

Reichsbahnrat Dr. Ing. RUDOLF BERNHARD, Berlin:

Neuere Messungen dynamischer Brückenbeanspruchungen¹

I. Allgemeine Problemstellung

Das wachsende Bedürfnis, die nur durch Rechnung gewonnenen Ergebnisse der z. B. in unseren Brückenbauwerken auftretenden Spannungen auch praktisch durch örtliche *Messungen* nachzuprüfen, hat in den letzten Jahren zu zahlreichen Versuchen geführt, die auch heute noch keineswegs als abgeschlossen zu betrachten sind. Bei Berücksichtigung der dynamischen Beanspruchungen, also der Untersuchung des Zustandes während der Überfahrt von Fahrzeugen, gestalten sich die Vorgänge jedoch derartig verwickelt, daß bisher keine einwandfreien Lösungen gefunden werden konnten.

Die große *wirtschaftliche Bedeutung* dieser Versuche liegt bekanntlich darin, daß durch experimentellen Nachweis die wirklich auftretenden Stoßzahlen sich genauer erfassen lassen, und daher die zulässigen Spannungen vielleicht etwas erhöht werden können. Die Ergebnisse werden dann möglicherweise eine wirtschaftlichere Ausbildung zulassen.

Die *Anforderungen an statische und dynamische Brückenspannungsmesser* müssen bekanntlich sehr weit gestellt werden, weil die auftretenden Dehnungen nicht bloß außerordentlich klein sind, also erhebliche Vergrößerungen verlangen, sondern sich andererseits auch auf einen verhältnismäßig großen Meßbereich erstrecken. Außerdem sind die Apparate sehr raschen Dehnungsschwankungen ausgesetzt, die sie gleichzeitig selbst aufzeichnen müssen.

Dazu kommt, daß man auf einer im Betriebe befindlichen Brücke aus naheliegenden Gründen keine empfindlichen Laboratoriumsgeräte verwenden kann und daß andererseits an die Genauigkeit sowie Empfindlichkeit Anforderungen gestellt werden müssen, wie sie in dieser ungünstigen Zusammenstellung wohl bei kaum einem der bisher bestehenden Meßgeräte auch auf anderen Gebieten gefordert werden. Der eigentliche Dehnungsmesser, der handfest ausgebildet werden muß, ist zweckmäßig von der Schreibvorrichtung zu trennen. Der empfindliche, registrierende Teil braucht dann nicht mehr auf der Brücke aufgestellt zu werden, was u. a. auch aus rein dynamischen Gründen zweckmäßig erscheint, da die Masse des Schreibwerkes die Aufzeichnungen stets störend beeinflussen wird. Die beiden Teile werden dann am einfachsten elektrisch verbunden. Der Bauingenieur, der hier das ihm fernerliegende Gebiet der Feinmeßtechnik beschreiten muß, kann nicht erwarten, mit den altgewohnten Mitteln einwandfreie Ergebnisse zu erzielen, sondern wird die Verfahren aus den Grenzgebieten, z. B. der Elektrotechnik zu Hilfe holen müssen, wo Schwingungsuntersuchungen mit noch weit höheren Anforderungen bereits gelöst worden sind.

Die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft hat, wie bekannt, bereits im Jahre 1925 ein *Preis Ausschreiben* zur Erlangung eines Spannungs- und Schwingungsmessers für die dynamischen Beanspruchungen eiserner Brücken veranstaltet.

Nachdem das anlässlich dieses Wettbewerbs eingesetzte Preisgericht zu dem Ergebnis gekommen ist, daß die bisherigen sowie die zum Wettbewerb eingereichten Brückenspannungsmesser noch keineswegs den an sie zu stellenden Anforderungen genügen, sind zur Schaffung geeigneter Apparate zwei grundsätzlich verschiedene Wege weiter beschritten worden.

Der eine Weg behandelt in erster Linie die Verbesserung der vorhandenen *mechanischen Geräte*.

¹ Eine ausführliche Wiedergabe des Referates ist im Stahlbau (Beilage zur Zeitschrift „Die Bautechnik“) als Sonderdruck erschienen (Heft 13 vom 21. September 1928).

Der zweite Weg, der aus obigen Gründen *elektrische Meßverfahren* benützt, ist inzwischen ebenfalls, und zwar vom Reichsbahnzentralamt in Berlin weiter ausgebaut worden, worüber hier vor allem berichtet werden soll. Vorausgeschickt sei, daß sich beide Verfahren keineswegs ausschließen, nur wird das erste wohl stets auf einfachere Brückenmessungen, unter Verzicht der Aufnahme sehr rascher Spannungsschwankungen bei erheblichen Vergrößerungen beschränkt bleiben.

II. Eichfragen

Die *Eichfrage* spielt nicht bloß bei allen dynamischen Spannungsmessern, sondern auch für die rein statischen Apparate eine so wichtige Rolle, daß hierauf ausführlicher eingegangen werden soll.

Man muß scharf zwischen einer statischen und einer dynamischen Eichung unterscheiden. Die dynamischen Apparate werden naturgemäß beiden Prüfungen unterworfen.

1. Zunächst sei die *statische Eichung*, d. h. die genaue Bestimmung des jeweiligen *Vergrößerungsmaßstabes* der statischen und selbstverständlich auch dynamischen Spannungsmesser, innerhalb ihres gesamten Meßbereiches behandelt.

Bei einer normalen Meßlänge von 20 cm muß, wenn z. B. die *sehr weitgehende* Forderung des Preisausschreibens der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft beibehalten werden soll, der Nachweis von Spannungsschwankungen von 5 kg/qcm gefordert, d. h. Dehnungsänderungen (Δl) von $0,5 \mu$ gemessen werden können. Es ist nämlich $\Delta l = \frac{20 \cdot 5}{2 \cdot 100 \cdot 000} \approx \frac{1}{20 \cdot 000} \text{ cm} = 0,5 \mu$. Nimmt man dann an, daß bei normaler Diagrammstrichstärke noch ein halbes Millimeter genügend genau abgelesen werden kann, so bedingt dies eine Vergrößerung von mindestens eintausend ($n = \frac{0,5 \text{ mm}}{0,5 \mu} = 1000$).

Der Nachweis derartig kleiner Längenänderungen verbunden mit einer 1000-fachen Vergrößerung erklärt die Schwierigkeit, mit mechanischen Geräten diese beiden Bedingungen, auch schon für rein statische Messungen, zu erfüllen.

Will man also in Zukunft derartige Eichungen unter $0,5 \mu$ der vorher errechneten Genauigkeitsgrenze ausführen, so müssen andere Wege eingeschlagen werden.

Erst wenn es also möglich ist, derartig kleine, *ursächliche* Bewegungen im Bereich von $0,5 \mu$ den Meßgeräten einerseits aufzuzwingen und auf irgend eine Weise, z. B. auf optischem Wege, durch Meßmikroskope, wenn man von Interferenzkomparatoren absehen will, andererseits nachzumessen, lassen sich Eichkurven der Meßgeräte für die in der Brückenmeßtechnik nun leider erforderlichen Genauigkeiten einwandfrei aufstellen.

Dasselbe Eichverfahren muß sinngemäß auch für alle dynamischen Spannungsmesser verwendet werden, um zunächst die absolute Vergrößerung der statischen Grundspannung nachweisen zu können.

2. Die *dynamische Eichung* besteht *erstens* in der Feststellung der *Eigenschwingungszahl* der Apparate. Bei Frequenzen über 500 Hertz kann diese kaum noch mit Hilfe eines Schütteltisches, wie weiter unten ausgeführt, der für so hohe Frequenzen schwerlich gebaut werden kann, sondern nur durch *Anstoßversuche* nachgewiesen werden. Unter Anstoßversuchen wird hier die künstliche Erregung der Meßgeräte durch einen einmaligen Impuls verstanden.

Zweitens muß jedoch dann noch der endgültige Beweis geführt werden, daß innerhalb des Bereiches der auftretenden Brückenschwingungen, für die zur praktischen Auswertung im Höchstfalle etwa 300 Hertz in Frage kommen, die Apparate auch absolut richtige, d. h. *unverzerrte Amplituden* aufzeichnen.

Dies läßt sich aber exakt wiederum nur mit Hilfe eines *Schütteltisches* nachweisen.

Die bisherigen Versuche, sowohl mit mechanischen wie auch elektrischen Spannungsmessern haben gezeigt, daß jeder beim Befahren der Brücke entstehende Schwingungsvorgang (Erregerfrequenz), sobald er mit einer Eigenschwingung der Meßgeräte übereinstimmt, eine erhebliche Verzerrung der Aufzeichnungen verursacht, selbst wenn die erregenden Amplituden so klein sind, daß sie auf die Brückenspannungen keinerlei nennenswerten Einfluß ausüben. Die Resonanzwellen überlagern die Aufzeichnungen vielfach derartig, daß eine Auswertung der Diagramme praktisch unmöglich wird, da eine Aufschauklung zu großen Ausschlägen auch bei verhältnismäßig hohen Apparateigenschwingungen nicht zu vermeiden ist.

III. Elektrische Meßverfahren

Auf die Versuche und Ergebnisse mit vorwiegend *mechanischen Meßgeräten* soll hier nicht weiter eingegangen werden, da hierüber bereits ausreichend Literatur in den letzten Jahren erschienen ist. Ebenso seien *Schwingungsmesser* zunächst nicht weiter behandelt, weil den Brückenbauer ja in erster Linie die Auswirkungen der Schwingungen in Form von Spannungsänderungen interessieren.

Die Hauptschwierigkeit bei sämtlichen mechanischen Apparaten besteht vor allem *erstens* in der Erreichung der erforderlichen hohen *Eigenschwingungszahl*, um innerhalb ihres Meßbereiches maßstabgetreue Aufzeichnungen zu erhalten und *zweitens* der gleichzeitig zur einwandfreien Auswertung erforderlichen erheblichen Vergrößerung, da mit wachsender Vergrößerung die Eigenschwingungszahl ganz bedeutend fällt.

Es ergibt sich aus den *Resonanzkurven*, daß die wichtige Forderung, mindestens ein Vierfaches der höchsten zu messenden Schwingungen als Apparateigenschwingung zu verlangen, doch unbedingt empfehlenswert erscheint, um unter allen Umständen im unverzerrten Bereich zu bleiben. Unter *Resonanzkurven* versteht man diejenigen Kurven, welche entstehen, wenn z. B. auf der X-Achse die dem Meßsystem aufgedrückte Frequenz und auf der Y-Achse die Amplitude, d. h. die vom Meßsystem aufgezeichnete Wellenhöhe aufgetragen wird.

Mit Meßgeräten, die auf elektrischer Übertragung beruhen, gelingt es ohne weiteres, diese Schwierigkeit zu überwinden, und zwar sowohl eine ausreichend rasche Apparateigenschwingung zu erreichen, als auch die Frage der Eichfähigkeit, wie weiter unten ausgeführt, ebenfalls einwandfrei zu lösen.

Die im folgenden geschilderten Versuche hatten ausschließlich den Zweck, ein *elektrisches Meßverfahren* so zu vervollkommen, daß es für die Praxis des Brückeningenieurs ohne besondere Bedienungsschwierigkeiten verwendbar wird.

Man muß, wie bereits erwähnt, zunächst zwischen dem eigentlichen Schreibgerät und dem Dehnungsmesser unterscheiden.

1. Ein vorzügliches *Registriergerät*, das u. a. die erforderlichen hohen Eigenschwingungszahlen aufweist, ist durch den Oszillographen gegeben, mit dem in der Elektrotechnik schon lange sämtliche Schwingungserscheinungen untersucht werden.

Der Oszillograph kann daher, von dem Nachteil der photographischen Entwicklung abgesehen, infolge der Verwendung des masselosen Lichtstrahls, was bei dynamischen Messungen im Bereich höherer Frequenzen unvermeidlich erscheint, für Registrierzwecke von Schwingungs- und Spannungsvorgängen jeglicher Art als hervorragendes Meßgerät angesehen werden.

2. Weit schwieriger ist die eigentliche Dehnungsmessung und die *Umsetzung* der *Dehnung* in Gleichstrom zwecks Registrierung durch den Oszillographen.

Zur Dehnungsmessung sind daher zunächst *Kohlendehnungsmesser* weiter entwickelt worden, die die obigen Nachteile vermeiden. In einem Gehäuse enthalten sie zwei Säulen, die aus aufeinandergeschichteten Kohlenscheibchen bestehen.

Zwischen diesen Säulen befindet sich ein elastisch eingespannter Stab, dessen Bewegung gegen das Gehäuse durch Aufsetzen seines freien Endes auf das sich dehnende Brückenglied in der einen Kohlensäule Zug, in der andern Druck erzeugt; der elektrische Berührungswiderstand der Kohlenscheibchen wird dadurch verändert. Fügt man die beiden Kohlensäulen so in die bekannte WHEATSTONESche Brückenschaltung ein, daß in Normallage kein Strom durch die Brücke fließt, so ergibt jede Dehnungsänderung und mithin Druck- oder Widerstandsänderung einen positiven, bzw. negativen Gleichstrom in der WHEATSTONESchen Brücke. Die Zug- und Druckversuche haben bewiesen, daß es durch die obenerwähnte Schaltung und die Wahl einer geeigneten mechanischen Vorspannung von *zwei* Kohlensäulen möglich ist, innerhalb des erforderlichen Meßbereiches von etwa ± 1000 kg/qcm, praktisch linear mit jeder Spannungsschwankung veränderliche Ausschläge am Milliampere-meter bzw. der Meßschleife zu erhalten.

Durch Anschlagen der Apparate, sowohl in aufgespanntem wie nicht aufgespanntem Zustande sind die Eigenschwingungskurven aufgenommen worden, die sich zu 2000 bis zu 4000 Hertz, je nach der gewählten mechanischen Vorspannung der Kohlensäulen ergeben haben. Dies von den Amerikanern zuerst im Jahre 1923 verwendete Prinzip (Electrical Telemeter von O. S. PETERS, U. S. Bureau of Standards, Washington, D. C.) ist in Deutschland von Dr. SIEMANN, Bremen, im Jahre 1925 zur Aufzeichnung langsamer Spannungsänderungen bei Untersuchungen von Schiffen auf See in etwas veränderter Form wieder benutzt worden.

IV. Besondere Aufgaben aus der Brückenmeßtechnik und Wege zu ihrer Lösung

In beliebiger Entfernung von der Brücke steht ein Meßwagen, der den Oszillographen und das Schaltpult aufnimmt, welches lediglich zum Abgleichen der Widerstände in den einzelnen Zweigen der WHEATSTONESchen Brückenschaltung dient.

Die Eichung der Oszillogramme wurde mit Hilfe von HUGGENBERGER-Spannungsmessern von 10 cm Meßlänge, durch wiederholtes Auffahren der Belastungslokomotive auf die Brücke in die jeweils ungünstigste Stellung, vorgenommen. Aus dem Mittelwert der Ablesungen dieser Dehnungsmesser konnte dann die statische Spannung errechnet werden. Der infolge der entsprechenden statischen Belastung erzeugte Schleifenausschlag des Oszillographen vor und nach der Aufnahme der eigentlichen Oszillogramme wurde dann der Auswertung der dynamischen Aufzeichnungen zugrunde gelegt.

Endgültige Folgerungen können aus den bisher durchgeführten wenigen Versuchen jetzt noch nicht gezogen werden. Einige bemerkenswerte Ergebnisse seien jedoch, vorbehaltlich der Bestätigung durch weitere Messungen auch an anderen Brücken, kurz gestreift.

Erkennbar ist zunächst jedenfalls, daß die durch die *Einrüttelfahrten* erzwungene, absolute Konstanz der Null-Linie eine gute Bestätigung für das richtige Arbeiten der gesamten Apparatur darstellt. Die systematischen Einrüttelfahrten, die bei mechanischen Geräten und auch rein statischen Messungen unbedingt erforderlich sind, haben jedenfalls zum Erfolg sehr wesentlich beigetragen.

Auf die außerordentliche Bedeutung der *absoluten Gleichzeitigkeit* mehrerer Diagramme, die bei mechanischen Einzelapparaten wohl niemals so genau zu erzielen sein wird, sei nochmals hingewiesen. Man kann auf diese Weise durch Anbringen einer größeren Zahl von Apparaten die räumliche Verformungslinie eines ganzen Stabes oder Fachwerkträgers usw., also die Schwingungsform (Grundton oder 1., 2. usw. Oberton) festlegen.

Der Charakter der *Schwingungserscheinungen* in einem Untergurtstab und somit auch der Stoßkoeffizient läßt sich vorläufig wie folgt auswerten:

1. Bei den *Fahrten mit 10 km/Std.* Geschwindigkeit ergab sich eine deutliche,

bisher bei so geringer Geschwindigkeit wohl kaum beobachtete Schwingung von 30 bis 50 Hertz, was lediglich infolge der erheblichen Vergrößerung und des raschen Papiervortriebes erst erkennbar wurde. Es errechnet sich daraus bereits für 10 km/Std ein Stoßkoeffizient von 1,06 ($\sigma_{\max} = 1,06 \sigma_{\text{mittel}}$).

2. Bei den *Fahrten von 40 km/Std.* sind drei völlig voneinander verschiedene Schwingungen deutlich zu erkennen, und zwar: $n_1 = 4$ bis 6 Hertz, $n_2 = 42$ bis 44 Hertz und $n_3 = 300$ bis 600 Hertz. Vergleicht man diese drei Schwingungen mit den von Prof. HORT¹ errechneten Werten, so kann man vermutlich die langsame Schwingung als den Triebad- und Timoshenkoeffekt, und die mittlere als Stoßeffect ansprechen, während die dritte, rasche Schwingung möglicherweise als ein Oberton der Eigenschwingung des Stabes anzusehen ist.

3. Die *Eigenschwingungszahl bzw. deren Obertöne eines Obergurtes* und eines *Pfostens* im belasteten und unbelasteten Zustande sind auch experimentell, und zwar auf folgende Weise bestimmt worden: Die Stäbe wurden durch Anschlagen mit Vorschlagshämmern in Richtung der X- sowie Y-Achse unmittelbar neben den Dehnungsmessern erregt; sie erhielten dadurch eine Beanspruchung, der mechanische Geräte wohl kaum gewachsen sind.

Die Übereinstimmung der auftretenden Schwingungen bei einer gewöhnlichen Belastungsfahrt mit den Anstoß-Eigenschwingungen der Einzelstäbe, sowohl für die X- wie auch für die Y-Achse, die im Bereich von 50 bis 600 Hertz liegen, erlaubt wohl den Schluß zu ziehen, daß nicht bloß Längsschwingungen (Longitudinalwellen), wie später ausgeführt wird, sondern in ausgeprägter Weise auch Querschwingungen (Transversalschwingungen oder Biegungswellen) unsere Brückenspannungen beeinflussen.

4. Die *Amplitudenhöhe der einzelnen Schwingungen*, auf den Stoßkoeffizienten umgerechnet, ergibt für n_1 rd. 0,08 (nach HORT bei 65 km/Std. als Triebadeffect bei Resonanz und Timoshenkoeffect zusammen mit 0,20 errechnet), für n_2 rd. 0,15 (nach HORT als Stoßeffect ebenfalls mit 0,15 errechnet) und für n_3 rd. 0,02 (voraussichtlich Eigenschwingungsoberton des Fachwerkstabes). Daß diese hohen Obertöne keine praktische Bedeutung in bezug auf die Stoßzahl haben, war vorauszu-sehen; der Zweck der Versuche ist auch keineswegs in der Aufnahme so rascher Schwingungen zu suchen.

5. Um die *Eigenschwingung der Brücken* genauer bestimmen zu können, aus deren Veränderung nach längerem Betriebe möglicherweise sich Rückschlüsse auf ihren Zustand ziehen lassen, sind Versuche mit einem Erschütterungswagen ange-stellt worden. Der *Erschütterungswagen* soll den Brücken sinusförmige Schwingungen aufdrücken, und zwar mit Hilfe von sogenannten Unbalancen, d. h. exzentrisch angebrachten Schwungrädern, die verschieden gerichtete Stöße in beliebiger Reihen-folge und Stärke auf die Brücken ausüben können. Über weitere im Gang befindliche Untersuchungen mit dem Erschütterungswagen kann zurzeit noch nicht berichtet werden.²

6. Schließlich werden aber auch Schwingungserscheinungen bereits durch *rein statische* Wirkungen, und zwar die besonders beim Längs- und Querträger auf-tretenden starken Spitzen der bisher wohl allgemein zu sehr vernachlässigten *Wirkungsflächen* hervorgerufen.

Unter *Wirkungsflächen*, also den *theoretischen Diagrammen* oder *Summeneinfluß-linien*, wie man sie sonst auch nicht ganz zutreffend nennt, wird hier die Summe der

¹ W. HORT: Stoßbeanspruchungen und Schwingungen der Hauptträger statisch be-stimmter Eisenbahnbrücken. „Die Bautechnik“, 1928, Heft 3 und 4.

² R. BERNHARD und W. SPÄTH: Reindynamische Verfahren zur Untersuchung der Beanspruchung von Bauwerken. „Der Stahlbau“, 1929, Heft 6.

mit den entsprechenden Raddrücken multiplizierten Einflußlinien verstanden, die zu einer bestimmten wandernden Lastgruppe (z. B. einer Belastungslokomotive) und nicht einer Last „eins“, wie bei einer gewöhnlichen Einflußlinie, gehören. Die rasche Aufeinanderfolge ihrer Spitzen, die leicht mit anderen Schwingungen verwechselt werden kann, ist nur von der Geschwindigkeit der Belastungslokomotive abhängig. Bei 40 km/Std. ergibt sich z. B. für den Längsträger und für den Querträger der untersuchten Brücke eine scheinbare Frequenz von etwa 4 Hertz. Zur Bestimmung der Stoßzahl von Schrägen, Pfosten und vor allem von Quer- und Längsträgern ist es daher unbedingt erforderlich, diese Wirkungsflächen einzuzichnen, um richtige Werte zu erhalten.

V. Zusammenfassung

Einige *Hauptbedingungen*, die an einen guten, registrierenden Spannungsmesser zur Untersuchung statischer und dynamischer Beanspruchungen eiserner Brücken gestellt werden müssen, sind demnach kurz zusammengefaßt zurzeit etwa folgende:

1. *Apparateigenschwingungszahl*: Größer oder gleich 1200 Hertz, damit maßstabgetreue Anzeige von Frequenzen bis zu 300 Hertz sichergestellt ist.
2. *Empfindlichkeit*: Anzeige der Spannungsänderungen von etwa 5 kg/qcm.
3. *Genauigkeit*: Bei über 1000facher Vergrößerung $\pm 2,5\%$.
4. *Zeitliche Übereinstimmung*: Anzeigen von mehreren Meßstellen auf einem Diagramm.
5. *Diagrammvortrieb*: Zur Aufnahme kurzer Vorgänge Papiergeschwindigkeit bis 4 m/Sek. regelbar.
6. Einfache *Eichmöglichkeit*.
7. Leichte *Bedienbarkeit*.

Diese Grundlagen stimmen im wesentlichen mit den bisherigen Forderungen des Preisausschreibens der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft überein. Ob sie überhaupt alle durch einen einzigen Apparat erfüllt werden können, bleibt noch dahingestellt. Mit den elektrischen Verfahren kann jedenfalls der größte Teil davon erreicht werden. Die Notwendigkeit, auch andere als vorwiegend mechanische Geräte auszubilden, hat sich gerade als Folge des obigen Preisausschreibens erst herausgestellt und war wohl früher nicht mit Bestimmtheit vorauszusehen.

Die *Nachteile* des elektrischen Verfahrens liegen zweifellos in der nicht leichten Bedienung des Oszillographen, wobei freilich zu bemerken ist, daß auch sämtliche, selbst die einfachsten mechanischen, rein statischen Dehnungsmesser unbedingt eingearbeitete Hilfskräfte erfordern.

Die *Vorteile* des elektrischen Meßverfahrens sind dagegen in erster Linie die praktisch unbegrenzte, hohe Apparateigenschwingung und Vergrößerungsmöglichkeit, geringe Aufspannzeit, Bedienung vieler Dehnungsmesser gleichzeitig von einer Zentralstelle aus, also Ersparnis an Arbeitskräften, absolute Koinzidenz der verschiedensten Vorgänge auf einem Streifen, sowie Verringerung der Diagrammzahl durch Wiedergabe auf einem Papierstreifen von fast beliebig raschem Vortrieb, der damit verbundene Zeitgewinn und schließlich die insgesamt geringeren Kosten.

Herr Oberbaurat Prof. Dr. SKUTSCH, Herr dipl. Ing. CURTIUS, Herr Dipl. Ing. KAMMERER und Herr Reichsbahnoberinspektor MORGENROTH haben wesentlich zum Gelingen der Versuche beigetragen. Es ist dem Berichtersteller eine angenehme Pflicht, seinen Dank auch an dieser Stelle zum Ausdruck zu bringen.

Diskussion

ALFRED MEYER, II. Sektionschef bei der Generaldirektion der Schweizer Bundesbahnen, Bern:

Als Erbauer eines mechanisch registrierenden Dehnungsmessers möchte ich einige Bemerkungen zu den Ausführungen von Herrn Dr. BERNHARD anbringen.

Herr Dr. BERNHARD stellt in erster Linie die Forderung auf, daß die sekundliche Eigenschwingungszahl, die sogenannte Resonanz eines Dehnungsmessers, nicht unter 1200 Hertz liegen müsse, damit der Dehnungsmesser mit Sicherheit den vierten Teil, d. h. 300 Hertz, unverzerrt aufzeichne. Diese Forderung mag für den Kohlenplättchen-Dehnungsmesser zutreffen. Bei einem mehrhebligen, mechanisch-registrierenden Meßgerät liegt der Fall insofern anders, als die Resonanzkurve nicht eine einfache mathematische Funktion ist, wie sie gewöhnlich dargestellt wird, weil bei hohen Schwingungszahlen eine natürliche Dämpfung in Form von vermehrter Reibung und vermehrtem Luftwiderstand durch die Hebel eintritt. Dadurch liefert der Dehnungsmesser weit über den vierten Teil der Resonanz hinaus unverzerrte Diagramme, wie Versuche auf dem elektrischen Schütteltisch der Firma TRÜB, TÄUBER & Co. in Zürich mit meinem Dehnungsmesser gezeigt haben. Diese Versuche sind noch im Gang und erlauben daher noch kein abschließendes Urteil.

Eine Gefahr, daß die an einer Brücke auftretenden 300 sekundlichen Dehnungsschwingungen von einem mechanisch-registrierenden Dehnungsmesser verzerrt aufgezeichnet würden, wenn dieser beispielsweise eine Eigenfrequenz von nur 400 Hertz besitzt, ist ausgeschlossen. Die Amplitude so hoher Schwingungen ist gering, schätzungsweise im Maximum 30 kg/qcm, so daß diese den Dehnungsmesser kaum zu erregen vermögen, und von ihm entweder gar nicht oder aber zu klein aufgezeichnet werden. Was bedeutet aber die Unterdrückung von einigen kg/qcm, wenn in Betracht gezogen wird, daß der mechanisch-registrierende Dehnungsmesser dem elektrisch-optischen in der praktischen Handhabung überlegen ist? Auch in bezug auf die Kosten stellt sich der mechanisch-registrierende günstiger, und zwar sowohl bezüglich der Anschaffungs- als auch der Betriebskosten. Außerdem fehlt heute noch die Erfahrung darüber, wie rasch der Verschleiß der Kohlenplättchen bei den heftigen Brückenerschütterungen sich gestaltet. Beispielsweise verändern Kohlenmikrophone manchmal verhältnismäßig rasch ihre Leitfähigkeit, wodurch sie unbrauchbar werden. Es ist daher nicht ausgeschlossen, daß infolge Veränderungen der Berührungsfächen der Kohlenplättchen der elektrische Widerstand sich ändert, wodurch der Kohlenplättchen-Dehnungsmesser unrichtige Angaben macht.

Betreffend die im Vortrage besonders hervorgehobene Trennung der eigentlichen Meßapparate vom Oszillographen möchte ich noch kurz folgendes erwähnen:

Wer schon Messungen an Brücken ausgeführt hat, weiß, wie wichtig es ist, daß alle Beteiligten möglichst gut erreichbar sind. Durch die Aufstellung des Oszillographen im weit entfernten Brückenmeßwagen wird die Messung eher umständlicher. Außerdem besteht beim Versagen der Bremsen des Belastungszuges die Gefahr, daß die Beobachter des Meßwagens und dieser selbst Schaden leiden. Auch im Hinblick auf eine rasche Räumung des Geleises für einen fahrplanmäßigen Zug ist die Belassung des Meßwagens auf offener Strecke nicht zu empfehlen. Es wird daher in bestimmten Fällen die Aufstellung des Oszillographen samt der Akkumulatorenbatterie in der Nähe der Brücke nicht immer zu umgehen sein. Solche Maßnahmen würden naturgemäß den Betrieb weiter erheblich verteuern und umständlicher machen.

Reichsbahnrat Dr.-Ing. BERNHARD:

1. Die aufgestellte Forderung, eine Apparate-Eigenschwingungszahl nicht unter 1200 Hertz anzustreben, um durch die auftretenden Spannungsschwankungen von etwa 300 Hertz in den Brückenstäben *keine Störungen und falsche Anzeigen* zu erhalten, ist in der Form der *für jedes Schwingungssystem ganz allgemein gültigen Resonanzkurve* begründet. Nur bei halbaperiodischer Dämpfung, gleichgültig aus welcher Ursache, z. B. Luftwiderstand oder sonstige Reibungen, wird man bis zu einem Viertel der Apparate-Eigenschwingungszahl unverzerrte Anzeigen erhalten. In allen anderen Fällen, also sowohl geringerer wie auch größerer Dämpfung, *ganz unabhängig, ob ein mechanisches, optisches oder elektrisches System zugrunde liegt*, werden sich falsche, d. h. Über- bzw. Unteranzeigen ergeben.

2. Die raschen, aber absolut genommen sehr kleinen Spannungsschwankungen, die Herr MEYER auf etwa 30 kg/qcm schätzt, machen immerhin rund 10% *der überhaupt mit den Meßgeräten erfaßbaren Spannungen aus*. Normalerweise betragen diese Beanspruchungen infolge Verkehrslast etwa 300 kg/qcm; der Rest von 900 kg/qcm (1200—300 kg/qcm) bildet den Eigengewichtsanteil.

In dem jetzt erschienenen, außerordentlich gründlichen Bericht des englischen Ausschusses für Brückenmeßtechnik (London 1929) wird von ganz unabhängiger Seite erneut festgestellt, daß *mechanisch aufzeichnende Meßgeräte* durch rasche Erregerschwingungen, *mögen sie noch so gering sein*, zu erheblichen Fehlanzeigen, und zwar insbesondere störenden *Überanzeigen*, angeregt werden.

Das *Aneinanderreihen verschiedener Hebel*, wie es zur Erzielung der notwendigen Vergrößerung bei mechanischen Geräten nun einmal erforderlich ist, bildet u. a. eine Ursache von Ungenauigkeiten, die bei *statischen Messungen*, wie es z. B. jeder Versuch auf einer Eichbank zeigt, leicht zu erheblichen Hysteresiserscheinungen und bei *dynamischen Versuchen*, z. B. durch Nachweis auf dem Schütteltisch leicht zu Schüttelschwingungen führen kann. Die *einwandfreie Bedienung* dieser verschiedenen, durch Gelenke stets mit geringem Spiel verbundenen Hebel, erscheint deshalb *keineswegs so ganz einfach*.

3. Die Anschaffung einer größeren Anzahl der im Handel befindlichen mechanischen Brückenspannungsmesser ist zur Zeit noch teurer als die gleiche Anzahl Kohlendehnungsmesser in Verbindung mit einem Oszillographen; insbesondere wenn man berücksichtigt, daß der Kohlendehnungsmesser fast ohne Mehrkosten *gleichzeitig als Schwingungs-, Beschleunigungs- und auch dynamischer Durchbiegungsmesser* verwendet werden kann.

4. Der Vorteil, alle Meßstellen von einer Zentralstelle aus bedienen zu können, ergibt meines Erachtens eine wesentliche *Vereinfachung des Meßvorganges* und verlangt keine weitere Verständigung der nun überhaupt nicht mehr erforderlichen Einzelbeobachter, was auch als wirtschaftlicher Vorteil in einer *Herabsetzung der Betriebskosten* zur Auswirkung kommt.

Außerdem ist die *gleichzeitige Aufzeichnung* derartiger Vorgänge, die sich in Bruchteilen von Sekunden abspielen, nur bei Registrierung auf einem *einzigem Papierstreifen* gewährleistet. Die Synchronisierung des Vortriebes der verschiedenen Meßstreifen bei einzelnen Meßgeräten ist auch bei elektrischer Kupplung nicht mit der genügenden Genauigkeit durchführbar.

5. Eine *Veränderung der Leitfähigkeit der Kohlenplättchen* ist trotz fast zweijähriger Versuche nicht beobachtet worden; jedenfalls wird innerhalb der Überfahrt eines Zuges, die nur wenige Sekunden dauert, bestimmt keine störende Veränderung eintreten, was sich durch einfache Eichung vor und nach der Meßfahrt stets leicht kontrollieren läßt.

6. Während der Fahrt des Belastungszuges über die Brücke muß die Strecke

ohnehin gesperrt werden. Besondere *betriebliche Störungen* durch Aufstellung des Meßwagens entstehen dadurch also nicht; falls ein Versagen der Bremsen des Belastungszuges und mithin eine Gefährdung des Meßwagens auf eingleisigen Strecken befürchtet wird, werden Schnellfahrten mit der Anfahrstrecke vom Meßwagen ausgehend zur Brücke hin vorgenommen.

Zum Schluß sei ausdrücklich noch einmal darauf hingewiesen, daß es vielleicht möglich sein wird, durch Vergleich mit einem genauen, elektrisch-optischen und daher *masselosen* Meßverfahren, die Fehler der mechanischen Dehnungsmesser durch ihre stets *mit Masse behafteten Teile*, zu erkennen, um sie für *einfache Messungen* trotzdem verwenden zu können.

Ministerialrat a. D. Ing. J. BEKE, Budapest:

Neuartige Verwendung des versteiften Stabbogens bei der Straßenbrücke in Győr in Ungarn¹

Die kön. Freistadt Győr hat im Jahre 1926 einen öffentlichen Wettbewerb für den Bau der Straßenbrücke über einen Nebenarm der Donau ausgeschrieben. System, Form, Material der Brücke konnten die Bewerber nach eigenem Ermessen wählen. Die gesamte *freie* Öffnung von 120 m war in eine Mittelöffnung von 88 m

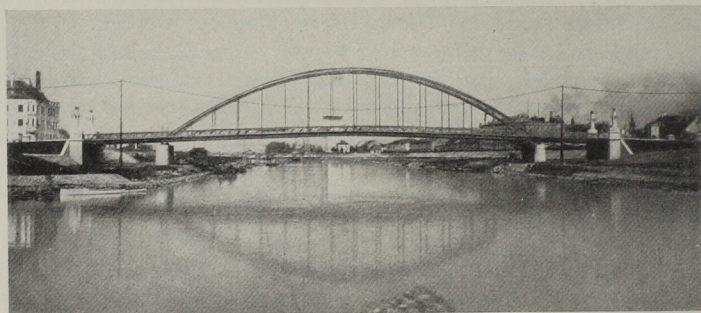


Abb. 1

und zwei Uferüberbrückungen von je 16 m zu teilen. Die Bauhöhe war mit ungefähr 1,0 m festgesetzt, so daß nur eine Brücke mit untenliegender Fahrbahn in Frage kommen konnte. Die Brückenbreite war mit 10,9 m vorgeschrieben, hievon entfallen 6,9 m auf den Fahrweg zwischen den Hauptträgern und je 2,0 m auf die beiderseitigen äußeren Gehwege.

Eingereicht wurden elf Offerte mit mehr als 30 Varianten. Der Bauauftrag wurde für den Überbau der WAGGON- U. MASCHINENFABRIK A. G. in Győr auf Grund der vom Vortragenden entworfenen Brückenkonstruktion mit Langer-Trägern erteilt; die Unterbauten wurden von den Baufirmen ZSIGMONDY (Budapest) und HLATKY-SCHLICHTER (Győr) hergestellt.

Der Stabbogen in der Mittelöffnung hat 90,5 m Spannweite und ist mit einem parallelgurtigen Strebenfachwerk versteift. Die Pfeilhöhe des Bogens ist vom *Untergurte* des Versteifungsträgers gemessen rund 15,8 m, d. i. etwas mehr als ein Sechstel der Spannweite. Die Höhe des Versteifungsträgers ist 2,40 m, der Obergurt ist ungefähr in Geländerhöhe. Eine Besonderheit der Konstruktion ist, daß die Versteifungsträger konsolartig in die Seitenöffnungen hineinragen und daselbst

¹ Der vollständige Vortrag wird im „Bauingenieur“ erscheinen.