstechnisches Gutachten, Immissionsmessung im Bereich der Oberkasseler Brücke; Ingenieurbüro D. Uderstädt + Partner GbR. Essen (2000)
- [7] *Veit, G.:* Noise Reduction on a Railway Steel Bridge; CETIM France (2001)
- [8] *Heinz, G.; Nguyen, T.T.:* Schallbilder Oberkasseler Brücke Düsseldorf; GFal e.V. Berlin (2001)
- [9] *Laugwitz, F.; Markworth, M.; Polzer, J. u.a.:* Reduzierung von Stahlbrücken-Lärm; Abschlussbericht des Projektes P493 der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. Düsseldorf (2004)

[10] System Schienenstegdämpfung; Firmeninformation Vossloh AG

[11] Die Flüsterschiene; Firmeninformation Ortec GmbH

[12] Absorber-Systeme; Firmeninformation Schrey&Veit GmbH

[13] Schalldämpfprodukte; Firmeninformation Cello-foam GmbH & Co. KG

Summary / Résumé

Vibration and noise generation on the Oberkassel Bridge in Düsseldorf

The article presents interim results from the research project on "adaptive reduction of noise radiation from steel bridges, especially when crossed by railway vehicles". The project was coordinated by the Düsseldorf Steel Utilisation Research Association and funded by the Steel Utilisation Research Foundation in Essen. The reference structure chosen for the study was the Oberkassel Bridge spanning the Rhine in Düsseldorf. Noise generation was analysed by measuring vibration and sound levels, and the dynamic behaviour of the structure was calculated using finite element models. Combining these methods of examination made it possible to identify the causes of noise generation and to derive ways of reducing noise levels in general; these were evaluated against the bridge chosen for study.

Formation des vibrations et du bruit au franchissement du pont Oberkassel à Düsseldorf

Dans cet article sont présentés des résultats partiels du projet de recherche « réduction adaptée du rayonnement sonore des ponts métalliques, en particulier lors du franchissement par des véhicules ferroviaires », qui a été coordonné par l'association de recherche « Application de l'acier » de Düsseldorf et soutenu financièrement par des moyens fournis par la fondation « Recherche sur les applications de l'acier » d'Essen. Pour les études l'on a choisi comme objet de référence le pont Oberkassel sur le Rhin à Düsseldorf. Pour analyser la formation du bruit, on a effectué des mesures des vibrations et du bruit, et on a calculé le comportement dynamique de la structure à l'aide de modèles à éléments finis. La combinaison de ces méthodes d'étude a permis de trouver les causes de l'apparition du bruit, d'en déduire des conclusions relatives à des mesures générales destinées à réduire le bruit et d'évaluer celles-ci pour ce qui concerne le pont sélectionné.





Autoprowa®

Service



Autoprowa®

Schulung

Autoprowa® Schulung

Intensive Schulungen sind das A und O für das Verstehen unserer Produkte. Ob Planung, Auf- und Abbau, Bedienung oder Service - bewährte Schulungskonzepte machen aus Ihrem qualifizierten Personal Autoprowa® Spezialisten.

Zuverlässigkeit und Sicherheit spielen dabei für uns die Hauptrollen.

**Sicherheit
für heute
und morgen**

ZÖLLNER GmbH
 Zur Föhre 1 D-24143 Kiel Phone +49 431 7027-100/111/116 E-mail signal@zoellner.de
 PO Box 6540 D-24126 Kiel Fax +49 431 7027-202 Website www.zoellner.de