Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 1 (1932)

Rubrik: V. Dynamical problems of bridges

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.03.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

V 1

PROBLEME DER BRÜCKENDYNAMIK

LA DYNAMIQUE DU PONT

DYNAMICAL PROBLEMS OF BRIDGES

EINLEITENDES REFERAT
RAPPORT D'INTRODUCTION
INTRODUCTORY REPORT

Reichsbahnoberrat HOMANN,
Zentralbauamt der Gruppe Bayern der Deutschen Reichsbahngesellschaft, München.

Die Brückenvorschriften der meisten Länder tragen den dynamischen Wirkungen der Lasten bisher dadurch Rechnung, dass sie in der Form von Kurven oder Tabellen gewisse Zahlenwerte, « Stosszahlen », vorschreiben, mit denen die statisch ermittelten Biegungsmomente und Querkräfte aus der Verkehrslast zu vervielfältigen sind. An diesen Stosszahlen muss auffallen, dass sie in den verschiedenen Ländern recht erheblich von einander abweichen. Schon diese Tatsache offenbart, dass ihnen Mängel anhaften und dass sie nicht als etwas Endgültiges angesehen werden können.

Und in der Tat müsste man, um einwandfreie Stosszahlen angeben zu können, entweder aus der Erfahrung wissen, welche dynamischen Beanspruchungen unter den verschiedensten Verhältnissen überhaupt vorkommen, und wie sie sich summieren können, oder man müsste in der Lage sein, diese Fragen theoretisch zu beantworten.

Wie steht es bis heute in dieser Hinsicht?

Die Erfahrung muss sich auf Messungen stützen, — Durchbiegungs- oder Spannungsmessungen —, sie muss also versagen, solange man nicht über Geräte verfügt, die die Messgrössen richtig aufzeichnen und solange die Beobachtungsergebnisse die Möglichkeiten der Schwingungserscheinungen nicht erschöpfen und zu ihrer Erklärung nicht ausreichen. Bis zu der Zeit, als die Stosszifferkurven entstanden, hat man aber einwandfreie Messgeräte noch nicht gehabt, und wenn sie auch inzwischen wesentlich verbessert worden sind, so reicht doch auch heute das Beobachtungsmaterial nicht aus, um die Lücken und Mängel der dynamischen Vorschriften zu beseitigen.

Was anderseits die Theorie betrifft, so stellt zwar die Mathematik wertvolle Hilfsmittel zur Verfügung, aber es bleiben doch genug Fragen offen, die durch die Theorie allein niemals beantwortet werden können, so die Frage, inwieweit unsere Bauwerke den idealisierten theoretischen Schwingungsgebilden

entsprechen, und welche Zahlenwerte für die Beiwerte der Formeln in die Rechnung einzuführen wären.

Hinsichtlich der wissenschaftlichen Begründung der Stosszahlen hat sich also in den letzten Jahren nicht viel geändert, obwohl zuzugeben ist, dass die Ausbildung der Messgeräte und die Forschungsmethoden erfreuliche Fortschritte zeigen. Es ist darum verständlich, dass Zweifel laut geworden sind, ob es überhaupt möglich ist, wissenschaftlich begründete Vorschriften aufzustellen, ob man sich nicht vielmehr lediglich an die Erfahrung halten müsse. Und wenn man bedenkt, wieviel Zeit, Mühe und Scharfsinn schon aufgewendet worden sind, so kann die Tatsache wohl nachdenklich stimmen, dass wir heute noch keine verwickeltere dynamische Schaulinie im einzelnen analysieren, geschweige denn die dynamischen Beanspruchungen voraus berechnen können. Wohl hat man interessante Einzelheiten festgestellt, wie Resonanzwirkungen oder Koppelungserscheinungen, aber, wenn man diese rechnungsmässig verfolgen wollte, so bliebe man auf allerlei Annahmen angewiesen, weil vielfach die Beobachtungen nicht ausreichen, der Berechnung sichere Unterlagen zu geben. Damit sollen diese Beobachtungen nicht herabgesetzt werden, — die bisherigen Forschungen behalten vielmehr schon deshalb ihren Wert, weil sie die Schwierigkeiten der Aufgabe erkennen liessen und so zum mindesten eine Vorbedingung für die Weiterarbeit schufen, aber die Zweifler können doch verlangen, dass man sich ernsthaft mit ihnen auseinandersetzt. Sie könnten darauf hinweisen, dass Resonanz- und Kopplungserscheinungen einen gesetzmässigen Charakter tragen, dass daneben aber andere auftreten, die so unregelmässig und von so vielen Umständen abhängig sind, dass ihnen durch Rechnung in keiner Weise beizukommen wäre. Nun will man zwar auf weitere Versuche nicht verzichten, aber man sieht das Weiterkommen nur in einer Art Grosszahlforschung. Es sollen, wenn wir recht verstehen, mit den vorhandenen Betriebsmitteln immer und immer wieder Spannungs- und Durchbiegungsmessungen gemacht werden, und die Erfahrung soll dann zeigen, in welchen Grenzen sich die dynamischen Beanspruchungen halten. Dieser Vorschlag möchte vielleicht hingenommen werden können, wenn die üblichen Messungen unter den verschiedensten Verhältnissen ein Bild ergeben würden, aus dem sich bestimmte Gesetzmässigkeiten erkennen liessen. Das ist jedoch nicht der Fall. Es kommen häufig Streuwerte vor, und diese Fälle erfordern Aufklärung, sonst bleibt die Unsicherheit für die Fassung der Vorschriften bestehen, und die Beruhigung, die sie geben sollen, wird nicht erreicht. Schon aus diesem Grunde müsste alles versucht werden, um über die bisherigen Erkenntnisse hinaus tiefer einzudringen. Wichtig wird dabei sein, ob in der Brückendynamik die Gesetzmässigkeiten oder Zufälligkeiten die grössere Rolle spielen, und ob man sich von letzteren, wenigstens teilweise, freimachen kann. Davon wird es abhängen, ob man, wie bei der Grosszahlforschung, auf statistische Methoden angewiesen bleibt, oder ob das Ziel höher gesteckt werden darf.

Um hier etwas klarer zu sehen und Stellung nehmen zu können, wollen wir, — obwohl wir damit nur bekannte Dinge wiederholen, einen Blick auf die dynamischen Vorgänge werfen, die sich in einer Brücke abspielen. Wir denken dabei in erster Linie an vollwandige Träger mit gleichbleibendem Trägheits-

moment, erinnern uns aber zugleich, dass sich, wie Theorie und Praxis zeigen, auch Fachwerkträger nicht wesentlich anders verhalten :

Die erste Betrachtung gilt gewöhnlich dem Fall der Belastung durch eine ortsfeste konstante Last. Indem das Tragwerk sich mit der Last ins Gleichgewicht zu setzen sucht, biegt es sich durch. Weil aber die Spannungen (Stabkräfte) allmählich von Null an wachsen, während die Last gleich in voller Grösse wirkt, bleibt die im Träger sich aufspeichernde potentielle Energie (Formänderungsarbeit) zunächst hinter der Arbeit der Last zurück. Der Überschuss der äusseren Arbeit geht in Bewegungsenergie der Trägermasse und der trägen Masse der Last über und diese Energie erreicht ihren Grösstwert, wenn der Träger seine statische Gleichgewichtsform angenommen hat.

Die angesammelte Bewegungsenergie treibt nun den Träger über diese Lage hinaus. Dabei senkt sich die Last weiter, sie leistet weiter Arbeit. Jetzt aber ist der Zuwachs der Formänderungsarbeit, die ja mit dem Quadrat der Durchbiegung wächst, — grösser als der Zuwachs der äusseren Arbeit; die schwingende Masse wird nun verzögert, und es tritt schliesslich, bei der doppelten statischen Durchbiegung, der Zeitpunkt ein, wo die Masse einen Augenblick zur Ruhe kommt und die Schwingung in die entgegengesetzte Richtung übergeht.

Diese Überlegung darf nicht zu der Annahme verleiten, dass auch eine über den Träger rollende Last die doppelte statische Durchbiegung hervorrufen müsse. Die Theorie zeigt vielmehr, dass in diesem Falle die dynamische Durchbiegung nur unwesentlich grösser wird, als die statische. Man gewinnt davon eine Vorstellung an dem Beispiele eines Trägers, der in der Mitte um das Mass f überhöht ist, um das ihn die Last Q durchbiegt. Die in der Trägermitte plötzlich angebrachte Last hat, wenn der Träger sich um f gesenkt hat, die Arbeit $Q.f$ geleistet, die vom Auflager heranrollende Last Q aber hat gegenüber dieser Lage der Trägermitte gar keinen Niveauunterschied. Sie ist zwar, um die Durchbiegung f hervorbringen zu können, zunächst etwas gestiegen, aber nicht um das Mass f. Die Durchbiegung unter der rollenden Last wird dadurch beeinflusst, dass diese eine gekrümmte Bahn durchläuft, und Fliehkräfte in lotrechter Ebene entwickelt. Sobald Schwingungen eingesetzt haben, wird die Bahn der rollenden Last, die nicht mit der Biegungslinie des Trägers oder mit einer Schaulinie der Durchbiegung eines Knotenpunktes verwechselt werden darf, sehr verwickelt. Sie zeigt mit letzteren eine gewisse Ähnlichkeit, indem einem mittleren Durchhang ein auf — und abgehender Wellenzug freier Eigenschwingungen des Trägers überlagert ist, sie ist aber nicht symmetrisch zur Trägermitte, sondern steigt gegen das Ablaufende steiler an. Je nachdem nun, ob die Bahnkurve gerade nach oben oder nach unten hohl ist, wird die Achslast durch die Fliehkraft vermehrt oder vermindert. Es besteht also die Möglichkeit, dass die Einflüsse mehrerer Lasten sich gegenseitig aufheben, und das ist auch meistens der Fall. Ausserdem bleibt zu beachten, dass die Grösse der Fliehkraft nicht von der Krümmung der Bahnen abhängt, die die Achsen beschreiben, sondern von der Bahn des Lastschwerpunktes, die infolge der Fahrzeugfederung flacher verläuft.

Zu den bisher betrachteten Schwingungen treten erzwungene Schwingungen, hervorgerufen durch die freien Fliehkräfte der zusätzlichen Gegenge-

wichte der Lokomotivtreib- und Kuppelachsen, unter Umständen auch durch die periodisch wechselnde lotrechte Seitenkraft das Kreuzkopfdruckes.

Die Wirkung der freien Fliehkräfte ist eine doppelte. Neben den lotrechten Impulsen üben sie auch ein periodisch wechselndes Drehmoment senkrecht zur Bauwerksachse aus, das die Hauptträger in Gegenphase zum Schwingen anregt. Diese periodischen Kraftwirkungen sind theoretisch und praktisch besonders beachtlich, da sie unter Umständen eine Brücke durch Resonanz zu starken Schwingungen aufschaukeln können. Diese sind praktisch wichtiger, als die weiterhin noch zu erwähnenden Resonanzerscheinungen bei Koppelung, weil an ersteren nur die im Tragwerk liegende Dämpfung zehrt, die immer gering ist.

Rhythmische Kraftwirkungen gehen auch von den Temperaturlücken der Schienen aus, indem an ihnen in mehr oder weniger regelmässigen Zeitabständen Stösse auf die Brücken ausgeübt werden.

Die so entstandenen erzwungenen Schwingungen setzen sich aus (gedämpften und daher abklingenden) Eigenschwingungen und aus erzwungenen Schwingungen zusammen. Dabei ist sehr wichtig, dass die Dämpfung in den Brückentragwerken klein ist; denn das hat zur Folge, dass die Eigenschwingungen, die sich den erzwungenen Schwingungen überlagern und bei Resonanz einen gewissen Schutz gegen das Aufschaukeln bilden, nur langsam abklingen, ja, da sie durch neue Anstösse erneut angeregt werden, wohl nie ganz zur Ruhe kommen.

Das Zeitmass der Eigenschwingungen ist bestimmt durch die Biegungssteifigkeit des Trägers und durch Grösse und Verteilung der schwingenden Masse, letztere bestehend aus der gesamten Masse der Brücke und der jeweiligen, im Weiterfahren nach Grösse und Lage sich ständig ändernden Masse des Zuges. Diese Änderung der schwingenden Masse ist sehr wichtig, weil dadurch das Zeitmass der Schwingungen ständig geändert, also gestört wird. Aber auch noch in einem anderen Sinne bilden die Betriebslasten und ihre Massenkräfte kein konstantes, sondern ein veränderliches Lastsystem. Die einzelne Achslast nämlich besteht aus dem Gewicht der Achse und einem Federdruck, der innerhalb weiter Grenzen schwanken kann. Das tritt z. B. ein, wenn die Beschleunigung der Schwingungsbewegung der Brücke so gross wird, dass die Reibung in den Achsführungen und in den Federblättern der Fahrzeuge überwunden wird und die Tragfedern zum Schwingen kommen. Dann beeinflussen sich die abgefederten Massen der Fahrzeuge auf der einen und die Masse der Brücke zusammen mit den nicht abgefederten Massen der Fahrzeuge auf der andern Seite gegenseitig, und es entstehen freie Koppelschwingungen, die sich im allgemeinen aus zwei harmonischen Einzelschwingungen, einer langsameren und einer schnelleren zusammensetzen, aber auch aus nur einer der beiden bestehen können. Bei der langsamen Einzelschwingung schwingen die durch die Fahrzeugtragfedern gekoppelten Massen in gleichem Sinne, bei der schnellen in Gegenphase. In letzterem Falle ist es also so, als wenn die Fahrzeugmasse entgegengesetztes Vorzeichen hätte. Neben den freien können auch erzwungene Koppelschwingungen auftreten.

Wenn die Periode der schnellen Koppelschwingung mit der Periode der Fliehkräfte schnellfahrender Züge übereinstimmt, dann sind die Erregerkräfte

sehr gross, aber die Resonanzschwingungen sind dafür durch den Hinzutritt der Reibung zwischen den Federblättern und in den Achsführungen stärker gedämpft. Immerhin sind starke dynamische Wirkungen der schnellen Koppelschwingungen beobachtet worden. Auch kommen sie nicht nur bei Schnellzügen, sondern auch bei schnellfahrenden Güterzügen vor, da diese bei kleinerer Geschwindigkeit doch dieselbe Winkelgeschwindigkeit und dieselben Fliehkräfte, also gleiche Erregerfrequenz und gleiche Erregerkraft entwickeln.

Von vielfach zusammengesetzter Art sind die dynamischen Beanspruchungen eines Fachwerkstabes. Neben den Kräften, die er als Teil des Trägers aus dem Schwingungszustande des Trägers aufnimmt, erleidet er Spannungen aus Längs-, Quer- und Drehschwingungen, die er für sich ausführt, und noch weitere Spannungen ergeben sich für einzelne Querschnittsteile, wie abstehende Flanschen, die wieder bis zu einem gewissen Grade unabhängig vom geschlossenen Querschnitt für sich schwingen können.

Auch die Fahrbahnträger schwingen für sich und werden durch mancherlei Stosskräfte beansprucht.

Wie steht es nun mit all diesen Schwingungen, die in mannigfacher Kombination an ein- und derselben Schaulinie in Erscheinung treten können? Sind sie gesetzmässiger Natur und lassen sich mathematisch erfassen, oder sind sie mehr von Zufälligkeiten abhängig?

Wir haben schon erwähnt, dass die dynamische Wirkung einer rollenden Einzellast der theoretischen Behandlung nicht unzugänglich ist. Das gleiche gilt von dem Einfluss eines Zuges aus Einzellasten. Man kann aber die Fliehkraftwirkung der bewegten Last auch ganz fernhalten oder jedenfalls praktisch unschädlich machen, indem man die Träger so überhöht, dass ihre Biegelinie bei Vollbelastung zur Geraden wird. Dann wird eine grosse Schwierigkeit ausgeschaltet. Die übrigen Schwingungserscheinungen lassen sich leichter verfolgen, sowohl theoretisch, als versuchstechnisch. Und zwar liegt auf der versuchstechnischen Seite das Schwergewicht. Man wird hoffen dürfen, dass es wissenschaftlichen Versuchen gelingt, die Grenzen festzulegen, innerhalb deren sich die einzelnen schwingungerregenden Ursachen auswirken. Wenn die bisherigen Versuche hierauf, soweit wir übersehen können, keine bestimmte Antwort gegeben haben, so liegt das wohl daran, dass praktisch, wenn man keine Vorsorge dagegen trifft, immer mehrere Ursachen zusammenwirken, die sich gegenseitig stören.

Wenn man sicher wäre, dass immer gegenseitige Störungen aufträten, die die Ausbildung grosser Schwingungs ausschläge (grosser dynamischer Beanspruchung) verhinderten, dann könnte man wohl von planmässigen wissenschaftlichen Versuchen absehen und sich mit Grosszahlforschung begnügen. Leider aber ist man nicht sicher, dass es nicht auch einmal anders sein kann. Wir brauchen also eine Vertiefung unserer Kenntnisse, und diese wird man sich davon versprechen können, dass man versucht, den Einfluss der einzelnen Ursachen zunächst zu trennen und dann ihr Verhalten zueinander zu beobachten. Zu dieser Hoffnung scheinen die Fortschritte zu berechtigen, die in den letzten Jahren die Ausbildung der Messgeräte und die Forschungsmethoden genommen haben. Die Forderung, dass die Geräte unverzerrte Aufzeichnungen liefern müssen, kann heute wohl als erfüllt angesehen werden. Damit ist bei

der Bedeutung, die die Streuwerte für die Vorschriften haben, eine ganz wichtige Tatsache gegeben, insofern als man es in Zukunft nicht mehr mit vermeintlichen, auf falschen Aufzeichnungen beruhenden, sondern nur noch mit wirklichen Streuwerten zu tun haben wird, die vielleicht in engeren Grenzen bleiben, als man bisher annehmen musste. Weiter bietet die Schwingmaschine, wie sie z. B. bei den englischen Versuchen des Jahres 1923 zur Anwendung kam und heute von der Deutschen Reichsbahn verwendet wird, die Möglichkeit, eine Brücke auf alle praktisch wichtigen Eigenfrequenzen hin abzutasten ; der Schweizerische Einachswagen erlaubt es, die gegenseitigen Störungen mehrerer Achsen auszuschalten um die Wirkung einer konstanten Last zu untersuchen und der von Professor Kulka in der Bautechnik 31, Heft 26 vorgeschlagene Durchbiegungsmesser gibt ein Verfahren an die Hand, mit dem man die Schwingungen aller Knotenpunkte einer Gurtung gleichzeitig aufzeichnen und daraus die Schwingungsformen der Träger ableiten kann. Gestützt auf diese Verbesserungen lässt sich ein umfassendes Versuchsprogramm aufstellen. Die Kenntnis aller Eigenfrequenzen hilft dazu, bei den Versuchen unerwünschte Einflüsse fernzuhalten und erleichtert die Auswertung der Schaulinien, da die Perioden der Einzelschwingungen bekannt sind, aus denen sich die Schaulinien aufbauen. Eine andere notwendige und erfolgversprechende Aufgabe liegt in der Ausdehnung der Beobachtungen auf die Ermittlung der Dämpfungsverhältnisse von Brücke und Fahrzeug. Die Grösse der Dämpfungen muss zahlenmässig geklärt werden. Bisher scheiterte, wie schon erwähnt, die rechnerische Verfolgung mancher Beobachtungen an der Ungewissheit, die in dieser Hinsicht bestand.

Dagegen wird es niemals möglich sein, für eine bestimmte Brücke und gegebene Belastungen die dynamischen Beanspruchungen in einzelnen vorauszuberechnen. Im praktischen Falle wirken, wie gesagt, stets mehrere schwingungserregende Ursachen zusammen, die von so vielen Umständen abhängen, dass ihr zeitliches Zusammentreffen durch kein mathematisches Gesetz erfasst werden kann. Das Ziel der Versuchsforschung kann nur darin liegen, Stosszahlen aufzustellen, die, wie schon heute, die ungünstigste Summierung der einzelnen dynamischen Beanspruchungen berücksichtigen, aber besser begründet sind, als die bisherigen.

Wenn es in Auswertung der im « Report Of The Bridge Stress Committee [1] » veröffentlichten hervorragenden englischen Versuche gelungen ist, Lokomotivtypen zu erkennen und auszuscheiden, die sich für die Brücken als schädlich erwiesen, so darf man wohl hoffen, dass es auch gelingen wird, aus planmässigen Versuchen Gesichtspunkte für die bauliche Durchbildung der Brücken zu gewinnen, durch die eine Summierung ungünstiger dynamischer Wirkungen verhindert wird. Im Hinblick auf die lotrechten Fliehkräfte ist das ja schon angedeutet ; das weitere Streben muss darauf gerichtet sein, das Auftreten von Streuwerten auszuschliessen. Die Aufgabe, die sich hiernach für die Versuchsforschung abzeichnet, ist gross und mühsam. Sie kann nicht gelöst werden ohne planmässige wissenschaftliche Vorbereitungen, und mit den Versuchen muss, wenn sie die Aufgabe erschöpfen wollen, zugleich der weitere Ausbau der Theorie Hand in Hand gehen. Im Laboratorium lassen sich die Versuche nicht

1. London, published under the authority of his Majesty's Stationery Office, 1928.

durchführen, sondern nur an wirklichen Brücken und mit den Fahrzeugen des Verkehrs. Es leuchtet auch ein, dass die Spannungen, die man aus den Messungen gewinnt, nicht verglichen werden können mit den Spannungen, die man nach den üblichen vereinfachenden Berechnungsverfahren erhält, wobei die Knotenpunkte der Fachwerke als Gelenke angesehen werden, sondern, wenn die Stosszahlen, die man sucht, Wert haben sollen, so muss man sie auf statische Spannungen beziehen, die der Wirklichkeit so genau wie möglich entsprechen. Das heisst, man muss die Steifigkeit der Knotenpunkte und der Stäbe in die Rechnung einführen. Wenn diese Arbeit sehr zeitraubend ist, so hat sie doch das Gute, dass man gezwungen ist, sich gründlich mit den Nebenspannungen zu beschäftigen und dass dadurch zugleich auf dieses Gebiet mehr Licht fallen wird, dass man jedenfalls praktisch klarere Vorstellungen von der Grösse dieser Spannnngen erhält. Ist das erreicht, so mag man die Nebenspannungen einbeziehen und die Stosszahlen wieder zu den statisch errechneten Grösstkräften in Beziehung setzen.

Nach dem eben Gesagten kann es nicht zweifelhaft sein, dass die Durchführung der Arbeit nicht von dritter Seite kommen wird, sondern der Initiative der Eisenbahnverwaltungen überlassen bleibt.

Bei dieser Sachlage ist es zu begrüssen, dass sich aus den Reihen der Kongressmitglieder stets Kräfte gefunden haben, die bereit sind, der Wissenschaft zu dienen und Mittel für die Forschung bereitzustellen. Und deshalb ist es vielleicht auch nicht abwegig, wenn unter dem Thema des allgemeinen Berichtes einmal die Frage aufgeworfen wird, ob die « Internationale Vereinigung » die Forschung nicht auch dadurch fördern könnte, dass sie ein die Grundlagen der Brückendynamik umfassendes Sammelwerk bearbeiten lässt. Das Bedürfnis nach einem solchen dürften schon viele Fachgenossen gefühlt haben, denn heute liegen die Dinge so :

Wer das dynamische Verhalten der Brücken beherrschend verstehen oder auch nur das Schrifttum mit vollem Nutzen verfolgen will, muss über umfangreiche Kenntnisse aus Mathematik, Mechanik, Maschinenbau und Gerätekunde verfügen. Ein Brückeningenieur, der diese Spezialkenntnisse nicht aus der Studienzeit oder der praktischen Arbeit mitbringt, der sich vielleicht jahrelang ausschliesslich mit Statik beschäftigt hat, und sich nun mit Brückenschwingungen und dynamischen Messungen vertraut machen will, sieht sich vor eine überaus mühselige Arbeit gestellt. Fast unübersehbar kann sie ihm zunächst erscheinen, wenn er sich an das vorhandene Schrifttum wendet. Es gibt unzählige Bücher, die sich mit dem Gegenstande beschäftigen, aber nirgends findet er das, was er braucht, in bequemer Form, nein, aus einer Unzahl von Lehrbüchern und Abhandlungen muss er sich's zusammensuchen. Hierunter leiden zunächst die Kontrollingenieure, denen die Prüfung und ständige Beobachtung der Brücken im Betrieb anvertraut ist ; sie müssen mit allerlei Geräten hantieren, deren Theorie sie nicht beherrschen und sie gewinnen Aufzeichnungen, die ihnen vielleicht Rätsel aufgeben.

Dieser Zustand widerspricht ganz der sonstigen Übung der Eisenbahnverwaltungen. Überall sonst gibt man den Bediensteten Dienstvorschriften in die Hand, die in verständlicher Weise den Wissensstoff zusammenfassen, den sie brauchen. Hier fehlt das — aus verständlichen Gründen. Mit einer kurzen

Anweisung ist's eben nicht getan, sie würde ohne eingehende Spezialkenntnisse aus den Hilfswissenschaften nicht verstanden werden. Man braucht eine Anweisung, die zugleich die wissenschaftlichen Grundlagen einbezieht und auch denen etwas gibt, die an leitender Stelle stehend, für wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Fortschritt zu sorgen haben.

Aber weiter : Werfen wir einen Blick auf die neueren Abhandlungen in den technischen Zeitschriften. Wird man nicht den Eindruck haben müssen, dass hier ein Missverhältnis besteht zwischen der Summe an Arbeit und Wissen, den sie einschliessen und dem Nutzen, den sie stiften ? Wenn der Leser die Gesetzmässigkeiten der Schwingungslehre nicht mathematisch beherrscht, dann wird ihm so manche wertvolle Bemerkung verloren gehen, er wird aus Widerprüchen und Unklarheiten nicht herauskommen. Und vielleicht darf man sogar noch einen Schritt weitergehen und etwas aussprechen, was nicht als Kritik an den Forschungsarbeiten selbst empfunden werden möge : Wenn man die verschiedenen Abhandlungen liest, so kann sich wohl die Frage auf drängen, ob die Forscher, selbst sich in den Grundanschauungen über die Wege zum Erfolg einig sind. Wie wäre es wohl, wenn es darüber einmal zu einer Aussprache käme? Wäre man sicher, dass nicht Meinungsverschiedenheiten bestehen würden ? Und nun bedenke man, wie gross, zeitraubend und kostspielig noch die Aufgabe der Forschung ist. Eine einzelne Verwaltung, geschweige denn ein einzelner, kann sie nicht leisten, nur gemeinsame Anstrengung nach wissenschaftlich begründetem Plane kann sie bewältigen. Ehe aber von einem wohl überlegten gemeinsamen Plane die Rede sein kann, müssen alle Meinungsverschiedenheiten beseitigt werden und das könnte geschehen, wenn das, was Grundlage und Ausgangspunkt sein muss, einmal ausgesprochen wird in einer Form, die sich der Kritik stellt. Meinungstreit zu entfesseln und auszutragen, könnte eine erste nützliche Aufgabe des Entwurfes der « Grundlagen der Brückendynamik » werden. Der Entwurf sollte Gegenstand der Diskussion sein, bis er nach übereinstimmendem Urteil der besten Sachkenner das geworden ist, was er sein soll : der sichere Führer und Ratgeber und Ausgangspunkt für die Forschung.

Unter der Annahme nun, dass eine Sammlung der Grundlagen der Brükkendynamik das Interesse der Vereinigung finden könnte, seien im Folgenden einige Gedanken über Inhalt und Form eines solchen Werkes entwickelt.

1. Die Gesetze der Schwingungslehre lassen sich mit elementaren Hilfsmitteln nicht einwandfrei ableiten. Es müssen also gewisse mathematische Kenntnisse, einschliesslich der Elemente der höheren Analysis vorausgesetzt werden. Der mathematische Teil würde danach mit den einfachen harmonischen Schwingungen beginnen und weiter die gedämpften freien und die erzwungenen Schwingungen behandeln. Schon hier aber muss das Werk, Hand in Hand mit der Forschung, selbständig seinen Weg gehen. Die mathematischen Lehrbücher begnügen sich damit, für die Dämpfung bequeme Annahmen zu machen und Buchstabengrössen einzuführen. Der Brückenbauer braucht Zahlenangaben und muss wissen, inwieweit seine Bauwerke den theoretischen Annahmen gerecht werden. Die Theorie der erzwungenen Schwingungen fragt hauptsächlich nach dem Beharrungszustand und interessiert sich für die begleitenden Eigenschwingungen nur insofern, als sie zur

Angabe des allgemeinen Integrals der Schwingungsgleichung nötig sind. Für den Brückenbauer aber sind gerade die durch das Hinzutreten der Eigenschwingungen charakterisierten Anfangsbewegungen wichtig, weil die Eigenschwingungen der Brücken sehr schwach gedämpft sind, also lange anhalten und zudem immer auf's neue erregt werden.

Während bis hierher die Schwingungslehre mehr Vorstufe und die Grundlage für das Verständnis der Brükkenmessgeräte bildet, geht die Betrachtung eines Trägers als eines elastischen Stabes schärfer auf die Feinheiten der Bewegungsvorgänge ein. Dieses Gebiet ist nicht ganz einfach und weder nach der mathematischen noch nach der versuchstechnischen Seite hin als abgeschlossen zu betrachten. Auf Grund der bisherigen Beobachtungen wissen wir z. B. nicht viel darüber, ob ein Träger als Ganzes, oder u. U. auch in mehreren Wellen, also mit Knoten, schwingt. Das zu wissen, ist aber sehr wichtig, denn, wenn man aus den Durchbiegungen auf die Spannungen schliessen will, macht es einen bedeutenden Unterschied, ob eine bestimmte Durchbiegung Pfeil der Grundwelle oder einer Oberwelle ist. Man kann also Durchbiegungsmessungen zu Spannungsberechnungen nur gebrauchen, wenn man die Schwingungsform eines Trägers genau kennt, wie es das oben genannte Verfahren von Professor Kulka erstrebt.

Auch in diesem Zusammenhange sehen wir wieder, dass es nicht mit Auszügen aus dem vorhandenen Schrifttum getan ist, sondern dass selbständiges wissenschaftliches Arbeiten verlangt wird.

Ein Fall, für den die Schwingungsform eine besondere Rolle spielt, und der bisher auf besonders unsicheren Grundlagen beruht, ist die Berechnung der Schutzbrücken, die den Stoss herabfallender Lasten von Förderbahnen und dergl. auffangen sollen. Wohl gibt es dafür eine Reihe von Vorschlägen, aber alle Berechnungen beruhen auf theoretischen Annahmen, denen die versuchstechnische Bestätigung fehlt. Hier darf man sich wohl von der Kulka'schen Methode besondere Erfolge versprechen. Wenn der Zeisss-Kulka-Durchbiegungsmesser in die Versuchsforschung Eingang findet, so erwächst für die Bearbeiter der « Grundlagen » die Aufgabe, die Entwicklung zu verfolgen und die Auswertung der Messungsergebnisse vorzuführen, d. h. gewisse Gebiete der Interpolations- und Differenzenrechnung zu behandeln.

Weiter hatten wir oben auf Kopplungserscheinungen hingewiesen. Dass die gegenseitige Beeinflussung von Brücke und Fahrzeug von Bedeutung werden kann, haben die grossen englichen Versuche, über die in dem schon genannten « Report » berichtet ist, bewiesen. Man kann also an den Kopplungserscheinungen nicht vorübergehen. Auch hierbei wird an den Bearbeiter die Forderung selbständigen wissenschaftlichen Schaffens gestellt, denn die bisher vorliegenden, — nicht für den Brückenbauer bestimmten, sondern anderen Problemen gewidmeten — Abhandlungen reichen nicht hin, die naheliegenden praktischen Fragen des Brückenbaues zu beantworten.

Selbstverständlich kann eine Sammlung der mathematischen Grundlagen nicht an der harmonischen Analyse als dem unentbehrlichen Hilfsmittel für die Zergliederung und Deutung der aufgenommenen Schaulinien vorübergehen. Die Annäherung gegebener Linienzüge durch endliche und unendliche trigonometrische Reihen müsste besonders eingehend behandelt werden.

Schliesslich könnte sich das Sammelwerk ein Verdienst erwerben, wenn es Auszüge aus den wertvollsten Arbeiten der rückliegenden Zeit brächte, soweit diese nicht ohnedies zur Vervollständigung der Theorie Verwendung finden müssten. Man findet ja häufig Hinweise auf berühmte Arbeiten, aber das genügt nicht ; der Leser braucht eine ausführliche Besprechung, die neben den Ergebnissen die Gedankengänge der Untersuchung klar erkennen lässt, und die Voraussetzungen herausarbeitet, auf denen sie beruht. Die Beschäftigung mit älteren Arbeiten ist deshalb oft so fruchtbar, weil sie gewisse Grundfragen, die in neueren Lehrbüchern der Fülle des Stoffes wegen nur kurz gestreift werden, besonders klar behandeln. Auch dahingehende Hinweise sind wertvoll.

Auch über die Form ist vielleicht eine Bemerkung am Platze :

Eine Darstellung, die sich darauf beschränkt, die Formeln zu entwickeln und zu diskutieren, kann dem Praktiker nicht genügen. Sich Formeln gegenwärtig zu halten und ihre Tragweite zu überblicken, ist nicht jedermann's Sache. Die Beschäftigung mit der Theorie gewährt grösseren Gewinn, wenn die Hauptergebnisse in Worte gefasst werden. Sie erhalten dadurch mehr Leben und prägen sich leichter ein. Dass man mit solchen Mitteln arbeiten kann, darin liegt die eigentümliche Stärke einer wissenschaftlichen Darstellung, die sich auf ein engeres Gebiet beschränkt.

2. In neueren Abhandlungen, namentlich von russischer Seite, ist darauf hingewiesen worden, dass die Schaulinien von Spannungen und Durchbiegungen auch dann äusserlich den Charakter von Schwingungen tragen müssten, wenn die Formänderungen ohne Massenwirkungen nach rein statischen Gesetzen vor sich gingen. Man denke an die unseres Wissens von Rabut eingeführten Summeneinflusslinien für Lastgruppen. Hiermit erhält man für die theoretischen Linienzüge irgendwelcher Messgrössen, z. B. für das Biegungsmoment oder für die Durchbiegung in einem Punkte der Fahrbahnträger, in der Tat gezähnte Linienzüge, die den dynamischen Schaulinien, wie sie von den Messgeräten praktisch aufgezeichnet werden, sehr ähneln.. Das gilt schon für konstante Lasten. Nun aber sind die Achslasten nicht konstant, sondern sie schwanken um die Anderungen des Federdruckes. Bei Eisenbahnbrücken kommt hinzu, dass die Achsdrücke der Treib- und Kuppelachsen um den Betrag der freien Fliehkräfte periodisch zu- und abnehmen. Solcher Lastschwankungen der rollenden Lasten gibt es, wie wir schon eingangs ausführten, noch mehr, und sie müssen, schon statisch betrachtet, auf alle Schaulinien einen ähnlichen Einfluss ausüben, wie vorhin der Wechsel der Laststellungen.

Wenn nun auch sicherlich die Formänderungen der Brücken nicht bloss ein statisches Abbild der eben skizzierten statischen Lastschwankungen sein können, so zeigt doch einerseits die Theorie, dass die Schwingungsweiten der von den rollenden Lasten erzwungenn Schwingungen und der Einfluss der Trägheitskräfte der rollenden Massen im allgemeinen rechtgering sind, andererseits die Erfahrung, dass die periodischen Schwankungen der Achsdrücke sich in den Schaulinien deutlich ausprägen, ohne im allgemeinen zu einem Aufschaukeln zu führen. Darum wäre es sicher von Interesse, wenn im Sinne der russischen Anregungen die Forschung auch auf die Feststellung ausgedehnt würde, inwieweit die Schaulinien aus den Einflusslinien für Lastgruppen unter Berücksichtigung der oben erwähnten Lastschwankungen erklärt werden können.

Für unser Handbuch entspringt daraus aber die Aufgabe, die störenden Bewegungen der Lokomotiven, soweit sie nicht innerhalb der Maschinen selbst oder innerhalb der Schienen ausgeglichen werden, sondern auf die Brücken übergehen, zusammenfassend zu behandeln. Für Strassenbrücken, bei denen die Resonanzerscheinungen noch eine grössere Rolle spielen, als bei den Eisenbahnbrücken, käme dazu der Bau der Strassenfahrzeuge und die Untersuchung ihrer dynamischen Eigenschaften.

3. Wenn so die mathematischen und technischen Grundlagen zusammengefasst sind, so fehlt für dass volle Verstädnnis des Schrifttums als Drittes nur noch die Lehre von den Messgeräten und ihre Theorie. Es würde genügen, wenn die neuen Geräte und Messverfahren behandelt würden, aber es bleibt wünschenswert, dass auch diese Kenntnisse auf eine breitere Grundlage gestellt würden, indem auch die Messtechnik im allgemeinen zur Behandlung käme.

TRADUCTION

par M. Gossieaux, Ing., Paris.

Jusqu'à maintenant et dans la plupart des pays, les Règlements concernant les Ponts introduisent dans les calculs les influences dynamiques exercées par les charges, en prescrivant l'emploi, sous forme de courbes ou de tableaux, de coefficients déterminés, dits « coefficients de choc », par lesquels il faut multiplier les moments fléchissants déterminés statiquement et les efforts tranchants qui résultent de l'intervention des charges roulantes. Il convient d'ailleurs de remarquer que ces coefficients diffèrent très sensiblement entre eux d'un pays à l'autre. Ce fait montre déjà leur caractère empirique et indique que ces coefficients ne peuvent pas être considérés comme quelque chose de définitif.

En fait, pour pouvoir indiquer des coefficients de choc qui soient rigoureux, il faudrait savoir par l'expérience quels sont les efforts dynamiques qui prennent naissance, dans les diverses conditions de la pratique et être en mesure de les introduire dans les calculs, ou bien être à même de résoudre le problème par des voies théoriques.

Où la question en est-elle, à ce point de vue?

L'expérience doit s'appuyer sur des mesures, mesures de déformations ou mesures d'efforts. Elle est donc en défaut tant que l'on ne dispose pas d'appareils qui permettent de déterminer exactement les grandeurs à mesurer et tant que les résultats fournis par les observations ne permettent pas de pénétrer à fond les phénomènes oscillatoires et de les expliquer entièrement. Jusqu'au moment où furent publiés des règlements tenant compte des phénomènes de choc, on n'avait pas encore disposé d'appareils de mesure satisfaisants ; si ces appareils ont, depuis, subi des perfectionnements notables, on ne possède toutefois pas encore aujourd'hui des résultats expérimentaux suffisants pour pouvoir combler les lacunes et remédier aux imperfections des prescriptions qui concernent le point de vue dynamique.

Par ailleurs, en ce qui concerne la théorie, la science mathématique met à la disposition des investigateurs des moyens puissants ; il existe toutefois un

grand nombre de questions auxquelles la théorie seule ne pourra jamais donner de solution, telles que la question de savoir dans quelle mesure les ouvrages que nous construisons répondent aux notions théoriques de principe sur le processus des oscillations et quelles valeurs il convient de donner, dans les calculs, aux coefficients que comportent les formules.

En ce qui concerne la justification scientifique des coefficients de choc, aucune évolution notable n'est intervenue au cours de ces dernières années ; il importe toutefois de signaler que la construction des appareils de mesure et les méthodes d'investigations ont réalisé des progrès satisfaisants. Il est, par conséquent, bien naturel que l'on se soit demandé si, d'une manière générale, il est possible d'établir des prescriptions pratiques, reposant sur des bases scientifiques théoriques, ou s'il ne convenait pas plutôt de s'en tenir tout simplement aux résultats fournis par l'expérience. Quoique l'on y ait déjà consacré beaucoup de temps et d'efforts, l'on n'est pas encore actuellement en mesure d'interpréter d'une manière satisfaisante les diagrammes fournis par les appareils et encore moins de prévoir les caractéristiques dynamiques d'un ouvrage. On a bien élucidé des points intéressants, tels que les phénomènes de résonance et d'accouplement des oscillations, mais lorsque l'on a voulu pousser à fond, par le calcul, l'étude de ces questions, on a été réduit à toutes sortes d'hypothèses, parce que les observations effectuées n'étaient fréquemment pas suffisantes pour fournir au calcul des bases précises. Il ne faut toutefois pas jeter le discrédit sur ces observations ; bien au contraire, les recherches qui ont été effectuées jusqu'à maintenant doivent être considérées comme conservant toute leur valeur ; elles ont permis, en effet, de constater quelles étaient les difficultés de la tâche et elles ont fourni tout au moins une base préliminaire pour les travaux ultérieurs. Il convient de faire remarquer à ceux qui manifestent encore un doute, d'ailleurs fort compréhensible, que si les phénomènes de résonance et d'accouplement des oscillations présentent les caractères des phénomènes qui obéissent à des lois, par contre, à côté de ceux-là, il s'en présente d'autres qui apparaissent comme si irréguliers et liés à tant de conditions diverses que l'on ne sait vraiment pas comment en aborder l'étude rigoureuse.

En fait, il ne s'agit pas, pour eux, de renoncer à l'étude théorique de la question, mais ils n'entrevoient, comme résultats possibles, que l'obtention de formules empiriques résultant d'un grand nombre d'essais. Si nous avons bien saisi la question telle qu'elle se présente, ils estiment qu'il faut répéter, dans les conditions normales d'exploitation, et sans se lasser, les mesures d'efforts et de déformations ; l'expérience montrera alors dans quelles limites s'exercent les influences dynamiques. On pourrait s'en tenir à cette méthode, si les mesures courantes effectuées dans les conditions les plus diverses donnaient, des phénomènes, une image à partir de laquelle on puisse tirer des lois déterminées. Ce n'est toutefois pas le cas. On trouve souvent, en effet, des valeurs qui sortent des limites normales et ces exemples réclament des justifications, faute de quoi il subsisterait un doute dans l'interprétation des prescriptions et on ne pourrait pas y trouver l'assurance qu'elles doivent donner. Cette raison suffirait, à elle seule, pour que l'on entreprenne tous les efforts nécessaires afin de pousser d'une manière très serrée le développement des connaissances

que l'on a acquises jusqu'à maintenant. Il est donc de toute importance de savoir si, dans la dynamique du Pont, il faut attribuer le plus grand rôle à la régularité des lois physiques ou à la fantaisie du hasard et si l'on pourra s'affranchir, tout au moins partiellement, de cette dernière. Il en dépendra l'emploi des formules purement empiriques élaborées par la méthode quasi-statistique, ou celui de moyens dus à un niveau scientifique plus élevé.

Pour éclaircir quelque peu la question et pour pouvoir prendre position à ce sujet, nous allons jeter un coup d'œil sur les processus dynamiques qui interviennent dans la manière dont se comporte un pont, tout en nous limitant à des faits connus.

Considérons tout d'abord une poutre à âme pleine admettant un moment d'inertie constant, sans oublier toutefois, en même temps, que les poutres en treillis ne se comportent pas d'une manière sensiblement différente, ainsi que le montrent la théorie et la pratique.

Le premier cas auquel on se reporte généralement tout d'abord est celui d'une charge constante, appliquée en un point fixe. La poutre, tendant à se mettre en équilibre avec la charge, subit un fléchissement. Comme toutefois les efforts (efforts dans les barres lorsqu'il s'agit d'une poutre en treillis) croissent progressivement à partir de zéro, tandis que la charge se maintient à sa pleine valeur normale, l'énergie potentielle qui s'accumule dans la poutre (par suite du travail de déformation) reste tout d'abord inférieure au travail produit par la charge. L'excès du travail extérieur passe sous forme d'énergie de mouvement à la masse de la poutre, ainsi qu'à la masse inerte de la charge; cette énergie atteint sa valeur maximum lorsque la poutre a pris la forme qui correspond à son état d'équilibre statique.

L'énergie ainsi accumulée chasse maintenant la poutre au delà de cette position d'équilibre. Par suite, la charge descend encore et produit un nouveau travail. Mais cette fois, l'accroissement du travail de déformation (qui croît en effet avec le carré du fléchissement) est supérieur à l'accroissement du travail extérieur. L'oscillation de la masse subit un amortissement et finit par atteindre, après une double déformation statique, un point correspondant à un repos instantané, l'oscillation reprenant ensuite dans le sens opposé.

Cette considération ne permet pas de conduire à l'hypothèse qu'une charge roulante devrait provoquer également sur la poutre la double déformation statique. La théorie indique plutôt que dans ce cas, la déformation d'origine dynamique est seulement légèrement supérieure à la déformation statique. On en déduit une idée de ce qui se passe, par exemple, dans le cas d'une poutre qui serait surélevée en son milieu d'une quantité f, qui correspondrait au fléchissement provoqué sur la poutre par une charge Q. La charge à laquelle se trouve tout à coup soumis le milieu de la poutre a produit un travail $Q.f$ au moment où la poutre a subi ce fléchissement f. La charge roulante venant de l'appui n'a toutefois subi aucune dénivellation par rapport à cette position du milieu de la poutre. Pour pouvoir subir le fléchissement f, elle a tout d'abord subi évidemment une certaine dénivellation vers le haut, quoique d'une importance inférieure à f. Le fléchissement qui résulte de l'intervention de la charge roulante s'exerce de telle sorte que celle-ci parcourt un trajet incurvé

et qu'elle met par suite en jeu des efforts centrifuges s'exerçant dans le plan vertical.

Dès que le phénomène d'oscillation commence à se produire, le trajet suivi par la charge roulante devient extrêmement compliqué ; il ne peut en effet pas être confondu avec la courbe de déformation de la poutre, pas plus qu'avec le diagramme de flexion des nœuds de l'assemblage. Il n'est pas sans présenter une certaine analogie avec ces dernières courbes ; en effet, sur une courbe de fléchissement moyen, se superpose un parcours ondulatoire correspondant aux oscillations libres de la poutre ; le trajet ainsi parcouru n'est toutefois pas symétrique par rapport au milieu de la poutre et sa pente est plus accusée du côté non chargé que du côté chargé de la poutre. Suivant que, à un instant donné, la trajectoire se trouve incurvée vers le haut ou vers le bas, la charge par essieu s'en trouve augmentée ou diminuée, par suite de l'intervention de la force centrifuge. Il existe donc la possibilité de compenser l'une par l'autre les influences qui peuvent être exercées par plusieurs charges et c'est d'ailleurs généralement le cas. En outre, il est à noter que la valeur de la force centrifuge ne dépend pas de la courbure propre des voies elles-mêmes, sur lesquelles circulent les essieux, mais bien de la trajectoire parcourue par le centre de gravité de la charge qui se rapproche d'une droite, grâce à la suspension élastique des véhicules.

Aux oscillations prises en considération jusqu'à maintenant, s'ajoutent des oscillations forcées, provoquées par des efforts centrifuges indépendants qui prennent naissance sous l'action des contrepoids additionnels des essieux moteurs et des essieux couplés des locomotives, ainsi que, dans certains cas, par les efforts verticaux, périodiquement alternés que les crosses des pistons exercent sur leurs glissières.

L'influence des efforts centrifuges indépendants est double ; à côté des impulsions verticales, ils donnent également naissance à un moment de torsion périodiquement alterné perpendiculairement à l'axe de l'ouvrage et qui provoque dans les poutres principales des oscillations qui se trouvent en opposition de phase. Les efforts périodiques qui en résultent doivent être pris en considération d'une manière particulière, tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, car ils peuvent dans certains cas amorcer dans un pont des phénomènes de résonance très intenses. L'influence de ces derniers est, en pratique, plus importante que celle des phénomènes de résonance provoqués par la superposition des oscillations, et dont il sera question plus loin, car cette influence ne subit en effet que l'amortissement exercé par la charpente, et qui est toujours très faible.

Des efforts rythmés se produisent également aux joints de dilatation des rails et ces efforts transmettent aux ponts des impulsions qui se produisent à des intervalles de temps plus ou moins réguliers.

Les oscillations résultantes se composent donc d'oscillations propres (amorties et qui, par suite, tendront à disparaître) et d'oscillations forcées (ou entretenues). Par suite, il est très important que l'amortissement soit faible dans les charpentes de ponts ; cela a en effet pour conséquence que les oscillations propres, qui se superposent aux oscillations forcées et assurent par suite, par résonance, une certaine protection contre le « balancement » ne s'amortissent

que lentement, et même qu'elles ne cessent jamais complètement, étant renouvelées par de nouvelles impulsions.

La période des oscillations est déterminée par la résistance de la poutre à la flexion et par l'importance et la répartition des masses participant à ces oscillations ; ces dernières sont constituées par la masse totale du pont et par celle du train, qui varie sans cesse dans son parcours, en valeur et en position. Cette variation de la masse qui est soumise aux oscillations présente une grosse importance, car elle a pour conséquence une modification incessante de la période d'oscillation ; donc, elle gêne ces oscillations. Toutefois, dans un autre ordre d'idées, les charges roulantes et les efforts qui en résultent ne constituent pas non plus un système de charges constantes, mais bien variables. En particulier, la charge unitaire par essieu se compose du poids de l'essieu lui-même et d'une pression exercée par le système de suspension, et qui peut varier entre des limites très étendues. C'est ce qui se produit, par exemple, lorsque l'accélération du mouvement oscillatoire du pont prend une valeur telle que la résistance au frottement des guides des boîtes d'essieu et des lames des ressorts se trouve surmontée et que les ressorts de suspension entrent en oscillation. A ce moment, réagissent réciproquement les unes sur les autres, d'une part, les masses des véhicules suspendus, d'autre part, l'ensemble constitué par la masse du pont et celle des véhicules qui ne sont pas suspendus ; il en résulte des phénomènes de superposition d'oscillations libres, les oscillations résultantes pouvant être constituées par deux oscillations harmoniques distinctes, en général, l'une d'elles ayant une fréquence plus faible et l'autre une fréquence plus élevée, mais pouvant également ne comporter que l'une des deux. Dans le cas de l'oscillation à faible fréquence, les masses qui se trouvent ainsi accouplées par l'intermédiaire des ressorts de suspension des véhicules oscillent dans le même sens (en concordance de phase) ; lorsqu'il s'agit de l'oscillation de fréquence plus élevée, elles se trouvent en opposition de phases. Dans le dernier cas, tout se passe comme si la masse des véhicules avait un sens opposé à celui de l'ensemble des autres. Outre ces oscillations libres, il peut encore se produire des oscillations forcées résultantes.

Lorsque la période des oscillations rapides coïncide avec celle des efforts centrifuges dans les trains de vitesse, les efforts mis en jeu deviennent très importants, mais les oscillations dues à la résonance sont fortement amorties par l'intervention du frottement entre les lames des ressorts et dans les guides des boîtes d'essieux. On a bien observé la mise en jeu d'efforts dynamiques considérables, par suite de la composition des oscillations à fréquence élevée. Toutefois, ces efforts ne se produisent pas seulement dans les trains de vitesse, mais également dans les trains de marchandise à marche accélérée, car ceux-ci, pour une vitesse plus faible, développent toutefois la même vitesse angulaire et les mêmes efforts centrifuges, donc les mêmes fréquences et les mêmes efforts d'excitation.

Les efforts dynamiques que subit un élément du treillis sont souvent la résultante d'influences multiples. A côté des efforts auxquels il est soumis par suite de l'état d'oscillation de la charpente et en tant que partie constitutive de cette charpente, il a également à supporter des efforts résultant des oscillations longitudinales, transversales et de torsion auxquelles il est soumis par

lui-même ; d'autres efforts supplémentaires prennent encore naissance dans certaines régions particulières des sections, telles que les brides écartées des centres de gravité auxquels elles appartiennent et qui peuvent, dans une certaine mesure, osciller par elles-mêmes, indépendamment de la section correspondante.

Les poutres supportant les voies sont également soumises à des oscillations propres et subissent par suite des efforts de choc de toute nature.

Que résulte-t-il maintenant de toutes ces oscillations qui peuvent se manifester en se composant de la manière la plus variée sur un même diagramme? Suivent-elles une loi définie et peut-on les analyser mathématiquement, ou faut-il y voir plus encore l'effet du hasard?

Nous avons déjà signalé que l'influence dynamique d'une charge roulante isolée n'est pas inaccessible à l'étude théorique. La même remarque peut s'étendre à l'influence exercée par un train, constitué par un ensemble de charges individuelles. On peut toutefois également éliminer complètement l'influence de l'effort centrifuge exercé par la charge roulante, ou la rendre pratiquement sans danger, par un surhaussement des poutres, de manière telle que la courbe de déformation soit une droite pour la pleine charge. On supprime ainsi une difficulté considérable. Les autres phénomènes oscillatoires se prêtent en effet plus facilement à l'investigation, tant en ce qui concerne le point de vue théorique que les recherches expérimentales. En fait, d'ailleurs, c'est surtout du côté de la recherche expérimentale qu'il importe de s'orienter. On peut espérer, par des essais exécutés sur des bases scientifiques, déterminer les limites dans lesquelles s'exercent les causes particulières qui provoquent les oscillations. Si les recherches qui ont été effectuées jusqu'à maintenant à ce sujet, n'ont pas encore fourni de résultats positifs, c'est parce qu'il est très difficile d'analyser les phénomènes dynamiques suivant leurs causes ou bien de réaliser des dispositifs qui permettent de les isoler.

Si l'on était sûr que ces causes de perturbations s'entravent toujours mutuellement, empêchant ainsi à des chocs oscillatoires plus importants de prendre naissance et entravant par suite la mise en jeu d'efforts dynamiques plus considérables, on pourrait se dispenser de recherches scientifiques systématiques et se contenter de recherches empiriques exécutées en grand nombre. Malheureusement, on n'est nullement sûr qu'il ne puisse jamais en être autrement. Il nous faut donc chercher à approfondir nos connaissances et l'on ne pourra y parvenir qu'en séparant tout d'abord les différentes causes élémentaires, puis en étudiant leurs relations réciproques. Les progrès qui ont été réalisés au cours de ces dernières années, dans la conception des appareils de mesure et dans les méthodes d'investigation paraissent légitimer cet espoir. La nécessité pour les appareils de fournir des indications nettes peut être considérée aujourd'hui comme réalisée. Étant donné l'importance que présentent, dans l'établissement des Règlements, les valeurs accusant une grande dispersion, on a obtenu un résultat très intéressant en ce sens qu'à l'avenir on n'aura plus à craindre que les valeurs ainsi obtenues au cours des essais soient hypothétiques ou qu'elles reposent sur des indications fausses. Ce seront bien des valeurs effectives et elles resteront peut-être dans des limites plus étroites que celles dans lesquelles on devait travailler jusqu'à maintenant. De plus, la machine

pour l'essai aux oscillations, telle que celle à laquelle on a eu recours en 1923 pour les essais qui ont été effectués en Angleterre et que l'on emploie actuellement dans les Chemins de fer allemands, offre la possibilité d'essayer un pont à toutes les fréquences propres qui sont intéressantes dans la pratique. Le truck suisse d'essai à un seul essieu permet d'éliminer les perturbations simultanées provoquées par plusieurs essieux et d'étudier ainsi le mode d'action d'une charge constante. Enfin, l'appareil conçu par le professeur Kulka (Die Bautechnik, 1931, n° 26) met à notre disposition un procédé grâce auquel on peut mesurer simultanément les oscillations en tous les points d'assemblage d'une membrure et en déduire le régime d'oscillation de cette membrure.

Grâce à ces progrès, on peut établir un vaste programme de recherches. La connaissance de toutes les fréquences propres permet d'écarter, au cours des essais, les influences indésirables et facilite la détermination des diagrammes, car on connaît ainsi les périodes des oscillations élémentaires qui servent de base à l'établissement du diagramme. L'extension des observations à la détermination des conditions d'amortissement sur les ponts et sur les véhicules constitue un autre objectif indispensable et d'ailleurs plein de promesses. L'importance des amortissements doit pouvoir être exprimée numériquement. Ainsi qu'on l'a déjà indiqué, on a échoué jusqu'à maintenant dans l'étude analytique de nombreux résultats d'observations, par suite de l'incertitude qui règne dans ce domaine.

Par contre, il ne sera jamais possible de déterminer à l'avance par le calcul les efforts dynamiques élémentaires qui correspondent à un pont déterminé et à un système de charges données. Dans la pratique, interviennent toujours en effet, comme on l'a déjà vu, de nombreuses causes qui donnent naissance à des phénomènes oscillatoires; ces causes dépendent d'ailleurs de conditions si diverses que le processus de leur coïncidence dans le temps ne peut être prévu par aucune loi mathématique. Le but des recherches expérimentales peut donc uniquement être de déterminer des coefficients de choc qui, ainsi qu'on le réalise déjà aujourd'hui, tiennent compte de la somme des efforts dynamiques élémentaires considérés comme agissant dans les sens les plus défavorables, mais établis toutefois sur des bases plus certaines que ceux que l'on adoptait précédemment.

De même que l'on a réussi, au cours des remarquables essais effectués en Angleterre et publiés dans le « Report of the Bridge Stress Committee », à établir que certains types de locomotives sont défavorables à ce point de vue et par suite à pouvoir les éliminer, de même est-on en droit d'espérer que l'on réussira, grâce à des essais systématiques, à déterminer des bases permettant d'éviter la composition des efforts dynamiques dans le sens le plus défavorable; ces bases pourront être utilisées pour déterminer les dispositions à adopter pour la construction des ponts. On peut déjà prévoir un tel résultat en ce qui concerne les efforts centrifuges. On doit donc s'efforcer, par la suite, d'arriver à la suppression des valeurs expérimentales accusant une forte dispersion.

L'objectif qui s'offre ainsi aux recherches expérimentales est important et difficile à atteindre. On ne pourra y parvenir qu'au prix d'une préparation scientifique systématique, à condition d'ailleurs que l'édification ultérieure de la théorie soit poursuivie également. Les essais ne devront pas être effectués au

laboratoire, mais bien sur des ponts réels et avec les propres véhicules que l'on utilise pour le trafic. Il est également évident que les efforts qui seront déterminés au cours des mesures ne pourront pas être comparés avec ceux que l'on obtient par l'application des méthodes de calcul simplifiées que l'on emploie couramment et dans lesquelles les nœuds des charpentes sont considérés comme des articulations. Si l'on veut obtenir des coefficients de choc ayant quelque valeur, il faudra plutôt les déduire des efforts statiques qui correspondent d'une manière aussi rapprochée que possible à la réalité. C'est-à-dire qu'il faudra introduire dans les calculs la rigidité des assemblages et des barres. Si ce travail est de longue haleine, il présente par contre cet avantage que l'on est obligé de se préoccuper à fond des efforts secondaires ; on se trouvera ainsi amené en même temps à jeter plus de lumière dans ce domaine et l'on obtiendra en tout cas des notions plus claires sur la valeur de ces efforts.

D'après ce qui vient d'être exposé, il ne paraît aucunement douteux que l'exécution de ce programme ne peut pas être assurée par un tiers, mais qu'elle appartient toujours à l'initiative des compagnies de chemins de fer. Dans l'état actuel de la question, il faut se réjouir de constater que l'on trouve toujours, dans les rangs des Congressistes, des énergies prêtes à servir la Science et des moyens permettant l'exécution des recherches. Et c'est pourquoi il n'est peut-être pas inopportun, dans le thème d'un exposé général, de demander si l'Association Internationale ne pourrait pas donner l'impulsion correspondante, en jetant les bases d'un travail embrassant l'ensemble de la Dynamique du Pont. Nombre de nos Collègues doivent déjà en avoir senti la nécessité et cette question se présente actuellement de la manière suivante :

Pour pouvoir comprendre pleinement la question de la dynamique du pont ou pour pouvoir seulement suivre avec profit la littérature technique, il faut disposer de connaissances très étendues en Mathématiques, en Mécanique proprement dite, en Construction Mécanique et en Appareils de Mesure. Un ingénieur de ponts qui ne possède pas ces connaissances spéciales de par sa formation d'étudiant ou sa pratique technique, tout en s'étant exclusivement occupé de statique pendant des années, et qui veut ensuite se consacrer à l'étude des phénomènes et des mesures dynamiques, ainsi que des oscillations qui se produisent dans les ponts, se trouve devant une tâche particulièrement ardue. Elle peut, à première vue, lui paraître impossible à embrasser d'un seul coup d'œil s'il l'étudie d'après la littérature existante. Il existe en effet d'innombrables ouvrages qui traitent de ces questions, mais il ne pourra jamais y trouver ce dont il a besoin sous une forme qui lui convienne ; il sera obligé de se documenter en faisant des recherches dans un grand nombre d'ouvrages techniques et de mémoires. De cette situation, les ingénieurs du Contrôle souffrent les premiers, car c'est à eux qu'est confié le contrôle des ponts et leur surveillance permanente en service ; ils doivent employer toutes sortes d'appareils dont ils ne possèdent pas à fond la théorie et ils obtiennent par suite des indications d'essais qui peuvent constituer pour eux de véritables énigmes.

Leur situation est donc en contradiction avec la pratique courante dans les compagnies de chemins de fer. Partout ailleurs, on donne au personnel des règlements d'Exploitation qui groupent d'une manière claire les connaissances techniques dont il a besoin. Ici, cela fait défaut — pour des raisons faciles à

comprendre. On ne donne même pas de directives succinctes, car elles ne seraient pas comprises faute de connaissances spéciales approfondies sur les phénomènes correspondants. Il faudrait disposer d'une instruction qui analyse les principes scientifiques de base et qui apporte en même temps une aide pratique à ceux qui ont à réaliser au premier chef des progrès techniques et économiques.

Plus encore : jetons un coup d'œil sur les derniers travaux publiés par la presse technique. N'a-t-on pas l'impression qu'il y a une disproportion entre la somme de travail et de connaissances qu'ils impliquent et le profit que l'on en retire? Lorsque le lecteur ne possède pas à fond, du point de vue mathématique, les lois qui régissent les phénomènes d'oscillation, telle remarque très intéressante lui échappera et il « nagera » dans les contradictions et les obscurités.

Et peut-être peut-on même pousser la chose un peu plus loin et émettre une idée qui ne doit pas être considérée comme une critique blessante envers les travaux de recherches. Lorsque l'on lit ces différents mémoires, on peut très bien en arriver à se poser la question suivante : les investigateurs eux-mêmes sont-ils d'accord sur les conceptions fondamentales concernant la route à suivre? Que se passerait-il s'il fallait se prononcer à ce sujet? Est-on sûr qu'il ne se manifesterait pas de différences dans les conceptions individuelles? Pensons maintenant à l'importance des recherches à effectuer, au temps et aux frais nécessaires. Une seule Direction, et à plus forte raison, un chercheur isolé, ne peut pas en venir à bout, mais seuls réussiront des efforts communs, s'exerçant d'après des directives scientifiquement établies. Toutefois, avant qu'il puisse être question d'un plan de travail général, judicieusement établi, il conviendrait de supprimer toutes ces divergences d'opinion.

Cela ne pourra être réalisé que si l'on se décide, comme base et comme point de départ des travaux, à exposer une bonne fois la question d'une manière qui se prête à la discussion. Dégager les divergences d'opinion et les éliminer, voilà qui pourrait constituer le premier objectif de ce plan concernant la détermination des « Bases de la Dynamique du Pont ». Ce plan serait l'objet d'une discussion, jusqu'à ce qu'il devienne après accord de tous les spécialistes les plus qualifiés, ce qu'il doit être : le guide sûr et effectif et le point de départ des investigations.

Si l'on admet maintenant que l'Association soit à même de s'occuper du groupement des Bases de la Dynamique du Pont, on trouvera indiquées ci-dessous quelques considérations plus développées sur la teneur et la forme d'un tel travail.

1. Les lois qui régissent les phénomènes oscillatoires ne peuvent pas être étudiées parfaitement en se basant sur de simples notions élémentaires. Il faut donc supposer certaines connaissances mathématiques, y compris celle des éléments de l'analyse supérieure. L'étude mathématique commencera par celle des oscillations harmoniques simples, puis s'étendra aux oscillations libres amorties et enfin aux oscillations forcées. Toutefois dès ce moment, les travaux de recherche expérimentale devront naturellement aller de pair avec les recherches théoriques. Les ouvrages mathématiques se contentent, au sujet de l'amortissement, de faire des hypothèses commodes et de jouer sur des lettres. Le constructeur de ponts, lui, a besoin de renseignements chiffrés et doit savoir

dans quelle mesure ses ouvrages peuvent répondre aux hypothèses théoriques. La théorie des oscillations forcées s'occupe principalement du régime permanent et elle ne s'intéresse aux oscillations propres qui les accompagnent que dans la mesure où elles sont nécessaires pour l'obtention de l'intégrale générale de l'équation d'oscillation. Par contre, pour le constructeur de ponts, les déplacements initiaux caractérisés par l'apparition des oscillations propres sont importants, car les oscillations propres qui prennent naissance dans les ponts sont très faiblement amorties ; elles sont donc de longue durée et elles se trouvent en outre constamment soumises à des impulsions nouvelles.

Jusqu'à maintenant, la théorie des oscillations forme, à proprement parler, un premier degré et constitue une base pour la compréhension des principes des appareils de mesure qui sont utilisés dans la construction des ponts. Par contre, le point de vue qui consiste à considérer une poutre comme un élément élastique pénètre plus profondément dans les détails du processus du mouvement. Ce domaine présente une certaine complexité ; il doit être considéré comme difficilement abordable, tant du point de vue mathématique, que du point de vue expérimental. Si nous nous basons sur les observations déjà effectuées, nous ne sommes, par exemple, pas très sûrs qu'une poutre oscille sur toute sa totalité ou en formant plusieurs ondes, c'est-à-dire en présentant des nœuds d'oscillation. Il est cependant très important de le savoir, car si l'on veut passer des flexions aux efforts, les deux points de vue sont très différents ; une flexion déterminée peut être en effet considérée, suivant le cas, comme flèche correspondant soit à une courbe fondamentale, soit à une harmonique supérieure. Il en résulte que l'on ne peut utiliser les résultats fournis par les mesures des déformations que si l'on connaît avec précision le mode d'oscillation de la poutre, ce que permet d'obtenir le procédé du Professeur Kulka, mentionné plus haut.

On constate également, dans cet ordre d'idées, que l'on ne peut pas tirer parti de la littérature technique existante, mais qu'il faut faire appel à des travaux techniques spéciaux.

Considérons maintenant le cas particulier que constituent les ponts de protection, qui sont destinés à recevoir le choc des blocs qui peuvent tomber des berlines d'extraction ou autres dispositifs de manutention. Il y a là précisément un cas dans lequel le mode d'oscillation joue un rôle particulier et qui repose, jusqu'à maintenant, sur des bases incertaines. Il existe bien, à ce sujet, une série de règles, mais tous les calculs sont basés sur des hypothèses théoriques, auxquelles la confirmation de l'expérience fait défaut. On est ici en droit d'attendre des résultats intéressants de l'application de la méthode de Kulka. Si l'appareil de mesure des fléchissements Zeiss-Kulka est adopté pour les recherches expérimentales, il appartiendra à ceux qui seront chargés d'établir les « Bases de la Dynamique du Pont » de suivre le développement des essais et de les mettre en valeur, c'est-à-dire de faire appel aux notions positives de différence et interpolation.

Nous avons déjà parlé plus haut des phénomènes d'accouplement des oscillations. Les recherches importantes qui ont été effectuées en Angleterre, et qui font l'objet du rapport mentionné plus haut, ont montré que l'influence réciproque des ponts et des véhicules pouvait être considérable. On ne peut donc pas

laisser de côté les phénomènes dits de couplage des oscillations. Les investigateurs se trouveront par suite en présence de la nécessité de faire un travail scientifique absolument nouveau, que les études qui ont été publiées jusqu'à maintenant ne traitent pas, car elles ne sont pas destinées aux constructeurs de ponts, mais abordent plutôt d'autres problèmes. Ces études seront nécessaires pour pouvoir répondre aux questions pratiques de cet ordre que soulève la construction des ponts.

Il est évident que le groupement des principes mathématiques de base ne doit pas laisser de côté l'analyse harmonique, qui constitue le moyen indispensable pour analyser et interpréter les diagrammes obtenus. L'étude d'approximation des diagrammes obtenus, par séries trigonométriques limitées ou illimitées, doit particulièrement être poussée à fond.

Enfin le travail de groupement des éléments de base aurait une valeur encore plus importante s'il résumait également les travaux les plus intéressants qui ont déjà été effectués, pour autant qu'ils ne trouvent pas emploi, par ailleurs, dans les développements de la théorie. On trouve souvent en effet mention de travaux célèbres, mais ce renseignement ne suffit pas ; le lecteur a besoin d'une étude détaillée, qui, à côté des résultats, fasse ressortir d'une manière claire l'évolution du raisonnement dans la suite du travail et qui mette en évidence les hypothèses sur lesquelles repose ce raisonnement. Le travail sur des études antérieures est souvent très fructueux, car il permet d'approfondir et de voir nettement des questions capitales qui ne sont qu'effleurées brièvement dans les nouveaux ouvrages, par suite de l'abondance des matières. Les indications qui s'y rapportent sont donc précieuses.

En ce qui concerne la forme pratique à donner au travail la remarque suivante paraît indiquée.

Un exposé qui se limiterait à développer et à discuter les formules, sans les commenter, ne peut pas être suffisant pour le praticien. Avoir les formules présentes à la mémoire et embrasser leur portée d'un simple coup d'œil n'est pas à la portée de tout le monde. Pouvoir se reporter à la théorie elle-même assure un gros avantage, à condition que les résultats principaux y soient exposés également sous forme de texte. Ils sont ainsi bien plus vivants et ils frappent davantage. C'est précisément la facilité qu'il donne au lecteur de pouvoir travailler dans les conditions ci-dessus, qui constitue la valeur intrinsèque d'un exposé scientifique limité à un domaine restreint.

2. Dans les nouveaux ouvrages, et tout particulièrement dans ceux d'origine russe, on attire l'attention sur le fait que les diagrammes des efforts et des déformations devraient également porter extérieurement le caractère des phénomènes oscillatoires, même lorsque les déformations se sont produites d'après des lois purement statiques, sans intervention de masse. Il s'agirait des lignes d'influence résultantes introduites, à notre connaissance, par Rabut, pour l'étude des groupes de charges. Par exemple, s'il s'agit du moment fléchissant ou du fléchissement en un point d'une poutre supportant la voie, on obtient en réalité des tracés dentelés, qui sont tout à fait analogues à ceux des diagrammes dynamiques, tels qu'ils sont tracés en pratique par les appareils de mesure. Cela se produit même lorsqu'il s'agit de charges constantes. Or les charges sur les essieux ne sont pas constantes, mais elles varient avec les modi-

fications que subit la tension des ressorts. Dans les ponts de chemins de fer, il arrive que les charges sur les essieux moteurs et sur les essieux couplés augmentent et diminuent périodiquement avec la valeur des efforts centrifuges libres. La charge roulante est également soumise à des variations importantes, ainsi que nous l'avons développé au début et ces variations doivent, même au point de vue statique, exercer une influence analogue sur tous les diagrammes, de même que le changement des points d'application des charges.

S'il est également certain que les déformations que subissent les ponts ne constituent pas seulement une image statique des variations statiques de charge qui viennent d'être indiquées, d'une part, la théorie montre toutefois que les amplitudes des oscillations forcées provoquées par les charges roulantes et par l'influence des forces d'inertie des masses roulantes sont en général très faibles ; d'autre part, l'expérience montre que les variations périodiques de charge aux essieux apparaissent nettement dans les diagrammes, sans conduire toutefois, en général, à un balancement régulier. Il serait par suite certainement intéressant d'étendre les recherches, en tenant compte des suggestions russes, jusqu'à déterminer dans quelle mesure les diagrammes tirés des lignes d'influence, pour des groupes de charges, peuvent être interprétés en tenant compte des variations de charges signalées ci-dessus.

Pour notre « Manuel », il en résulte toutefois la nécessité de considérer l'ensemble des influences perturbatrices créées par les locomotives, dans la mesure où elles ne sont pas compensées soit sur la machine elle-même, soit avant d'exercer leur influence sur les roues, c'est-à-dire dans la mesure où elles se transmettent aux ponts eux-mêmes. En ce qui concerne les ponts-routes dans lesquels les phénomènes de résonance jouent un rôle encore plus important que dans les ponts-rail, il faudrait faire intervenir la construction des véhicules routiers et l'étude de leurs caractéristiques dynamiques.

3. Lorsque les principes fondamentaux mathématiques et techniques seront ainsi rassemblés, il ne manquera plus, en troisième lieu, pour la pleine compréhension de la littérature technique, que l'étude des appareils de mesure et de leurs principes théoriques. A première vue, il paraîtrait suffisant d'étudier les nouveaux appareils et les nouvelles méthodes de mesure ; toutefois, il est désirable d'envisager la chose d'une manière plus large et de traiter également, dans ses lignes générales, la technique des mesures elle-même.

Zusammenfassung.

Die bisherigen Bestimmungen der Brückenvorschriften über die Berechnung der dynamischen Wirkung der Lasten können nicht als endgültig angesehen werden.

Theoretische Betrachtungen allein können eine vertiefte Erfassung der dynamischen Vorgänge nicht erschliessen, sondern nur planmässige, durch wissenschaftliche Überlegung geleitete praktische Versnche, Hand in Hand gehend mit dem Ausbau der Theorie. Beschränkung auf Grosszahlforschung mit den bisherigen Methoden bedeutet wissenschaftlichen Verzicht, zu dem kein Zwang vorliegt, solange man hoffen kann, durch Versuche mit wissenschaftlicher Fragestellung tiefer einzudringen. Die Schwierigkeiten, Mühen und Kosten der Forschungsaufgaben weisen auf internationale Zusammenarbeit hin. Der Forschung wäre auch gedient mit einer Zusammenstellung und zweckmässigen Bearbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen der Brückendynamik.

Résumé.

Dans les prescriptions actuelles relatives aux ponts, les règlements concernant la détermination de l'action dynamique des charges ne peuvent pas être considérés comme définitifs.

Ce n'est pas par des considérations théoriques seules qu'on arrivera à une conception plus approfondie des procédés dynamiques, mais seulement par des essais pratiques bien organisés et guidés par des considérations scientifiques, allant de pair avec le développement de la théorie. Se restreindre à des analyses d'essais exécutés en grand nombre avec les méthodes actuelles signifie un renoncement scientifique, auquel on n'est nullement contraint tant qu'on peut avoir quelque espoir de pénétrer plus profondément ces questions par des essais de base scientifique. Les difficultés, le labeur et les frais des recherches exigent une collaboration internationale. Le groupement et l'étude judicieuse des principes fondamentaux de la dynamique des ponts seraient également de grande utilité.

Summary.

Stipulations hitherto laid down in bridge specifications regarding calculating the dynamic effect of the loads cannot be regarded as final.

A fuller conception of the dynamic action cannot obtained from theoretical considerations alone, but only from systematic practical experiments, conducted according to a scientific plan, proceeding hand in hand with the development of the theory. Limiting oneself to searching for empirical formulae with the methods hitherto used, means an abandonment of scientific principles, for which there is no justification as long as one can hope to learn more by conducting tests, with scientific enquiry as to the meaning of the results. The difficulties, trouble and cost of research point to the necessity of international cooperation. Research would also be assisted by the bringing together and suitably working up of the scientific bases of the dynamics of bridges.

Leere Seite
Blank page
Page vide

V 2

NEUERE DYNAMISCHE MESSVERFAHREN IM BAUWESEN

NOUVELLES MÉTHODES DE MESURE DANS LA DYNAMIQUE DES PONTS ET CHARPENTES

NEW METHODS FOR DYNAMICAL MEASURING ON STRUCTURES

Dr.-Ing. Rudolf BERNHARD,
Reichsbahnrat im Reichsbahnzentralamt, Berlin.

A. Messtechnik im Allgemeinen.

Die grosse Bedeutung der praktischen Messtechnik liegt in erster Linie in ihrem wirtschaftlichen Nutzen. Durch Prüfung und auch Befruchtung der Berechnung von dynamischen Vorgängen soll die Theorie, welche ohne diese Hilfe wahrscheinlich nur sehr langsam Fortschritte machen könnte, ergänzt werden. Diese Wechselwirkung zwischen Messung und Berechnung wird es erst ermöglichen, einen grossen Teil der zunächst willkürlichen Annahmen von Berechnungsgrundlagen genauer festzule en, also die sparsamste und sicherste Bauweise zu erkennen und mithin Über-, sowie Unterdimensionierungen zu vermeiden.

I. Messgrössen und Messgrenzen.

Die bei der Untersuchung von Bauwerken in erster Linie in Frage kommenden Messgrössen sind :

Durchbiegungen,
Dehnungen (Längenänderungen),
Verdrehungen (Winkeländerungen),
Schwingungen (Frequenzen und Amplituden),
Beschleunigungen,
und neuerdings auch Dämpfungen, Arbeitsbeträge und Temperaturen.

Welche Grössen gemessen werden müssen, richtet sich u. a. danach, ob der Werkstoff allein, oder das Bauwerk als Ganzes untersucht werden soll.

Hier seien nur Messungen am Bauwerk und zwar bei Beanspruchungen unterhalb der Elastizitätsgrenze betrachtet.

Die Grössenordnung obiger Messwerte ist recht verschieden. Während die *Durchbiegung* verhältnismässig grosse Werte, etwa von 1/10 mm bis zu 10 cm

erreichen kann, bewegen sich die *Dehnungen* in wesentlich kleineren Dimensionen, die im allgemeinen, bezogen auf die üblichen Messlängen, kaum über 200 μ ($1\ \mu = 10^{-3}$ mm) hinausgehen. Auch für die unteren Grenzen der *Verdrehungen* (Winkeländerungen) ist die Bestimmung von ungewöhnlich kleinen Werten bis hinunter zu 5 Winkelsekunden erforderlich. Schwingungen sind bis zu 800 Hertz (1 Hertz = Schwingung je Sekunde) beobachtet worden, also Zahlen, welche bereits fast das Doppelte des Kammertons a (435 Hertz) erreichen. Über die Grenzen der anderen, oben genannten Grössen können zur Zeit noch keine genaueren Zahlen angegeben werden.

Die *Hilfsmittel*, welche zur Messung dieser, zum Teil ungewöhnlich kleinen Dimensionen zur Verfügung stehen, sind vor allem der Mechanik, Optik, Elektrotechnik und Akustik zu entnehmen. Während der Mechanik durch ihre an die Masse gebundenen Hilfsmittel sehr bald obere und untere Grenzen gesetzt sind, haben die drei anderen Gebiete einen wesentlich erweiterten Wirkungsbereich.

So können in der *Optik*, z. B. mit Ultramikroskopen, in kolloidalen Lösungen Werte von nur wenigen $\mu\mu$ ($1\ \mu\mu = 10^{-6}$ mm) erkannt und in der *Elektrotechnik*, z. B. mit Kathodenstrahlen-Oszillographen, Vorgänge aufgenommen werden, welche sich auf einen Zeitraum von nur 10^{-7} sec erstrecken.

Die Anforderungen in der Bauwerksmesstechnik erreichen zwar nicht die obigen Grenzwerte, der masselose Lichtstrahl in der *Optik* und die masselose Übertragung von Strömen in der *Elektrizität* bilden aber Hilfsmittel, die auch hier kaum zu entbehren sind.

II. Anforderungen an die Messgeräte.

Die Forderungen, welche an die im Bauwesen anzuwendenden Messgeräte gestellt werden müssen, kann man in *statische und dynamische* einteilen, je nachdem ob unter ruhenden oder veränderlichen Lasten gemessen werden soll.

Die Dehnungs- (Spannungs-) Messung, also die Feststellung von Abstandsänderungen zweier Punkte (Messlänge) des Werkstoffes, spielt im Bauwesen eine ausschlaggebende Rolle. Sie soll daher zunächst besprochen werden. Sowohl die dabei zu stellenden statischen Anforderungen in Bezug auf Empfindlichkeit, Vergrösserung und Genauigkeit, als auch die dynamischen Anforderungen, wie masstabsgetreue Anzeige an Ueber- oder Unterfrequenzgeräten, Phasengleichheit, Registrierung und Zeitmarkierung sind im letzten Bericht des Verfassers an der Internationalen Tagung für Brücken- und Hochbau in Wien 1928 (Ausgabe 1929) [1] bereits eingehend geschildert worden, sodass sich eine weitere Behandlung hier erübrigt.

III. Fehlerquellen der Messgeräte.

Die bei den Messgeräten leicht auftretenden *Fehler* können gleichfalls statische und dynamische Ursachen haben. Einige der hauptsächlich auftretenden Störungen seien kurz gestreift.

---

1. Neuere Messungen dynamischer Brückenbeanspruchungen.
R. Bernhard. Bericht über die II. Internationale Tagung für Brücken- und Hochbau. Wien (Ausgabe 1929).

1. Statische Fehler.

a. *Gelenke* : Werden zur Übertragung von Bewegungen Hebel verwendet, die durch irgendwelche Gelenke angeschlossen sind, so bildet ein Spiel in diesen Gelenken eine Fehlerquelle. Bei tausenfacher Vergrösserung genügt schon das Spiel von 1 μ, um am Ende einen Auschlag von 1 mm, also bei 20 cm Messlänge eine Fehlanzeige von 10 kg/cm² hervorzurufen.

b. *Temperaturschwankungen* : Bedenkt man weiter, dass eine Temperaturschwankung von 1° C bei 20 cm Messlänge für Stahl bereits eine Längenänderung von 2,4 μ bedeutet, so erscheint die Aufgabe fehlerfreie Gelenke herzustellen, geschweige denn sie bei dem rauhen Betrieb an der Messstelle fehlerfrei zu erhalten, gleichfalls sehr schwierig. Werden jedoch Hebel mit mehreren Gelenken hintereinander geschaltet, um stärkere Vergrösserungen zu erhalten, so summieren sich die Fehler entsprechend.

c. *Messpitzen* : Die Messpitzen, welche je nach Härte des Baustoffes sich verschieden tief in den Werkstoff eingraben und in erster Linie die Abstandsänderung der Messpunkte unmittelbar zu übertragen haben, bilden leicht eine weitere Fehlerquelle. Insbesondere für wechselnde Spannungen, bei denen sich diese Messpitzen einmal in der einen und nachher in der anderen Richtung bewegen, also an verschiedenen Seiten anliegen, ist ein Spiel, ebenso wie bei den Gelenken, oft die Ursache vermeintlicher Hysteresis-Erscheinungen oder in Wirklichkeit nicht vorhandener, remanenter Spannungen.

d. *Aufspannung* : Eine bequem nachspannbare Befestigung wird, nachdem sich die Messpitzen durch verschiedene Belastungen gleichsam ein Bett im Werkstoff geschaffen haben, und ein Einrütteln der Messpitzen eingetreten ist, die Beseitigung von Aufspannfehlern erleichtern.

2. Dynamische Fehler.

a. *Reibung* : Als dynamische Fehlerquelle kommt in erster Linie die unvermeidliche, je nach dem Zustand des Ols in den Gelenken und den Witterungsverhältnissen veränderliche, unkontrollierbare Reibung beweglicher Einzelteile in Frage. Die damit zusammenhängende, veränderliche Dämpfung vereitelt die Forderung nach masstabsgerechter Aufzeichnung. Auch wird das geringste Spiel in den Gelenken zur Aufzeichnung von in Wirklichkeit nichtvorhandenen Schüttelschwingungen führen. Dieses Spiel muss so weit wie irgend möglich durch kräftige Federn beseitigt werden, die ein gleichmässiges, einseitiges Anliegen der Gelenke bewirken.

b. *Massenwirkung* : Bedenkt man ferner, dass von der Schreibspitze bei tausendfacher Vergrösserung ein tausendfacher Weg gleichzeitig bei tausendfacher Beschleunigung zurückzulegen wäre, so ergibt sich rein rechnerisch dort ein 10^6-faches Moment der Trägheitskraft. Jegliche noch so geringe Änderung in den Massen der Messysteme erzeugt Änderungen der Trägheitskräfte, die demnach erhebliche Fehlanzeigen nach sich ziehen müssen. Insbesondere ist dabei zu beachten, dass eine Steigerung der Vergrösserung, also eine Erhöhung der Massen, ein erhebliches Absinken der Eigenfrequenz zur Folge hat.

Nur die bis aufs äusserste getriebene *Einschränkung beweglicher Massen* kann hier Abhilfe schaffen.

IV. Eichung der Messgeräte.

Die *Eichung der Messgeräte*, also die Feststellung, ob die Geräte den oben genannten Fehler nicht aufweisen, gehört mit zu den schwierigsten Aufgaben. Erst wenn es gelingt, Eichgeräte zu bauen, welche eine Prüfung ermöglichen, ob die Apparate den statischen und dynamischen Bedingungen genügen, können zuverlässige Messgeräte enwickelt werden.

Da die Eichfrage gleichfalls im vorgenannten Bericht des Verfassers bereits eingehend behandelt wurde, sei hier nur mitgeteilt, dass inzwischen die damals geforderten Eichgeräte entwickelt worden sind.

1. Statische Eichung.

Für die *statische Eichung*, d. h. die genaue Bestimmung des Vergrösserungsmasstabes innerhalb des gesamten Messbereiches, ist eine *Eichbank* gebaut worden.

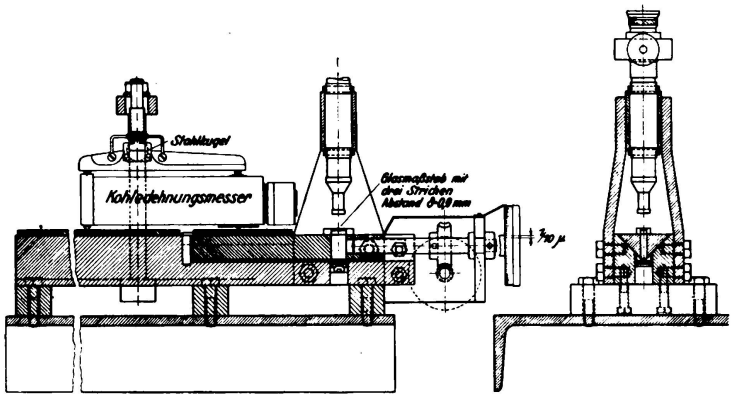


Fig. 1.
Eichbank zur statischen Prüfung von Messgeräten.
Banc d'étalonnage pour le Contrôle statique des appareils de mesure.
Calibrating Bench for Static Checking of Measuring Instruments.

Stahlkugel. — Bille d'acier. — Steel ball.
Kohledehnungsmesser. — Dispositif à disques de charbon pour la mesure de l'allongement. — Carbon disk extensometer.
Glasmasstab mit drei Strichen. — Échelle graduée en verre avec trois traits espacés de 0,9 mm. — Glass scale with three marks. Distance $\delta = 0{,}9$ mm.

Die *Eichbank* (Abb. 1) besteht aus einem festen und einem beweglichen Teil. Die zu prüfenden Messgeräte werden mit ihrer beweglichen Spitze auf dem beweglichen, mit ihrer festen Spitze auf dem festen Teil der Eichbank befestigt. Durch Verschiebung des beweglichen Teils der Eichbank um genau bekannte Werte, etwa im Bereich von 0,5 μ, kann den Messgeräten eine Verschiebung aufgedrückt werden. Diese kleine Verschiebung muss durch genaue Messmikroskope kontrolliert werden. Die Anzeige der zu prüfenden Messgeräte soll dann unter Berücksichtigung ihres Vergrösserungsmasstabes mit der Bewegung des beweglichen Teils der Eichbank, also der Anzeige des Messmikroskops, übereinstimmen.

2. Dynamische Eichung.

Für die dynamische Eichung ist ein Prüfstand gebaut worden [1] (Abb. 2).

1. Prüfstand für Messgeräte im Bauwesen.
R. Bernhard. Zeitschrift des VDI, 1931, Heft 52.

Er besteht aus einem festen und einem beweglichen Teil, auf dem die zu prüfenden Instrumente befestigt werden. Der bewegliche Teil ist einerseits in der Lage, ausreichend hohe Frequenzen, also z. B. sinusförmige Schwingungen bis zu 300 H bei verschiedenen Amplituden auszuführen, die andererseits aber auch gleichzeitig einwandfrei beobachtet und zum Vergleich mit dem Schaubild des zu eichenden Instruments aufgezeichnet werden können. Die Erregung

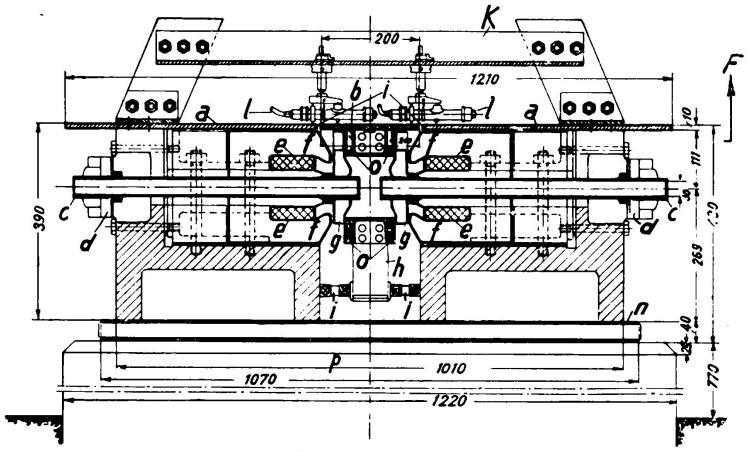


Fig. 2.

Aufbau und Hauptabmessungen des elektromagnetischen Prüfstandes für Messgeräte im Bauwesen.

Disposition et cotes principales du banc d'essai électromagnétique pour le contrôle des appareils de mesure de construction.

General Arrangement and Sizes of Electromagnetic Bench for Checking Measuring Instruments for Structural Members.

a) Fester Teil. — Partie fixe. — Fixed part.
b) Beweglicher Teil des Tisches. — Partie mobile du banc. — Movable part of the bench.
c) Rohrfedern zwischen *a* und *b*. — Ressorts tubulaires disposés entre *a* et *b*. — Helical springs between *a* and *b*.
d) Blattfedern zwischen a und *b* (auswechselbar). — Ressorts à lames disposés entre *a* et *b* (interchangeables). — Leaf springs between *a* and *b*.
e) Magnetspule. — Electro-aimant à armatures feuilletées. — Magnet spools.
f) Lamellen, fest in *a*. — Armatures feuilletées solidaires de *a*. — Laminations fixed in *a*.
g) Lamellen, fest in *b*. — Armatures feuilletées solidaires de *b*. — Laminations, fixed in *b*.
h) Gegengewicht für *b*. — Contrepoids de *b*. — Counterweight for *b*.
i) Gummidämpfung. — Amortisseur de caoutchouc. — Rubber buffers.
k) Aufspannbock. — Armature de serrage. — Fixing device.
l) Zu untersuchende Prüfgeräte. — Appareil d'essai à contrôler. — Object tested.
n) Korkplatte. — Plaque de liège. — Cork slab.
o) Blattfedern zu Führung des beweglichen Teiles. — Ressorts à lames pour le guidage de la partie mobile. —Leaf springs for guide of the movable part.
p) Betonfundament. — Socle de béton. — Concrete foundation.

des beweglichen Teils des Prüfstandes zu Schwingungen von bekannter Frequenz und Auslenkung erfolgt durch Magnete, welche mit Wechselstrom von der gewünschten Periodenzahl und Stromstärke gespeist werden.

B. Neuere dynamische Messverfahren.

I. Wahl der Messverfahren.

Die Frage, welche Messgrössen bei den Bauwerken zu verfolgen sind, ist noch nicht geklärt. Wenn man den Endzweck, die *Erforschung der Beanspruchung infolge der dynamischen Vorgänge* im Auge behält, ist es letzten Endes gleichgültig, welcher Weg zum Ziel führt. Solche Verfahren, die durch

möglichst wenige Einzelmessungen den ganzen Spannungszustand des Bauwerks auf einmal erfassen können, sind vorzuziehen.

Am einfachsten ist jedenfalls wegen der bequemen Grössenordnung die Messung von *Durchbiegungen*.

Mit optischen Verfahren wird es wohl gelingen, *Durchbiegungen aller Knotenpunkte* einer Brücke während der Überfahrt eines Belastungszuges auf einmal aufzunehmen. Die in rein mathematischer Hinsicht jedoch schwierige Rechnung, aus diesen Durchbiegungen nunmehr die Spannungen zu erfassen, bleibt dann noch durchzuführen. Gleichfalls offen ist die Frage, wie sich nun in den Einzelstäben, also zwischen den gemessenen Knotenpunkten, die Beanspruchungen verteilen.

Ein zweiter Weg, die *Beanspruchungen* ohne erhebliche Rechenarbeit unmittelbar zu messen, erscheint zunächst einfacher. Durch Messung der mittleren Querschnittsspannungen, also gleichzeitig mit zahlreichen Apparaten, könnte der Spannungszustand des gesamten Tragwerks gleichfalls erfasst werden; durch Anbringung von Messgeräten in der Nähe oder auch zwischen den Knotenpunkten wären auch die dort auftretenden Beanspruchungen, einschliesslich der dynamischen Nebenbeanspruchungen, zu verfolgen. Der Umweg über die Durchbiegungsmessung ist in diesem Fall nicht erforderlich.

Eine dritte Möglichkeit, die Messung von *Beschleunigungen*, erfordert gleichfalls eine nicht einfache Umrechnung auf die Spannungen und wird daher wohl nur bei Sonderaufgaben in Frage kommen.

Schwingungen setzen sich unmittelbar in Durchbiegungs- und Spannungsschwankungen um und brauchen daher in gewöhnlichen Fällen nicht besonders gemessen zu werden.

Die vierte Möglichkeit, den Gesamtzustand eines Bauwerks zu erfassen, besteht in dem Verfahren, das ganze Bauwerk künstlich zu Schwingungen anzuregen. Hier sind zahlreiche Versuche, mit Schwingungsmaschinen durch Leistungsaufnahme und Verfolgung der Temperaturen gleichsam den Energiehaushalt des Bauwerks zu erfassen, in Angriff genommen worden.

II. Messgeräte.

Es werden nunmehr einige neuere, dynamische Messgeräte, und zwar vor allem Spannungs- (Dehnungs-) und Durchbiegungszeichner, als die im Bauwesen vorzugsweise verwendeten Messgeräte, und weiter Schwingungs-, bezw. Beschleunigungszeichner beschrieben.

Betont werden muss nochmals, dass auch jetzt die Entwicklung der Messgeräte noch nicht abgeschlossen ist, ja wohl niemals beendet sein wird, da mit fortschreitender Technik sich auch stets die Messgeräte verbessern werden.

Als endgültig brauchbar können nur solche Apparate angesehen werden, welche nicht nur den eingangs erwähnten Anforderungen genügen, sondern sich auch in mehrjährigen, eingehenden Versuchen am Bauwerk praktisch bewährt haben und deren Anschaffungskosten eine bestimmte, wirtschaftlich vertretbare Summe nicht überschreiten.

Die Messgeräte können, wie auch aus der Zusammenstellung I hervorgeht, je nach dem Messprinzip in *mechanische* und *optische*, sowie *mechanisch-optische* und *elektrisch-optische Instrumente* eingeteilt werden.

1. Mechanische Messgeräte.

Die Frage, ob überhaupt und bis zu welchen Grenzen man sich auf die Anzeigen mechanischer Messgeräte verlassen kann, ist noch nicht endgültig entschieden.

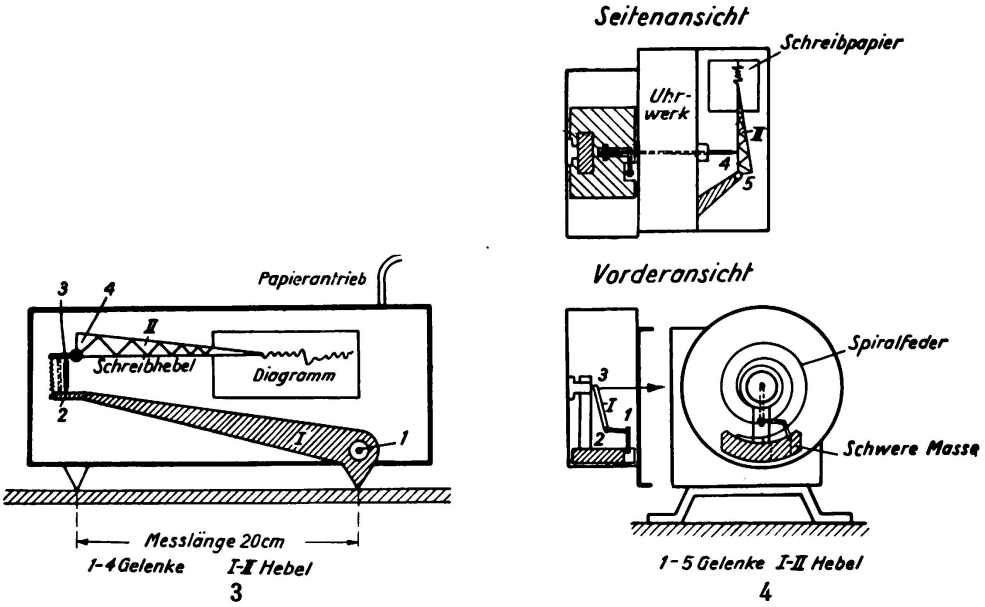


Fig. 3.

Mechanischer Spannungsmesser der Schweizerischen Bundesbahnen (A. Meyer). — Schema.
Appareil de mesure mécanique des efforts. — Chemins de fer fédéraux (A. Meyer). — Schéma.
Mechanical Stress Recorder. — Swiss Federal Railways (A. Meyer). — General arrangement.

Papierantrieb. — Disposition d'entrainement du papier. — Card moving mechanism.
Schreibhebel. — Levier d'enregistrement. — Pen lever.
Diagramm. — Diagramme. — Diagram.
Messlänge. — Longueur de mesure. — Measured length.
1-4 : Gelenke. — Articulations. — Joints.
I-II : Hebel. — Leviers de mesure. — Levers.

Fig. 4.

Mechanischer Schwingungsmesser. Vibrograph (Geiger). — Schema.
Appareil mécanique pour la mesure des oscillations. — Vibrographe (Geiger). — Schéma.
Oscillation Mechanical Recorder. — Vibrograph (Geiger). — General arrangement.

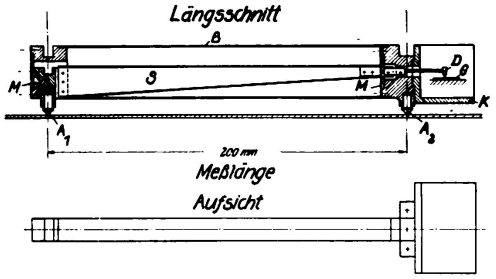
Seitenansicht. — Profil. — Side view.
Vorderansicht. — Vue de face. — Front view.
Uhrwerk. — Mécanisme d'horlogerie. — Clockwork.
Schreibpapier. — Dispositif d'enregistrement. — Card.
Spiralfeder. — Ressort spiral. — Spiral spring.
Schweremasse. — Poids. — Heavy mass.
1-5 : Gelenke. — Articulations. — Joints.
I-II : Hebel. — Leviers. — Levers.

a. *Spannungsmesser der Schweizerischen Bundesbahnen* [1] (A. Meyer) (Abb. 3):
Der Spannungsmesser ist bereits auf der letzten Tagung von Herrn Sektionschef Bühler genauer beschrieben worden. Er ist ein Zwei-Hebelgerät mit 4 Gelenken, Registrierung auf berusstem Papier, getrenntem Papiervortrieb für den 4 cm breiten Diagrammstreifen, veränderlicher Messlänge von 20 und 40 cm und fester Vergrösserung von 1 : 100. Die zur Aufspannung erforderliche

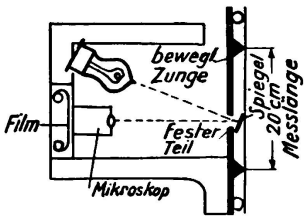
1. Ziel. Ergebnisse und Wert der Messungen an Bauwerken.
A. Bühler. Bericht über die II. Internationale Tagung für Brücken- und Hochbau. Wien (Ausgabe 1929).

Gesamtlänge beträgt 30 bezw. 50 cm, das Gewicht einschliesslich Vortrieb 1 kg. Durch besonders sorgfältige Prüfung jedes einzelnen Hebels, sowie seiner Lager auf einem Schütteltisch ist eine grosse Vervollkommnung erreicht worden. Weitere Einzelheiten gehen auch aus der Zusammenstellung I hervor.

Man kann wohl sagen, dass von den zur Zeit bestehenden mechanischen Geräten für dynamische Spannungsmessungen an Brücken dieser Apparat am weitgehendsten praktisch erprobt ist.



5



6

Fig. 5.

Mechanischer Spannungsmesser nach dem Ritzverfahren (Pabst). — Schema.
Appareil mécanique pour la mesure des oscillations suivant la méthode Ritz (Pabst). — Schéma.
Mechanical Stress Recorder. By the Ritz Method (Pabst). — General arrangement.

Längsschnitt. — Coupe longitudinale. — Longitudinal section.
Übertragungshebel. — Levier de transmission. — Transmission lever.
Diamant. — Diamant. — Diamond.
Glasplatte. — Plaque de verre. — Glass plate.
Feste Messpitze. — Pointe fixe de mesure — Movable measuring point.
Bewegliche Messpitze. — Pointe mobile de mesure. — Movable measuring point.
Messlänge. — Longueur de mesure. - Measured length.
Aufsicht. — Vue en plan. — Plan.

Fig. 6.

Optischer Spannungsmesser nach dem mikrophotographischen Verfahren (Bloss). — Schema.
Appareil optique pour la mesure des efforts d'après la méthode Microphotographique (Bloss). — Schéma.
Optical Stress and Deflection Recorder by the Microphotographic Method (Bloss). — General arrangement.

Film. — Bande d'enregistrement. — Film.
Bewegliche Zunge. — Languette mobile. — Movable tongue.
Fester Teil. — Partie fixe. — Fixed part.
Spiegel. — Miroir. — Mirror.
Mikroscop. — Microscope. — Microscope.
Messlänge. — Longueur de mesure. — Measured length.

b. *Schwingungsmesser Vibrograph* [1] *(Dr. Geiger)* (Abb. 4) : Der Schwingungsmesser ist ein Zwei-Hebelgerät mit 5 Gelenken, Tintenregistrierung und eingebautem Uhrwerkantrieb für den 5 cm breiten Diagrammstreifen. Durch Anbringung verschieden schwerer Gewichte an verschieden starken Federn ist seine Eigenfrequenz von 0,001 bis 1 H veränderlich. Es soll als Unterfrequenzgerät (Seismisches Prinzip) verwendet werden. Das Gesamtgewicht beläuft sich auf etwa 4,6 kg, die Vergrösserung ist von 3 bis 24-fach einstellbar, die Aufspannlänge-beträgt 25 cm. Das Gerät ist zur Bestimmung von Frequenzen in waagerechten und lotrechten Ebenen brauchbar. Eine Auswer-

1. Neuere Fortschritte im Bau von Messgeräten für den Maschinenbau. Geiger. Maschinenbau, 1924, Heft 27.

tung der Absolutwerte (Amplituden) ist nicht einfach und u. a. nur möglich, wenn der jeweilige Dämpfungszustand vor und nach jeder Messung durch Eichversuche festgestellt wird. Weitere Einzelheiten gehen aus der Zusammenstellung I hervor.

Der Vibrograph ist von den mechanischen Schwingungsmessern dasjenige Gerät, welches z. B. bei der unmittelbaren Messung von Brückenschwingungen mehrfach verwendet worden ist.

c. *Spannungsmesser nach dem Ritz-Verfahren der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt* [1] (*Pabst*) (Abb. 5) : Das Gerät ist ein mechanisches Instrument *ohne* Hebelübersetzung. Es wurde zunächst für eine Messlänge von 20 cm eingerichtet. Der mit einer beweglichen Messpitze verbundene Diamant ritzt auf einer Glasscheibe mit aussergewöhnlich langsamem Vortrieb (25 mm in 15 sec bis 160 min) die Längenänderungen in *natürlicher Grösse* ein. Die Glasplattendiagramme von nur 25 mm Länge müssen daher unter einem Mikroskop ausgewertet werden. Durch Beobachtung mit Mikroskopen hat man etwa 500-fache Vergrösserungen erreicht. Die Eigenschwingungszahl soll rund 2000 H betragen, das Gewicht nur 500 g. Dem Vernehmen nach wird an der Entwicklung dieses Messinstrumentes zur Zeit noch weitergearbeitet.

Das sehr leichte und kleine Gerät von 28 cm Baulänge hat sich besonders für die Zwecke der Luftfahrt bei Spannungs-und Durchbiegungsmessungen bewährt.

2. Optische Messgeräte.

Bei den *rein optischen Verfahren* fallen alle mechanischen Übertragungsteile zur Umsetzung der zu messenden Lage- oder Längenänderungen wie Hebel, Gelenke, reibende Schreibstifte usw. fort. Eine trägheitsfreie Übersetzung wird durch den masselosen Lichtstrahl erreicht.

a. *Durchbiegungs-und Spannungsmesser nach dem mikrophotographischen Verfahren* [2] (*Bloss*) (Abb. 6) : Durch zwei mit den Enden an den Messpunkten befestigte Zungen wird ein Spalt gebildet, dessen veränderliche Breite mit einer mikrophotographischen Kamera auf einem vorbeilaufenden Filmstreifen von 3 cm nutzbarer Breite abgebildet wird. Die Vergrösserung (Verkleinerung) beträgt 1 : 1/2 bis 1 : 20 für Durchbiegungs-bezw. 1 : 70 für Dehnungsmessungen. Die zur Aufspannung erforderliche Länge ist 60 cm, das Gesamtgewicht beträgt 15 kg.

Das Instrument ist in erster Linie zur Messung von Durchbiegungen geeignet und hat sich bei derartigen Messungen an Schienen bewährt.

b. *Durchbiegungsmesser Optograph* [3] (*Zeiss-Kulka*) (Abb. 7) : Das Messprinzip wurde im Jahre 1927 im Schiffbau zuerst angewandt. Das Messgerät, welches mit Unterstützung der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft hergestellt

1. Aufzeichnung schneller Schwingungen nach dem Ritzverfahren.
Pabst. Zeitschrift des VDI, 1929, Heft 46.
2. Zur Frage der Dehnungs- und Schwingungszeichner.
Bloss. Die Bautechnik, 1930, Heft 38.
3. Optisch-photographische Formänderungsmessungen an Luftfahrzeugen.
Küssner. Jahrbuch 1930 der deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Berlin Adlershof.
Beitrag zur Ermittlung von dynamischen Beanspruchungen in eisernen Brücken.
H. Kulka. Die Bautechnik, 1931, Heft 26.

wurde, befindet sich noch im Versuchsstadium. Die Durchbiegungen zur Bestimmung der elastischen Linie werden durch ein, mit einer photographischen Kamera versehenes, in Richtung des zu messenden Trägers aufgestelltes Fernrohr aufgenommen. Besondere Tripelprismen, welche die Eigenschaft haben, jeden eintreffenden Lichtstrahl genau parallel der Einfallsrichtung zu reflektieren, werden an den zu untersuchenden Messpunkten angebracht. Eine elektrische Glühbirne im Fernrohr dient als Lichtquelle. Die reflektrierten Bilder dieser punktförmigen Lichtquelle erscheinen in der Fernrohrkamera als leuchtende Punkte und auf dem vorbeigezogenen Filmband in der Kamera als gerade Linien. Veränderungen der Tripelprismen erzeugen mithin Veränderungen auf dem Filmstreifen, lotrechte Durchbiegungen entsprechende lotrechte Einsenkungen, auf der in Form einer Wellenlinie photographierten Abbildung der Tripelprismen.

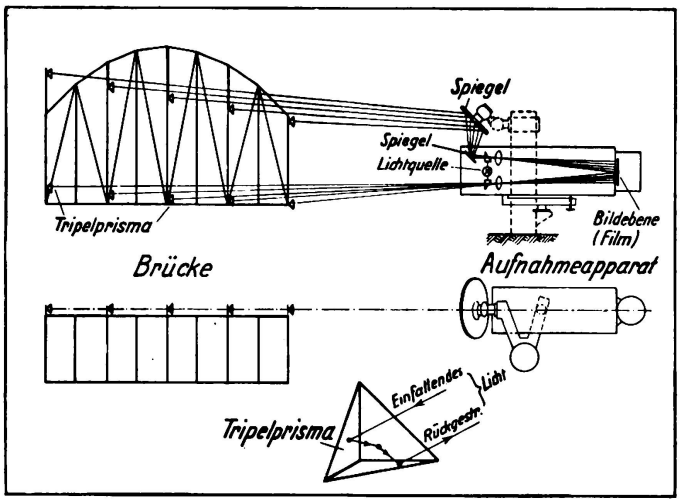


Fig. 7.

Optischer Durchbiegungsmesser Optograph (Zeiss-Kulka). Schema.
Optographe Zeiss-Kulka pour la mesure optique des fléchissements. — Schéma.
Optical Deflection Recorder. Optograph (Zeiss-Kulka). — General arrangement.

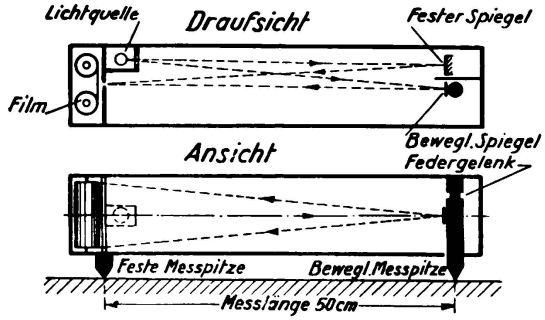
Tripelprisma. — Prisme à trois faces. — Equilateral prism.
Brücke. — Pont. — Bridge.
Lichtquelle. — Source lumineuse. — Source of light.
Spiegel. — Miroir. — Mirror.
Bildebene. — Plan de l'image (enregistrement). — Image.
Aufnahmeapparat. — Appareil d'enregistrement. — Receiving apparatus.
Einfallendes Licht. — Faisceau lumineux, arrivée. — Impinging light.
Rückgestrahltes Licht. — Retour du faisceau lumineux. — Reflected light.

Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens liegt unzweifelhaft in der Möglichkeit, die Durchbiegung einer grossen Anzahl von Messpunkten auf einem einzigen Diagrammstreifen trägheitslos und absolut gleichzeitig zu erfassen. Die Auswertung der Diagramme, die nur unter sehr erheblicher Vergrösserung mit besonderen Messmikroskopen möglich ist, erfordert noch weitere Versuche.

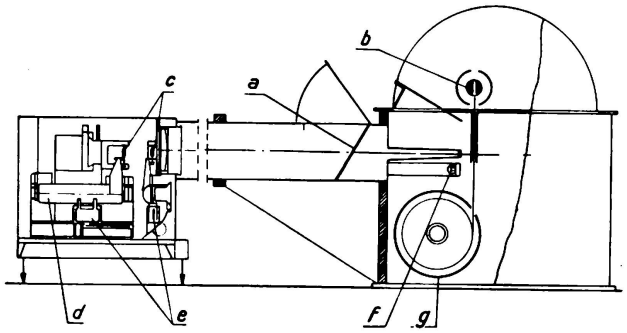
3. Mechanisch-optische Geräte.

Bei den mechanisch-optischen Geräten ist darauf zu achten, dass insbesondere der mit Masse behaftete mechanische Teil nicht die Vorzüge des masselosen optischen Teils zunichte macht.

a, *Spannungsmesser der Englischen Eisenbahn-Gesellschaften* [1] (*Fereday-Palmer*) (Abb. 8): Der Spannungsmesser ist gleichfalls auf der letzten Tagung von Herrn Sektionschef Bühler [2] erwähnt worden. Er wird als Ein-Hebelgerät mit photographischer Registrierung ausgebildet. Die Ablenkung des Lichtstrahls erfolgt durch einen Spiegel, welcher auf einem, mit der beweglichen Messpitze unmittelbar verbundenen Hebel, angebracht ist. Elektrischer Vortrieb des 6 cm breiten Films ist möglich. Eine feste Messlänge von 50,8 cm, sowie feste Vergrösserung von 1 : 100 ist vorhanden. Das Gewicht liegt hoch und beträgt 10 kg, die Einbaulänge 80 cm. Weitere Einzelheiten gehen aus der Zusammenstellung I hervor.



8



9

Fig. 8.

Mechanisch-optischer Spannungsmesser der Englischen Eisenbahngesellschaften (Fereday-Palmer). — Schema.

Appareil mécanique et optique pour la mesure des efforts. — Chemins de fer anglais (Fereday-Palmer). — Schéma.

Mechanical and Optical Stress Recorder of British Railway Companies (Fereday-Palmer). General arrangement.

Draufsicht. — Vue en plan. — View from above.
Ansicht. — Profil. — Side view.
Fester Spiegel. — Miroir fixe. — Fixed mirror.
Beweglicher Spiegel. — Miroir mobile. — Movable mirror.
Film. — Bande d'enregistrement. — Film.
Federgelenk. — Articulation élastique. — Spring joint.
Bewegliche Messpitze. — Pointe fixe de mesure. — Movable measuring point.
Feste Messpitze. — Pointe fixe de mesure. — Fixed measuring point.
Messlänge. — Longueur de mesure. — Measured length.

Fig. 9.

Mechanisch-optischer Dreikomponentenerschütterungsmesser.

Appareil mécanique et optique pour l'étude des trépidations, suivant les trois composantes.

Mechanical and Optical Vibration Recorder by the three-component Method.

a) Beobachtungsspiegel. — Miroir d'observation. — Observation mirror.
b) Aufwickeltrommel. — Tambour d'enroulement — Drum for exposed film
c) Spiegel. — Miroir. - Mirror.
d) Masse. — Masse. — Mass.
e) Dämpfung. — Amortissement. — Damping.
f) Lampe. — Lampe. — Lamp.
g) Filmvorratstrommel. — Bobine de chargement. — Drum with unexposed film.

Besonders die englischen Eisenbahngesellschaften haben umfangreiche Versuche mit diesem Gerät angestellt. Es ist jedenfalls eines der ersten Geräte, welches sich die Vorteile der Vergrösserung durch einen masselosen Lichtstrahl zunutze gemacht hat, um dabei den Nachteil der photographischen Registrierung auf sich zu nehmen.

1. Report of the Bridge Stress Committee London, 1928.
2. Siehe Fuss note 5, p. 459.

b. *Mechanisch-optischer Erschütterungsmesser*[1] (*Schwayder*, *Hort*, *Angenheister*) (Abb. 9) : Das erst 1930 in den Handel gebrachte Gerät stellt einen Dreikomponenten-Schwingungsmesser nach seismischem Messprinzip (Unterfrequenzmessgerät) dar. Ähnlich wie bei dem eben beschriebenen Spannungsmesser (Fereday-Palmer) wird die Ablenkung eines Lichtstrahls mit Hilfe eines Spiegels auf einem Filmstreifen registriert.

Für die 3 Raumkomponenten (X-, Y- und Z- Achse) ist je ein Spiegel vorgesehen. Die Ablenkung des Lichtstrahls bezw. Drehung jedes Spiegels erfolgt durch drei, in den entsprechenden Raumachsen beweglich aufgehängte Pendelmassen. Sowohl die mechanische Übersetzung (Hebelverbindung zwischen Spiegel und Pendelmasse), als auch die optische Vergrösserung (Lichtzeigerlänge) sind veränderlich, so dass bis zu dreitausendfacher Übersetzung erreicht werden kann. Die Eigenschwingungszahl der drei Pendelmassen beträgt etwa 5 Hertz.

Bemerkenswert ist die veränderliche Dämpfung durch verschieden hohes Einstellen des Oberflächenspiegels eines, in besonderen Dämpfungsgefässen angeordneten Ölbades. Die Filmbandbreite beträgt 6 cm, das Gesamtgewicht etwa 33 kg ; der Vortrieb ist bis zu 8 cm je Sekunde regelbar.

Das Gerät ist wegen seiner grossen Empfindlichkeit besonders zur unmittelbaren Messung von Erschütterungen mit sehr kleinen Amplituden geeignet.

4. Elektrisch-optische Geräte.

Bei den elektrisch-optischen Geräten kann die sehr wünschenswerte Trennung in Aufnahme- (Sende-) Gerät und Registrier- (Empfänger-) Gerät leicht mit Hilfe einer Kabelverbindung durchgeführt werden.

Vorausgeschickt sei ferner, dass eine völlige Beseitigung mechanischer Übertragungsteile, wie bei den rein optischen Messgeräten, nicht möglich ist, jedoch auf wenige untergeordnete Teile beschränkt werden kann. Eine photographische Registrierung lässt sich gleichfalls kaum vermeiden ; die Beobachtung der Vorgänge während der Messung ist trotzdem erreicht worden. Auch kann man nach wenigen Sekunden Entwicklungszeit den Aufnahmefilm erkennen, und durch geschickte Anordnung von Lichtschleusen die Dunkelkammer beliebig betreten. Wagen oder Zelte zum Transport oder Aufstellung der Messgeräte an der Messtelle sind in jedem Fall erforderlich und ermöglichen stets den Einbau einer Dunkelkammer, falls nicht sogar Tankentwicklung ohne Dunkelkammer vorgezogen wird.

Solche Messgeräte, welche Diagramme in Form von Umhüllungskurven, also Schaulinien, bei denen nur die oberen, bezw. unteren Berührungslinien verwendbar sind, aufzeichnen, sind nicht weiter verfolgt worden.

Bei den zur Zeit benutzten und in der Entwicklung befindlichen, elektrisch-optischen Messverfahren wird als Empfänger ein *Oszillograph* benutzt, der zunächst beschrieben werden soll :

Empfängergerät Oszillograph[2] (*Siemens* und *Halske*) (Abb. 10): Der Oszillograph ist im vorigen Bericht vom Verfasser bereits erwähnt worden. Er besteht

1. Drei-Koponenten-Erschütterungsmesser.
René Leonhardt. Die Bautechnik, 1931, Heft 49.
2. Oszillographen. Zeitschrift des VDI, 1930, Heft 8.

im wesentlichen aus einem, in Form einer Drahtschleife ausgespannten Messorgan, das zwischen einem starken Elektromagneten nach Art eines Galvanometers aufgehängt ist. Durch die elektrodynamischen Wirkungen, die ein Magnetfeld auf stromdurchflossene Leiter ausübt, ergeben sich Schleifenausschläge bei Stromdurchgang. Auf der Schleife ist ein kleiner, nur 0,5. 0,5 mm grosser Spiegel befestigt, der in den Strahlengang einer Lampe eingeschaltet, seine Bewegungen auf einen beweglichen Filmstreifen projiziert. Es können sechs und mehr Schleifen nebeneinander angeordnet werden, also auf

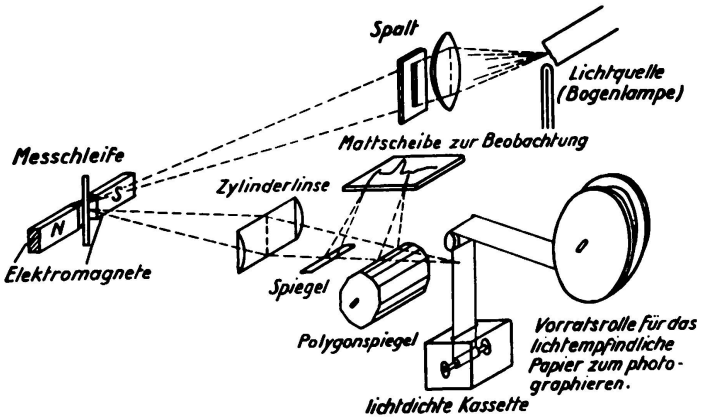


Fig. 10.

Empfänger zur Beobachtung und Aufzeichnung elektrischer Strom- oder Spannungsschwankungen. Schema des Strahlenganges in einem einschleifigen Oszillographen (Siemens und Halske).

Appareil récepteur pour l'observation et l'enregistrement électrique des variations de courants ou d'efforts. Trajet des rayons lumineux dans un oscillographe à un seul circuit (Siemens et Halske).

Receiver for Observation and Registration of Electrically Transmitted Current or Stress Oscillations. Passage of the Rays through the Single Moving-coil Oscillograph (Siemens and Halske).

Lichtquelle. — Source lumineuse (lampe à arc). — Source of light (arch lamp).
Spalt. — Fente. — Slit.
Mess-Schleife. — Équipage mobile. — Moving coil.
Elektromagnete. — Électroaimant. — Electro magnet.
Zylinderlinse. — Lentille cylindrique. — Cylinder lens.
Spiegel. — Miroir. — Mirror.
Mattscheibe zur Beobachtung. — Verre dépoli pour observation. — Frosted glass plate for observation.
Polygonspiegel. — Miroir polygonal. — Polygonal mirror.
Vorratsrolle. — Dispositif d'enregistrement photographique. — Roll of unexposed sensitised paper for photographing.
Lichtdichte Kassette. — Bobine étanche. — Light-tight box.

ein und demselben 12 cm breiten Filmstreifen sechs Diagramme und mehr gleichzeitig aufgenommen werden. Bei den üblichen Schleifen entspricht 1 mm Ausschlag auf dem Film bei 1 m Lichtzeigerlänge etwa 5.10^{-5} Amp. Stromstärke. Die von der Deutschen Reichsbahn für Brückenmesszwecke benutzten Oszillographenschleifen besitzen eine Eigenfrequenz von 1500-15000 Hertz. Durch entsprechende Zusammensetzung des zur Dämpfung in den Oszillographenschleifen erforderlichen Öls wird genau halbaperiodische Dämpfung erreicht.

Bei mechanischen Geräten hat man es nicht ohne weiteres in der Hand, den gewünschten Dämpfungszustand zu erzwingen. Je nach den inneren Widerständen der Apparate, z. B. in den Gelenken, wird sich eine andere Dämpfung ergeben, die sich beim Transport und neuem Aufspannen der Messgeräte jeweils etwas verschiebt und gegebenenfalls eine wiederholte Eichung des Verzerrungsmasstabes nötig macht.

Die Bewegung der Schleifenausschläge kann auf stroboskopischer Grundlage während eines Versuches durch Beobachtung auf einem Polygonspiegel sichtbar gemacht, ja sogar eine Verwandlung von laufenden in dauernd sichtbare, gewissermassen stehende Wellen vorgenommen werden. Die Vergrösserung kann ohne die Diagrammstrichbreite zu verstärken, fast als unbeschränkt bezeichnet werden. Bisher ist in Verbindung mit einem Sendegerät der Deutschen Reichsbahn im Höchstfall mit einer 20000-fachen Vergrösserung gearbeitet worden.

Der Papiervortrieb ist, was bei mechanischer Aufzeichnung unmöglich erscheint, bis zu 4 m/sec stetig regelbar. Die Aufstellung und Bedienung des Oszillographen kann ganz unabhängig und auch selbsttätig in beliebiger Entfernung von der zu untersuchenden Messtelle in einem besonderen Wagen oder Zelt geschehen.

Zur Bestimmung des Zeitablaufs, in dem die Messungen vor sich gehen, kann als Zeitzeichen die Bewegung einer Stimmgabel (50 H Eigenschwingung) mitphotographiert werden. Für Brückenmesszwecke wird zweckmässig ein elektromagnetisch betätigter Unterbrecher eingebaut werden. Seine Erregung geschieht durch einen oder mehrere Kontakte auf, bezw. vor und auch hinter der Brücke, so dass die jeweilige Stellung, sowie Geschwindigkeit der Belastungsfahrzeuge, deren Achsen während der Überfahrt diese Kontakte niederdrücken, auf jedem Diagramm genau verzeichnet ist.

Der Oszillograph kann zur Aufzeichnung rascher Vorgänge, insbesondere infolge der Verwendung des masselosen Lichtstrahls als geeignetes Messgerät auch in der Bauwerksmesstechnik angesehen werden.

Sendegeräte :

Die beiden zunächst und das unter d beschriebene Verfahren arbeiten mit *Elektronenröhren*. Gewisse Schwierigkeit bietet dabei der Anschluss von gleichzeitig mehreren Messgeräten, für die jeweils eine oder sogar mehrere Röhren erforderlich werden. Von den unter a bis d genannten Verfahren seien nur die grundsätzlichen elektrischen Schaltbilder erläutert und auf die Veröffentlichungen in den Fachzeitschriften verwiesen, da für die Messungen an Brücken erprobte Ausführungsformen zur Zeit noch nicht vorliegen.

a. *Spannungsmessung nach dem Kondensatorverfahren* [1] (*Thoma und Sachsenberg*) (Abb. 11) :

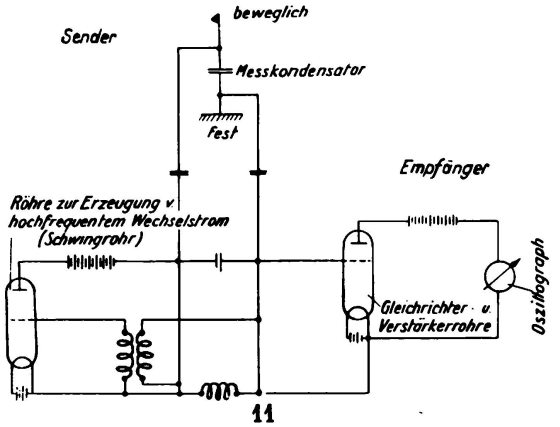
Die Längenänderung der Messtrecke wird auf zwei sich gegenüberliegende *Kondensatorplatten*, von denen die eine mit der festen, die andere mit der beweglichen Messpitze verbunden ist, übertragen. Die Abstandsänderung dieser beiden Messplatten, die in einem durch eine Elektronenröhre zu hochfrequenten Schwingungen angeregten Kreis eingeschaltet sind, ruft Kapazitätsänderungen hervor. Hierdurch werden in einem zweiten, in Resonanz gekoppelten Schwingungskreis Änderungen der Stromstärke erzeugt, die durch

---

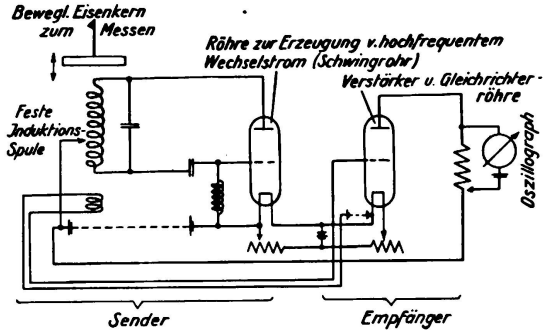
1. Aufzeichnung schneller Schwingungen.
H. Thomas. Zeitschrift des VDI. 1929, Heft 19.
Gerät zur Messung von Arbeitswiderständen und Beanspruchungen.
Sachsenberg, Osenberg und Gruner. Zeitschrift des VDI, 1928, Heft. 14.

eine weitere Röhre gleichgerichtet und erheblich verstärkt werden müssen. Die Ströme können einem Oszillographen zugeleitet und von ihm aufgezeichnet werden.

Dieses Messprinzip ist zunächst für Untersuchungen im Maschinenbau verwendet worden.



11



12

Fig. 11.

Elektrisch-optischer Dehnungsmesser nach dem Kondensatorverfahren.
Elektrisches Schaltschema nach H. Thoma.

Appareil électrique et optique pour la mesure des allongements d'après la méthode du condensateur. — Schéma de montage d'après H. Thoma.

Electrical and Optical Extensometer by the Condenser Method.
Wiring Diagramm according to H. Thoma.

Sender. — Transmetteur. — Transmitter.
Beweglich. — Mobile. — Movable.
Messkondensator. — Condensateur de mesure. — Measuring condenser.
Fest. — Partie fixe. — Fixed.
Röhre zur Erzeugung von hochfrequentem Wechselstrom (Schwingrohr). — Oscillateur à haute fréquence. — Valve for generating highfrequency alternating current (Oscillator valve).
Empfänger. — Récepteur. — Receiver.
Gleichrichter und Verstärkerröhre. — Valve redresseuse et amplificatrice. — Amplifying and rectifying valve.
Oszillograph. — Oscillographe. — Oscillograph.

Fig. 12.

Elektrisch-optischer Dehnungsmesser nach dem Induktionsverfahren.
Elektrisches Schaltschema nach H. A. Thoma.

Appareil électrique et optique pour la mesure des allongements d'après la méthode d'induction. Schéma de montage d'après H. Thoma.

Electrical and Optical Extensometer by the Induction Method.
Wiring Diagramm according to H. Thoma.

Bewegl. Eisenkern zum Messen. — Noyau magnétique solidaire de la pointe mobile de mesure. — Movable iron core for measuring.
Feste Induktionsspulen. — Selfs fixes. — Fixed induction coils.
Röhre zur Erzeugung von hochfrequentem Wechselstrom (Schwingrohr). — Oscillateur à haute frequence. — Valve for generating high frequency alternating current (oscillator valve).
Sender. — Transmetteur. — Transmitter.
Empfänger. — Récepteur. — Receiver.
Verstärker und Gleichrichterröhre. — Tube redresseur et amplificateur. — Amplifying and rectifying valve.
Oszillograph. — Oscillographe. — Oscillograph.

b. *Spannungsmessung nach dem Induktionsverfahren*[1] (*H. A. Thomas*) (Abb. 12):

Das Verfahren unterscheidet sich von dem oben, unter a genannten Verfahren in erster Linie nur dadurch, dass an Stelle der beiden sich gegenüberstehenden Kondensatorplatten, diesmal eine *Spule* einer *Metallplatte* von hohem Widerstand gegenübersteht. Durch die Abstandsänderung zwischen Spule und

1. Report of the Bridge Stress Committee, London, 1928.

Metallplatte, die einerseits mit der festen, andererseits mit der beweglichen Messspitze verbunden sind, werden gleichfalls Stromschwankungen in dem durch eine Elektronenröhre erzeugten, hochfrequenten Schwingungskreis hervorgerufen. Diese Stromschwankungen müssen durch eine weitere Röhre gleichgerichtet sowie verstärkt, einem Oszillographen zugeleitet und von ihm aufgezeichnet werden.

Das Messprinzip ist von den englischen Eisenbahngesellschaften bei Brückenuntersuchungen verwertet worden, wird aber für den rauhen Betrieb an der Messstelle als weniger geeignet bezeichnet.

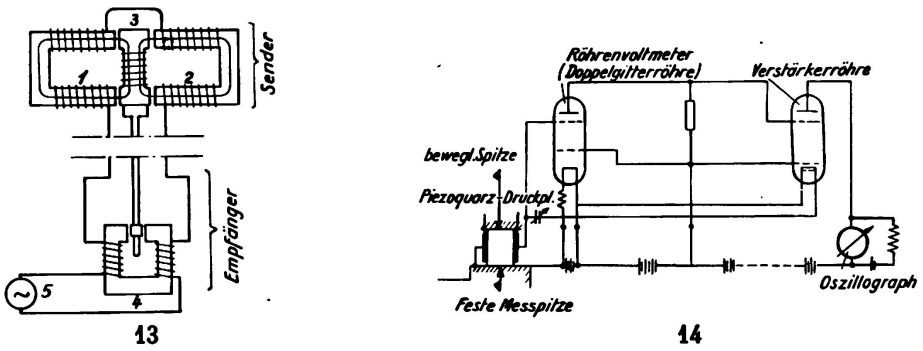


Fig. 13.

Elektrisch-optischer Dehnungsmesser nach dem elektromagnetischen Verfahren. Elektrisches Schaltschema nach Kamerer-Bernhard.

Appareil électrique et optique pour la mesure des allongements d'après la méthode électromagnétique. Schéma de montage d'après Kamerer-Bernhard.

Electrical and Optical Extensometer by the Electromagnetic Method. Wiring Diagram according to Kamerer-Bernhard.

Sender. — Transmetteur. — Transmitter.
Empfänger. — Récepteur. — Receiver.
1, 2: Feststehende Magnete (Senderteil). — Aimants fixes (Transmetteur). — Fixed magnets (Transmitter part).
3. Beweglicher Magnet (Senderteil). — Aimant mobile. — Movable magnet (Transmitter part).
4. Wattmetrische Schleife im Oszillographen (Empfängerteil). — Equipage mobile wattmétrique de l'oscillographe. — Wattmeter moving coil in the oscillograph (Receiver part).
5. Wechselstromgenerator (Empfängerteil). — Source de courant alternatif. — A. C. generator (Receiver part).

Fig. 14.

Elektrisch-optischer Beschleunigungsmesser nach dem Piezoquartzverfahren. Elektrisches Schaltschema nach Kluge und Linckh.

Appareil électrique et optique pour la mesure des accélérations d'après la méthode du quartz piézoélectrique. Schéma de montage d'après Kluge et Linckh.

Electrical and Optical Acceleration Recorder by the Piezoquartz Method. Wiring Diagramm according to Kluge and Linckh.

Bewegliche Messpitze. — Pointe mobile de mesure. — Movable measuring point.
Piezoquartz-Druckplatten. — Plaques de quartz-piézoélectrique travaillant à la compression. — Piezo-quartz press plates.
Feste Messpitze. — Pointe fixe de mesure. — Fixed measuring point.
Röhrenvoltmeter (Doppelgitterröhre). — Voltmètre électronique (tube à deux grilles). — Valve voltmeter (Double grid valve).
Verstärkerröhre. — Amplificateur. — Amplifying valve.
Oszillograph. — Oscillographe. — Oscillograph.

c. *Spannungsmessung nach dem elektromagnetischen Verfahren*[1] (*Kammerer-Bernhard*) (Abb. 13):

Das Verfahren, welches auch in den Vereinigten Staaten von Nordamerika verwendet worden ist, beruht ebenso wie das unter b genannte Messprinzip

1. Veröffentlichungen der Westinghouse Elec. Mgf Co Pittsburgh. Versuchslaboratorium, Messgerät für kleine Dehnungen (Patent 31. März 1931).

auf *Induktionswirkung* eines in *einem elektromagnetischen Felde beweglichen Ankers*. Der zwischen den Magnetspulen des Senders angeordnete Anker ist mit der beweglichen Messpitze, die beiden Magnetspulen mit der festen Messspitze verbunden. Die Längenänderungen des Baugliedes und mithin Bewegungen des Ankers induzieren Ströme, die von einem, mit wattmetrischen Schleifen versehenen Oszillographen (Wechselstromoszillographen) aufgezeichnet werden. Wattmetrische Schleifen, d. h. Scleifen, die das Produkt aus Stromstärke und Spannung messen, sind gewählt worden, um die Schwierigkeit bei der Auswertung von sonst unvermeidlichen Umhüllungskurven zu umgehen.

Sowohl die Magnetspulen des Senders, als auch die des Oszillographen zur Erzeugung der elektrischen Felder, werden mit ein- und demselben Wechselstrom von gleicher Periode gespeist. Die Frequenz des Wechselstroms (Trägerwelle) ist so hoch gewählt, dass die Oszillographenschleifen durch diesen Strom nicht in Schwingungen geraten.

Der Vorteil gegenüber den erstgenannten beiden elektrischen Verfahren liegt in dem Fortfall jeglicher Elektronenröhre. Das von der Deutschen Reichsbahn entwickelte Messgerät soll demnächst gleichfalls praktisch auf einer Brücke ausprobiert werden.

d. *Beschleunigungsmessung nach dem Piezoquarz-Verfahren*[1] (*Risch, sowie Kluge-Linckh*) (Abb. 14):

Die Druckänderung infolge irgendwelcher Beschleunigungen ruft Änderung der elektrischen *Ladung* eines oder mehrerer aufeinander gelegter *Piezoquarzkristalle* hervor. Der Anodenstrom einer Elektronenröhre wird durch das Gitter dieser Röhre entsprechend der Ladungsänderung des Kristalls gesteuert. Diese Röhre muss unmittelbar neben dem Piezoquarzkristall angeordnet werden, sowohl um die Ladungsverluste durch Isolationsströme, die sich niemals ganz vermeiden lassen, möglichst zu verkleinern, als auch um die Kapazität niedrig zu halten und damit die Empfindlichkeit zu steigern. Diese erste Röhre gehört also mit zum Senderteil. Ihr Anodenstrom kann durch eine weitere Röhre verstärkt und dem Oszillographen zur Aufzeichnung zugeleitet werden.

Das Verfahren ist im Bauwesen u. a. bei Beschleunigungsmessungen von Verkehrserschütterungen praktisch verwertet worden. Die Beschleunigungskräfte, welche auf ein über den Piezoquarzkristallen angeordnetes Gewicht wirken, setzen sich in Druck- und mithin Ladungsschwankungen des Piezoquarzkristalls um.

Ein Vorteil der unter a, b und d genannten Verfahren liegt in der Möglichkeit, mit Hilfe von Elektronenröhren eine fast unbeschränkte, masselose Vergrösserung erzielen zu können. Inwieweit die empfindlichen Röhren dem rauhen Betrieb und sonstigen Einflüssen auf der Messstelle gewachsen sind, muss praktischen Versuchen vorbehalten bleiben.

---

1. Messung von Verkehrserschütterungen. Risch. Verkehrstechnik 1929, Heft 40. Piezoelektrische Messungen von Druck- und Beschleunigungskräften. Kluge and Linckh. Zeitschrift des VDI, 1929, Heft. 37.

e. *Spannungs-, Beschleunigungs- und Durchbiegungsmesser nach dem Kohledruckverfahren*[1]. *Kohlefernmesser (Bernhard)* (Abb. 15) :

Der Kohlefernmesser ist im vorigen Bericht vom Verfasser[2] bereits genau beschrieben worden. Auf das Messverfahren soll daher hier nicht näher eingegangen werden. Wiederholt sei nur das Messprinzip, das auf dem in Abhängigkeit vom Druck veränderlichen elektrischen Widerstand von Kohleplättchen beruht.

Der Kohlefernmesser ist zur Zeit das einzige praktisch erprobte elektrische Sendegerät, welches ohne jede Elektronenröhre auskommt und trotzdem die erforderliche Vergrösserung erreicht. Ausserdem ist es von den elektrischen Sendegeräten dasjenige, welches bereits eine mehrjährige praktische Erprobung an Brücken durchgemacht hat. In Bezug auf sämtliche, bisher beschriebenen Verfahren ist hervorzuheben, dass es ohne nennenswerte Änderungen gleich-

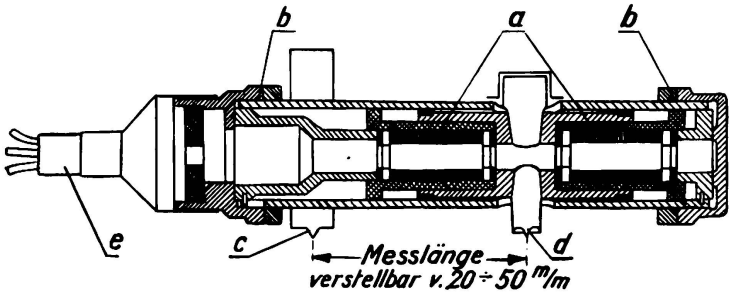


Fig. 15.

Elektrisch-optischer Dehnungs- (Spannungs-) Beschleunigungs- (Schwingungs-) und Durchbiegungsmesser nach dem Kohledruckverfahren.
Längsschnitt durch einem Kohlefernmesser (Bernhard).

Appareil électrique et optique pour la mesure des allongements (efforts), des accélérations (oscillations), et des fléchissements, par compression de disques de charbon.
Coupe longitudinale d'un télémètre à disques de charbon (Bernhard).

Electrical and Optical Recorder for Elongation (Stress), Acceleration (Oscillation), and Deflection, by the Carbon-resistance Method. Section of a Carbon-disc Telemeter (Bernhard).

Messlänge verstellbar von 20 bis 50 mm. — Longueur de mesure, réglable de 20 à 50 mm. — Measured length adjustable between 20 and 50 mm.
a) Kohlenringe. Disques de charbon. — Carbon disks.
b) Gewinde zur Veränderung der Vorspannung von a. — Écrou borgne pour réglage de la pression initiale des disques a. — Thread for changing the pressure in a.
c) Feste Spitze. — Pointe fixe de mesure. — Fixed point.
d) Bewegliche Spitze. — Pointe mobile de mesure. — Movable measuring point.
e) Kabelführung. — Arrivée et départ des câbles. — Cable inlet.

zeitig als Dehnungs- (Spannungs-), Durchbiegungs-, Schwingungs- und Beschleunigungsmesser an Bauwerken bereits verwendet worden ist. Die Weiterentwicklung gerade dieses Gerätes ist die folgerichtige Fortsetzung der Ergebnisse von Versuchen seit dem Jahre 1925, bei denen festgestellt wurde, dass die damals bestehenden Messgeräte den an sie zu stellenden Anforderungen noch nicht genügten. Es ist inzwischen gelungen, das Gewicht eines Senders auf 400 g bei einer Einbaulänge von nur 16 cm herunterzudrücken (Abb. 16). Ein noch kleineres Gerät von etwa 75 g Gewicht und 12 cm Einbaulänge befindet sich im Versuchsstadium.

1. New Development in Electrical Telemeters. Peters. Am. soc. Testing. Mat., 1923, S. 592. Ferndehnungsmessungen an Schiffskörpern. Siemann. Zeitzchrift des VDI, 1926, S. 539.
2. R. Bernhard. Bericht über die II. Internat. Tagung für Brücken- und Hochbau. Wien (Ausgabe 1929).

Bei Verwendung des Senders als *Schwingungs- oder Beschleunigungsmesser* ist nur eine andere Aufspannung erforderlich. Die bewegliche Messspitze wird dabei nicht in den Werkstoff gedrückt, sondern muss mit einem kleinen Zusatz-

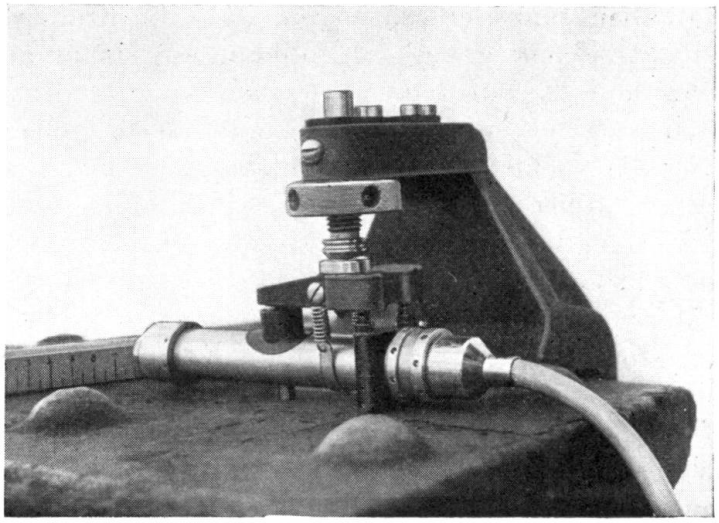


Fig. 16.
Kohlefermesser als Spannungs- (Dehnungs-) messer.
Télémètre à disque de charbon utilisé comme appareil pour la mesure des efforts (allongements).
Carbon-disc Telemeter used as Stress (Elongation) Measuring Instrument.

gewicht versehen, frei in der Richtung der zu messenden Beschleunigungen ausschwingen können (Abb. 17). Der Sender arbeitet auch in diesem Fall als Überfrequenzgerät, also anders als die sonst allgemein üblichen Schwingungsmesser der Erdbebenforschung, die meistens als Unterfrequenzmesser wirken.

Bei Verwendung des Senders als *Durchbiegungsmesser* müssen die, im Verhältnis zu den Spannungsdehnungen grossen Durchbiegungswerte verkleinert werden. Infolge des geringen Gewichtes und der kleinen Ausmasse des Senders genügt eine leichte Blattfederuntersetzung. Die dadurch hervorgerufene Verminderung der Eigenschwingungszahl bleibt weit über dem Vierfachen der raschesten Durchbiegungsfrequenzen.

Die grösste, bisher angewandte Vergrösserung betrug, in Verbindung mit einem Oszillographen, rd. 20 000, so dass Messungen an Massivstrassenbrücken bei Belastungen durch nur

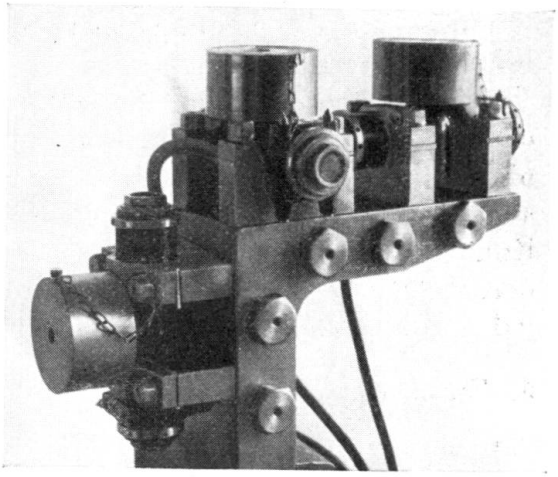


Fig. 17.
Kohlefernmesser. Sendergruppe als Dreikomponentenbeschleunigungs- (Schwingungs-) messer.
Télémètre à disque de charbon. Groupe transmetteur utilisé comme appareil de mesure des accélérations suivant les trois composantes (oscillations).
Carbon-disc Telemeter. Sending Set used as Acceleration (Oscillation) measuring device, by the Three-component Method.

ein einziges Belastungsfahrzeug ohne Schwierigkeiten durchgeführt werden konnten.

Wenngleich auch das Messprinzip, auf Grund veränderlicher Berührungswiderstände Messungen durchzuführen, in der Elektrotechnik nicht gern verwendet wird, so haben sich Befürchtungen, dass die Kohleplättchen raschen Schwingungen nicht schnell genug folgen könnten, als unbegründet herausgestellt; ein Mikrophon, das auf demselben Grundsatz beruht, werden bekanntlich Sprachschwingungen von wesentlich höheren Frequenzen einwandfrei übertragen. Vor- und Nachteile seien hier, obgleich sie im vorigen Bericht bereits teilweise angeführt wurden, nochmals zusammengestellt und ergänzt.

Die *Vorteile* der elektrisch-optischen Messverfahren sind hohe Apparateeigenschwingung und Vergrösserungsmöglichkeit, Bedienung und leichte Überwachung vieler Messgeräte gleichzeitig von einer Zentralstelle aus, also Ersparnis an Arbeitskräften; ferner ist die absolute Koinzidenz der verschiedenen Vorgänge auf einem Streifen, sowie Verringerung der Diagrammzahl durch Wiedergabe auf einem Papierband von in weitesten Grenzne regelbarem Vortrieb, der damit verbundene Zeitgewinn und schliesslich die bei Beschaffung mehrerer Sender kaum höheren Kosten als Vorteil zu bezeichnen.

Die *Nachteile* der elektrisch-optischen Verfahren liegen zweifellos in der nicht leichten Bedienung des Oszillographen, wobei freilich zu bemerken ist, dass auch sämtliche, selbst die einfachsten mechanischen, rein statischen Messgeräte unbedingt eingearbeitete Hilfskräfte erfordern; auch bedeutet die Notwendigkeit, die photographischen Diagramme erst entwickeln zu müssen, einen gewissen Zeitverlust.

Die Durchführung einer *Grosszahlforschung* ist nur durch gleichzeitiges Ansetzen vieler Apparate durchführbar. Die Erfassung mehrerer Messgrössen schon bei einer Belastungsfahrt wird durch elektrische Fernbedienung wesentlich erleichtert.

Die bisher durchgeführten, zahlreichen Messungen haben jedenfalls gezeigt, dass einige der auf elektrisch optischer Übertragung beruhenden Verfahren nicht nur als wissenschaftliche Laboratoriumsmethode geeignet sind, sondern auch in der Bauwerksmesstechnik mit Erfolg verwendet werden können. Kontrollmessungen oder einfachere Untersuchungen mit andern Messgeräten, deren Brauchbarkeitsgrenze hiermit gegebenenfalls festzustellen wäre, sollen jedoch damit keineswegs ausgeschlossen werden.

5. Zusammenfassung.

Einige *Hauptbedingungen*, die demnach an registrierende Messgeräte zur Untersuchung dynamischer Vorgänge im Bauwesen gestellt werden müssen, sind kurz zusammengefasst zur Zeit etwa folgende:

1) *Hohe Apparateeigenschwingungszahl.* Grösser oder gleich 1200 H, damit masstabsgetreue Anzeige von Frequenzen bis zu 300 H sichergestellt ist.
2) *Phasengleichheit*; um Verzerrung von Teilschwingungen zu vermeiden.
3) *Genauigkeit*; bei mindestens tausendfacher Vergrösserung $\pm$ 2,5 %.
4) *Einfache Eichmöglichkeit.*

5) *Leichte Bedienung*; tunlichst mehrerer Messgeräte von einer zentralen Stelle aus.
6) *Rascher Diagrammvortrieb*; zur Aufnahme kurzer Vorgänge schneller Papier- (Film-) vortrieb (möglichst bis 2 m/sec regelbar).
7) *Zeitliche Uebereinstimmung*; möglichst Anzeigen von mehreren Messstellen auf einem Diagramm.

Für Spannungs- (Dehnungs-) messer :

8) *Kurze Messlängen*; möglichst unter 20 cm.
9) *Empfindlichkeit*; Anzeigen von etwa 5 kg/cm².

Diese Grundlagen stimmen im wesentlichen mit den bereits im vorigen Bericht gestellten Forderungen überein. Ob sie überhaupt alle durch einen einzigen Apparat erfüllt werden können, bleibt noch dahingestellt.

III. Besondere Hilfsmittel.

Schwingungsmaschine.

Zu den Hilfsmitteln, welche dynamische Untersuchungen erleichtern sollen und auf die in dem vorigen Bericht bereits hingewiesen wurde, gehören die Versuche mit *Schwingungsmaschinen* [1].

Das Messverfahren beruht grundsätzlich auf der *Erregung von Bauwerken zu Schwingungen* mit Hilfe von künstlich erzeugten periodischen Impulsen, um durch Untersuchung des Verhaltens der Bauten gegenüber derartigen Lasten von genau bekannter, beliebig einstellbarer Grösse, Lage und Frequenz, Schlüsse auf die Eigenschaften und gegebenenfalls den Zustand des Bauwerks ziehen zu können.

Versuchsanordnung und Auswertung sollen wegen der Neuartigkeit des ganzen Verfahrens genauer beschrieben werden.

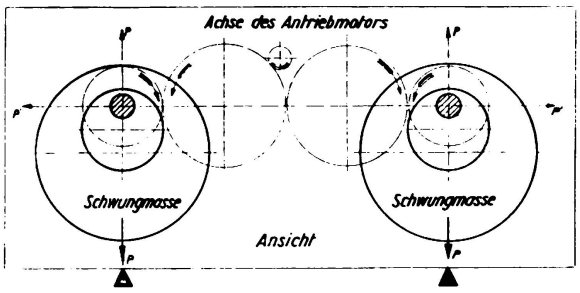


Fig. 18.
Schwingungsmaschine. Schema der Schwingmassenanordnung (Späth-Losenhausen).
Machine pour l'essai d'oscillation. Disposition des masses de mise en oscillation (Späth-Losenhausen).
Oscillating Machine. General Arrangement of the Oscillating Masses (Späth-Losenhausen).
Achse des Antriebsmotors. — Arbre de commande. — Axis of the driving motor.
Schwungmasse. — Masse de mise en oscillation. — Oscillating mass.
Ansicht. — Disposition d'ensemble. — Side view.

1. *Versuchsanordnung* : Die Schwingungserregung, bezw. die Ausübung von beliebig gerichteten und verschieden starken Kräften oder auch Kräftepaaren irgendwelcher Frequenz, die rein sinusförmig zu-, bezw. abnehmen, wird auf folgende Weise hervorgerufen :

Zwei exzentrisch gelagerte Scheiben, deren Drehsinn, sowie Exzentrizität beliebig einstellbar sind, werden durch einen Elektromotor angetrieben (Abb. 18). Je nach dem Drehsinn und der Stellung der beiden Schwungmassen zueinander (gleich- oder entgegengerichtet), können lotrechte bezw. waagerechte Impulse (P), und zwar Kräfte oder Momente in beliebigen Ebenen, auf das Bauwerk ausgeübt werden.

1. Rein dynamische Verfahren zur Untersuchung der Beanspruchung von Bauwerken. R. Bernhard und W. Späth. Der Stahlbau, 1929, Heft 6.

Während die lotrechten Kräfte z. B. bei Brücken in erster Linie zur Untersuchung der Hauptträger in Frage kommen, können die waagerechten Kräfte, vor allem winkelrecht zur Fahrbahnachse, zu Messungen an den Wind-, Brems- oder Schlingerverbänden Verwendung finden. Durch Momente (Kräftepaare) in lotrechten Ebenen, ebenfalls winkelrecht zur Gleisachse, ist die Torsionsteifigkeit von Brücken zu erforschen, also die räumliche Zusammenwirkung von Hauptträgern, Wind- und Querverbänden, was u. a. für einseitige Belastung zweigleisiger Brücken von Bedeuntung sein kann [1].

Die nicht gewünschten Impulse (P) der beiden Schwungmassen heben sich infolge der gewählten Gegenläufigkeit von selbst auf. Durch Einstellen der Exzentrizität kann die absolute Grösse der Zentrifugalkräfte von beiden Schwungscheiben weitgehend verändert werden. Zur Bestimmung der in den verschiedenen Exzenterstellungen ausgeübten Zentrifugalkräfte wird das von den Scheiben ausgeübte Drehmoment auf einer sogennanten Schwerpunktswaage ausgewogen, wie sie zum Ausbalancieren von Rotationskörpern vielfach Verwendung findet. Hierauf kann durch Rechnung für jede Tourenzahl die zugehörige Zentrifugalkraft Z bestimmt werden, und zwar nach der bekannten Formel :

$$Z = m \,.\, r \,.\, \omega^2,$$

worin m die Masse der Schwungscheiben, r die Exzentrizität und ω die Winkelgeschwindigkeit $= 2.\pi.n$ bedeutet (n = Anzahl der Schwingungen je Sekunde).

2. *Versuchsauswertung* : Der Strom zum Antrieb des Elektromotors muss, um Netzschwankungen auszuschalten, einer ortsbeweglichen Akkumulatorenbatterie entnommen werden. Nach Einschalten des Stromes wird die Tourenzahl langsam erhöht, und das Verhalten des Bauwerks bei den verschiedenen Umdrehungszahlen beobachtet. Jedes Bauwerk zeigt hierbei das Verhalten eines mechanischen Schwingungssystems. Die Durchbiegungen unter den periodischen Belastungen sind im allgemeinen sehr klein, erreichen jedoch in dem eng begrenzten Gebiet der Resonanz ausserordentlich grosse Werte.

Dieses Verhalten eines Bauwerks ist messtechnisch mit Hilfe verschiedener Methoden festzustellen. Man kann z. B. an beliebigen Stellen die sich ergebenden Durchbiegungen oder Spannungen mit Hilfe der früher ausgeführten registrierenden Messgeräte bestimmen. Durch Auftragen der Schwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Frequenz wird dann eine Art Resonanzkurve des Bauwerks erhalten.

Da die im Bauwerk schwingende Energie proportional mit dem Quadrat der Schwingungsausschläge wächst, kann vorteilhaft nicht die Auslenkung selbst, sondern deren Quadrat aufgetragen werden.

Eine weitere Messung von besonderer Bedeutung besteht nun darin, die *Leistung des Antriebsmotors* zu bestimmen. Die vom Motor zu deckende Leistung wächst genau wie die oben erwähnte Energiekurve — Quadrat des Aus-

---

1. Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. F. Bleich.
Über die Verwindungssteifigkeit von zweigleisigen Eisenbahnfachwerkbrücken.
R. Bernhard. Der Stahlbau, 1930, Heft 8 u. 1931, Heft 21.

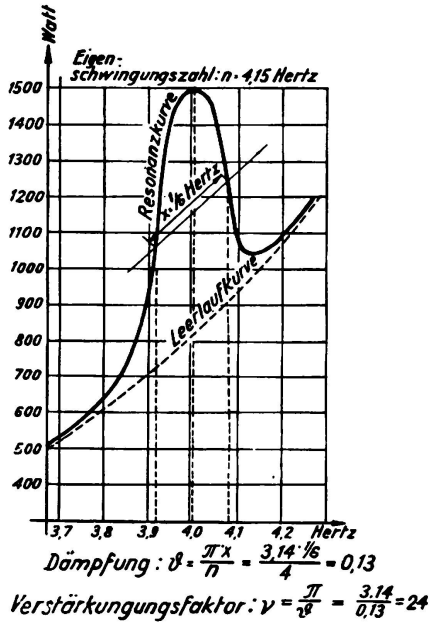
Messprinzip	Bezeichnung: Überfrequenz	Bezeichnung: Unterfrequenz	Messgrössen (bisher angewandt)	Messbereich etwa	Vergrösserung	Eigenschwingung (Hertz) etwa	Sender: Zahl	Sender: Messlänge	Sender: Art	Sender: Gewicht	Empfänger: Zahl	Empfänger: Registrierung	Besondere Vorteile	Besondere Nachteile
Mechanisch	Schweizerische Bundesbahnen	—	Dehnungen	50-1000 kg/cm²	1:100		1	20 cm u. 40 cm	2 Hebel 4 Gelenke	1 kg	1 ohne Vortrieb	Schreibhebel mit Tinte, Uhrwerkvortrieb	Diagramm unmittelbar erkennbar	Vergrösserung begrenzt
	—	Vibrograph	Schwingungen	–	1:2	0,001-1	1	—	Schwere Masse 2 Hebel 5 Gelenke	4,6 kg	1			Niedrige Eigenfrequenz
	Ritzverfahren	—	Dehnungen	50-1000 kg/cm²	1:1	~ 2000	1	20 cm fest		0,5 kg	1	Diamant auf Glas	Kleiner Sender	Auswertung mit Mikroskop Vergr. bis 500 fach
Optisch	Optograph	—	Durchbiegung	—	—	—	1	—	Triple Prisma	0,5 kg	~ 12	Photographisch-Film mit Uhrwerkvortrieb	Synchronismus	Auswertung mit Mikroskop. Umrechnung auf Dehnungen
	Mikrophotograph	—	Durchbiegung Dehnungen	0,01-60 mm 30-1000 kg/cm²	2:1 bis 1:20 1:70	— —	1	20 cm fest	Spule	15 kg	1			Vergrösserung begrenzt
Mechanisch Optisch	Fereday Palmer	—	Dehnungen	50-1000 kg/cm²	1:100	~ 170	1	50,8 cm fest	Spiegel 1 Hebel	10 kg	1			
	—	3 Komponenten Erschütterungsmesser	Schwingungen	—	bis 1:3000	~ 5	3	—	3 Spiegel 3 Hebel	33 kg	1		Empfindlichkeit	Niedrige Eigenfrequenz
Elektrisch-Optisch	Kondensator	—	Dehnungen	beliebig		—	1	—	2 Kondensatorplatten	—	~ 6	2 Röhren (12)	Oszillograph Photograph.-Film mit Uhrtr. Vortrieb: Beliebige Vergrösserung	Elektronenröhren
	Induktion	—	Dehnungen	—		—	1	—	Eisenkern und Spule	—	~ 6	2 Röhren (12)	Oszillograph Photograph.-Film mit Uhrtr. Vortrieb: Synchronismus	
	Elektromagnetisch	—	Dehnungen	—		—	1	—	3 Spulen	—	~ 6			
	Piezoquarz	—	Schwingung Beschleunigung	—		—	1	—	Piezoquarz u. 1 Rohre		~ 6	1 Röhre (6)	Oszillograph Photograph.-Film mit Uhrtr. Vortrieb: Kleiner Sender	Elektronenröhren
	Kohlefernmesser	—	Durchbiegung Dehnungen Schwingungen Beschleunigung	5-2000 kg/cm²	bis 20 000	1200 bis 4000	1	2-50 mm	Kohleplättchen	0,4 kg Gewicht	~ 6			

Photographische Entwicklung

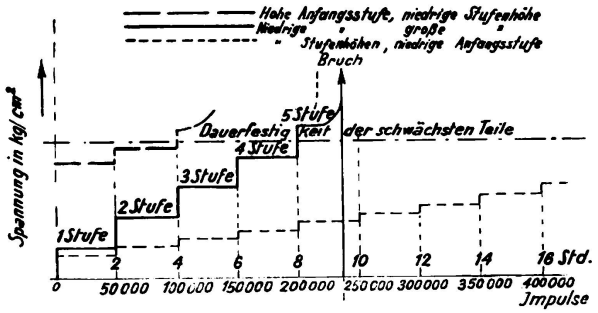
schlags — beim Durchgang durch eine kritische Eigenfrequenz des Bauwerks erheblich an.

Trägt man daher auf der X- Achse die Tourenzahl der Schwingungsmaschine und auf der Y- Achse die jeweilige Leistung des Antriebsmotors auf, was durch besondere Registrierinstrumente selbsttätig erfolgen kann, so erhält man *Frequenzleistungsdiagramme* (Abb. 19). Derartige Kurven sind massgebend für das dynamische Verhalten eines Bauwerks und bilden die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen.

Die gestrichelte Linie zeigt hierbei den Verbrauch an Leerlaufarbeit zur Überwindung der elektrischen und mechanischen Verluste der Prüfanordnung. Diese Kurve muss vorher für sich aufgenommen werden, wobei die Schwing-



19



20

Fig. 19

Ergebnis eines Schwingungsversuches mit der Schwingungsmaschine.
Frequenz-Leistungsdiagramm einer Brücke.

Résultats des essais d'oscillation effectués avec la machine spéciale de mise en oscillation.
Diagramme fréquence. — Puissance absorbée, dans un pont.

Results of an Oscillation Test with the Oscillating Machine.
Power-frequency Diagram on a Bridge.

Eigenschwingungzahl. — Fréquence propre d'oscillation. — Natural frequency.
Resonanzkurve. — Courbe de résonance. — Resonance curve.
Leerlaufkurve. — Courbe de marche à vide. — No-load curve.
Dämpfung. — Amortissement. — Damping.
Verstärkungsfaktor. — Coefficient d'amplification. — Amplifying factor.

Fig. 20.

Ergebnis eines Zerstörungsversuches mit der Schwingungsmaschine.
Stufendiagramm bei einer Arbeitsfrequenz von rund 7 Hertz.

Résultats des essais de destruction effectués avec la machine d'essai d'oscillation.
Diagramme progressif pour une fréquence de travail d'environ 7 Hertz.

Results of a Test to Destruction with the Oscillating Machine.
Stage-Diagram for a working frequency of about 7 Hertz.

Spannung in kg/cm². — Efforts en kg par cm². — Stress in kg/cm².
1. Stufe. — 1er échelon du taux de travail. — 1st step.
2. Stufe. — 2e échelon du taux de travail. — 2nd step.
Bruch. — Rupture. — Rupture.
Dauerfestigkeit des schwächsten Teils. — Résistance à la fatigue des parties les plus faibles. — Fatigue Strength of the weakest parts.
Std. — Heures. — Hours.
Impulse. — Nombres d'impulsions. — Impulses.
Hohe Anfangsstufe, niedrige Stufenhöhe. — Taux initial élevé, échelons faibles. — High initial stress, small increases.
Niedrige Anfangsstufe, grosse Stufenhöhe. — Taux initial faible, échelons élevés. — Low initial stress, high increases.
Niedrige Anfangsstufe, niedrige Stufenshöhen. — Taux initial faible, échelons faibles. — Low initial stress, low increases.

ungsmaschine auf eine starre Unterlage gestellt wird. Der Antriebsmotor hat in diesem Falle lediglich die Leerlaufverluste zu decken, während die eigentliche Arbeitsleistung, also die Erzeugung von Schwingungen durch die starre Lagerung künstlich auf Null gehalten wird.

3. *Schwingungsversuche* : Die eigentlichen Versuche mit der Schwingungsmaschine dienen nicht zur Untersuchung des Baustoffs selbst und auch im Allgemeinen nicht einzelner Punkte des Bauwerks, sondern wollen das Verhalten des *gesamten Baukörpers* und zwar auf rein dynamischem Wege erfassen. Dazu können also die eingangs erwähnten einzelnen statischen oder dynamischen Messungen von Dehnungen, Spannungen, Durchbiegungen, Schwingungen oder Beschleunigungen nicht gerechnet werden.

Die Erregung von Eisenbahnbrücken zu Schwingungen durch eine darüberfahrende Lokomotive und erst recht durch ganze Züge ist ein so verwickelter Vorgang, dass eine *Trennung von Ursache und Wirkung* sehr erschwert wird. Die Vereinfachung und klare Erfassung des Erregervorganges durch derartige Schwingungsversuche ist zur Aufstellung systematischer Versuche sehr erwünscht.

Es sei hier erwähnt, dass bei weiteren Versuchen an Brücken angestrebt wird, die dämpfende Wirkung der Fahrbahn von Schienen, Schwellen, Bettung, sowie Längs- und Querträgern wahlweise auszuschalten, um gleichzeitig ihren Einfluss auf den Überbau selbst feststellen zu können.

4. *Dauer- und Zerstörungsversuche* : Man hat diese Versuchsmethode weiter ausgebaut und ist zu *Dauerversuchen*[1] übergegangen, die bis zur Zerstörung des Bauwerks durchgeführt werden.

Die Beanspruchung bis zum Bruch unter dauernd wechselnden Lasten, die sogenannte *Dauerfestigkeit*, beträgt nur einen Teil, etwa herunter bis zu 20 %, der einmaligen statischen Bruchbelastung. Die Bestimmung der Dauerfestigkeit spielt daher bei den neueren Werkstoffuntersuchungen eine wichtige Rolle.

Es sind Versuchsträger, Dachbindern oder kleinen Brückenbauten entsprechend, hergestellt worden, und nun die Impulszahl und -stärke, hervogerufen durch die Schwingungsmaschine, welche auf diesen Versuchsträgern befestigt war, so lange gesteigert worden, bis die ersten Brüche eintraten.

Ein Beispiel für ein *Stufendiagramm*, bei dem auf der X-Achse die Anzahl der stufenweise gesteigerten Impulse, und auf der Y-Achse die durch diese Impulse verursachte Spannung in dem zuerst zerstörten Bauglied aufgetragen ist, geht aus Abb. 20 hervor. Der Bruch trat in dem in der Abb. 20 gezeichneten Beispiel nach 235 000 Impulsen und 9 1/2 Stunden Versuchsdauer bei $\pm$ 2 000 kg/cm^2 Beanspruchung der zerstörten Verbindung in der 5. Belastungsstufe ein.

Nur um einen Anhalt für die Bedeutung derartiger Zerstörungsversuche zu gewinnen, kann man sich z. B. eine Brücke vorstellen, die in 24 Stunden von 50 Zügen befahren wird und bei jeder Überfahrt *einen* derartigen Stoss als Höchstwert erleidet. Die Zerstörung nach 235 000 Impulsen käme dann einer Betriebsdauer von rund 13 Jahren gleich.

---

1. Dauerversuche an genieteten und geschweissten Brücken. R. Bernhard. Zeitschrift des VDI, 1929, Heft 47.

Auf diese Weise sind bereits eine Anzahl von Versuchsträgern aus verschiedenen Stahlsorten mit verschieden ausgebildeten Nietverbindungen, sowie auch geschweissten Knotenpunkten, untersucht worden.

Durch Einschaltung von schwächeren Gliedern, bezw. Verbindungen, können in gleicher Weise auch Versuche an *Einzelstäben* vorgenommen werden.

Ergänzt sind diese Versuchsreihen mit Hilfe von Temperaturmessungen. Durch Anbringung von Temperaturmessgeräten an den vermutlich zuerst zum Bruch neigenden Stellen, werden die auftretenden Wärmeschwankungen registriert. Es ist auf diese Weise gelungen, schwache Stellen der Konstruktion, deren Erwärmung vermutlich innerer Reibungsarbeit zuzuschreiben ist, lange vor Eintreten des ersten Bruches einwandfrei nachzuweisen.

5. *Zusammenfassung.*

a) Vorteile des Verfahrens mit Schwingungsmaschinen.

1. Die *Durchführung der Versuche* ist verhältnismässig einfach und stellt keine besonderen Anforderungen an das Bedienungspersonal. Nach dem Aufsetzen auf das zu untersuchende Bauwerk ist die Schwingungsmaschine in wenigen Minuten messbereit.

2. Die Messung der grundlegenden Kennziffer eines Bauwerks, der *Eigenabstimmung*, ist auf etwa 1/10 H genau möglich. Diese Bestimmung erlaubt eine genaue Berechnung der übrigen dynamischen Eigenschaften.

3. Die *Versuchsbedingungen* selbst, z. B. die Grösse der dynamischen Belastung, sind genau einstellbar und können insbesondere bei Kontrollmessungen beliebig oft wiederholt werden, eine grundlegende Forderung für vergleichbare Brückenprüfungen.

4. *Gewöhnliche Belastungsversuche* sind im allgemeinen nur in lotrechter Richtung, diese Versuche dagegen in beliebiger Richtung möglich, da sie von der Schwerkraft unabhängig sind.

b) Nachteile des Verfahrens.

1. Als *Nachteil* muss vorläufig die heute noch unentschiedene Frage betrachtet werden, ob es überhaupt gelingen wird, bestimmte *charakteristische dynamische Eigenschaften* der Bauwerke in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Bauzustand einwandfrei zu erkennen. Erst dann kann von einer praktischen Bedeutung des Verfahrens zur Überwachung z. B. von Brücken während des Betriebes, die Rede sein.

2. Die Frage, an welchem Punkte des Bauwerks bei schlechten Ergebnissen nun die schwache Stelle zu suchen ist, bleibt bei derartigen Verfahren ungelöst und wird dagegen stets örtlichen Untersuchungen. bezw, Messungen, vorbehalten bleiben.

IV. Anwendungsgebiete der Messverfahren.

Die Verwendung der nach obigen Grundsätzen entwickelten, dynamischen Messgeräte und- verfahren erstreckt sich auf das gesamte Gebiet des *Bau- und Maschinenwesens*, von dem hier nur einige wenige Beispiele genannt werden sollen.

1. Hoch- und Tiefbau.

Die Verhinderung der Übertragung von Schwingungen und Geräuschen im Erdboden und Gebäuden[1] ist eine wichtige Aufgabe im *Hochbau*. Die Schwingungs- und Geräuschdämpfung in grossen Sälen oder die zweckmässige Weiterleitung des Schalles ist vor allem durch Beschleunigungs- und Schwingungsmessungen (auch akustischer Natur) zu verfolgen. An die Erdbebenforschung (Seismik) muss dabei angeknüpft werden. Hier werden in vielen Fällen einfachere Messgeräte gute Dienste leisten, da die Anforderungen in Bezug auf die Aufnahme hoher Schwingungszahlen herabgesetzt werden können.

Im *Tiefbau* kommt in erster Linie die Erdbebenforschung, die Untersuchung der Tragfähigkeit verschiedener Bodenarten, die Bestimmung ihrer Bettungsziffer usw. in Frage. Hier sind u. a. Versuche mit Schwingungsmaschinen begonnen worden[2]. Auch sind in diesem Zusammenhang dynamische Untersuchungen von Strassenfahrbahnen zu erwähnen; Versuche betreffend den Widerstand ihrer Oberfläche gegenüber verschieden bereiften, schnell fahrenden Fahrzeugen, sowohl in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Strassendecke, als auch in Bezug auf die Weiterleitung der Stösse und Geräusche in die Nachbarschaft, kommen dabei in Frage.

Im *Tiefbau* erstreckt sich ferner die Untersuchung von dynamischen Beanspruchungen insbesondere auf Fundamente. Die Berechnung von Maschinenunterbauten, deren Eigenfrequenzen möglichst oberhalb der Maschinendrehzahl liegen müssen, gehört mit zu den Aufgaben des Bauingenieurs. Bei rasch laufenden Turbinen, wo sich diese Forderung meistens nicht durchführen lässt, verlangt die Vermeidung einer Übereinstimmung zwischen Betriebsdrehzahl und irgend einer Fundamenteigenschwingung, bezw. eines Obertons, meist schwierige Berechnungen.

2. Maschinenbau.

Im *Maschinenbau* ist die Untersuchung von dynamischen Beanspruchungen bereits am weitesten fortgeschritten, in der Luftfahrttechnik sind jedoch die verschiedensten, dynamischen Probleme noch zu lösen. Eine Übereinstimmung der Torsionseigenschwingungszahlen von Kurbelwellen mit ihren Drehzahlen hat schon oft zu den gefährlichsten Dauerbrüchen geführt.

Im *Schiffbau* sind dynamische Untersuchungen, vor allem im hohen Wellengang, zu erwähnen. Resonanzerscheinungen an Zwischendecks oder der Aussenhaut in Verbindung mit dem Schraubenantrieb können zu besonders unangenehmen Störungserscheinungen führen. Auch hier sind u. a. Versuche mit Schwingungsmaschinen begonnen worden.

3. Eisenbahnbau.

Ferner ergibt der *Eisenbahnbau* mit Messungen an Fahrzeugen und am Oberbau ein weites dynamisches Arbeitsfeld. Die Bestimmung der Bewegung

---

1. Messung von Verkehrserschütterungen. Risch. Verkehrstechnik, 1929. Heft 40.
2. Die dynamische Bodenuntersuchung. Hertwig. Bauingénieur, 1931, Heft 25 u. 26.

der Fahrzeuge während der Fahrt durch dynamische Messgeräte spielt u. a. für die Begrenzung des Lichtraumprofils und die Beanspruchung des Fahrgestells eine wichtige Rolle. Am Oberbau ist gleichfalls die Bettungsziffer und die Spannung in den Schienen während der Überfahrt rasch fahrender Züge zu erforschen.

4. Brückenbau.

Schliesslich bildet der *Brückenbau* mit das wichtigste technische Neuland, da hier die dynamischen Beanspruchungen erhebliche Werte erreichen können, die noch wenig erforscht sind. Durch genaue Kenntnis der Schwingungsvorgänge lassen sich gegebenenfalls praktische Ersparnisse erreichen. Die Verringerung des Abstandes zwischen zulässiger Spannung und Streckgrenze, bezw. Dauerfestigkeit, wird wohl bei sicherer Messung der wirklich im Höchstfall auftretenden statischen und dynamischen Beanspruchungen, sowie genauerer Festlegung der Dauerfestigkeit der Werkstoffe und ihrer Verbindungen sich ermöglichen lassen.

Auf einige Untersuchungen im Brückenbau soll im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

C. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse.

I. Spannungs- und Schwingungsmessungen.

Als Ergebnis der bisher beobachteten dynamischen Zusammenhänge zwischen Fahrzeug und Brückenbau [1] kann man, wenn zunächst nur die lotrechten Schwingungen sowohl von den Überbauten wie auch von den Fahrzeugen als Ganzes in Betracht gezogen werden, vorläufig folgende Einteilung, ähnlich wie sie bereits im englischen Bericht [2] durchgeführt worden ist, vornehmen :

1. Eisenbahnbrücken.

a. Bei *Eisenbahnbrücken mit grossen Spannweiten*, also niedriger lotrechter Eigenfrequenz, kann eine annähernde Übereinstimmung mit den lotrechten Lokomotiv-und Schwerwageneigenfrequenzen auftreten. Die dämpfende Wirkung der Federn der Fahrgestelle wird jedoch ein Aufschaukeln zu grösseren Schwingungen des Überbaues, und mithin erhöhten Stosszahlen, kaum zulassen.

b. *Bei Brücken mit mittleren Spannweiten* und entsprechend höherer Eigenschwingung kommt eine Übereinstimmung mit den Fahrzeugeigenfrequenzen kaum in Frage; dagegen werden möglicherweise die unausgeglichenen, hin und hergehenden Massen von Dampflokomotivtriebwerksteilen als Erregerkräfte wirksam werden. Bei höheren, sogenannten kritischen Fahrgeschwindigkeiten können diese Erregerkräfte mit den Brückeneigenschwingungen zusammenfallen nnd gegebenenfalls zu erheblichen Aufschaukelungen und mithin erhöhten Stosszahlen führen.

c. Bei *Brücken mit kleineren Spannweiten*, also hohen Eigenfrequenzen,

1. Brücke und Fahrzeug. Betrachtungen über ihre dynamischen Zusammenhänge. R. Bernhard. Bauingenieur, 1930, Heft 28.
2. Report of the Bridge Stress Committee, London, 1928.

werden sowohl die lotrechten, verhältnismässig langsamen Eigenschwingungen der Fahrzeuge, als auch die Anstösse durch unausgeglichene Schwungmassen nicht zu Aufschaukelungen führen, schon allein aus dem Grunde, weil die Einwirkung der Erregerkräfte sich nur auf die sehr kurze Zeit der Überfahrt erstreckt.

Die durch unmittelbare Stosswirkung erhöhten dynamischen Beanspruchungen, die in erster Linie örtliche Verformungen und auch Schwingungen von Einzelgliedern hervorrufen, werden von diesen Betrachtungen nicht berührt. Der Stossweg, d. h. der räumliche Abstand zwischen Stosserregung und ihrer Auswirkung, also der jeweiligen Messtelle, spielt eine wesentliche Rolle.

2. Strassenbrücken

Bei Strassenbrücken liegen die Verhältnisse etwas anders. Es treten keine Erregerkräfte durch unausgeglichene Massen auf. Die durch rauhes Strassenpflaster hervorgerufenen Stösse erfolgen fast immer völlig unregelmässig. Sie können aber trotzdem zu erheblichen Schwankungen des Fahrzeugchassis und mithin, bei annähernder Übereinstimmung von Überbau und Fahrzeugeigenschwingung, zu Aufschaukelungen und erhöhten Stosszahlen führen. Insbesonders begünstigt hierbei die Fahrzeugabfederung eine Energieübertragung auf die Brücke und führt leicht zu Schwebungserscheinungen [1].

Im übrigen trifft die für Eisenbahnbrücken durchgeführte Dreiteilung in Strassenüberbauten mit grossen, mittleren und kleinen Spannweiten in gewissem Sinne gleichfalls zu.

Gefahrenpunkte bilden alle nicht genügend steifen Überbauten und Einzelglieder, also besonders schlaffe Schrägen, wie sie namentlich bei älteren Brücken häufig vorkommen.

Aus den bisher besprochenen Ergebnissen mit Dehnungsmessern geht hervor, dass es möglich ist, allein durch Auswerten von Spannungsdiagrammen bereits einige schwingungstechnische Erkenntnisse zu gewinnen. Dass diese Erkenntnisse nur einen ersten, kleinen Schritt auf dem grossen Gebiet der Brückendynamik bedeuten und durch eingehende theoretische Untersuchungen ergänzt werden müssen, ist selbstverständlich. Insbesondere muss eine Art Grosszahlforschung, an den einfachsten Trägern beginnend, systematisch weiter durchgeführt werden, um durch schrittweises Vorgehen zu immer schwierigeren Tragwerken, auch die vielfach zusammengesetzten Erscheinungen erkennen zu können.

Zusammenfassend kann gesagt werden :

1. Die Stosszahl, die den dynamischen Einfluss der Verkehrslasten erfassen soll, ist in bestimmten Fällen von der Spannweite des Überbaues, dem Fahrzeuggewicht und der Fahrgeschwindigkeit nur mittelbar abhängig.

2. Fahrzeug und Brücke sind in ihrer gegenseitigen Beeinflussung wesentlich von ihren schwingungstechnischen Eigenschaften abhängig. Die dynamischen Konstanten der Fahrzeuge haben einen erheblichen Einfluss auf die Stosszahl.

3. Es muss zwischen verschiedenen Schwingungsformen der Brücken und Fahrzeuge unterschieden werden.

---

1. Brücke und Fahrzeug. Betrachtungen über ihre dynamischen Zusammenhänge. R. Bernhard. Bauingenieur, 1930, Heft 28.

4. Bei Berechnung der Eigenschwingungszahlen ist der jeweilige Belastungszustand von Brücke und Fahrzeug zu berücksichtigen.

5. Inwieweit die beobachteten ungünstigsten Fälle nur Ausnahmen darstellen, insbesondere, ob bei Eisenbahnbrücken infolge der grossen Dämpfung der Fahrzeugfedern sowie der erhöhten Fahrgeschwindigkeiten (Impulszahl und Impulsfrequenz) und der mithin fehlenden Aufschaukelzeit Schwingungserscheinungen, die zu einer nennenswerten Erhöhung der Stosszahl führen, überhaupt regelmässig auftreten können, muss durch zahlreiche weitere Untersuchungen, die sich insbesondere auch mit den dynamischen Fahrzeugeigenschaften befassen, erst geklärt werden.

II. Schwingungsversuche.

Auf Grund der bisher durchgeführten Versuche mit Schwingungsmaschinen *am fertigen Bauwerk* und an fertigen Fahrzeugen kann wohl gesagt werden, dass eine Erweiterung der Kenntnisse unserer Bauwerksdynamik auch mit diesem neuen Verfahren zu erhoffen ist.

Es lassen sich *Ermüdungs- und Alterungserscheinungen* infolge periodischer Belastung in verhältnismässig kurzer Zeit studieren, die gegebenenfalls zur Verbesserung der dynamischen Eigenschaften der Bauwerke und Fahrzeuge, also zu konstruktiven Änderungen führen werden.

Dem Idealbild *eines Bauwerkes gleicher Festigkeit*, auch gegenüber dynamischen Beanspruchungen, wird man auf diese Weise möglicherweise näher kommen. Nur nach Messungen an zahlreichen, auf andere Weise bereits untersuchten neuen, sowie alten Bauwerken, deren guter bezw. schlechter *Bauzustand* daher im voraus bekannt ist, wird man in der Lage sein, für die mit diesem Verfahren dann neu zu messenden Bauwerke gleichsam Zeugnisse auf Grund ihres dynamischen Verhaltens aufzustellen.

III. Dauerversuche.

Die Ergebnisse der Dauerversuche können vorläufig wie folgt zusammengefasst werden :

1. Das Verfahren ermöglichst die Durchführung derartiger *Dauerversuche* an Versuchsüberbauten und Vergleiche zwischen verschiedenen Konstruktionen in verhältnismässig kurzer Zeit.

Insbesondere bei geschweissten Bauwerken wird dieses Versuchsverfahren Bedeutung gewinnen, da die üblichen Verfahren der dynamischen Werkstoffprüfung an einzelnen Schweissraupen oder Schweissnähten schwer durchzuführen sind.

2. Eine gewisse *Erhöhung der Eigenfrequenz* scheint innerhalb einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln einzutreten.

3. Eine *Erholung* nach längeren Pausen, die im praktischen Betrieb stets vorhanden sind, wird auch nach Überschreitung des Höchstwertes obiger Erscheinung zunächst ebenfalls zugunsten der Dauerfestigkeit der Konstruktion anzunehmen sein.

4. *Brüche einzelner Konstruktionsteile* machen sich in einer sprunghaften Erniedrigung der Eigenfrequenz der verschiedenen Freiheitsgrade bemerkbar.

TRADUCTION

par M. Gossieaux, Ing., Paris.

A. Généralités sur la technique des mesures.

La grosse importance que l'on doit attacher, en premier lieu, à la technique pratique des mesures, provient du but utilitaire qu'elle permet d'atteindre. Il est probable que, sans cette aide qu'elle apporte à la théorie, en permettant le contrôle et la mise en valeur des résultats du calcul des processus dynamiques, les études théoriques ne pourraient réaliser que des progrès très lents. La technique des mesures permet donc à l'étude théorique de progresser. Cet appui réciproque que trouvent entre eux la mesure et le calcul permettent, en grande partie, d'établir sur des bases précises une grande partie des hypothèses tout d'abord arbitrairement choisies, et qui servent de point de départ aux études théoriques. On peut ainsi éviter d'adopter dans les différentes parties de la construction, des dimensions trop faibles ou trop fortes et réaliser les conditions présentant le maximum d'économie et de sécurité.

I. Grandeurs à mesurer et limites des mesures.

Dans l'étude des charpentes, les grandeurs dont la mesure est nécessaire sont, en premier lieu, les suivantes :

Flexions,
Allongements, ou plus généralement variations de longueur,
Torsions, ou déviations angulaires,
Oscillations, sous les rapports de la fréquence et de l'amplitude,
Accélérations,
et ultérieurement :
Amortissements,
Taux de travail,
Températures.

La nature exacte des grandeurs effectives sur lesquelles doivent porter les mesures dépend, entre autres considérations, de la nécessité d'étudier soit le matériau lui-même, soit la charpente finie ou en cours de construction.

On ne prendra en considération, dans ce qui suit, que les mesures à effectuer sur la charpente elle-même et, en particulier, celles qui correspondent à des taux de travail inférieurs à la limite d'élasticité.

La manière dont se présentent les grandeurs indiqués ci-dessus est extrêmement variable. Les fléchissements peuvent varier dans des limites très étendues, allant par exemple de 1/10 de millimètre jusqu'à 10 centimètres; par contre les allongements se limitent à des valeurs notablement plus restreintes; si l'on considère les longueurs que l'on a à mesurer le plus couramment, elles dépassent à peine 200 μ soit 0,2 millimètre ($1\ \mu = 10^{-3}$ mm). En ce qui concerne les mesures de torsion, ou de déviations, il faut compter avoir à descendre, pour les valeurs les plus faibles et qui sortent d'ailleurs de la normale, jusqu'à 5 secondes. On observe des oscillations atteignant une fréquence de

800 hertz (1 hertz = 1 oscillation par seconde), donc atteignant facilement déjà le double de la fréquence de 435 hertz qui correspond au la du diapason normal. En ce qui concerne les autres grandeurs qui sont indiquées plus haut, il est encore difficile, à l'heure actuelle, de donner des chiffres précis.

Les ressources dont on dispose pour la mesure de ces dimensions, dont quelques-unes sont extrêmement faibles, sont offertes principalement par la mécanique, l'optique, l'électrotechnique et l'acoustique. La mécanique n'offre toutefois qu'un champ d'investigation rapidement limité, aussi bien dans les valeurs supérieures que dans les valeurs inférieures, par suite de ce fait que les masses interviennent au premier chef ; par contre, les trois autres domaines permettent d'atteindre des marges sensiblement plus étendues.

En optique, par exemple, avec l'ultramicroscope, on peut en solution colloïdale atteindre des valeurs ne dépassant pas quelques $\mu\mu$ (1 $\mu\mu = 10^{-6}$ millimètre). En électrotechnique, avec l'oscillographe cathodique, on peut enregistrer des processus s'étendant sur un intervalle de temps ne dépassant pas 10^{-7} seconde.

Il est évident que les nécessités de la construction n'atteignent pas, en ce qui concerne la technique des mesures, les limites indiquées ci-dessus ; toutefois, on ne saurait se passer de l'aide du rayon lumineux dénué de masse, qu'offre l'optique, ou de la transmission du courant également dénué de masse, qu'offre l'électricité.

II. Exigences auxquelles doivent répondre les appareils de mesure.

En ce qui concerne les exigences auxquelles doivent pouvoir répondre les appareils destinés aux mesures relatives à la construction, on peut distinguer deux catégories : exigences statiques et exigences dynamiques, suivant que les grandeurs à mesurer présentent un caractère fixe ou variable.

Les mesures d'allongements, c'est-à-dire d'efforts, jouent un rôle absolument capital en construction ; ils consistent, en somme, à mesurer les modifications de l'intervalle entre deux points. C'est de cette catégorie de mesures qu'il sera donc question en premier lieu. Le dernier rapport présenté par l'auteur au cours de la Réunion Internationale des Ponts et Charpentes, à Vienne, en 1928 (Edition de 1921 [1]), a déjà traité d'une manière approfondie les nécessités auxquelles doivent répondre les appareils de mesure, tant du point de vue statique, telles que la sensibilité, l'amplification et la précision, que du point de vue dynamique, comme l'enregistrement, le chronométrage, les appareils à haute et à basse fréquence, le synchronisme des phases. Il n'est donc pas utile de revenir sur ces questions.

III. Les sources d'erreur dans les appareils de mesure.

Les erreurs qui s'introduisent facilement dans l'utilisation des appareils de mesure peuvent être provoquées par des causes statiques ou dynamiques. On trouvera, dans les lignes qui suivent, quelques indications sur les causes de perturbation que l'on rencontre le plus fréquemment.

---

1. Neuere Messungen dynamischer Brückenbeanspruchungen. R. Bernhard. Bericht über die II. Intern. Tagung für Brücken-und Hochbau. Vienne, édition 1929.

1. Erreurs d'ordre statique.

a. Les articulations des appareils.

Si l'on emploie des leviers pour assurer la transmission des mouvements, le jeu dans leurs articulations constitue une source d'erreurs, si les articulations ne sont pas particulièrement étudiées. Pour une amplification de 1.000 il suffit en effet d'un jeu de 1 μ pour provoquer à la lecture une déviation de 1 millimètre, ce qui, sur une longueur de mesure de 20 centimètres, peut se traduire par une erreur de 1 kg par mm^2.

b. Variations de température.

Remarquons en outre qu'une variation de température de 1° C s'exerçant sur une pièce d'acier de 20 cm., provoque une modification de longueur de 2,4 μ; on se rend compte par suite de la difficulté qu'il y a à réaliser des articulations qui ne soient pas susceptibles d'introduire des erreurs, et surtout encore à les maintenir telles, dans des conditions de service souvent dures. Si l'on emploie, de plus, plusieurs articulations successives, afin d'obtenir une plus forte amplification, les erreurs correspondantes s'ajoutent dans le même sens.

c. Pointes de mesure.

Les pointes de certains appareils de mesure, qui sont appelées à pénétrer plus ou moins profondément, suivant sa dureté, dans le matériau à étudier, et qui constituent l'organe principal de transmission des déplacements à mesurer, sont également une source d'erreurs. Lorsqu'il s'agit en particulier de mesures d'efforts alternés, pour lesquelles on emploie des pointes qui se déplacent une fois dans un sens, une fois dans l'autre, en prenant par conséquent appui sur des points différents, le jeu, de même que la présence d'articulations, est souvent la cause réelle de phénomènes apparents d'hystérésis, ou de tensions rémanentes, qui n'existent pas en réalité.

d. Flottement des pièces.

Lorsque les pointes ont constitué une sorte de lit dans le matériau à essayer, à la suite des variations de la charge, ou lorsqu'elles ont subi un certain tassement, elles perdent le contact; il est bon alors de disposer d'un mode de fixation qui permettre de rattraper le flottement, afin d'éviter les erreurs correspondantes.

2. Erreurs d'ordre dynamique.

a. Frottement.

Toutes les erreurs d'ordre dynamique proviennent en premier lieu du frottement, que l'on ne peut ni éviter, ni évaluer, et dont l'importance dépend de l'état de l'huile qui se trouve dans les articulations, ainsi que des conditions de température, auxquelles se trouvent soumises les pièces en mouvement. L'amortissement qui en résulte provoque un décalage des indications sur les échelles correspondantes. En outre, le plus petit jeu dans les articulations

conduit à des oscillations dans les organes indicateurs, oscillations qui ne correspondent pas à la réalité. Ces influences devront donc être annihilées dans toute la mesure du possible par l'adjonction de ressorts puissants, qui permettront d'obtenir des indications comparables entre elles et bien définies.

b. Influence de l'inertie.

Si l'on considère que pour une amplification de mouvement de 1.000, le chemin à parcourir par l'organe amplificateur est 1.000 fois plus important que le déplacement à mesurer, et que l'accélération correspondante est également 1.000 fois plus importante, on voit que le moment d'inertie est également tout simplement 10^6 fois plus fort. Toute modification, si faible soit-elle, dans la masse de l'équipage de mesure provoque également des modifications dans les effets d'inertie mis en jeu et conduit, par suite de ce qui précède, à des indications d'autant plus fausses. Il faut remarquer, en particulier, qu'une augmentation de l'amplification, qui correspond à un accroissement des masses, provoque une diminution de la fréquence propre d'oscillation.

Une réduction aussi poussée que possible des masses en mouvement peut seule être efficace dans cet ordre d'idées.

IV. Étalonnage des appareils de mesure.

L'étalonnage des appareils de mesure, qui a pour but de déterminer dans quelle mesure ils sont sujets aux causes d'erreurs indiquées ci-dessus, présente les plus grandes difficultés. Ce n'est que lorsque l'on réussit à construire des appareils étalons qui permettent de déterminer si les appareils de mesure eux-mêmes satisfont aux conditions statiques et dynamiques, que l'on peut être sûr des appareils de mesure.

La question de l'étalonnage a déjà été traitée d'une manière approfondie dans le précédent rapport de l'auteur, il suffira d'indiquer ici que les appareils d'étalonnage dont on avait signalé précédemment la nécessité, ont été établis entre temps.

1. Étalonnage statique.

Pour l'étalonnage statique, c'est-à-dire la détermination précise de l'échelle d'amplification qui correspond à l'ensemble du processus des mesures, on a construit un banc d'étalonnage.

Le banc d'étalonnage (fig. 1) se compose d'une partie fixe et d'une partie mobile. Les appareils de mesure à contrôler sont fixés par leur extrémité mobile à la partie mobile du banc d'étalonnage, et par leur extrémité fixe à la partie fixe de ce banc. En faisant subir à la partie mobile du banc d'étalonnage un déplacement dont on connaît exactement la grandeur, et qui est de l'ordre de 0,5 μ, on imprime un déplacement aux appareils de mesure. Ce faible déplacement doit être contrôlé avec précision au moyen d'un microscope micrométrique. L'indication de l'appareil de mesure à étalonner doit concorder, compte tenu de l'échelle d'amplification, avec le déplacement qui a été imposé à la partie mobile de l'appareil d'étalonnage, c'est-à-dire avec l'indication du microscope de mesure.

2. Étalonnage dynamique.

On a établi un banc d'essai pour l'étalonnage dynamique[1]. Il comporte une partie fixe et une partie mobile, sur laquelle les instruments à essayer sont fixés. La partie mobile est sollicitée pour exécuter des oscillations de fréquences suffisamment élevées, par exemple, des oscillations de forme sinusoïdale allant jusqu'à 300 hertz, sous différentes amplitudes, pendant que d'un autre côté on effectue des observations rigoureuses par comparaison avec le diagramme fourni par l'appareil à contrôler. L'excitation de la partie mobile du banc d'essai, pour produire des oscillations de fréquence et d'amplitude déterminées, est obtenue au moyen d'un électro-aimant, qui est alimenté par un courant alternatif de fréquence et d'intensité correspondantes.

B. Les nouvelles méthodes dynamiques de mesure.

I. Choix des méthodes de mesure.

La question du choix des grandeurs qu'il convient de mesurer, en construction, n'a pas encore reçu de solution effective. Si l'on considère l'objectif final, qui consiste à déterminer les efforts qui sont mis en jeu au cours des phénomènes d'ordre dynamique, on peut dire qu'il est en somme indifférent d'adopter tel ou tel moyen, pourvu qu'il mène au but. Toutefois, il convient de préférer les méthodes qui permettent d'embrasser d'un seul coup le régime complet des charges auxquelles la construction se trouve soumise, avec le plus petit nombre possible de mesures particulières.

Quoi qu'il en soit, la mesure la plus simple est celle des fléchissements, par suite de la manière dont se présente la grandeur à mesurer.

En employant des méthodes optiques, on réussit à déterminer les fléchissements de tous les points d'assemblage d'un pont, pendant le parcours d'un système de charge, et directement. On se trouve alors, du point de vue mathématique pur, en présence de calculs difficiles qui doivent permettre de trouver les valeurs des efforts, à partir des fléchissements ainsi déterminés. Le problème se pose encore également de déterminer de quelle manière se répartissent ces efforts entre les éléments de la charpente, c'est-à-dire dans l'intervalle des nœuds d'assemblage pour lesquels les mesures ont été faites.

Une deuxième méthode qui paraît, au premier abord, plus simple, consiste à mesurer directement les efforts, sans passer par l'intermédiaire de calculs fastidieux. On peut déterminer le régime de charge de toute la charpente en mesurant simultanément, avec de nombreux appareils, les efforts moyens dans les sections ; en disposant des appareils de mesure au voisinage des points d'assemblage de la charpente, ou entre eux, on pourrait également obtenir les efforts qui s'y exercent, y compris les efforts auxiliaires correspondant aux influences dynamiques. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à la mesure des déformations.

Une troisième méthode, qui consiste à mesurer les accélérations, nécessite

---

1. Prüfstand für Messgeräte in Bauwesen. R. Bernhard. Zeitschrift des V. D. I., 1931, n° 52.

également des calculs intermédiaires compliqués pour arriver aux efforts eux-mêmes et son emploi ne pourra, par conséquent, être envisagé que dans des cas particuliers.

Les oscillations se traduisent directement par des variations dans les flèches et dans les efforts ; par suite, dans les cas les plus courants, il n'est pas nécessaire de procéder à des mesures particulières.

Une quatrième méthode pour déterminer la manière dont se comporte l'ensemble d'une construction consiste à communiquer à la construction tout entière un régime d'oscillations appropriées. Dans ce domaine, de nombreuses recherches ont été entreprises en vue de saisir les caractéristiques de la construction sous le rapport des manifestations de l'énergie auxquelles elle est soumise, en utilisant des machines provoquant les oscillations et en étudiant la consommation d'énergie et la marche de la température.

II. Les appareils de mesure.

On trouvera ci-après la description de quelques nouveaux appareils dynamiques de mesure, principalement d'appareils indicateurs de tensions (allongements) et de fléchissements, sous la forme où ils sont employés de préférence en construction, ainsi que la description d'appareils indicateurs d'oscillations et d'accélérations.

Il convient toutefois d'attirer encore une fois l'attention sur le fait que le développement des appareils de mesure n'a pas encore atteint son stade définitif, et qu'il ne l'atteindra même jamais, car les progrès de la technique permettront toujours de les perfectionner.

Ne peuvent en effet être considérés comme susceptibles d'une utilisation pratique effective, que les appareils qui, non seulement, répondent aux exigences indiquées précédemment, mais ont encore permis de réaliser des essais pratiques, sur des constructions, pendant des années, et dont le prix d'achat ne dépasse pas une limite déterminée, considérée comme suffisamment intéressante au point de vue économique.

Suivant le principe général qu'ils mettent en œuvre, les appareils de mesure peuvent être classés, ainsi qu'il ressort du tableau 1 (page 499), dans les catégories suivantes : mécanique, optique, mécanique-optique, électrique-optique.

1. Appareils mécaniques.

On n'a pas encore pu déterminer d'une manière décisive si l'on pouvait, et dans quelle mesure, se fier aux indications qui sont fournies par les appareils mécaniques de mesure.

a. Appareil de mesure d'efforts des Chemins de Fer Fédéraux de Suisse[1] (A. Meyer). Figure 3.

L'appareil de mesure d'efforts a déjà été décrit, à l'occasion de la dernière réunion, par M. le Chef de Section Bühler. C'est un appareil à deux leviers,

1. Ziel. Ergebnisse und Wert der Messungen an Bauwerken.
A. Bühler. Bericht über die II. Intern. Tagung für Brücken- und Hochbau. Vienne, édition 1929.

comportant quatre articulations et un dispositif d'enregistrement sur papier noirci, avec dispositif séparé pour l'entraînement d'une bande de papier de 4 centimètres, destinée à recevoir les diagrammes. L'amplification fixe est de 1 à 100 ; les mesures peuvent intéresser une longueur de 20 ou de 40 centimètres, ainsi que le montre la figure 3, l'encombrement total étant de 30 ou de 50 centimètres ; le poid est de 1 kg., y compris l'appareil d'entraînement du papier. Grâce à une vérification particulièrement minutieuse de chacun des leviers et à la fixation sur une table élastique, cet appareil a atteint un degré de perfectionnement remarquable. Des caractéristiques plus détaillées figurent, à son sujet, dans le tableau.

Il est certain que de tous les appareils mécaniques actuellement existants pour la mesure dynamique des efforts, celui-ci s'est montré de beaucoup le plus pratique.

b. Vibrographe pour la mesure des oscillations[1] (Dr Geiger). Figure 4.

Cet appareil de mesure d'oscillations comporte deux leviers et cinq articulations, un dispositif d'enregistrement par encrage et une minuterie intérieure, pour bandes de diagrammes de 5 centimètres de large. En adoptant des masses différentes, fixées sur des ressorts de différentes forces, on peut faire varier sa fréquence propre de 0,001 jusqu'à 1 hertz.

Il doit être employé comme appareil à basse fréquence (principe des séismomètres). Le poids total atteint environ 4,6 kg. ; l'amplification peut être réglée de 3 à 24, l'encombrement atteint 25 centimètres. L'appareil peut être utilisé pour la détermination des fréquences, tant dans le plan horizontal que dans le plan vertical. La détermination des valeurs absolues des oscillations (amplitudes) n'est pas facile ; elle n'est, en tout cas, possible que si le degré d'amortissement est déterminé également avant et après chaque mesure. Le tableau 1 (page 499) donne les caractéristiques complémentaires de cet appareil.

De tous les appareils pour mesure mécanique des oscillations, c'est ce type qui est employé le plus souvent, par exemple, pour l'étude des oscillations dans les ponts.

c. Appareil de mesure d'efforts, d'après la méthode Ritz, du Bureau allemand de recherches pour la navigation aérienne[2] (Pabst). Figure 5.

L'appareil est mécanique et ne comporte pas de transmission par leviers. Il a été initialement prévu pour intéresser une longueur de mesure de 20 centimètres. Le diamant, monté sur une tête mobile, se déplace sur une plaque de verre, grâce à un mouvement d'entraînement extrêmement lent (parcours de 25 millimètres durant un temps variable de 15 secondes à 160 minutes) ; les modifications de longueur sont reproduites en vraie grandeur. Par suite, les diagrammes obtenus sur cette plaque de verre de 25 millimètres de long doivent être observées au microscope. L'observation au microscope a ainsi permis de réaliser une amplification de 500. La fréquence propre d'oscillation doit atteindre

1. Neuere Fortschritte im Bau von Messgeräten für Maschinenbau. Geiger. Maschinenbau, 1924, n° 27.
2. Aufzeichnung schneller Schwingungen nach dem Ritzverfahren. Pabst. Zeitschrift des V.D.I., 1929, n° 46.

environ 2.000 hertz ; le poids n'est que de 500 grammes. Nous croyons d'ailleurs savoir que l'on travaille encore actuellement au perfectionnement de cet appareil.

Cet appareil, très léger et dont le faible encombrement n'est que de 28 centimètres, a été particulièrement utilisé pour la mesure des efforts et des fléchissements, en navigation aérienne.

2. Appareils optiques.

Dans les appareils basés sur des méthodes purement optiques on ne rencontre aucun des dispositifs mécaniques de transmission destinés à mettre en évidence les modifications des points d'appui ou des longueurs, tels que les leviers, les articulations et les dispositifs d'encrage d'enregistrement. Le rayon lumineux, dénué de masse, permet de réaliser une transmission sans aucune inertie.

a. Appareil de mesure des fléchissements et des efforts basé sur la méthode microphotographique[1] (Bloss). Figure 6.

Deux languettes, solidaires à leurs extrémités des points entre lesquels les mesures doivent être effectuées, constituent une fente, de largeur variable, et dont l'image se reproduit sur une bande sensible qui se déplace devant un objectif microphotographique. La bande a une largeur de 4 centimètres. L'amplification (ou réduction) varie entre 1 /2 et 20 pour les mesures de fléchissements et 70 pour les mesures d'allongements. L'encombrement est de 60 centimètres et le poids total de l'appareil atteint 15 kg.

Cet appareil est celui qui convient le mieux pour les mesures de flèches et a été particulièrement apprécié, à cette fin, pour l'étude des voies de chemin de fer.

b. Optographe Zeiss-Kulka pour la mesure des fléchissements[2]. Figure 7.

Le principe de cet appareil a été appliqué, pour la première fois, en 1927, en construction navale. L'appareil de mesure lui-même a été étudié avec le concours de la Société des Chemins de Fer Allemands. Il en est encore à la période d'essai. Les fléchissements qui sont destinés à la détermination de la ligne élastique sont observés à l'aide d'une lunette braquée dans la direction de la poutre à étudier, avec dispositif d'enregistrement photographique. Des prismes spéciaux à trois faces, qui possèdent la propriété de réfléchir chaque rayon lumineux suivant une direction rigoureusement parallèle à celle par laquelle il a pénétré, sont disposés aux point où doivent être faites les mesures. Une ampoule électrique disposée dans la lunette est utilisée comme source lumineuse. Les images réfléchies de cette source lumineuse ponctuelle forment

1. Zur Frage der Dehnungs- und Schwingungszeichner. Bloss. « Die Bautechnik », 1930, n° 38.

2. Optisch-photographische Formänderungsmessungen an Luftfahrzeugen. Küssner, Annuaire 1930 : Deutsche Versuchsanstalt für Luffahrt. Berlin Adlershof.

Beitrag zur Ermittlung von dynamischen Beanspruchungen in eisernen Brücken. H. Kulka. « Die Bautechnik », 1931, n° 26.

des points lumineux, dans la chambre de la lunette et elles s'enregistrent sur la bande sensible sous forme de lignes droites. Les perturbations que subissent les prismes produisent des perturbations correspondantes sur la bande sensible ; à chaque fléchissement correspond un coude de la courbe d'enregistrement, et l'image renvoyée par chaque prisme donne une ligne ondulée.

Le gros avantage que présente cet appareil réside dans la possibilité d'enregistrer sur un seul et même diagramme, sans aucune inertie, et absolument simultanément, les fléchissements subis par un grand nombre de points faisant l'objet des mesures. L'interprétation des diagrammeés ainsi obtenus, qui n'est possible qu'à l'aide d'un microscope de mesure spécial à très fort grossissement, nécessite encore des recherches ultérieures.

3. Appareils mécaniques et optiques.

Il est à noter que dans les appareils mixtes mécaniques et optiques, la partie mécanique, douée de masse, n'annihile nullement les avantages que donne la partie optique, dénuée de masse.

a. Appareil de mesure des efforts des Chemins de fer anglais[1] (Fereday-Palmer). Figure 8.

Cet appareil de mesure des efforts a été également signalé, au cours de la dernière réunion, par M. le Chef de Section Bühler. Il constitue un appareil à un levier muni d'un dispositif d'enregistrement photographique. La déviation des rayons lumineux est provoquée par un miroir qui est fixé sur un levier relié lui-même directement à la pointe mobile destinée à enregistrer les efforts. On peut provoquer l'entraînement d'un film de 6 centimètres de large, par commande électrique. La longueur intéressée à la mesure est fixe et de 50,8 centimètres ; l'amplification de 100 est fixe également. Le poids de l'appareil est élevé : il atteint 10 kg et sa longueur est de 80 cm. Le tableau I donne, au sujet ce cet appareil, des renseignements complémentaires.

Les Chemins de fer anglais, en particulier, ont effectué des essais très étendus avec cet appareil. C'est un des premiers appareils qui utilisent l'amplification par rayon lumineux dénué de masse pour compenser l'inconvénient de l'enregistrement photographique.

b. Appareil mécanique et optique pour la mesure des trépidations[2] (Schwayder, Hort, Angenheister). Figure 9.

Le premier appareil lancé sur le marché en 1930 est un appareil de mesure d'oscillations suivant les trois composantes d'après le principe des mesures sismographiques (appareil de mesure de basse fréquence). De même que dans l'appareil de mesure d'efforts qui vient d'être décrit, la déviation subie par un rayon lumineux est enregistrée, à l'aide d'un miroir, sur une bande sensible.

Pour chacune des trois composantes qui correspondent aux axes de coordonnées X, Y et Z, il est prévu un miroir. La déviation du rayon lumineux,

1. Report of the Bridge Stress Committee, Londres, 1928.

2. Drei-Komponenten-Erschütterungsmesser. René Leonhardt. « Die Bautechnik », 1931, n° 49.

c'est-à-dire la rotation du miroir correspondant, est réalisée au moyen de trois masses pendulaires suspendues et mobiles suivant l'axe correspondant. La liaison mécanique (liaison par un levier entre le miroir et la masse pendulaire) ainsi qne l'amplification optique (longueur du rayon lumineux indicateur) sont variables, de telle sorte que l'on peut atteindre une amplification allant jusqu'à 3.000 dans la transmission des déplacements. La fréquence d'oscillation propre des trois masses pendulaires atteint environ 5 hertz.

Il est à noter que l'on a réalisé un amortissement réglable en faisant varier la hauteur du niveau d'un bain d'huile, disposé dans des pots d'amortissement spéciaux. La largeur de la bande sensible est de 6 centimètres ; le poids total de l'appareil est de 33 kg ; le mouvement d'entraînement de la bande est réglable jusqu'à 8 centimètres par seconde.

L'emploi de cet appareil est particulièrement indiqué pour l'évaluation directe des trépidations de très faible amplitude, grâce à sa sensibilité élevée.

4. Appareils électriques et optiques.

Dans les appareils électriques et optiques, on a la possibilité très intéressante de séparer l'appareil de perception (transmetteur) et l'appareil d'enregistrement (récepteur). Cette séparation très facile est réalisé par l'intermédiaire d'une liaison par fil.

Remarquons tout d'abord que l'on n'a toutefois pas la possibilité d'éliminer complètement les organes mécaniques de transmission, ainsi qu'on peut le faire dans les appareils fonctionnant sur un principe purement optique. Ils sont malgré tout limités à quelques pièces d'importance secondaire. On ne peut pas éviter non plus l'enregistrement photographique ; on peut toutefois observer les phénomènes pendant la mesure même. On peut également, au bout de quelques secondes de développement, observer le film d'enregistrement, et, grâce à des chicanes spécialement disposées, avoir accès optique dans la chambre noire. Le transport de l'appareil de mesure et son installation à l'endroit voulu nécessitent, dans tous les cas, l'emploi d'un wagon et d'un abri spécial. Lorsque l'on ne tient pas à effectuer le développement à la cuve spéciale, on peut ainsi prévoir l'installation d'une chambre noire.

On ne poursuit plus actuellement l'étude des appareils qui ne donnent les diagrammes que sous forme de courbes enveloppées dont les enveloppes inférieures et supérieures seules peuvent être utilisées.

Parmi les procédés de mesure électriques et optiques en cours de développement et d'ailleurs déjà utilisés, on peut citer tout d'abord l'emploi de l'oscillographe, utilisé comme appareil de réception et qui fait l'objet de la description ci-après.

Oscillographe de réception[1] (Siemens et Halske). Fig. 10.

L'oscillographe a été signalé par l'auteur dans son précédent rapport.

Il se compose principalement d'un organe de mesure, constitué par un conducteur replié en forme de boucle et qui est suspendu entre les branches d'un puissant électro-aimant, comme dans un galvanomètre. Par suite de l'action

1. Oszillographen : « Zeitschrift des V. D. I. », 1930, n° 8.

électrodynamique qu'exerce un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant, le circuit constitué par le conducteur qui se trouve entre les branches de l'aimant est animé d'un mouvement d'oscillation dès qu'il est parcouru par un courant. Sur les deux branches du conducteur, est fixé un miroir très petit, de 0,5 sur 0,5 millimètres, que l'on dispose de manière à ce qu'il se trouve dans le pinceau lumineux émis par une lampe ; les déviations que subit ce miroir sont projetées sur une bande sensible. On peut disposer de la même manière, les uns à côté des autres, six circuits et même plus ; on peut en effet enregistrer sur une même bande sensible de 12 centimètres de large, et simultanément, six diagrammes et plus. Avec cette disposition, telle qu'elle est constituée normalement, un courant d'environ 5.10^{-5} ampères provoque sur le film une déviation de 1 millimètre, lorsque la longueur du rayon lumineux est de 1 mètre. Les dispositifs oscillographiques utilisés par les Chemins de fer allemands pour effectuer des mesures sur les ponts possèdent des fréquences propres variant entre 1.500 et 15.000 hertz. En employant, pour l'amortissement des déviations de l'équipage mobile, une huile de composition appropriée, on peut obtenir un système exactement semi-apériodique.

C'est une possibilité que n'offrent pas les appareils mécaniques, dans lesquels on ne peut pas obtenir rigoureusement, à priori, l'amortissement voulu. En effet, suivant les résistances intérieures des appareils et qui proviennent, par exemple, des articulations, l'amortissement se modifie ; il est également modifié en cours de transport et au moment de la mise en place des appareils, de sorte que l'on se trouve, en pareil cas, dans l'obligation de procéder à un nouvel étalonnage des échelles.

Le processus d'oscillation du circuit qui porte le miroir peut être rendu visible, au cours d'un essai, par la méthode stroboscopique, en observant par l'intermédiaire d'un miroir polygonal ; on peut même ainsi fixer un mouvement oscillatoire passager et obtenir un système ondulatoire permanent, visible et mesurable. De plus, l'amplification peut être augmentée d'une manière presque illimitée, sans renforcement de l'épaisseur du tracé. Jusqu'à maintenant, on a pu pousser l'amplification jusqu'à 20.000, en travaillant en liaison avec un appareil transmetteur d'oscillations des Chemins de fer allemands.

L'entraînement du papier est réglable jusqu'à une vitesse régulière de 4 mètres par seconde, ce qui paraît impossible à première vue pour un enregistrement mécanique. On peut monter l'oscillographe et l'utiliser d'une manière tout à fait indépendante et à un éloignement quelconque par rapport à l'emplacement où ont lieu les mesures ; on peut donc en particulier travailler dans un wagon ou sous un abri spécial.

Pour pouvoir étudier dans le temps les phénomènes qui font l'objet des mesures, on utilise les indications données par les vibrations d'un diapason dont la période propre d'oscillation est de 50 hertz ; ces vibrations sont, à cet effet, photographiées simultanément avec les phénomènes à étudier. Lorsque l'on travaille sur les ponts, on monte un interrupteur à commande électromagnétique dont l'excitation est effectuée au moyen de plusieurs contacts que l'on dispose sur le pont, ainsi qu'à l'entrée et à la sortie ; ce dispositif permet de déterminer sur le diagramme la position et la vitesse de la charge roulante,

à chacun des moments où elle actionne un des contacts sur lesquels elle passe.

On peut également envisager l'emploi de l'oscillographe, en construction, comme appareil de mesure ; il sera utilisé en particulier pour l'étude des phénomènes extrêmement rapides, grâce à l'intervention du rayon lumineux dénué de masse.

Appareils transmetteurs.

Les deux méthodes faisant l'objet des paragraphes ci-dessous, ainsi que le procédé décrit dans le paragraphe 4, font appel à des tubes électroniques. On éprouve donc une certaine difficulté à faire fonctionner simultanément plusieurs appareils dont chacun d'eux demande l'emploi d'un ou même de plusieurs tubes. Pour les méthodes indiquées dans les paragraphes 1 à 4 ci-dessous, on n'indiquera que le principe du montage et on renverra aux publications dans la presse technique, car les appareils construits en pratique n'ont pas encore été essayés effectivement au cours de mesures sur des ponts.

a. Mesure des efforts d'après la méthode du condensateur [1]. (Thoma et Sachsenberg). Figure 11.

Les variations de longueur de la zone sur laquelle porte la mesure sont transmises à deux lames de condensateur, disposées l'une contre l'autre ; l'une de ces lames est solidaire de la pointe fixe et l'autre de la pointe mobile. Ces lames sont intercalées dans un circuit excité en haute fréquence par un tube électronique. Toute modification de l'écartement entre les lames provoque des modifications correspondantes dans la capacité du circuit. Il en résulte des variations simultanées dans l'intensité du courant qui parcourt un deuxième circuit, couplé en résonance avec le premier. Le courant de ce circuit est redressé par une autre valve et doit subir une notable amplification. Il est ensuite envoyé dans un oscillographe, où il est décelé ainsi qu'il a été indiqué précédemment.

Le principe ci-dessus a été utilisé tout d'abord pour les mesures à effectuer en construction mécanique.

b. Mesure des efforts par la méthode d'induction [2]. (H. A. Thoma). Figure 12.

Ce procédé ne se différencie de celui qui vient d'être indiqué, en principe, que par le point suivant : à la place des deux lames de condensateur disposées l'une contre l'autre, c'est une bobine qui se trouve disposée contre une plaque métallique de résistance élevée. La bobine et la plaque sont solidaires, l'une de la pointe fixe, l'autre de la pointe mobile de l'appareil de mesure proprement dit. La modification d'écartement qui en résulte entre elles provoque ici également des variations dans l'intensité du courant d'un circuit à haute fréquence. Ces oscillations sont redressées dans un deuxième tube et amplifiées, puis envoyées dans un oscillographe qui permet de les mettre en évidence.

---

1. Aufzeichnung schneller Schwingungen. Z. V. D. I., 1929, n° 19, H. Thoma. Gerät zur Messung von Arbeitswiderständen und Beanspruchungen. Sachsenberg, Osenberg, Gruner. Z. des V. D. I., 1928, n° 14.

2. Report of the Bridge Stress Committee. Londres, 1928.

Cette méthode a été utilisée par les Chemins de fer anglais pour des essais de ponts ; elle ne se prête toutefois que peu aux dures conditions que comporte le service sur place.

c. Mesure des efforts d'après la méthode électromagnétique [1]. (Kammerer-Bernhard). Figure 13.

Ce procédé de mesure a été également employé aux États-Unis. De même que celui qui est indiqué dans le paragraphe précédent, il repose sur l'effet d'induction produit ici par un induit mobile se déplaçant dans un champ électromagnétique. L'induit, qui est disposé entre les bobines de l'appareil transmetteur, est solidaire de la pointe mobile de l'appareil de mesure proprement dit ; les deux bobines étant solidaires de la pointe fixe. Les modifications que subit la longueur étudiée, et les déplacements corrélatifs de l'induit produisent des courants qui sont mis en évidence par un oscillographe muni d'un dispositif wattmétrique (oscillographe à courant alternatif). On a choisi un dispositif wattmétrique c'est-à-dire un équipage mobile qui mesure le produit de l'intensité du courant par la tension, pour éviter les difficultés que présente l'interprétation des courbes enveloppes, que l'on ne pourrait pas éviter autrement. Les bobines du dispositif transmetteur, de même que celles qui produisent le champ de l'oscillographe, sont alimentées par la même source de courant alternatif de période constante. La fréquence du courant alternatif, qui constitue l'onde porteuse, est choisie assez élevée pour que l'équipage mobile de l'oscillographe ne puisse pas entrer en oscillations sous son influence.

L'avantage de ce dispositif, par rapport aux deux premiers, réside en l'absence de tout tube électronique. L'appareil étudié par les Chemins de fer allemands doit prochainement faire l'objet d'essais pratiques sur un pont.

d. Mesure des accélérations par la méthode piézo-électrique [2]. (Risch, Kluge, Linckh). Figure 14.

La modification de pression qui résulte d'une accélération quelconque provoque une modification de la charge électrique d'un cristal de quartz piézo-électrique, ou de plusieurs cristaux placés les uns sur les autres. Le courant anodique d'un tube électronique est soumis par l'intermédiaire de la grille de ce tube, à l'influence des variations de charge du cristal. Le tube doit être disposé directement au voisinage du cristal de quartz piézo-électrique, d'une part pour réduire dans toute la mesure du possible les pertes de charge résultant des fuites dans les isolants, fuites qui ne peuvent jamais être complètement évitées, et d'autre part pour maintenir la capacité aussi faible que possible et par suite, réaliser le maximum de sensibilité. Ce premier tube appartient à la partie transmettrice de l'appareil. Son courant anodique peut être amplifié par un deuxième tube et envoyé dans un oscillographe pour être mis en évidence.

Le procédé a été employé pratiquement en construction, en particulier pour

1. Veröffentlichungen der Westinghouse Electric Mfg. Co, Pitts. Versuchslaboratorium. Messgeräte für kleine Dehnungen. Brevet 31 mars 1931.

2. Messung v. Verkehrserschütterungen. Risch. « Verkehrstechnik », 1929, n° 40, et Piezoelektrische Messungen v. Druck-u. Beschleunigungskräften. Kluge und Linckh. « Zeitschrift des V. D. I. », 1929, n° 37.

l'étude des phénomènes de trépidation provoqués par la circulation. Les efforts d'accélération qui s'exercent sur une masse, placée sur les cristaux de quartz piézo-électrique, provoquent dans ces cristaux des pressions oscillatoires et par suite des oscillations correspondantes dans son état de charge électrique.

L'avantage des méthodes indiquées dans les paragraphes 1, 2 et 4 réside dans la possibilité d'obtenir, grâce à l'emploi des tubes électroniques, une amplification sans intervention de masse et presque illimitée. Des essais pratiques devront montrer jusqu'à quel point les tubes électroniques, qui sont fragiles, pourront supporter un service sévère et les autres influences qui peuvent s'exercer sur place.

e. Mesure des efforts, des accélérations et des fléchissements par la méthode de compression sur des plaques de charbon [1]. Télémètre à disques de charbon (Bernhard). Fig. 15.

Le télémètre à disques de charbon a déjà été décrit dans le précédent rapport de l'auteur. Il n'est donc pas utile de revenir ici sur le principe de la méthode. Il suffira de rappeler qu'il repose sur la variation de résistance électrique de petits disques de charbon soumis à des pressions variables.

Le télémètre à disques de charbon est actuellement le seul appareil transmetteur électrique qui ait fait ses preuves d'une manière pratique et qui ne comporte aucun tube électronique, tout en assurant l'amplification nécessaire. En outre, c'est précisément celui qui, parmi les appareils transmetteurs électriques, a été éprouvé dans des conditions effectives, sur des ponts, pendant plusieurs années. Il est intéressant de faire ressortir, par comparaison avec les autres procédés, qu'il a déjà été employé en construction, sans nécessiter de modifications importantes, à la fois pour mesurer les allongements (efforts), les fléchissements, les oscillations et les accélérations. Le succès de cet appareil provient tout naturellement des résultats qu'ont donné les essais effectués depuis l'année 1925, au cours desquels il a été établi que les appareils existant ne satisfaisaient pas encore aux exigences qui leur sont imposées. Il a permis de réduire le poids de l'appareil transmetteur à 400 grammes et son encombrement à 16 centimètres seulement (figure 16). On procède d'ailleurs actuellement aux essais d'un appareil encore plus petit, qui ne pèse que 75 grammes environ, avec un encombrement réduit à 12 centimètres.

Lorsque l'appareil transmetteur doit être employé comme instrument de mesure des oscillations ou des accélérations, il suffit d'une modification peu importante : la pointe mobile de mesure n'est pas maintenue au contact de la pièce, mais elle est munie d'un faible poids additionnel et elle doit pouvoir dévier librement suivant la direction des accélérations à mesurer (figure 17). Le transmetteur travaille donc, dans ce cas, comme un appareil à haute fréquence et non pas comme les appareils courants pour la mesure des phénomènes sismiques, qui travaillent la plupart du temps comme appareils à basse fréquence.

Lorsque l'on emploie l'appareil pour la mesure des fléchissements, qui sont importants par rapport aux allongements, il faut en réduire l'importance.

1. New Development in Electrical Telemeters. Peters. American Society for Testing Materials, 1923, p. 592. Ferndehnungsmessungen an Schiffkörpern. Siemann. Zeitschrift des V. D. I., 1926, p. 539.

Étant donné le faible poids et les petites dimensions de l'appareil, il suffit d'interposer un ressort à lame léger. Malgré la réduction qu'elle subit, la fréquence propre reste encore bien supérieure au quadruple des fréquences les plus élevées de la flexion.

En liaison avec un oscillographe, on a atteint jusqu'à maintenant des amplifications d'environ 20.000, de sorte qu'il a été possible d'effectuer des mesures sur des ponts-routes de construction massive (pierre et béton) et sans difficultés, même pour un seul véhicule.

En électrotechnique, on n'applique pas volontiers, pour les mesures, le principe de la variation de la résistance de contact. On a toutefois constaté qu'il n'était pas fondé de craindre que les disques de charbon ne suivent pas assez rapidement les oscillations de fréquence élevée. On sait d'ailleurs que dans le microphone, qui repose sur le même principe, les oscillations ou vibrations de la parole sont transmises d'une manière parfaite, quoiqu'il s'agisse de fréquences sensiblement plus élevées.

Quoique cela ait déjà été fait en partie dans le précédent rapport, il est intéressant de résumer et de compléter l'exposé des avantages et des inconvénients que présentent ces appareils.

Les avantages des appareils électriques et optiques de mesure sont les suivants : période élevée d'oscillation propre de l'appareil, grandes possibilités d'amplification, facilité d'employer et de surveiller simultanément plusieurs appareils à partir d'un même point central d'observation, et, par suite, économie de personnel ; il importe en outre d'attirer l'attention sur l'avantage que présente l'absolue coïncidence des divers phénomènes sur la même bande, de même que sur la possibilité de réduire le nombre des diagrammes, grâce à cet enregistrement sur une seule bande, dont la vitesse d'entraînement est réglable dans de larges limites ; on réalise ainsi un gain de temps considérable ; enfin, pour l'enregistrement en différents points, il suffit de se procurer seulement plusieurs appareils transmetteurs, de sorte que les frais ne s'élèvent pas d'une manière importante.

Les inconvénients de ces appareils résident sans aucun doute dans l'emploi délicat de l'oscillographe ; il convient d'ailleurs de faire remarquer que tous les appareils purement statiques, même les plus simples du point de vue mécanique, nécessitent des aides-opérateurs absolument familiarisés avec leur maniement. Enfin, la nécessité d'avoir tout d'abord à développer le diagramme photographique implique inévitablement une certaine perte de temps.

L'exécution de mesures très nombreuses nécessite la mise en œuvre simultanée de plusieurs appareils. Le relevé de plusieurs mesures, même pour un seul trajet de la charge, est notablement facilité par l'emploi de la commande électrique à distance.

Les nombreuses mesures qui ont été effectuées jusqu'à maintenant ont, dans tous les cas, mis en évidence le fait que quelques-uns des procédés reposant sur la transmission électrique et optique ne doivent pas être considérés comme des méthodes scientifiques pures destinées au laboratoire, mais que même dans la technique pratique des mesures concernant la construction, ils pouvaient être employés avec succès. Cette considération ne doit toutefois pas exclure les

mesures de contrôle, pas plus que les recherches qui seraient à faire avec d'autres appareils de mesure, en vue de déterminer leurs possibilités.

5. Conclusion.

Quelques-unes des conditions principales auxquelles doivent satisfaire les appareils de mesure enregistreurs, pour permettre d'étudier le processus des phénomènes dynamiques qui se présentent en construction, sont résumées brièvement ci-après :

1. Fréquence élevée d'oscillation propre de l'appareil.

Cette fréquence doit être supérieure ou égale à 1.200 hertz afin de pouvoir obtenir des indications sûres, pour des fréquence à mesurer pouvant aller jusqu'à 300 hertz.

2. Constance des phases.

La régularité des phases permettra d'éviter les perturbations parasitaires.

3. Précision.

$\pm$ 2,5 % pour une amplification d'au moins 1.000.

4. Facilité d'étalonnage.

5. Facilité de commande.

Dans toute la mesure du possible, commande simultanée de plusieurs appareils de mesure d'un même point central.

6. Rapidité du dispositif d'enregistrement.

Pour l'enregistrement des phénomènes rapides, commande rapide du papier ou de la pellicule, qui doit, dans toute la mesure du possible, être réglable jusqu'à 2 mètres par seconde.

7. Synchronisme.

Dans toute la mesure du possible, on enregistrera sur une même bande les diagrammes provenant d'emplacements de mesure différents.

Pour les appareils de mesure d'efforts (allongements) :

8. Les mesures devront porter sur de faibles distances.

Dans toute la mesure du possible, inférieures à 20 cm.

9. Sensibilité.

On doit pouvoir déceler des efforts de 0,5 kg par mm^2.

Les indications de base qui précèdent sont, en particulier, conformes aux exigences qui avaient été déjà indiquées dans le rapport précédent. Il reste à déterminer si, d'une manière générale, toutes ces conditions peuvent être réalisés par un seul appareil.

III. Appareils auxiliaires spéciaux.

Machine pour l'essai d'oscillation.

Parmi les dispositifs auxiliaires permettant de faciliter les recherches et

Tableau 1. — Les nouveaux appareils pour mesures dynamiques.

Principe	Désignation Fréquence Haute	Désignation Fréquence Basse	Applications actuelles	Zones utiles	Amplification	Fréquences propres hertz (env.)	Transmetteur Nb.	Transmetteur Long. de mesure	Transmetteur Type	Transmetteur Poids	Récepteur Nb.	Récepteur Dispositif d'enregistrement	Avantages particuliers	Inconvénients particuliers
Mécanique	Ch. de Fer Suisses		Allongements	50 à 1.000 kg par cm²	1 à 100		1	20 cm. et 40 cm.	2 leviers 4 articulations	1 kg.	1*	Inscription à l'encre avec mouvement d'horlogerie	Obtention directe du diagramme	Amplification limitée
		Vibrographe	Oscillations		1 à 24	0,001 à 1	1		Masse lourde 2 leviers 5 articul.	4,6 kg.	1			Faible fréquence propre
	Méthode Ritz		Allongements	50 à 1.000 kg par cm²	1	2.000 environ	1	fixe 20 cm.		0,5 kg.	1	Diamant sur verre	Petit transm.	Microscope nécessaire Gros. jusqu'à 500
Optique	Optographe		Flèches				1		Prismes à trois faces	0,5 kg.	env. 12	Bande photographique mouvement d'horlogerie	Synchronisme	Microscope néces. conversion d'allongements **
	Microphotogr.		Flèches Allongem.	0,01 à 60 mm. 30 à 1.000 kg. par cm²	de 1 à 0,5 à 1 à 20 1 à 70		1	fixe 20 cm.	Bobine	15 kg.	1			Amplification ** limitée
Mécanique et Optique	Fereday-Palmer		Allongements	50 à 1.000 kg. par cm²	1 à 100	env. 170	1	fixe 50,8 cm.	1 levier Miroir	10 kg.	1			Amplification ** limitée
		Trépidations 3 composantes	Oscillations		jusqu'à 1 à 3.000	env. 5	3		3 leviers 3 miroirs	33 kg.	1		Sensibilité	Faible fréquence propre **
Electrique et Optique	Condensateur		Allongements		facultative		1		2 armatures de condensateur		6 env.	Oscillographe Bande photographique avec commande électrique		Deux lampes **
	Induction		Allongements				1		noyau et bobine		6 env.			Deux lampes **
	Electro-magnét.		Allongements				1		3 bobines		6 env.			**
	Piézoquartz		Oscillations Accélérations				1		piézo-quartz 1 lampe		6 env.			Une lampe **
	Télémètre à disques charbon		Flèches Allongemt Oscillations Accélérations	5 à 2.000 kg. par cm²	jusqu'à 20.000	1.200 à 4.000	1	2 à 50 millim.	Disques de Charbon	0,4 kg. pour le transm.	6 env.		Petit transmetteur Synchronisme Amplification facultative	**

* Sans dispositif d'entraînement.

** Développement photographique.

essais dynamiques, et qui ont été déjà mentionnés dans le précédent rapport, il convient de signaler la machine pour essais d'oscillation [1].

Le procédé repose essentiellement sur la mise en oscillation des constructions, à l'aide d'impulsions périodiques judicieusement réglées. L'étude de la manière dont se comporte la construction vis-à-vis de charges dont on connaît les caractéristiques de grandeur, de position et de fréquence, permet ensuite de tirer des conclusions en ce qui concerne les caractéristiques propres et éventuellement l'état dans lequel se trouve la construction.

Étant donné la nouveauté de l'ensemble du procédé, il convient de donner quelques précisions sur les dispositions de l'essai et sur l'interprétation des résultats.

1. Mode opératoire.

La mise en oscillation, c'est-à-dire l'application d'efforts d'intensités variées et de directions appropriées, ou de couples de fréquences quelconques, suivant une loi purement sinusoïdale, est réalisée de la manière suivante :

Deux disques excentriques, dont le sens de rotation et l'excentricité sont réglables à volonté, sont entraînés par un moteur électrique (figure 18). Suivant le sens de rotation et la position l'une par rapport à l'autre des deux masses oscillantes (coïncidence ou opposition), on peut exercer sur la construction des impulsions verticales ou horizontales (P) et par suite des efforts ou des moments dans un plan quelconque.

Les efforts verticaux sont intéressants au premier chef, par exemple dans les ponts, lorsqu'il s'agit de l'étude des poutres principales. Les efforts horizontaux interviennent principalement dans une direction perpendiculaire à la voie, pour la détermination de l'importance des éléments de contreventement, des pièces destinées à résister aux influences de freinage ou de roulis. Par l'application de moments dans le plan vertical, éventuellement perpendiculairement à l'axe de la voie, on peut étudier la rigidité de torsion des ponts, c'est-à-dire la manière dont se comportent, dans leur ensemble, les poutres principales, ainsi que les éléments transversaux et de contreventement. Cette question présente une grosse importance, en particulier en ce qui concerne l'influence des charges s'exerçant sur une seule voie, dans les ponts à double voie [2].

On élimine les influences indésirables (P) des deux masses par une disposition réciproque appropriée de ces deux masses l'une par rapport à l'autre. En réglant leurs excentricités, on peut faire varier dans de larges proportions les efforts centrifuges exercés par les deux disques oscillants. Pour déterminer les efforts centrifuges produits suivant ces différentes excentricités, on évalue le moment de torsion exercé par les deux disques sur une balance dite « à centre de gravité », telle que celles que l'on emploie fréquemment pour l'équilibrage des masses tournantes. On peut ensuite, par le calcul, et pour chaque vitesse de

1. Rein dynamische Verfahren zur Untersuchung der Beanspruchung v. Bauwerken. Bernhard und Späth. « Stahlbau », 1929, n° 6.

2. Theorie u. Berechnung der eisernen Brücken. Bleich :

Ueber die Verwindungssteifigkeit von zweigleisigen Eisenbahnfachwerkbrücken. Bernhard. « Stahlbau », 1930, 8, et 1931, 21.

rotation, déterminer l'effort centrifuge correspondant, en appliquant la formule connue :

$$Z = m\,\omega^2\,r$$

dans laquelle on désigne par :

m la masse des disques de la machine d'oscillation.

ω la vitesse angulaire, $\omega = 2\,\pi\,n$ (n tours/sec.)

r l'excentricité.

2. Interprétation des essais.

Pour éviter l'influence des oscillations dans la fréquence du réseau, l'alimentation du moteur d'entraînement doit être effectuée au moyen d'une batterie d'accumulateurs transportables. A partir de la mise en circuit du moteur, la vitesse de rotation monte lentement et l'on observe la manière dont se comporte la construction pour des vitesses de rotation différentes. Toute construction se comporte en effet à ce sujet comme un système oscillatoire mécanique. Les fléchissements provoqués par les charges périodiques sont en général très faibles ; toutefois, lorsque l'on passe entre les limites d'ailleurs très étroites de la résonance, ces déformations peuvent atteindre des valeurs extrêmement élevées.

La manière dont l'ouvrage se comporte peut être étudiée numériquement à l'aide de différentes méthodes. On peut, par exemple, aux endroits voulus, déterminer les fléchissements ou les efforts en employant les appareils de mesure enregistreurs précédemment décrits. On obtiendra une sorte de courbe de résonance de la construction en portant les amplitudes des oscillations en fonction de leur fréquence.

Dans un ouvrage, l'énergie mise en jeu par les oscillations croît proportionnellement au carré de l'amplitude des oscillations ; il y aura donc intérêt à porter non pas les déviations elles-mêmes, mais plutôt leurs carrés.

Une autre mesure extrêmement importante consiste à déterminer la puissance du moteur d'entraînement. En effet, la puissance que doit fournir ce moteur croît exactement suivant la même courbe que l'énergie mise en jeu et dont il a été question ci-dessus, c'est-à-dire comme le carré de la déviation accusée par la construction, lorsque l'on passe dans une zone de fréquence critique.

Par suite, si l'on porte sur l'axe des x le nombre de tours de la machine d'oscillation, et si l'on porte sur l'axe des y les variations correspondantes de la puissance du moteur d'entraînement, que l'on peut déterminer facilement avec des appareils enregistreurs spéciaux, on obtiendra un diagramme donnant la puissance en fonction de la fréquence (figure 19). Ces courbes servent de base pour l'étude dynamique des constructions, ainsi que de point de départ pour toutes les recherches ultérieures.

La courbe en traits discontinus indique la consommation qui correspond à la marche à vide et qui sert à compenser les pertes électriques et mécaniques du dispositif de mise en oscillation. Cette courbe doit être tracée par elle-même au préalable, en plaçant la machine sur un bâti fixe. Le moteur d'entraînement n'a en effet en pareil cas qu'à couvrir les pertes de la marche à vide, aucune puissance utile n'étant fournie, puisqu'aucune oscillation ne peut être produite.

3. Les essais d'oscillation.

Les essais qui sont effectués avec la machine de mise en oscillation ne servent pas à étudier les matériaux de construction eux-mêmes, pas plus qu'à éprouver des points particuliers de la construction, mais à déterminer la manière dont se comporte l'ensemble de la construction, tout particulièrement du point de vue dynamique seul. Ils ne peuvent pas servir à effectuer les mesures statiques ou dynamiques, telles qu'elles ont été exposées plus haut, et qui portent sur les allongements, les efforts, les fléchissements, les oscillations ou les accélérations.

La mise en oscillation des ponts de chemin de fer par le passage d'une locomotive et, d'une manière plus conforme à la réalité, par un train entier est un phénomène si compliqué qu'il devient dans ce cas extrêmement difficile de séparer les effets et les causes. L'emploi de la machine ci-dessus simplifie beaucoup la question et permet de l'étudier d'une manière beaucoup plus nette ; il est donc à souhaiter que son emploi soit largement étendu à des essais systématiques.

Il est bon de signaler que, dans les recherches qui se poursuivent au sujet des ponts, on s'efforce de séparer l'influence d'amortissement exercée par chacun des organes tels que les rails, les traverses, le ballast, de même que les éléments transversaux et longitudinaux constituant le support des voies. On pourra ainsi en même temps déterminer l'influence de chacun de ces organes sur la superstructure du pont elle-même.

4. Essais de fatigue et de destruction.

On a poussé plus loin le champ d'application de cette méthode [1] et on l'a adaptée aux essais permanents, ou essais de fatigue, que l'on pousse jusqu'à destruction de l'ouvrage.

La valeur jusqu'à laquelle il faut pousser une charge permanente alternée pour obtenir la rupture, que l'on appelle la résistance à la fatigue, n'atteint qu'une faible partie, soit moins de 20 °/₀ de la valeur de la charge de rupture statique une fois seulement appliquée. La détermination de la résistance à la fatigue joue donc un rôle important dans les essais actuels.

On a construit des poutres d'essai, des fermes et des ponts réduits, sur lesquels on a monté la machine d'essai d'oscillation ; on a appliqué à ces pièces d'épreuve, des impulsions de fréquences et d'intensités déterminées jusqu'à ce que la rupture s'ensuive.

On donne sur la figure 20, à titre d'exemple, un diagramme d'essai progressif ; en abscisses, sont portés les nombres d'impulsions augmentant progressivement, et en ordonnées, les efforts auxquels ces impulsions ont donné naissance dans le premier élément de l'ouvrage qui ait cédé. Dans l'exemple de la figure 20, la rupture s'est produite après 235.000 impulsions, après une durée d'essai de 9 heures 1/2 et pour un effort de 20 kg par mm² dans l'élément qui a cédé, au cours du cinquième échelon de la mise en charge.

Pour se représenter à quoi peut correspondre un tel diagramme et quelle

1. Dauerversuche an genieteten und geschweissten Brücken. — R. Bernhard. Zeitschrift des V. D. I., 1929, n° 47.

est son importance, on peut imaginer un pont sur lequel passeraient 50 trains par période de 24 heures et qui, à chaque passage, subirait un seul effet de choc ayant sa pleine valeur. La rupture au bout de 235.000 influences semblables correspondrait à une durée totale de service d'environ 13 années.

On a déjà essayé, dans ces conditions, un certain nombre de poutres d'épreuve construites en aciers de différentes qualités, et comportant des assemblages rivés aussi bien que des assemblages soudés.

On a pu également faire porter les essais sur les éléments des charpentes, en intercalant des éléments plus faibles, destinés à subir la rupture les premiers.

Les essais ci-dessus peuvent être complétés par des mesures de température. En disposant des appareils de mesure de température aux endroits où l'on s'attend à ce que la rupture se produise en premier lieu, on peut enregistrer les fluctuations de la température de ces points. On a pu, de cette manière, mettre en évidence les points faibles de certaines constructions bien avant que ne se produise la première rupture, grâce à l'échauffement que produit, vraisemblablement, le travail de frottement interne.

5. Conclusion.

Avantages de la méthode de mise en oscillation par la machine spéciale d'essai d'oscillation.

1. — L'exécution des essais est relativement simple et ne pose aucune exigence particulière en ce qui concerne le personnel de service. Très peu de temps après sa mise en place à l'endroit à étudier, la machine pour l'essai de mise en oscillation est prête ; quelques minutes suffisent.

2. — La mesure des caractéristiques principales des ouvrages, c'est-à-dire de leurs fréquences propres, peut être effectuée avec une précision d'environ 1/10 hertz. Cette détermination permet de calculer d'une manière précise les caractéristiques dynamiques courantes.

3. — Les conditions d'essai elles-mêmes, par exemple la valeur de la contrainte dynamique, peuvent être réglées exactement et vérifiées à volonté par des mesures de contrôle, condition indispensable si l'on veut faire des essais de ponts qui soient comparables.

4. — Les essais courants en charge ne sont en général possibles que suivant une seule direction d'efforts ; par contre, les essais ci-dessus sont possibles dans toutes les directions, puisqu'ils ne mettent pas en jeu la pesanteur elle-même.

Inconvénients de cette méthode.

1. — On peut considérer comme un inconvénient de cette méthode le fait que l'on ne sait pas encore aujourd'hui si l'on réussira à trouver une relation entre l'état effectif d'un ouvrage et certaines caractéristiques dynamiques déterminées. Ce n'est en effet qu'à ce moment qu'il pourra être envisagé de donner à la méthode une portée pratique pour la surveillance en service, lorsqu'il s'agit des ponts par exemple.

2. — Une telle méthode ne permet toutefois pas de déterminer en quel endroit se trouve le point faible d'un ouvrage qui donne, à l'essai, des résul-

tats non satisfaisants. Ce problème ne peut être résolu que par des recherches ou des mesures localisées.

IV. Champs d'application des méthodes de mesure.

Les possibilités d'emploi des appareils et des méthodes de mesure dynamiques basés sur les principes exposés ci-dessus s'étendent à la totalité du domaine de la construction proprement dite et de la construction mécanique, quoique l'on ne connaisse actuellement que quelques exemples d'application.

1. Construction (Superstructure et Fondation).

En ce qui concerne les superstructures, il est très important d'empêcher la transmission des oscillations et des bruits causés par les vibrations [1]. L'amortissement des oscillations et des bruits, dans les grandes salles, ou la transmission convenable des sons, est une question de mesures d'accélérations et de vibrations (donc de nature acoustique). Elle doit être liée à la technique des recherches sismiques. Dans de nombreux cas, des appareils plus simples donneront de bons résultats ; les exigences auxquelles ils doivent répondre sont moins sévères, étant donné qu'il s'agit de travailler sur des fréquences d'oscillation plus élevées.

En ce qui concerne les travaux au-dessous du sol, les questions les plus importantes sont l'étude des phénomènes sismiques, la recherche de la résistance des différents sols, la détermination des possibilités d'amortissement qu'ils offrent. On a entrepris, à ce sujet, entre autres essais, des essais avec la machine de mise en oscillation [2]. Il faut signaler également, dans ce domaine, des recherches sur les chaussées des routes, recherches portant sur leur résistance superficielle au passage de véhicules comportant des garnitures de roues diverses et roulant à des allures différentes, recherches concernant la durée des recouvrements, ainsi que la transmission des secousses et des bruits dans les régions voisines.

En ce qui concerne le sous-sol, l'étude des contraintes dynamiques s'étend également, et en particulier, aux fondations. Le calcul des fondations des machines, dont la fréquence propre doit, dans toute la mesure du possible, se trouver au-dessus du nombre de tours des machines qu'elles supportent, est du ressort de l'ingénieur de construction. Dans le cas des turbines à grande vitesse de rotation, pour lesquelles, dans la majeure partie des cas, on ne peut pas réaliser cette condition, on se trouve conduit à des calculs très délicats pour éviter une coïncidence entre le nombre de tours normal et la période propre d'oscillation du massif de fondation, ou une de ses harmoniques.

2. Construction mécanique.

En construction mécanique proprement dite, l'étude des efforts d'ordre dynamique a déjà fait les plus grands progrès ; par contre, en construction aéronautique, les problèmes les plus variés restent encore à résoudre. La coïncidence entre les fréquences propres des oscillations de torsion des vilebrequins et

1. Messung v. Verkehrserschüttenrungen. — Risch : Verkehrstechnik 1929, n° 40 et : Piezoelektrische Messungen v. Druck- u. Beschleunigungskräften. Kluge und Linckh. Zeitschrift des V. D. I., 1929, n° 37.

2. Die dynamische Bodenuntersuchung. — Hertwig : « Bauing », 1931, 25-26.

leur nombre de tours a souvent provoqué des ruptures par fatigue ayant des conséquences tragiques.

En construction navale, il faut signaler les recherches dynamiques, portant particulièrement sur les allures élevées. Les phénomènes de résonance provoqués par la marche des hélices dans les ponts intermédiaires et dans les coques peuvent donner lieu à des perturbations particulièrement gênantes. Ici aussi, on a entrepris des essais avec la machine d'essai aux oscillations.

3. Chemins de fer.

Les chemins de fer offrent un domaine très vaste aux études dynamiques, tant sur les véhicules que sur les superstructures. La détermination des mouvements d'un véhicule, pendant la marche, grâce à des appareils de mesure dynamiques, joue un rôle très important, en particulier pour le choix du profil et la détermination des efforts auxquels se trouvent soumis les châssis.

Pour les superstructures, il faut étudier également l'élasticité du ballastage et les efforts dans les voies au moment du passage des trains rapides.

4. Construction des ponts.

Enfin la construction des ponts ouvre ici le champ technique d'application le plus nouveau, car les efforts dynamiques que l'on y rencontre peuvent atteindre des valeurs élevées et sur lesquelles on n'est encore que peu documenté. La connaissance précise des phénomènes oscillatoires permettra, le cas échéant, de réaliser des économies pratiques. On pourra en effet réduire au maximum l'écart entre l'effort admissible et la limite d'écoulement, ou la résistance à la fatigue, lorsque des mesures sérieuses auront permis de déterminer, dans les cas les plus défavorables, quels sont les efforts statiques et dynamiques auxquels on a affaire, et quelle est la limite exacte de résistance à la fatigue que présentent le métal employé et les assemblages obtenus.

Quelques recherches sur la construction des ponts seront étudiées d'une manière plus détaillée dans le prochain chapitre.

C. Exposé d'ensemble des résultats obtenus.

I. Mesure des efforts et des oscillations.

Si l'on se limite aux oscillations dans le plan vertical, tant en ce qui concerne les superstructures que les véhicules, et si l'on tient compte des observations qui ont pu être effectuées sur les relations dynamiques entre les véhicules et les ponts, on arrive maintenant à la classification suivante, analogue à celle qui figure dans le rapport anglais [1] :

1. Ponts de chemin de fer.

a. Ponts de grande portée.

Les fréquences propres dans le plan vertical sont relativement faibles ; il peut se produire une coïncidence approchée avec les fréquences propres verticales des locomotives et des wagons lourds. Toutefois, l'amortissement exercé par les ressorts de suspension des véhicules permettra d'éviter l'amplification des oscillations de la superstructure et, par suite, l'augmentation des coefficients de choc.

1. Report of the Bridge Stress Committee. London, 1928.

b. Ponts de moyenne portée.

La fréquence propre est plus élevée ; il n'y a par suite pas lieu d'envisager la possibilité d'une coïncidence avec les fréquences propres des véhicules. Par contre, les différents organes de transmission des locomotives à vapeur peuvent intervenir, sous l'influence de leurs masses non équilibrées et se déplaçant un peu dans tous les sens, pour exciter des oscillations. Pour des vitesses élevées, ou vitesses critiques, ces influences excitatrices peuvent se trouver en coïncidence de phase avec les oscillations propres du pont ; elles conduiront alors à un balancement important et, en même temps, à des coefficient de choc plus élevés.

c. Ponts de faible portée.

Les fréquence propres de ces ponts sont élevées. Les oscillations propres verticales des véhicules, relativement lentes, de même que les impulsions produites par les masses non équilibrées, ne provoqueront donc pas de balancement, ne serait-ce d'ailleurs que pour cette raison que l'influence de ces forces d'excitation à l'oscillation n'aurait pas le temps de se manifester, par suite de la courte durée du passage du train sur le pont.

L'intervalle de choc, c'est-à-dire la distance qui sépare les points du trajet correspondant à l'excitation au choc, ou commencement de ce choc, d'une part, et à la fin de sa manifestation, d'autre part, joue ici un rôle considérable. Ces points sont ceux où doivent être effectuées les mesures.

2. Ponts-Routes.

Dans les ponts-routes, les choses se passent quelque peu différemment. Il n'entre pas en jeu de forces excitatrices à l'oscillation et provenant de masses non équilibrées. Les chocs provenant des inégalités du pavage des rues se produisent presque toujours d'une manière tout à fait irrégulière. Ils peuvent quand même donner lieu à des oscillations appréciables dans les châssis des véhicules et, par suite, conduire à un balancement et à des coefficient de choc plus élevés, lorsque les fréquences propres dues à la chaussée et celles du véhicule sont voisines. En particulier, la suspension des véhicules favorise ici la transmission, au pont, d'une certaine quantité d'énergie et peut conduire facilement à des phénomènes de balancement [1]. Par ailleurs, la classification qui a été faite pour les ponts de chemin de fer, en ponts de grandes, de moyennes et de faibles portées, est également légitime ici, dans une certaine mesure. Les superstructures et les éléments non suffisamment rigides, et en particulier les diagonales non rigides, constituent des points dangereux ; il s'en présente particulièrement fréquemment dans les vieux ponts.

Des résultats exposés précédemment, en ce qui concerne les mesures d'allongements, on peut conclure qu'il est possible, uniquement en interprétant le diagramme des efforts, d'obtenir quelques notions sur le processus des oscil-

---

1. Brücke und Fahrzeug. Betrachtungen über ihre dynamischen Zusammenhänge. R. Bernhard. « Bauingenieur », 1930, n° 28.

lations. Il est évident qne ces notions ne constituent que les faibles prémisses de notre connaissance du vaste domaine de la dynamique des ponts et qu'elles devront être complétées par des études théoriques approfondies. Il faudra, en particulier, entreprendre d'une manière systématique un très grand nombre de recherches, en commençant par les types de poutres les plus simples, pour passer progressivement à des charpentes de plus en plus compliquées, si l'on veut finir par arriver à analyser les phénomènes complexes.

Pour résumer, nous pouvons dire que :

1. Le coefficient de choc qui doit englober l'influence dynamique des charges roulantes ne dépend, dans certains cas, que d'une manière indirecte de la portée de l'ouvrage, de la vitesse et du poids des véhicules.

2. Les charges roulantes et les ponts sont nettement liés, dans leurs influences réciproques, par leurs caractéristiques propres d'oscillation. Les constantes dynamiques de la charge roulante exercent une influence notable sur le coefficient de choc.

3. Il convient de distinguer différentes formes, parmi les oscillations auxquelles sont soumis les ponts et les charges roulantes.

4. Pour le calcul des fréquences propres d'oscillation, il importe de tenir compte, en chaque cas, de l'état de charge des ponts et des véhicules.

5. Il importe de déterminer dès le début, par de nombreux essais suivis, tenant compte en particulier des caractéristiques dynamiques propres des charges roulantes, si les cas les plus défavorables que l'on ait observés ne constituent que des exceptions — en particulier, s'il peut se produire, dans les ponts de chemin de fer, des phénomènes oscillatoires systématiques conduisant à une notable augmentation du coefficient de choc, et qui seraient provoqués par un amortissement considérable de la suspension des véhicules, par l'adoption de vitesses de trafic plus fortes (importance et fréquence des impulsions) et par la réduction corrélative de la durée du balancement.

II. Essais d'oscillation.

Si l'on se base sur les résultats des essais qui ont été entrepris jusqu'à maintenant, avec des machines d'essai d'oscillation, et sur des constructions effectives aussi bien que sur des véhicules, on peut fermement espérer que ce nouveau procédé d'investigation permettra de développer nos connaissances sur la dynamique des ouvrages.

Cette méthode permet de faire l'étude, dans un temps relativement court, des phénomènes de fatigue et de vieillissement que provoque l'application de charges soumises à des variations périodiques ; on peut ainsi améliorer les caractéristiques dynamiques des ouvrages et des véhicules, en leur faisant subir des modifications judicieuses.

On peut ainsi espérer se rapprocher plus facilement des formes idéales de l'ouvrage d'égale résistance aux efforts dynamiques. Ce n'est toutefois que lorsque l'on aura effectué de nombreuses mesures de comparaison sur des ouvrages neufs et anciens, dont on connaît l'état exact, bon ou mauvais, par ailleurs, que l'on sera effectivement en mesure d'employer ce nouveau procédé pour étudier la manière dont se comportent dynamiquement les nouveaux ouvrages auxquels on aura à faire subir des essais.

III. Essais de fatigue.

Les résultats actuels des essais de fatigue peuvent être résumés comme suit :

1. La méthode permet l'exécution des essais de fatigue sur des ouvrages d'essai en superstructure ; elle permet également de faire une comparaison, dans un temps relativement court, entre différents ouvrages.

Elle présente une importance toute particulière en ce qui concerne l'essai des constructions soudées, étant donné que les méthodes courantes d'essai dynamique sur les cordons de soudure sont d'une exécution difficile.

2. Il semble que l'application d'un nombre déterminé d'alternances, dans le cas des charges variables, provoque, dans une certaine mesure, une augmentation de la fréquence propre.

3. Lorsque l'influence d'une série continue d'oscillations a dépassé les limites normales, il semble qu'après un temps d'arrêt assez long, la reprise de ces phénomènes exerce une action favorable sur la résistance de la construction à la fatigue. C'est d'ailleurs ce qui se passe toujours dans la pratique.

4. Des ruptures individuelles dans les éléments des ouvrages se manifestent par une réduction brusque de la fréquence propre, pour les différents degrés de liberté.

Zusammenfassung.

Der vorliegende Bericht enthält allgemeine Angaben über Messgrössen, Messgrenzen und Anforderungen an dynamische Messgeräte, sowie ihre Fehlerquellen und ihre Eichung. Nach kurzem Hinweis auf die Wahl der verschiedenen Messverfahren erfolgt eine Beschreibung der seit dem letzten Bericht des Verfassers auf der Internationalen Tagung für Brücken- und Hochbau in Wien 1928 weiter-, sowie neuentwickelten Messverfahren. Auf die in den gemeinschaftlichen Versuchen des internationalen Eisenbahnverbandes, insbesondere der Schweizerischen Bundesbahnen, der Französischen Nordbahn, der Englischen Südbahn und der Deutschen Reichsbahngesellschaft geprüften Messgeräte wird näher eingegangen. Auch einige, in letzter Zeit mehrfach verwendete, besondere Hilfsmittel neuzeitlicher Bauwerksmesstechnik werden beschrieben. Die Anwendungsgebiete der geschilderten Messverfahren sind gestreift. Zum Schluss folgt eine Zusammenfassung der bisherigen Messergebnisse mit den neuen Geräten.

Résumé.

Le rapport qui précède contient des indications générales sur les valeurs à mesurer, sur les possibilités et les limites d'application des méthodes de recherche scientifique, sur les exigences auxquelles doivent satisfaire les appareils de mesures dynamiques, ainsi que leurs sources d'erreurs et les méthodes d'étalonnage.

Après un bref exposé concernant le choix des différentes méthodes de mesure, l'auteur décrit les méthodes qui se sont développées depuis son dernier rapport à la Réunion Internationale des Ponts et Charpentes, à Vienne, en 1928. Il s'étend davantage sur les appareils qui ont fait leurs preuves au cours des essais collectifs entrepris par l'Association Internationale des Chemins de Fer, et en particulier par les Chemins de Fer Fédéraux, le Nord Français, le South Railway en Angleterre, la Société des Chemins de Fer allemands. Il décrit également quelques dispositifs auxiliaires appartenant à la technique des mesures, dans le domaine de la construction, et qui ont été employés à plusieurs reprises au cours de ces derniers temps. Les champs d'application des appareils décrits sont indiqués. Pour conclure, l'auteur résume les résultats déjà obtenus avec les nouveaux appareils.

Summary.

This report contains general rules concerning the magnitudes to be measured, the limits of measurement and the demands made on dynamic measuring instruments, also their sources of error and their calibration. After a short reference to the selection of different measuring systems, a description is given of further systems recently developed, i. e. since the author's last report at the 2nd International Congress for Bridge and Structural Engineering at Vienna in 1928. Details are given of the tests made on measuring apparatus by the International Railway Association undertaken in common, and particularly by the Swiss Federal Railways, the Northern Railway in France, the Southern Railway in England and the German State Railways Co. Several special devices of modern measuring technique are described. The fields of application for the mentioned measuring systems are touched on. Finally a summary is given of the results obtained up to now with the new apparatus.

Leere Seite
Blank page
Page vide

V 3

THEORIE DER SCHWINGUNGSERSCHEINUNGEN AN TRAGWERKEN

THÉORIE DES OSCILLATIONS DES PONTS ET CHARPENTES

THEORY OF THE OSCILLATIONS OF STRUCTURES

Dr.-Ing. Friedrich BLEICH,
Zivilingenieur, Wien.

Herr HOMANN hat in dem vorangehenden Referat in knapper aber äusserst übersichtlicher Form alle jene Probleme der Dynamik berührt, deren theoretische Erledigung zu einer erfolgreichen Erforschung der Schwingungserscheinungen bei Brücken notwendig erscheinen. Die Mannigfaltigkeit und die enge Verkettung der verschiedenen dynamischen Erscheinungen bei Brücken und anderen Bauwerken verlangt gebieterisch vor Inangriffnahme grosszügiger Versuche und Beobachtungen an ausgeführten Brücken die theoretische Klärung zahlreicher Fragen der Bauwerksdynamik, denn in diesen schwierigen Fragen werden nur unter Führung der Theorie Beobachtungen und Untersuchungen am Bauwerk mit Aussicht auf Erfolg durchgeführt werden können. Umgekehrt wird aber auch die fortschreitende Versuchsforschung der Theorie neue Aufgaben und Fragen stellen. In einem solchen steten Zusammenwirken von mathematischer Theorie und Versuchsforschung zwecks gegenseitiger Anregung und Befruchtung sehe ich den einzigen gangbaren Weg, um das überaus schwierige Problem der Bauwerkdynamik, insbesondere der Brückendynamik einer befriedigenden Lösung zuzuführen.

Aufgabe dieses Referates ist es, in groben Umrissen den derzeitigen Stand der Theorie der Schwingungserscheinungen bei Bauwerken im allgemeinen vorzuführen, um dann auf die Besprechung der im Brückenbau in Betracht kommenden besonderen dynamischen Probleme einzugehen.

A. Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen in Bauwerken.

Drei Ursachen sind es im wesentlichen, die zu Schwingungserscheinungen unserer Bauwerke Anlass geben. 1. Bewegte (rollende) Lasten. 2. Periodische Veränderlichkeit ortsfester oder bewegter Lasten. 3. Stosswirkungen der Lasten. 1. und 2. führen auf das Problem der sogenannten erzwungenen Schwin-

gungen, das im Rahmen des praktischen Bedürfnisses wohl als gelöst betrachtet werden kann, während die befriedigende Lösung aller mit eigentlichen Stosswirkungen der Lasten zusammenhängenden dynamischen Aufgaben bisher, trotz vielfacher Anstrengungen der Ingenieure, nicht gelungen ist.

I. Eigenschwingungen elastischer Systeme.

Jedes Tragwerk führt, wenn es irgendwie angeregt und dann sich selbst überlassen wird, Schwingungen aus, die wir als Eigenschwingungen bezeichnen und die infolge gewisser Dämpfungswirkungen wenn keine neuen Anregungen hinzutreten, abklingen. Diese Eigenschwingungen lassen sich immer auf eine endliche oder unendliche Summe von harmonischen Schwingungen also auf die Form

$$y = \sum_{r=1}^{\infty} \eta_r \sin(p_r t + \varepsilon_r) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

zurückführen. y ist hierbei die Koordinate einer Punktverschiebung des hier zunächst als eben vorausgesetzten Tragwerkes. p ist gleich der 2π fachen Schwingungszahl je sec und heisst Kreisfrequenz, ε ist die Phasenverschiebung. η ist die Schwingungsamplitude, sie stellt eine von der Zeit unabhängige Ortsfunktion vor.

Das durch Gl. (1) dargestellte System von Eigenschwingungen kennzeichnet das dynamische Verhalten des Systems. Die Kenntnis der Eigenschwingungen bildet daher die Grundlage für alle weiteren Schwingungsuntersuchungen. Ordnet man die Glieder in Gl. (1) nach der Grösse von p_r, so heisst das erste Glied mit dem kleinsten p die Grundschwingung, ihr entspricht in der Regel die grösste Amplitude η. Die übrigen Schwingungen heissen Oberschwingungen ; p nimmt mit wachsendem r sehr rasch zu, η sehr rasch ab. Massgebende Rolle, insbesonders bei Resonnanzproblemen, spielt die Grundschwingung, weshalb es meistens genügt die Grundschwingungszahl zu kennen.

Fasst man die Bauwerke im allgemeinsten Fall als aus biegungs- und torsionssteifen Stäben zusammengesetzte Tragwerke auf, so vollführen die einzelnen Stäbe Längs- Biegungs- und Torsionsschwingungen. Ausserdem vollführen die einzelnen Stäbe als ganzes periodische Verschiebungen und Drehungen. In Fachwerken spielen, selbst wenn die Stäbe in den Knoten steif verbunden sind, die Biegungsspannungen in der Regel nur eine untergeordnete Rolle, die Nebenspannungen haben bei den hauptsächlich gebräuchlichen Fachwerkformen sehr geringen Einfluss auf die Formänderung des Fachwerkträgers. Massgebend sind hier die Längenänderungen, also vom dynamischen Standpunkt aus, die periodischen Verschiebungen und Drehungen der ganzen Stäbe, sowie ihre Längsschwingungen. Umgekehrt spielen bei Rahmensystemen die Biegungsschwingungen neben den Längsschwingungen eine ausschlaggebende Rolle. Setzt man voraus, dass unsere Bauwerke, was in der Mehrzahl der Fälle zutreffen wird, aus ebenen Tragsystemen bestehen, wo von Ausnahmsfällen abgesehen, Torsionsmomente keine Rolle spielen, so können wir in erster Annäherung mit einer dynamischen Theorie des ebenen Fachwerkes

einerseits, und des ebenen Stabwerkes, d. s. ebene Tragwerke aus biegungssteifen und miteinander steif verbundenen Stäben, anderseits, zunächst das Auslangen finden.

Für die Schwingungszahlen der Eigenschwingungen sind die Grösse und Verteilung der Massen, sowie die Steifigkeit des Tragwerkes massgebend. Je grösser die Masse und je elastischer das Tragwerk ist, umso langsamer ist die Grundswingung. Die Schwingungszahlen werden von kleinen Massenverschiebungen wenig beeinflusst, es genügt daher bei der praktischen Ermittlung der Schwingungszahlen vereinfachte Massenverteilung anzunehmen, um die Berechnung zu vereinfachen, ohne dass sich das Ergebnis, praktisch genommen, verschiebt.

1. Eigenschwingungen von Fachwerken.

Die Ermittlung der Eigenschwingungsperioden kann ausserordentlich vereinfacht werden, wenn man jedes Fachwerk in ausreichender Annäherung als ein System von n Massenpunkten, die in den n Knoten des Trägers sitzen, betrachtet, und zwischen denen die Stabkräfte als innere elastische Kräfte wirken[6, 10]. Ist das Fachwerk im allgemeinsten Fall z fach statisch unbestimmt, so führt das Problem auf $N = 2n - 3 - z$ homogene Gleichungen von der Form

$$\left.\begin{aligned} P_k u_k \frac{p^2}{g E} &= \sum_h \frac{F_{hk}}{s_{hk}} \left[(u_k - u_h)\cos\alpha_{hk} + (v_k - v_h)\sin\alpha_{hk}\right]\cos\alpha_{hk} \\ P_k v_k \frac{p^2}{g E} &= \sum_h \frac{F_{hk}}{s_{hk}} \left[(u_k - u_h)\cos\alpha_{hk} + (v_k - v_h)\sin\alpha_{hk}\right]\sin\alpha_{hk} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (2)$$

worin u_k v_k die Verschiebungsamplituden des Knotens k, u_h, v_h die Verschiebungen aller durch Stäbe mit k verbundenen Knoten h, F_{hk}, s_{hk} Flächen und Längen der in k zusammentreffenden Stäbe, P_k die Knotenlast in k, g und E Schwerebeschleunigung und Elastizitätsmodul bedeuten. α_{hk} sind die Neigungswinkel der Stäbe gegen eine feste Achse x. Siehe Abb 1.

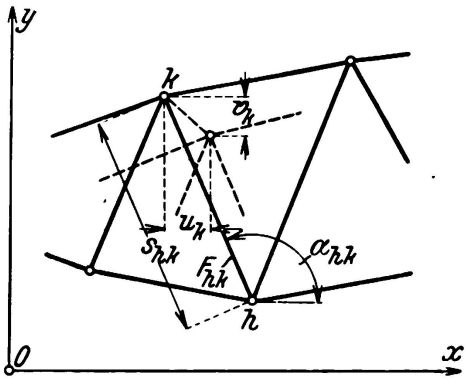


Fig. 1.

Die Null gesetzte Determinante des Gleichungssystems (2) liefert die Periodengleichung aus der die N Eigenschwingungsgrössen des Fachwerkes hervorgehen. Praktisch wäre die Ausrechnung der Determinante überaus beschwerlich. Doch kann in äusserst einfacher Weise durch ein von POHLHAUSEN[9] angegebenes schrittweises Annäherungsverfahren, das in seinem Wesen mit den von Vianello für Bemessung von Knickstäben vorgeschlagenen zeichnerischen Verfahren übereinstimmt, die Grundschwingungszahl und wenn notwendig die höheren Schwingungszahlen mit verhältnismässig geringer Mühe ermittelt werden.

Man wählt zu diesem Zwecke ein beliebiges System von Verschiebungen u und v, die aber mit den Auflagerbedingungen im Einklange stehen müssen,

und berechnet mit der Annahme $\lambda^2 = \frac{p^2}{E g} = 1$ die Knotenlasten $P u \lambda^2$ und $P v \lambda^2$ und hiezu zeichnerisch oder rechnerisch die zugehörenden Stabkräfte S, die wir als erste Näherungswerte mit S' bezeichnen. Mit diesen Stabkräften ermittelt man die Verschiebungen u' und v', z B mit einem Williotschen Verschiebungsplan, und berechnet nach Pohlhausen mittels der Beziehung

$$\lambda'^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma(P u')^2 + \Sigma(P v')^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

einen ersten Näherungswert λ'^2. Die Summen unter den Wurzelzeichen erstrekken sich hiebei auf alle Knoten des Fachwerkes. Man bestimmt nun mit diesem Wert λ'^2 neuerdings die Knotenlasten $P u' \lambda'^2$ und $P v' \lambda'^2$ und dazu die neuen Stabkräfte S'' und die dazugehörenden Knotenverschiebungen u'', v'', die einen neuen Näherungswert

$$\lambda''^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma(P u'')^2 + \Sigma(P v'')^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3')$$

liefern. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis die aufeinanderfolgenden Näherungswerte von λ^2 genügend Übereinstimmung zeigen. Dieses Verfahren führt sehr rasch zum Ziele, da die Konvergenz eine ausgezeichnete ist und meistens der dritte Näherungswert bereits ausreicht. In der Regel wird es genügen, auf diese Weise nur die Grundschwingungszahl zu ermitteln. Doch liegt nichts im Wege, auch die höheren Schwingungszahlen auf dem gleichen Wege zu finden.

Das Verfahren ist vollkommen allgemein und kann bei jeder Art Fachwerksystem, statisch bestimmt oder statisch unbestimmt und bei jeder Art der Massenverteilung verwendet werden und liefert nach zwei oder dreimaliger Wiederholung des einfachen Rechnungsganges (es handelt sich im wesentlichen um Zeichnung von Kräfteplänen und Verschiebungsplänen bezw. Biegeplänen) sehr genaue Ergebnisse. Wegen praktischen Beispielen sei auf [10] und [11] hingewiesen.

2. Eigenschwingungen von Rahmentragwerken.

Wir betrachten zunächst einen einfachen, biegungssteifen Stab als einfachsten Fall eines Rahmentragwerkes. Er stellt ein System mit unendlich vielen Freiheitsgraden vor. An Stelle des endlichen Systems der Gleichungen (2) beim Fachwerk, aus denen die Frequenzen der freien Schwingungen zu ermitteln sind, tritt die Differentialgleichung

$$\frac{d^4 v}{d x^4} - \frac{\mu p^2}{J E} v = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Gl. (4) stellt die Differentialgleichung des mit $\mu \frac{p^2}{E} v$ belasteten Stabes vor, wobei v die Ausbiegung bedeutet.

Die Ermittlung der Lösung dieser Gleichung kann in der gleichen Art erfolgen, wie bei den analogen Differentialgleichungen in der Theorie des instabilen Gleichgewichtes, nämlich durch schrittweises Anpassen der Biegelinie an

die Bedingungen (4). Es ergibt sich damit im Wesentlichen das gleiche Verfahren, das wir bereits im Vorangehenden dargelegt haben, und das, sinngemäss angewendet, nicht nur für den Einzelstab, sondern auch für jedes Rahmentragwerk Geltung besitzt [11].

Zu diesem Zwecke denken wir uns den steifen Stab oder das Rahmengebilde in einzelne, genügend dicht aneinander gereihte Massenpunkte zerlegt. Jedem dieser Massenpunkte ordnen wir eine zunächst willkürlich angenommene, aber mit den Auflagerbedingungen des Systems verträgliche Verschiebung v, oder wenn wir gleich verallgemeinern wollen, Verschiebungen u und v zu. u sind die Verschiebungen in der Längsrichtung des Stabes, während v die Verschiebung quer zur Stabachse bedeuten. Wir belasten nun das Rahmengebilde in den gewählten Massenpunkten mit den Lasten $P u \lambda^2$ bezw. $P v \lambda^2$. P bedeutet das Gewicht der in den fraglichen Massenpunkten konzentriert gedachten Massen μ des Stababschnittes und seiner Auflasten, wobei zunächst

$$\lambda^2 = \frac{p^2}{E g} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (5)$$

gleich 1 gewählt wird. Zu diesen Lasten ermittelt man rechnerisch oder zeichnerisch die Biegungsmomente und Normalkräfte und damit die Verformung in der in der Statik üblichen Weise und gewinnt so ein erstes System von Verschiebungen u' und v'. Man berechnet nun einen ersten Wert von λ^2 nach der Formel.

$$\lambda'^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma (P u')^2 + \Sigma (P v')^2}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (6)$$

und wiederholt den vorgeschriebenen Rechnungsgang. Das Ergebnis seien die Verschiebungen u'' und v'', mit denen neuerdings gemäss Gl. (6) ein zweiter Näherungswert λ''^2 bestimmt werden kann. Das Verfahren wird solange fortgesetzt, bis zwei aufeinanderfolgendé λ genügend Übereinstimmung zeigen. Dies ist oft schon bei λ'' der Fall.

Auf diese Weise gelingt es, bei passendem Ansatz der ersten Biegelinie die einzelnen Schwingungstypen der Reihe nach darzustellen und die zugehörigen Schwingungszahlen zu berechnen.

II. Erzwungene Schwingungen elastischer Systeme.

Wirkt in irgend einem Punkte des Tragwerkes eine Last P, die ihre Grösse periodisch ändert, wir nehmen an, dass dies nach dem Gesetz $P(t) = P \sin \omega t$ erfolge, so vollführt das Tragwerk, wenn ein gewisser stationärer Zustand erreicht ist, Schwingungen mit der Frequenz ω. Diese Schwingungen sind im allgemeinen für das Bauwerk so lange ungefährlich, als die Schwingungszahl n nicht in Übereinstimmung mit einer der niedrigen Eigenschwingungsperioden, insbesonders mit der Grundschwingungsperiode steht. Ist dies der Fall, so tritt die bekannte Erscheinung der Resonanz ein. Die Schwingungsamplituden und damit die von den Schwingungen herrührenden Beanspruchungen können sehr gross werden, und falls die Dämpfung nicht genügend stark ist, wachsen die Amplituden und damit die Spannungen im Tragwerk in einer

den Bestand desselben gefährdenden Weise. Für die praktische Bemessung des Bauwerks entsteht nun die Frage, wie nahe darf die Schwingungszahl n der einwirkenden Last an die kritische Schwingungszahl ν heranrücken, ohne das Bauwerk in Gefahr zu bringen, und wie hoch sind die durch die schwingende Last erzeugten tatsächlichen Beanspruchungen im Bauwerk.

1. Näherungslösung.

Vereinfachende Annahmen führen auf folgende verhältnismässig gut stimmende Näherungsformeln: [10 und 11]

a) Fachwerke: Ist $P^* \sin \omega t$ die schwingende Last, die in einem Knoten m angreife, w die Verschiebung des Knotens m in der Richtung von P^*, u und v die übrigen Knotenverschiebungen, wobei w, u, v die bei der Ermittlung der Eigenschwingungen nach dem Pohlhausenverfahren festgestellten Eigenschwingungsverschiebungen und P die zugehörenden Knotenlasten sind; ist weiters S_k die Stabkraft im Stabe s_k, die zu diesen Verschiebungen gehört und die ebenfalls aus dem Rechnungsgange zur Bestimmung der Eigenschwingungen bekannt ist, so ist die tatsächliche Stabspannung S_k^* unter Wirkung der schwingenden Last $P^* \sin \omega t$ gegeben durch

$$S_k^* = \frac{\alpha S_k}{1 - \frac{n^2}{\nu^2}}, \quad \alpha = \frac{w}{\Sigma P u^2 \lambda^2 + \Sigma P v^2 \lambda^2}, \quad \lambda = \frac{p^2}{E g} \quad \ldots \quad (7)$$

Hierbei ist von Fall zu Fall die Rechnung mit jenem Eigenschwingungstypus durchzuführen, dessen Schwingungszahl $\nu = \frac{p}{2\pi}$ der Schwingungszahl der antreibenden Kraft P^*, nämlich $n = \frac{\omega}{2\pi}$ am nächsten kommt. n kann kleiner oder grösser als ν sein.

b) Rahmentragwerke: Eine ganz analoge Formel gilt auch hier. Ist M_k^* das von der Last $P^* \sin \omega t$ hervorgerufene Biegungsmoment in irgend einem Punkte k, so gilt hierfür

$$M_k^* = \frac{\alpha M_k}{1 - \frac{n^2}{\nu^2}} \quad \ldots \quad (8)$$

Die Bezeichnunhen haben die gleiche Bedeutung wie oben. M_k ist das zu den Eigenschwingungsverschiebungen u, v, w gehörende Moment im Punkte k.

Aus den Formel (7 und 8) erkennt man, dass bei Heranrücken von n an ν, der Nenner sich der Grenze 0 nähert, und dass bei Fehlen der Dämpfung S oder M ins Unendliche wächst. Anderseits gestatten die einfachen Gl. (7 und 8) zu entscheiden, wie nahe man im Einzelfalle mit der Schwingungszahl n an die kritische Zahl ν heranrücken darf, um einerseits die notwendige Sicherheit zu haben, dass man weit genug vom kritischen Grenzzustand entfernt ist, und dass anderseits die auftretende dynamische Spannung im Tragwerk, hinzugefügt zu den von den übrigen ruhenden Lasten hervorgerufenen Spannungen noch innerhalb der zulässigen Beanspruchung bleibe. Die Entscheidung im

Einzelfalle hängt ganz davon ab, mit welcher Genauigkeit n bekannt ist und wie genau die kritische Eigenschwingung bestimmt werden kann. Diese Bestimmung ist mit sehr grosser Genauigkeit dann durchführbar, wenn die mitschwingenden Massen der Grösse und Lage nach gut bestimmt sind. Wie nahe man n an ν heranrücken lassen kann, hängt weiters damit zusammen, wie gross für sich genommen der Spannungszuwachs in Folge der schwingenden Last P gegenüber den von den übrigen Lasten erzeugten Spannungen ist. Man erkennt, dass eine allgemeine Regel, wie gross der Unterschied zwischen n und ν gemacht werden soll, nicht gegeben werden kann, dass aber anderseits die einfachen Formeln (7 und 8) es leicht machen, im Einzelfall nach richtiger Einschätzung der die Genauigkeit der beiden massgebenden Zahlen n und ν beinflussenden Faktoren, den Abstand von n und ν festzulegen.

2. Genaue Lösung.

Für das Fachwerk fehlt in der einschlägigen Literatur ein zweckmässiges Verfahren zur genaueren Ermittlung der Formänderungen und Beanspruchungen in Folge eingeprägter Schwingungen, obwohl es grundsätzlich nicht schwer sein dürfte, diese Aufgabe in einer für die Praxis geeigneten Form zu lösen.

Für das ebene Rahmentragwerk haben, PRAGER [12], BLEICH [11], mehr oder weniger allgemeine Verfahren angegeben, um in einer auch bei praktischen Rechnungen anwendbaren Form und ohne allzugrosse Rechenarbeit die Aufgabe der erzwungenen Schwingung streng zu lösen.

Die Prüfung der Näherungsformeln (7 und 8) an den Ergebnissen der genauen Berechnung hat die Zuverlässigkeit der Näherungsformeln bestätigt.

B. Dynamische Probleme des Brückenbaues.

Wie in den nachfolgenden Erörterungen gezeigt werden wird, genügen die im Vorangehenden in Kürze vorgeführte Theorie und ihre Ergebnisse, um eine ganze Reihe von Fragen der Brückendynamik erfassen zu können. Welche Fragen überhaupt in Betracht kommen, haben Sie aus dem ausgezeichneten Bericht des Herrn HOMANN entnommen.

Von diesen Fragen sind die folgenden einer mehr oder weniger guten rechnungsmässigen Behandlung zugängig :

1. Erzwungene Schwingungen infolge der mit der Geschwindigkeit v rollenden Lasten.

2. Zusatzbeanspruchungen von den Fliehkräften, die in der nach unten gekrümmten Bahnlinie der bewegten Lasten auftreten.

3. Zusatzbeanspruchungen infolge der erzwungenen Schwingungen, die durch die periodisch veränderlichen Raddrücke der Lokomotiven infolge des unvollständigen Massenausgleiches ausgelöst werden, sowie die Zusatzbeanspruchungen durch die periodischen Stosswirkungen der in regelmässigen Abständen angeordneten Schienenstösse.

Eine Reihe älterer Arbeiten hat sich mit diesen Einzelproblemen befasst. Ich nenne hier nur PHILLIPS [2], RENAUDOT [3], BRESSE [4], LEBERT [5], die das Problem der Brückenschwingungen unter dem Einfluss der rollenden Lasten behan-

delt haben. STOKES[1], und ZIMMERMANN[7] haben den Einfluss der infolge der Durchbiegung entstehenden Fliehkräfte dargestellt.

Timoshenko[8] hat als erster einige Fragen der Brückendynamik, die einer rechnerischen Behandlung zugänglich sind, in einheitlicher Weise, unter der Benützung der Lagrangeschen Gleichungen zweiter Art erörtert. Die gleichen Probleme wurden später von der Differentialgleichung der Querschwingungen gerader Stäbe ausgehend und, so weit notwendig, unter Berücksichtigung der Abfederung der rollenden Last von Bleich untersucht und gezeigt, wie man auf theoretischem Wege zu den für die Praxis notwendigen Stosskoeffikienten gelangen kann [10].

1. Erzwungene Schwingungen von der rollenden Last.

Unter der Annahme, dass eine Einzellast P, deren Masse aber klein gegen die Masse des Tragwerkes gedacht ist, über einen frei aufgelagerten Balken von der Stützweite l mit der Geschwindigkeit c rollt, lassen sich die durch die bewegte Last erzwungenen Schwingungen leicht berechnen. Der Träger führt dann neben den Eigenschwingungen erzwungene Schwingungen mit der Periode $T = \frac{2\,l}{c}$ aus. Diese Periode ist also gleich der doppelten Zeit, die die Last braucht, um über die Brücke zu rollen. Die Bewegung ist langsam gegenüber den freien Schwingungen. Die Bahn des Lastpunktes ist im verzerrten Masstab in Abb. 2 dargestellt. Die grösste Durchbiegung tritt etwas seitwärts der Mitte auf. Da die erzwungenen Schwingungen verhältnismässig langsam sind, so tritt bei der Steifigkeit der heutigen Brücken Resonanzwirkung erst bei Lastgeschwindigkeiten von über 300 m/sek. ein, die natürlich nicht vorkommen, sodass Resonanzerscheinungen bei diesem Problem nicht in Frage kommen. Die zusätzliche Beanspruchung durch die Wirkung der rollenden Lasten beträgt bei schweren Eisenbahnbalkenbrücken etwa 10 % der statischen Wirkung der Last P bei 5 m Spannweite und nimmt bis auf ca 5 % bei 150 Spannweite ab. Die genaueren Zahlen sind nachstehend angegeben. Sie wurden für schwere Eisenbahnbalkenbrücken unter bestimmten Annahmen über Eigengewicht und Steifigkeit errechnet [10]. Aehnliche Zahlenreihen lassen sich für jeden Brückentypus, z. B. Bogenbrücken, unschwer aufstellen.

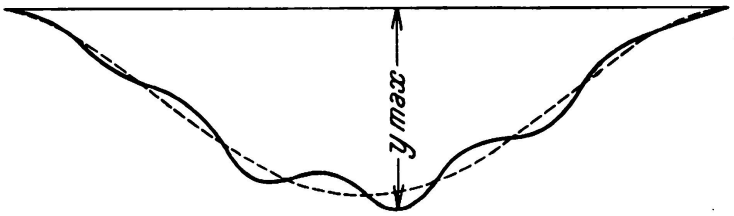


Fig. 2.

Tafel 1.

Stützweite l in m	4	6	10	15	20	25	50	100	150
Vermehrung in % der statischen Wirkung	10,3	9,8	8,7	8,7	8,3	8,1	6,8	5,9	5,0

Rollt eine ganze Folge von Einzellasten über die Brücke, so werden sich die einzelnen Lasten in ihrer Wirkung auf den Träger z. T. stören. Im ungün-

stigsten Fall aber zeigt es sich, dass die gleichen Vermehrungskoeffizienten gelten, wie für eine Einzellast [8 und 10].

Untersucht man den Einfluss, den die Abfederung der Wagen auf die Schwingungen ausübt, so gelangt man zu dem folgenden einfachen Zusammenhang [10]. Ist ν die Eigenschwingungszahl des Trägers ν', die der mit P belasteten Feder, so verhält sich die Amplitude der erzwungenen Schwingung der abgefederten Last zur Amplitude der Trägerschwingungen wie

$$\mu = \frac{\left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^2}{1-\left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Ist ν gross, ν' klein, so ist μ klein gegen 1, d. h. die abgefederte Last schwingt mit bedeutend kleinerer Amplitude als der Träger.

Die kleinen Wellen, die sich in Abb. 2 über die Hauptdurchbiegung überlagern, werden daher durch die Abfederung der Last stark abgeflacht. Der Einfluss der Abfederung ist bei Brücken kleiner Stützweiten mit ihren raschen Schwingungen sehr gross. Bei grösseren Brücken macht sich die Abfederung weniger geltend. Diese Erkenntnis ist aber äusserst wichtig, da gerade bei kleinen Brücken die Trägheitswirkungen der Lasten von grosser Bedeutung sind, und die gerade durch die Abfederung stark vermindert werden.

2. Einfluss der Trägheitskräfte der rollenden Last.

Wenn man die Träger nicht als gewichtslos betrachten will, ist eine strenge Lösung der hier in Frage kommenden Aufgabe nicht möglich. Die über den Träger rollende Last P mit der Masse $\frac{P}{g}$ übt infolge der Bahnkrümmung nach unten einen Druck

$$P' = P\left(1 - \frac{\mu}{g}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

aus, wo μ der oben, Gl. (9), ermittelte Beiwert der Abfederung ist. Die Wirkung dieser Kraft ist eine zweifache. Sie beeinflusst sowohl die oben berechneten erzwungenen Schwingungen als auch die sie begleitenden freien Schwingungen. Durch eine mehr abschätzende Näherungsberechnung wurde gefunden, dass die Vergrösserung der unter 1) betrachteten erzwungenen Schwingungen im Verhältnis von

$$1 : 1 + \frac{8M}{pl^2}\alpha^2 \qquad \alpha^2 = \frac{c^2 l^2 p}{\pi^2 EIg} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

erfolgt [10]. Hierin ist M das Moment des rollenden Lastenzuges, pl das Tragwerksgewicht, EJ die Brückensteifigkeit. Die folgende Tafel 2 gibt in Prozenten die Vermehrung der statischen Wirkung für den in Tafel 1 zugrunde gelegten Brückentypus an.

Tafel 2.

Stützweite l in m	4	6	10	15	20	25	50	100	150
Vermehrung in % der statischen Wirkung	12,3	8,3	4,9	3,3	2,4	1,9	0,91	0,38	0,23

Der Einfluss der lotrechten Fliehkräfte auf die freien Schwingungen ist nur bei kleinsten Stützweiten von Bedeutung. Die folgende Tafel 3 gibt ziffernmässig die Vermehrung der statischen Wirkung durch diese Fliehkräfte, bei dem bereits oben erwähnten betrachteten Brückentypus an[10].

Tafel 3.

Stützweite l in m	4	6	10	15	20	25	50	100	150
Vermehrung in % der statischen Wirkung	19,2	11,3	5,3	3,3	2,3	1,7	1,0	0,62	0,27

3. Dynamische Wirkungen der Gegengewichte der Lokomotivräder.

Die Gegengewichte der Lokomotivräder wirken mit dem Gesetz P sin $2\pi n t$ auf die Brücke. Nähert sich n einer Eigenschwingungszahl, so tritt Resonanz ein. Bei den üblichen Schnellzugslokomotiven ist $c = 30$ m/sec. und $n \simeq 5$. Nun ist bei Balkenbrücken von etwa 50 m Spannweite die Eigenschwingungszahl ν ebenfalls gleich 5. Es besteht also die Gefahr, dass bei Brücken von etwa 50 m Spannweite angefangen, starke Resonanzerscheinungen auftreten können. Diese Wirkungen werden aber erfahrungsgemäss verringert durch die Phasenverschiebung bei den einzelnen Lokomotivrädern und durch die Dämpfung in der Brücke, Es erscheint daher in erster Linie notwendig, da das Problem der gedämpften erzwungenen Schwingungen von der theoretischen Seite her als gelöst betrachtet werden kann, durch Beobachtungen an Brücken ziffernmässige Werte der Dämpfungskoeffizienten festzustellen. Mit der Bestimmung dieser Dämpfungskoeffizienten wäre auch die Frage der Resonanz bei erzwungenen Schwingungen infolge der in festen Abständen angebrachten Schienenstösse einer Lösung näher gebracht.

Damit wurden in knapper Form die wichtigsten einer theoretischen Behandlung unterzogenen Probleme der Brückendynamik gestreift. Bei der mathematischen Behandlung dieser Aufgaben wurde aber stillschweigend von der Voraussetzung ausgegangen, dass die Lasten durch starre Längs- und Querträger auf die Hauptträger übertragen werden. Die Wirkung der elastischen Fahrbahntafel macht sich aber so wie eine Abfederung geltend. Es wäre daher als eine nächste, durchaus auf theoretischem Wege lösbare Aufgabe zu erledigen, den Einfluss der elastischen Fahrbahntafel auf die Schwingungserscheinungen bei den Hauptträgern und umgekehrt den Einfluss der elastischen Lagerung von Längs- und Querträgern auf deren Schwingungen rechnerisch festzustellen.

Quellennachweis

1. Stokes. Discussion of a differential equation relating to the breaking of railway bridges. Trans. of the Cambridge Soc., 1849, p. 707.

2. Philips. Calcul de la résistance des poutres droites, telles que les ponts, les rails, etc., sous l'action d'une charge en mouvement. Ann. des mines, 1855, p. 467.

3. Renaudot. Études de l'influence des charges en mouvement sur la résistance des ponts métalliques à poutres droites. Ann. des Ponts et Chauss., 1861, p. 145.

4. Bresse. Cours de mécanique appliquée, I, 1862-66, p. 361.

5. Lebert. Études des mouvements vibratoires dans les ponts à poutres droites à une

travée et dans les ponts suspendus à tablier continu simplement appuyées aux culées. Ann. Ponts et Chauss., 1899, p. 215.

6. Reissner. Schwingungsaufgaben aus der Theorie des Fachwerks. Zeitschrift für Bauwesen, 1903, Seite 135.

7. Zimmermann. Die Schwingungen eines Trägers mit bewegter Last. Berlin, 1896.

8. Timoshenko. Erzwungene Schwingungen prismatischer Stäbe. Zeitschrift für Math. und Phys., 1911, S. 163.

9. Pohlhausen. Berechnung der Eigenschwingungen statisch bestimmter Fachwerke. Zeitschr. für angew. Math. u. Mech., 1921, S. 28.

10. Bleich. Theorie und Berechnung der eisernen Brücken. Berlin, 1924.

11. Bleich. Stahlhochbauten, ihre Theorie, Berechnung und bauliche Gestaltung. Berlin, 1932.

12. Prager. Die Beanspruchung von Tragwerken durch schwingende Lasten. Ing. Archiv., 1930.

TRADUCTION

par M. Gossieaux, Ing., Paris.

Dans le rapport qu'il vient de nous communiquer, M. Homann a présenté d'une manière concise, mais parfaitement claire, tous ceux des problèmes de la dynamique dont la mise au point paraît nécessaire si l'on veut pouvoir effectuer des recherches fructueuses sur les phénomènes d'oscillation qui se manifestent dans les ponts. La multiplicité et l'étroit enchaînement des divers phénomènes dynamiques que l'on observe dans les ponts et dans les autres ouvrages exigent d'une manière impérieuse, avant le commencement des recherches de grande envergure et des observations sur des ponts réels, la solution théorique de nombreuses questions pratiques concernant la dynamique des ouvrages. Si l'on veut, en effet, pouvoir poursuivre, avec quelques chances de succès, les observations et les recherches concernant la construction, dans ces domaines difficiles, il est nécessaire de s'appuyer sur des bases théoriques solides. Inversement, la progression des recherches expérimentales posera des questions théoriques nouvelles. Dans une dépendance aussi étroite entre la théorie mathématique et la recherche expérimentale, dépendance qui a pour conséquence la réciprocité dans l'impulsion et les progrès, je vois la seule condition qui permette d'arriver à une solution heureuse du problème délicat que constitue la dynamique de la construction et, en particulier, la dynamique du pont.

Le but de la présente étude est de présenter, d'une manière générale, et dans ses grandes lignes, l'état actuel de la théorie des phénomènes oscillatoires que l'on rencontre en construction, pour passer ensuite à l'énoncé des problèmes dynamiques qui se posent tout particulièrement en ce qui concerne la construction des ponts.

A. Les oscillations propres et les oscillations forcées dans la construction.

Il existe trois causes principales qui peuvent donner naissance, dans nos ouvrages de construction, à des phénomènes d'oscillation. Ce sont les suivantes :

1. les charges roulantes ;
2. les variations périodiques des charges fixes ou mobiles ;
3. les influences de choc qui sont exercées par les charges.

Les causes 1 et 2 nous conduisent à l'étude du problème des oscillations dites « forcées ». Dans le cadre des exigences de la pratique, ce problème peut, en fait, être considéré comme résolu. Par contre, on n'a pas encore pu résoudre d'une manière satisfaisante, malgré tous les efforts des techniciens, toutes les questions dynamiques qui sont reliées aux influences de choc proprement dites exercées par les charges.

I. Oscillations propres des systèmes élastiques.

Tout système de poutres qui se trouve soumis à une excitation particulière, puis abandonné à lui-même, est l'objet d'oscillations que l'on désigne sous le nom d'oscillations propres, et qui s'éteignent sous l'action de certaines influences d'amortissement, si aucune nouvelle excitation ne s'exerce. Ces oscillations propres peuvent toujours être ramenées à une somme limitée ou illimitée d'oscillations harmoniques, c'est-à-dire à la forme suivante :

$$y = \sum_{r=1}^{\infty} \eta_r \sin(p_r t + \varepsilon_r) \tag{1}$$

dans laquelle on désigne par :

y l'ordonnée du mouvement d'oscillation d'un point de la poutre à partir de sa position initiale d'équilibre ;
p_r 2π fois le nombre d'oscillations par seconde, c'est-à-dire la pulsation ;
ε le décalage de phase ;
η l'amplitude des oscillations, fonction du point considéré et indépendante du temps.

Le système d'oscillations propres défini par l'équation (1) définit la condition dynamique du système. La connaissance des oscillations propres constitue donc la base de toutes les recherches ultérieures sur les phénomènes oscillatoires. Si l'on range les termes de l'équation (1) d'après les valeurs croissantes de p_r (pulsation), le premier terme correspondant à la plus faible valeur de p constitue l'oscillation fondamentale, à laquelle correspond normalement la plus grande valeur de l'amplitude η. Les autres oscillations sont des oscillations harmoniques ; p augmente rapidement avec le rang de r, η diminuant rapidement en même temps.

L'oscillation fondamentale joue un rôle de premier plan, particulièrement dans les problèmes de résonance, c'est pourquoi, dans la plupart des cas, il suffit de connaître la fréquence de l'oscillation fondamentale.

Si, dans le cas le plus général, on considère l'ouvrage comme une charpente constituée par un ensemble d'éléments résistant à la flexion et à la torsion, les éléments individuels exécutent, en tant que faisant partie de cette charpente, des oscillations longitudinales, des oscillations de flexion et des oscillations de torsion. En outre, ils subissent par eux-mêmes des translations et des rotations périodiques. Dans les treillis, même lorsque les barres sont assemblées

aux nœuds d'une manière rigide, les efforts de flexion ne jouent, en règle générale, qu'un rôle peu important ; les tensions secondaires, dans les dispositions en treillis généralement adoptées, n'exercent qu'une influence très faible sur les déformations de la poutre en treillis. Par contre, les déformations longitudinales, qui se traduisent sur les éléments tout entiers par des translations et des rotations périodiques, jouent un rôle important.

Inversement, dans les systèmes constitués par des assemblages en cadres, les oscillations de flexion jouent un rôle prépondérant par rapport aux oscillations longitudinales. Si l'on admet, ce qui se produit dans la plupart des cas, que nos ouvrages se composent de systèmes plans lesquels, sauf cas d'exception, les moments de torsion n'interviennent pas, on peut donc, en première approximation, se contenter d'une théorie dynamique concernant, d'une part, le treillis plan, d'autre part, les éléments plans des charpentes, c'est-à-dire des systèmes constitués par des barres résistant à la flexion et assemblées d'une manière rigide les unes aux autres.

Les périodes des oscillations propres sont déterminées principalement par la valeur et par la répartition des masses, de même que par la rigidité de la charpente. L'oscillation fondamentale est d'autant moins rapide que la masse est plus importante et que la charpente est plus élastique. Les périodes d'oscillation sont peu influencées par de faibles variations de la masse ; il suffira donc, pour la détermination pratique de la période d'oscillation, d'admettre une répartition simple des masses ; le calcul sera ainsi simplifié, sans toutefois que le résultat soit altéré en ce qui concerne la portée pratique.

1. Oscillations propres des treillis.

La détermination de la période des oscillations propres peut être considérablement simplifiée, avec une approximation suffisante, si l'on considère chaque treillis comme un système de n points doués d'une masse élémentaire, situés aux n nœuds d'assemblage de ce treillis, et entre lesquels les efforts dans les barres agissent comme efforts élastiques internes[6,10]. Si, dans le cas général, le treillis est z fois statiquement indéterminé, le problème conduit à :

$$N = 2n - 3 - z$$

équations homogènes de la forme suivante :

$$\left.\begin{aligned} P_k u_k \frac{p^2}{g E} &= \sum_h \frac{F_{hk}}{s_{hk}} [(u_k - u_h)\cos\alpha_{hk} + (v_k - v_h)\sin\alpha_{hk}]\cos\alpha_{hk} \\ P_k v_k \frac{p^2}{g E} &= \sum_h \frac{F_{hk}}{s_{hk}} [(u_k - u_h)\cos\alpha_{hk} + (v_k - v_h)\sin\alpha_{hk}]\sin\alpha_{hk} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

dans lesquelles on désigne par :

$u_k\, v_k$ les amplitudes des déplacements du nœud k ;

$u_h\, v_h$ les déplacements de tous les nœuds h qui sont reliés au nœud k par des barres ;

$F_{hk}\, s_{hk}$ les sections et longueurs respectives des barres qui sont assemblées en k ;

P_k la charge sur l'assemblage en k ;

g, E l'accélération de la pesanteur et le module d'élasticité ;
α_{hk} l'angle de déviation des barres par rapport à un axe fixe x (voir figure 1).

En égalant à zéro le déterminant du système d'équations (2) on obtient l'équation de la période, de laquelle résultent les N valeurs qui correspondent à l'oscillation propre du treillis. Pratiquement, le calcul du déterminant serait très difficile. Toutefois, on peut, d'une manière très simple et avec relativement peu de difficultés, déterminer la période d'oscillation fondamentale et, en cas de besoin, les périodes des oscillations harmoniques, en employant un procédé d'approximations successives indiqué par Pohlhausen [9] et qui permet d'obtenir des résultats concordant avec ceux que donne le procédé graphique prévu par Vianello pour la détermination des cotes des barres au flambage.

On choisit à cet effet, à volonté, un groupe de translations u et v, qui doivent toutefois être compatibles avec les conditions aux appuis et on calcule les charges aux nœuds

$$\mathrm{P}u\lambda^2 \quad \text{et} \quad \mathrm{P}v\lambda^2$$

en supposant :

$$\lambda^2 = \frac{p^2}{\mathrm{E}g} = 1.$$

Puis, soit graphiquement, soit par le calcul, on détermine les efforts correspondants dans les barres S, dont nous désignerons les premières valeurs approchées par S'. Au moyen de ces efforts dans les barres, on détermine les translations u' et v' par exemple, au moyen d'un diagramme de translation de Williot et on calcule une première valeur approchée λ'^2 d'après Pohlhausen, au moyen de la relation :

$$\lambda'^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma(\mathrm{P}u')^2 + \Sigma(\mathrm{P}v')^2}} \tag{3}$$

Les sommes entre les parenthèses s'étendent à tous les nœuds du treillis. On détermine ensuite, à l'aide de cette valeur λ'^2, à nouveau, les charges dans les nœuds $\mathrm{P}u'\lambda'^2$ et $\mathrm{P}v'\lambda'^2$ puis les nouvelles valeurs S'' des efforts dans les barres et les déplacements correspondants $u''v''$ dans les nœuds, ce qui conduit à une nouvelle valeur approchée :

$$\lambda''^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma(\mathrm{P}u'')^2 + \Sigma(\mathrm{P}v'')^2}} \tag{3'}$$

On continue ces calculs jusqu'à ce que deux valeurs successives obtenues pour λ^2 soient suffisamment rapprochées. Cette méthode conduit très rapidement au but, car la convergence des résultats est remarquable et la troisième valeur approchée est généralement suffisante dans la plupart des cas.

En règle générale, il est suffisant de déterminer de cette manière la période d'oscillation propre. Toutefois, rien n'empêche de déterminer également les périodes des oscillations harmoniques, en employant le même procédé.

Le procédé est tout à fait général et peut être employé pour un système de treillis de quelque nature que ce soit, statiquement déterminé ou statiquement

indéterminé, et pour une répartition quelconque des masses; il donne, après deux ou trois approximations successives, d'un calcul simple, des résultats très précis s'il s'agit en particulier du tracé des diagrammes d'efforts, de déformations ou de fléchissements. En ce qui concerne les exemples pratiques, voir (10) et (11).

2. Oscillations propres des charpentes en cadres.

Considérons tout d'abord un élément simple et rigide, que nous pouvons admettre, comme représentant le cas le plus simple d'une charpente en cadres. Il constitue un système admettant un degré de liberté infini. A la place du système fini des équations (2) qui correspondent au treillis et à partir desquelles on détermine la fréquence des oscillations libres, on a l'équation différentielle :

$$\frac{d^4 v}{dx^4} - \frac{\mu}{J} \cdot \frac{p^2}{E} v = 0 \tag{4}$$

L'équation (4) représente l'équation différentielle de l'élément soumis à une charge $\mu \frac{p^2}{E} . v$ où v désigne le fléchissement.

La résolution de cette équation peut être effectuée de la même manière que celle des équations différentielles analogues que l'on rencontre dans la théorie des équilibres instables, c'est-à-dire par adaptation progressive de la ligne élastique aux conditions (4). On peut pour cela, en particulier, employer le même processus que celui que nous avons déjà exposé précédemment et qui, mis en œuvre d'une manière analogue, est applicable non seulement à un élément isolé, mais également à toute charpente constituée par des cadres [11].

Dans ce but, on suppose l'élément rigide, ou le cadre, décomposé en masses ponctuelles isolées, situées à des endroits suffisamment rapprochés les uns des autres. A chacune de ces masses ponctuelles, on attribue un déplacement v tout d'abord supposé arbitraire, mais compatible avec les conditions d'appui du système, ou, si l'on veut également généraliser, des déplacements u et v, u désignant les déplacements suivant la direction longitudinale par rapport à l'élément et v le déplacement suivant une direction perpendiculaire à son axe. On suppose maintenant le cadre chargé, à l'endroit des masses ponctuelles choisies, avec des charges respectives $P u \lambda^2$ et $P v \lambda^2$. P désigne le poids qui correspond, d'une part, aux masses μ des parties de l'élément considérées comme concentrées aux points en question et, d'autre part, aux charges à supporter. On considère tout d'abord :

$$\lambda^2 = \frac{p^2}{E g} \tag{5}$$

comme égal à 1. Pour ces charges, on détermine par le calcul ou graphiquement les moments fléchissants et les efforts normaux et, par suite, les déformations, suivant le processus courant en statique. On obtient ainsi un premier groupe de déplacements u' et v'. On calcule ensuite une première valeur λ'^2 d'après la formule :

$$\lambda'^2 = \frac{1}{\sqrt{\Sigma (P u')^2 + \Sigma (P v')^2}} \tag{6}$$

et l'on répète le cycle de calcul précédemment exposé. On obtient les déplacements u'' et v'', à partir desquels on peut déterminer à nouveau, suivant l'équation (6), une deuxième valeur plus approchée. On continue suivant la même méthode, jusqu'à ce que l'on obtienne deux valeurs successives λ qui soient suffisamment voisines l'une de l'autre. C'est ce qui se produit souvent dès la valeur λ''.

De cette manière, on arrive, en partant d'une ligne élastique convenable, à dégager les différentes oscillations particulières, les unes après les autres et à calculer les périodes d'oscillation correspondantes.

II. Oscillations forcées d'un système élastique.

Supposons que, en un point quelconque de la charpente, s'exerce une charge P dont la valeur varie périodiquement et que cette variation suive la loi :

$$P(t) = P \sin \omega t$$

La charpente exécutera, lorsqu'un certain état de régime sera atteint, des oscillations ayant la pulsation ω. Ces oscillations ne sont en général pas dangereuses pour la charpente, tant que la fréquence d'oscillation n ne coïncide pas avec l'une des périodes inférieures des oscillations propres, en particulier avec la période de l'oscillation fondamentale. Si toutefois ce fait se produit, le phénomène bien connu de la résonance entre en jeu. L'amplitude des oscillations et, par suite, les contraintes provoquées par ces oscillations, peuvent prendre des valeurs considérables. Si l'amortissement n'est pas suffisamment prononcé, les amplitudes continuent à croître ; les efforts peuvent alors devenir tels que la sécurité de la charpente soit elle-même menacée.

Pour déterminer les dimensions de cette charpente, la question se pose donc maintenant de savoir dans quelle mesure la fréquence de variation n de la charge peut se rapprocher de la fréquence d'oscillation critique ν sans que la sécurité de la charpente soit compromise et de déterminer quelles sont les valeurs effectives des efforts qu'y provoque la charge variable.

1. Solution approchée.

Des hypothèses de simplification conduisent aux formules approchées qui suivent et qui donnent des résultats relativement bons.

a) *Treillis.*

Soit P^* sin ωt la charge oscillante qui s'exerce sur un nœud m, soit w le déplacement que subit le nœud m dans la direction du P^*, u et v les déplacements que subissent les autres nœuds ; u, v et w étant constitués par les déplacements dus aux oscillations propres déterminées suivant la méthode de Polhausen et P désignant la charge correspondante s'exerçant aux nœuds. Soit en outre S_k l'effort dans l'élément s_k du treillis qui correspond à ces déplacements et qui est également déterminé par la méthode de calcul des oscillations propres.

L'effort effectif dans l'élément, soit S^*_k sous l'action de la charge oscillante $P^* \sin \omega t$ est donné par :

$$S_k = \frac{\alpha S_k}{1 - \frac{n^2}{\nu^2}} \qquad (7)$$

avec

$$\alpha = \frac{w}{\Sigma P u^2 \lambda^2 + \Sigma P v^2 \lambda^2}$$

$$\lambda = \frac{p^2}{E.g}$$

Ce calcul doit être exécuté, suivant chaque cas, en tenant compte du mode d'oscillation propre correspondant à la fréquence

$$v = \frac{p}{2\pi}$$

se rapprochant le plus possible de la fréquence

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

de la charge P^*. n peut être supérieur ou inférieur à ν.

b) Charpentes constituées par des cadres.

On peut appliquer ici une formule tout à fait analogue. Si M^*_k désigne le moment fléchissant qui prend naissance sous l'action de la charge $P^* \sin \omega t$ en un point quelconque k, on a ici :

$$M^*_k = \frac{\alpha M_k}{1 - \frac{n^2}{\nu^2}} \qquad (8)$$

les désignations étant les mêmes que précédemment. M_k est le moment correspondant aux déplacements u, v, w, au point k.

En examinant les formules (7) et (8) on peut remarquer que lorsque n et ν se rapprochent, et lorsque l'amortissement fait défaut, S (ou M) augmente indéfiniment. D'autre part, les équations simples (7) et (8) permettent de déterminer dans quelle proportion, pour des cas particuliers, la fréquence d'oscillation n peut être voisine de la fréquence critique ν ce qui permet, d'une part, de s'assurer que par suite de l'écart avec la valeur critique, on réalise la sécurité nécessaire et d'autre part, que l'effort dynamique qui s'exerce dans la charpente et qui vient s'ajouter aux efforts mis en jeu par les autres charges fixes, se maintient encore au-dessous du taux admissible.

Le résultat dépend, dans chaque cas particulier, de la précision avec laquelle n est connue, ainsi que de celle avec laquelle on peut déterminer l'oscillation propre critique. Cette détermination peut être effectuée avec une exactitude beaucoup plus grande lorsque toutes les masses entrant en oscillation peuvent être elles-mêmes convenablement déterminées, tant en grandeur qu'en position.

L'écart admissible entre n et ν dépend en outre de l'importance en soi de l'accroissement des efforts résultant de l'influence des oscillations de la charge P par rapport aux efforts produits par les autres charges. Il est évident que l'on ne peut pas donner de règles générales indiquant quelles différences on peut admettre entre n et ν ; on voit toutefois que les formules simples (7) et (8) permettent de déterminer facilement l'écart entre n et ν dans chaque cas particulier suivant l'exactitude de l'évaluation des facteurs qui interviennent dans la précision avec laquelle on connaît les valeurs essentielles n et ν.

2. Solution exacte.

Pour le treillis, il manque dans la littérature correspondante une méthode convenable permettant la détermination précise des déformations et des efforts qui résultent des oscillations forcées, quoiqu'il ne paraisse pas très difficile, en principe, de résoudre cette question d'une manière qui réponde aux besoins de la pratique.

En ce qui concerne les membrures planes des charpentes, PRAGER [12], BLEICH [11], ont indiqué des méthodes plus ou moins générales permettant de résoudre la question des oscillations forcées sous une forme faisant appel à des calculs assez pratiques et sans conduire à un travail trop fastidieux.

Le contrôle qui a été effectué sur les formules (7) et (8), d'après les résultats obtenus en employant les méthodes de calcul rigoureuses, a permis de confirmer la légitimité de ces formules approchées.

B. Problèmes dynamiques concernant la construction des ponts.

Ainsi qu'on le verra dans les discussions qui suivent, la théorie qui vient d'être brièvement exposée et les résultats qu'elle permet d'obtenir suffisent à embrasser une grande partie des questions qui concernent la dynamique du pont. Le remarquable mémoire de M. HOMANN a permis de voir quelles étaient les questions les plus importantes qu'il importait de prendre en considération.

Les points suivants sont susceptibles d'être traités par le calcul d'une manière plus ou moins satisfaisante.

1. — Oscillations forcées provoquées par des charges roulantes qui se déplacent à une vitesse v ;

2. — Efforts secondaires dus aux influences centrifuges et qui se trouvent mis en jeu sur la trajectoire suivie par la charge roulante et incurvée vers le bas ;

3. — Efforts secondaires résultant des oscillations forcées que produisent les variations périodiques de pression exercées par les roues de locomotives, et qui sont dues à un équilibrage imparfait des masses, ainsi que les efforts secondaires provoqués par les effets de choc périodiques qui se produisent aux joints de dilatation des rails, qui se trouvent généralement à des intervalles réguliers.

Un certain nombre d'investigateurs se sont déjà préoccupés antérieurement de ces problèmes particuliers. Nous nous contenterons seulement de signaler ici PHILLIPS [2], RENAUDOT [3], BRESSE [4], LEBERT [5] qui ont traité le problème des

oscillations provoquées dans les ponts par l'influence des charges roulantes. STOKES [1] et ZIMMERMANN ont établi l'influence des forces centrifuges qui prennent naissance à la suite des fléchissements.

Timoshenko [8], le premier, a étudié quelques-unes des questions que pose la dynamique du pont et qui sont susceptibles de recevoir une solution rigoureuse, en employant les équations de Lagrange du deuxième type. Le même problème a été étudié ultérieurement à partir de l'équation différentielle des oscillations transversales des barres rectilignes et, dans la mesure nécessaires en tenant compte de l'influence de la suspension de la charge roulante. On a montré comment il était possible d'arriver par des voies théoriques, aux coefficients de choc qui sont nécessaires dans la pratique [10].

1. Oscillations forcées provoquées par les charges roulantes.

Si l'on suppose qu'une charge isolée P, dont on imagine toutefois que la masse est faible par rapport à la masse de la charpente, roule sur une poutre ayant une portée l et reposant librement sur ses appuis, la vitesse de ce déplacement étant c, on peut déterminer facilement par le calcul les oscillations forcées provoquées par cette charge roulante.

La poutre exécute, outre ses oscillations propres, des oscillations forcées admettant une période égale à :

$$T = \frac{2\,l}{c}$$

Cette période est donc égale au double du temps que met la charge roulante pour parcourir la longueur du pont. Le mouvement est lent par rapport aux oscillations. Le chemin parcouru par le point d'application de la charge est représenté sur la figure 2 à échelle réduite. Le fléchissement atteint sa valeur maximum en un point voisin du milieu. Comme les oscillations forcées sont relativement lentes, il se produit tout d'abord, par suite de la rigidité des ponts actuels, un effet de résonance, pour les vitesses de déplacement de la charge qui sont supérieures à 300 mètres-seconde. Comme ces vitesses ne se présentent pas dans la pratique, il n'y a pas lieu de tenir compte, dans ce problème, des phénomènes effectifs de résonance. L'effort additionnel dû à l'action de la charge roulante atteint, dans les ponts-rail lourds à poutres pleines, environ 10 % de celui qui résulte de l'influence statique de la charge, pour une portée de 5 mètres, et descend environ jusqu'à environ 5 % pour une portée de 150 mètres. Les chiffres exacts sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.

Portées l en mètres :								
4	6	10	15	20	25	50	100	150
Coefficient d'amplification de la charge statique, en %.								
10,3	9,8	8,7	8,7	8,3	8,1	6,8	5,9	5,0

Ces coefficients ont été calculés pour des ponts-rail lourds à poutres pleines, dans des conditions déterminées de poids propre et de rigidité [10]. On peut déterminer facilement des séries de pourcentages semblables pour chaque type de ponts, par exemple, pour les ponts en arc ou pour les ponts suspendus.

Si toute une succession de charges isolées passe sur le pont, les influences de ces charges individuelles sur la poutre subiront des perturbations partielles. Dans le cas le plus défavorable, on constate que l'on peut faire intervenir les mêmes coefficients d'amplification que pour les efforts provoqués par une charge isolée [8, 10].

Si l'on recherche l'influence qu'exerce sur les oscillations la suspension des véhicules, on arrive à la relation simple suivante [10]. Soit ν la fréquence de l'oscillation propre de la poutre, et ν' celle de la suspension supportant une charge P. On a entre l'amplitude des oscillations forcées de la charge suspendue et celle des oscillations de la poutre la relation :

$$\mu = \frac{\left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^2}{1 - \left(\frac{\nu'}{\nu}\right)^2} \tag{9}$$

Si ν est élevé, ν' faible, μ est très faible, c'est-à-dire que la charge suspendue oscille avec une amplitude notablement inférieure à celle de la poutre.

Les petites ondulations qui, sur la fig. 2, se superposent aux déformations principales, seront donc considérablement aplaties par suite de la suspension de la charge. Dans les ponts de faibles portées, l'influence de la suspension est donc très importante, par suite de leurs oscillations rapides. Dans les ponts de plus grandes portées, cette influence se fait moins sentir. La connaissance de ces influences est particulièrement importante, car précisément dans les ponts de faibles portées l'influence de l'inertie des charges est plus importante et elle se trouve considérablement réduite grâce à la suspension.

2. Influence des forces d'inertie de la charge roulante.

Si l'ont veut considérer les poutres comme non dénuées de poids, il n'est pas possible d'arriver à une solution rigoureuse des questions qui interviennent. La charge P qui roule sur la poutre avec sa masse $\frac{P}{g}$ exerce, par suite de l'incurvation du chemin de roulement, vers le bas, une pression :

$$P' = P\left(1 - \frac{\mu}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right) \tag{10}$$

expression dans laqnelle μ désigne le coefficient de suspension précédemment déterminé (équation 9). L'influence de cette force est double. Elle agit aussi bien sur les oscillations forcées déterminées plus haut que sur les oscillations libres qui les accompagnent. On a trouvé, grâce à un calcul approché plus poussé, que l'amplification qui en résulte, pour les oscillations forcées considérées dans le paragraphe 1, est dans le rapport de [10] :

$$1 \text{ à } 1 + \frac{8\,M}{p\,l^2}\,\alpha^2 \quad \text{avec} \quad \alpha^2 = \frac{c^2 l^2 p}{\pi^2 E J g} \tag{11}$$

M désignant le moment qui correspond à la disposition des charges, $p\,l$ le poids de la charpente et E J la rigidité du pont.

Le tableau 2 qui suit donne le coefficient d'amplification en % de l'influence statique pour le type de pont ayant servi de base à l'établissement du tableau 1.

Tableau 2.

Portée l en mètres :								
4	6	10	15	20	25	50	100	150
Coefficient d'amplification de l'influence statique, en % :								
12,3	8,3	4,9	3,3	2,4	1,9	0,91	0,38	0,23

L'influence des efforts centrifuges verticaux sur les oscillations libres n'est importante que pour les plus faibles portées. Le tableau 3 suivant donne numériquement la valeur de l'amplification de l'influence statique, résultant de ces efforts centrifuges, pour le type de ponts déjà considéré.

Tableau 3.

Portées en mètres :								
4	6	10	15	20	25	50	100	150
Coefficient d'amplification de l'influence statique, en % :								
19,2	11,3	5,3	3,3	2,3	1,7	1,0	0,62	0,27

3. Influences dynamiques exercées par les masses d'équilibrage des roues des locomotives.

Les contrepoids des roues des locomotives réagissent sur le pont suivant la loi :

$$P \sin 2\pi n t$$

Si la valeur de n devient voisine d'une fréquence propre d'oscillation, les phénomènes de résonance entrent en jeu. Dans les locomotives couramment employées pour les trains rapides, on a :

$$c = 30 \text{ m./sec.} \qquad \text{et} \qquad n = 5 \text{ environ.}$$

Dans les ponts à poutres rectilignes ayant une portée de 50 mètres environ, la fréquence de l'oscillation propre est également égale à 5. On risquerait donc, dans les ponts ayant une portée voisine de 50 mètres, de voir se produire des phénomènes de résonance importants. On a toutefois constaté expérimentalement que ce danger était considérablement réduit par suite du décalage de phase qui existe entre les différentes roues d'une même locomotive et par suite de l'amortissement du pont. Il semble donc utile au premier chef de déterminer, par des observations effectuées sur des ponts, les valeurs numériques de ces coefficients d'amortissement, puisque le problème des oscillations forcées amorties peut être considéré comme résolu du point de vue théorique. La détermination de ces coefficients d'amortissement permettrait également d'étudier de plus près une autre question : celle des phénomènes de résonance résultant des oscillations forcées qui sont provoquées par les chocs sur les joints des rails, chocs qui se produisent à intervalles réguliers.

On pourrait ainsi traiter, dans leurs grandes lignes, les principaux problèmes de la dynamique du pont qui rentrent dans le cadre d'un traité théorique. L'étude mathématique de ces questions devrait toutefois partir implici-

tement de cette hypothèse que les charges sont transmises aux poutres principales par l'intermédiaire des longerons et des poutres transversales rigides. L'influence de l'élasticité du tablier de la voie se fait donc sentir comme si une supension intervenait. Il faudrait donc ensuite déterminer complètement, sur des bases théoriques, l'influence qu'exerce le tablier élastique du pont sur les phénomènes d'oscillation, puis déterminer corrélativement l'influence de l'appui élastique que constituent les longerons et les poutres transversales sur ces oscillations.

Zusammenfassung.

Es werden die Methoden zur Berechnung der Eigenschwingungen und der durch periodisch veränderliche Lasten hervorgerufenen erzwungenen Schwingungen dargelegt. Diese Verfahren können bei Fachwerken, bei biegungssteifen Trägern und bei Rahmenkonstruktionen Anwendung finden. Verwendung der vorgeführten Theorien in der Dynamik der Brücken und zwar auf folgende Probleme : 1) Erzwungene Schwingungen der Brücken unter dem Einfluss rasch bewegter Lasten, 2) Einfluss der durch die Durchbiegung der Brücken geweckten lotrechten Fliehkräfte der bewegten Lasten. Der Einfluss der Abfederung der Lasten auf die dynamische Wirkung derselben kann berücksichtigt werden. Als Beispiel werden die Vermehrungszahlen der statischen Spannungen durch die dynamische Wirkung der bewegten Lasten bei schweren Eisenbahnbalkenbrücken vorgeführt.

Résumé.

L'auteur expose les méthodes de détermination des oscillations propres et des oscillations forcées qui sont provoquées par des charges périodiquement variables. Ces méthodes peuvent être employées pour les treillis, les poutres rigides et les charpentes constituées par des cadres.

Il expose ensuite les principes de l'application des théories précédentes à la dynamique du pont, et en particulier aux problèmes suivants :

1. Oscillations forcées provoquées dans les ponts par l'action des charges rapides ;

2. Influence des efforts centrifuges verticaux, provoqués par le fléchissement des ponts sous l'action des charges roulantes.

On peut d'ailleurs tenir compte de l'influence qu'exerce la suspension des charges sur leur action dynamique.

A titre d'exemple, l'auteur montre quelles amplifications subissent les influences statiques par suite de l'action dynamique des charges roulantes, dans les ponts lourds de chemins de fer.

Summary.

The methods are shown for calculating the frequencies of natural vibrations and of forced vibrations caused by periodically fluctuating loads. These methods may be adopted in trusses, in rigid lattice girders and in framed structures. Application of the exposed theories to the dynamics of bridges in the following problems : 1) Forced vibrations in bridges caused by loads moving at a high speed; 2) Influence of the vertical centrifugal forces of the rolling loads, caused by bending of the bridges. The effect of the suspension of the loads on their dynamic action can be taken into consideration. Examples are given of the addition to the static stresses caused by the dynamic action of rolling loads in heavy railway girder bridges.

Leere Seite
Blank page
Page vide

V 4

STIFFNESS OF SKY-SCRAPERS

LA RIGIDITÉ DES GRATTE-CIEL

DIE STEIFIGKEIT DER WOLKENKRATZER

David Cushman COYLE,
Consulting Engineer, New York.

Psychological perception of sway of sky-scrapers and towers appears to be a function of acceleration as well as maximum deflexion, since stiff towers seem to be more comfortable than flexible ones, though acceleration may be the same.

The purpose of this paper is to obtain discussion of the problem of evaluating a proposed series of measurements of existing towers. A separate investigation, not described in this paper, will be made by psychological tests, to determine the function of amplitude and frequency which defines the equivalent perceptible sway. The study of this question should lead to a formula by which towers of differing amplitudes and frequencies can be located in a statistical diagram, in order of their equivalent sensation of sway. The purpose of this diagram would be to serve as a guide to the judgement in choosing a nominal static deflection for use in SPURR's method of bracing design, something which now must be done by pure guess.

In view of the purpose, for which the results are to be used, it is considered desirable to carry out these studies even though the results cannot have any high degree of accuracy. The towers to be investigated are not braced in accordance with any consistent theory ; and there is no way of estimating the true stiffness of the joints or of the walls. Columns are scattered in irregular lines, beams are eccentric, the fixity of joints and the effect of fireproofing defy mathematical analysis. It is necessary to guess at the probable elastic curve.

The following pages show how a tower of irregular shape and weight can be approximately evaluated with regard to stiffness. The data are the weights and dimensions, the time of vibration readings at various levels to assure that the tower vibrates without nodes. A standard wind is assumed. An approximate elastic curve is located so as to be equivalent to the shape which the building would assume if each square foot of wind acted only on its own element of mass. The top ordinate of the equivalent elastic curve is then taken as the measure of flexibility.

Section I shows a derivation of an elastic curve which can be used as approximate for any building. *Section II* gives the application of the common theory of a vibrating cantilever to an ideal building. *Section III* is an example of a typical building, showing how the deviations from the ideal are adjusted.

Section I. Assume a building designed as follows[1]: a) the deflection of all bents due to change in length of columns, Dc, is the same. b) The deflection due to distortion of panels, Dw, is the same in every panel from top to bottom. c) The stresses in web members due to D_w cause vertical loads in columns such that the floor remains plane.

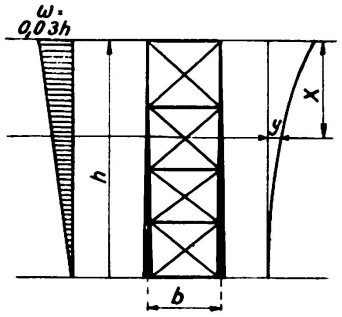


Fig. 1.

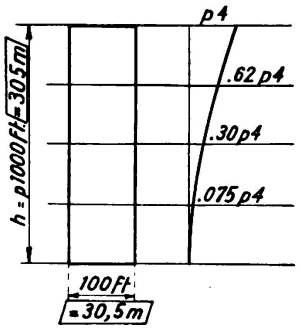


Fig. 2.

1. Curve due to Dc. — In Fig. 1 is shown a tower of uniform floor area, with columns varying in section from 0 at the top to a maximum at the bottom. The base b is that of an equivalent tower with all the coloumns concentrated into two lines.

J_0 is J of column areas at the base $\qquad$ h is the height

J_x is J at level x, $J_x = \frac{x}{h} J_0$

Mx is Moment of wind load above level x, $Mx = \frac{wx^2}{2} - \frac{wx^3}{6h}$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_x}{J_x E} = \frac{\frac{wx^2}{2} - \frac{wx^3}{6h}}{\frac{x}{h} J_0 E} = \frac{wh}{2J_0E} x - \frac{w}{6J_0E} x^2 ; \frac{dy}{dx} = \frac{wh}{4J_0E} x^2 - \frac{w}{18J_0E} x^3 + C$$

$$\text{If } x = h, \quad \frac{dy}{dx} = o, \quad so: C = -\frac{7wh^3}{36J_0E} ; \quad \frac{dy}{dx} = \frac{whx^2}{4J_0E} - \frac{wx^3}{18J_0E} - \frac{7wh^3}{36J_0E}$$

$$y = \frac{w.h}{12J_0E} x^3 - \frac{w}{72J_0E} x^4 - \frac{7wh^3}{36J_0E} x + C ; \text{If } x = h, y = o, so: C = + \frac{wh^4}{8J_0E}$$

$$y = \frac{w}{4J_0E} \left(\frac{hx^3}{3} - \frac{x^4}{18} - \frac{7h^3x}{9} + \frac{h^4}{2} \right).$$

Wind pressure admitted: $w = \frac{3h}{10^2}$ lbs./sq.ft.

$$\text{If } x = o: \quad y = D_c = \frac{3h^5}{800 J_0 E}$$

---

1. Modified form of Spurr's Theory (Wind bracing by H. V. Spurr, Mc Graw Hill Co., New York, 1930).

J_o is determined by the fact that in a New York building with the usual loads and construction, if h is 1000 ft., actual base 100 ft., then D_c is 1 ft.

$$D_c = 1 = \frac{3 \times 10^{15}}{800\, J_o E}, \text{ and } J_o = \frac{3 \times 10^{13}}{8\, E} \text{ for } h = 1000.$$

Therefore, for any height, and base 100 ft.:

$$J_o = \frac{h}{1000} \cdot \frac{3.10^{13}}{8E} = \frac{3h.10^{10}}{8E}$$

$$y = \frac{2}{10^{12}}\left(\frac{hx^3}{3} - \frac{x^4}{18} - \frac{7h^3x}{9} + \frac{h^4}{2}\right).$$

This formula holds for buildings 100 ft. long, of any height and weight of bracing, provided the bracing is designed to make floors stay plane, and provided the columns are designed for the usual New York office building loads. Let h be any fraction p of 1000 ft.: $h = p \times 10^3$.

Then the shape of the curve will be as follows:

$$y = \frac{px^3}{15.10^8} - \frac{x^4}{9.10^{12}} - \frac{p^3x}{640} + p^4$$

When $x = o$	$x = \frac{p.10^3}{4}$	$x = \frac{p\,10^3}{2}$	$x = \frac{3p\,10^3}{4}$	$x = p.10^3$
so $y = D_c = p^4$	$y = 0.62p^4$	$y = 0.30p^4$	$y = 0.075p^4$	$y = o.$

Fig. 2 shows the shape of the curve, for any height of building. It will be noted that the shape is the same for any height and wathever value of D_c may occur.

2. Curve due to D_w. — The total deflection allowed is assumed to be 0.002h, and the allowable web distortion D_w is 0.002h — D_c. Fig. 3 shows deflections for various heights of building, 100 ft. base. For example at 800 ft., p is 0.8 D_c is p^4 or 0.41 ft., and D total is 1,6 ft. So the allowed D^w is the difference = 1.19 ft.

3. Total curvature of any standard building of height h, base 100. Fig. 4 illustrates the procedure for a building 800 ft. high. D_w as in 2 is 1.19 and the deflection curve due to web distortion is a sloping straight line. For example, at midheight yw is 0. 595 ft. From Fig. 2, at half height, y_o is 0.3 D_c or 0.123 ft. Therefore the total y at midheight is y_w plus y_c or 0.718 ft. As D is 1.6, the middle ordinate 0.718 is 0.45 D.

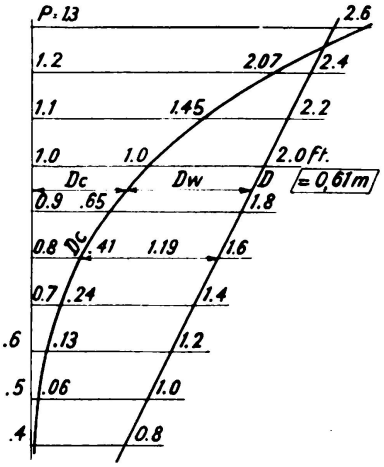


Fig. 3.

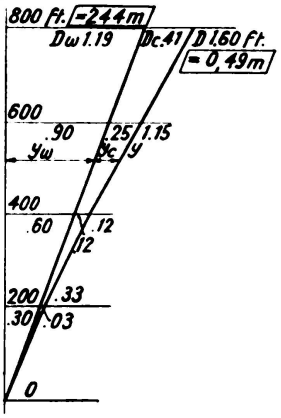


Fig. 4.

In the discussion to follow, it is assumed that if any building is 8 times as

high as it is long, and has any particular D at the top as determined by its actual stiffness, then its total elastic curve will be approximately similar to the curve of Fig. 4, that is, its middle ordinate will be about 0.45 D.

By a similar procedure, if the slenderness ratio is 5, the middle ordinate will be 0.49 D ; if it is 10, the middle ordinate will be 0.40 D.

It will be noted that if the building were to deflect entirely as a cantilever, the middle ordinate would be, by Fig. 2 about 0.3D. If the columns were infinitely stiff vertically, and all the deflection were due to the web system, the middle ordinate would be 0.5D. Fig. 5 shows ratios of mid ordinate for various ratios of slenderness. As will be seen these ratios show an increasing departure from the sloping straight line as the buildings become more slender, and cannot be very far from correct for any given building.

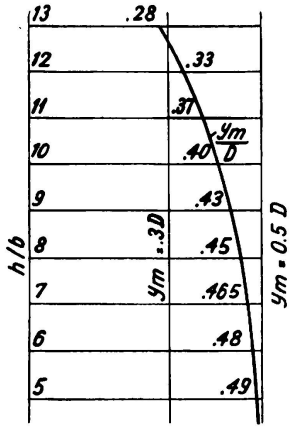


Fig. 5.

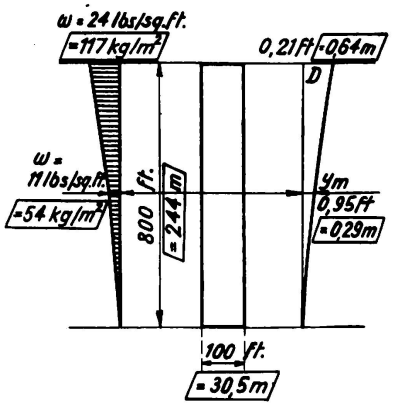


Fig. 6.

Section II. Fig. 6 shows an ideal building 100 ft. square and 800 ft. high, with a wind load of 0.03 h, or 24 lbs., at the top, and a wind pressure diagram similar to the elastic curve, with a wind load per square foot at mid height of 0.45 × 24, or 11 lbs.

The building vibrates 15 times per minute, T is 2 sec. The weight of one vertical foot of the building is 150000 lbs., and the weight acted on by 1 square foot of wind is 1500 lbs.

For harmonic vibration with period T the maximum acceleration with amplitude q is $\frac{\pi^2}{T^2} \cdot q$, and the force of the spring for a static deflection a is $\frac{w}{g} \frac{\pi^2}{T^2} \cdot r$. Therefore the static deflection for 1 lb. pressure is $\frac{g\ T^2}{w\ \pi^2}$

In fig. 6, the static deflection at the top is

$$\frac{24.gT^2}{w.\pi^2} = \frac{24.32.2^2}{1500.\pi^2} = 0.21 \text{ ft.}$$

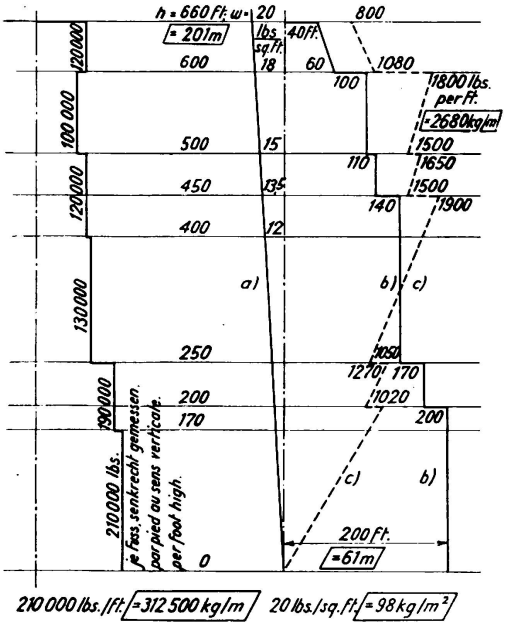
The static deflection at mid height is

$$\frac{11.gT^2}{w\pi^2} = 0.095 \text{ ft., or } 0.45 \times 0.21 \text{ ft.}$$

It will be noted that for each element of the tower, the vibration amplitude, wind load, acceleration, and static deflection are all proportional to the ordinate of the elastic curve. In a actual building the deflection can be approximated by evaluating the differences from the ideal.

Section III. Deflection of an actual building. The height is 8 times the base,

and the value of T is 4 sec. Fig. 7 is a diagram of the weight per foot high, obtained from the column loads including estimated live load. Fig 8 shows : a) the assumed wind pressure, 0.03 h lbs. per square foot. b) the width of building across the wind. c) is the product of a) and b), giving the total wind force on a horizontal slice 1 foot high.



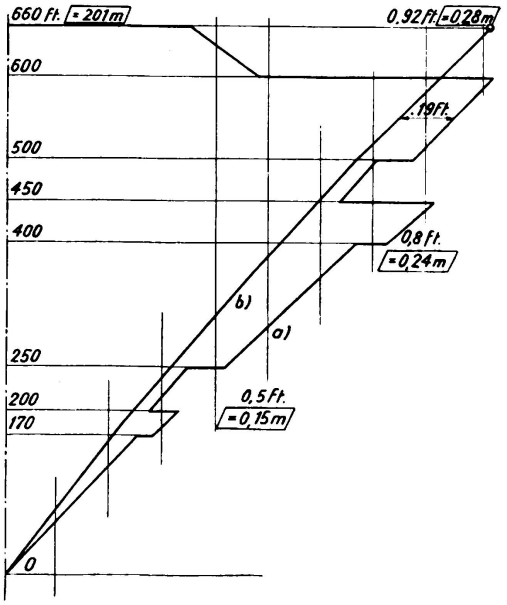


Fig. 9 shows the nominal deflection a) which is the wind force (fig. 8 c), divided by the weight (fig. 7), and multiplied by $\frac{gT^2}{\pi^2} = 53$.

Curve b) is an elastic curve, with middle ordinate 0.45D, located by trial so that it will be equivalent to a) by the following criterion : Consider, for example, the section between the 500 and 600 ft. levels. The average discrepancy between a) and b) is 0.19 ft., which multiplied by 100 000 and divided by 53 as above, corresponds to 360 lbs. per foot high, on Fig. 8 c. The overturning moment of this differential on the section, 100 ft. high, is 360 × 100 × 550, or 19 800 000 ft. lbs. If the summation of all these overtuning moments is 0 then the curves a) and b) may be said to be equivalent. On curve b) the top ordinate D is 0.92 ft. This indicates that with the assumed wind the top of this building will deflect about 0.92 ft. The amplitude of the harmonic vibration is, of course, much smaller than the static deflection.

This method gives the static deflection for any existing tower, but not a coefficient of stiffness for comparing two towers, unless they happen to have the same T. For practical purposes, in order to compare two towers, it will be necessary to find by experimental psychology what function of T and D will give approximately a mesure of the sensory intensity of motion. It is apparently not the acceleration.

TRADUCTION

par M. Gossieaux, Ing., Paris.

La sensation physique du balancement des gratte-ciel et des tours paraît être fonction de leur accélération, de même que de l'amplitude maximum de leur déformation, puisque les tours rigides paraissent plus confortables que celles qui possèdent une certaine flexibilité, quoique leur accélération puisse être la même.

La présente étude a pour but de discuter les problèmes que posent les diverses mesures qu'il conviendrait d'effectuer sur les tours actuellement existantes. On se propose d'ailleurs de faire des recherches physiologiques spéciales, dont il n'est pas question dans ce rapport, afin de déterminer comment on peut définir la perception physiologique du balancement en fonction de l'amplitude et de la fréquence des oscillations. L'étude de cette question devrait permettre d'établir une formule de classement des tours admettant différentes amplitudes et fréquences, d'après un diagramme d'observation expérimentale, et d'après l'importance de la sensation de balancement qu'elles provoquent. Ce diagramme servirait de base pour le choix de la déformation statique nominale à adopter dans la méthode de Spurr, pour le calcul des contreventements, détermination qui ne se fait actuellement que par pure intuition.

Étant donné l'emploi qui doit être fait des résultats de cette étude, il paraît intéressant de la poursuivre, même dans le cas où l'on ne pourrait pas parvenir à des résultats qui présentent un degré élevé de précision. Les tours qui devront faire l'objet des investigations n'ont, d'ailleurs, pas été contreventées suivant des principes précis et l'on ne dispose pas non plus de moyens d'évaluation de la rigidité effective des assemblages ou des parois murales. Dans la plupart des cas, les poteaux sont répartis d'une manière irrégulière, les poutres sont désaxées, la rigidité des assemblages, ainsi que les dispositions prises pour mettre la construction à l'épreuve du feu défient toute analyse rigoureuse. On en est réduit à deviner la courbe élastique probable.

Les lignes qui suivent ont pour objet de montrer comment on peut déterminer approximativement, sous le rapport de la rigidité, les éléments d'une tour admettant une certaine irrégularité dans la forme et la répartition des masses. On donne les fréquences et les amplitudes d'oscillation, à différents niveaux, qui permettent d'éviter la formation de nœuds d'oscillation dans la hauteur de la tour. On suppose un vent normal. On fixe une courbe élastique approximative correspondant à la forme qu'aurait la construction si le vent, dans chaque mètre carré, n'avait à agir que sur la masse correspondante. L'ordonnée au sommet de cette courbe élastique équivalente est alors prise comme mesure de la flexibilité.

Le chapitre I se rapporte à une forme de courbe élastique qui peut être adoptée, comme première approximation, pour une construction quelconque. Le chapitre II concerne l'application de la théorie courante de l'oscillation d'un système en cantilever à une construction théorique. Dans le chapitre III, on trouve l'exemple d'une construction pratique, montrant comment on peut s'écarter des notions théoriques.

Chapitre I.

Supposons une construction qui réponde aux conditions suivantes[1] :

a) le déplacement horizontal D*c* dans toutes les membrures, résultant d'une modification dans la hauteur des poteaux, est le même ;

b) la déformation qui résulte de la distorsion dans les panneaux, D*w*, est la même pour tous les panneaux, du haut en bas de l'édifice ;

c) les efforts mis en jeu dans les diagonales, par suite des déformations D*w* dans les panneaux, se traduisent, sur les poteaux, par des charges telles que les planchers restent plans.

1. Courbe correspondant à l'influence D*c*.

La figure 1 représente une tour dans laquelle les surfaces des planchers sont les mêmes, et dont les poteaux ont une section variant de O, au sommet, à une valeur maximum en pied. La dimension de base *b* correspond à une tour équivalente dans laquelle tous les poteaux seraient groupés en deux rangées.

On désigne par :

J_0 le moment d'inertie des sections des poteaux, à la base ;

J_x leur moment d'inertie à un niveau x ;

M_x le moment des efforts dus au vent, au-dessus du niveau x ;

On a :

$$M_x = \frac{w x^2}{2} - \frac{w x^3}{6h} \qquad J_x = \frac{x}{h} J_0$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_x}{J_x E} = \frac{\frac{w x^2}{2} - \frac{w x^3}{6h}}{\frac{x}{h} J_0 E} = \frac{w h}{2 J_0 E} x - \frac{w}{6 J_0 E} x^2$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{w h}{4 J_0 E} x^2 - \frac{w}{18 J_0 E} x^3 + C$$

$$\text{Si } x = h \quad \frac{dy}{dx} = 0, \text{ alors } C = -\frac{7 w h^3}{36 J_0 E}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{w h x^2}{4 J_0 E} - \frac{w x^3}{18 J_0 E} - \frac{7 w h^3}{36 J_0 E}$$

$$y = \frac{w h}{12 J_0 E} x^3 - \frac{w}{72 J_0 E} x^4 - \frac{7 w h^3}{36 J_0 E} x + C$$

$$\text{Si } x = h, \qquad y = 0, \qquad C = \frac{w h^4}{8 J_0 E}$$

$$y = \frac{w}{4 J_0 E}\left(\frac{h x^3}{3} - \frac{x^4}{18} - \frac{7 h^3 x}{9} + \frac{h^4}{2}\right); \qquad w = \frac{3h}{10^2} \text{ lbs./sq. ft.}$$

$$\text{Si } x = 0, \qquad y = D_c = \frac{3 h^5}{800 J_0 E}$$

---

1. Variante de la théorie de Spurr (Wind Bracing, par H.V. Spurr, chez McGraw Hill, New York, 1930).

J_0 est déterminé par cette considération, adoptée pour la construction des immeubles à New York, que si, dans les conditions effectives normales de construction et de charge, la hauteur de l'édifice est de 1.000 pieds (soit 305 mètres), si la base mesure 100 pieds (soit 30,50 mètres), on doit avoir

D_c = environ 1 pied (soit 0,30 mètre).

$$D_c = 1 = \frac{3 \times 10^{15}}{800 J_0 E} \quad \text{et} \quad J_0 = \frac{3 \times 10^{13}}{8E} \quad \text{si } h = 1000 \text{ ft.}$$

Par suite, pour un édifice ayant une dimension à la base de 100 pieds (soit 30,50 mètres), et pour des hauteurs diverses, on aura :

$$J_0 = \frac{h}{1000} \cdot \frac{3 \times 10^{13}}{8E} = \frac{3h.10^{10}}{8E}$$

$$y = \frac{2}{10^{12}} \left(\frac{h x^3}{3} - \frac{x^4}{18} - \frac{7 h^3 x}{9} + \frac{h^4}{2} \right).$$

Cette formule est applicable à des constructions ayant une longueur de 100 pieds, quels que soient le poids de l'ossature de contreventement et la hauteur, à condition que cette ossature soit calculée de telle sorte que les planchers restent plans, les poteaux devant être calculés pour correspondre aux charges courantes dans les immeubles à usages commerciaux, à New York.

Considérons h comme une fraction p de la hauteur de 1.000 pieds (soit 305 mètres); la courbe sera définie comme suit :

$$y = \frac{p x^3}{15.10^8} - \frac{x^4}{9.10^{12}} - \frac{p^3 x}{640} + p^4$$

si $x = 0$	$x = \frac{p 10^3}{4}$	$x = \frac{p.10^3}{2}$	$x = \frac{3p10^3}{4}$	$x = p10^3$
$y = D_c = p^4$	$y = 0{,}62p^4$	$y = 0{,}30p^4$	$y = 0{,}75p^4$	$y = 0.$

La figure 2 indique la forme de la courbe, pour une hauteur quelconque de l'édifice. On remarquera que la forme de cette courbe est la même quelle que soit la hauteur et quelle que soit la valeur de Dc qui intervienne.

2. Courbe correspondant à l'influence Dw.

La déformation totale admise est de : 0,002 h.

La déformation des panneaux Dw est donc :

$$0{,}002h - Dc.$$

La figure 3 indique les déformations pour différentes hauteurs de construction, avec une dimension de base de 100 pieds (soit 30,50 mètres). Par exemple, pour une hauteur de 800 pieds (soit 244 mètres), on a :

$p = 0{,}8$ $\quad Dc = p^4$ soit 0,125 mètre.

D total = 0,49 mètre.

Il en résulte, pour Dw admissible :

$$Dw = 0{,}49 - 0{,}125 = 0{,}365 \text{ mètre.}$$

3. Déformation totale d'une construction normale de hauteur h et de dimension de base de 100 pieds (30,5 mètres).

L'exemple de la figure 4 se rapporte à un édifice de 800 pieds de haut (soit 244 mètres). D w est égal à 0,365 mètre comme dans le paragraphe précédent et la courbe de déformation des panneaux est une ligne droite inclinée.

On a par exemple, à mi-hauteur :

$$y_w = 0,182 \text{ mètre.}$$

Sur la figure 2, à mi-hauteur également, on a :

$$y_c = 0,3\,D_c = 0,037 \text{ mètre.}$$

Par suite, la valeur totale de y à mi-hauteur est :

$$y_m = y_w + y_c = 0,22 \text{ mètre.}$$

Étant donné que D = 0,49 mètre, on en déduit pour l'ordonnée moyenne :

$$y_m = 0,45\,D.$$

Pour interpréter ce résultat, on admet que si un édifice a une hauteur égale à huit fois sa largeur, et si sa rigidité effective a pour conséquence une valeur déterminée de déformation telle que D, la courbe élastique résultante aura la forme de la courbe de la figure 4, et l'on aura approximativement :

$$y_m = 0,45\,D.$$

D'une manière analogue, si la finesse, exprimée par le rapport entre la hauteur et la base, est de 5, on trouvera que l'ordonnée moyenne sera :

$$y_m = 0,49\,D.$$

Si ce rapport est de 10, on trouvera pour l'ordonnée moyenne :

$$y_m = 0,40\,D.$$

On remarquera que si la construction devait se comporter, dans ses déformations, entièrement comme un système en cantilever, l'ordonnée moyenne serait :

$$y_m = 0,30\,D \text{ environ.}$$

Si les poteaux étaient infiniment rigides, et si toutes les déformations intéressaient les poutres, on aurait :

$$y_m = 0,50\,d.$$

La figure 5 donne les valeurs des ordonnées moyennes pour différents rapports entre la hauteur et la base de l'édifice. Ainsi qu'on le remarque, ces rapports s'éloignent de plus en plus de la ligne droite, au fur et à mesure de l'accroissement de la finesse de l'édifice et ils ne doivent pas s'écarter notablement des valeurs exactes effectives pour une construction quelconque.

Chapitre II.

La figure 6 représente une tour théorique, d'une section carrée de 100 pieds à la base (soit 30,50 mètres), et d'une hauteur de 800 pieds (soit 244 mètres).

On adopte $0{,}03\,h$ pour la charge due au vent, soit, au sommet, 117 kg. par mètre carré. La distribution des efforts dus au vent est analogue à la forme de la courbe élastique ; on a donc, à mi-hauteur, une charge due au vent de :

$$117 \times 0{,}45 = 54 \text{ kg. par mètre carré.}$$

L'édifice exécute 15 vibrations par minute, la période T est de 2 secondes. Le poids de la construction, par mètre carré de base, est de 730 tonnes et le poids de construction sur lequel s'exerce le vent est, par mètre carré, de 7,3 tonnes.

Si l'on considère une oscillation de période T, l'accélération maximum qui correspond à une amplitude q est :

$$\frac{\pi^2}{T^2} \cdot q$$

L'énergie potentielle accumulée dans un ressort pour une déviation statique r est :

$$\frac{w}{g} \cdot \frac{\pi^2}{T^2} \cdot r$$

Par suite, la déformation statique correspondant à un effort égal à l'unité est :

$$\frac{g\,T^2}{w\,\pi^2}$$

Dans le cas de la figure 6, la déformation statique au sommet est, en appliquant les formules précédentes, de 0,064 mètre et la déformation statique à mi-hauteur de :

$$0{,}029 \text{ mètre (soit } 0{,}064 \times 0{,}45).$$

On remarquera que pour chaque tranche de la construction, l'amplitude des oscillations, la charge due au vent, l'accélération et la déformation statique sont proportionnelles à l'ordonnée de la courbe élastique. Lorsqu'il s'agit d'une construction effective, on peut déterminer approximativement la déformation en évaluant les écarts par rapport aux valeurs théoriques.

Chapitre III. — Déviations dans une construction effective.

La hauteur est égale à 8 fois la dimension de base et la valeur de T est de 4 secondes. La figure 7 donne la charge en fonction de la hauteur, comprenant le poids propre et la charge utile estimée. La figure 8 donne :

a) la charge admise pour le vent ;

b) la largeur de construction offerte à l'action du vent ;

c) le produit des facteurs *a* et *b*, c'est-à-dire l'effort dû au vent sur une tranche horizontale de l'édifice.

La figure 9 donne la déviation nominale, obtenue en divisant l'effort dû au vent (figure 8 *c*) par le poids (figure 7) et en multipliant par

$$\frac{g\,T^2}{\pi^2} = 16.$$

La courbe *b* est une courbe élastique, avec ordonnée moyenne égale à 0,45 D, déterminée par l'expérience, et qui doit correspondre à *a*, ainsi qu'il est exposé ci-après : considérons, par exemple, la tranche située entre les niveaux de

500 et 600 pieds (soit 152 et 183 mètres, c'est-à-dire un écart de 100 pieds. ou 30,50 mètres). L'écart entre *a* et *b* est de 0,058 mètre, ce qui, multiplié par 100.000 et divisé par 16, comme précédemment, correspond à 675 kg. par mètre, ainsi que l'indique la figure 8 *c*. Le moment de renversement de cet élément de section de 100 pieds de hauteur (soit 30,50 mètres) est de 2.740.000 kilogrammètres. Si la somme de tous ces moments de renversement est nulle, on peut dire que les courbes *a* et *b* sont équivalentes. Sur la courbe *b*, l'ordonnée au sommet est de 0,27 m. Ceci montre qu'avec la force supposée pour le vent, le sommet de l'édifice subira une déviation d'environ 0,27 mètre. L'amplitude de l'oscillation est naturellement beaucoup plus faible que la valeur de cette déviation statique.

Cette méthode permet de déterminer la déviation d'ordre statique pour toute construction en forme de tour déjà existante mais ne donne pas un coefficient de rigidité permettant de faire la comparaison entre deux tours, à moins qu'elles ne possèdent la même période. En pratique, pour comparer deux tours, il faudra déterminer, par des essais physiologiques, quelle fonction de T et de D peut donner une mesure approximative de l'intensité avec laquelle le mouvement est perçu. Il ne semble pas que ce soit uniquement l'accélération.

Summary.

Skyscrapers and other tower-like buildings are set perceptibly in vibration by wind pressure. The author endeavours to calculate these vibrations by investigating the elastic properties of the towers, and an approximate method is given for determining their stiffness. The method developed is also applicable to buildings of irregular shape and with irregular distribution of weight.

Résumé.

Les gratte-ciel et autres édifices dont la construction affecte la forme d'une tour, sont soumis, par suite de l'influence de la pression du vent, à des oscillations dont l'importance n'est pas négligeable. L'auteur traite ces oscillations en cherchant à déterminer les caractéristiques élastiques propres des tours et il donne une méthode approximative pour la détermination de leur rigidité. La méthode développée peut être également appliquée à des constructions de formes non régulières et dans lesquelles la répartition des masses est irrégulière.

Zusammenfassung.

Wolkenkratzer und andere turmähnliche Gebäude werden unter dem Einfluss des Winddruckes in fühlbare Schwingungen versetzt. Der Verfasser trachtet diese Schwingungen durch Untersuchung der elastischen Eigenschaften der Türme zu berechnen und gibt ein Näherungsverfahren zur Bestimmung ihrer Steifigkeit. Die entwickelte Methode ist auch bei unregelmässiger Gebäudeform und unregelmässiger Gewichtsverteilung anwendbar.

Leere Seite
Blank page
Page vide