

### Stand und Entwicklung der Verfahren zur Erforschung der Wirkungen bewegter Verkehrslasten auf Eisenbahnbrücken.

Von Reichsbahnrat Dipl.-Ing. W. Rosteck, Berlin.  
(Schluß.)

#### 9. Der Kohledehnungsmesser.

Bei der Umschau nach einem einfachen und zweckmäßigen elektrischen Dehnungsmesser war es naheliegend, als Geber ein Gerät zu entwickeln, das auf ähnlicher Grundlage wie das Fernsprechkonduktor beruht. Die Wirkungsweise eines derartigen Mikrophons besteht darin, daß sich der elektrische Übergangswiderstand zwischen Kohlekörpern ändert, wenn

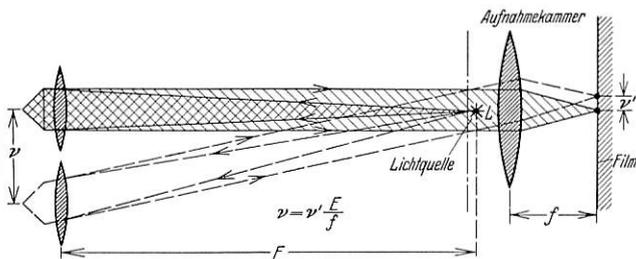


Abb. 12. Tripelprisma.

der Druck geändert wird, mit dem diese Körper aneinandergepreßt werden (Abb. 14). Legt man also einen derartigen Kohlewiderstand an eine Gleichstromquelle von konstanter Spannung, so kann man die Größe des Stromes durch Druckänderung beeinflussen. Wird z. B. bei dem Kohlemikrophon die dünnscheibige, vor den Kohlekörpern (Kohlekörnern) liegende Membrane mechanischen Druckschwankungen in Gestalt von Schallschwingungen unterworfen, so verwandeln sich diese Druckschwankungen in entsprechende Schwingungen des Stromes um den Gleichstromwert (Ruhestrom konstanter Größe). Beim Kohlemikrophon kommt es im wesentlichen darauf an, daß die Frequenzen der Schallwellen richtig wiedergegeben werden. Die Forderung nach einer unverzerrten Wiedergabe der Schwingungsweite (Amplitudenabhängigkeit) der Schallwelle, ob laut oder leise, tritt mehr zurück. Bei der Verwendung eines derartigen Gerätes für Meßzwecke ist dagegen die Forderung nach einer verzerrungsfreien Wiedergabe der Schwingungsweite von ausschlaggebender Bedeutung. Beim Kohlemikrophon werden

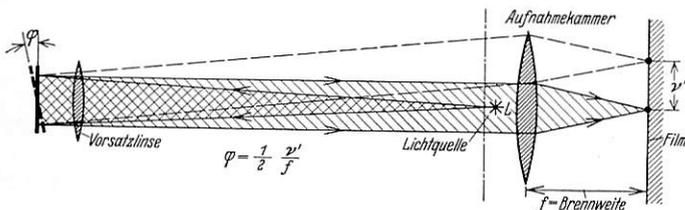
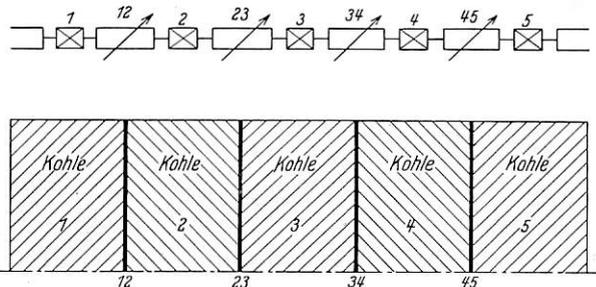


Abb. 13. Planspiegel.

lose aufeinanderliegende Kohlekörner verwendet. Im Gegensatz dazu sind beim Kohledehnungsmesser dünne, ringförmige Kohleplättchen auf einem zylindrischen Isolierkörper säulenartig aufeinandergereiht und mechanisch gegeneinandergepreßt. Selbstverständlich muß der Dehnungsmesser auch durch einen elektrischen Strom erregt werden. Aus den Ausschlägen des Stromzeigers lassen sich beim Kohledehnungsmesser Schlüsse auf die jeweilige Größe der zugeordneten Druck- und damit der Längenänderung ziehen.

Würde man, wie stillschweigend angenommen, den Kohledehnungsmesser aus nur einer Kohlesäule herstellen, so würde dies wenig vorteilhaft sein, weil neben dem eigentlichen veränderlichen Meßstrom auch der Erregerstrom (Ruhestrom) angezeigt würde. Der Erregerstrom ist jedoch für die Messung selbst ohne Bedeutung. Es ist deshalb anzustreben, die Wirkung des Erregerstromes auf die Meßschleife auszuschalten.



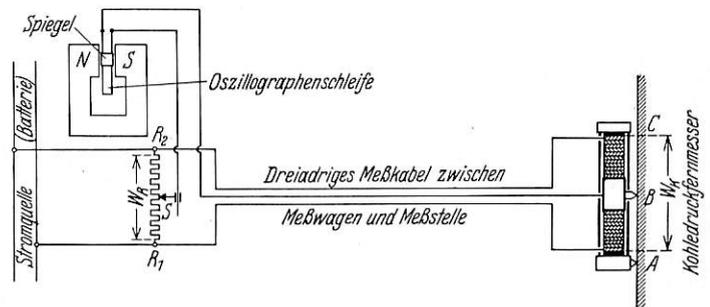
12, 23 usw. = Übergangswiderstände zwischen den einzelnen Kohleplättchen 1, 2, 3 usw.

1, 2, 3 usw. = feste Widerstände.

12, 23, 34 usw. = veränderliche Widerstände (Druckänderung).

Abb. 14. Widerstandsverhältnisse beim Kohledehnungsmesser.

Dies geschieht durch geeignete Schaltung in Form der „Wheatstoneschen Brücke“. Diese Schaltung sieht folgendermaßen aus (Abb. 15):



Der Schiebekontakt S am Widerstand  $R_1-R_2$  ist so eingestellt, daß im Ruhezustand des Dehnungsmessers der Schleifenstromkreis stromlos ist. Wird infolge einer Dehnung (Spannung) die Meßstrecke A-B vergrößert, so wird die untere Kohlesäule entlastet und die obere Kohlesäule mehr zusammengedrückt. Es fließt infolgedessen in dem Schleifenstromkreis ein Ausgleichstrom, durch den der Spiegel der Oszillographenschleife gedreht wird. Die Größe dieser Verdrehung ist ein Maß für den Schleifenstrom und damit auch für die Längenänderung der Strecke A-B.

Abb. 15. Zusammenwirken zwischen Kohledehnungsmesser und Oszillographenschleife.

An einer Gleichstromquelle — Batterie — liegen parallel geschaltet die zwei Kohlesäulen AB und BC eines elektrischen Widerstandes  $W_R$ . In den Zweigen AB und BC des Dehnungsmessers befinden sich die unter Vorspannungsdruck stehenden beiden Kohlesäulen. Bei Bewegung des Punktes B nach unten wird die untere Kohlesäule AB zusätzlich gedrückt, die obere Säule BC in gleichem Maß entlastet. Am Punkt B zwischen den Kohlesäulen und am Schleifkontakt S des Wider-

standes ist eine Oszillographenschleife angeschlossen. Die Schleife zeigt keinen Ausschlag, wenn keine elektrische Spannung zwischen B und S vorhanden ist, man sagt dann: Die Brückenschaltung ist abgeglichen. Dies ist der Fall, wenn Punkt B den elektrischen Widerstand der beiden Kohlesäulen und Punkt S den elektrischen Widerstand  $W_R$  halbiert. Andernfalls fließt ein Ausgleichstrom = Meßstrom durch die Oszillographenschleife, wodurch der Schleifenspiegel gedreht wird.

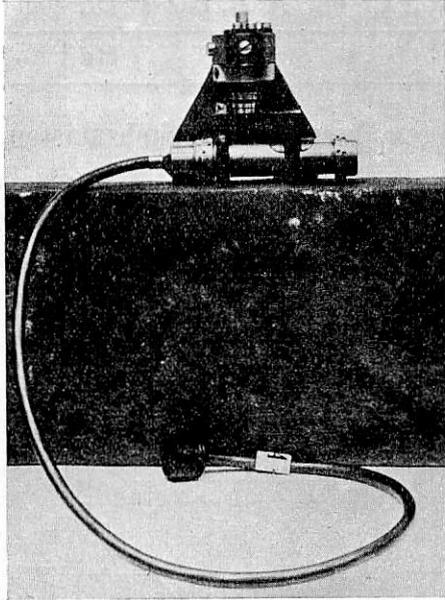


Abb. 16. Kohledehnungsmesser, Zweissäulengerät.

den eigentlichen Dehnungsmesser, wie bereits oben aus anderen Gründen gesagt, aus einer Säule aufbauen, während die zweite

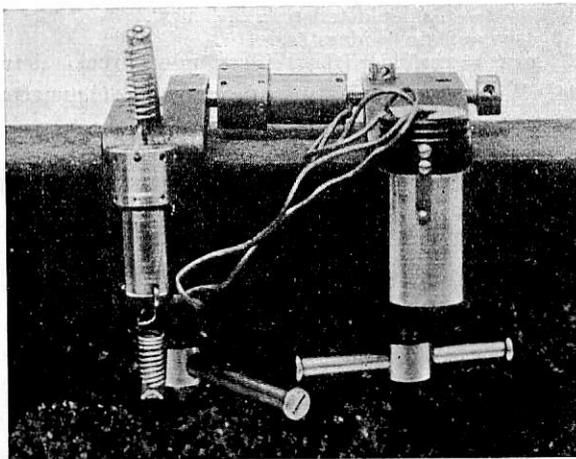
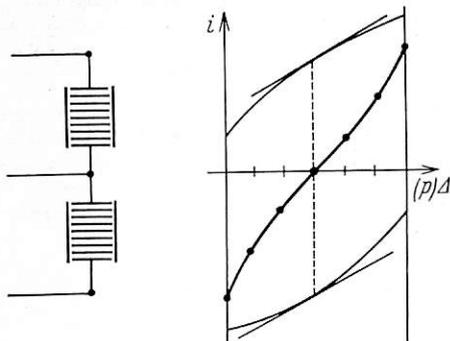


Abb. 17. Kohledehnungsmesser, Einsäulengerät.

Säule in der gleichen Schaltung wie beim Zweissäulengerät z. B. beim Oszillographen im Meßwagen untergebracht ist. Druck-



1. Die Steilheit der zusammengesetzten Kurven ist größer (erkennbar an den Tangenten).
2. Die neue Kurve ist geradliniger.

Abb. 18. Vorteile bei Verwendung von zwei Kohlesäulen (in Brückenschaltung).

änderungen unterworfen wird dann aber nur die erste Säule, während die zweite lediglich zum Abgleich dient. Bei gleichen Abmessungen der einzelnen Kohlesäulen muß natürlich die

Empfindlichkeit der Einsäulenordnung um etwa die Hälfte sinken, weil die zweite Säule zu den Widerstandsänderungen nichts mehr beiträgt (Abb. 16, 17 und 18).

Der mechanische Aufbau des Kohledehnungsmessers ist in diesem Zusammenhang unwesentlich, zumal er aus früheren Veröffentlichungen:

1. Leitfaden „Mechanische Schwingungen der Brücken“ V W L G, Berlin 1933,
2. „Der Stahlbau“, 1928, Heft 13 als bekannt vorausgesetzt werden kann.

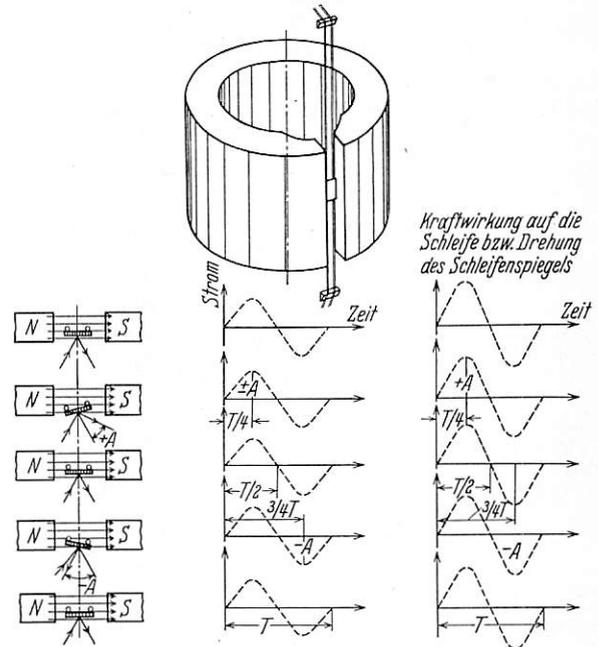


Abb. 19. Wirkung der Schleife mit unveränderlichem Erregerfeld (z. B. Permanentmagnetschleife) bei niedrigen Stromfrequenzen.

Die für den Kohledehnungsmesser verwendete Oszillographenschleife (Abb. 19) ist im wesentlichen ein Galvanometer mit sehr hoher Anzeigegeschwindigkeit, also mit kleiner Einstellzeit, so daß sie auch sehr raschen Bewegungen richtig folgen kann. An die Stelle der Drehschleife des Galvanometers

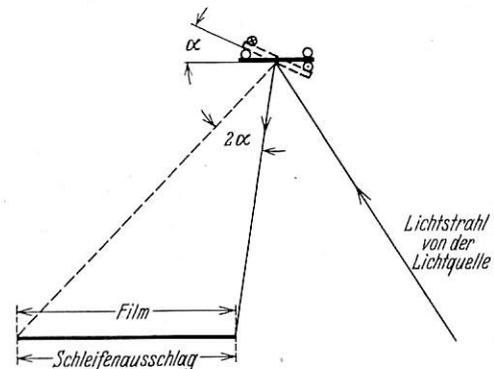


Abb. 20. Ablenkung des Spiegels der Oszillographenschleife.

treten jedoch zwei in einem Abstand von rund  $1/2$  mm gespannte Drähtchen aus Silberband. Diese Bändchen liegen zwischen den Polen eines kleinen, aber sehr starken Stahlmagneten. Die Wirkung der Oszillographenschleife beruht auf einem bekannten Grundsatz der Elektrotechnik, wonach ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld einen Kraftantrieb erfährt. Für die Richtung der Bewegung ist die Stromrichtung im Leiter maßgebend. Da bei der Meßschleife die gegenüberliegenden Bändchen von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen werden, so wird der auf die Drähtchen gekittete Spiegel gedreht (Abb. 20).

### 10. Prüfung des Kohledehnungsmessers.

Versuche, die auf dem elektrischen Schütteltisch vorgenommen wurden und dementsprechend eine Frequenz zwischen 300 Hz und 15 Hz umfassen, haben gezeigt, daß bei einem derartigen Kohledehnungsmesser bei schwingender Beanspruchung eine Amplitudenabhängigkeit auftritt. Sie ist stark davon abhängig, welcher Erregerstrom angewendet wird. Die Amplitudenabhängigkeit wächst mit zunehmendem Erregerstrom (Abb. 21). Ferner ergab sich weiter durch Versuche, daß die Amplitudenabhängigkeit bei schwingenden Druckbeanspruchungen der Kohleplättchen um so kleiner aus-

bereichs keine nennenswerte Amplitudenabhängigkeit ergeben. Dynamische Spannungen mit solchen Frequenzen werden z. B. durch die Grundschwingungen der Brücken ausgelöst. Vergleichsmessungen mit mechanischen Dehnungsmessern an Ort und Stelle, wie z. B. mit dem der Schweizerischen Bundesbahnen von A. Meyer scheinen darauf hinzudeuten, daß in dem Bereich dieser niedrigen Frequenzen der Fehler infolge der Amplitudenabhängigkeit tragbar ist.

Am Prüfstand — dem mechanischen Schütteltisch — sind die Untersuchungen für den Bereich der niedrigen Frequenzen eingeleitet.

Da der Kohledehnungsmesser zur Erreichung möglichst unveränderlicher Empfindlichkeit eine mechanische Vorspannung erhalten muß, so ist auch ein erhöhter Kraftaufwand für die Bewegung der Meßspitzen erforderlich. Es besteht daher die Gefahr, daß sich die Einspannung an den Spitzen lockert, wodurch Mißweisungen, z. B. auch Nullpunktsverlagerungen, entstehen können.

### 11. Der elektromagnetische Dehnungsmesser

von Dipl.-Ing. Kammerer, DRP. 505174 (16. 10. 1928).

Nachdem nun die genauere Prüfung des Kohledehnungsmessers auf dem Schütteltisch und auf der optischen Eichbank ergeben hat, daß er vorläufig noch nicht allen an derartige Meßgeräte zu stellenden Anforderungen entspricht, so mußten auch noch andere Geräte herangezogen und untersucht werden. So konnte z. B. im April 1933 gelegentlich von Versuchen am Oberbau in Haar bei München ein auf elektromagnetischer Grundlage beruhendes Versuchsgesetz für Dehnungsmessungen vorgeführt werden. Der Grundgedanke ist dabei folgender:

Leitet man einen Wechselstrom durch die Wicklung eines Elektromagneten, dessen Anker gegen die Pole verschiebbar ist, so wird dieser Wechselstrom durch Veränderung des Abstandes zwischen Anker und Polen beeinflusst. Wechselströme lassen sich aber durch besonders durchgebildete Stromzeiger messen. Im vorliegenden Fall müssen diese Wechselstromzeiger eine hinreichende Empfindlichkeit und Trägheitslosigkeit haben, um die den kleinen Längenänderungen entsprechenden kleinen und raschen Stromänderungen mitmachen zu können. Ein derartiges Anzeigegerät stellt die „wattmetrische Schleife“ (Abb. 23 a und b) dar, die in dem neuen Siemens-Universaloszillographen ebenso verwendet werden kann wie die gewöhnliche Schleife mit Stahlmagnet. Der Grundgedanke der Arbeitsweise der wattmetrischen Schleife beruht auf dem sogenannten dynamometrischen Prinzip, das sich am einfachsten erklären läßt, wenn man von der oben beschriebenen Schleife mit Stahlmagnet ausgeht. Bei der Betrachtung der Oszillographenschleife mit Stahlmagnet für den Kohledehnungsmesser wurde gezeigt, daß sich bei einer Umkehr der Stromrichtung in den Schleifendrähtchen und bei Beibehaltung der Richtung des Magnetfeldes eine entgegengesetzte Drehung des Oszillographenspiegels ergibt. Das gleiche würde auch eintreten, wenn man umgekehrt die Richtung des Schleifenstromes beibehält und die des Magnetfeldes wechselt. Kehrt man jedoch die Richtung des Stromes in der Schleife und gleichzeitig die des Magnetfeldes um, so bleibt der Ausschlag des Oszillographenspiegels auf derselben Seite von der Ruhelage. Das Magnetfeld wurde bei der Oszillographenschleife für den Kohledehnungsmesser durch einen Stahlmagneten erzeugt. Dieses Feld läßt sich aber auch durch einen Elektromagneten erzeugen; man kann dann die Richtung des Magnetfeldes in sehr einfacher Weise dadurch umkehren, daß man den Strom in der Magnetwicklung umpolt. Speist man nun sowohl die Schleife als auch die Erregerwicklung des Magneten mit Wechselströmen gleicher Periodenzahl, so wird der Spiegel um eine Lage pendeln, die

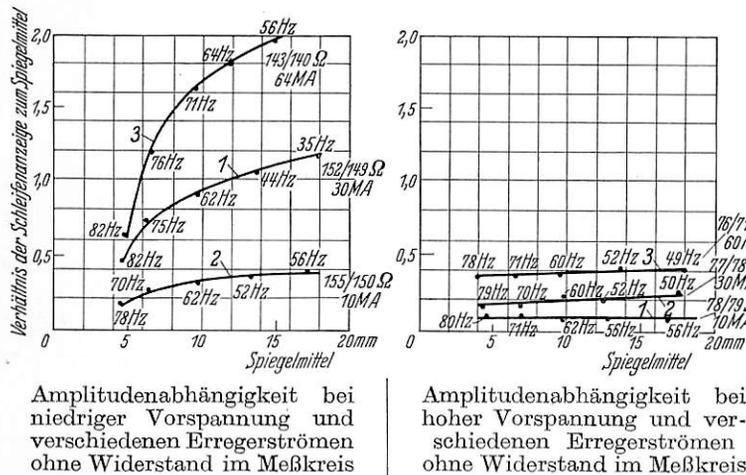


Abb. 21. Versuche mit dem Kohledehnungsmesser.

fällt, je größer man die mechanische Vorspannung wählt, mit dem sie aufeinandergepreßt werden. Endlich kann die Amplitudenabhängigkeit auch durch Einschalten eines Widerstandes in den Meßkreis vermindert werden (Abb. 22). Alle drei angegebenen Mittel zur Verminderung der Amplitudenabhängigkeit gehen allerdings erheblich auf Kosten der Empfindlichkeit.

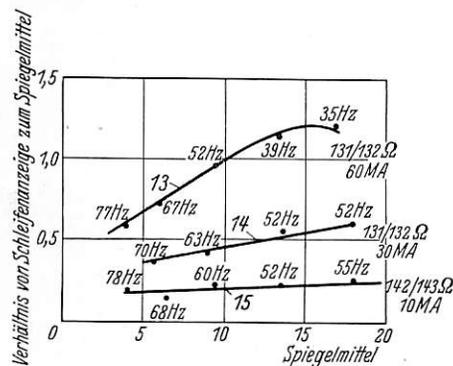


Abb. 22.

Kohledehnungsmesser mit niedriger Vorspannung und verschiedenen Erregerströmen bei Widerstand im Meßkreis.

Bezüglich der künftigen Verwendung des Kohledehnungsmessers in dem Frequenzbereich über 15 bis 300 Hz ist nach den vorbeschriebenen Versuchen auf dem Prüfstand zu bemerken, daß er nur bei geringen Erregerströmen, etwa bis 15 mA oder bei entsprechend starker Vorspannung, d. h. also bei niedrigem Widerstandswert der Kohlesäule, benutzt werden darf. Bei derartigen Geräten darf grundsätzlich eine Amplitudenabhängigkeit nicht vorhanden sein, d. h. sie müssen eine stets gleichbleibende Empfindlichkeit haben. Praktisch läßt sich der Kohledehnungsmesser daher in dem Frequenzbereich zwischen 300 und 15 Hz nur in solchen Fällen verwenden, wo eine verhältnismäßig geringe Empfindlichkeit verlangt wird. Ebenso käme seine Verwendung dort in Frage, wo Spannungen, d. h. Dehnungen, mit nur niedrigen Frequenzen zwischen 15 und 0 Hz auftreten. Vorauszusetzen ist dabei, daß die Versuche innerhalb dieses niedrigen Frequenz-

einseitig außerhalb der Ruhelage der Schleife liegt. Bei hinreichend großen Periodenzahlen der Wechselströme wird die Schleife den Schwankungen der Wechselströme überhaupt nicht mehr folgen können, sondern sich in einer bestimmten Lage seitlich der Nullage einstellen. Diese Lage entspricht dem sogenannten „Effektivwert“ des Wechselstromes und bleibt unverändert, so lange der Effektivwert unverändert bleibt. Ändert er sich jedoch, so ändert sich auch der Ausschlag der Schleife. Man muß sich darüber klar sein, daß die Frequenz der

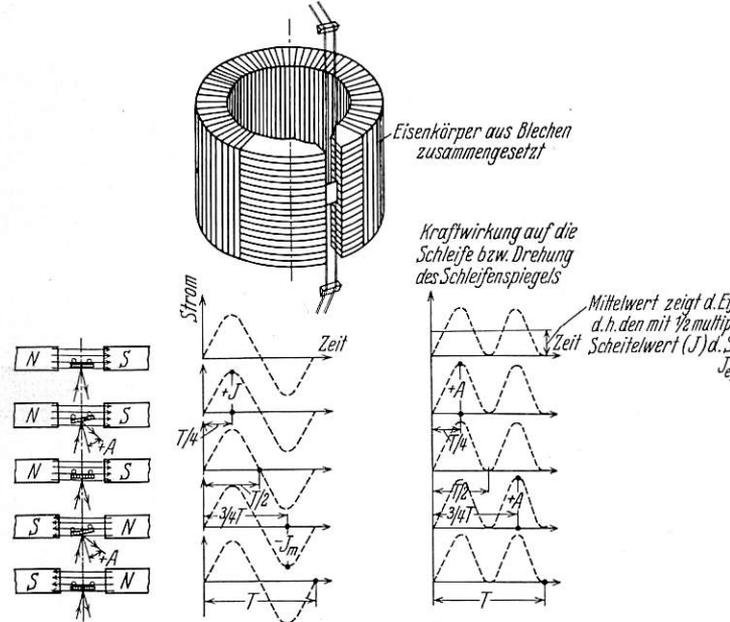


Abb. 23 a. Wirkung der wattmetrischen Schleife bei niedrigen Stromfrequenzen.

erregenden Wechselströme so hoch gelegt werden muß, daß die Schleife den Schwankungen des Wechselstromes selbst nicht mehr folgt, sondern nur die Schwankungen des Effektivwertes anzeigt. Die Frequenz des erregenden Wechselstromes darf daher mit der Frequenz der zu messenden mechanischen Schwingungen des Ankers nicht verwechselt werden. Ein Meßgerät, das auf diesem Grundgedanken beruht, nennt man einen

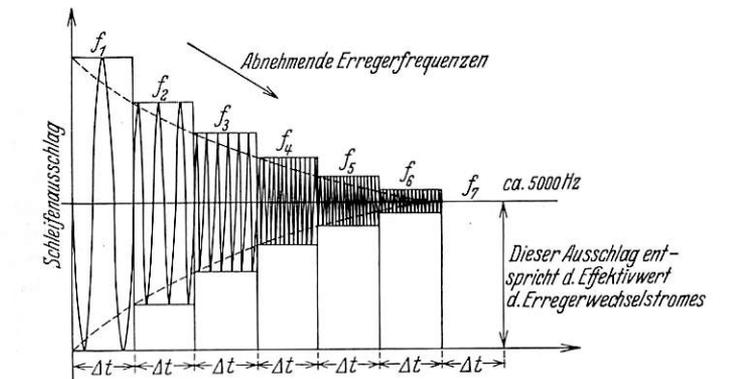


Abb. 23 b. Verhalten der wattmetrischen Schleife bei verschiedenen Erregerfrequenzen.

elektrodynamischen Stromzeiger, der in der Meßtechnik sehr häufig verwendet wird. Die wattmetrische Schleife ist im wesentlichen ein solcher elektrodynamischer Stromzeiger. Der Unterschied aber gegenüber den gewöhnlichen Stromzeigern besteht darin, daß die wattmetrische Schleife infolge der geringen Massenträgheit der Schleifendrähte und des Spiegels sehr raschen Änderungen des Effektivwertes folgen kann.

Es sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es sich bei dem elektromagnetischen Dehnungsmesser um die

Messung von Änderungen des Effektivwertes von Wechselströmen handelt, die durch die Änderung des Luftspaltes zwischen Magnetpol und Anker beeinflußt werden. Der Elektromagnet stellt also in Verbindung mit dem Anker einen Wechselstromwiderstand dar, der durch Änderung des Luftspaltes geändert wird. Rein äußerlich genommen, besteht mit dem Kohledehnungsmesser eine gewisse Ähnlichkeit insofern, als der elektromagnetische Dehnungsmesser ebenfalls auf einer Widerstandsänderung beruht. Um etwaigen Zweifeln vorzu-

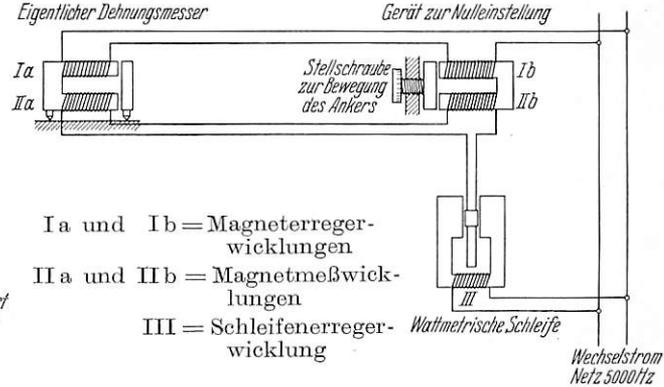


Abb. 24. Schaltplan des elektromagnetischen Dehnungsmessers.

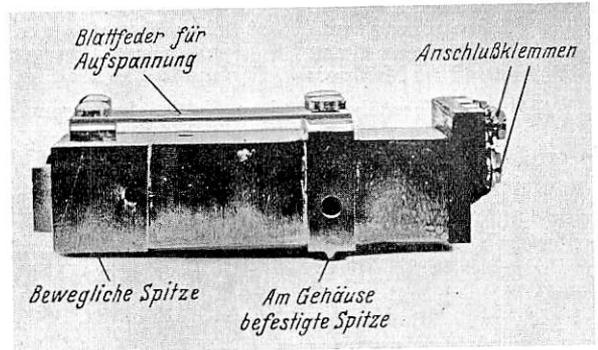


Abb. 25. Elektromagnetischer Dehnungsmesser.

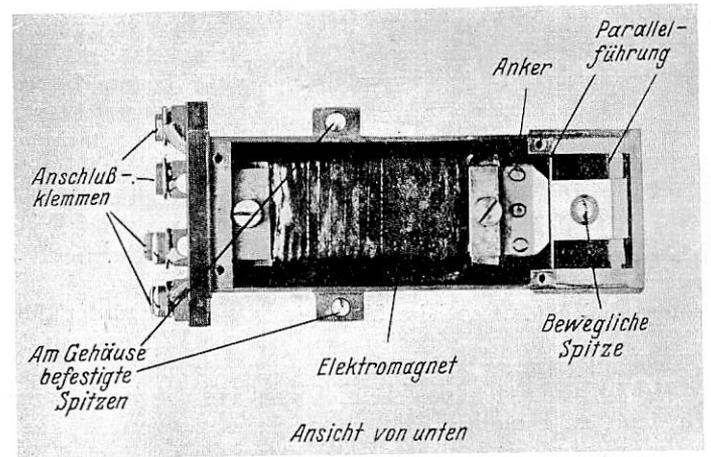


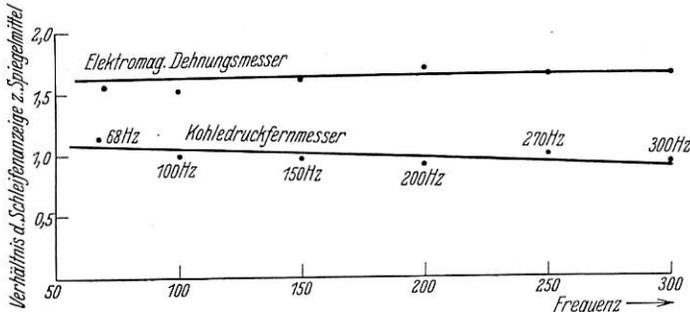
Abb. 26. Elektromagnetischer Dehnungsmesser.

beugen, muß darauf hingewiesen werden, daß man keine Einwirkung erhalten würde, wenn der Elektromagnet an Stelle von Wechselstrom durch Gleichstrom erregt würde. Ebenso wie bei den Kohledehnungsmessern muß auch bei den elektromagnetischen Dehnungsmessern die Wirkung des Erregerstromes auf das Anzeigergerät unterdrückt werden. Zu diesem Zweck ist ein zweiter, genau gleicher Elektromagnet notwendig, entsprechend der zweiten Säule des Kohledehnungsmessers (Abb. 24). Auf Einzelheiten der Schaltung einzugehen würde

hier zu weit führen und soll später erfolgen. Auch der elektromagnetische Dehnungsmesser kann entweder als Zweimagnet- oder als Einmagnetgerät ausgebildet werden. Bei der zur Zeit vorliegenden Ausführung wurde er als Einmagnetgerät hergestellt, weil dadurch sein Aufbau erheblich einfacher werden konnte (Abb. 25 und 26). Der Elektromagnet des Gebers ist in einem Gehäuse eingeschlossen, an dem zwei Stahlspitzen befestigt sind. Der Anker muß selbstverständlich parallel zu den Polen geführt werden. Dies wurde zunächst durch zwei Lenkerfedern erreicht, zwischen denen die dritte Spitze in einem Paßstück befestigt ist. Die Elastizität der Lenkerfedern ist so gewählt, daß sie ungefähr der mechanischen Vorspannung des Kohledehnungsmessers entspricht.

**12. Prüfung des elektromagnetischen Dehnungsmessers.**

Der elektromagnetische Dehnungsmesser wurde sowohl auf dem elektrischen Schütteltisch als auch auf der optischen Eichbank den gleichen Prüfungen unterworfen wie der Kohledehnungsmesser. Auf dem Schütteltisch wurde er mit dem Kohledehnungsmesser gleichzeitig betrieben. Dabei hat sich



Tischerregung, konstant . . . = 20,5 Amp.  
Erregung der Elektromagneten . = 2,0 „  
Erregung der Schleife . . . . = 2,7 „

Abb. 27. Frequenzabhängigkeiten von Kohledehnungsmesser und elektromagnetischem Dehnungsmesser.

gezeigt, daß er innerhalb der geforderten Grenzen weder eine Amplitudenabhängigkeit noch eine Frequenzabhängigkeit aufweist (Abb. 27, 28 und 29). Die Versuche auf der Eichbank ergaben auch in der derzeitigen Ausführung als Einmagnet-

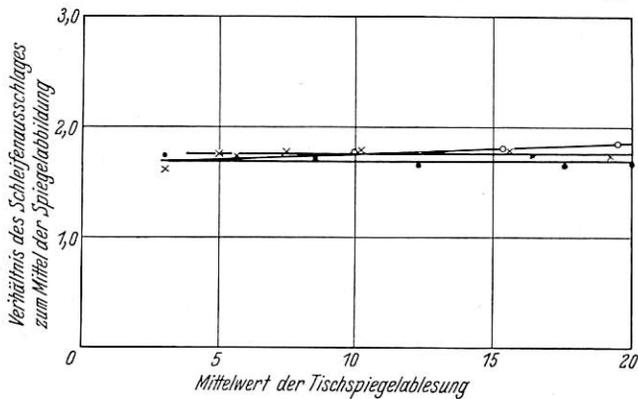
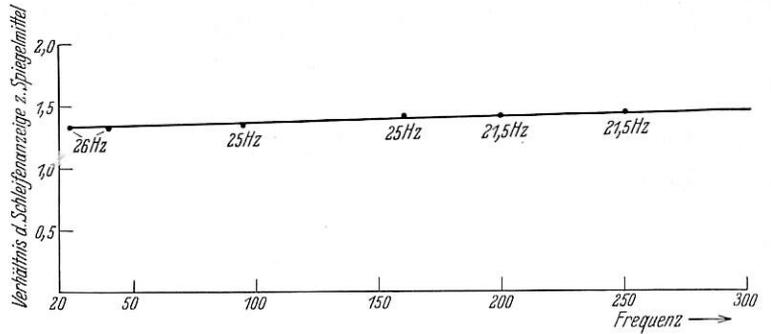


Abb. 28. Elektromagnetischer Dehnungsmesser. Amplitudenabhängigkeit bei unveränderlicher Tischfrequenz (150 Hz).

gerät eine hinreichend gerade Kennlinie für die Empfindlichkeit (Abb. 30). Eine Hysterese konnte bei dem Gerät nicht beobachtet werden. Bei starken Stößen weist er allerdings aus denselben Gründen wie der Kohledehnungsmesser noch Nullpunktverlagerungen auf. In den Oszillogrammen des elektromagnetischen Dehnungsmessers kommt noch die Erreger-

frequenz des Wechselstromes etwas zu stark durch. Dies wird aber bei Verwendung einer anderen Wechselstrommaschine mit höherer Erregerfrequenz (5000 Hz) — die jetzige behelfsmäßige Maschine hat nur rund 3500 Hz — beseitigt werden können.



Frequenzabhängigkeit.

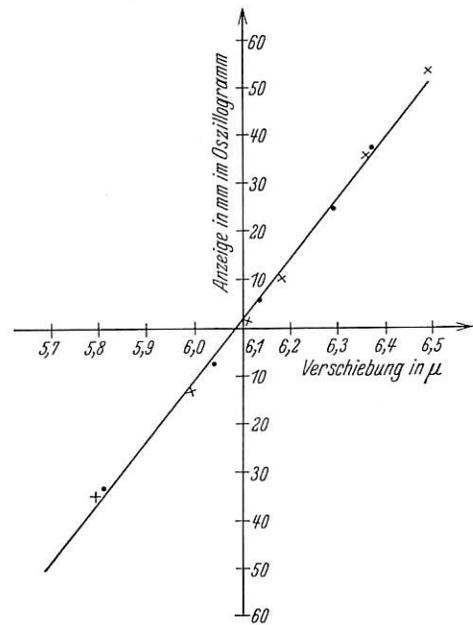
Der leichte Anstieg rührt vermutlich von der Schleifenkennlinie her.

Erregerstrom der Magnete = 1,7 Amp.

Erregerstrom der Schleife = 2,3 Amp.

Abb. 29. Elektromagnetischer Dehnungsmesser.

Zur Zeit werden auch Versuche mit einem elektromagnetischen Dehnungsmesser in einer anderen Ausführung gemacht, bei der an Stelle einer Ankerparallelführung mit Lenkerfedern eine Kugellagerung benutzt wird (Abb. 31 und 32). Diese Kugellager haben den Vorteil, daß zur Bewegung der Spitzen keine oder wenigstens nur unerhebliche Kräfte notwendig sind. Man hofft hierdurch, eine Nullpunktverlagerung zu vermeiden, wie sie beim Kohledehnungsmesser durch seine mechanische Vorspannung oder bei dem oben beschriebenen elektromagnetischen Dehnungsmesser durch die



Magneterregung = 1,93 Amp.

Schleifenerregung = 2,65 Amp.

Abb. 30. Eichung des elektromagnetischen Dehnungsmessers mit der optischen Eichbank (Ablesung am Oszillogramm).

Spannkraft der Lenkerfedern bedingt ist. Schließlich kann noch berichtet werden, daß zur Herstellung der Elektromagnete ein neuer, magnetisch besonders hochwertiger Stahl verwendet wurde, der voraussichtlich noch bessere Ergebnisse für die Empfindlichkeit des elektromagnetischen Dehnungsmessers liefern wird. Allerdings muß der elektromagnetische

Dehnungsmesser ebenso wie das Kohlegerät erst noch auf Hysterese bei dynamischer Beanspruchung auf dem Schütteltisch untersucht werden. Es sei hier noch einmal wiederholt,

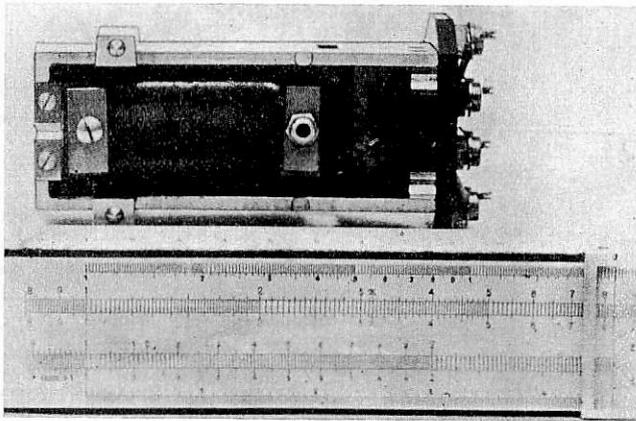


Abb. 31.

Elektromagnetischer Dehnungsmesser mit Kugellagerführung.

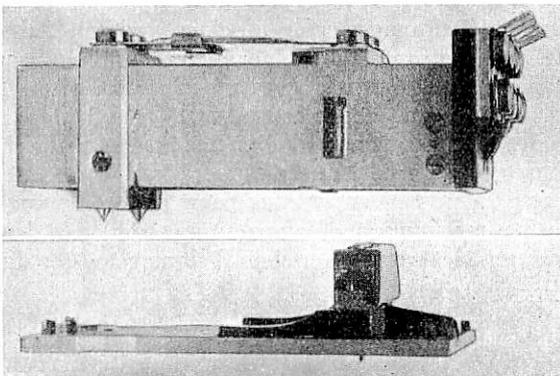


Abb. 32.

Elektromagnetischer Dehnungsmesser mit Kugellagerführung.

daß der elektromagnetische Dehnungsmesser bei statischer Beanspruchung keine Hysterese hat.

### 13. Kondensatormeßgerät.

Als weiteres Beispiel von elektrischen Dehnungsmessern ist hier das Kondensatormeßgerät zu nennen (Abb. 33 und 34). Bei diesem wird an Stelle eines Elektromagneten als Widerstand in den hochfrequenten Wechselstromkreis von rund 2000000 Hz ein Kondensator eingeschaltet, der zu einem Röhrengenerator gehört. Praktisch ist die Anordnung folgende: Zwei kreisrunde Metallscheiben von 50 mm Durchmesser sind auf dem zu untersuchenden Bauglied als Kondensatorplatten in geringem Abstand voneinander so befestigt, daß die Platten die Längenänderungen in gleicher Größe mitmachen.

Das Gerät zeigte bei der Untersuchung auf dem Schütteltisch, also bei schwingender Beanspruchung, ebenso wie der elektromagnetische Dehnungsmesser weder eine Amplituden- noch eine Frequenzabhängigkeit. Es ist aber gegen Witterungseinflüsse empfindlich und würde z. B. versagen, wenn Wasser zwischen die Kondensatorplatten gelangt. Auf der optischen Eichbank wurde das Gerät bisher noch nicht untersucht. Man kann aber mit ziemlicher Sicherheit voraussagen, daß auch hier keine Hystereseerscheinungen auftreten werden.

Ferner darf der Plattendurchmesser nicht zu groß gewählt werden, weil sonst damit gerechnet werden kann, daß die Platten selbst in Schwingungen geraten. Man könnte nun auf den Gedanken kommen, das Schwingen der Platten dadurch

zu vermeiden, daß man sie entsprechend dicker macht. Das vergrößerte Gewicht bedeutet aber eine Vermehrung der trägen Masse, die z. B. schon wegen der Befestigung der Platten sehr

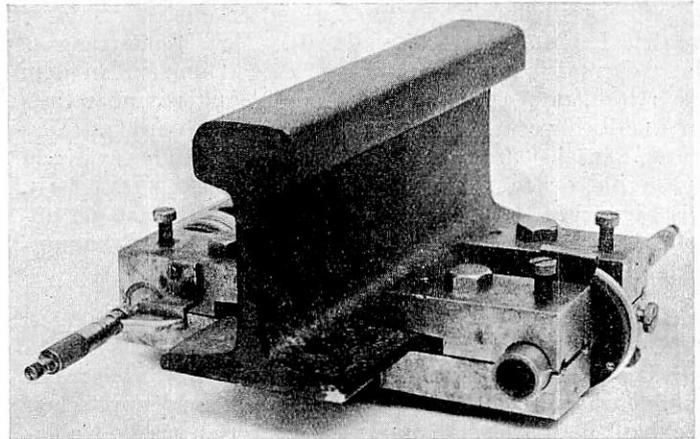


Abb. 33. Kondensatorgerät nach Prof. Thoma, Technische Hochschule Karlsruhe.

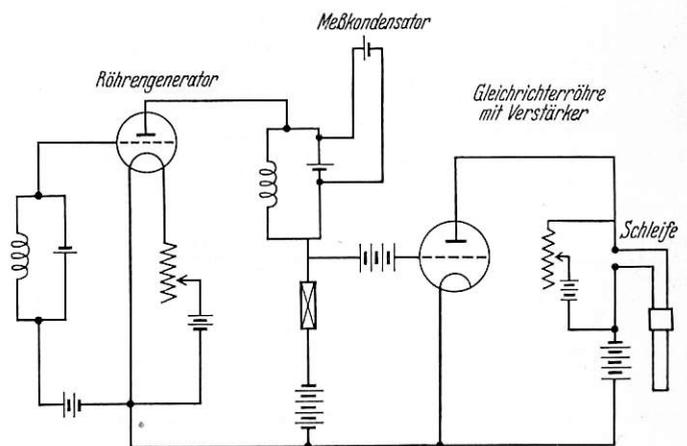


Abb. 34. Schaltplan zum Kondensatorgerät nach Prof. Thoma, Technische Hochschule Karlsruhe.

unerwünscht ist. Da also die Platten aus diesen Gründen verhältnismäßig klein bleiben müssen, ist auch ihre Kapazität so klein, daß sie durch die Anwesenheit von Metallmassen geändert wird, sofern sie nicht besonders abgeschirmt werden.

Auch die Kapazität der Zuleitungen spielt in diesem Zusammenhang eine Rolle.

An dieser Stelle soll noch einmal betont werden, daß alle sogenannten dynamischen Meßgeräte auch statisch richtig anzeigen müssen.

### 14. Ziel der weiteren dynamischen Untersuchungen an Brücken.

Da allen Messungen an Brücken die Erforschung des Einflusses der dynamischen Wirkungen der Verkehrslasten an Brücken zugrunde liegt, so ist zum Schluß noch auf das Ziel dieser Forschungsarbeiten näher einzugehen. Es sollen Mittel und Wege gezeigt werden, wie diese Aufgabe zunächst einmal näherungsweise gelöst werden kann. Unter den dynamischen Wirkungen, die infolge der wandernden Belastung der Betriebsmittel das Bauwerk in lotrechter Richtung am meisten beanspruchen, ist der Einfluß senkrechter, periodischer Kräfte als wesentlich erkannt worden, wie sie z. B. von den Ausgleichsmassen der Lokomotiven erzeugt werden. Wollte man sich damit zufrieden geben, diese dynamische Wirkung nur in bezug auf die Beanspruchung des gesamten Tragwerks größtmäßig zu erfassen, so könnte man sich mit reinen Durchbiegungsmessungen begnügen.

Bedingung wäre dafür allerdings, daß zur Messung solcher Durchbiegungen ein optisches Meßgerät zur Verfügung steht, wie es zum Beispiel nach dem Vorschlag von Professor Kulka besonders für Brückenmeßzwecke durch Zeiss-Jena hergestellt worden ist. Mit einem solchen Gerät ist es möglich, die Durchbiegungen beliebig vieler Punkte einer Brücke in zeitlicher Abhängigkeit von der fortschreitenden Belastung des Bauwerks gleichzeitig zu erfassen und aufzuzeichnen. Seine besondere Eignung beruht darauf, daß man gleichzeitig mehrere Meßpunkte auf einen Festpunkt beziehen kann. Allerdings ist das Zeiss-Kulka-Gerät in seiner heutigen Ausführung als praktisches Meßmittel bei Brücken noch nicht voll brauchbar. Der Grund hierfür liegt darin, daß das Aufnahmegerät z. Z. noch in Richtung der Brückenlängsachse, d. h. also am Bahnkörper, aufgestellt werden muß. Dadurch wird aber bei der Vorbeifahrt des Versuchszuges der Aufstellungsort miterschüttelt. Diese Erschütterungen des Gerätes drücken sich in Schwankungen der Nulllinie aus und erscheinen weiter als Überlagerungen in den eigentlichen Meßlinien. Das Auswerten solcher Meßlinien ist daher außerordentlich mühsam. Immerhin läßt es der sehr wichtige und gute Gedanke, der diesem optischen Gerät zugrunde liegt, nach dem heutigen Stand meßtechnischer Erkenntnis für geboten erscheinen, alles daran zu setzen, um dieses Gerät noch weiter zu vervollkommen. Im Gegensatz dazu sind bei einfach mechanisch wirkenden Durchbiegungsmessern die notwendigen Festpunkte nur schwierig herzustellen. Dies gilt vor allen Dingen für große Brücken oder Talübergänge, die sich meßtechnisch ohne nennenswerte Fehler nur auf optische Weise erfassen lassen (z. B. Messung starker Seitenschwankungen). Die gleichzeitige optische Messung an mehreren Stellen der Brücke ist auch vorteilhaft, um die Schwingungsformen der Tragwerke zu ermitteln. Dagegen ist ein derartiges Gerät ungeeignet für die Ermittlung von Schwingungsbeanspruchungen einzelner Bauglieder im Gesamtverband der Brücke. Abgesehen davon, daß man die Spannungsverteilung über einzelne Querschnitte optisch nicht messen kann, begeht man ungewollt den Fehler, eine mehr oder weniger lückenhafte Theorie nur durch eine lückenhafte neue zu beweisen. Praktisch wären wir damit aber keinen Schritt weitergekommen.

Bei Einzelgliedern einer Brücke lassen sich Schwingungsformen und Spannungsverteilungen in dem praktisch erforderlichen Maß nur durch zielbewußtes Abtasten der Bauteile mit Dehnungsmessern finden, wozu aber eine größere Zahl hochentwickelter und gleichzeitig messender Dehnungsmesser notwendig ist.

Allgemein läßt sich diese Aufgabe auf zweierlei Weise lösen, nämlich:

- a) durch wissenschaftliche Erforschung der Einzelwirkungen und
- b) durch statistische Erforschung auf Grund von Großzahlversuchen.

Die Erforschung der Einzelwirkungen und ihrer Ursachen ist durchaus möglich, aber praktisch schwierig und mühsam. Diese Schwierigkeiten dürfen jedoch kein Grund sein, der Lösung der Aufgaben auf diesem Weg bewußt auszuweichen. Um den heutigen Stoßzahlen eine wissenschaftliche Grundlage zu geben, müßte erst einmal den Einzeleinflüssen nachgegangen werden.

Die Einzelwirkungen versuchsmäßig zu erzeugen und zu erfassen, ist durchführbar, wenn dazu die geeigneten Erregergeräte vorhanden sind. Diese müßten die Form einer Einzelast haben, deren Gewicht das einer Einzelachse des Lastenzuges N oder E nicht überschreiten dürfte, um nicht durch zu schwere Versuchsmittel die Bauwerke, besonders die Fahrbahnanschlüsse, zu gefährden. Weiter müßte das erforderliche Versuchsmittel eine Eigengeschwindigkeit bis zu den Höchst-

geschwindigkeiten unserer heutigen Fahrzeuge besitzen und zum wahlweisen Erzeugen periodischer Kräfte eingerichtet sein. Das ganze würde also eine Vereinigung des Einachsers der Schweiz und des Schwingers bedeuten, jedoch mit dem Unterschied, daß man mit ihm beliebig schnell fahren und die Einflüsse einzeln oder zusammen hervorrufen kann. Ein Vorschlag zu einem solchen „Einachser der Reichsbahn“ ist in Abb. 35 dargestellt; im einzelnen muß er natürlich noch genau durchgearbeitet werden.

Die Schwierigkeiten bei der wissenschaftlichen Erforschung der Stoßzahl  $\varphi$  bedingen natürlich einen großen Zeitaufwand. Bei dem heutigen Streben nach ständiger Steigerung der Fahrgeschwindigkeiten — einer Lebensnotwendigkeit der Eisenbahnen — kann das Ergebnis dieser wissenschaftlichen Versuche leider nicht abgewartet werden. Eine Zwischenlösung auf mehr statistischer Grundlage kann vielleicht — wenn auch nur näherungsweise — schneller zu einem Ergebnis führen und soll daher zunächst durchgeführt werden. Darüber muß aber das erstrebte Endziel immer vor Augen bleiben.

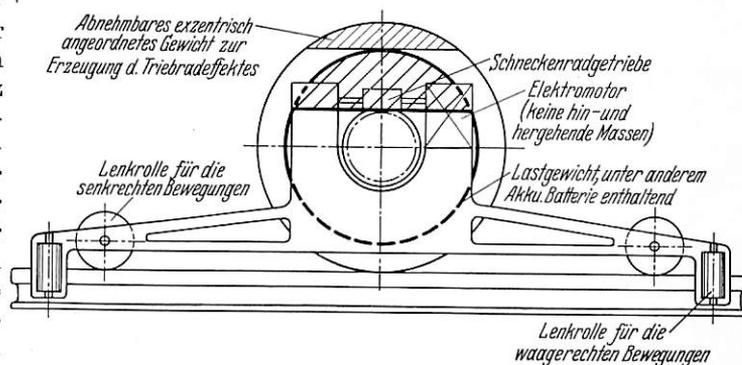


Abb. 35. Einachswagen für Schnellfahrten.

Entsprechend dem einfacheren Zweck statistischer Erforschung werden neben dem Schwinger nur Betriebsfahrzeuge als Versuchslasten benötigt. Ein Vorschlag für die Durchführung dieser Großzahlversuche möge den Abschluß dieser Ausführungen bilden.

### 15. Vorschlag für die Erforschung der dynamischen Wirkungen der Verkehrslasten auf Eisenbahnbrücken durch Großzahlversuche.

Der Vorschlag soll sich zunächst nur auf die Glieder der Hauptträger von eingleisigen Eisenbahnbrücken beziehen.

I. Nach den Bestimmungen der „Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken“, BE, 1934, werden die dynamischen Wirkungen der fahrenden Verkehrslasten dadurch berücksichtigt, daß die statischen Wirkungen der Lastenzüge mit einer Stoßzahl  $\varphi$  vervielfacht werden. Die „BE“ schreiben vor, daß diese Stoßzahl  $\varphi$  für alle Glieder eines bestimmten Hauptträgers gleich groß ist und nur abhängt

- a) von der Stützweite  $l$  des Hauptträgers,
- b) von der Art der Schienen- oder Schwellenlagerung und dem Vorhandensein von Schienenlücken.

Nach Taf. 3 der „BE“ ist

$$\varphi = a + \frac{b}{1 + c},$$

wobei für jede Stützweite gemäß Punkt b) vier verschiedene Fälle unterschieden werden müssen.

Diese Formel ist von der Reichsbahn nach einem Vorschlag von Melan entwickelt worden, kann aber wegen ihrer mehr oder weniger erfahrungsmäßigen Ableitung nicht als einwandfrei oder wissenschaftlich begründet angesehen werden.

Immerhin ist es aber zur Vervollkommnung unserer Vorschriften und Rechnungsverfahren bedeutungsvoll, die dyna-

mischen Wirkungen der Verkehrslasten möglichst wirklichkeitsgetreu zu erforschen. Die mathematische Behandlung der Schwingungsvorgänge bei Brücken, die Erforschung ihrer einzelnen Ursachen und die Ermittlung der zwischen Rad und Schiene tatsächlich auftretenden Kräfte stößt aber noch auf große Schwierigkeiten. Dynamische Berechnungen können z. Z. nur unter vielen vereinfachenden Annahmen aufgestellt werden. Deshalb wird man sich mit Zwischenlösungen auf der Grundlage von Großzahlversuchen an bestehenden Bauwerken und mit wirklichen Verkehrslasten begnügen müssen. Solche Versuche bieten die Möglichkeit, viele Unterlagen und Erkenntnisse über das dynamische Verhalten der Bauwerke zu sammeln und auszuwerten.

II. 1. Durch Versuche mit dem „Schwinger“ ist festgestellt worden, daß Brücken durch periodische Kräfte stark angefacht und bis zur Resonanz aufgeschaukelt werden können. Eine solche periodische Kraft kann auch in dem „Triebtrad-effekt“ erblickt werden, der, wie bereits gesagt, durch die freien Fliehkräfte der Massenausgleichsgewichte in den Triebrädern der Lokomotiven mit Kuppelstangenantrieb entsteht.

der Versuchslasten ergeben, durch Fahrten mit verschiedenen Geschwindigkeiten zu ermitteln.

2. Für die Auswahl der Versuchslasten aus den vorhandenen Fahrzeugen sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

Die zu benutzenden Lokomotiven müssen aus Betriebs-gattungen entnommen werden, die voraussichtlich noch lange Zeit regelmäßig verwendet werden. Dabei ist aber zu beachten, daß die von den Verkehrslasten ausgehenden dynamischen Wirkungen nicht selbständig, sondern immer in Verbindung mit ihren trägen Massen und Gewichten auftreten. Die Masse der Fahrzeuge vergrößert aber die ganze schwingende Masse, d. h. verstimmt das Bauwerk. Es wird demnach die Eigenschwingung des belasteten Bauwerks eine andere und zwar niedriger sein als die des unbelasteten; ihre Größe wird immer von der Stellung der Last abhängen.

Für einen masselosen Stab auf zwei Stützen, der durch eine ortsveränderliche punktförmige Masse belastet ist, ergeben sich die zu jeder Stellung der Masse gehörigen Einzelschwingungen des Stabs nach Abb. 36.

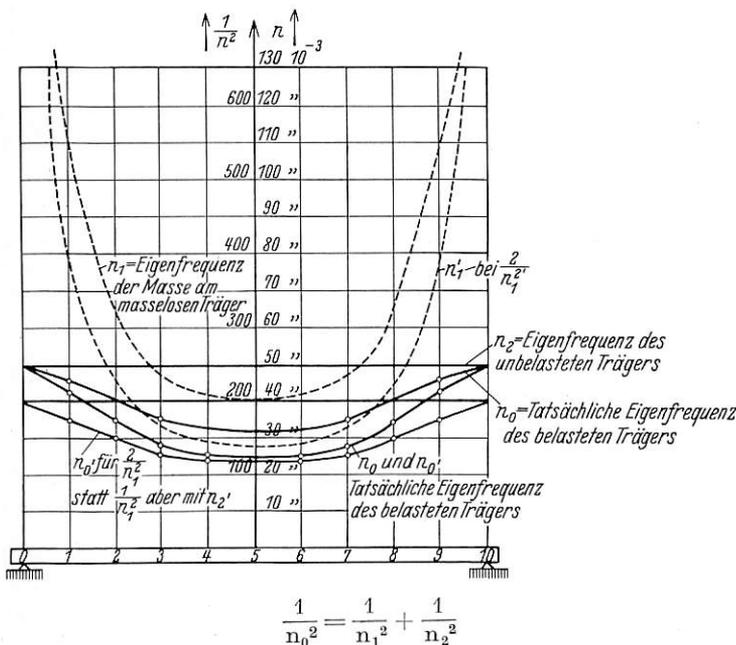
Auf Grund dieser Überlegungen sind der Reihe nach Versuche mit folgenden Lasten vorzunehmen:

- a) Eine gängige Lokomotive mit großem „Triebtrad-effekt“, kleinem Triebraddurchmesser und nicht zu großer Höchstgeschwindigkeit. Als sogenannte „Regellokomotive“ wird daher die preußische T 14<sup>1</sup> vorgeschlagen.
- b) Eine möglichst schwere Lokomotive neuerer Bauart mit Tender.
- c) Die Regellokomotive zu a) mit anhängenden schweren Wagen in betriebsmäßiger Zusammenstellung.
- d) Die schwere Lokomotive zu b) mit anhängenden schweren Wagen in betriebsmäßiger Zusammenstellung.
- e) Sollte sich im Verlauf der Versuche ergeben, daß auch noch andere betrieblich zulässige Zusammenstellungen von Versuchslasten, z. B. zwei miteinander gekuppelte Lokomotiven gleicher oder verschiedener Bauart und dergl., in Frage kommen, so sind die Untersuchungen auch hierauf auszudehnen.

III. Wie unter II., 2 bereits ausgeführt wurde, ist die Eigenschwingung des belasteten Bauwerks stets von der schwingenden Gesamtmasse der Brücke und Last sowie von der Stellung der Lasten auf der Brücke und von der Bauart der Verkehrslasten (Gewicht) abhängig. Demnach muß für jedes einzelne Brückenglied und nicht nur für das Bauwerk als Ganzes die maßgebende Eigenschwingung der Gesamtmasse von Brücke und Last ermittelt werden. Die Stellung und Folge der Lasten bei Bestimmung dieser Eigenschwingungen — mit dem Schwinger — muß die gleiche sein, wie die, die bei den Fahrversuchen die größten Ausschläge hervorgerufen hat.

Daraus folgt aber die wichtige Bedingung, daß

- 1. für jedes Einzelglied besondere Versuchsreihen mit den verschiedenen Versuchslasten durchgeführt werden müssen.
- 2. Als weitere Bedingung muß gelten, daß die dynamischen Wirkungen stets auf die zugehörigen statischen Wirkungen der gleichen Lasten zu beziehen sind. Es muß also für die Stellung der fahrenden Versuchslast, bei der die größte dynamische Wirkung erreicht wird, auch die zugehörige statische Wirkung der gleichen, aber ruhenden Lastengruppe ermittelt werden.
- 3. Aus Vergleichsgründen kann es notwendig sein, auch noch die Folge und Stellung ruhender Lasten zu untersuchen, bei der die größte statische Wirkung eintritt. Für die gleiche Stellung der gleichen fahrenden Lastengruppe ist dann die zugehörige dynamische Wirkung festzustellen.
- 4. Zu messen sind in Form von Dehnungen und damit Spannungen.



$$\frac{1}{n_0^2} = \frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2}$$

Abb. 36. Brückeneigenschwingung, abhängig von der Laststellung.

Diese Gewichte sollen die hin- und hergehenden Massen der Triebwerksteile ausgleichen. Die Größe des Ausgleichs ist in Deutschland durch die Vorschrift beschränkt, daß diese freien Fliehkräfte bei Höchstgeschwindigkeit der Lokomotiven höchstens 15% des ruhenden Achsdruckes betragen dürfen. Wenn die Frequenz des „Triebtrad-effektes“ in die Nähe der Brückeneigenschwingung kommt oder gar mit dieser übereinstimmt, so wird unter der Voraussetzung, daß der „Triebtrad-effekt“ genügend lang einwirken kann, die Brücke aufgeschaukelt (kritische Geschwindigkeit) und die Schwingungsausschläge können unter diesen Umständen sehr stark anwachsen. Die Versuche sind daher an Brücken von 40 bis 100 m Stützweite und zwar, um die Übersichtlichkeit zu wahren, zunächst nur an eingeleigten, regelmäßig gebauten, neueren Brücken vorzunehmen.

Allerdings darf nicht vergessen werden, daß die Versuche nicht mit einem Schwinger, der rein periodische Kräfte liefert, sondern mit wirklichen Verkehrslasten durchgeführt werden sollen, die neben periodischen Kräften auch noch andere dynamischen Wirkungen hervorrufen. Zweck der Messungen muß es daher sein, die größten Ausschläge, die sich aus dem Zusammenwirken aller dynamischen Einflüsse

5. Die Versuche müssen nach folgendem Plan vor sich gehen. Für eine bestimmte Meßstelle „n“ sind mit jeder einzelnen der vorgenannten Lastengruppen mehrere Versuchsreihen notwendig (Abb. 37).

a) Durch Versuchsfahrten ist entsprechend der veränderlichen Eigenschwingung (vergl. II, 3) der größte dynamische Ausschlag festzustellen, also

$$\max a'_{\text{Fahrt}} = \max a'_{\text{stat}} + \text{dyn.}$$

Durch Zeitmarken ist die in diesem Augenblick auf der Brücke befindliche Lastengruppe und ihre Stellung zu ermitteln. Für dieselbe Stellung der gleichen Gruppe in Ruhe ist hiernach der zugehörige statische Ausschlag

$$a'_{\text{Ruhe}} = a'_{\text{stat}}$$

zu messen. Der Einfluß der dynamischen Wirkungen der fahrenden Last wird auf die gleiche, aber ruhende bezogen durch das Verhältnis

$$\varphi'_e = \frac{\max a'_{\text{Fahrt}}}{a'_{\text{Ruhe}}} = \frac{\max a'_{\text{stat}} + \text{dyn.}}{a'_{\text{stat}}}$$

b) Die entsprechenden Versuchsreihen sind nunmehr für die Stellung und Folge der Lasten durchzuführen, bei der sich der größte statische Ausschlag

$$\max a''_{\text{Ruhe}} = \max a''_{\text{stat}}$$

ergibt. Der zugehörige dynamische Ausschlag ist

$$a''_{\text{Fahrt}} = a''_{\text{stat}} + \text{dyn.}$$

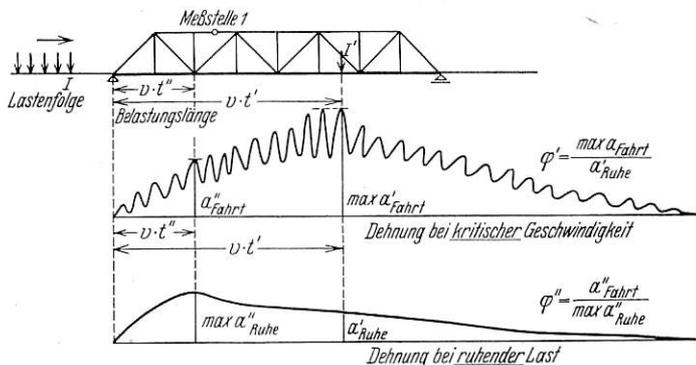


Abb. 37. Beziehungen zwischen den Dehnungen an der Meßstelle 1 unter fahrenden und ruhenden Verkehrslasten.

Die dynamischen Wirkungen sind jetzt durch das Verhältnis

$$\varphi''_e = \frac{a''_{\text{Fahrt}}}{\max a''_{\text{Ruhe}}} = \frac{a''_{\text{stat}} + \text{dyn.}}{\max a''_{\text{stat}}}$$

gegeben.

Für die Meßstelle „n“ bedeuten diese sogenannten „dynamischen Beiwerte“  $\varphi'_e$  und  $\varphi''_e$  für ganz bestimmte Lastengruppen und Laststellungen die Zahl, mit der die zugehörigen statischen Lasten vervielfacht werden müssen, um ihre dynamischen Wirkungen mitzuerfassen. Die maßgebende Laststellung und Lastenfolge ist für beide Fälle festzulegen.

c) Um nun für diese Meßstelle „n“ und die zugehörigen Lasten auch alle übrigen dynamischen Kennwerte, insbesondere Eigenschwingung der unbelasteten und belasteten Brücke, Dämpfung, Federkonstante, schwingende Masse usw. bestimmen zu können, müssen noch weitere Versuche mit dem Schwinger abgeschlossen werden. Sein Eigengewicht ist im Vergleich zu dem der Brücke und Verkehrslast so gering (rund 4 t), daß es in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann. Die dynamischen Kennwerte einer Brücke werden aus Frequenz-Leistungs- und aus Frequenz-Ausschlaglinien ermittelt (Abb. 38).

6. Solche Versuche sind an der gleichen Brücke für alle wichtigen Glieder und mit den oben genannten Versuchslasten planmäßig durchzuführen. Andere Einflüsse (Temperatur usw.), die das Meßergebnis beeinflussen können, sind in geeigneter Weise auszuschalten.

7. Alle dynamischen Beiwerte nebst ihren zugehörigen statischen Lasten werden zweckmäßig für sämtliche Glieder des betreffenden Bauwerks in Tafeln übersichtlich zusammengestellt. Die Ergebnisse müssen ferner an mehreren möglichst gleichen Brücken von gleicher Bauart, Stützweite, gleichem Gewicht usw. wiederholt und nachgeprüft werden. Die Mittelwerte hieraus könnten dann der Berechnung neuer Brücken gleicher oder vielleicht auch ähnlicher Art zugrunde gelegt werden. Welche dieser dynamischen Beiwerte die größten sind, läßt sich im voraus nicht übersehen. Auf jeden Fall kann aber schon jetzt gesagt werden, daß sie für jedes Glied eines Hauptträgers verschieden ausfallen werden.

8. Um aber die bisherige Anschauung, nach der die Stoßzahl  $\varphi$  allein von der Stützweite abhängt und für alle Glieder

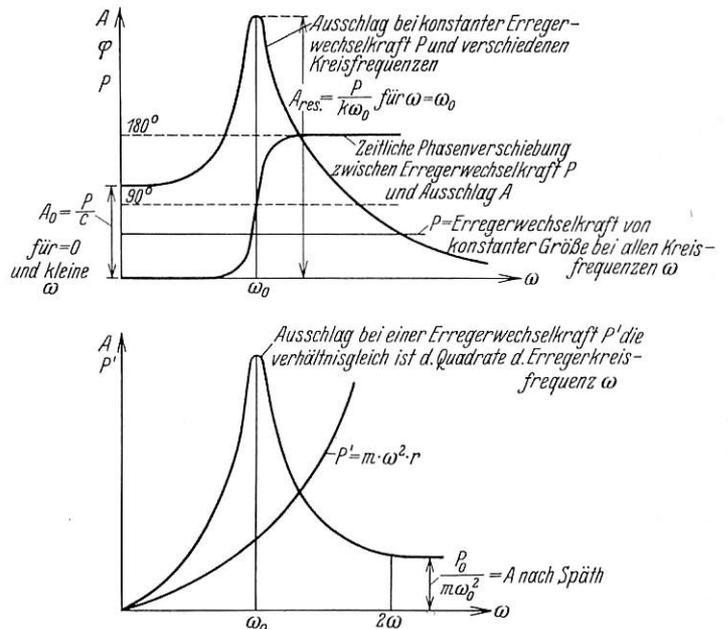


Abb. 38. Resonanzkurven.  
P = Wechselkraft, c = Federkonstante, m = Masse, k = Dämpfungsfaktor.

Abb. 38. Resonanzkurven.

eines Hauptträgers gleich ist, nachzuprüfen, werden noch folgende Versuchsreihen vorgeschlagen:

Getrennt für jede Versuchslast sind die größten dynamischen Durchbiegungen in Brückenmitte  $\max f'_{\text{Fahrt}}$  und die zu der gleichen Lastenfolge und Laststellung gehörige statische Durchbiegung  $f'_{\text{Ruhe}}$  zu bestimmen. Ferner ist gleichfalls die größte statische Durchbiegung  $\max f''_{\text{Ruhe}}$  und die zu dieser Lastenfolge und Laststellung gehörige dynamische Durchbiegung  $f''_{\text{Fahrt}}$  zu messen.

Die Verhältnisse

$$\varphi_f' = \frac{\max f'_{\text{Fahrt}}}{f'_{\text{Ruhe}}}$$

und

$$\varphi_f'' = \frac{f''_{\text{Fahrt}}}{\max f''_{\text{Ruhe}}}$$

sind mit den aus Dehnungsmessungen an den einzelnen Baugliedern gefundenen dynamischen Beiwerten  $\varphi'_e$  und  $\varphi''_e$  zu vergleichen. Auf diese Weise ließe sich erst beurteilen, ob man überhaupt für alle Glieder eines Hauptträgers dynamische Beiwerte in Abhängigkeit von der Stützweite des Gesamttragwerks verwenden kann.

9. Gleiche Versuchsreihen sind an den Hauptträgerteilen von Brücken anderer Bauarten durchzuführen. In den Über-

sichten der dynamischen Beiwerte sind die Brücken zu unterscheiden nach:

- a) Art, Form, Durchbildung, Baustoff, Gewicht und Schwingungsform der Hauptträger.
- b) Art, Form, Durchbildung und Lage der Fahrbahn.
- c) Art, Durchbildung und Lagerung des Oberbaues.
- d) Art, Form, Durchbildung, Zahl und Lage der Verbände.
- e) Ist ein gewisser Abschluß dieser Versuche erreicht, so können sie später auf zweigleisige Brücken ausgedehnt werden.
- f) Hieran würden sich ähnlich aufgebaute Versuche an Fahrbahnteilen anschließen.
- g) Schließlich sind auch noch Brücken mit Stützweiten unter 40 m zu untersuchen, namentlich die Vollwandträger in Niet- oder Schweißbauweise.

10. Damit werden voraussichtlich brauchbare Unterlagen für das Entwerfen neuer Brücken angegeben werden können. Es sei aber nochmals darauf hingewiesen, daß für alle diese Versuche zunächst nur regelmäßige, möglichst einfach liegende Fälle — innerlich und äußerlich statisch bestimmte Brücken — zu bevorzugen sind.

### Prüfung von Oberbauberechnungsverfahren an Hand von Spannungsmessungen.

Von Dipl.-Ing. J. Nemesdy-Nemcsék, Budapest.

Die zahlreichen Spannungsmessungen und Studien sowohl des Vereins Mitteleuropäischer Eisenbahnverwaltungen, wie der amerikanischen Railway Eng.-Ass. bezeugen gleichermaßen, welche hohe Bedeutung der zuverlässigen Kenntnis die Spannungen, die in den einzelnen Oberbauteilen entstehen, zukommt. Es handelt sich in erster Linie um die Kenntnis der in der Schiene verschiedener Oberbauanordnungen entstehenden mittleren Spannungen und um ein Berechnungsverfahren, das ohne allzu große Mühe für die Ausübung zuverlässige Ergebnisse liefert.

Die statische Beanspruchung der Schiene bildet nicht nur den wichtigsten und meist auch den am zuverlässigsten berechenbaren Teil der Gesamtspannung, sondern auch die Grundlage für die weitere Schätzung der Zusatzspannungen, da diese gewöhnlich nur in Anteilen der Grundspannung angegeben werden. Der Fehler der statischen Grundrechnung wird durch die verschiedenen Beiwerte nur noch vergrößert.

In Erkenntnis der großen Schwierigkeiten einer theoretisch einwandfreien Lösung stellte sich ein Arbeitsausschuß (Unterschuß für einheitliche Oberbauberechnung) des Vereins Mitteleuropäischer Eisenbahnverwaltungen nur die Aufgabe, ein Rechenverfahren ausfindig zu machen, das an ausgeführten Spannungsmessungen erprobt, am besten entspricht.

Denselben Prüfstein wählt nun auch Verfasser zur Untersuchung über die Tauglichkeit von drei neueren Oberbauberechnungsverfahren.

Es soll festgestellt werden, wie groß die prozentualen durchschnittlichen Abweichungen der mit den drei Verfahren berechneten Spannungen von den durchschnittlichen, gemessenen in Betracht kommenden Spannungen sind.

Verglichen wurden nachfolgende drei Verfahren:

1. Die „holländische“ oder sogenannte Achsstandformel

$$M = \frac{12mn - 7(m + n) + 4}{16[3mn - (m + n)]} Gk \dots 1)$$

für Zwischenlasten,

$$M = \frac{12n - 7}{16(3n - 1)} Gk \dots 2)$$

für Endlasten.

$$\sigma = \frac{M}{W'} \dots 3)$$

IV. Für die Festigkeitsberechnungen neuer Brücken könnte folgender Weg vorgeschlagen werden:

a) Aus den aufzustellenden Übersichten sind die für einen oder mehrere ähnliche Brücken als maßgebend erkannten wirklichen Verkehrslasten und ihre dynamischen Beiwerte zu entnehmen und damit die neue Brücke durchzurechnen.

b) Außerdem sind die Brücken statisch für die vorgeschriebenen Lastenzüge der BE zu berechnen, und zwar entweder ohne irgendwelche Zuschläge oder mit einem gewissen Anteil der dynamischen Beiwerte, sofern die Versuche dies notwendig erscheinen lassen sollten.

c) Durch Versuche am fertigen neuen Bauwerk ist die Richtigkeit der Maßnahmen nachzuprüfen und nötigenfalls das Verfahren zu berichtigen.

V. Unabhängig davon müssen aber unbedingt weitere Versuche auf wissenschaftlicher Grundlage durchgeführt werden, um die Einzelwirkungen und ihren gegenseitigen Einfluß kennenzulernen und mathematisch zu erfassen. Ferner wird es sich als unumgänglich notwendig erweisen, die von den Fahrzeugen, namentlich von den Lokomotiven, auf die Schienen übertragenen Kräfte in ihrem genauen zeitlichen Verlauf größtmäßig zu ermitteln.

In den Formeln bedeuten:

- M = das Biegemoment in kg/cm,
- $\sigma$  = die größte Spannung in kg/cm<sup>2</sup>,
- m und n das Verhältnis der anschließenden Achsstände vom Schwellenabstand,
- G = die halbe Achslast in kg,
- k = den Schwellenabstand in cm,
- W' = das Widerstandsmoment der Schiene in cm<sup>3</sup>.

Bei der Ableitung der Formel nach Clapeyron sind zwei auf der Strecke keineswegs zutreffende Annahmen gemacht:

- a) die Schiene ist starr unterstützt,
- b) die nicht dicht an eine Radlast stoßenden Schwellen übernehmen keinen Schienendruck.

2. Das amerikanische Verfahren in der Variante Dr. Timoshenko-Dr. Saller.

Es ist das eine Berechnung der quer gestützten Schiene als Längsträger und nicht, wie behauptet wird, eine Berechnung einer stellvertretenden Langschwelle. Eigentlich ist dieses Verfahren eine Berechnung der Schiene als Langschwelle auf einer stellvertretenden (gedachten, fiktiven) durchgehenden Unterlage.

In Amerika rechnete man schon vor zwölf Jahren allgemein

$$x_1 = 42,2 \sqrt[4]{\frac{J'}{u}} \dots 4)$$

$$M = 0,318 Gx_1 \dots 5)$$

$$\sigma = \frac{M}{W'} \dots 6)$$

wo J' das Trägheitsmoment der Schiene (cm<sup>4</sup>), u einen empirischen elastischen Beiwert des Oberbaues bedeutet.

$$(E' \text{ ist hier zu } 2\,150\,000 \text{ angenommen; } 42,2 = \frac{\pi}{4} \sqrt[4]{4E'};$$

$$0,318 = \frac{1}{\pi}.)$$

Dr. Timoshenko benützt ebenfalls Gl. 5) und 6), aber in Gl. 4) setzt er

$$\frac{1}{u} = \frac{k}{D'} \dots 7),$$

wodurch

$$x_1 = 42,2 \sqrt[4]{\frac{J'k}{D'}} \dots \dots \dots 8)$$

Dr. Timoshenko setzt der Einfachheit halber in guter Annäherung

$$D' = \frac{\alpha C b l}{2} = 0,45 C b l \dots \dots \dots 9)$$

wo C die Bettungsziffer (kg/cm<sup>3</sup>),

b die Schwellenbreite (cm),

l die ganze Schwellenlänge (cm),

$\alpha$  einen der Durchbiegung der Querschwellen Rechnung tragenden Beiwert bedeutet, welcher beispielsweise nach Petrof 0,9 ist.

Dr. Saller benützt eigentlich die Gl. 5), 6), 8); statt Petrof-Timoshenko [Gl. 9)] arbeitet er aber nach Diehl mit

$$D' = 2 C b \ddot{u} \dots \dots \dots 10)$$

wo  $\ddot{u}$  den bekannten „Überstand“ der Schwelle bedeutet.

Im nachfolgenden ist diese letztere Variante benützt.

3. Das Verfahren des stellvertretenden Langsschwellenoberbaues\*).

$$J_0 = J' + \beta_1 J'' \dots \dots \dots 11)$$

$$\frac{1}{D_0} = \frac{1}{D'} + \frac{1}{D''} = \frac{2}{\alpha C b l} + \frac{1}{100 f} \dots \dots \dots 12)$$

$$x_0 = 42,2 \sqrt[4]{\frac{k J_0}{D_0}} \dots \dots \dots 13)$$

$$M = 0,318 G x_0 \dots \dots \dots 14)$$

$$W_0 = W' + \beta_2 W'' \dots \dots \dots 15)$$

$$\sigma = \frac{M}{W_0} \dots \dots \dots 16)$$

Hier beziehen sich  $J''$ ,  $W''$ ,  $E''$  auf die Querschwellen, wie  $J'$ ,  $W'$ ,  $E'$  auf die Schiene. f bedeutet die Grundfläche der Unterlegplatte. In dem Ausdrucke der Faktoren:

$$\beta_1 = \alpha \frac{E'' l}{2 E' k} \dots \dots \dots 11a)$$

$$\beta_2 = \alpha \frac{E'' l h}{2 E' k 2 e} \dots \dots \dots 15a)$$

bedeutet h die Schwellenhöhe (cm),

2 e ~ die Schienenhöhe (meist = h),

$\alpha$  den oben bereits angegebenen Beiwert des Einflusses der Durchbiegung der Querschwellen in der Längsrichtung.

Nimmt man nun an:  $E' = 2150000$ ;  $E'' = 110000$ ;  $\alpha = 0,96$ ;  $h \geq 2 e$ , so wird:

$$\beta_1 = 0,0246 \frac{1}{k} \dots \dots \dots 11b) \text{ und } \beta_2 = \beta_1$$

Die Grundgleichungen 13), 14), 16) stimmen vollkommen mit den Gl. 8), 5), 6) überein, wenn man in den Gl. 11), 12), 15) die zweiten Glieder wegläßt. Daß diese Vernachlässigung aber nicht ratsam ist, folgt mit Bezug auf die Gl. 11), 15) aus den in der Fußnote angeführten Aufsätzen, sowie aus den nachfolgenden Ergebnissen dieser Untersuchung. Mit Bezug auf die altbekannte, theoretisch und praktisch bewiesene Gl. 12) dagegen wird es kaum notwendig sein, ihre Richtigkeit und Notwendigkeit auf diesen Blättern wieder beweisen zu müssen.

Die Gl. 11), 12), 15) und somit auch Gl. 13) sind für jeden beliebigen Oberbau ein für allemal und auch sonst sehr einfach und rasch zu berechnen, so daß dies letzte Verfahren ebenso einfach und schnell ist, wie die vorerwähnten Verfahren.

\*) Siehe Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1930, H. 5. Nemcsek, Zur Frage der Oberbauberechnung. — Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, H. 9. Dr. Janicsek.

Wenn es sich um einseitig und zweiseitig eingespannte Achsen handelt, so wird bei diesem Verfahren folgende Momentenformel benützt:

$$M = (0,318 G - 0,1173 Q'') x_0 + 0,0255 S \dots \dots 17)$$

wo  $Q''$  die Summe einer Radlast bedeutet, welche sich rechts und links von der Radlast G im Intervall  $2 x_0$  bis  $4,6 x_0$  befinden. S bezeichnet das statische Moment der Lasten  $Q''$  in kg/cm in bezug auf G, d. h. in bezug auf den untersuchten Querschnitt (siehe Verfassers erwähnten Aufsatz S. 85.  $Q'$  kommt in den nachfolgenden Anwendungen nicht vor, wurde somit hier aus der Formel weggelassen.)

Bei Berechnungen nach der Variante Dr. Saller benützte ich Dr. Sallers Momentenformel auf dieselbe Form

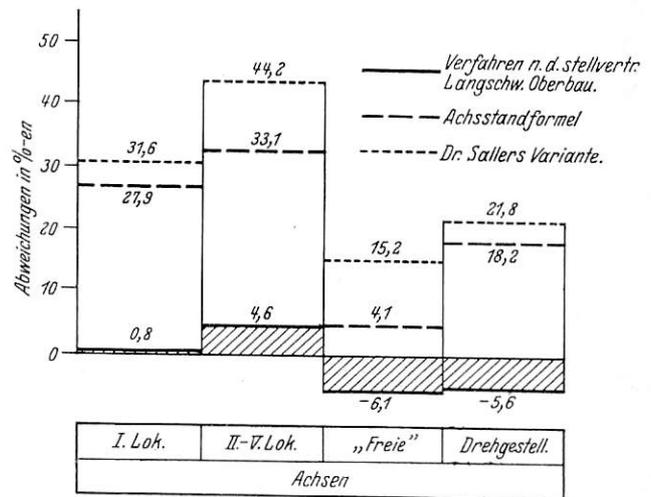
$$\text{gebracht } (L_1 = \frac{4}{\pi} x_1; S = Q_1'' a + Q_2'' b + \dots):$$

$$M = (0,318 G - 0,1136 Q'') x_1 + 0,0238 S \dots \dots 17a)$$

Dr. Sallers Momentenformel erschien drei Jahre nach Gl. 17) des Verfassers und unterscheidet sich von ihr nur unwesentlich in der dritten Dezimale zweier Beiwerte. Dadurch sollen nur Tatsachen festgestellt und das Naheliegende dieser Momentenformel betont sein; die Unabhängigkeit der Neuerleitung Dr. Sallers sei dadurch natürlich keineswegs in Abrede gestellt.

### Die Ergebnisse.

Mit den drei Verfahren wurden die Spannungen unter den Lokomotivachsen, den Achsen der zweiachsigen Wagen



Abweichungen der gerechneten mittleren Spannungen von den gemessenen in Vonhundertern derselben — nach Achsgattungen gruppiert. (Sächsische, oldenburgische und holländische Messungen I. und II. Reihe.)

Abb. 1.

und unter den Achsen der vierachsigen Wagen (zwei Drehgestelle) von Probezügen der sächsischen, holländischen und oldenburgischen Versuchsfahrten berechnet.

Diese berechneten Spannungen wurden dann mit den entsprechenden öffentlich zugänglichen, durchschnittlichen Werten der gemessenen Spannungen verglichen und die Abweichungen in von Hunderten der gemessenen Spannungen ausgedrückt. Diese prozentualen Abweichungen wurden dann entsprechend den drei Gruppen von Achsen („freie“ Achsen, „einseitig“ und „zweiseitig eingespannte“ Achsen) dem Durchschnitte nach für alle drei erwähnten Rechenverfahren und erwähnten Probestrecken berechnet. In der Gruppe der einseitig eingespannten Achsen machten wir die sich von selbst darbietende Unterscheidung: „Erste Lokomotivachse“ und „Drehgestellachsen“.

Das Ergebnis ist in Abb. 1 dargestellt.

Wir ersehen daraus, daß das Verfahren des stellvertretenden Langschwelligleises, welches Verfasser in Hinkunft kürzer das Verfahren der Momententeilung nennen will, einzig, allein und voll der Bedingung der guten Anpassung an die Meßergebnisse entspricht.

Es war die wohlbedachte Lösung:

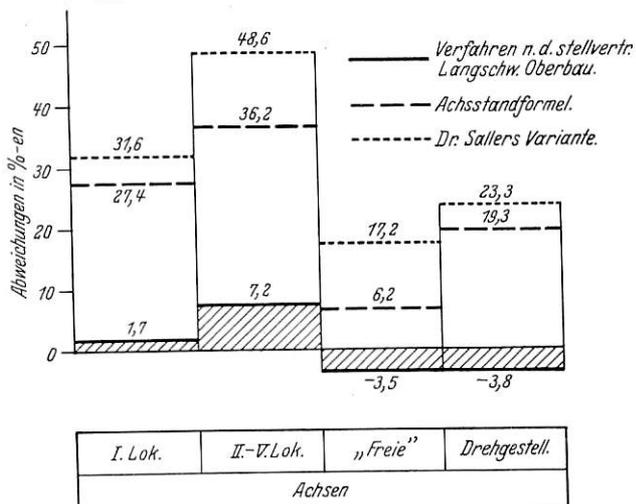
„Bei der Wahl einer Formel sollen die Beobachtungen, deren etwa 21000 vorliegen, entscheidend sein.“

Die Entscheidung kann nun gefällt werden; der Vergleich aller maßgebenden Spannungsmessungen mit den gerechneten Werten bezeugt, daß die durchschnittliche Abweichung bei

- dem Verfahren der Momententeilung . . . . . 2,1%
- der Achsstandformel . . . . . 19,3%
- dem Verfahren Dr. Timoshenko-Dr. Saller . . 27,5%

ist.

Zieht man nur die Versuchsreihen Sachsen, Oldenburg, Holland II in Betracht (schließt man also die Beobachtungen Holland I aus der Durchschnittsbildung nicht ohne jeden Grund diesmal aus), so bekommt man bezüglich der Achsgruppen für das Verfahren der Momententeilung ein



Wie Abb. 1, bloß bei Außerachtlassung der Meßreihe I in Holland.

Abb. 2.

noch günstigeres Bild (s. Abb. 2). Die durchschnittliche Abweichung ist dann bei

- dem Verfahren der Momententeilung . . . . . 0,2%
- der Achsstandformel . . . . . 21%
- dem Verfahren Dr. Timoshenko-Dr. Saller . . 32%

Die Ableitung dieser Ergebnisse ist zu Kontrollzwecken im Anhang dieses Aufsatzes enthalten.

Es wäre hier zu bemerken, daß die Achsstandformel durch den Arbeitsausschuß erst nach eingehendem Vergleich mit den folgenden Verfahren, empfohlen wurde: Dr. Zimmermann, Loewe, van Dijk, Winkler. Maßgebend waren immer die Meßergebnisse.

Es entstehen nun nach dem Schiedsspruch der Tatsachen folgende Fragen:

a) Kann die Achsstandformel oder das Timoshenko-Saller-Verfahren durch Einführung eines Beiwertes verbessert werden? Ein Blick auf Abb. 1 zeigt, daß dies ein hoffnungsloses Unternehmen sei, da es wohl für eine Art von Achsen (z. B. freie Achsen) möglich ist, die berechneten Werte durch einen empirischen, verbessernden Beiwert den Versuchsergebnissen anzupassen, für die übrigen Achsarten bleiben aber dann die in der Abbildung sichtbaren großen Sprünge noch immer bestehen. Verbessern kann man somit durch solchen Beiwert das Gesamtbild, nie wird man aber ein so glattes Anschmiegen an die gesamten Meßergeb-

nisse erreichen, wie es das Verfahren der Momententeilung ermöglicht.

Zudem wäre dies ein ganz willkürliches Vorgehen; Dr. Saller scheint in seinem letzten Aufsatz den Gedanken auch aufgegeben zu haben, da er ursprünglich den Beiwert 1,09 empfahl, später aber den Beiwert 0,88 anwandte, um seine Rechenergebnisse Meßergebnissen anzupassen, während er in seinem jüngsten Aufsatz überhaupt keinen Beiwert mehr benützt.

Das Verfahren der Momententeilung benötigt überhaupt keinen solchen, auch sonst ganz unzuverlässigen „deus ex machina“ und wurde diesmal in derselben Form angewandt, wie es vor vier Jahren vom Verfasser angegeben wurde.

b) Was ist der Grund der großen Abweichungen der zwei Verfahren besonders bei den eingespannten Achsen? Diese Verfahren besitzen bezüglich der Einwirkung der Nachbarlasten zu geringe Variabilität. Wenn man sich auf die Oberbauformen und Probezüge der Vereinsprobestrecken beschränkt (und diese sind bezeichnend für den mittleren und schweren Oberbau des Kontinents), so kann man feststellen, daß die holländische Achsstandformel wenig empfindlich für den Achsstand und die Nachbarlasten ist, da sie höchstens 5 bis 10% Verminderung der Spannung, der beiderseitig eingespannten Achsen zuläßt, während das Verfahren der Momententeilung oft 20 bis 25% Verminderung vorschreibt. In Wirklichkeit kommen Verminderungen der Durchschnittsspannungen um 25 bis 28% unter „beiderseits eingespannten“ Achsen oft vor. Das Verfahren von Dr. Timoshenko-Dr. Saller ist in dieser Beziehung meist besser gewappnet, aber es gibt auch hier Oberbauformen und Belastungen, wo die angegebenen Verminderungen ganz ungenügend sind. (Es kommen sogar formelmäßig Vergrößerungen der spezifischen Spannungen von beiderseits eingespannten Achsen gegenüber freien Achsen vor, was man bei Messungen natürlich niemals beobachtete.)

c) Weshalb zeigt das Verfahren der Momententeilung des Querschwellengleises bedeutend bessere Ergebnisse, als das verwandte Verfahren von Dr. Timoshenko-Dr. Saller? Wir erwähnten bereits, daß man die Gleichungen dieses letzteren Verfahrens durch Vernachlässigung dreier wichtiger Glieder des Verfahrens der Momententeilung erhalten kann. Die Vernachlässigung kann selbstredend nur auf Kosten der Genauigkeit erfolgen.

Berechnet man allgemein die Spannung unter einer Einzellast einmal nach Dr. Saller ( $\sigma_s$ ) und einmal nach Verfasser ( $\sigma_n$ ), so bekommt man nach obigen Formeln leicht:

$$\sigma_n = k \sigma_s = \sigma_s \frac{W'}{W_0} \sqrt[4]{\frac{D' J_0}{D_0 J'}} \quad \dots \quad (18)$$

Setzt man hierin nun für schwere Holzschwellenoberbau gut annähernd

$$\begin{aligned} J_0 &\sim 1,5 J' \\ W_0 &\sim 1,5 W' \\ D_0 &\sim 0,55 D', \end{aligned}$$

so bekommt man:  $k = 0,85$  und  $\sigma_n = 0,85 \sigma_s$ .

Dieses  $k = 0,85$  ist eigentlich der von Dr. Saller einmal statisch willkürlich, aber notgedrungen eingeführte Beiwert und Gl. 18) ist sein Querschnitt. Bei den „eingespannten“ Achsen sind die Abweichungen beider Verfahren noch größer. Es können somit die bösen Folgen der Außerachtlassung der Gleichungen:  $J_0 = J' + \beta_1 J''$  und  $W_0 = W' + \beta_2 W''$  nicht erspart bleiben.

Es mag hier auch die Behauptung angebracht erscheinen, daß das Verfahren der Momententeilung zumindest ebensolche technisch-wissenschaftliche Strenge besitzt, wie das Verfahren nach Timoshenko.

Um diesmal nur ganz kurz auf die statische Richtigkeit der „handwerkermäßigen“ Annahmen von einem Gesichtspunkte aus einzugehen, sei bemerkt, daß die Querschwellen ein in zweifacher Richtung tragender Träger ist. Das Verfahren der Momententeilung stellt die in beiden Richtungen entfalteten Formveränderungsarbeiten der Schwellen in Rechnung, wobei nicht zu vergessen ist, daß die Schiene nicht auf einer Schneide, sondern auf einer im Vergleich zur Schwellenteilung breiten Fläche aufliegt. Die stille Voraussetzung der Schneidenlagerung der Schiene war der Hauptfehler der bisherigen Verfahren. Die Breitenlagerung der Schiene fordert die Einbeziehung der Quersteifigkeit der Schwelle. Verfeinerung des Verfahrens der Momententeilung ist gut möglich (z. B. durch Reduzieren der Quersteifigkeit der Schwelle nach Maßgabe der Torsion u. a. m.), doch ist es schon in vorliegender Form trotz der Einfachheit, wie es unzählige Messungen zeigten, äußerst leistungsfähig.

d) Wie erklären sich die oft ziemlich verschiedenen groß ausfallenden mittleren gemessenen Spannungen, welche am selben Oberbau bei verschiedenen Zeiten gemessen wurden (z. B. Holländische Messungen I. und II. Reihe)? Die Achsstandformel läßt keine Erklärung zu. Die Formeln Timoshenko-Saller geben die Möglichkeit zu, daß sich die Bettungsziffer infolge Regen usw. geändert habe. Eine Änderung der Bettungsziffer um 50% ändert aber nach Timoshenko die Spannung nur um 10% (nach Formel 12 und 13 des Verfassers noch weniger), während in der Ausübung Änderungen der mittleren gemessenen Spannungen oft bis zu 24% vorgekommen sind. Das Verfahren der Momententeilung vermag die volle Erklärung zu geben: Nicht nur die Bettungsziffer hat sich geändert, sondern durch die Witterungseinflüsse auch die Zusammendrückbarkeit der Schwelle (Beiwert von f), und was von weiterer höherer Bedeutung ist, die Elastizitätszahl der Schwelle ( $E''$ ). Diese ziemlich veränderliche Größe kommt bei diesem Verfahren nicht nur unter der Potenz  $\frac{1}{4}$  vor, sondern auch linear im Nenner.

Die Spannung in der Schiene steht somit in lebhafter Wechselbeziehung nicht nur mit den Querschnittsabmessungen, sondern auch mit der Elastizität, dem Nässegrad und dem Alter der Schwelle. Was sich hiervon bisher in der Zimmermannschen Formel (durch L) und in dem Verfahren von Timoshenko-Saller (durch  $\alpha$ ) zeigt, ist unseres Erachtens bloß ein schwacher Abglanz der Wirklichkeit.

Verfasser hat das Verfahren der Momententeilung anläßlich eigener Messungen mit dem Okhouizen-Gerät auch bei schwächeren Oberbauformen als richtig befunden. Er und Dr. Janiesek haben auch bewiesen, daß dieses Verfahren durch amerikanische Spannungs- und Schienendruckmessungen, weiter durch die Messungen Wasjutynskis gestützt werden kann. Es sprechen dafür auch gerade die Messungen Thomas und Sallers und in ganz besonderem Maße — wie oben gezeigt wurde — die umfangreichen Spannungsmessungen des Vereins. Das Verfahren kann somit ruhigen Gewissens aufs beste empfohlen werden.

#### Anhang.

#### Herleitung der Abb. 1.

Betreffs der Berechnung der Abweichungen zwischen den berechneten und den mittleren gemessenen Spannungen ist folgendes zu bemerken:

1. Rechenschiebergenauigkeit. Die Berechnung von  $x_0$  ist für den Rechenschieber wie geschaffen.
2. Benützt wurden die auf der sächsischen Probestrecke (Dresden—Werdau), auf der oldenburgischen und der holländischen (Martensdijk) Probestrecke durchgeführten Messungen. Achsstände und Achslasten der Probezüge sind aus Zusammenstellung I ersichtlich. Neben der Lokomotive, den

zweiachsigen und den vierachsigen Wagen ist aber auf die Verfolgung der Spannungen unter dem Tender wegen Arbeitersparnis verzichtet worden. Hier würden übrigens die erst-erwähnten zwei Verfahren ihre schlechtesten Ergebnisse liefern.

3. Ausgelassen wurden bloß die sächsischen Messungen bei 60 cm Schwellenabstand, da die Richtigkeit derselben selbst von der beobachtenden Stelle angezweifelt worden war.

Ebenso wurden selbstredend Messungen in Bogen und auf flachen Unterlegplatten außer acht gelassen.

4. Es wurden bloß die Messungen bei 5 km und 45 km Geschwindigkeit herangezogen, da bei hohen Geschwindigkeiten (es wurden außer bei den angegebenen, auch bei Geschwindigkeiten von 70 bis 80 km/h Messungen veranstaltet) die Zufälligkeiten der dynamischen Einflüsse sich zu sehr bemerkbar machen müssen. Das prozentuale Verhältnis würde sich aber auch bei Einbeziehung dieser Meßreihen nicht wesentlich ändern.

Bei dem Vergleich mit Messungen bei 45 km/h Geschwindigkeit wurde bei den Berechnungen der statische Grundwert der Spannungen mit dem Geschwindigkeitsbeiwert des Vereins multipliziert.

6. Die mittleren Meßergebnisse der Spannungsmessungen, und zwar die auf 1 t Achslast entfallenden sogenannten mittleren spezifischen Spannungen sind nach Probestrecken, Geschwindigkeiten und Schwellenentfernungen in Zusammenstellung II angeführt. (Diese Meßergebnisse sind schon die Mittel mehrerer Messungen unter verschiedenen Fahrten bei der gleichen Geschwindigkeit. Es wurde an jeder Meßstelle mit vier Okhouizen-Geräten gemessen.)

7. Angaben über den Oberbau der Probestrecken.

Sachsen:  $W' = 230 \text{ cm}^3$ ;  $J' = 1700 \text{ cm}^4$

Schwellen:  $16 \cdot 26 \cdot 247$  (bei  $k = 60 \text{ cm}$ );

$J'' = 8900 \text{ cm}^4$ ;  $W'' = 1112,5 \text{ cm}^3$ .

$16 \cdot 24,5 \cdot 251$  (bei  $k = 70 \text{ cm}$ );

$J'' = 8390 \text{ cm}^4$ ;  $W'' = 1048,8 \text{ cm}^3$ .

$16 \cdot 21 \cdot 252$  (bei  $k = 80 \text{ cm}$ );

$J'' = 7180 \text{ cm}^4$ ;  $W'' = 897,5 \text{ cm}^3$ .

Holland:  $W' = 196 \text{ cm}^3$ ;  $J' = 1360 \text{ cm}^4$

Schwellen:  $16 \cdot 27 \cdot 270$ ;  $J'' = 9250 \text{ cm}^4$ ;

$W'' = 1156,2 \text{ cm}^3$ .

Oldenburg:  $W' = 218 \text{ cm}^3$ ;  $J' = 1440 \text{ cm}^4$  (D h abgenützt)

Schwellen:  $16 \cdot 27 \cdot 270$ ;  $J'' = 9250 \text{ cm}^4$ ;

$W'' = 1156,2 \text{ cm}^3$ .

8. Als Bettungsziffer wurde  $C = \frac{1}{2}(8 + 15) = 11,5$  benützt,

da ungefähr diese Zahl festgestellt wurde und da man bei Vergleichsrechnungen zuständigerseits für diese Strecken nach

Zimmermann und mit dem arithmetischen Mittel  $\frac{\sigma_8 + \sigma_{15}}{2}$  arbeitete.

9. Die erreichten Spannungen nach der Achsstandformel wurden aus zuständigen Rechnungen übernommen; für die oldenburgische Strecke wurden sie eigens berechnet, da sie öffentlich nicht zugänglich waren. Bei den ersteren war zwar ein anderer Geschwindigkeitsbeiwert angewandt worden, dieser ist aber bei 45 km/h Geschwindigkeit von dem üblichen nur wenig verschieden.

10. Berechnung nach dem Verfahren der Momententeilung. Benützt wurden die Formeln und Ausdrücke Nr. 11 bis 16, 11a; 11b;  $c = 11,5$ . Für  $\frac{1}{D''}$  haben wir mangels näherer Angaben durchwegs den mittleren Wert 0,000223 gesetzt. Zum Zwecke des leichteren Nachrechnens haben wir die Werte  $J_0, W_0, D_0, X_0$  verschiedener Probestrecken tabellarisch diesem Anhang beigefügt (Zusammenstellung I und Ia). Die

Spannungen unter den Wagen mit zwei „freien“ Achsen wurden mit Hilfe der Formel 14 berechnet.

11. Berechnung nach der Variante Dr. Saller. Benützt wurden die Gl. 10), 8), 5), 17a), 6). Werte der  $D'$ ;  $x_1$  sind in Zusammenstellung I und Ia vorgeführt\*).

12. Der nächste Schritt war die Bildung der Durchschnittswerte der beobachteten und auch der errechneten Spannungen bezüglich der gleichartigen Achsen. Die Zahlen der ersten Lokomotivachse wurden besonders behandelt und für sich allein belassen; die beobachteten und unter sich auch die berechneten Spannungen unter der II., III., IV. und V. Lokomotivachse wurden als zweiseitig eingespannte Achsen gemittelt und ebenso die vier Spannungen unter den Drehgestellrädern als einseitig eingespannte Lasten. Ebenso wurde immer auch der Durchschnitt unter den „freien“ Radgewichten der beiden zweiachsigen Wagen ermittelt.

13. Es wurden dann die Differenzen (Abweichungen) der nach den drei Verfahren errechneten durchschnittlichen Werte von den durchschnittlichen gemessenen Werten gebildet und in Vohunderterten der letzteren ausgedrückt. Die Ergebnisse der so gewonnenen Zusammenstellung II sind in Abb. 1 aufgetragen.

14. Will man schlechthin den Durchschnitt der prozentualen Abweichungen aller Messungen von den entsprechenden Rechenergebnissen eines Verfahrens in einer Zahl angeben, wie wir es oben unter dem Titel „Ergebnisse“ auch taten, so muß die Durchschnittsbildung nach jeder Reihe der Zusammenstellung II erfolgen. Es müssen hierbei die Abweichungszahlen der „freien“, der „zweiseitig eingespannten“ und der Drehgestellachsen mit der Gewichtszahl 4 in die Rechnung eingesetzt werden, während die Lokomotivachse I für sich steht.

Zusammenstellung I.

	k	J'	J''	J <sub>0</sub>	W'	W''	W <sub>0</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>s'</sub>	D'
	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>			
Sachsen	60	1700	8900	2688	230	1112	352	19840	27750	35600
	70	1700	8390	2496	230	1049	335	19350	28540	34100
	80	1700	7180	2296	230	898	310	17790	24630	29400
Holland	60	1360	9250	2387	196	1156	338	21200	37260	40168
	70	1360	9250	2237	196	1156	319	21200	37260	40168
	80	1360	9250	2127	196	1156	304	21200	37260	40168
Oldenburg	60	1440	9250	2467	218	1156	360	21200	37260	40168
	70	1440	9250	2317	218	1156	341	21200	37260	40168
	80	1440	9250	2207	218	1156	326	21200	37260	40168

Zusammenstellung Ia.

	k	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	σ <sub>0</sub> <sup>500</sup>	σ <sub>1</sub> <sup>500</sup>	σ <sub>0</sub> <sup>500</sup>	σ <sub>1</sub> <sup>500</sup>	σ <sub>2</sub> <sup>500</sup>
	cm	cm	cm	v=5	v=5	v=45	v=45	(Zimmermann)
Sachsen	60	71,2	58,4	31,8	40,3	33,95	43,1	53,9
	70	73,2	60,3	34,8	41,8	37,2	44,6	52,2
	80	75,6	62,1	38,6	42,9	41,2	45,8	54,5
Holland	60	68,2	51,3	32,1	41,6	34,2	44,5	51,3
	70	69,7	53,3	34,7	43,3	37,0	46,2	53,5
	80	71,5	55,1	37,5	44,8	40,0	47,8	55,3
Oldenburg	60	68,7	52	30,4	37,9	32,45	40,5	—
	70	70,3	54	32,8	39,4	35,05	42,1	—
	80	71,8	56	35,1	40,8	37,5	43,6	—

\*) Die berechneten, sowie die gemessenen Spannungen selbst konnten leider wegen Raummangel nicht veröffentlicht werden.

Zusammenstellung II.

Abweichungen der mittleren berechneten Spannungen gleichartiger Achsen von den beobachteten und gemittelten Spannungen in Vohunderterten der letzteren.

	Geschwindigkeit	Schwellenteilung	I Lok.-Achse	II—V Lok.-Achsen	„Freie“ Achsen	Drehgestellachsen	Rechenverfahren
Sachsen	5	70	19	72,2	—7,0	27,5	Achsstandformel (A)
			30,7	90	16,4	41,0	Dr. Saller (S)
	45	70	2,2	41,5	—3,1	11,0	Verfasser(N)
			27,5	54	—5,1	17,6	A
			42,5	72	32,3	33,5	S
	5	80	12	29,5	—1,4	5,4	N
17,2			1,2	—5,6	10,0	A	
16,2			39,5	0,9	10,5	S	
45	80	—0,9	12,6	—9,2	—5,5	N	
		16,2	20,7	—9,1	—5,3	A	
		17,3	22	0	—2,6	S	
45	60	—0,3	—1,3	—10,0	—16,8	N	
		4,8	40	—9,6	2,2	A	
		23,6	50	11,0	18,3	S	
45	60	—8,3	7	—11,0	—11,6	N	
		39	28,3	11,6	28	A	
		38	27,2	17,6	28,8	S	
5	70	7	—1,4	—2,1	0,3	N	
		30,8	0,4	12,8	25,2	A	
		33	36	20,1	27	S	
45	70	2,7	2,9	0,3	—1,3	N	
		22,7	57	24,4	35,3	A	
		11,8	38,2	20,5	21,2	S	
45	80	—11,5	3,0	3,6	—3,4	N	
		15	10	—13,1	4,7	A	
		32	33	9,0	20,5	S	
45	60	—6,5	—13,1	—23,0	—16,8	N	
		30,1	31,6	—1,2	12,8	A	
		30,6	37,6	4,1	14,0	S	
5	70	—3,2	6,0	—16,8	—15,1	N	
		21,7	20,30	2,4	8,9	A	
		24	28,8	9	12,3	S	
45	70	—8	—13,1	—12,8	—16,5	N	
		52,1	33,2	19,8	33,5	A	
		40,2	27,1	15,3	23,4	S	
45	80	9,2	—7,8	—3,4	3,4	N	
		47	47,2	12	23,8	A	
		68	78	33,4	41	S	
45	60	18,7	11,5	2,4	0,3	N	
		32,3	46,8	12,2	19,6	A	
		33,0	53,4	18,4	20,8	S	
5	70	—1,6	5,1	—5,2	—10,0	N	
		44	52	14,8	31,4	A	
		47,4	61,6	22,6	34,5	S	
45	70	8,5	11,9	—1,9	0	N	
		28,2	15	18,4	16,2	A	
		18,2	9,6	13,9	6,8	S	
45	80	—8,0	—21,8	—4,6	—16,4	N	

## Zur Frage der einheitlichen Berechnung des Eisenbahnoberbaues.

Von Dr. Ing. J. Jáky-Janicsek, Privatdozent an der Technischen Hochschule in Budapest.

Für die im Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, Heft 20 erschienenen Äußerungen Dr. Sallers bin ich sehr dankbar, da seine wertvollen Bemerkungen der weiteren Entwicklung der Frage der einheitlichen Oberbauberechnung dienen und neueren Erörterungen den Weg bereiten.

Dr. Saller hat gegen die Ausführungen des Verfassers\*) drei Einwendungen oder Bemerkungen geäußert, die im nachfolgenden beantwortet werden sollen.

1) Dr. Saller glaubt den Anlaß zur Bemerkung des Verfassers, wonach „das Verfahren nach Timoshenko die maßgebenden Eigenschaften der Querschwellen nicht in Rechnung ziehe“ darin zu finden, daß er, Dr. Saller bei der Ermittlung von D die Diehlsche Vereinfachung anwendet. Hierauf habe ich folgende Antwort:

Ich bin mir darüber durchaus im klaren, daß die Diehlsche Vereinfachung mit dem Verfahren nach Timoshenko nichts Gemeinsames hat und daß sich der einzusetzende D-Wert auf jedwede Art (Zimmermann, Diehl, Janicsek) errechnen ließe, wenn das Timoshenko-Sallersche Verfahren das theoretisch richtigere wäre. Daß dem jedoch nicht so ist, werde ich später im Punkt 2 beweisen und auch darauf hindeuten, daß die Berechnungsmethode nach Timoshenko-Saller die maßgebenden Eigenschaften der Querschwellen nicht bei D, sondern anderweitig, nämlich bei der Berechnung der Schienenspannung  $\sigma$  vernachlässigt.

Mit der Bemerkung Dr. Sallers betreffend den Vergleich der Diehlschen und Janicsekschen Berechnung muß ich mich aber gesondert befassen. Ich bin mit Dr. Saller darin vollkommen einig, daß die Formel nach Diehl ( $D = 2 C b_1 \ddot{u}$ ) nur eine Vereinfachung des Rechnungsverfahrens, und zwar eine gute Vereinfachung darstellt, wenn es sich um Hauptbahn-Querschwellen ( $2s = 250$  bis  $270$  cm) handelt.

Bei vielen Eisenbahnlinien, namentlich bei Nebenbahnen, so z. B. auch bei jenen der Königlich Ungarischen Staatseisenbahnen werden kürzere Querschwellen verwendet ( $2s = 220$  cm), für die aber die Diehlsche Berechnung keine guten Resultat mehr ergibt. Eine einheitliche Berechnungsart muß aber alle üblichen Maße erfassen; aus diesem Grunde messe ich der von mir abgeleiteten Formel:

$$\alpha = \frac{1}{0,723 + \frac{29,4}{L}}$$

weit allgemeinere Gültigkeit bei, da sie eine Annäherung an den theoretischen Wert (Zimmermann) mit großer Genauigkeit ermöglicht.

Obwohl diese Formel bereits in meiner früheren Abhandlung abgeleitet wurde, lasse ich mich auf Dr. Sallers Rat — „Sollte sich die Janicseksche Abkürzung in eine einheitliche Berechnung einführen, so wäre es dankenswert, wenn eine durchsichtige Ableitung der Formel nachgeholt würde“ — in eine kurze Wiederholung ein.

Die Aufgabe besteht im wesentlichen darin, die zusammenhängende und sich in Wellenform biegende Querschwellen in zwei Einzelstützen mit gleichmäßiger Einsenkung zu trennen. Bei Anwendung der Zimmermannschen Verknüpfungen gelangten die rechnerischen Ableitungen in der ersten Abhandlung durch die Gl. 4) bis 8) zur Länge der Einzelstützen (siehe Abb. 1 jener Abhandlung).

$$s_1 = \frac{L}{[\eta_e]} = \alpha s.$$

\*) Dr. Janicsek; Zur Frage der einheitlichen Berechnung des Eisenbahnoberbaues. Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, Heft 9.

Bei Einführung der Zimmermannschen Bezeichnung  $s = \lambda L$ :

$$\alpha = \frac{1}{\lambda [\eta_e]}$$

Die weitere Untersuchung gilt nunmehr der Veränderung von  $\lambda [\eta_e]$ . In Wirklichkeit steht das Produkt in Abhängigkeit von zwei veränderlichen Werten, und zwar von  $\rho$  und  $\lambda$ , es läßt sich jedoch nachweisen, daß bei den praktisch möglichen Querschwellenlängen von 220 bis 270 cm der Einfluß von  $\lambda$  derart sinkt, daß das Produkt  $\lambda [\eta_e]$  eigentlich nur eine Funktion von  $\rho$  bleibt. Ein mathematischer Nachweis wurde wie folgt erbracht: setzen wir zunächst für  $\rho$  einen festen Wert ein (z. B.  $\rho = 1,5$ ), dann ist in dem Produkt  $\lambda [\eta_e]$  nur noch  $\lambda$  veränderlich.

Wenn man nun das Produkt  $\lambda [\eta_e]$  für verschiedene  $\lambda$ -Werte errechnet — die entsprechend den Querschwellenlängen von 220 cm bis 270 cm zwischen die Grenzen:  $\lambda_1 = \frac{110 \rho}{75} = 2,200$  und  $\lambda_2 = \frac{135 \rho}{75} = 2,700$  fallen, und wenn man die so ermittelte Funktion  $\lambda [\eta_e]$  nach Abb. 2 der ersten Abhandlung aufträgt, so stellt sich die Funktion als ein äußerst flacher Parabelbogen dar. Darin liegt der Beweis, daß die Abhängigkeit von  $\lambda$  kaum zur Geltung kommt.

Zu der gut ausgleichenden Geraden dieser flachen Parabel (die also von  $\lambda$  keine Abhängigkeit mehr zeigt), gelangt man durch Halbierung der Bogenhöhe  $\Delta$  der Parabel. Die der Wagerechten zu  $\frac{\Delta}{2}$  entsprechende Ordinate:  $\lambda [\eta_e]_{\text{m}}$  (bei  $\rho = 1,5$  z. B. 1,324) zeigt den ersatzfähigen Wert des Produktes  $\lambda [\eta_e]$ . Wenn man nun unter Zugrundelegung der möglichen Werte ( $\rho = 0,8$  bis  $1,5$ ) die durchschnittlichen Werte für  $\lambda [\eta_e]_{\text{m}}$  bestimmt und diese bei verschiedenem  $\rho$  nach Abb. 3 veranschaulicht, so läßt sich der lineare Abhängigkeitszusammenhang zwischen  $\lambda [\eta_e]$  und  $\rho$  feststellen, dessen Gleichung  $\lambda [\eta_e] = 0,392 \rho + 0,723$  ist.

Setzt man den solcherart erhobenen Wert in  $\alpha$  ein, so ist

$$\alpha = \frac{1}{0,392 \rho + 0,723}$$

Nach Einführung der Beziehung:  $\rho = \frac{75}{L}$  ist endlich

$$\alpha = \frac{1}{0,723 + \frac{29,4}{L}}$$

Unter Zugrundelegung von Hauptbahn-Querschwellen zeigt Dr. Saller an Zahlenbeispielen, daß die Berechnungsart nach Diehl und jene des Verfassers für L nur geringe Abweichungen zeigt. Dies ist vollkommen richtig, sofern es sich um Vollbahn-Querschwellen handelt, allein bei Schwellen kleinerer Bemessung tritt schon eine wesentlich größere Abweichung zutage.

Für Nebenbahn-Querschwellen in Kiesbettung ist  $s = 110$  cm,  $E_1 = 120,000$  kg/cm<sup>2</sup>,  $J_1 = \frac{1}{12} 20 \cdot 14^3 = 4570$  cm<sup>4</sup>;  $b_1 = 20$  cm;  $C = 3$  kg/cm<sup>3</sup>.

Dann ist  $L_1 = \sqrt[4]{\frac{4 E_1 J_1}{C b_1}} = 77,7$  cm und demnach:

$\alpha = 0,908$ . Weiter wird  $s_1 = \alpha s = 0,908 \cdot 110 = 100$  cm, daher:  $D = s_1 b_1 C = 6000$  kg, wogegen nach Diehl  $D = 2 \ddot{u} b_1 C = 4200$  kg.

Es ergibt sich also für D eine Abweichung von 30 v. H.

Der Grundwert des Langschwellerbaues wird nach Timoshenko-Saller:

$$\text{bei } D = 6000 \text{ kg/cm: } L' = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{6000}}$$

$$\text{,, } D = 4200 \text{ kg/cm: } L'' = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{4200}} \text{ betragen, d. h.}$$

$L'' = \sqrt[4]{\frac{6000}{4200}} L' = 1,095 L'$ , woraus sich gegenüber der nur 2 v. H. betragenden Abweichung bei den von Saller benutzten Beispielen schon eine Differenz von 10 v. H. ergibt. Die mit der Berechnung von  $\alpha$  verbundene, unbedeutende Mehrarbeit findet jedoch ihren Lohn in der erwünschten Genauigkeit des Resultates.

2) In meiner ersten Abhandlung habe ich auf theoretischem Wege unter Berücksichtigung gewisser Annahmen — Ausgleich des abschnittsweise wechselnden Trägheitsmomentes und des abschnittsweise wechselnden Bettungsdruckes — den Grundwert des stellvertretenden Langschwellerbaues bestimmt, der sich in die Formel

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 (E J l + E_1 J_1 s_1)}{D}} \dots \dots \dots 1)$$

bringen läßt.

Im Zusammenhange mit dieser Formel wurde theoretisch nachgewiesen, daß die Querswellen steigenden Einfluß auf die Steifheit des ganzen Systems ausüben. Hierauf bezog sich zum Teil jene Bemerkung von mir, daß dieser Einfluß im Timoshenko-Sallerschen Berechnungsverfahren nicht mitbezogen ist, da hier das zweite Glied unter der Wurzel ausgeschaltet und  $E_1 J_1 s_1 = 0$  angenommen wird.

Die unter 1) angeführte Formel für den Grundwert  $L_0$  besitzt allgemeine Gültigkeit als jene nach Timoshenko, denn aus dieser Formel stellt sich mit  $E_1 J_1 s_1 = 0$  die Formel Timoshenkos:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{D}} \dots \dots \dots 2)$$

lediglich als ein Spezialfall dar.

Ich kann der Behauptung Dr. Sallers nicht beipflichten, daß das Verfahren nach Timoshenko wissenschaftlich weit aus einwandfreier und einfacher sei, als das stellvertretende Langschwellerbauesystem, da doch jenes in der allgemeingültigeren Gl. 1) als Spezialfall mitenthalten erscheint. Alle jene Voraussetzungen, die bei der Ableitung der allgemeinen Gl. 1) mitgewirkt haben, müssen notwendigerweise auch in einem Spezialfall — wie es die Gleichung nach Timoshenko darstellt — Gültigkeit besitzen. Wenn Dr. Saller dem gleichmäßigen Ausgleich des abschnittsweise auftretenden Trägheitsmomentes der Querschwellen in meinem Verfahren den Stempel eines „grobe Handwerksverfahrens“ aufdrückt, so ist dies dasselbe grobe Handwerksverfahren, dessen sich die Methode nach Timoshenko mit der Gl. 2) bedient, wo sich Timoshenko die abschnittsweise auftretende Kraft  $D$  ebenfalls in gleichmäßiger Verteilung auf den Abschnitt  $l$  vorstellt und solcherart den gleichmäßig verteilten Bettungsdruck mit  $\frac{D}{l}$  in die Formel einführt. Was Dr. Saller bei mir tadelt spielt auch bei seinem Verfahren die ausschlaggebende Rolle.

Dr. Saller hält es für einen Vorteil der unter 2) angeführten Formel, daß man nach Timoshenko nur mit zwei Faktoren (Schiene und Bettung) zu rechnen hat, wogegen der Verfasser drei Bauglieder (Schiene, gedachte Langschwelle und Bettung) zu seiner Berechnung benötigt. Meinerseits erblicke ich hierin keinen Nachteil, im Gegenteil betrachte ich es als Vorteil und den tatsächlichen Verhältnissen entsprechend, da

doch die Schiene nicht unmittelbar auf der Bettung aufliegt, sondern unter Vermittlung der Querschwellen.

Zur völligen Klarstellung muß freilich zugegeben werden, daß der Grundwert  $L$  ohne größeren Unterschied ziemlich derselbe bleibt, ob man nun die Berechnung mit der Formel 1) oder 2) durchführt. Das ist darauf zurückzuführen, daß die Kennziffer  $4 E_1 J_1 s_1 / D$  der stellvertretenden Langschwelle in der vierten Wurzel erscheint und somit  $L_0$  nur wenig beeinflusst. So z. B. treten bei dem K-Oberbau der Deutschen Reichsbahn folgende Differenzen in Erscheinung:

bei $C = 6 \text{ kg/cm}^3$	$L_0 = 95,4 \text{ cm}$	$L = 86,4 \text{ cm}$
$= 7,5 \text{ ,,}$	$= 90,6 \text{ ,,}$	$= 82,1 \text{ ,,}$
$= 10,0 \text{ ,,}$	$= 84,8 \text{ ,,}$	$= 76,8 \text{ ,,}$
$= 15,0 \text{ ,,}$	$= 77,6 \text{ ,,}$	$= 70,3 \text{ ,,}$

Weil  $L_0 = 1,103 L$  ist, beträgt die Abweichung nur 10 v. H.

Nach meinen neueren Untersuchungen bestehen zwischen den Grundwerten nach Zimmermann, Timoshenko-Saller sowie nach dem stellvertretenden Langschwellerbauesystem äußerst einfache Zusammenhänge, die eine wesentliche Vereinfachung der Umrechnung herbeiführen.

Die Gleichung unter 1) läßt sich auch wie folgt anschreiben:

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{D} + \frac{4 E_1 J_1 s_1}{D}} = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{D} + \frac{4 E_1 J_1 s_1}{s_1 b_1 C}}$$

(da  $D = s_1 b_1 C$  ist), woraus sich  $L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{D} + \frac{4 E_1 J_1}{C b_1}}$  ergibt; da ferner der erste Ausdruck unter der Wurzel den Grundwert nach Timoshenko ( $L$ ), der zweite den Zimmermannschen Grundwert ( $L_1$ ) bedeutet, läßt sich durch entsprechende Einfügung in obige Gleichung der folgende elegante Pythagoräische Zusammenhang vierten Grades für die drei Grundwerte aufstellen:

$$L_0^4 = L^4 + L_1^4 \dots \dots \dots 3)$$

Setzt man mit Dr. Saller  $L_0 = L$ , so würde sich aus der Gl. 3)  $L_1 = 0$  ergeben, eine offensichtliche Unmöglichkeit, die das Vorhandensein der Querschwellen verneint und somit auch den Wert  $D$  der Formel Timoshenko im vorhinein ausschaltet.

Geben wir nun aus Umrechnungsrücksichten den drei verschiedenen  $L$ -Werten der Gl. 1) die Form:

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{4 E J l}{D} \left( 1 + \frac{E_1 J_1 s_1}{E J l} \right)}$$

und sehen wir  $\frac{E_1 J_1 s_1}{E J l} = k$  als Steifigkeitsziffer des Oberbaues an, so erhalten wir in

$$L_0 = L \sqrt[4]{1 + k} \dots \dots \dots 4)$$

und nach Einsetzung in die Gl. 3) in

$$L_0 = L_1 \sqrt[4]{\frac{1 + k}{k}} \dots \dots \dots 5)$$

jene Zusammenhänge, die die Bestimmung des einen  $L$ -wertes aus dem anderen gestatten.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Gl. 5), da  $L_1$  nach Zimmermann bei unseren Oberbausystemen ein bereits errechneter Wert ist, in dessen Kenntnis der neue Grundwert  $L_0$  auf höchst einfache Weise mittels  $k$  bestimmt werden kann.

Die Einführung der Steifigkeitsziffer  $k$  trägt auch wesentlich zur Vereinfachung der weiteren Berechnungen bei. Nach meiner früheren Abhandlung beträgt das Schienenmoment

$$M_1 = M \frac{J}{J + \lambda \frac{s}{l} J_1} \dots \dots \dots 6)$$

Berücksichtigen wir, daß  $\lambda = \alpha \frac{E_1}{E}$  ist, und dividieren wir Zähler und Nenner durch  $J$ , so erhalten wir

$$M_1 = M \frac{1}{1 + \frac{E_1 J_1 \alpha s}{E J I}} = \frac{M}{1 + \frac{E_1 J_1 s_1}{E J I}}$$

d. h.

$$M_1 = \frac{M}{1 + k} \dots \dots \dots 7)$$

und die Schienenbeanspruchung

$$\sigma = \frac{M}{(1 + k) W} \dots \dots \dots 8)$$

Das ist eine derart einfache Formel, daß sich die Berechnung ganz primitiv gestaltet. Aus dieser Formel erhellt die ungemein große Bedeutung der stellvertretenden Langschwelle.

In  $L_0$  spielt  $k$  eine ziemlich untergeordnete Rolle (unter der vierten Wurzel), in der Formel für  $\sigma$  hingegen erscheint  $k$  in einfacher linearer Form und hat eine ansehnliche Verminderung der Beanspruchung zur Folge. Wenn  $k = 0,40$  ist, was bei dem Vollbahnoberbau als Durchschnittswert gilt, so ist nach Formel 8)

$$\sigma' = \frac{M}{1,4 W},$$

wogegen nach Saller ( $k = 0$ )

$$\sigma'' = \frac{M}{W}$$

d. h.

$$\sigma'' = 1,40 \sigma'$$

und somit gibt die Berechnung nach Saller eine um  $\sim 40$  v. H. höhere Schienenspannung. Dies wird später an einem Beispiel auch zahlenmäßig bewiesen, ebenso auch, daß die stellvertretende Langschwelle keine Fiktion ist und daß somit doch kein „Streit um des Kaisers Bart“ vorliegt.

3) Endlich habe ich in meiner ersten Abhandlung die Umgrenzung mit zwei Geraden der für die Lastgruppen maßgebenden negativen Momentflächen empfohlen, weil die Sallersche Formel (Grundformel 10) im Falle  $a < 1,571 L_0$  nicht zutrifft. Ich habe diesbezüglich auf die Württembergische K-Lokomotive aus dem Sallerschen Beispiel hingewiesen, bei welcher der eine Achsstand ( $a = 143$  cm) in diesen gefährlichen Bereich fallen kann. Dr. Saller ist in seiner Antwort bemüht, das Gegenteil zu beweisen, wobei er von den Grundwerten  $L = 80$  bis  $90$  cm ausgeht. Der Unterschied zwischen beiden Auffassungen liegt darin, daß Dr. Saller mit  $L$ , ich aber mit dem größeren Wert  $L_0$  rechne, da sich — wie ich auch in meiner früheren Ausführung hervorgehoben habe — die Voraussetzung  $a > 1,571 L_0$  nur selten erfüllt, namentlich nur bei niedrigem  $L_0$  (80 bis 90 cm).

In dem von Dr. Saller gewählten Beispiel für Holzschwellen ist  $L = 82,5$ , woraus sich tatsächlich  $143 > 1,571 \cdot 82,5 = 129,5$  cm ergibt; wenn aber mit

$L_0 = L \sqrt[4]{1 + k} = 82,5 \cdot \sqrt[4]{1 + 0,471} = 91$  cm gerechnet wird, dann ist  $a = 1,571 \cdot 91 = 143$  cm, d. h. die Achse fällt eben auf die Grenze.

Es wäre verfehlt, hieraus zu schließen, daß solcherart nur ganz kleine Achsstände in Frage kommen können; zahlreiche Lokomotiven der Königlichen Ungarischen Staatseisenbahnen mit rund 1,50 m Achsstand, ja sogar der Salonwagen aus dem Sallerschen Versuch\*) ( $a = 1,55$  m) zeigen  $a < 1,571 L_0$ , wie sich aus dem unten folgenden Beispiel zeigen wird.

Meiner Ansicht nach können nur Versuche das Für und Wider um die Richtigkeit der Berechnung aus dem stellvertretenden Langschwellenoberbau oder nach Timoshenko entscheiden. So gesehen hat das Verfahren des stellvertretenden Langschwellenverfahrens seine erste Prüfung schon

damals mit bestem Erfolg bestanden, als wir die amerikanischen Untersuchungsergebnisse des „Special Committee on Stresses in Railroad Track“ ausgewertet haben (Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, Heft 9, S. 182).

Hat Dr. Saller gegen den amerikanischen Spannungsmesser, den Stremmatographen und somit gegen die Versuche der Amerikaner eine von mir nicht geteilte Einwendung, so wird er doch seine eigenen, mit dem Thomaschen Kondensatorverfahren durchgeführten Versuche gelten lassen, die er in letzter Zeit am bayerischen Oberbau vorgenommen hat\*).

Den Versuchszug und die unter seinen verschiedenen Achsen auftretende lotrechte Schienenbeanspruchung zeigt die Textabb. S. 214. Die punktierten und die strichpunktierten Kurven stellen die Versuchsergebnisse dar, die Sallerschen Berechnungsergebnisse sind durch eine ausgezogene Linie veranschaulicht. Diesbezüglich muß ich bemerken, daß Dr. Saller aus seiner Formel den Winklerschen Festwert 1,09 ganz richtig ausschaltet, hingegen die Beanspruchungen völlig willkürlich mit 0,88 multipliziert, um auf diese Weise eine bessere Übereinstimmung seiner Berechnung mit den Messungsergebnissen herbeizuführen. Trotzdem fällt die Übereinstimmung nicht zufriedenstellend aus, denn die Beanspruchungen unter Einzelasten (Güterwagen) sind niedriger, unter den Gruppenlasten (Lokomotive) jedoch höher, was Dr. Saller wiederum durch Anwendung neuerer Wertziffern auszugleichen denkt.

Im nachstehenden wird der Verfasser beweisen, daß sich ein derartiger künstlicher Eingriff mit Wertziffern vollkommen erübrigt, liefert doch das Verfahren des stellvertretenden Langschwellengleises den besten Einklang zwischen Versuch und Berechnung. Die beiden Versuchskurven ( $v = 8,3$  und  $v = 8,5$  km/h) unter den Lokomotivachsen bieten zufolge ihrer sehr guten Übereinstimmung eine vorzügliche Untersuchungsmöglichkeit. Greifen wir die Beanspruchungen unter zwei beliebigen Achsen, z. B. jene unter der zweiten und der dritten Achse der Lokomotive heraus, so ergibt sich nach den Versuchen:

Schienenanspannung unter dem zweiten Räderpaar:

$$\sigma_2 = 670 \text{ kg/cm}^2,$$

Schienenanspannung unter dem dritten Räderpaar:

$$\sigma_3 = 715 \text{ kg/cm}^2.$$

Die entsprechenden Biegemomente lassen sich als Funktion des Grundwertes  $L_0$  folgend ausdrücken:

$$M_2 = \frac{9850 L_0}{4} - \frac{9850 (3,75 L_0 - 1,85) + 7800 (3,75 L_0 - 2,70)}{42}$$

daher

$$M_2 = 885 L_0 + 934 \dots \dots \dots 9)$$

bzw.

$$M_3 = \frac{9850 L_0}{4} - \frac{9850 (3,75 L_0 - 1,85) + 9800 (3,75 L_0 - 3,50)}{42}$$

daher

$$M_3 = 706 L_0 + 1250 \dots \dots \dots 10)$$

Das Verhältnis der beiden Momente ist

$$\frac{M_2}{M_3} = \frac{\sigma_2}{\sigma_3} = \frac{885 L_0 + 934}{706 L_0 + 1250} = \frac{670}{715}$$

woraus sich

$$L_0 = 1,066 \text{ m} = 106 \text{ cm} \text{ ergibt.}$$

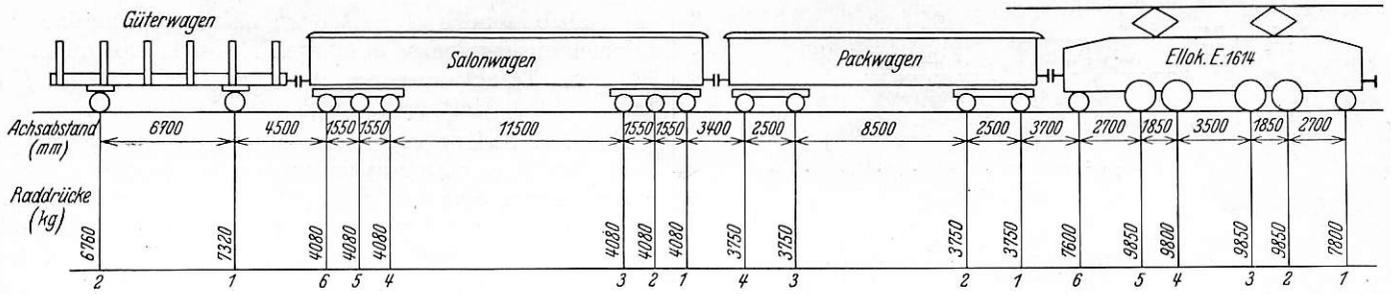
Setzt man diesen Wert in die Gl. 9) und 10) ein, so folgt  $M_2 = 1870$  kgm und  $M_3 = 2000$  kgm.

Hieraus ergibt sich das Widerstandsmoment des zusammengesetzten Systems:

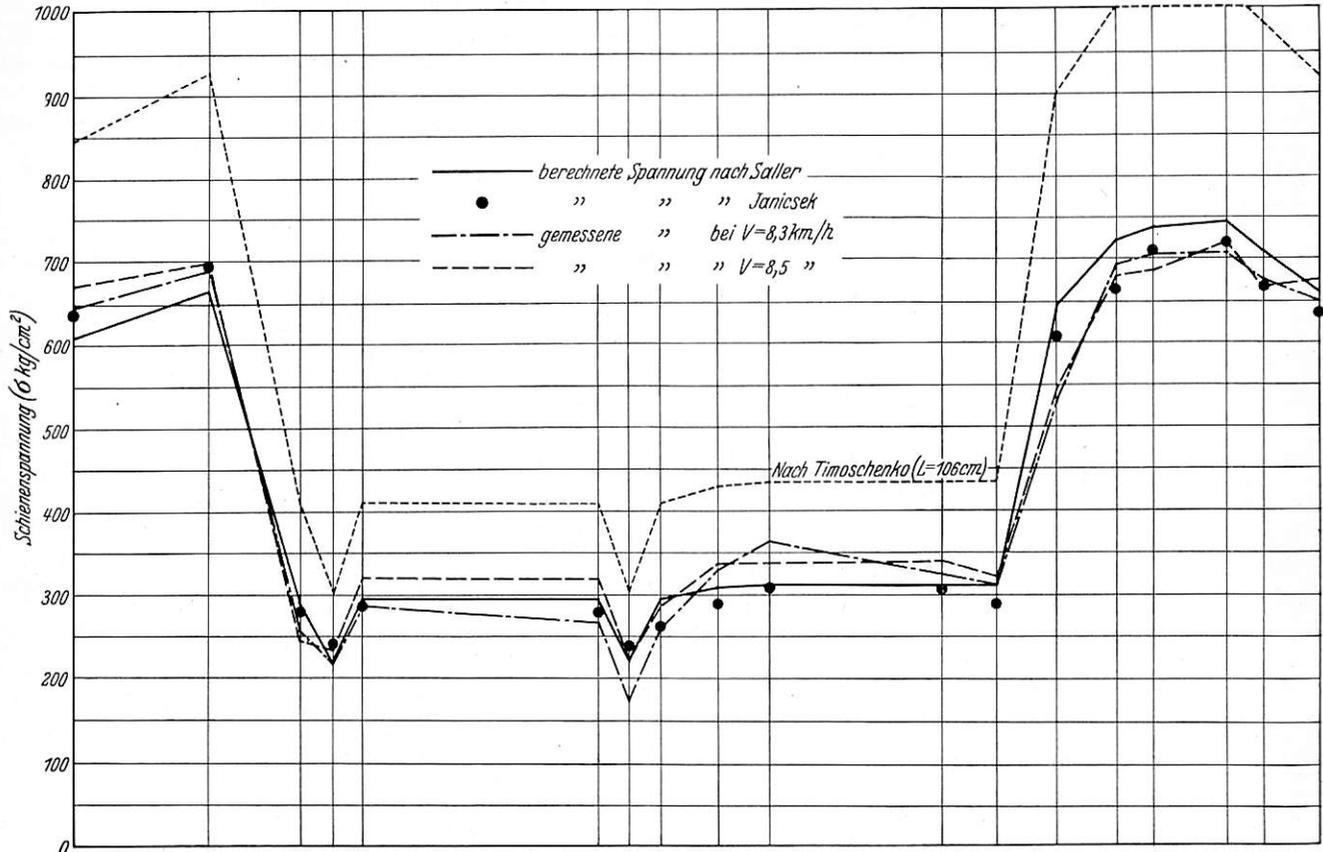
$$W_0 = \frac{187000}{670} = \frac{200000}{715} = 280 \text{ cm}^3.$$

\*) Dr. Saller, Einheitliche Berechnung des Eisenbahnoberbaues. Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, Heft 9.

\*) Dr. Saller, Einheitliche Berechnung des Eisenbahnoberbaues. Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1933, Heft 9.



Vergleich der gemessenen und der berechneten Spannungen



Wenn wir jetzt mit Hilfe der Werte  $L_0 = 106$  cm und  $W_0 = 280$  cm<sup>3</sup> die unter sämtlichen Rädern aufgetretene Spannung ermitteln, erhalten wir folgende Werte:

unter dem Rad 1 der Lokomotive	= 631 kg/cm <sup>2</sup>
„ „ „ 2 „ „	= 668 „
„ „ „ 3 „ „	= 715 „
„ „ „ 4 „ „	= 711 „
„ „ „ 5 „ „	= 671 „
„ „ „ 6 „ „	= 605 „
„ „ „ 1 des Packwagens	= 290 „
„ „ „ 2 „ „	= 308 „
„ „ „ 3 „ „	= 308 „
„ „ „ 4 „ „	= 288 „
„ „ „ 1 „ Salonwagens	= 264 „
„ „ „ 2 „ „	= 240 „
„ „ „ 3 „ „	= 282 „
„ „ „ 4 „ „	= 282 „
„ „ „ 5 „ „	= 240 „
„ „ „ 6 „ „	= 282 „
„ „ „ 1 „ Güterwagens	= 693 „
„ „ „ 2 „ „	= 643 „

Die Auftragung dieser rechnerischen Resultate in der obenstehenden Textabbildung — kleine Kreise — läßt eine derart vollkommene Übereinstimmung erkennen, wie sie sich zwischen Theorie und Praxis im allgemeinen nur selten zeigt.

Die verhältnismäßig größte Abweichung macht sich unter den Achsen des Packwagens bemerkbar, was auf den störenden Einfluß der durch die leichten Achsen hervorgerufene erhebliche seitliche Kraft zurückgeführt werden kann.

Den ausschlaggebenden Beweis für die Richtigkeit des stellvertretenden Langschwelenverfahrens liefert aber nicht diese gute Übereinstimmung, sondern der Wert:  $W_0 = 280$  cm<sup>3</sup>. Das Widerstandsmoment im Schienenstrang beim bayerischen X.-Oberbau beträgt  $W = 202$  cm<sup>3</sup> (neue Schiene)\*), d. h. wesentlich weniger als  $W_0 = 280$ . Wenn wir das Moment nach Saller anstatt durch  $W_0$  nur durch  $W = 202$  dividieren würden, würden sich um 39 v. H. höhere Spannungen ergeben, wie es der punktierte Linienzug in der Textabbildung zeigt. Es genügt ein flüchtiger Blick, um die Unhaltbarkeit dieses Ergebnisses zu erkennen, womit der Beweis erbracht ist, daß das auftretende Biegemoment nicht nur von der Schiene, sondern auch von der Langschwelle abhängt.

Nachdem wir auf Grund der Versuchsergebnisse  $W_0$  zahlenmäßig ermitteln haben, können wir nun nach der Formel 8) die Steifigkeitsziffer des Oberbaues:  $k$  bestimmen.

Laut Formel 8) ist  $W_0 = (1 + k) W$ ,  
daher:  $280 = (1 + k) 202$ ,  
woraus sich  $k = 0,385$  ergibt.

\*) Dr. Ing. H. Saller, Der Eisenbahnoberbau im Deutschen Reich. 1928.

Der Grundwert nach Zimmermann des Querschwellensystems ergibt sich nach Formel 5), wonach  $L_1 = L_0 \sqrt[4]{\frac{k}{1+k}} = 106 \cdot 0,727 = 77$  cm.

Wenn uns die Querschwelle nach Größe und statischer Beschaffenheit bekannt ist, läßt sich mittels  $L_1$  auch die für den Zeitpunkt des Versuches zutreffende Bettungsziffer berechnen, da aus

$$L_1 = \sqrt[4]{\frac{4 E_1 J_1}{C b_1}}$$

die Bettungsziffer

$$C = \frac{4 E_1 J_1}{b_1 L_1^4} \text{ ist. . . . . 11)}$$

Nachdem uns die von Dr. Saller in seiner Berechnung benützte Schwellengröße unbekannt ist, nehmen wir folgende Maße als wahrscheinlich an.

Holzschwelle: 25/15 cm (möglicherweise auch 26/16 cm),  $J_1 = 7030$  cm<sup>4</sup>,  $E_1 = 100000$  kg/cm<sup>2</sup> (Durchschnittswert),

$$\text{woraus: } C = \frac{4 \cdot 100000 \cdot 7030}{25 \cdot 77^4} = 3,2 \text{ kg/cm}^3.$$

Sollte es sich um andere Schwellengrößen handeln, so ändert sich natürlich auch der Wert von C. Er erhöht sich z. B. für Holzschwellen von 26/16 cm auf 4,0 kg/cm<sup>3</sup>. Entgegen der bisherigen Anschauungen haben wir es mit einem überraschend geringen Wert von C zu tun, was wir im Zusammenhang mit dem amerikanischen Zahlenbeispiel unserer früheren Abhandlung schon damals betont haben. Das amerikanische Beispiel lieferte ebenfalls  $C \sim 3$  kg/cm<sup>3</sup>.

Es gelang nun zum zweiten Male mit Hilfe des stellvertretenden Langschwelligleises die auf sehr verschiedene Versuchsarten erhobenen Meßergebnisse genauest zu bestätigen. Wenn es auch verfrüht wäre, diese Tatsache einer endgültigen Entscheidung zugrunde zu legen, so hoffe ich, daß Dr. Saller zumindest so viel zugeben wird, daß das Verfahren des stellvertretenden Langschwelligleises hinsichtlich der Vollkommenheit den bisher bekamten Methoden vorangeht.

## Rundschau.

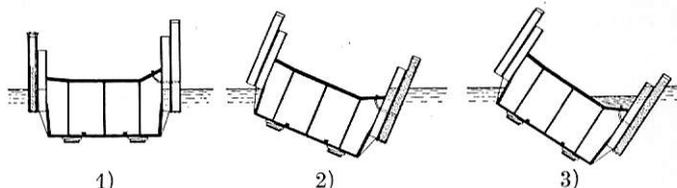
### Bahnunterbau, Brücken und Tunnel; Bahnoberbau.

#### Die Lillebaeltbrücke zwischen Jütland und Fünen in Dänemark.

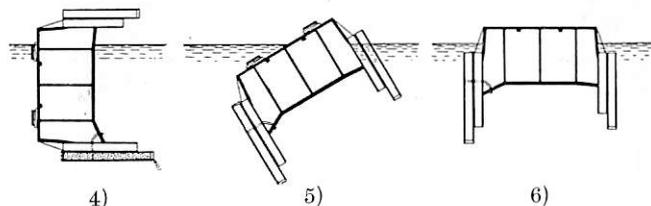
Die als Eisenbahn- und Straßenbrücke vereinigte große Lillebaeltbrücke befindet sich zur Zeit in Ausführung und soll 1934 fertig werden. Der Belt ist an der Baustelle 825 m breit. Zwischen den beiden an den Ufern stehenden Widerlagern erstreckt sich auf vier Pfeilern ein Eisenbau in fünf Feldern 137,5—165,0—220,0—165,0—137,5 m. Es soll die erste größere Brücke in dem neuen Kruppbaustahl werden. Die Unterkante des Eisenüberbaues liegt in den drei mittleren Feldern mindestens 33 m über dem Wasserspiegel. Das Mittelfach hat 24 m Bauhöhe. In den Seitenfeldern nimmt die Bauhöhe bis zu 15 m an den Widerlagern ab. Die Doppelbahn liegt auf der Ostseite des 16,5 m betragenden Hauptträgerabstandes. Auf beiden Ufern schließen sich bis zu den Erddämmen Eisenbetonbogen an, auf Fünen drei, in Jütland fünf. Die beiden zunächst den Widerlagern des Eisenüberbaues gelegenen Öffnungen haben 40 m Lichtweite und 30 m Höhe. Diese Eisenbetonbogen und die Pfeilergründungen sind jetzt fertig. Der Meeresgrund besteht auf unbekannter Tiefe aus sehr festgelagertem, fettem Tertiärton, der zu den sogenannten plastischen Tonarten zu rechnen ist. Der Ton ist sehr feinkörnig und von wechselndem, aber sehr hohem Kalkgehalt. In unberührtem Zustand ist der Ton praktisch für Wasser undurchdringlich.

Was den Bau der Lillebaeltbrücke besonders bemerkbar gemacht und ihm ungewöhnliches Aufsehen in der Fachwelt zugewendet hat, ist die Ausführung der Pfeilergründungen. Es bestanden hier infolge der großen Wassertiefe ganz außergewöhnliche Schwierigkeiten. Die Tiefe beträgt für die drei ersten Pfeiler, von der Küste Fünens gerechnet, 29 bis 30 m und für den vierten Pfeiler 24 m. Nach langem Planen wurde auf Grund eines Preisausschreibens ein der Firma Grün und Bilfinger in Mannheim patentiertes Gründungsverfahren gewählt, nämlich Eisenbetonsenkstätten mit bedeutend höherer Arbeitskammer als gewöhnlich (7 bis 8 m gegen gewöhnlich 2 bis 2,5 m). Das Verfahren macht die Anwendung der kostspieligen und gefährlichen Druckluftarbeit überhaupt entbehrlich. Die Wände der Arbeitskammer bestehen aus lotrecht dicht aneinander gestellten und untereinander fest verbundenen Rohren, die eine Kammer einschließen. Innerhalb dieser Rohre wird der Ton des Meergrundes mit Hilfe besonderer hydraulischer Grabvorrichtungen in Verbindung mit Spülung ausgehoben, wobei sich der Senkkasten mit seiner Auflast in den Meerboden niederdrückt, bis die Decke der Arbeitskammer auf den innerhalb der Rohrwände liegenden Meeresboden aufstößt. Die Ausschachtung beträgt etwa 3 m unter der natürlichen Sohle, da man hier tragfähigen Baugrund festgestellt hat. Die Unterkante des Rohrkranzes liegt dann

etwa 4 m unter der Gründung. Die Rohrwände werden nun ausbetoniert und bilden eine wasserdichte, kräftige Umfassung der Arbeitskammer, zu der man durch Deckel in der Kastendecke Zugang erhält. In der Arbeitskammer kann man so ohne Anwendung von Druckluft die erforderlichen Ausgrabungen vornehmen. Schließlich wird die Arbeitskammer ausbetoniert. So



- 1) Schwimmstellung des Senkkastens nach dem Stapellauf. Die Schiefstellung infolge der ungleichen Rohrwände ist durch Sandbelastung ausgeglichen, die jetzt entfernt wird.
- 2) Auf der schwereren Seite werden die Rohrwände mit Steinbettung gefüllt, wodurch die Drehung eingeleitet wird.
- 3) Durch Ventile wird der Arbeitskammer Wasserballast zugeführt.



- 4) Der Senkkasten hat sich um 90° gedreht und die Steinbettung beginnt auszulaufen.
- 5) Die Drehung ist nahezu beendet. Die Steinbettung ist ausgelaufen.
- 6) Schwimmstellung des Senkkastens nach der Drehung.

Abb. 1.

weit die Fuge zwischen Rohrwand und dem Ton des Meergrundes nicht genügend dicht ist, kann man auch Druckluft anwenden.

Die Senkkasten werden auf einem Helling an dem jütländischen Ufer ausgeführt. Da die Unterkante des Rohrkranzes genau den Unebenheiten des Meerbodens an Pfeilerstelle angepaßt sein muß, so mußten die Senkkasten zunächst umgewendet, d. i. mit der Unterkante nach oben hergestellt werden. Während des Baues ruhen die Senkkasten auf eingerammten Pfählen, oberhalb deren als Unterlagen für den Senkkasten Sandbüchsen eingeschoben sind. Auch der Hellingablauf ruht zu Land und zu Wasser auf Pfählen. Der Stapellauf der Senkkasten wird ein-

geleitet, indem man den Sand aus den Büchsen durch kleine Öffnungen auslaufen läßt. Der Senkkasten wird dabei um einige Zentimeter abgelassen und läuft über die mit Seife geschmierte Hellingbahn ab. Der Senkkasten schwimmt dann mit dem Untersten zu oberst und muß nun im Wasser gewendet werden. Es geschieht dies durch einseitige Belastung, indem die Röhren teils mit Kies und Steinen, teils mit Wasser gefüllt werden, wie aus Abb. 1 hervorgeht. Im Verlauf der Drehung fallen Kies und Steine von selbst wieder aus den Röhren heraus. Schließlich schwimmt der Senkkasten in der richtigen Stellung. Unmittelbar nach der Drehung wird er mit so viel Wasserballast auf den Grund gesetzt, daß man ihn durch Auspumpen wieder flott machen kann, selbst nachdem sein Gewicht durch den beginnenden Pfeileraufbau, dessen Hauptteil eine in Zellen eingeteilte Eisenbeton-Senkkastenkonstruktion bildet, erhöht worden ist. Dieser Aufbau erfolgt Schritt für Schritt und dazwischen wird der Kasten immer weiter in tieferes Wasser geschoben, bis die Aufbauhöhe genügt, um den Senkkasten an den richtigen Platz der Pfeilerstelle zu setzen. Dann werden die nötigen Krane, Bohr- und Gräbtürme auf dem Pfeiler aufgestellt; der Rohrkranz wird mit Hilfe loser Eisenröhren, die untereinander und gegen den Senkkasten abgesteift werden, bis zur Höhe der

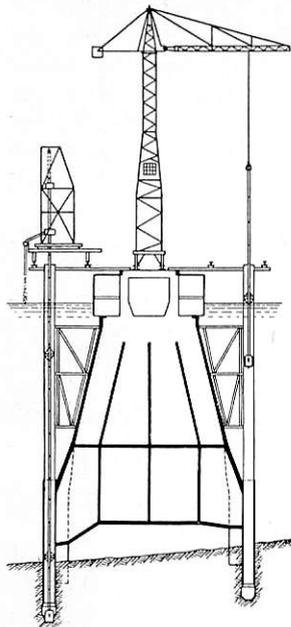


Abb. 2. Eingraben des Senkkastens an der endgültigen Pfeilerstelle.

der Rohrkranz wird mit Hilfe loser Eisenröhren, die untereinander und gegen den Senkkasten abgesteift werden, bis zur Höhe der

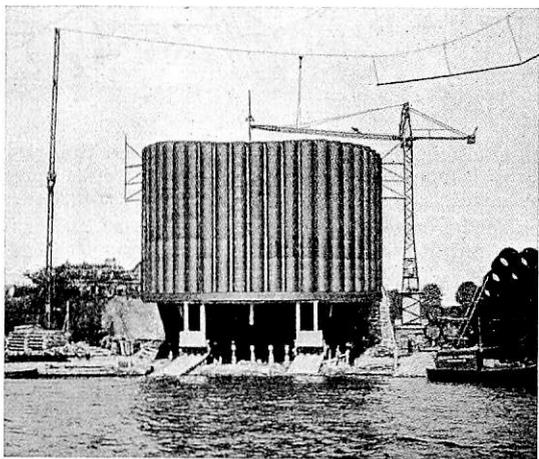


Abb. 3. Senkkasten auf dem Helling.

Arbeitsplattform aufgehöhht. Nunmehr beginnt das Ablassen des Senkkastens durch Eingraben (Abb. 2). Obwohl kleinere und auch einige größere Steine auf dem Tongrund und in dessen oberster Schicht (der eigentliche Lillebaetlehm ist völlig steinfrei) nicht vorher entfernt worden waren, konnten doch die Einbohrarbeiten anstandslos durchgeführt werden. Abb. 3 zeigt den Senkkasten auf dem Helling, Abb. 4 während des Drehens.

Nach Ausbetonieren der Rohrwände, das unter Wasser mittels Klappkästen erfolgt, wird der Eingang zur Arbeitskammer geöffnet und es werden die nötigen Leitern und Aufzüge für die Massenförderung eingebaut. Schließlich wird die Arbeitskammer auf die verbleibenden 3,5 m Höhe ausbetoniert. Damit ist der schwierigste Teil der Gründungsarbeiten abgeschlossen. Die

Zellen über dem Senkkasten werden ebenfalls ausbetoniert, wobei jedoch bemerkenswerterweise einige Zellen in Pfeilermitte nicht ausgefüllt werden, sondern auch im fertigen Brückenpfeiler leer

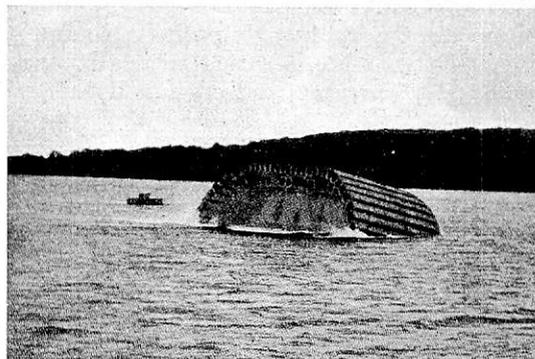


Abb. 4. Senkkasten während der Drehung.

blieben. Der Aufbau der Eisenbetonpfeiler, der an besonders der Abnutzung ausgesetzten Flächen mit Granit u. a. verkleidet wird, begegnet keinen weiteren Schwierigkeiten. Dr. Saller.

### Schienenverladeweise der Great Western Railway.

Das Verladen der ausgebauten Schienen ist eine verhältnismäßig umständliche und zeitraubende Arbeit. Die englische Great Western Railway sucht diese durch ein neues Verfahren zu vereinfachen.

Die zu verladenden Schienen werden dabei paarweise möglichst nahe beim Gleis gelagert. Von dort werden sie durch eine Lokomotive mittels eines starken Drahtseils, das über eine an der Stirnseite des für die Verladung bestimmten Plattformwagens angebrachte breite Walze läuft, auf den Wagen hinaufgezogen. Der Wagen, der gerade beladen werden soll, muß hierzu fest-



Aufladen von Schienen mittels Hilfslokomotive.

gebremst werden. Das Drahtseil wird am Zughaken der Lokomotive oder eines vorauslaufenden Wagens befestigt; an seinem freien Ende hängen in einer Schlaufe zwei Ketten, die mittels Klauen die beiden Schienen fassen. Um ein Hinüberziehen der Schienen über das vordere Wagenende zu vermeiden, ist ein zweites Seil von bestimmter Länge vorgesehen, das in dem Augenblick angespannt wird, wo die Schienen richtig auf dem Wagen liegen und damit die Entfernung zwischen dem beweglichen und dem festgebremsten Fahrzeug begrenzt. Die langsam fahrende Lokomotive kommt dann entweder zum Halten oder, sie nimmt den festgebremsten Plattformwagen mit.

Mit Hilfe des geschilderten Verfahrens sollen sechs Mann in einer Stunde etwa 32 Schienen verladen können. R. D. (Rly. Engr., September 1932.)