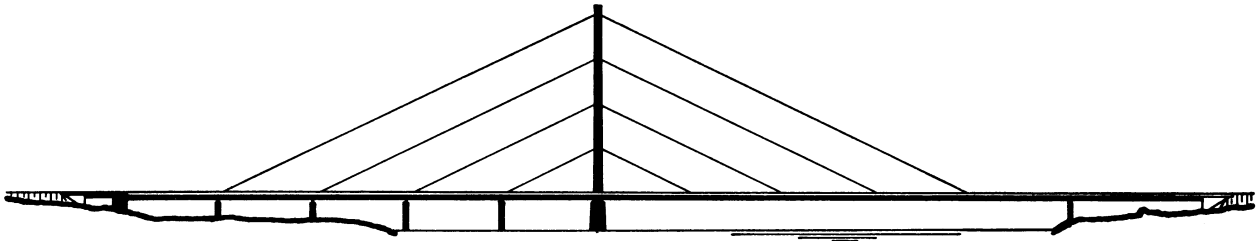


Reduzierung von Stahlbrücken-Lärm



Doz. Dr. rer. nat. habil. Friedemann Laugwitz

Dr.-Ing. Gerald Schmidt

Dr.-Ing. Bernd Vogl

Dr.-Ing. Dirk Mayer

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Mechanik

Lehrstuhl Adaptronik

Dr.-Ing. Michael Markworth

Dr.-Ing. Jürgen Weiser

IGAM Ingenieurgesellschaft für
angewandte Mechanik mbH

Dr.-Ing. Jan Polzer

Dipl.-Ing. Andreas Wolff

Dr.-Ing. Walter Ungerer

Betriebsforschungsinstitut Düsseldorf

VDEh-Institut für angewandte Forschung GmbH

Abteilung Anlagentechnik

*Koordiniert durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Düsseldorf
Finanziell unterstützt mit Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung Essen*

13.02.2004

Adaptive Reduzierung der Lärmabstrahlung von Stahlbrücken insbesondere beim Befahren durch Schienenfahrzeuge

Es ist bekannt, dass Stahlbrücken stärker zur Lärmerzeugung, verursacht durch Verkehrslasten, neigen als Betonbrücken. Das Forschungsprojekt „Adaptive Reduzierung der Lärmabstrahlung von Stahlbrücken insbesondere beim Befahren durch Schienenfahrzeuge“ zielte darauf ab, effektive Methoden zur Lärmreduzierung an Stahlbrücken zu finden. Das von Oktober 2000 bis Februar 2003 laufende Projekt wurde durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Düsseldorf koordiniert und durch die Stiftung Stahlanwendungsforschung Essen finanziert. Die Oberkasseler Brücke in Düsseldorf, die den Rhein überspannt, wurde als Referenzobjekt gewählt, weil diese Brücke Lärm besonders bei der Überfahrt von U-Bahn-Zügen verursacht.

Der erste Schritt in diesem Projekt war die Analyse der Ursachen für die Lärmentstehung. Nur durch die Kombination von verschiedenen experimentellen Methoden gelang es, diese Ursachen trotz des komplexen Anregungsspektrums und der hohen modalen Dichte zu finden. Diese Methoden waren Mehrstellenschwingungsmessungen an den Schienen, auf der Oberseite und im Innern des Brückenkörpers, Schallmessungen unterhalb der Brücke und die Anwendung einer Schallquellenortungsmethode mit einer akustischen Kamera. Außerdem wurde ein FE-Modell der gesamten Brücke und einzelner Brückensektionen erstellt. Als ein wesentlicher Grund für die Lärmentstehung wurde eine Stoßerregung, die vom U-Bahn-Zug beim Überqueren einer Diskontinuität im Schienenstrang in der Nähe eines Pfeilers verursacht wird, erkannt. Diese Erregung wird durch die Gleisbefestigungen direkt in die Brückenstruktur übertragen und verursacht in einer bestimmten Brückensektion Resonanzschwingungen von Stahlblechfeldern mit einer Frequenz von ungefähr 70 Hz. Der Lärm wird von der Unterseite der Brückenstruktur abgestrahlt und durch Reflexion auf der Straße weitergeleitet.

Der nächste Schritt im Forschungsprojekt war die genauere Untersuchung der Lärmabstrahlung von einem Modell einer Sektion der Brücke und die Untersuchung von aktiven Lärmreduzierungsverfahren an diesem Modell. Die Schwingungseigenschaften des Modells wurden mit der Modalanalyse untersucht, die räumliche Schallfeldtransformation (STSF) wurde zur Analyse der Schallintensitätsverteilung bei den verschiedenen Anregungen benutzt und die Ergebnisse wurden mit Resultaten der FE-Modellierung des Modells verglichen. Mit digitalen adaptiven Regelalgorithmen konnten bei der Lärmreduzierung für einzelne Moden gute Ergebnisse erzielt werden, aber aufgrund der hohen modalen Dichte konnte insgesamt keine Lärmreduzierung erreicht werden.

Adaptive Reduction of Noise Emission of Steel Bridges caused by Rail Vehicles

It is known that steel bridges tend to cause more noise due to traffic loads in comparison with concrete bridges. The research project „Adaptive Reduction of the Noise Emission of Steel Bridges caused by Rail Vehicles“ was therefore aimed to find effective methods for noise reduction of steel bridges. The project running from October 2000 till February 2003 was coordinated by the Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. Düsseldorf and financed by the foundation Stahlanwendungsforschung Essen. The Oberkassel bridge at Düsseldorf crossing the Rhine was chosen as a reference object. This bridge causes noise particularly during the passage of subway trains.

The first step in this project was the analysis of the reasons for the noise development. Only a combination of different techniques assured, that yet for all its complex excitation spectra and the high modal density of the bridge the reasons of the noise generation could be found. This methods were multipoint vibration measurements on the rails, on the top of the bridge and inside the bridge corpus, noise measurements beneath the bridge and the use of a noise source localisation technique with the acoustical camera. Further a FE model was calculated for the whole bridge and for some special sections of the bridge structure. As an essential reason for the noise generation was detected an impact load excitement caused by the subway trains when crossing a discontinuity of the rail track in the surrounding of a bridge pier. This excitation is then introduced through the rail mountings directly into the bridge structure and causes in a particular section of the bridge resonant vibrations on steel sheet fields with frequencies of about 70 Hz. The noise is emitted from the bottom of the bridge structure and than the noise is distributed by reflection on the street.

The next step in this research project was the detailed study of the noise emission from a model of a section of the bridge and the investigation of active noise reduction techniques on this model. The vibration properties of this model were analysed using modal testing techniques and the spatial transformation of sound fields (STSF) method to detect the sound field intensity for different excitations and the results were compared with FE calculations for the model section. The active noise reduction using a digital adaptive control algorithm had good performance for single modes, but due to the high modal density a overall reduction of noise could not be achieved.

Adaptive Reduzierung der Lärmabstrahlung von Stahlbrücken insbesondere beim Befahren durch Schienenfahrzeuge

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	1
2	Zusammenfassung.....	1
3	Berechnung und Messung von Schwingungen und Lärm.....	3
3.1	Bestimmung und Beschreibung des Untersuchungsobjekts	3
3.2	Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente	4
3.2.1	Globales Finite-Elemente-Modell der Brücke	4
3.2.2	Berechnungen mit detaillierten Finite-Elemente-Teilmodellen.....	6
3.3	Vorbereitung der Messungen	6
3.3.1	Immissionsmessung im Bereich der Tonhalle	6
3.3.2	FE-Berechnung des dynamischen Verhaltens	7
3.3.3	Übersichtsmessung von Schwingung und Schall im Brückenkasten.....	7
3.4	Messung der Schallabstrahlung mit der „Akustischen Kamera“.....	8
3.5	Messung des dynamischen Verhaltens der Brücke	10
3.5.1	Messplan und Messpunkte	10
3.5.2	Schwingungsanregung.....	12
3.5.3	Messprotokoll	13
3.5.4	Auswertung der Messung in Übersichtsdarstellung.....	13
3.5.5	Auswertung der Messung im Detail.....	17
3.6	Ergebnisse hinsichtlich der Schwingungs- und Lärmentstehung.....	23
4	Schwingungs- und Lärmreduktion an Modellstrukturen.....	24
4.1	Dämpfung der Blechschwingungen und der Schallabstrahlung.....	24
4.1.1	Konzeption und Realisierung der Modellstruktur eines Brückenabschnitts	24
4.1.1.1	Auslegung der Modellstruktur.....	24
4.1.1.2	Merkmale der Modellstruktur	24
4.1.1.3	Fertigung der Modellstruktur.....	25
4.1.2	Berechnung der Modellstruktur mit der Methode der Finiten Elemente.....	26
4.1.3	Messung der Schwingungen und der Schallabstrahlung am Brückenmodell.....	29
4.1.4	Analyse des vibroakustischen Verhaltens mit der Statistischen Energieanalyse ..	33
4.1.5	Konzepte zur Schwingungs- und Lärmreduktion	34
4.1.6	Realisierung einer aktiven Schwingungs- und Lärmreduktion	39
4.2	Dämpfung der Schwingungseinleitung	44
4.2.1	Mathematisches Modell der aktiv gelagerten Schiene	44
4.2.2	Regelungskonzept für eine adaptive Schnittstelle	46
4.2.2.1	Untersuchung auf Störgrößenentkoppelbarkeit	47
4.2.2.2	Störgrößenentkoppelung und Stabilisierung der Regelstrecke.....	47
4.2.2.3	Beobachterentwurf	48
4.2.3	Simulationsergebnisse	49
5	Schlussfolgerungen für die Lärmreduktion.....	50
5.1	Allgemeine Maßnahmen für Stahlbrücken	50
5.1.1	Vermeidung der Ursache der Lärmentstehung	50
5.1.2	Verminderung von Schienenschwingungen	51
5.1.3	Reduzierung der Schalleinleitung in die Struktur	52
5.1.4	Reduzierung der Schallabstrahlung von der Struktur	52
5.1.5	Vermeidung der Schallübertragung.....	53
5.2	Maßnahmen an der Oberkasseler Brücke.....	54
6	Literatur	56

Bilder- und Tabellenverzeichnis

<i>Bild 3.1.1: Oberkasseler Rheinbrücke mit Tonhalle (rechts) in Düsseldorf.....</i>	<i>3</i>
<i>Bild 3.1.2: Längsschnitt der Oberkasseler Brücke</i>	<i>4</i>
<i>Bild 3.1.3: Querschnitte der Brücke (links geschlossenes Profil, rechts offenes Profil).....</i>	<i>4</i>
<i>Bild 3.1.4: Schienenbefestigung mit Epoxidharz-Klebemörtel und Gummiunterlage.....</i>	<i>4</i>
<i>Bild 3.2.1: FE-Modell der Brücke: links Schalen- und rechts Balken- und Seil-Elemente</i>	<i>5</i>
<i>Bild 3.2.2: Ausschnitte des FE-Modells: links geschlossenes, rechts offenes Profil.....</i>	<i>5</i>
<i>Bild 3.2.3: Beispiele globaler Schwingformen der Brücke: links 1,9 Hz, rechts 6,5 Hz.....</i>	<i>5</i>
<i>Bild 3.2.4: Beispiel für lokale Eigenschwingformen: links 31,8 Hz, rechts 72,7 Hz.....</i>	<i>6</i>
<i>Bild 3.2.5: Betriebsschwingungsanalyse: links Modell mit Anregung, rechts: dominante Schwingform bei 76 Hz.....</i>	<i>6</i>
<i>Bild 3.4.1: Messpunkte der Akustischen Kamera.....</i>	<i>8</i>
<i>Bild 3.4.2: Schallemission am Messpunkt „100 m“ am Rheinufer.....</i>	<i>8</i>
<i>Bild 3.4.3: Schallemission am Messpunkt „20 m“ am Rheinufer.....</i>	<i>8</i>
<i>Bild 3.4.4: Schallemission am Messpunkt „vor der Tonhalle“.....</i>	<i>9</i>
<i>Bild 3.4.5: Schallemission am Messpunkt „auf der Tonhalle“.....</i>	<i>9</i>
<i>Bild 3.4.6: Übersicht der Schallabstrahlung der Brücke.....</i>	<i>9</i>
<i>Bild 3.4.7: Herkunft der höchsten Emissionen als Reflexion der Schallabstrahlung.....</i>	<i>10</i>
<i>Bild 3.4.8: Spektrum der reflektierten Schallabstrahlung.....</i>	<i>10</i>
<i>Bild 3.5.1: Darstellung der Messpunkte am Querschnitt des offenen Profils.....</i>	<i>12</i>
<i>Bild 3.5.2: Darstellung der Messpunkte am Längsschnitt der Brücke</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 3.5.1: Harmonische Anregungsfrequenzen von der Rheinbahn</i>	<i>13</i>
<i>Tabelle 3.5.2: Messprotokoll.....</i>	<i>14</i>
<i>Bild 3.5.3: Vergleich von Leistungsspektren und Schalldruck von 6achser und 8achser.....</i>	<i>15</i>
<i>Bild 3.5.4: Übersichtsdarstellung der Messsignale am Beispiel Datensatz 90</i>	<i>16</i>
<i>Bild 3.5.5: Übersichtsdarstellung der Messsignale am Beispiel Datensatz 104 am „Feld“.....</i>	<i>17</i>
<i>Bild 3.5.6: Wasserfalldarstellung der Leistungsspektren bei Bahnüberfahrt Datensatz 90</i>	<i>18</i>
<i>Bild 3.5.7: Leistungsspektrum mit deutlicher Frequenzmodulation von 1,46 Hz.....</i>	<i>18</i>
<i>Bild 3.5.8: Leistungsspektrum mit Frequenzmodulation von 6,5 Hz.....</i>	<i>18</i>
<i>Bild 3.5.9: Zeitsignale von „Schiene“ und „Decke“ beim 6achser Datensatz 90.....</i>	<i>20</i>
<i>Bild 3.5.10: Vergleich von Signalausschnitten „Schiene“ und „Decke“.....</i>	<i>20</i>
<i>Bild 3.5.11: Zeitsignale von „Schiene“ und „Decke“ beim 8achser Datensatz 84.....</i>	<i>21</i>
<i>Bild 3.5.12: Maßstäblich überhöhte Darstellung der Brückendurchbiegung unter Verkehrslast.....</i>	<i>21</i>
<i>Bild 3.5.13: Kurzzeitspektren während der Bahnüberfahrt an „Decke“ und „Schott außen“.....</i>	<i>22</i>
<i>Bild 3.5.14: Beispiele von Betriebsschwingformen des Blechfeldes: 76Hz, 84Hz und 101Hz.....</i>	<i>22</i>
<i>Bild 3.6.1: Gemessenes Leistungsspektrum (links) und berechneter Frequenzgang bei Bahnanregung am „Schott außen“</i>	<i>23</i>
<i>Bild 4.1.1: Vergleich von „Brückensegment“ (links) und „Modellstruktur“.....</i>	<i>25</i>
<i>Bild 4.1.2: Zeichnung der Modellstruktur.....</i>	<i>25</i>
<i>Bild 4.1.3: Wasserstrahlschneidanlage und Schneidkopf während der Arbeit</i>	<i>26</i>
<i>Bild 4.1.4: Montage (links) und Gesamtansicht des Brückenmodells.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 4.1.1: Berechnete Eigenfrequenzen der Modellstruktur.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 4.1.2: Vergleich von Eigenmoden aus Schwingungsmessung und FE-Berechnung</i>	<i>28</i>
<i>Bild 4.1.5: FE-Modell mit Anregungs- und Antwortpunkt sowie berechneter Frequenzgang der Modellstruktur.....</i>	<i>28</i>
<i>Bild 4.1.6: Betriebsschwingformen mit hohen Amplituden am Tunnelboden bei 78Hz, 107Hz, 176Hz und 246 Hz</i>	<i>29</i>
<i>Bild 4.1.7: Experimentell ermittelte Schwingform eines Tunnelbodens mit hohen Amplituden bei 219 Hz.....</i>	<i>29</i>
<i>Bild 4.1.8: Brückenmodell, auf weichen Federn gelagert (um 180°gedreht).....</i>	<i>29</i>
<i>Bild 4.1.9: Analyse der globalen Schwingungen des Brückenmodells.....</i>	<i>30</i>
<i>Bild 4.1.10: Analyse der lokalen Schwingungen von Blechfeldern</i>	<i>30</i>
<i>Bild 4.1.11: Spektrum des Schalldrucks oberhalb des Brückenmodells.....</i>	<i>31</i>
<i>Bild 4.1.12: Aufbau zur Räumlichen Schallfeldtransformation (Quelle: Brüel & Kjaer)</i>	<i>31</i>

3.4 Messung der Schallabstrahlung mit der „Akustischen Kamera“

Im Auftrag der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde durch die Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI) eine Messung mit der „Akustischen Kamera“, einem Messsystem mit sternförmiger Anordnung von 33 Studio-Mikrofonen, zur Lokalisierung der dominierenden Schallquellen durchgeführt (Heinz, Nguyen 2001).

Die Messungen wurden in Auswertung der Voruntersuchungen auf die rechtsrheinische Hälfte der Brücke konzentriert und hier insbesondere auf den Abschnitt mit offenem Querschnitt sowie die Übertragung des Schalls zur Tonhalle. Die Anordnung des Systems für die verschiedenen Messungen ist in **Bild 3.4.1** dargestellt, die **Bilder 3.4.2 - 3.4.5** zeigen Fotos der Messsituationen und Beispiele für ermittelte Emissionskarten.

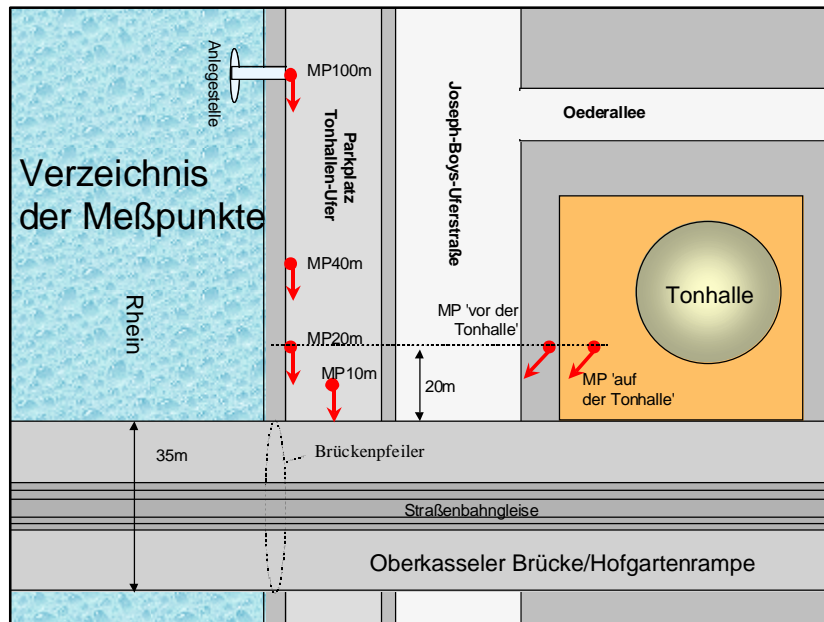


Bild 3.4.1: Messpunkte der Akustischen Kamera

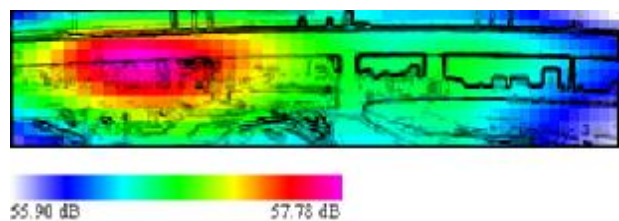


Bild 3.4.2: Schallemission am Messpunkt „100 m“ am Rheinufer

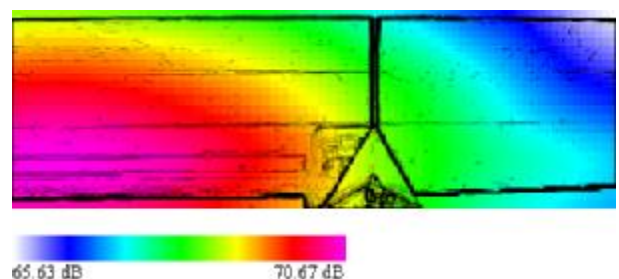


Bild 3.4.3: Schallemission am Messpunkt „20 m“ am Rheinufer

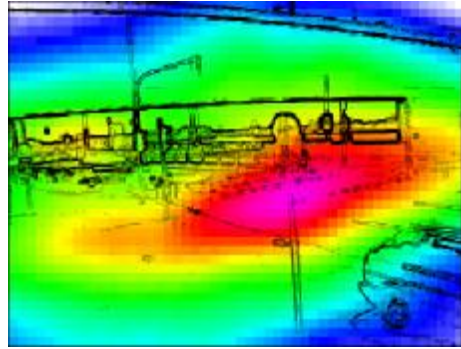


Bild 3.4.4: Schallemission am Messpunkt „vor der Tonhalle“

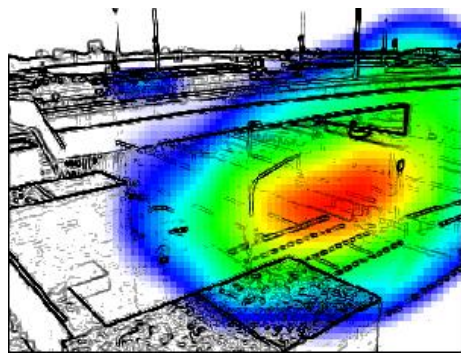


Bild 3.4.5: Schallemission am Messpunkt „auf der Tonhalle“

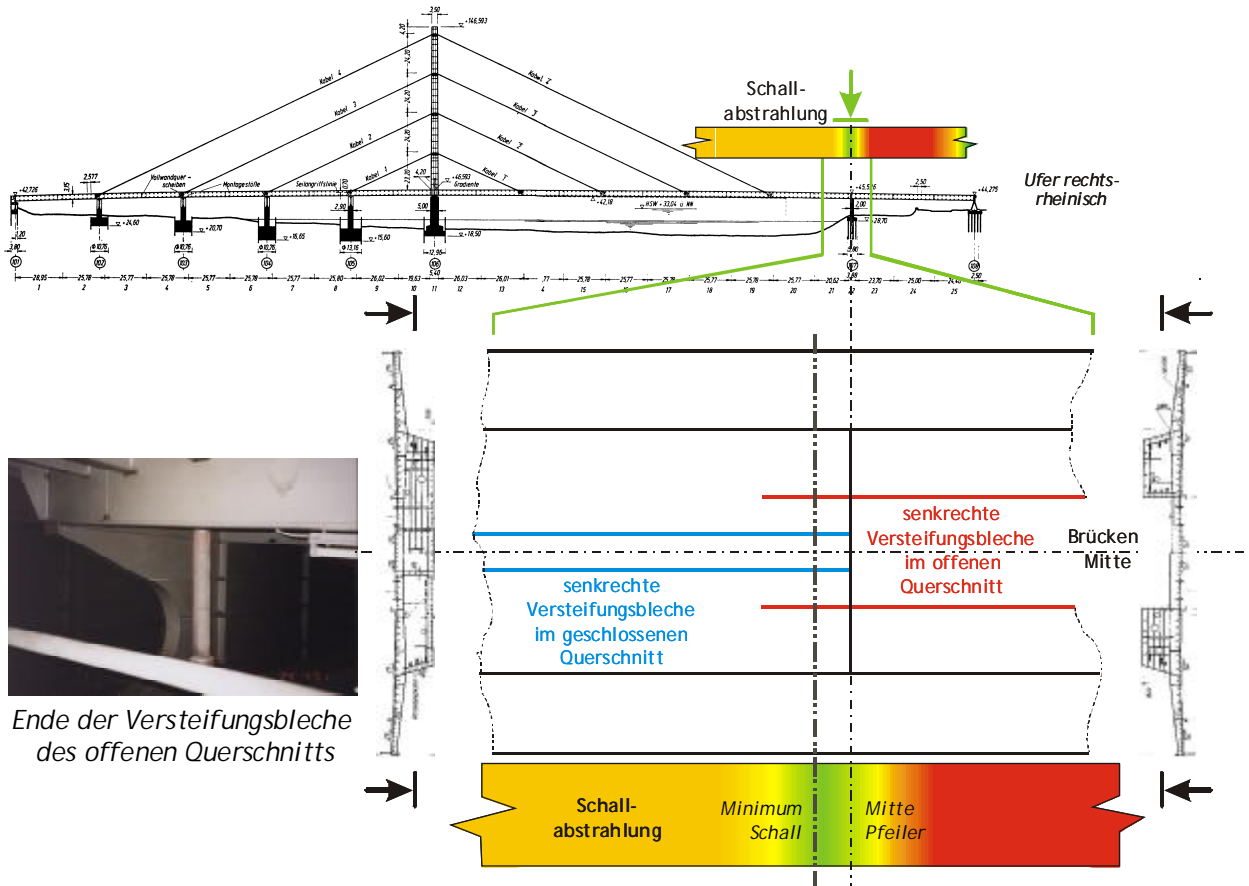


Bild 3.4.6: Übersicht der Schallabstrahlung der Brücke

Die Auswertung der Schallmessung ergab folgende Ergebnisse:

- Nicht der direkte Schall der Bahnen ist dominant, 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.
- Der Teil der Brücke mit „offenem Querschnitt“ weist deutlich höhere Schallabstrahlung auf, als der Teil mit „geschlossenem Querschnitt“, obwohl die Fahrgeschwindigkeit der Bahnen im offenen Bereich geringer ist.
- In allen Aufnahmen sind Stellen stärkerer und schwächerer Schallabstrahlung zu erkennen, Ruhepol ist in allen Aufnahmen der Stützpfiler der Brücke bzw. - aufgrund der Anordnung der senkrechten Versteifungsbleche - die Stelle dicht neben dem Pfeiler. In **Bild 3.4.6** ist die Schallabstrahlung in einer Übersicht schematisch dargestellt.
- Alle Aufnahmen zeigen, dass Hauptemissionen aus dem Mittelteil zwischen den Trägern (offener Querschnitt) stammen und von dort nach unten abgestrahlt werden.
- Die maßgebliche Geräusentwicklung im Bereich der Tonhalle entsteht aufgrund von Reflexion der abgestrahlten Emissionen an der Straßenoberfläche (**Bild 3.4.7**).
- Das Spektrum in **Bild 3.4.8** zeigt, dass die größten Amplituden in den Frequenzbereichen 60-70 Hz und 120-180 Hz auftreten.

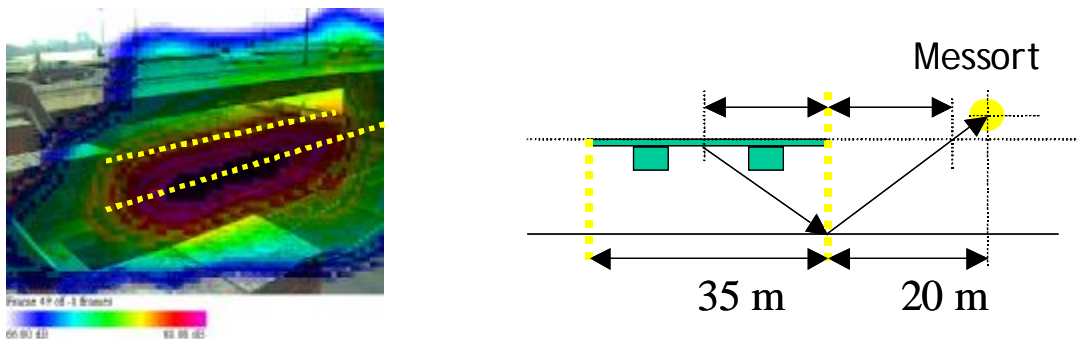


Bild 3.4.7: Herkunft der höchsten Emissionen als Reflexion der Schallabstrahlung

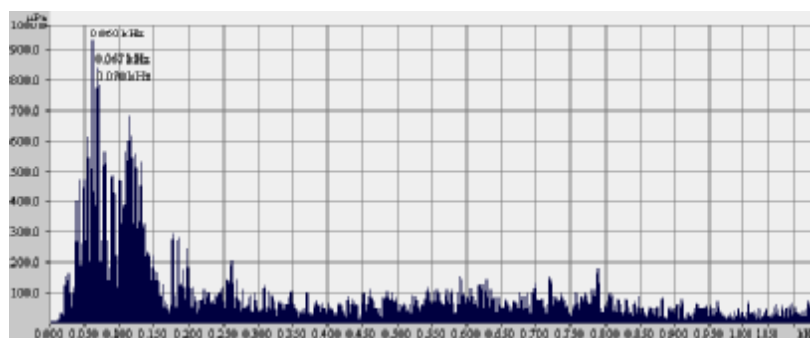


Bild 3.4.8: Spektrum der reflektierten Schallabstrahlung

3.5 Messung des dynamischen Verhaltens der Brücke

3.5.1 Messplan und Messpunkte

Die Auswahl der Messstellen und Messgrößen erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

- Die globalen Eigenformen der Gesamtbauwerkes liegen in einem akustisch nicht relevanten Bereich und mussten für die weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt werden.