

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Heidrich, Werner**

## **Schwingungen von Eisenbahnbrücken und Übertragung dieser Schwingungen in den Baugrund über leichte Stützenfundamente**

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106171>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heidrich, Werner (1979): Schwingungen von Eisenbahnbrücken und Übertragung dieser Schwingungen in den Baugrund über leichte Stützenfundamente. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 41. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 30-37.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Schwingungen von Eisenbahnbrücken und Übertragung dieser Schwingungen in den Baugrund über leichte Stützenfundamente

Dipl.-Mathem. Werner Heidrich KdF  
Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin

Bekanntlich treten bei Brücken leichter Bauart, besonders auch bei Reichsbahnbrücken mit Pendelstützen, in einigen Fällen Setzungen auf. Besonders gefährdet sind offensichtlich die nur gering dimensionierten Fundamente dieser Stützen. Ebenso ist bekannt, daß sich in einigen Fällen die Widerlager zur Brücke hin kippen und in einigen Fällen sogar gegen den Brückenträger drücken. Während diese Kippung aus einer falschen Einschätzung des Erddruckes folgen kann, ist im ersten Fall bestimmt, aber auch bei einigen Fällen von Widerlagerbewegungen, eine durch Erschütterungen hervorgerufene Setzung des Untergrundes die Ursache.

Für den Ingenieur ist es üblich, die dynamischen Wirkungen durch einen Sicherheitsfaktor in irgendeiner Weise in die Berechnungen einzubeziehen und damit die Sicherheit des Bauwerkes zu gewährleisten. Uns wurde die Frage gestellt: "Ist es möglich, durch einen solchen Sicherheitsfaktor das Problem zufriedenstellend zu lösen? Wenn ja, wie groß muß dann dieser Faktor sein; wenn nein, welche anderen Mittel müssen angewandt werden, um die Sicherheit der Brücken zu garantieren?"

Bisher besagen die Vorschriften der Reichsbahn, daß in der Sohlfluge von Stützenfundamenten kein zusätzlicher dynamischer Sicherheitsbeiwert für die zulässige Sohlpressung berücksichtigt werden muß. Bei den schweren Beton- oder Mauerwerkstützen früherer Zeit, die nach heutiger Auffassung überdimensioniert sind, traten auch keine Schwierigkeiten auf. Andererseits ist aber das Kippen von Brückenwiderlagern ein Hinweis darauf, daß trotz relativ großer "Beruhigungsmassen" noch Schäden auftreten können. Um die gestellten Fragen beantworten zu können, kam es zunächst darauf an, festzustellen, mit welchen Schwingungen wir überhaupt rechnen müssen.

Aus früheren Messungen war uns bereits bekannt, daß die im Untergrund wirksamen Schwingungen nicht nur über das Brücken-

bauwerk in den Baugrund eingetragen werden, sondern auch von Gleisen unterhalb der Brücke beträchtliche Schwingungen in den Untergrund übertragen werden. Es ist dabei auffällig, daß besonders an Kreuzungsbauwerken zweier Bahnlinien häufig Schäden auftreten. Wir gingen bei der Bearbeitung dieses Themas davon aus, daß zunächst für die Schwingungen, die aus der Brücke in den Untergrund übertragen werden, eine meßtechnische Untersuchung notwendig ist, die mit Berechnungen verglichen werden muß. Dafür standen einige Brücken zur Verfügung, bei denen unten kein bzw. noch kein Schienenverkehr erfolgte. Andererseits war es unbedingt notwendig, auch die Schwingungen zu erfassen, die aus dem Verkehr unter der Brücke herrühren, und sie mit den auf der Brücke erzeugten und in den Baugrund übertragenen Schwingungen zu vergleichen.

Als erstes wurden daher an mehreren Brücken mit leichten Stützen Messungen durchgeführt, bei denen sowohl an der Brücke selbst als auch am Stützenfundament eine Reihe von Meßpunkten lagen. Registriert wurde in diesen Fällen jeweils die Schwinggeschwindigkeit bei der Überfahrt von Lokomotiven und Zügen, und die gemessenen Werte wurden der Fahrgeschwindigkeit zugeordnet. Weiter wurde das Verhalten der Brücken bei Erregung durch einen Unwuchterreger gemessen und der jeweilige Frequenzgang bestimmt. In einem Falle wurde dann das Ergebnis der Messungen auch einer relativ genauen dynamischen Berechnung gegenübergestellt. Hierbei zeigte sich, daß die Messungen bei Erregung durch einen Unwuchterreger sehr gut mit den Berechnungen übereinstimmen. Das angewandte Rechenverfahren, das in einer gesonderten Veröffentlichung vorgestellt werden soll, gestattet also durchaus die Schwingungen zu erfassen. Dagegen lieferten die Schwingungsmessungen bei der Überfahrt einer Lokomotive einen völlig anderen Frequenzgang. Um dieses Frequenzspektrum sicher zu erfassen, haben wir die Schwingungen auf Tonband registriert und anschließend auf einem Frequenzspektrometer ausgewertet, wobei von jeder Überfahrt zwischen 6 und 10 Momentanwerte des Spektrums aufgenommen wurden. Damit war auch der Unterschied im Spektrum je nach augenblicklicher Lage der Lok zu erkennen. Die hierbei festgestellten Abweichungen

vom berechneten Spektrum sind nicht mit der zusätzlichen Belastung der Brücke durch die Lokomotive erklärbar, da recht hohe Frequenzen zwischen 20 und 100 Hz dominierten. Die unbelastete Brücke zeigte etwa 8 Hz als Eigenschwingung und dieser Wert wurde durch die Zusatzmasse der Lokomotive je nach deren Stellung auf der Brücke bis auf etwa 2 Hz heruntergedrückt. Auch der Versuch, die Brücke zu betrachten als "eingespannt" zwischen ihren Stützen und den Fahrgestellfedern, die sich gegen das Fahrzeug abstützen, führt nicht zu den gemessenen Frequenzgängen. Es ist daher anzunehmen, daß die Anregung durch das Fahrzeug den wesentlichen Teil des Frequenzspektrums bestimmt, und daß die Brücke nur noch eine Modifizierung dieser Schwingungen bewirkt.

Wesentlich für die Frage, ob ein Sicherheitsbeiwert dem Kern des Problems gerecht wird, ist auch, ob die auftretenden Spannungen im Baugrund bei Überfahrt einer Lokomotive wesentlich größer werden als wenn die Lok auf der Brücke steht. Da es uns bisher nicht möglich war, Druckmeßdosen unter einem leichten Stützenfundament einzubauen, haben wir eine Bewegungsmessung gegen eine Art Benkelmanbalken vorgenommen. Es wurde versucht, den Balken möglichst bewegungsfrei zu halten und mit einem induktiven Wegmesser die Verschiebung des Fundamentes gegen die Balkenspitze zu messen. Diese Messungen zeigten eindeutig, daß bei der Auffahrt des Zuges auf die Brücke Schwingungen auftraten, die relativ geringe Frequenz und beachtliche Amplituden hatten. Sie nahmen mit der Annäherung der ersten Achse an die untersuchte Stütze ab. Die Einsenkung der Stütze erreichte unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit den selben Wert wie beim Stand. Die dynamischen Bewegungen - obwohl natürlich vorhanden - sind so klein, daß sie in der Registrierung nicht feststellbar sind. Ein Überschreiten der maximal erreichten Einsenkung bei stehender Lok trat nicht auf. Daraus muß gefolgert werden, daß auch die auftretenden Spannungen nicht wesentlich die statischen Spannungen überschreiten. Natürlich ist vorgesehen, durch eine Spannungsmessung diese aus der Bewegungsmessung gezogene Folgerung zu bestätigen, obwohl die gezogenen Folgerungen zwingend erscheinen. Aus diesen Erkennt-

nissen ergibt sich zwangsläufig, daß ein dynamischer Sicherheitsbeiwert nicht den Kern des physikalischen Problems erfaßt, da durch ihn gerade eine dynamische bedingte Erhöhung der auftretenden Spannungen in den Berechnungen mit erfaßt werden soll. Damit ist zu erwarten, daß die Anwendung eines solchen Sicherheitsbeiwertes entweder zu unökonomischen Lösungen führen wird oder die erforderliche Sicherheit nicht gewährleistet; im ungünstigsten Falle kann sogar beides auftreten. In mehreren Meßreihen wurde anschließend ein Vergleich geführt zwischen den Schwingungen, die von der Brücke in den Untergrund eingetragen werden, und denen, die aus dem unteren Gleis stammen. Die frequenzmäßige Auswertung liegt noch nicht vor, aber es können schon jetzt wesentliche Schlußfolgerungen gezogen werden.

Als erstes muß betont werden, daß die vom unteren Gleis herrührenden gemessenen Werte der Schwinggeschwindigkeiten im Durchschnitt etwa doppelt so groß sind wie die aus der Brücke herrührenden, wenn die Messungen im Untergrund nahe dem Stützenfundament erfolgt. Hierbei liegen anscheinend die Frequenzen höher bei den Fahrten von Zügen auf den unteren Gleisen. Selbst die Stützenfundamente wurden durch Züge auf dem unteren Gleis noch zu stärkeren Schwingungen angeregt, als bei der Fahrt eines Zuges über die Brücke. Die Schwinggeschwindigkeit wurde gemessen, da diese Größe nach allen bisherigen Erfahrungen in erster Näherung frequenzunabhängig ein Maß für die Schädlichkeit bildet. In der Mechanik sind wir gewöhnt, mit Amplituden oder Schwingwegen zu rechnen, bei denen die niedrigen Frequenzen stärker betont werden. Es ist daher zu erwarten, daß bei Betrachtung der Amplituden die Stärke der Schwingungen auf den Stützenfundamenten in beiden Anregungsfällen etwa gleich groß sein wird. Natürlich sind die hier angegebenen Verhältnisse nur Mittelwerte, die sowohl von Brücke zu Brücke variieren als auch sonst einer sehr großen Streuung unterliegen. So genügt z. B. ein Flachläufer, um die Spitzenwerte der Schwinggeschwindigkeit auf das 3 - 4fache zu steigern. Ebenso macht sich die Fahrgeschwindigkeit sehr stark bemerkbar.

Als zweites zeigt sich, daß die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten eine Größe haben, die nach bisher vorliegenden Erkenntnissen eventuell zu einer Einrüttelung locker gelagerter rolliger Erdstoffe führen können. Leider sind unsere Kenntnisse auf diesem Gebiet noch nicht ausreichend, um hier schon allgemein gültige Aussagen machen zu können, und für bindiges Material sind die bisher vorliegenden Erkenntnisse noch geringer. Doch steht mit Sicherheit fest, daß bei rolligem Material die Setzungsgefährdung infolge dynamischer Einwirkung geringer wird mit wachsender statischer Vorspannung. Dies würde bedeuten, daß ein dynamischer Sicherheitsbeiwert, der die Vorspannung unter der Brückenstütze verringert, die Setzung der Stütze begünstigt, die durch unten vorbeifahrende Züge hervorgerufen wird, eine Schlußfolgerung, die zweifellos gegen die Anwendung eines Sicherheitsbeiwertes spricht.

Schließlich ist aus den vorstehenden Ausführungen zu entnehmen, daß einer guten Gleislage unter der Brücke die gleiche Bedeutung beizumessen ist wie auf der Brücke. Wenn z. B. neben einer Stütze, an der beachtliche Schäden aufgetreten sind, ein Schienenstoß vorhanden ist, muß er nicht unbedingt allein zu den Schäden geführt haben, aber daß er seinen wesentlichen Anteil dazu beigetragen hat, muß aus allen bisher vorliegenden Messungen geschlossen werden. Das gleiche gilt natürlich auch für starke Riffelbildung.

Aus den vorhergehenden Ausführungen folgt, daß für die Vermeidung von dynamisch bedingten Schäden an Brückenbauwerken genauere Kenntnisse über das Verhalten der einzelnen Erdstoffe bei dynamischer Belastung vorliegen müssen. Bekannt ist, daß manche Erdstoffarten setzungsempfindlich sind und andere wenig oder gar nicht, und daß besonders der Wassergehalt neben der Lagerungsdichte eine wesentliche Rolle spielt. Anscheinend ist es so, daß relativ hochfrequente Schwingungen die Scherfestigkeit vieler Erdstoffe stark herabsetzen und damit die Voraussetzung schaffen für Umlagerungen unter statischer oder sehr niederfrequenter Belastung. Das deutet darauf hin, daß z. B. das gleichzeitige Fahren eines Zuges auf der Brücke und eines Zuges darunter zu besonders gefährlichen Schwingungs- und

und Spannungsverhältnissen führen kann. Wenn wir nun aus den vorgenannten Gründen einen dynamischen Sicherheitsbeiwert ablehnen, stellt der Praktiker, der schließlich die Brücken berechnen und bauen muß, die Frage, was er zur Zeit tun muß, um sicher zu bauen, und welche Ziele uns bei unseren weiteren Untersuchungen vorschweben.

Zur Zeit können wir uns neben den vorliegenden Schwingungsmessungen nur auf die in der Literatur vorhandenen bzw. bei uns in anderem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse stützen, die sich auf das Verhalten von Erdstoffen unter dynamischer Belastung beziehen. Das hier anstehende Problem wird wahrscheinlich am besten erfaßt in der Dissertation von Hausner /1/, in der für Maschinenfundamente unterschiedlicher Art ein Zusammenhang zwischen den drei Größen: Schwinggeschwindigkeit des Fundaments, Dichteindex des Baugrundes und Auftreten von Schäden hergestellt wurde. Eine Übertragung der durch Hausner für Maschinenfundamente gewonnenen Ergebnisse auf anders geartete dynamisch angeregte Fundamente ist sicherlich zulässig, lediglich dürfte die Zeit bis zum Auftreten von Schäden bei stochastischen Verkehrserschütterungen mit relativ großen Zeiträumen der Verkehrsrube größer sein als bei ständig laufenden Maschinen. Leider gelten die Angaben von Hausner nur für rolliges Material. Ein Vergleich der Ergebnisse der Schwingungsmessungen mit den von Hausner angegebenen Werten zeigt, daß bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km/h selbst beim Vorhandensein von Flachläufern bei rolligem Material ein Auftreten von Schäden kaum zu erwarten ist, daß aber bei höheren Fahrgeschwindigkeiten für locker gelagertes Material eine Einrüttelung möglich wird. Für den Praktiker bedeutet dies, daß er bereits im Baugrundgutachten eine Angabe über den Dichteindex des anstehenden Materials im Bereich bis zu einigen Metern unter Gründungssohle braucht; eventuell kann mit einer leichten Rammsonde eine brauchbare Aussage nachgeholt werden. Wenn der Baugrund locker ist, sollte nach Aushub der Baugrube für das Stützenfundament eine möglichst tief wirkende Verdichtung vorgenommen werden. Da Tiefenrüttler in der DDR nicht zur Verfügung stehen, muß mit einem Oberflächenverdichter möglichst

großer Tiefenwirkung gearbeitet werden. Hierdurch kann ein großer Teil der noch zu erwartenden Setzungen vorweggenommen werden. In diesem Falle ist eine Nachkontrolle mit der leichten Rammsonde sinnvoll.

Bei temporären Brücken, die eine Nachstellmöglichkeit für die Stützen haben, ist eine derartige Maßnahme nicht unbedingt erforderlich aber zweifellos nützlich.

In Flußbetten wird man leichte Stützen wahrscheinlich nur für temporäre Brücken verwenden, da sie durch Eisgang sehr gefährdet sind. In diesem Falle wird man sich auf die Nachstellmöglichkeit verlassen müssen, da eine Verdichtung unter Wasser nicht viel Erfolg verspricht.

Für die Zukunft ist zu erwarten, daß eine Art Katalog der verschiedenen Erdarten aufgestellt werden kann, in dem z. B. die Abnahme des Winkels der inneren Reibung oder auch einer anderen Schergröße, einer Kompressionsgröße oder sonstiger für die Berechnung wichtiger Kennwerte des Baugrundes in Abhängigkeit von den auftretenden Schwingungen angegeben wird; daneben müßte eine statistisch gesicherte Tabelle über die bei den verschiedenen Brücken zu erwartenden Schwingungen dem Projektanten angeben, welche Spannungen er letztendlich im Untergrund zulassen kann. Der Sicherheitsbeiwert der damit errechnet wird, wäre also dann abhängig von den zu erwartenden Erschütterungen und dem Erdstoff, und würde anzuwenden sein auf bestimmte Kenngrößen, wahrscheinlich in erster Linie auf Scherparameter, des Baugrundes. Die Untersuchungen, die zu diesen Angaben führen sollen, werden zur Zeit vorbereitet; Es ist leicht vorstellbar, daß es sich hierbei um eine Aufgabe handelt, die nicht von heute auf morgen zu lösen ist. Aus diesem Grunde wird es nötig sein, die Erdstoffe entsprechend ihrer Bedeutung als Baugrund für Brücken nacheinander zu untersuchen.

Zusammenfassend ist zu sagen:

Eine wesentliche Erhöhung der Sohlspannung durch die Fahrt einer Lok verglichen mit der statisch hervorgerufenen Spannung konnte nicht festgestellt werden.

Ein "dynamischer Sicherheitsbeiwert" - wie immer definiert - ist nicht nur nutzlos, sondern eventuell sogar gefährlich.

Zur Zeit ist die einzige Möglichkeit zum Vermeiden von Setzungsschäden, wenn vor Errichtung von leichten Fundamenten von Brückenstützen eine sorgfältige Verdichtung der Baugrube mit einem möglichst tief wirkenden Verdichtungsgerät vorgenommen wird, falls lockerer Baugrund vorliegt.

Eine einwandfreie Verlegung der Gleise und Vermeidung von Schienenstößen und Riffelbildung sowohl auf als auch unter der Brücke sind Voraussetzungen dafür, daß die Schwingungen unter dem gefährlichen Bereich bleiben. Natürlich ist auch der Zustand der Fahrzeuge von ausschlaggebender Bedeutung. Flachläufer erhöhen die dynamische Belastung sehr stark. Ziel der zur Zeit anlaufenden Arbeiten muß es sein, für die einzelnen Erdstoffe dynamische Kennziffern zu erarbeiten, die einen Zusammenhang zwischen den Berechnungsgrößen und den auftretenden Schwingungsgrößen herstellen.

#### Literatur

/1/ Hausner:

Dynamische Stabilität nichtbindiger Lockergesteine bei stationärer Anregung durch Maschinenfundamente.

Dissertation an der TU Dresden, Sektion Bauingenieurwesen, 1971.