

Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens

Technisches Fachblatt des Vereins Mitteleuropäischer Eisenbahnverwaltungen

Herausgegeben von Vizepräsident Ernst Harprecht, Berlin, unter Mitwirkung von Dr. Ing. A. E. Bloss, Dresden

96. Jahrgang

15. Juni 1941

Heft 12

Verfahren zur Beurteilung der Laufeigenschaften von Eisenbahnwagen.

Von Oberreichsbahnrat W. Helberg und Reichsbahnrat Sperling, Berlin.

Fahrende Eisenbahnwagen führen bekanntlich aus den verschiedensten Gründen schwingende Bewegungen aus, die mit größerer oder kleinerer Annäherung sinusförmig verlaufen. Auf die Gründe und Beeinflussungsmöglichkeiten dieser Schwingungen soll in diesem Aufsätze nicht eingegangen werden. Es sei nur allgemein darauf hingewiesen, daß bei sonst gleichen Verhältnissen (Verschleißzustand zwischen Rad und Schiene, Bauart und Unterhaltungszustand des Fahrzeuges und des Oberbaues) die Heftigkeit der Schwingungen, abgesehen von wenigen Ausnahmen, mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit wächst. Bei Überschreitung einer von Fall zu Fall verschiedenen Grenzgeschwindigkeit werden die störenden Bewegungen daher von den Fahrgästen als unangenehm empfunden und können bei noch weiterer Steigerung schließlich auch für die Ladegüter sowie für den Wagen und seine Bauteile von schädlicher Wirkung sein.

Um für den Wagenlauf ein einheitliches Beurteilungsverfahren aufzustellen und festzulegen, wurden im Reichsbahn-Versuchsamt für Wagen in Berlin-Grünwald eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen erstrebten für Personen- und Güterwagen eine eindeutige und im Einzelfalle von der gefühlsmäßigen Beurteilung unabhängige Wertung der Laufgüte. Vor allem mußten zu diesem Zwecke feste Beziehungen zwischen den meßtechnisch erfaßbaren Größen der Wagenlaufmechanik (Größe und Schwingungszahl der Wagenausschläge) und dem nur gefühlsmäßig abschätzbaren Empfinden des Menschen ermittelt oder gewählt werden.

Bei der Untersuchung der Empfindlichkeit von Menschen gegen Fahrerschütterungen im Eisenbahnbetriebe können mit der Wirklichkeit völlig übereinstimmende Bedingungen nur dann geschaffen werden, wenn man die zu untersuchenden Personen tatsächlich den Erschütterungen fahrender Eisenbahnwagen aussetzt. Ganz abgesehen von den hohen Kosten eines solchen Großversuches hätte jedoch außerdem ein derartiges Verfahren keine Aussicht auf brauchbare Ergebnisse geboten, da es im Fahrbetriebe unmöglich gewesen wäre, einen bestimmten Erschütterungszustand über eine ausreichend lange Zeit unverändert durchzuhalten. Die zur einwandfreien Erfassung und Kennzeichnung eines Bewegungszustandes unbedingt notwendige Wirkungszeit hätte also nicht zur Verfügung gestanden.

Man mußte sich deshalb zur Anwendung stark vereinfachender Bedingungen entschließen und wählte trotz aller entgegenstehenden Bedenken das Verfahren der Schütteltischuntersuchungen. Hierbei war von vornherein damit zu rechnen, daß die zahlenmäßigen Ergebnisse der Schütteltischversuche wahrscheinlich nur mit gewissen Korrekturen auf die Wirklichkeit übertragen werden können. Es bestand jedoch die Aussicht, auf diesem Wege wenigstens grundsätzliche Erkenntnisse über den gefühlsmäßigen Verlauf der Erschütterungsempfindlichkeit des Menschen zu finden. Diese Hoffnung ist auch nicht getäuscht worden.

Die nachstehenden Erörterungen sind in drei Abschnitte gegliedert:

1. Schütteltischversuche und ihre Auswertung,
2. Entwicklung eines neuen Schwingungsmessers zur Beurteilung der Laufeigenschaften,
3. Praktische Anwendung.

1. Schütteltischversuche und ihre Auswertung.

Die Erschütterungsempfindlichkeit wurde an Menschen untersucht, die auf einer mit einem Schütteltisch fest verbundenen Bank saßen. Auf liegende oder stehende Menschen wurden die Versuche nicht ausgedehnt. Der Schütteltisch wurde entweder waagrecht oder senkrecht bewegt. In beiden Fällen erstreckten sich die Untersuchungen auf mit großer Annäherung sinusförmige Schwingungen mit Frequenzen von 1 bis 12 Hz und Schwingungsweiten von 0,01 bis 2,5 cm. Überlagerte senkrechte und waagerechte Schwingungen wurden nicht eingestellt. Die geradeaus blickende, auf der Bank sitzende Versuchsperson wurde bei den waagerechten Schwingungen senkrecht zur Blickrichtung erschüttert. Die Bewegungen entsprachen daher annähernd den Verhältnissen in einem Eisenbahnwagen mit Querbänken.

Im allgemeinen saßen die untersuchten Personen auf einer Holzbank, ähnlich dem Sitz der dritten Wagenklasse. Außerdem wurde noch eine zusätzliche Versuchsreihe nur mit senkrechten Schwingungen durchgeführt, bei der die Versuchsperson auf einem Polstersessel entsprechend dem Sitz der zweiten Wagenklasse saß. In diesem Falle wurden jedoch nur Schwingungen unter 1 mm Schwingungsweite und über 7 Hz herangezogen, da bei größeren Schwingungsweiten und niedrigeren Frequenzen kein merklicher Einfluß der Polsterung festgestellt werden konnte. Wie nicht anders zu erwarten, war die Empfindung der Versuchsperson ausschließlich von den Schwingungen abhängig, denen sie selbst unterliegt. In dem untersuchten Bereich ergab sich durch die Polsterung im Mittel eine Verminderung der Schwingungsweite der Versuchsperson um etwa 30 bis 40 v. H. gegenüber der Schwingungsweite des Schütteltisches. Bei der Ermittlung der Wagenlaufeigenschaften werden selbstverständlich die unverminderten Erschütterungen des Fahrzeuges zugrunde gelegt und der Einfluß der Polsterung lediglich als erstrebenswerte zusätzliche Erhöhung der Reisebequemlichkeit betrachtet.

Der Schütteltisch besteht im wesentlichen aus einer federnd gelagerten biegungssteifen Plattform, die mit Federkraftantrieb von einem verstellbaren Exzenter bewegt wird. Die Bewegungen des Schütteltisches und die Bewegungen der Bank wurden bei jeder Versuchsreihe mit Tastschwingungsmessern überprüft. So war die Gewähr gegeben, daß die Versuchsperson tatsächlich der vom Schwingwegschreiber aufgenommenen Erschütterung unterworfen war. Bei den Versuchen mit Polstersesseln wurde außerdem die Bewegung der Versuchsperson selbst mit einem Tastschwingungsmesser aufgenommen.

Zur Kennzeichnung der Empfindlichkeit wurde eine Erschütterungsskala mit folgenden Empfindungswerten E aufgestellt:

E

- 1,0 gerade spürbar,
- 2,0 gut spürbar,
- 2,5 stärker spürbar, jedoch nicht unangenehm, erträglich,
- 3,0 stark spürbar, unruhig, noch erträglich,
- 3,25 stark unruhig, kaum erträglich,
- 3,5 außerordentlich unruhig, unangenehm, lästig, bei längerer Dauer nicht erträglich,
- 4,0 außerordentlich unangenehm, unerträglich, bei längerer Dauer schädlich.

Schlechtere Werte wurden nicht mehr eingestellt, da sie bei Schienenfahrzeugen für Personenbeförderung nicht mehr in Frage kommen.

Nach einer Erschütterungsdauer von 2 bis 10 Min. teilte die Versuchsperson mit, in welches Gebiet der Erschütterungsskala ihre Empfindungen einzureihen seien.

Zu den Untersuchungen wurden 25 Bedienstete des Reichsbahn-Versuchsamts für Wagen herangezogen, und zwar hauptsächlich nur solche Personen, die auf dem Gebiete des Wagenlaufes ein einigermaßen geschultes Beurteilungsvermögen besaßen. Die Empfindungsangaben von Personen ohne jegliche Erfahrung auf dem Gebiete des Wagenlaufes konnten meistens nicht ausgewertet werden, da die abgegebenen Werturteile dann so stark streuten, daß selbst für die gleiche Person keinerlei gesetzmäßige Zusammenhänge abgelesen werden konnten. Nicht selten wurde von unerfahrenen Menschen der gleiche Erschütterungszustand an einem Tage mit dem Empfindungswert 2,0 und an einem anderen Tage mit 4,0 bezeichnet.

Wie nicht anders zu erwarten war, streuten auch die ausgewerteten Empfindungsangaben noch in größerem Umfange. Die Versuchsergebnisse wurden deshalb nicht durch einfache Mittelwertbildung, sondern in der bei ähnlichen Versuchen üblichen Weise unter Berücksichtigung ihrer Häufigkeit ausgewertet. Es waren z. B. bei der Versuchsreihe 25 (waagerechte Schwingungen mit der Frequenz $f = 1,8$ Hz, Schwingungsweite = Ausschlag aus der Mittellage $a = 0,38$ cm, Beschleunigung $b = 48$ cm/sec²) folgende Empfindungswerte angegeben:

- 1 Wert mit E = 2,0,
- 3 Werte mit E = 2,5,
- 11 Werte mit E = 3,0,
- 4 Werte mit E = 3,25,
- 2 Werte mit E = 3,5,
- 3 Werte mit E = 4,0.

Unter Beachtung der Häufigkeit wurde in diesem Falle daher das Urteil E = 3,0 gegeben.

Auf die geschilderte Weise wurden etwa 1800 einzelne Ergebnisse zu 226 mittleren Empfindungsurteilen zusammengefaßt, die lediglich von der Schwingungsweite a und der Frequenz f abhängig sind.

In Bild 1 und 3 sind die gefundenen mittleren Empfindungsurteile getrennt für waagerechte und senkrechte Bewegungen in Achsenkreuze eingetragen, deren Ordinaten den Maßstab $\log f$ und deren Abszissen den Maßstab $\log a$ besitzen. Bei dieser Darstellungsweise können die Punkte gleicher Empfindungsstärke mit genügender Genauigkeit durch Gerade verbunden werden, deren Parameter die Empfindungsstärke angibt.

Man erkennt, daß diese Verbindungslinien bei den waagerechten Schwingungen (Bild 1) parallel verlaufen und den Richtungsfaktor $-\frac{3}{5}$ besitzen. Es handelt sich also um Potenzkurven der allgemeinen Formel:

$$a \cdot f^{\frac{5}{3}} = C.$$

Für $f = 1$ wird $a = C$. Man kann daher dem Bild 1 ohne weiteres entnehmen, daß sich bei den einzelnen Empfindungswerten folgende Größen für C ergeben:

E	C
2	0,233
3	0,900
3,25	1,17
3,5	1,49
4,0	2,34

Bei Einzeichnung dieser Werte in ein Achsenkreuz, dessen beide Achsen logarithmisch geteilt sind (Bild 2), erkennt man, daß die Punkte $\log E$ über $\log C$ auf einer Geraden mit dem

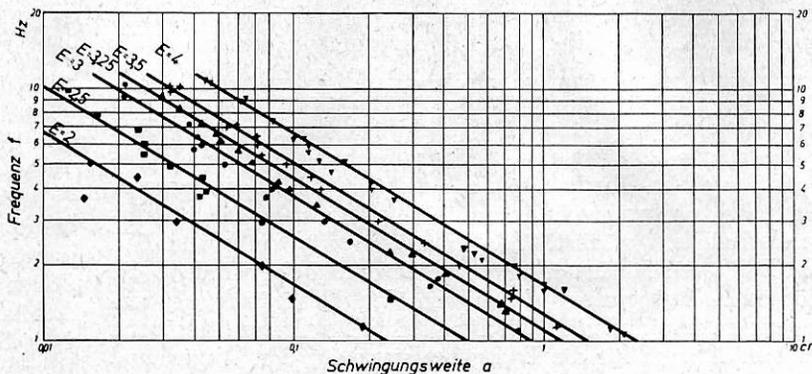


Bild 1. Abhängigkeit der Empfindungswerte E von der Schwingungsweite a und der Frequenz f bei waagerechten Schwingungen.

Richtungsfaktor $\frac{3}{10}$ angeordnet sind. Auch hier liegt also ein Potenzgesetz vor. Die zahlenmäßige Nachrechnung zeigt, daß folgende Beziehung gilt:

$$C = \left(\frac{E}{3,1}\right)^{\frac{10}{3}}.$$

Durch Einsetzung dieses Wertes für C in die oben angeführte Formel der Potenzkurven ergibt sich:

$$a \cdot f^{\frac{5}{3}} = \left(\frac{E}{3,1}\right)^{\frac{10}{3}}.$$

Nach einigen Umformungen kann geschrieben werden:

$$E = 3,1 \sqrt[10]{a^3 f^5}.$$

Diese Formel gilt also für die in Bild 1 (waagerechte Schwingungen) eingetragenen Linienzüge.

Es ist häufig üblich, die Ergebnisse physiologischer Untersuchungen in die Form des Weber-Fechnerschen Gesetzes zu kleiden, für das die Formel $E = C \log \frac{R}{R_0}$ gilt. (C = konstanter Beiwert, R = Reizstärke, R_0 = Reizschwellenintensität.) Die Ergebnisse von Bild 1 könnten dann in den Grenzen von E = 2 bis E = 4 näherungsweise durch die Formel

$$E = 0,666 \log \frac{a^3 f^5}{0,000\ 013\ 8}$$

wiedergegeben werden. Die vorliegenden Erfahrungen werden allerdings erheblich genauer durch die Wurzelform

$$E = 3,1 \sqrt[10]{a^3 f^5}$$

erfaßt. Außerdem schien die Darstellung nach Weber-Fechner nicht zweckmäßig zu sein, weil keineswegs sicher ist, daß die Reizstärke tatsächlich dem Ausdruck $a^3 f^5$ entspricht. Aus Bild 1 ist lediglich zu entnehmen, daß das Verhältnis der Potenzen von a und f sich wie 3:5 verhalten muß. Es ist

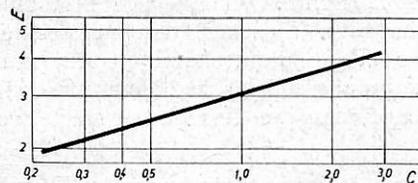


Bild 2. Zusammenhang zwischen E und C bei waagerechten Schwingungen.

also noch völlig offen, ob die Reizstärke durch den Ausdruck $a^3 f^5$ oder $a \cdot f^3$ oder irgendeinen anderen entsprechenden Wert wiedergegeben wird.

Der Vergleich von Bild 1 mit Bild 3 zeigt, daß zwischen den Empfindungswerten für senkrechte und waagerechte Schwingungen keine wesentlichen Abweichungen vorhanden sind. Zwar werden im Bereiche der höheren Empfindungs-

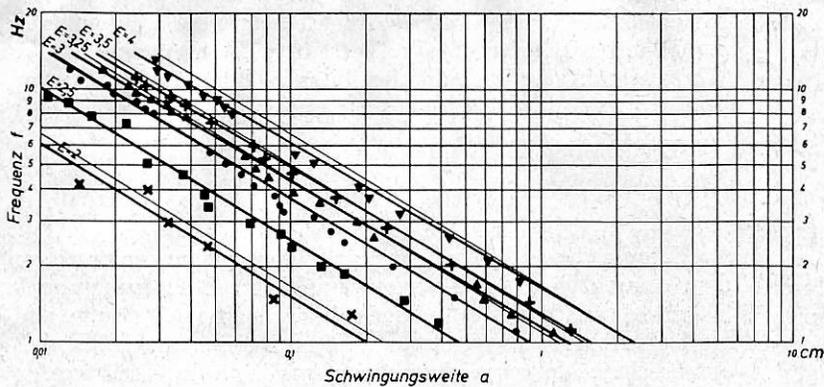


Bild 3. Abhängigkeit der Empfindungswerte E von der Schwingungsweite und der Frequenz bei senkrechten Schwingungen ————Empfindungswertlinien für waagerechte Schwingungen (aus Bild 1).

werte ($E = 3,25 - 4,0$) die senkrechten Erschütterungen mit steigender Frequenz etwas stärker empfunden als die waagerechten Schwingungen. Auch stimmen die Empfindungswertlinien $E = 2,0$ nicht völlig überein. Diese Unterschiede sind jedoch für die Verwertung von untergeordneter Bedeutung, da senkrechte Schwingungen über etwa 5 Hz (außer bei Wagenkastendurchbiegungen) im allgemeinen nicht vorkommen und die Linien $E = 2,0$ im ungefährlichen Gebiete großer Annehmlichkeit liegen, wo kleine Abweichungen ohne weiteres tragbar sind. Zur Förderung einer einfachen Handhabung ist es daher berechtigt, die senkrechten und waagerechten Schwingungen rechnerisch gleich zu behandeln.

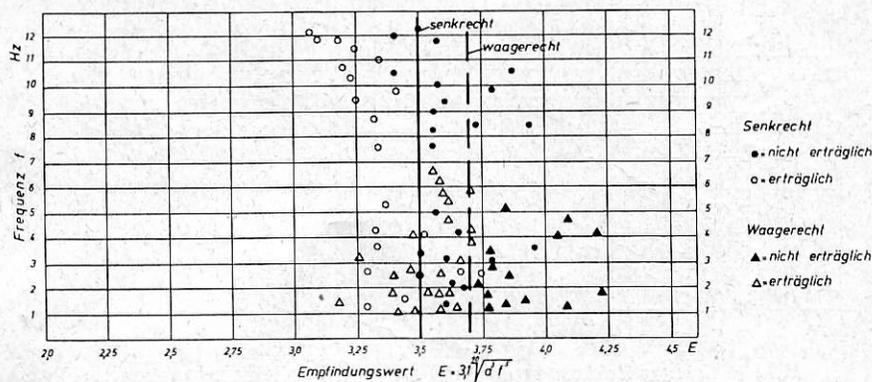


Bild 4. Grenzl意思 zwischen den Empfindungsgebieten „erträglich“ und „nicht erträglich“. Senkrecht: ● = nicht erträglich, ○ = erträglich. Waagerecht: ▲ = nicht erträglich, △ = erträglich.

Die Formel

$$E = 3,1 \sqrt[10]{a^3 f^5}$$

gilt also in den untersuchten Grenzen mit genügender Genauigkeit sowohl für die waagerechten als auch für die senkrechten Schütteltischschwingungen.

Zur Nachprüfung der aufgestellten Formel für E in der Nähe der Erträglichkeitsgrenze ($E = 3$ bis 4) wurden in späterer Zeit noch etwa 800 Kontrollversuche durchgeführt. Für bestimmte Einstellungen des Schütteltisches wurden die Empfindungswerte nach der aufgestellten Formel ermittelt und mit den neuerlichen Angaben der Versuchspersonen verglichen.

Die Versuchsperson hatte bei diesen Versuchen nur anzugeben, ob sie die eingestellte Schwingung auf die Dauer für „erträglich“ oder für „unerträglich“ hielt. Diese Versuche wurden in willkürlicher Reihenfolge, und zwar bei waagerechten Schwingungen von 1 bis 7 Hz und bei senkrechten Schwingungen 1 bis 12 Hz durchgeführt.

In Bild 4 sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihen aufgetragen. In jeder Versuchsreihe wurden immer 10 bis 15 Einzelwerte aufgenommen. Auch in diesem Falle wurden die Urteile verschiedener Personen für eine bestimmte Schütteltiseinstellung zu einem einzigen Gesamturteil zusammengefaßt. Der zusammengefaßte Empfindungswert „erträglich“ oder „unerträglich“ wurde nur berücksichtigt, wenn für dieses Urteil mindestens 60 v. H. der Angaben vorlagen.

Man sieht aus Bild 4, daß bei Schütteltischversuchen die aufgestellte Formel

$$E = 3,1 \cdot \sqrt[10]{a^3 f^5}$$

in dem untersuchten Bereich für die Ermittlung der Empfindungswerte gut brauchbar ist. Bei waagerechten Schwingungen liegt nach den Kontrollversuchen die Grenze zwischen den Empfindungsgebieten „erträglich“ und „unerträglich“ etwa bei dem rechnerisch ermittelten Werte $E = 3,7$. Die senkrechten Schwingungen werden etwas schärfer beurteilt; bei ihnen sind im allgemeinen schon Empfindungswerte über 3,5 als „unerträglich“ bezeichnet worden.

In diesem Zusammenhange soll kurz auf die Bedeutung der Beschleunigung bei der Beurteilung von Erschütterungen eingegangen werden. Bekanntlich findet man häufig die Ansicht, daß die Beschleunigung als die für den Wagenlauf maßgebende Kenngröße angesehen werden muß. Bei dieser Meinung wird also vorausgesetzt, daß Linien gleicher Beschleunigung auch Linien gleicher Empfindungsstärke sind. Bei Annahme sinusförmiger Schwingungen müßte für diese Linien dann die Beziehung $a f^2 = \text{Const}$ gelten

$$(\text{Beschleunigung } b = (2\pi f)^2 a = C \cdot a f^2)^*$$

Die im Reichsbahn-Versuchsamt für Wagen gefundenen Empfindungswerte folgen dagegen, wie

oben gezeigt, der Gleichung $a f^3 = C$. Sie liegen also nicht auf einer Linie gleicher Beschleunigung.

Der grundsätzliche Unterschied zwischen diesen beiden Ergebnissen kann an Hand von Bild 5 erkannt werden, in der eine doppellogarithmisch geteilte Darstellung f über b verwendet ist**). Die Linien gleicher Beschleunigung sind in dieser Darstellung senkrechte Geraden. Die Grunewalder Schütteltischversuche hingegen werden durch die geneigten E-Linien wiedergegeben. Sie zeigen deutlich, daß eine bestimmte gleiche Beschleunigung bei tieferen Frequenzen unangenehmer als bei höheren Frequenzen empfunden wird. So wird z. B. eine Schwingungsbeschleunigung von 100 cm/sec^2 bei der Frequenz $= 1,2 \text{ Hz}$ mit $E = 4,0$ und bei $f = 4,6 \text{ Hz}$ mit $E = 3,5$ beurteilt.

Außer diesen Betrachtungen, die lediglich die physiologische Wirkung auf die im Reichsbahn-Versuchsamt für

*) In dem hier erörterten Frequenzbereich kommt Meister zu ähnlichen Ergebnissen bei seinen Schütteltischuntersuchungen mit liegenden und stehenden Menschen (Forschung, Bd. 6, Heft 31).

***) Zwecks Eintragung in dieses Netz wird die Formel $E = 3,1 \sqrt[10]{a^3 f^5}$ unter Verwendung der Gleichung $b = (2\pi f)^2 a$ zweckmäßig in $E = 1,025 \cdot \sqrt[10]{\frac{b^3}{f}}$ umgeformt.

Wagen untersuchten Personen berücksichtigen, sprechen Erwägungen über die Mechanik des Wagenlaufes ebenfalls dafür, daß in vielen Fällen Schwingungen gleicher Beschleunigung bei kleinen Frequenzen schärfer als bei hohen Frequenzen beurteilt werden müssen. Bei gleicher Beschleunigung hat eine Schwingung kleiner Frequenz eine größere Schwingungsweite als bei hoher Frequenz ($a = \frac{b}{(2\pi f)^2}$).

Nun besitzen alle Eisenbahnwagen, besonders aber die Güterwagen, nicht unerhebliche waagerechte Spiele im Laufwerk (Achsschenkel gegen Achsbuchse oder Lagerschale, Achsbuchse gegen Achshaltergleitbacken, Wiege gegen Drehgestellrahmen). Bei Wagenschwingungen von verhältnismäßig hoher Frequenz treten erfahrungsgemäß nur kleine Ausschläge auf, d. h. die durch die Bauart gegebenen Spiele werden daher nicht oder nur teilweise ausgenutzt. Bei Wagenschwingungen gleicher Beschleunigung, aber geringerer Frequenz werden die bestehenden Spiele wegen des großen Schwingungsausschlages

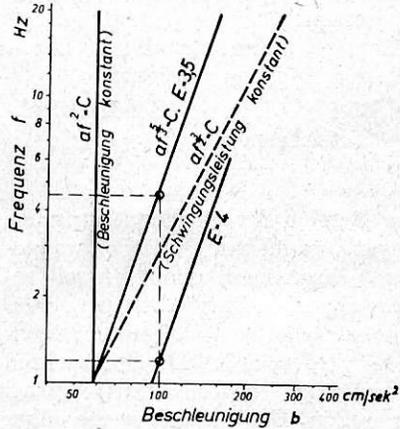


Bild 5. Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Frequenz.

völlig in Anspruch genommen und es entsteht ein mehr oder minder heftiger Stoß. Erhebliche Kräfte auf die Achsen und andere Wagenteile sind daher im allgemeinen nur bei Schwingungen kleiner Frequenz zu erwarten. Auch für die Standsicherheit von Ladegütern sind im allgemeinen rasche Schwingungen weniger schädlich als langsame Erschütterungen mit großer Schwingungsweite. Aus allen diesen Gründen wurde angestrebt, in Zukunft die Laufeigenschaften aller Eisenbahnwagen mit Wertungszahlen Wz zu kennzeichnen, die weitestgehend den Ergebnissen der Schütteltischversuche des Reichsbahn-Versuchsamts für Wagen entsprechen.

Wie im Org. Fortschr. Eisenbahnwes. (Jahrg. 1938, Heft 13, Seite 248) geschildert, war früher die Beurteilung der Laufeigenschaften von Güterwagen auf der Größe der Schwingungsleistung $L = (2\pi f)^3 a^2$ aufgebaut. Die Linien gleicher Wertungszahlen waren also auch Kurven gleicher Schwingungsleistung. In Bild 5 ist eine derartige Linie gestrichelt eingetragen. Man sieht, daß das bisherige Verfahren in dem schon damals vorhandenen Bestreben, gleiche Beschleunigungen bei höheren Frequenzen geringer zu bewerten, etwas zu weit gegangen war.

Der Versuch, die bei den Schütteltischuntersuchungen gefundene Formel für die Empfindungswerte ($E = 3,1 \sqrt[10]{a^3 f^5}$) in vollem Umfange ohne Änderungen auf die Wertungszahlen Wz des Wagenlaufes anzuwenden, erwies sich allerdings nicht als durchführbar. Bei unveränderter Übertragung der Schütteltischergebnisse hätten sich für die Anwendung der Wagenlaufbeurteilung zu scharfe Urteile ergeben. Die Abweichung der auf dem Schütteltisch gefundenen Empfindungswerte gegenüber den Bewertungsgrundsätzen der Wagenlaufeigenschaften kann wohl damit geklärt werden, daß sich die untersuchten Personen bei den Schütteltischversuchen weit schärfer auf die einwirkenden Schwingungen achteten als dies bei einem Fahrgast im fahrenden Eisenbahnwagen der Fall ist. Außerdem

wirkt wahrscheinlich eine völlig ruhende Umgebung auf den durch den Schütteltisch bewegten Menschen anders — und zwar stärker — auf das Empfindungsvermögen als die sich mitbewegende unmittelbare Umgebung in einem Eisenbahnwagen. Aus diesem Grunde konnten lediglich die qualitativen Ergebnisse (Neigung und Staffelung der Empfindungswertkurven, d. h. also der Wert $\sqrt[10]{a^3 f^5}$) der Schütteltischergebnisse, nicht aber der konstante Beiwert 3,1 für den Aufbau der Wertungszahlen übernommen werden. Nach längeren Untersuchungen wurde unter Beachtung aller bisherigen Erfahrungen für die Wertungszahl des Wagenlaufes folgende Formel gewählt:

$$Wz = 2,7 \sqrt[10]{a^3 f^5}$$

Da die Beschleunigung $b = (2\pi f)^2$ ist, gilt auch

$$Wz = 0,896 \sqrt[10]{\frac{b^3}{f}}$$

Die aus diesen Formeln hergeleiteten Beziehungen zwischen dem Ausschlag a , der Frequenz f und der Beschleunigung b lassen sich aus Bild 6 entnehmen, in der $\log f$ als Ordinate und $\log b$ als Abszisse verwendet ist. Es muß beachtet werden, daß entsprechend der physiologischen Grundlage des vorliegenden Verfahrens die Beschleunigung bei gleichbleibender Frequenz erheblich schneller wächst, als die zugehörige Wertungszahl ($b = 1,5 Wz^{3,33} f^{0,33}$). So nimmt z. B. bei gleichbleibender Frequenz die Wertungszahl nur um etwa 23% zu, wenn die Beschleunigung verdoppelt wird. Im Bereiche höherer Wertungszahlen (über etwa $Wz = 3,5$) ist also eine kleine prozentuale Erhöhung der Wertungszahl mit einer beträchtlichen absoluten Vergrößerung der Beschleunigung und damit auch der mechanischen Beanspruchungen verbunden.

Ein auf der geschilderten Grundlage aufgebautes Beurteilungsverfahren ist sowohl für Personen- als auch für Güterwagen geeignet. Im Versuchsamt für Wagen hat sich im Laufe der Zeit folgende Einheitsbezeichnung der Laufgütezahlen (Wz) ausgebildet:

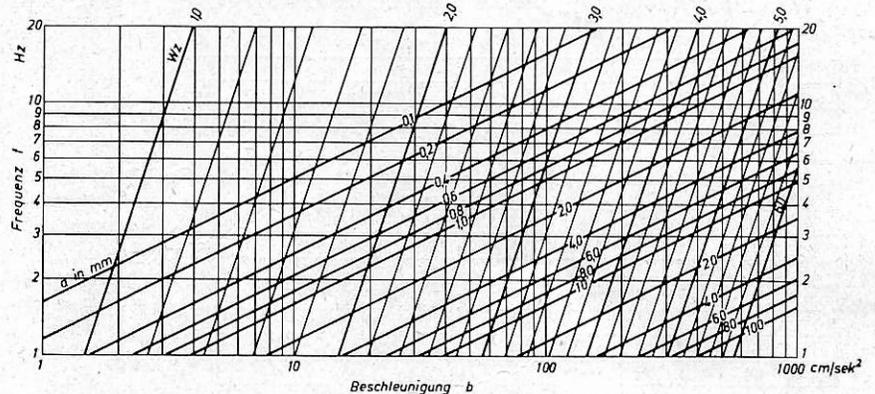


Bild 6. Zusammenhang zwischen der Frequenz, Schwingungsweite, Beschleunigung und Wertungszahl.

- | | |
|------|-------------------------------------------------------------|
| Wz | |
| 1,0 | — sehr gut — |
| 1,5 | — fast sehr gut — |
| 2,0 | — gut — |
| 2,5 | — fast gut — |
| 3,0 | — befriedigend — (erstrebenswerte Grenze für Personenwagen) |
| 3,25 | — befriedigend bis noch befriedigend — |
| 3,5 | — noch befriedigend — |
| 4,0 | — betriebsfähig — (erstrebenswerte Grenze für Güterwagen) |
| 4,5 | — nicht betriebsfähig — |
| 5,0 | — betriebsgefährlich — |

Die Wertungszahl $Wz = 4,0$ ist nach betrieblichen und nicht nach physiologischen Gesichtspunkten als erstrebenswerter Grenzwert der noch zulässigen schlechtesten Laufeigenschaften von Wagen (Güterwagen) anzusehen. Für Personenbeförderungen kann dieser Wert nicht mehr zugelassen werden, da Erschütterungen in diesem Bereich als unerträglich empfunden werden. Für Personenwagen ist die zulässige Grenze für die Laufgüte etwa bei der Wertungszahl $Wz = 3$ erreicht.

Die mit dem Ausdruck „betriebsgefährlich“ gekennzeichnete Wertungszahl $Wz = 5,0$ berücksichtigt zusammenfassend das Gesamtgebiet aller Erfahrungen, die bei der Beurteilung des Laufzustandes beachtet werden müssen. Fahrten mit Wagen, deren Laufgüte mit $Wz = 5,0$ bezeichnet werden muß, führen nach längerer Zeit unweigerlich zum Heißlaufen von Lagern, zu Brüchen von Fahrzeugteilen, vor allem der Achsen, zu Schädigungen der Ladegüter und schließlich unter Umständen auch zu Entgleisungen. Mit Hilfe der höchst zulässigen Wertungszahl kann daher die für gegebene Verhältnisse (Oberbau, Wagenbauart, Verschleißzustand) gültige Grenzgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die Formel $Wz = 2,7 \sqrt[10]{a^3 f^5}$ gilt zunächst für den Fall, daß eine einzige oder mehrere gleiche sinusförmige Wagenserschütterungen beurteilt werden sollen. Im Betrieb schwanken jedoch die Ausschläge nacheinander auftretender Wagenschwingungen in mehr oder minder großen Grenzen. Auch die Frequenzen nacheinander auftretender Wagenschwingungen weisen im allgemeinen gewisse Unterschiede auf, die jedoch wesentlich geringer sind als bei den Ausschlägen. Zur Beurteilung eines solchen Schwingungsverlaufs muß ein Mittelwertbildungsgesetz verwendet werden. Schütteltischversuche, die für die Aufstellung eines derartigen Gesetzes der Mittelwertbildung verwendet werden können, liegen nicht vor. Dagegen hat die Erfahrung vieler Jahre gezeigt, daß sowohl das mittlere Empfinden der Fahrgäste wie auch das Verhalten der Ladegüter weit überwiegend von den Schwingungen höherer Wertungszahlen, d. h. also im allgemeinen von den Schwingungen mit großen Ausschlägen gesteuert wird. Da die Beschleunigungen und damit zugleich die Massenkräfte sehr stark mit steigender Wertungszahl wachsen, ist eine besonders nachdrückliche Berücksichtigung der Schwingungen höherer Wertungszahlen auch im Hinblick auf die Dauerfestigkeit (Wöhlerkurve) geboten. Es ist daher folgende Formel gewählt:

$$Wz_{ges} = \sqrt[10]{Wz_1^{10} \cdot n_1 + Wz_2^{10} \cdot n_2 + Wz_n^{10} \cdot n_n}$$

Hierin bedeutet n_1, n_2, n_3 usw. die Häufigkeit der nacheinander aufgetretenen Schwingungen mit der Wertungszahl Wz_1, Wz_2, Wz_3 usw.

Mit dieser Formel ergibt sich z. B. bei einem Schwingungsbild, das zu 10% aus Schwingungen der Wertungszahl 4,0 und zu 90% aus Schwingungen der Wertungszahl 2,0 besteht, die Gesamtwertungszahl $Wz_{ges} = 3,2$. Die auch bei geringer Häufigkeit erstrebte Bevorzugung der Schwingungen größerer Wertungszahlen ist also erreicht.

Ähnliche Verhältnisse bestehen, wenn — was allerdings seltener vorkommt — gleichzeitig auftretende (also überlagerte) Schwingungen gleicher Richtung, aber verschiedener Frequenz durch ein zusammenfassendes Urteil gekennzeichnet werden sollen. Für diesen Fall wird folgende Formel verwendet:

$$Wz_{ges} = \sqrt[10]{Wz_1^{10} + Wz_2^{10} + \dots + Wz_n^{10}}$$

Bei überlagerten Schwingungen darf jedoch trotz ihrer Erfassung durch ein Gesamturteil niemals auf die ausdrückliche Erwähnung der jeweiligen Wertungszahlen für die einzelnen Schwingungsarten verzichtet werden, da sich sonst eine unzulässige Verschleierung der verschiedenen Entstehungsgründe ergeben würde. So muß z. B. bei senkrechten Schwingungen eines Wagenkastens neben dem Gesamturteil immer angegeben werden, welche einzelnen Wertungszahlen sich für die langsam

verlaufenden Tauchschwingungen auf den Federn und die höher frequenten Biegunsschwingungen des Wagenkastens ergeben.

Aus dem gleichen Grunde werden auch die senkrechten und die waagerechten Wagenschwingungen (Quer- und Längsschwingungen) immer getrennt beurteilt und niemals zu einem Gesamturteil zusammengefaßt. Für ihre getrennte Behandlung spricht vor allem der Umstand, daß die Wertungszahl erkennen lassen muß, wo der eigentliche Grund eines unbefriedigenden Wagenlaufs zu suchen ist und in welcher Richtung sich die Verbesserungen zu bewegen haben. Erst in zweiter Linie hat bei Schwingungen verschiedener Richtung das Fehlen entsprechender Schütteltischversuche bisher gegen ein zusammenfassendes Allgemeinurteil gesprochen.

2. Entwicklung eines neuen Schwingungsmessers.

Die Anwendung der geschilderten Bewertung der Wagenlaufeigenschaften setzt einen Schwingungsmesser voraus, der die für die Beurteilung maßgebenden Größen a und f einwandfrei aufzeichnet. Die bereits entwickelten und käuflichen Schwingungsmesser waren aus verschiedenen Gründen für den vorliegenden Zweck nicht vollkommen geeignet. Einerseits waren sie für die erheblichen Beanspruchungen, die hauptsächlich bei der Untersuchung von Güterwagen auftreten, nicht genügend derb und widerstandsfähig; andererseits war es bei den bisher verwendeten Geräten mit Öldämpfung wegen der starken Abhängigkeit der Ölviskosität von Temperaturschwankungen nur selten möglich, die anfangs eingestellte Dämpfung über längere Zeit unverändert durchzuhalten. Da eine Nacheichung während einer Versuchsfahrt jedoch nur in seltenen Fällen möglich ist, mußte verhältnismäßig häufig mit dem Ausfall brauchbarer Meßergebnisse gerechnet werden.

Im Reichsbahn-Versuchsammt für Wagen wurden daher eingehende Untersuchungen über die Entwicklung eines besonders für Wagenlaufuntersuchungen geeigneten Schwingungsmessers angestellt.

Zuerst war die Frage einer geeigneten Dämpfung zu klären. Grundsätzlich schien eine Wirbelstromdämpfung mit zwischen Magnetschuhen pendelnden Kupferscheiben am geeignetsten zu sein. Zur Behebung der von einigen Fachleuten geäußerten Bedenken — im Schwingungsmesserbau ist die Wirbelstromdämpfung bisher nur selten angewendet worden — mußte eine große Reihe planmäßiger Vorversuche ausgeführt werden. Diese Untersuchungen ergaben schließlich, daß die Wirbelstromdämpfung so durchgebildet werden kann, daß sie allen Ansprüchen genügt. Der befürchtete Skinneffekt konnte bei den hier in Frage kommenden Frequenzen mit Sicherheit vermieden werden. Die in kleinen Grenzen vorhandene Temperaturabhängigkeit der Dämpfung (während des Betriebes erwärmt sich die stromdurchflossene Magnetspule und verändert dadurch ihren Widerstand) kann ohne Unterbrechung des Meßvorganges und ohne Nacheichung durch Regeln eines Vorwiderstandes ausgeglichen werden.

Die zweite grundsätzliche Aufgabe bestand in der Wahl einer zweckmäßigen Eigenfrequenz für den neuen Schwingungsmesser. Die wirkliche Vergrößerung eines Schwingungsmessers beträgt bekanntlich:

$$V = \frac{A}{a} = \frac{\varphi \cdot \lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4D \cdot \lambda^2}}$$

Hierin bedeutet:

- A = Schwingungsweite (Ausschlag aus der Mittellage) des vom Schwingungsschreiber aufgezeichneten Schwingungsbildes.
- a = Schwingungsweite (Ausschlag aus der Mittellage) der tatsächlichen Schwingung des Wagenkastens.
- φ = Statische Vergrößerung (Indikatorvergrößerung) des Schwingungsmessers. Sie ist eine Konstante des Gerätes und unabhängig von der Frequenz der gemessenen Schwingung.

$\lambda = \frac{f}{f_0}$ = Verstimmung. Die Verstimmung ist das Verhältnis der gemessenen Frequenz f zur Eigenfrequenz f_0 des ungedämpften Schwingungsmessers.

D = Dämpfung (nach Lehr: Schwingungstechnik). Für diesen Wert gilt:

$$D = \frac{\frac{\ln \varepsilon}{\pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln \varepsilon}{\pi}\right)^2}};$$

hierin ist $\varepsilon = \frac{a_n}{a_n + \frac{1}{2}}$ das Verhältnis zweier um eine halbe Periode auseinanderliegender Ausschläge, die sich beim gedämpften Ausschwingen eines angestoßenen Schwingungsmessers ergeben.

Bei Einstellung der Dämpfung auf den üblichen Wert $\varepsilon = 7:1$ und damit auf $D = 0,53$ und bei vorläufiger Annahme von $\varphi = 1$ ergibt sich rechnerisch für V über λ die in Bild 7a dar-

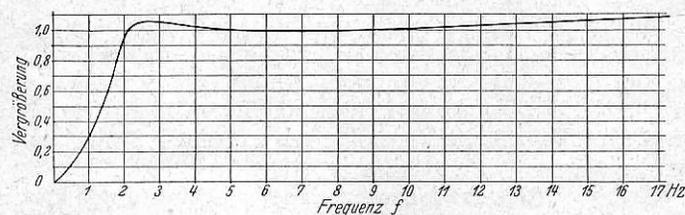
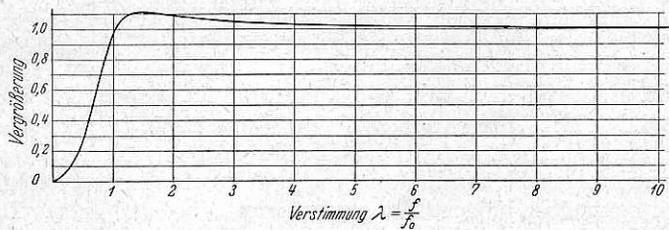


Bild 7a. Rechnerische Vergrößerung eines Schwingungsmessers bei $\varepsilon = 7:1$, $\varphi = 1,0$ und $f_0 = 1,7$ Hz.

Bild 7b. Eichkurve des Schwingungsmessers mit Wirbelstromdämpfung $\varepsilon = 7:1$, $\varphi = 0,9$ und $f_0 = 1,7$ Hz.

gestellte Kurve*). Man erkennt deutlich zwei Gebiete. Unterhalb der Eigenfrequenz f ist die Vergrößerung sehr stark von der Frequenz der gemessenen Schwingungen abhängig; oberhalb der Eigenfrequenz dagegen ist die Vergrößerung fast frequenzunabhängig und kann mit ausreichender Genauigkeit als konstant betrachtet werden. Aus diesem Grunde arbeitet man im allgemeinen bei Schwingungsmessern lediglich im Gebiete über der Eigenfrequenz, d. h. man muß den Schwingungsmesser so auslegen, daß seine Eigenfrequenz genügend weit unterhalb der kleinsten zu messenden Frequenz liegt.

Leider war ein ähnliches Vorgehen in dem vorliegenden Falle nicht möglich. Zur Beurteilung des Wagenlaufes müssen Fahrzeugschwingungen von etwa 0,1 bis 60,0 mm Schwingungsweite bei Frequenzen von etwa 15 bis 1,0 Hz gemessen werden. Es erwies sich als praktisch undurchführbar, diese Schwingungsweiten ausschließlich im Gebiete konstanter Vergrößerung oberhalb der Eigenfrequenz zu messen. Die kleinen Fahr-

*) Die Eichwerte fast aller ausgeführten Schwingungsmesser liegen im Bereiche höherer Frequenzen wegen des Einflusses unvermeidlicher elastischer Formveränderungen meistens etwas über den rechnerischen Werten. Die folgenden Betrachtungen werden jedoch von diesem Unterschiede so gut wie nicht berührt.

zeugausschläge müssen zur Erzielung einer ausreichenden Ablesegenauigkeit vergrößert aufgezeichnet werden, die großen Ausschläge dagegen müssen verkleinert werden, weil ihre Aufzeichnung in natürlicher Größe schreibtechnische Schwierigkeiten bereiten würde. Diese beiden sich widersprechenden Forderungen ließen sich bei Verwendung des Gebietes über der Eigenfrequenz nicht gleichzeitig erfüllen; auch die zusätzliche Einschaltung einer veränderlichen statischen Vergrößerung konnte keine genügende Abhilfe bringen, weil von dieser Möglichkeit nur in beschränktem Umfange Gebrauch gemacht werden darf, wenn unerwünschte Rückwirkungen auf die Anzeigegenauigkeit vermieden werden sollten. Es bestand also kaum die Hoffnung, mit einer einzigen Schwingungsmesserform das gesamte Gebiet der Wagenschütterungen erfassen zu können.

In dieser etwas mißlichen Lage konnte nach längerem Suchen ein Kunstgriff gefunden werden. Für die Wertungszahl der Wagenlaufbeurteilung ist in Abschnitt 1 folgende Formel angegeben:

$$Wz = 2,7 \sqrt[10]{a^3 f^5}.$$

Mit $a = \frac{A}{V}$ ergibt sich:

$$Wz = 2,7 \sqrt[10]{\frac{f^5}{V^3} \cdot A^3}.$$

Es läßt sich nun zeigen, daß der Wert $\sqrt[10]{\frac{f^5}{V^3}}$ bei einer

Eigenschwingungszahl des Schwingungsmessers von $f_0 = 1,7$ Hz in den Grenzen f von 1,0 = 1,85 Hz mit genügender Genauigkeit als unveränderlich angesehen werden kann. Der Schwingungsmesser wurde deshalb für eine Eigenfrequenz $f_0 = 1,7$ Hz ausgelegt. Seine bei $\varepsilon = 7:1$ und $\varphi = 0,9$ aufgenommene Eichkurve ist in Bild 7b wiedergegeben. Für Schwingungen von 1,0 bis 1,8 Hz gilt dann:

$$Wz = 3,65 \sqrt[10]{A^3}.$$

Die Zulässigkeit der hier angewandten Annäherung kann aus Bild 8 entnommen werden. Diese Darstellung deckt sich im wesentlichen mit Bild 6. In Bild 8 ist lediglich an Stelle des tatsächlichen Schwingungsausschlages a die Amplitude A

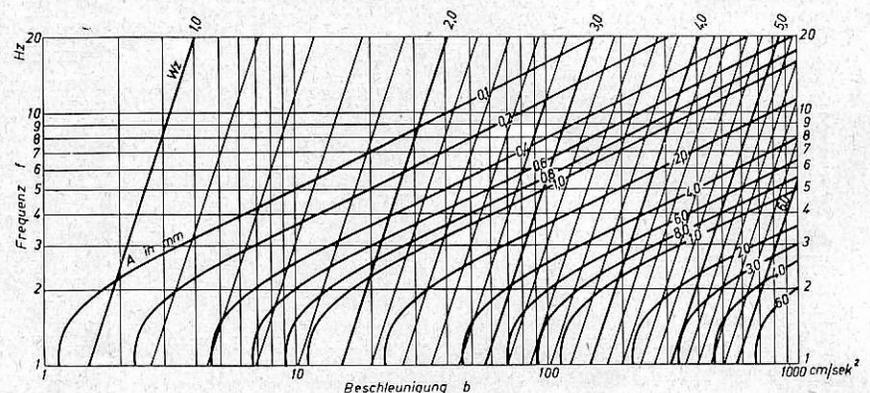


Bild 8. Zusammenhang zwischen der Frequenz, der Schwingungsweite des Schwingungsbildes, Beschleunigung und Wertungszahl Wz bei Verwendung eines Schwingungsmessers mit einer Eichkurve nach Bild 7b.

des vom Schwingungsmesser aufgezeichneten Schwingungsbildes eingetragen worden. Man erkennt ohne weiteres den annähernd gleichen Verlauf der Linien für Wz und A im Bereiche von 1,0 bis 1,8 Hz.

Durch die besprochene Vereinfachung wurde es möglich, ohne irgendwelche Umständlichkeiten in dem sonst bei Schwingungsmessungen meistens gemiedenen Gebiete stark frequenzabhängiger Vergrößerung zu arbeiten. Die Formel besagt,

daß die Wertungszahl in den hier behandelten Grenzen nicht mehr von der gemessenen Frequenz f , sondern lediglich von der Amplitude A des vom Schwingungsmesser aufgezeichneten Schwingungsbildes abhängig ist. Da die tatsächlichen Schwingungen im Gebiete unter der Eigenfrequenz f_0 verkleinert dargestellt werden, ist auch zugleich das oben gesteckte Ziel erreicht, daß die besonders weiten Ausschläge in verminderter Größe aufgezeichnet werden.

Für die Anwendung eines derartig ausgelegten Schwingungsmessers ergeben sich also zwei Folgerungen. Die Schwingungen im Frequenzbereich von 1,0 bis 1,8 Hz, das sind im wesentlichen die Schwingungen aller zweiachsigen Güterwagen, werden auf dem absteigenden Aste der Vergrößerungskurve gemessen und mit der Formel $Wz = 3,65 \sqrt[10]{A^3}$ gewertet. Alle übrigen Schwingungen liegen mit genügender Genauigkeit im Bereiche konstanter Vergrößerung und können leicht mit der ursprünglichen Formel $Wz = 2,7 \sqrt[10]{a^3 f^5}$ beurteilt werden.

Schwingungen (sämtliche Personenwagenschwingungen sowie die senkrechten Güterwagenschwingungen und auch die waagerechten Güterwagenschwingungen in der Fahrtrichtung) werden mit dem Übersetzungsverhältnis 2:1 aufgeschrieben. Das Registrierpapier kann wahlweise zeitabhängig (Antrieb durch Elektromotor mit Feinregulierung), oder wegabhängig (Antrieb Welle von der Wagenachse) vorgeschoben werden. Durch ein während des Laufes bedienbares Umschaltgetriebe ist erreicht, daß sich der Papiervorschub auf 2,5 oder 25 mm/sec (70 oder 700 mm/km) beläuft. Das Registrierpapier wird über eine Tischplatte geführt, unter der ein Heizwiderstand vorgesehen ist, der die Tischplatte so stark erwärmt, daß die Tintenschrift der aufgezeichneten Schwingungen schnell trocknet und beim Abwickeln auf eine Rolle nicht mehr verwischt werden kann. Die Schwingungen der Massenpendel werden durch die Elektromagneten 10 bis 12 gedämpft, in deren Luftspalt die an den Massenpendeln befestigten Kupferplatten schwingen. Feststellmagnete 13 und 14 legen die Schwinggewichte beim Ausschalten oder Ausbleiben des Stromes selbsttätig fest; Be-

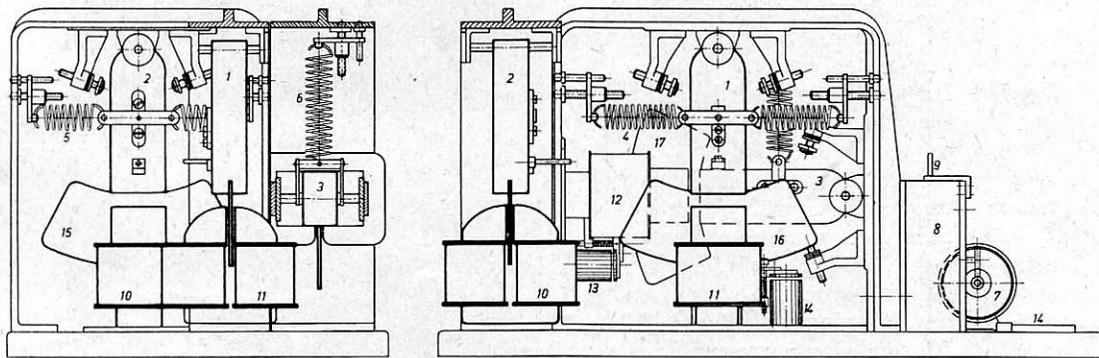


Bild 9. Dreirichtungsschwingungsmesser mit Wirbelstromdämpfung.

1 bis 3 = Schwinggewichte; 4 bis 6 = Rückstellfedern; 7 = Antriebsmotor für Papiervorschub; 8 = Getriebekasten; 9 = Umschalt-
hebel; 10 bis 12 = Dämpfungsmagnete; 13 bis 14 = Feststellmagnete; 15 bis 17 = Dämpfungsscheiben.

Nach Klärung dieser grundsätzlichen Fragen wurde der erste Entwurf eines Schwingungsmessers mit Wirbelstromdämpfung für eine Eigenfrequenz $f_0 \cong 1,7$ Hz vom Reichsbahn-Versuchsamt für Wagen aufgestellt. Die weitere Durchbildung sowie Anfertigung wurde einer bewährten Firma übertragen.

In Bild 9 ist ein Schwingungsmesser für gleichzeitige Aufnahme von Schwingungen in drei zueinander senkrechten Richtungen schematisch dargestellt. In Bild 11 ist ein Lichtbild dieses Schwingungsmessers wiedergegeben. Der Dreirichtungsschwingungsmesser besteht im wesentlichen aus den Massenpendeln 1 bis 3, die durch die Federn 4 bis 6 abgedeutert sind.

Die Pendel 1 und 2 schwingen in waagerechter Richtung um waagerechte Achsen. Die Rückstellkräfte werden also durch die Federn und die Schwerkraftkomponenten der Pendel erzeugt. Das Pendel 3, das senkrecht um eine waagerechte Achse schwingt, wird lediglich durch eine Feder in seine Nulllage zurückgestellt. Die Angriffspunkte der Federn am Gehäuse und am Massenpendel sind in gewissen Grenzen verstellbar, so daß die gewünschte Eigenschwingungszahl und die Mittelwege genau eingeregelt werden können. An den Massenpendeln sind die Schwingungsschreiber mit Stoßstangen über eine Geradföhrung spielfrei angelenkt. Als Schwingungsschreiber werden die seit Jahren bewährten Tintenschreiber verwendet. Zwischen den Massenpendeln und den Schwingungsschreibern sind Übersetzungshebel angeordnet, so daß die Ausschläge der zu beurteilenden Schwingungen im Gebiete über der Eigenfrequenz entweder in natürlicher Größe oder in doppeltem Maßstabe aufgezeichnet werden. Bei der Aufzeichnung waagerechter Güterwagenschwingungen quer zur Fahrtrichtung wird das Übersetzungsverhältnis 1:1 verwendet. Alle übrigen

schädigungen des Schwingungsmessers durch Aufschaukelung beim ungedämpften Ausschlagen sind dadurch mit Sicherheit vermieden. Der zur Dämpfung benötigte Strom wird mit Drehwiderständen geregelt und mit Strommessern überwacht. Die Wicklung der Dämpfermagnetspulen ist für eine Spannung von 24 Volt (übliche Eisenbahnwagenbatterien) bemessen. Der Stromverbrauch eines Dämpfermagneten beträgt etwa 0,65 Amp. Der Stromverbrauch der Feststellmagnete ist sehr gering und beträgt zusammen etwa 0,1 Amp. Die Heizplatte verbraucht etwa 0,8 Amp. und der Antriebsmotor 1,5 Amp., so daß zum Betrieb eines Dreirichtungsschwingungsmessers mit einem Gesamtverbrauch von etwa 4 bis 5 Amp. zu rechnen ist, was keine große Belastung der üblichen Eisenbahnwagenbatterien bedeutet.

Da das Gewicht des Dreirichtungsschwingungsmessers ziemlich groß ist, wurde noch ein kleiner, bequem tragbarer Schwingungsmesser entwickelt (Bild 10). Dieser Schwingungsmesser ist nur für eine Schwingungsrichtung geeignet; durch Kippen des Gerätes um 90° können jedoch wahlweise senkrechte oder waagerechte Schwingungen aufgenommen werden. Bei der Aufzeichnung waagerechter Schwingungen dreht sich das Schwinggewicht waagrecht um eine senkrechte Achse. In gekipptem Zustande liegt die Achse dagegen waagrecht, und das Gewicht schwingt senkrecht. In beiden Fällen wird die Rückstellkraft lediglich von Federn ausgeübt. Das Schwinggewicht und die Rückstellfedern sind so bemessen, daß im Regelfalle oberhalb der Eigenschwingungszahl eine Gesamtvergrößerung von 2:1 gegeben ist. Durch Verschieben einer Masse 2 innerhalb des als Hohlzylinder ausgeführten Schwinggewichtes kann die Vergrößerung auf die Hälfte verkleinert werden, so daß die Amplituden des untersuchten Schwin-

gungsvorganges im Bereiche oberhalb der Eigenschwingungszahl in natürlicher Größe aufgezeichnet werden. Hierbei erhöht sich allerdings die Eigenschwingungszahl etwas; durch Verstellen der Federangriffspunkte am Schwinggewicht kann jedoch ohne weiteres der ursprüngliche Wert $f_0 = 1,7$ Hz wieder hergestellt werden.

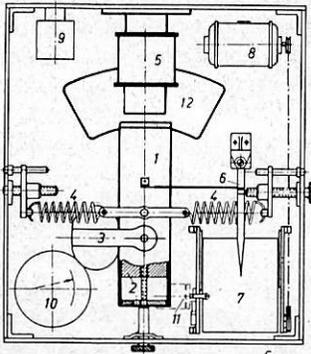


Bild 10. Schwingungsmesser mit Wirbelstromdämpfung.

- 1 = Schwinggewicht; 2 = verschiebbares Gewicht;
3 = Lagerbock; 4 = Rückstellfedern; 5 = Dämpfermagnet;
6 = Schwingwegschreiber; 7 = Papiertransport; 8 = Antriebsmotor; 9 = Regulierwiderstand für die Dämpfung;
10 = Strommesser;
11 = Zeitmarke;
12 = Dämpfungsscheibe.

Drehachse $435 \cdot 10^{-3}$ cm kg sec², reduzierte Pendellänge 13,4 cm, die auf die reduzierte Pendellänge umgerechnete Masse $2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}$ kg sec²/cm, Polfläche des Dämpfermagneten 24 cm², Luftspalt 0,5 cm, Dicke der Dämpferplatte 0,3 cm. Induktion im Luftspalt des Dämpfungsmagneten ~ 5000 Gauss.

Kleiner, kippbarer Schwingungsmesser: Gesamtgewicht 18 kg, Gewicht des Schwinggewichtes = 2,2 kg, Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse 13,7 cm, Massenträgheitsmoment bezogen auf die Drehachse $110 \cdot 10^{-3}$ cm kg sec², reduzierte Pendellänge 10,8 cm, die auf die reduzierte Pendellänge umgerechnete Masse $0,95 \cdot 10^{-3}$ kg sec²/cm, Polfläche des Dämpfermagneten 12 cm², Luftspalt 0,4 cm, Dicke der Dämpferplatte 0,2 cm, Induktion im Luftspalt des Dämpfermagneten ~ 5000 Gauss.

Die beschriebenen Schwingungsmesser sind für die Aufnahme von Schwingungen von 1 bis 15 Hz gut geeignet. Da die Frequenzen der bei Eisenbahnwagen auftretenden Schwingungen im allgemeinen unter 15 Hz liegen, sind die Schwingungsmesser für alle vorkommenden Fälle voll geeignet.

Die Meßgenauigkeit der Schwingungsmesser ist groß. Bei der Aufzeichnung hoher Frequenzen und kleiner Amplituden streut die Aufzeichnung höchstens um $\pm 5\%$ um die mittlere Eichkurve. Bei Schwingungen über 5 mm ist die Streuung noch erheblich geringer ($\pm 2\%$).

Die versuchsweise gebauten Schwingungsmesser haben sich in zweijährigem Betriebe so gut bewährt, daß sie für Wagenlaufuntersuchungen in größerem Umfange eingeführt werden.

3. Anwendung.

Zur Ermittlung der senkrechten und der waagerechten Wagenerschütterungen wird der verwendete Schwingungs-

Da bei der beschriebenen Kippmöglichkeit um 90° ein Tintenschreiber nicht unbedingt betriebssicher ist, werden die Schwingungen von dem kleinen Schwingungsmesser auf Wachs-papier registriert. Der Einfluß der mit diesem Verfahren verbundenen größeren Reibung ist unbedeutend. Zusätzlich wurde auch noch die Möglichkeit des Einbaues eines Tintenschreibers ohne Gradführung vorgesehen, so daß wahlweise die eine oder die andere Schreibvorrichtung verwendet werden kann. Das Registrierpapier wird durch einen regelbaren Elektromotor vorge-schoben.

Nachstehend sind die wichtigsten Kenngrößen der beiden Schwingungsmesser angegeben:

Großer Schwingungsmesser: Gesamtgewicht 75 kg, Gewicht des Schwinggewichtes = 3,3 kg, Abstand des Schwerpunktes von der Drehachse 9,65 cm, Massenträgheitsmoment bezogen auf die

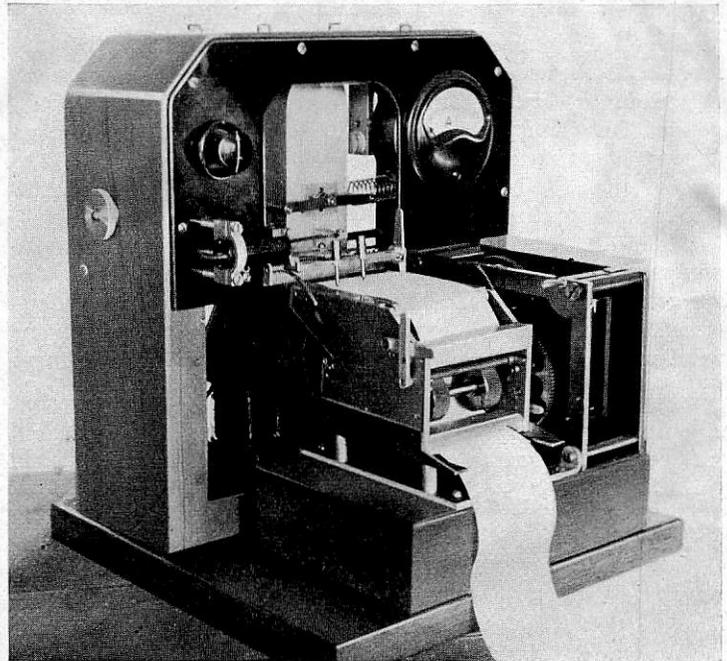


Bild 11 a. Schwingungsmesser.

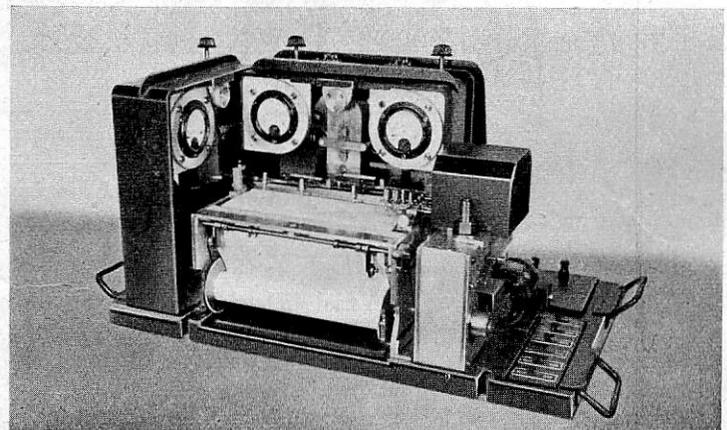


Bild 11 b.

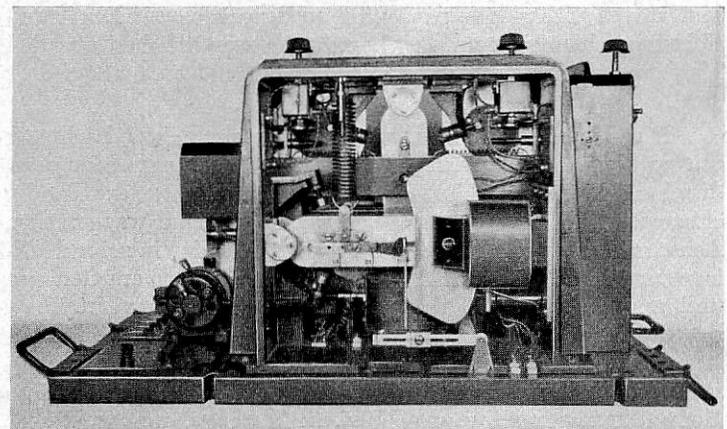


Bild 11 c.

Bild 11 b und c. Dreirichtungsschwingungsmesser.

messer in der Regel bei zweiachsigen Wagen über der Mitte einer Achse und bei vierachsigen Fahrzeugen über der Mitte eines Drehgestelles aufgestellt. Bei besonderer Untersuchung der Wankbewegungen müssen gegebenenfalls zusätzlich Schwin-

gungsmesser in der Nähe der Seitenwände angeordnet werden. Senkrechte Durchbiegungsschwingungen können durch Schwingungsmesser erfaßt werden, die je nach der Lage des Schwingungsbauches ihren Stand entweder in der Mitte des Wagens oder im Überhang oder an einer anderen geeigneten Stelle haben. Zur Messung von Drehschwingungen (Schwingungen um die senkrechte Wagenachse) werden zwei Schwingungsmesser verwendet, wobei die Schwingungsmesser auf beiden Wagenenden oder über den Drehstellen aufgestellt werden. Hierbei ist jedoch eine genauere Messung der Phase erforderlich (schneller Papiervorschub).

Zur einwandfreien Festlegung einer Gesamtwertungszahl ist es erforderlich, daß die zum Versuche benützte Meßstrecke ausreichend lang ist, zweckmäßig etwa 5 bis 10 km. Bei kürzeren Meßstrecken besteht die Gefahr, daß irgendwelche Zufälligkeiten die Wertungszahl ausschlaggebend beeinflussen.

In der Regel wird der Einfluß größerer Unstetigkeiten des Oberbaues bei der Auswertung unberücksichtigt gelassen. Nur in Sonderfällen beschränkt sich die Beurteilung gerade auf die Wirkungen, die von Unregelmäßigkeiten des Gleises usw. herrühren. Um die ungünstigsten Verhältnisse zu erfassen, wird das untersuchte Fahrzeug im allgemeinen am Schlusse eines Zuges befördert. Je nach der Aufgabestellung muß jedoch auch von dieser Richtlinie abgewichen werden.

Da der waagerechte Laufzustand eines Eisenbahnwagens entscheidend von den Verschleißverhältnissen zwischen Rad und Schiene abhängig ist, kann ein abschließendes Urteil über die Laufgüte nur dann abgegeben werden, wenn das Fahrzeug nicht nur mit neuen, sondern auch mit stark abgenutzten Radreifen untersucht wird. Im Reichsbahn-Versuchsammt für Wagen sind zu diesem Zwecke Radsätze mit besonders ungünstigen Verschleißprofilen vorrätig, so daß auch neue Fahrzeuge unter den ungünstigsten Voraussetzungen untersucht werden können.

Vor Beginn des Versuches ist der Schwingungsmesser auf etwa vorhandene unzulässige Reibung usw. zu untersuchen. Beim freien ungedämpften Ausschlagen des angestoßenen Schwingungsgewichtes müssen mindestens zehn Schwingungen bis zum Abklingen aufgezeichnet werden. Weiterhin muß die Eigenfrequenz f_0 , die Dämpfung D und die statische Vergrößerung φ auf die gleichen Werte eingestellt sein, die bei der Aufnahme der Eichkurve vorlagen. Die Eigenfrequenz wird durch Verschieben der Federangriffspunkte am Pendel auf den gewünschten Wert $f_0 = 1,7$ Hz eingeregelt. Zur Prüfung der statischen Vergrößerung wird die auf die Pendel wirkende Schwerkraftkomponente durch Ankippen des Schwingungsmessers um einen gewissen Winkel verändert. Hierbei muß sich ein bestimmter Schreibhebelausschlag ergeben, der gegebenenfalls durch Nachstellung des Übersetzungsverhältnisses hergestellt werden muß. Der die Magnetspulen durchfließende Strom wird so eingeregelt, daß sich beim Ausschlagen des angestoßenen gedämpften Pendels die Größen zweier um eine halbe Periode auseinanderliegender Ausschläge wie 7:1 verhalten.

Bei der Auswertung der von dem beschriebenen Schwingungsmesser aufgezeichneten Schwingungsbilder wird, wie oben erläutert, mit einer der beiden nachstehend wiederholten Grundformeln gearbeitet. Bei Schwingungen mit einer größeren Frequenz als 1,8 Hz gilt $Wz = 2,7 \sqrt[10]{a^3 f^5}$. Je nach dem eingestellten Übersetzungsverhältnis des Schwingungsmessers ist $a = A$ oder $a = \frac{A}{2}$.

Bei Schwingungen geringerer Frequenzen von 1,0 bis 1,8 Hz wird die Formel $Wz = 3,65 \sqrt[10]{A^3}$ verwendet. Auch hier kann die Übersetzung von 1:1 auf 2:1 verändert werden. Wenn in dem zu untersuchenden Streckenabschnitt nacheinander

Schwingungen verschiedener Wertungszahlen Wz_1, Wz_2, \dots, Wz_n mit der Häufigkeit n_1, n_2, \dots, n_n vorkommen, wird die mittlere Gesamtwertungszahl wie folgt gebildet:

$$Wz_{ges} = \sqrt[10]{Wz_1^{10} \cdot n_1 + Wz_2^{10} \cdot n_2 + \dots + Wz_n^{10} \cdot n_n}$$

In ähnlicher Weise lautet die Auswertungsformel für überlagerte Schwingungen gleicher Richtung verschiedener Frequenz:

$$Wz_{ges} = \sqrt[10]{Wz_1^{10} + Wz_2^{10} + \dots + Wz_n^{10}}$$

Die Beurteilung des Wagenlaufes auf Grund dieser Formel scheint zunächst etwas umständlich zu sein. An Hand besonders aufgestellter Bilder von Kurvenscharen und Leiter tafeln lassen sich die erforderlichen Ermittlungen jedoch verhältnismäßig schnell durchführen.

So kann z. B. die Größe der Wertungszahl einer einzelnen Schwingung ohne weiteres den bereits besprochenen Darstellungen nach Bild 6 und 8 entnommen werden, die für die Zwecke der Anwendung natürlich größer und ausführlicher gezeichnet sind.

Besonders zweckmäßig ist jedoch die Anwendung einer Reihe von Leitern (Bild 12), mit deren Hilfe nicht nur die Wertungszahlen für einzelne Schwingungen, sondern auch die abschließenden Gesamtwertungszahlen für zusammengesetzte Schwingungen ermittelt werden können. Auf die Ableitung dieser Leitern soll hier nicht weiter eingegangen werden. Es sei lediglich ihre Anwendung an je einem angenommenen Beispiel aus den Gebieten über und unter 1,8 Hz erläutert.

Ein Meßstreifen enthalte mit der Häufigkeit $n_1 = 0,2$ Schwingungen, deren Frequenz $f = 3$ Hz und deren Schwingungsweite im Mittel $A_1 = a_1 = 3,8$ mm beträgt. Außer dieser Schwingungsgruppe mit größeren Ausschlägen liegen noch Schwingungen mit $A_2 = a_2 = 3$ mm und $f_2 = 2,5$ Hz vor. Ihre Häufigkeit beträgt $n_2 = 1,0 - n_1 = 0,8$. Der Punkt $a_1 = 3,8$ auf der Leiter I für die Schwingungsweiten wird mit dem Punkt $f_1 = 3,0$ auf der Leiter II für die Frequenz f verbunden. Der Schnittpunkt des Strahles mit der Leiter III ergibt die Wertungszahl $Wz_1 = 3,5$. Durch Legen einer Geraden von diesem Punkte nach $n_1 = 0,2$ auf der Leiter IV findet man auf der Leiter V die Teilwertungszahl $Wz_{t_1} = 3,0$. Die Teilwertungszahl Wz_{t_2} für die restlichen Schwingungen wird auf die gleiche Weise ermittelt und beläuft sich auf $Wz_{t_2} = 2,9$. Die Gesamtwertungszahl Wz_{ges} wird mit der Summenleiter VI erhalten, auf der ohne weiteres die Werte $Wz_{t_1}^{10} = 5,8 \cdot 10^4$ und $Wz_{t_2}^{10} = 4,2 \cdot 10^4$ abgelesen werden können. Die Summe dieser beiden Ziffern beträgt $1 \cdot 10^5$, wozu nach der Summenleiter VI die Gesamtwertungszahl $Wz_{ges} = 3,2$ gehört.

Zur Erläuterung des zweiten Falles sei ein Schwingungsbild besprochen, das mit der Häufigkeit $n_1 = 0,3$ Ausschläge von $A_1 = 20$ mm, $f_1 = 1,2$ Hz und mit der Häufigkeit $n_2 = 0,7$ Ausschläge von $A_2 = 10$ mm und $f_2 = 1,6$ Hz enthält. Bei Schwingungen unter 1,8 Hz wird auf der Leiter II nur der Punkt C verwendet. Außerdem gilt in diesem Falle die Leiter I nicht für a , sondern für A . Der Punkt $A_1 = 20$ mm der Leiter I wird mit dem Punkte C der Leiter II verbunden. Man findet auf Leiter III $Wz_1 = 4,5$. Der Schnittpunkt des Verbindungsstrahles mit $n_1 = 0,3$ der Leiter IV ergibt auf Leiter V die Teilwertungszahl $Wz_{t_1} = 4,0$. In gleicher Weise findet man für die zweite Schwingungsgruppe $Wz_2 = 3,65$ und $Wz_{t_2} = 3,5$. Die Gesamtwertungszahl Wz_{ges} wird wie in dem ersten Beispiel gebildet und beläuft sich auf $Wz_{ges} = 4,1$.

Bei der Betrachtung von Meßstreifen stellt sich meistens heraus, daß die bei gleichem Fahrzeug und einem bestimmten Oberbau bei gleicher Geschwindigkeit aufgenommenen Schwingungen zwar erhebliche Unterschiede in ihren Amplituden, dagegen jedoch kaum Abweichungen in den Frequenzen aufweisen. Man teilt daher bei der Auswertung der Meßstreifen

die Schwingungen in Gruppen genügend klein gewählter Amplitudenstufen, die bei niedrigen Frequenzen 0,2 bis 0,3 und bei

gezeichnet. Der Schwingungsmesser war über einem Drehzapfen aufgestellt. Die Geschwindigkeit betrug 140 km/h. Da

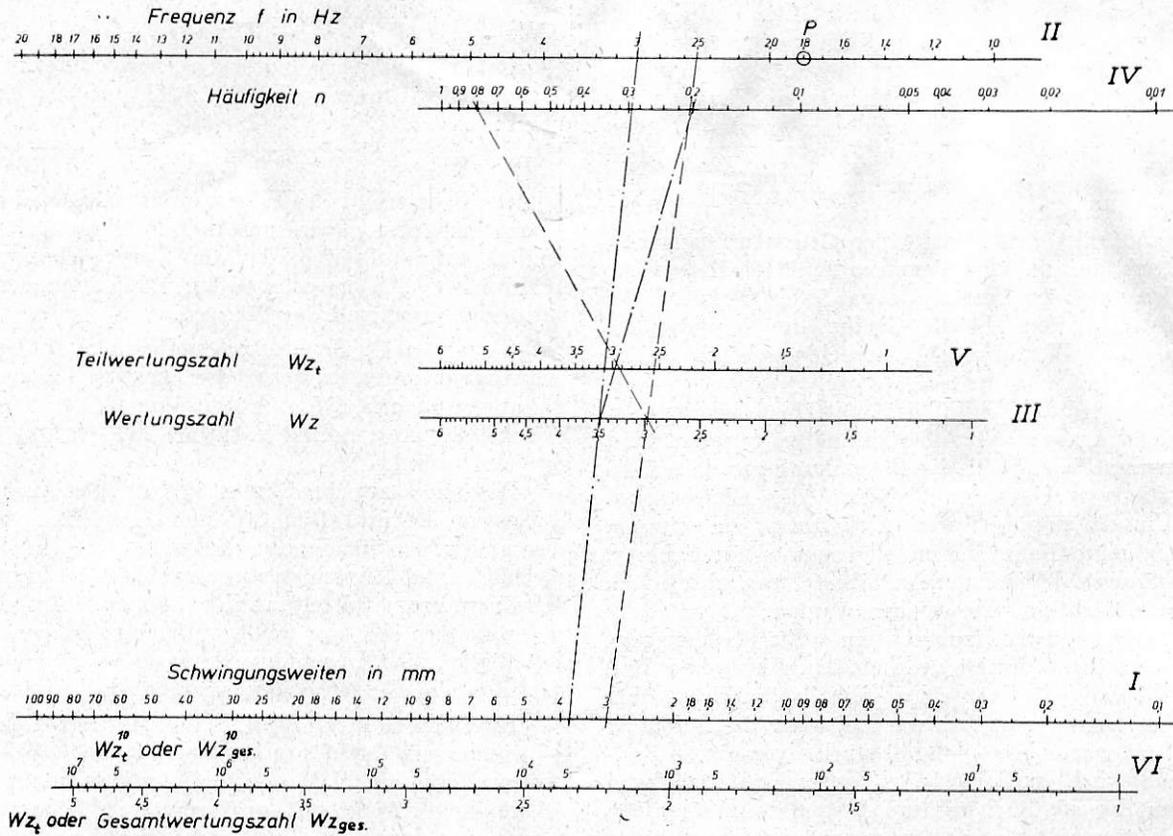


Bild 12. Leitertafel zur Ermittlung der Wertungszahl der Wagenlaufgüte.

höheren Frequenzen etwa 0,5 Wertungszahleinheiten entsprechen. Dann ermittelt man die in jeder Stufe vorkommende Anzahl von Schwingungen und kann darauf leicht die zu jeder Amplitudenstufe gehörige Häufigkeit als Anteil an allen Schwingungen errechnen.

Gelegentlich erhält man Meßstreifen, auf denen kräftige Ausschläge annähernd gleichbleibender Frequenz mit längeren Strecken abwechseln, in denen die auftretenden Schwingungen wegen ihrer Kleinheit völlig vernachlässigt oder überhaupt nicht mehr ausgewertet werden können. In einem derartigen Falle wird die Häufigkeit als Anteil an angenommenen möglichen Schwingungen verstanden. Die Anzahl der möglichen Schwingungen ergibt sich, wenn man annimmt, daß der Wagen auch auf den nahezu schwingungsfreien Streckenabschnitten mit der Frequenz der großen Ausschläge durchschwingen würde.

Zum Schluß sei die praktische Auswertung von Wagenlaufuntersuchungen in drei Beispielen an Hand von Ausschnitten aus verschiedenen Meßstreifen erläutert.

Der erste Meßstreifen (Bild 13a) stellt die Aufnahme der waagerechten Wagenkastenschwingungen eines besonders schlecht laufenden zweiachsigen Güterwagens bei $v=75$ km/h dar. Der Schwingungsmesser stand bei der Untersuchung über der letzten Achse, sein Übersetzungsverhältnis war auf 1:1 eingestellt. Es ergeben sich folgende Werte (siehe Zahlentafel 1, Seite 187).

Dem Wert $2,03 \cdot 10^6$ entspricht die Gesamtwertungszahl

$$Wz_{ges} = 4,3.$$

Im zweiten Meßstreifen (Bild 13b) wurden die waagerechten Schwingungen eines vierachsigen Personenwagens auf-

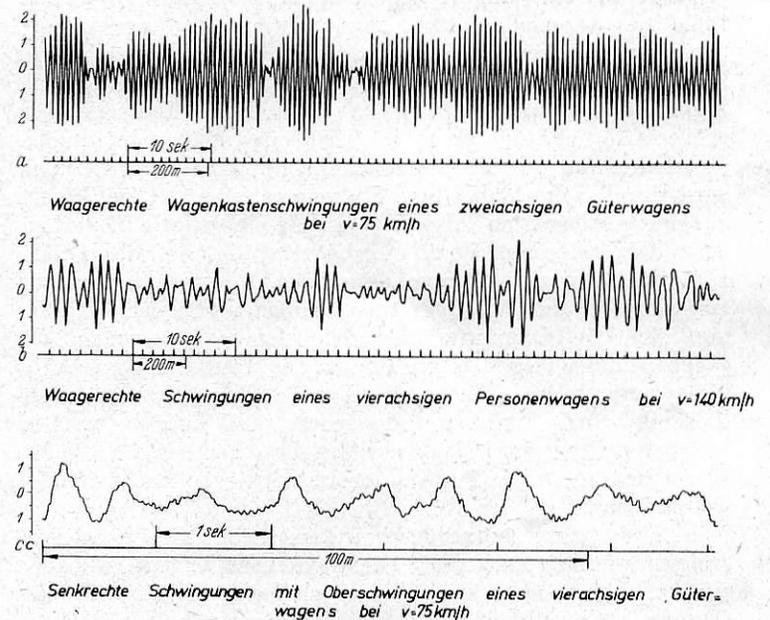


Bild 13. Schwingungsbilder.

sich das eingestellte Übersetzungsverhältnis auf 2:1 belief, sind die geschriebenen Ausschläge zu halbieren. Folgende Werte wurden ermittelt (siehe Zahlentafel 2, Seite 187).

Dem Wert $5,8 \cdot 10^4$ entspricht die Gesamtwertungszahl

$$Wz_{ges} = 3,0.$$

Der dritte Meßstreifen (Bild 13c) bezieht sich auf senkrechte Schwingungen eines vierachsigen Güterwagens. Der

Zahlentafel 1.

Stufen der Schwingungsweiten	Mittelwert	Anzahl der Schwingungen	Häufigkeit	Frequenz in Hz	Wertungszahl bei Häufigkeit 100%	Teilwertungszahl bei Häufigkeit n	Wz_t^{10}
A	A	z	n	f	Wz	Wz_t	
> 22 mm	23 mm	12	0,09	1,6	4,7	3,7	$4,7 \cdot 10^5$
22—18 „	20 „	37	0,28		4,5	3,95	$9,2 \cdot 10^5$
18—14 „	16 „	39	0,30		4,2	3,73	$5,2 \cdot 10^5$
14—10 „	12 „	18	0,14		3,9	3,16	$1,0 \cdot 10^5$
< 10 „	6,5 „	24	0,19		3,2	2,69	$0,2 \cdot 10^5$
Summe:	—	130	1,0	—	—	—	$2,03 \cdot 10^5$

Zahlentafel 2.

Stufen der Schwingungsweiten	Mittelwert	Anzahl der Schwingungen	Häufigkeit	Frequenz in Hz	Wertungszahl bei Häufigkeit 100%	Teilwertungszahl bei Häufigkeit n	Wz_t^{10}
A	A	z	n	f	Wz	Wz_t	
> 7,5 mm	9,0 mm	7	0,1	1,2	3,5	2,8	$3,0 \cdot 10^4$
7,5—5 „	6,0 „	15	0,22		3,1	2,7	$2,0 \cdot 10^4$
5—2,5 „	4,0 „	17	0,25		2,8	2,4	$0,65 \cdot 10^4$
< 2,5 „	2,0 „	28	0,43		2,2	2,08	$0,15 \cdot 10^4$
Summe:	—	67	1,0	—	—	—	$5,8 \cdot 10^4$

Schwingungsmesser stand in der Mitte des Wagens zwischen den beiden Achsgruppen. Auch hier beträgt das Übersetzungsverhältnis 2:1. Der Meßstreifen zeigt die Aufnahme einer langsam verlaufenden Grundschwingung mit heftigen Oberschwingungen höherer Frequenz. Im allgemeinen wird man bei ähnlichen Schwingungen neben der Wertungszahl jeder Schwingungsart auch noch die Gesamtwertungszahl angeben. Die Grundschwingung wird wie in den ersten beiden Bei-

spielen ausgewertet und ergibt eine Wertungszahl $Wz_{gr} = 2,9$. Bei der Auswertung der Oberschwingung bedient man sich zweckmäßig einer Auswertlupe mit zehnfacher Vergrößerung (Brinellupe), weil die kleinen Unterschiede in der Stufung mit dem bloßen Auge nicht mehr erkannt werden können. Es müssen hier Amplitudenstufen verwendet werden, die nur um 0,1 mm steigen. Für die Oberschwingung wurde gefunden:

Zahlentafel 3.

Stufen der Schwingungsweiten	Mittelwert	Anzahl der Schwingungen	Häufigkeit	Frequenz in Hz	Wertungszahl bei Häufigkeit 100%	Teilwertungszahl bei Häufigkeit n	Wz_t^{10}
A	A	z	n	f	Wz	Wz_t	
> 0,4 mm	0,45 mm	8	0,07	19,5	4,7	3,6	$3,8 \cdot 10^5$
0,4—0,3 „	0,35 „	12	0,11		4,4	3,55	$3,0 \cdot 10^5$
0,3—0,2 „	0,25 „	14	0,12		4,0	3,25	$1,0 \cdot 10^5$
< 0,2 „	0,15 „	80	0,70		3,4	3,3	$1,5 \cdot 10^5$
Summe:	—	114	1,0	—	—	—	$9,3 \cdot 10^5$

Dem Wert $9,3 \cdot 10^5$ entspricht eine Wertungszahl der Oberschwingung $Wz_o = 3,96$.

Mit der Summenleiter VI ergibt sich die Gesamtwertungszahl

$$Wz_{ges} = \sqrt[10]{Wz_{gr}^{10} + Wz_o^{10}} = \sqrt[10]{2,9^{10} + 3,96^{10}} = \sqrt[10]{4,1 \cdot 10^4 + 9,3 \cdot 10^5}$$

$$Wz_{ges} = 3,97$$

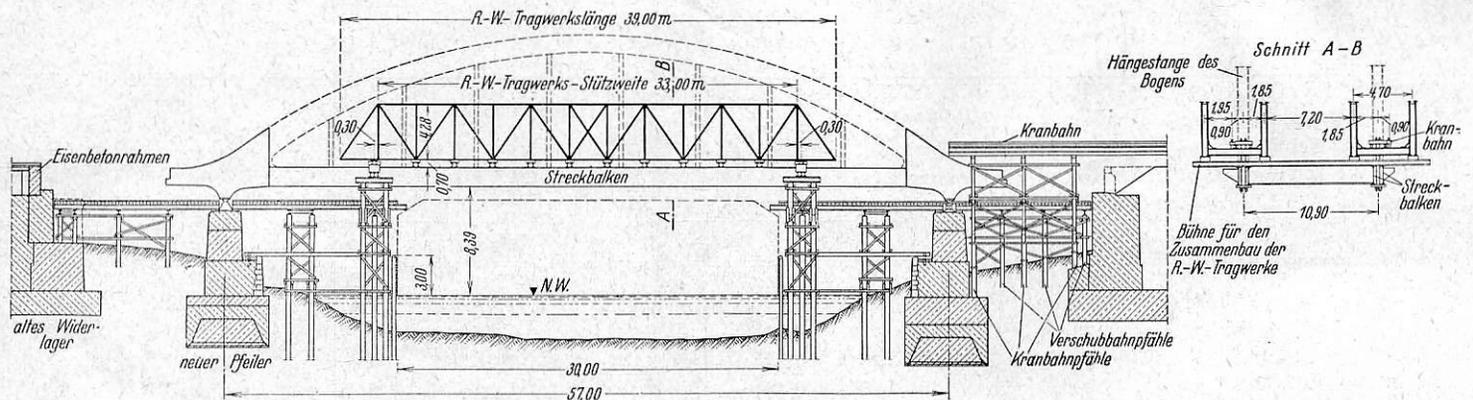
Mit dem oben beschriebenen Bewertungsverfahren werden

die Laufeigenschaften von Wagen ziffernmäßig durch zusammenfassende Urteile gekennzeichnet. Auf diese Weise kann nicht nur an einem bestimmten Fahrzeug der Einfluß baulicher Verbesserungen auf den Wagenlauf untersucht, sondern auch die Laufgüte verschiedener Fahrzeuge miteinander verglichen werden. In vielen Fällen kann man sich auf derartige Gesamturteile beschränken. Darüber hinaus müssen selbstverständlich die immer auftretenden zahlreichen Einzelfragen durch besondere Untersuchungen, deren Schilderung über den Rahmen dieses Aufsatzes hinausgeht, geklärt werden.

Rundschau.

Umbau einer zweigleisigen Eisenbahnbrücke.

Die alte Lichtweite von 80 m einer zweigleisigen Eisenbahnbrücke konnte zwar durch zwei neue Pfeiler unterteilt werden, aber die Trägerunterkante war mit Rücksicht auf die Schifffahrt um 1,06 m zu heben. Da damit umfangreiche und kostspielige Hebungen der benachbarten Strecke verbunden waren (ein Bahnhof und viele Brücken), mußte die Bauhöhe des neuen Tragwerkes möglichst klein gehalten werden, und daraus ergab sich für die Hauptöffnung trotz der kleinen Stützweite von nur 57 m ein Bogen mit angehängter Fahrbahn und steifem Zugband, der schnabelförmig in die Seitenöffnungen reicht und hier die frei aufliegenden Schleppträger aufnimmt. Damit ergab sich auch eine schönheitlich einwandfreie Lösung.



Eigenartig war der Zusammenbau des Haupttragwerkes (siehe Abbildung). Auf jedem Ufer wurde ein Teil des Streckbalkens (Zugband) auf Gerüsten hergestellt. Dann wurden beide Teile gegen den Fluß vorgezogen, der Stoß wurde freischwebend vernietet. Nun hätte der Bogen auf dem Streckbalken zusammengebaut werden sollen, was bei einer Lichtweite von 30 m für die Schifffahrt noch möglich gewesen wäre. Da aber die Arbeiten im Winter nicht beendet werden konnten, schrieb die Behörde für die Sommerschifffahrt eine Lichtweite von 35 m vor, wodurch der vorgesehene Bauvorgang wegen Überbeanspruchung des Streckbalkens unmöglich wurde. Man half sich in folgender Weise: Über beide Streckbalken wurde eine Bühne gelegt und darauf für jeden Bogen eine zerlegbare Fachwerksbrücke der Bauart Roth-Wagner zusammengesetzt. Sie ruhten auf den beiden, der Schifffahrtöffnung benachbarten Pfahljochen auf. An diese R.W.-Tragwerke wurden nun die Streckbalken angehängt und jetzt erst die beiden bogenförmigen Hauptträger aufgesetzt. Kern.

Aus Bautechnik 1940, Heft 20, S. 230.

Fernwirkanlagen im elektrischen Zugbetrieb.

Das Gebiet der elektrischen Fernwirkanlagen hat auch beim elektrischen Zugbetrieb Eingang gefunden und ist in jüngster Zeit zu größerer Bedeutung gelangt. Bei dem sich ständig vergrößernden Netz des elektrischen Bahnbetriebes war eine Stelle nicht mehr in der Lage, die gesamte Betriebslage zu überblicken, um die erforderlichen Anordnungen zu treffen. Besonders nach der Einrichtung von Lastverteilern wurde eine Übermittlung der Belastungsverhältnisse im Netz notwendig. Ein wirtschaftlicher Einsatz der Bahnkraftwerke kann nur durch weitgehende Anwendung der Fernwirktechnik erreicht werden. Den Lastverteilern fallen folgende Aufgaben zu:

- Verteilung der Wirklast auf die einzelnen Maschinen,
- Überwachung der Netzspannung und Verteilung der Blindlast,
- Anordnung des Schaltzustandes im Netz,
- Behebung von Störungen im Netz.

Um diesen Aufgaben gerecht zu werden, benötigt der Lastverteiler Angaben wie Wirk- und Blindleistung der Kraftwerke, Wirkleistung der Unterwerke, Energiefluß an markanten Fernleitungspunkten und gelegentlich noch weitere Angaben.

Die Fernwirkverfahren umfassen:

- Fernmessung,
- Fernregelung,
- Fernsteuerung.

Bei der Fernmessung ist eine elektrische oder physikalische Größe in eine für die elektrische Übertragung geeignete Form zu bringen und auf der Empfangsseite wieder in eine elektrische, optische oder akustische Form zurückzuverwandeln. Für die Fernmessung bestehen verschiedene Verfahren. Ausgangsform ist das Intensitätsverfahren. Es kommt aber für größere Entfernungen nicht in Frage. Wird an Stelle von Strom und Spannung die Frequenz als Übertragungsfaktor benützt, so kommt man zum Frequenzverfahren. Die neuere Fernmeßtechnik bedient sich

eines Verfahrens, bei dem eine Verstümmelung durch die Übertragung nicht stattfindet. Es ist das Impulsverfahren, bei dem eine Impulszahl je Sekunde dem zu übertragenden Meßwert verhältnismäßig ist. Das reine Impulsverfahren führte über das Impulszeitverfahren zu dem heute fast ausschließlich angewandten Impulsfrequenzverfahren. Die Wirkungsweise des Impulskompensationsverfahrens der AEG. und des Impulsfrequenzverfahrens von S & H. sind auf der Sendeseite in ihrer Wirkungsweise fast ohne Unterschied. Dagegen sind die Empfangsseiten beider Verfahren grundverschieden. Das Kompensationsverfahren benutzt wegen der kleineren maximalen Impulszahl ein mechanisches Empfangsgerät (Impulskompensator). Das Frequenzverfahren braucht mit seiner höheren maximalen Impulszahl ein elektrisches Empfangsgerät. Mit dem genannten Verfahren können nicht nur Augenblickswerte übertragen werden, sondern es ist auch Summenbildung möglich. Bei dieser Summenbildung spielt allerdings die Umformungsgeschwindigkeit eine Rolle. Der Anzeigewert eilt dem Ausgangswert um eine Kleinigkeit nach. Je kleiner die Nachteiligung, um so besser ist das Fernmeßverfahren für alle Aufgaben geeignet.

Als weiteres Gebiet der Fernwirkanlagen ist die Fernregelung zu nennen. Hierbei soll eine Maschine oder ein Werk nach einer bestimmten Ausgangsgröße im Netz geregelt werden. Der Unterschied zwischen Ist- und Sollwert dient zur Beeinflussung der mechanischen Regeleinrichtung.

Wichtiger als das Fernregelverfahren ist die Fernsteuerung. Die einfachste Art findet man in jedem Werk mit einer Schaltwarte. Die Fernsteuerung kann entweder handbedient oder automatisch sein. Auch hier führte die Entwicklung vom Intensitätsverfahren zum Impulsverfahren. Das Synchronwählerverfahren benutzt auf der Send- und Empfangsseite synchron umlaufende Wähler. Zur Erreichung des Synchronismus dienen Motoren oder die Anwendung eines Schrittwählers. Das Schrittwählerverfahren benutzt zum Weiterschalten des Wählers Fortschaltimpulse. Das Drehwählerverfahren ist heute durchweg an die Stelle des Synchronwählers getreten. Die Fortschaltung geschieht in der Reihenfolge: Auswahl der richtigen Schaltleitung, Prüfung der richtigen Auswahl, Richtigmeldung, Durchgeben des eigentlichen Schaltimpulses und Rückmeldung der Schaltbefehlausführung.

Die Prüfung selbst geschieht durch das Ergänzungsverfahren, die Rückwahlkontrolle oder die Spiegelbildkontrolle.

Die Übertragung des Fernwirkvorganges von der Sende- zur Empfangsstelle geschieht über den mit Übertragungskanal bezeichneten Übertragungsweg. Als Übertragungskanal kommen Drahtleitungen oder drahtlose Übertragungsverfahren in Frage. Einfachleitung mit Rückleitung über Erde, Doppelleitung, Kunstleitung als Simultanschaltung oder Phantomschaltung und schließlich Doppelleitung mit Mehr- und Vielfachausnutzung kommen für Drahtübertragung in Frage. Bei der Mehrfachausnutzung wird zur Übertragung von Trägerfrequenzen eine Fernsprechleitung benutzt. Es steht hierfür aber nur der Frequenzbereich bis zu 300 Hz. zur Verfügung. Ist die Leitung ausschließlich für Fernwirkvorgänge verfügbar, so ist Vielfachausnutzung durch Tonfrequenz gegeben. Die Erzeugung der Tonfrequenz erfolgt durch Frequenzvervielfachung, durch Elektronenröhren oder durch Tonfrequenzmaschinen. Die Tonfrequenzen werden als ungerade Vielfache der Grundfrequenz 60 Hz. gewählt, angefangen bei 420 Hz. Soweit Drahtleitungen für die Übertragung nicht zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit einer drahtlosen Übertragung. Sie ist aber nicht betriebssicher. Es bleibt noch die Hochfrequenzübertragung längs vorhandener Leitungen zu erwähnen. Der Betrieb von Hochfrequenzanlagen stößt allerdings auf mancherlei Schwierigkeiten und ist für ein ausgedehntes Bahnnetz ungeeignet.

Die Anwendung der Fernwirkverfahren erfolgt bei der Deutschen Reichsbahn sowohl bei den Gleichstrombetriebenen Stadt- und Vorortbahnen als auch bei den Einphasenwechselstrom-Fernbahnen. Bei der Stadtbahn erfolgt die Fernmessung aller Meßwerte über ein besonderes zweiadriges Schwachstromkabel nach dem Impulsverfahren. Fernregelung ist nicht vorhanden. Dagegen spielt die Fernsteuerung eine wichtige Rolle. Auf dem älteren Teil der Berliner Stadtbahn findet man das Synchronwählerverfahren, während die später in Betrieb genommene Wannseebahnstrecke mit Drehwählersteuerung ausgerüstet wurde. Die Prüfung erfolgt hier sowohl durch Ergänzungswähler und Gleichstromübertragung als auch durch Rückwahlkontrolle und Wechselstromübertragung.

Auch bei dem Einphasenwechselstrom-Fernbahnnetz hat die Fernmessung steigende Bedeutung erlangt. Die Anlagen arbeiten nach dem Impulskompensations- und Impulsfrequenzverfahren. Für die Übertragung wird von der Vielfachausnutzung eigener Schwachstromkabel durch Tonfrequenzen Gebrauch gemacht. Für Fernsprechzwecke findet auch Hochfrequenzübertragung Anwendung. Die Fernregelung ist in einigen Kraftwerken zur Einphasenstromerzeugung eingebaut. Die Fernsteuerung kommt für Einphasenwechselstrom-Fernbahnen weniger in Frage.

Bei ausländischen Eisenbahnen findet man Fernwirkanlagen in Italien im Drehstrombahnnetz für Fernmessungen, im Gleichstrombahnnetz außerdem für Fernsteuerung. 18 unbesetzte Unterwerke werden von drei Steuerstellen aus ferngesteuert.

Die französische Gleichstrombahn Paris-Le Mans ist mit einer kombinierten Fernmeß- und Fernsteuerungsanlage ausgerüstet. Fernmessung und Fernsteuerung auf der 211 km langen Strecke erfolgen über ein besonderes Fernsprechkabel mittels Tonfrequenzübertragung.

In Polen ist die Warschauer Vorortbahn mit einer Fernmeßanlage nach dem Impulskompensationsverfahren ausgerüstet. Die Holländische Bahnstrecke Rotterdam-Dordrecht bedient sich einer Fernmeß- und Fernzählanlage nach dem Impulskompensationsverfahren.

Die Londoner U-Bahn besitzt neben einer Fernmeßanlage eine Fernsteuerungsanlage für die Hochspannungs- und Anzapfschalter der Umspanner. In Nordamerika ist die Great Indian Peninsula Railway mit einer Fernsteuerungsanlage ausgerüstet, bei der die Unterwerke vom nächsten Hauptbahnhof aus gesteuert werden.

Das Anwendungsgebiet der Fernmessung ist für Gleich- und Wechselstrombahnen gleichmäßig verbreitet. Fernsteuerung wird in größerem Umfang bei Gleichstrombahnen verwendet. Die Fernregelung kommt nur für Bahnbetriebe mit bahneigenen Werken zur Ausnutzung der Vorteile der Verbundwirtschaft in Betracht.

Elektr. Bahnen, Augustheft 1940.

Verbundschienen und ihre Wirtschaftlichkeit.

Die Forderungen, die an die Eigenschaften von Schienenwerkstoff gestellt werden müssen, nämlich seine Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß und Verquetschung, seine Bruchfestigkeit auch gegen stoßweise Beanspruchung sowie seine Schweißfähigkeit haben sich bisher in einem Werkstoff nicht in dem gewünschten Maße verwirklichen lassen. Der naheliegende Gedanke, Schienen aus zwei verschiedenen Werkstoffen zusammensetzen, hat daher schon frühzeitig zu vielfachen Versuchen und Vorschlägen geführt, die aber bis zum Weltkrieg erfolglos blieben. In dem später erstarkenden Deutschland nahmen dann unabhängig von einander die Klöckner-Werke in Osnabrück und der Bochumer Verein für Gußstahlfabrikation (zuvor Phönix A.G. in Duisburg) diesbezügliche Versuche wieder auf und erreichten es auf verschiedenen Wegen, heute Verbundschienen auf den Markt zu bringen, die allen berechtigten Anforderungen in vollem Maße genügen.

Die Klöckner-Werke verwenden bei der Herstellung der Walzblöcke eine Kokille, die durch mehrere in kleinem Abstand voneinander eingesetzte Weicheisenbleche in zwei Teile geteilt ist, in die gleichzeitig Hart- und Weichstahl derartig eingegossen werden, daß beide Oberflächenpiegel in gleicher Höhe bleiben. Der nicht völlige Abschluß der Eisenbleche erlaubt, daß beiderseits flüssiger Stahl in den Raum zwischen die Bleche tritt, wobei unter Durchmischung der beiden Stahlsorten ein Zusammenschmelzen mit den Trennblechen oder ein Anschweißen an sie eintritt. Nach Erstarrung des so hergestellten Verbundblockes wird dieser wieder auf Walztemperatur angewärmt und sodann in üblicher Weise weiter ausgewalzt.

Nach dem Verfahren des Bochumer Vereins wird zuerst durch Einsatz einer starken Gußeisenzwischenwand ein Teil der Kokille in der jeweils gewünschten Form abgetrennt und hier der Hartstahl eingegossen. Wenn dieser an der Zwischenwand erstarrt, im Inneren aber noch flüssig ist, wird die Zwischenwand herausgezogen und in den verbleibenden Hohlraum der Kokille der Weichstahl eingegossen, der dann, die Oberfläche des Hartstahls wieder aufschmelzend, sich mit diesem innig verbindet. Der ungewöhnlich große Gußblock (etwa 22 t) unterliegt dann einem Schmiedeverfahren, bei dem er auf die Abmessungen eines gewöhnlichen Walzblockes gebracht wird.

Die Festigkeit der beiden Stahlsorten ist bei beiden Werken annähernd gleich und liegt bei rund 120 und 55 kg/mm².

Ein in neuester Zeit vom Bochumer Verein entwickeltes Herstellungsverfahren wird von diesem wie folgt beschrieben: Es werden unmittelbar walzbare Verbundstahlblöcke derart hergestellt, daß beim gleichzeitigen Gießen der beiden Stahlsorten und durch Ausbildung einer im Block verbleibenden besonderen Zwischenwand ein besonders günstiger Übergang und Verbund erzielt wird. Diese Zwischenwand besteht aus einem Kohlenstoff abgebenden Werkstoff, der beim Gießen durch flüssigen Stahl unter Wärmeabgabe zerstört wird. Um die Auf-



Bild 1. Schienenkopf der Klöckner-Werke.

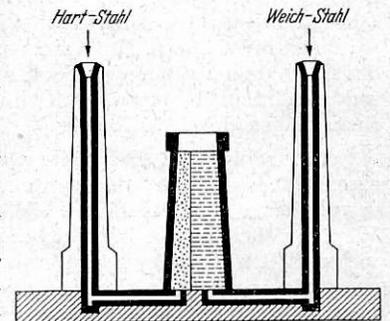


Bild 2. Kokillenguß der Klöckner-Werke.



Bild 3. Schienenkopf des Bochumer Vereins.

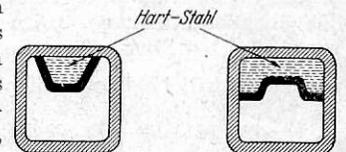


Bild 4. Kokillen des Bochumer Vereins für Rillenschienen und Vollbahnschienen.

Lösung der Trennwand und die damit verbundene Aufkühlung des weicheren Stahls zu regeln, ist der Kohlenstoffträger von zwei gelochten Blechen umhüllt, wobei durch verschiedene Größe und Anordnung der Löcher in diesen Schutzblechen in einfacher Weise der Grad des Aufkohlens der kohlenstoffärmeren Schmelze bestimmt wird.

Über die Festigkeiteigenschaften der Verbundschienen liegen Ergebnisse aus zahlreichen Werkstattversuchen, aber auch langjährigen und umfassenden Erfahrungen vor. Die Verschleißzeit von Verbundschienen beträgt nach vielfachen Erfahrungen und eingehenden statistischen Feststellungen das 3,5- bis 8fache von Siemens-Martin-Schienen mit 75 bis 85 kg/mm Festigkeit. Die Bruch-, Biege- und Verwindungsversuche zeigen außerordentlich günstige Ergebnisse. Diesbezügliche Betriebserfahrungen sind gleichfalls gut, namentlich hat sich der Zusammenhalt der beiden Werkstoffe miteinander als äußerst fest und widerstandsfähig erwiesen. Für die Schweißung von Verbundschienen wurde neuerdings ein Verfahren entwickelt, das sehr gute Ergebnisse geliefert hat. Auch war bei ihnen weder eine stärkere Neigung zu Riffelbildung noch eine stärkere Korrosion zu beobachten als bei gewöhnlichen Stahlschienen. Auf die Festigkeit von Schienen kann das Vorhandensein innerer Spannungen ungünstig einwirken. Die Zusammensetzung der Verbundschienen aus zwei verschiedenen Stoffen, deren Temperatur- und Elastizitätsdehnung verschieden sein kann, legt die Befürchtung nahe, daß solche Spannungen sich bei ihnen in erhöhtem Maße einstellen werden. In Wirklichkeit ist das nach Maßgabe eingehender Untersuchungen nicht der Fall, da wahrscheinlich die plastische Dehnbarkeit des Weichstahls innere Spannungen durch bleibende Verformung ausgleicht.

Die schwierige Herstellung von Verbundschienen bedingt einen höheren Preis, der heute im Mittel bei dem 1,85fachen gewöhnlicher Schienen liegt. Wenn dadurch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Verwendung von Verbundschienen auch in vielen Fällen nicht in Frage kommt, so bleibt für sie doch noch ein großes Gebiet, wo sie mit Schienen aus Normalstahl in erfolgreichen Wettbewerb treten können.

Die Entscheidung über die Verwendung von Verbundschienen wird heute im allgemeinen nur auf Grund gefühlsmäßiger Beurteilung ihrer Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit gefällt. Es entspricht daher einem Bedürfnis, diese Frage durch planmäßige Untersuchung zu klären.

In den nachfolgenden Vergleichsrechnungen wird der aus Verzinsung und Tilgung sich zusammensetzende und auf die Lebensdauer des Gleises gleichmäßig verteilte Kapitaldienst einer Verbundschiene und einer Normalstahlschiene gegenübergestellt. Dabei wird bezeichnet mit: R der reine Schienenpreis je Meter eines Normalstahlgleises, mit b der Baukostenfaktor, so daß $b \cdot R$ reine Baukosten je Schienenmeter bei Gleiswechselung sind einschließlich zusätzlichen Bettungsstoffs, aber ausschließlicher Kosten von ausgewechselten Schwellen und Kleineisenzeug ohne Altwert der ausgebauten Schienen. Die Nichtberechnung des Ersatzes von Schwellen und Kleineisenzeug ist zwar nicht immer berechtigt, weil oft nur durch den Schienenausbau der Ersatz notwendig wird. Im Kostenvergleich erscheint aber durch den Fehler die Normalstahlschiene günstiger als sie wirklich ist und dieser Fehler wirkt sich daher zuungunsten der Verbundschiene aus. Ferner ist $v \cdot R =$ Preis der Verbundschiene je Meter, $s \cdot R$ der Schrottpreis je Schienenmeter, $z =$ Jahreszins in Prozent, $n =$ Verschleißzeit einer Normalstahlschiene in Jahren, $m =$ Verschleiß- oder Betriebszeit einer Verbundschiene in Jahren. Endlich sind t_n und t_m die jährliche Rücklage, um nach n - oder m -Jahren den Betrag von 1 \mathcal{R} . bei Zinseszins anzusammeln. Es folgt dann:

Der jährliche Kapitaldienst einer Normalstahlschiene:

$$K_1 = \frac{z}{100} (R + bR) + t_n (R + bR - sR),$$

desgleichen einer Verbundschiene:

$$K_2 = \frac{z}{100} (vR + bR) + t_m (vR + bR - sR),$$

und das Rentabilitätsverhältnis:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{z(1+b) + 100 t_n(1+b-s)}{z(v+b) + 100 t_m(v+b-s)}$$

Wird den heutigen Verhältnissen entsprechend $z = 4,5$, $m = 3,5 n$, $v = 1,85$, $s = \frac{1}{3}$ gesetzt, so ist:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{4,5(1+b) + 100 t_n(0,667+b)}{4,5(1,85+b) + 100 t_m(1,517+b)}$$

Durch Einsetzen verschiedener Werte für b und n , wofür aus Zinstabellen t_n und t_m entnommen werden kann, erhält man die zugehörigen Werte $\frac{K_1}{K_2}$, die der Kennlinientafel Bild 5 zugrunde liegen. Zur Benutzung der Kennlinientafel sind die Aus- und

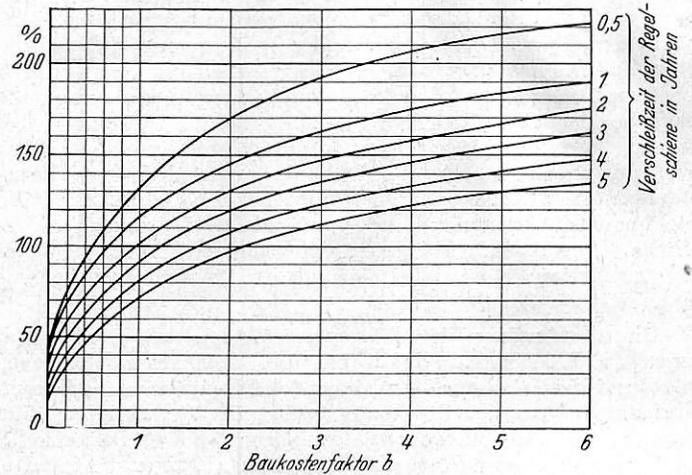


Bild 5. Mehrkosten in v. H. einer Normalstahlschiene gegenüber einer Verbundschiene, wenn diese die $3\frac{1}{2}$ fache Lebensdauer einer Normalstahlschiene erreicht.

Einbaukosten der Schienen zu ermitteln und daraus der Baukostenfaktor b , woraus sich entsprechend der Verschleißzeit der Normalstahlschiene (an der betreffenden Stelle) und der zugehörigen Kennlinie das Bild 5 ergibt, um wieviel vom Hundert teurer (billiger) kommt in dem fraglichen Bereich nicht in Frage) die Normalstahlschiene ist als die Verbundschiene.

Den Vergleich in Bild 5 über eine Verschleißzeit der Verbundschiene von mehr als etwa 20 Jahren auszudehnen, scheint zwecklos, weil darüber hinaus selten vorauszusehen ist, ob eine Umlegung des Gleises oder eine durchgreifende Ausbesserung nicht die Voraussetzungen der Vergleichsrechnung hinfällig machen können.

Die in Bild 5 nachgewiesene große Kostenersparnis bei Verwendung von Verbundschienen zeigt, daß diese auch dann noch

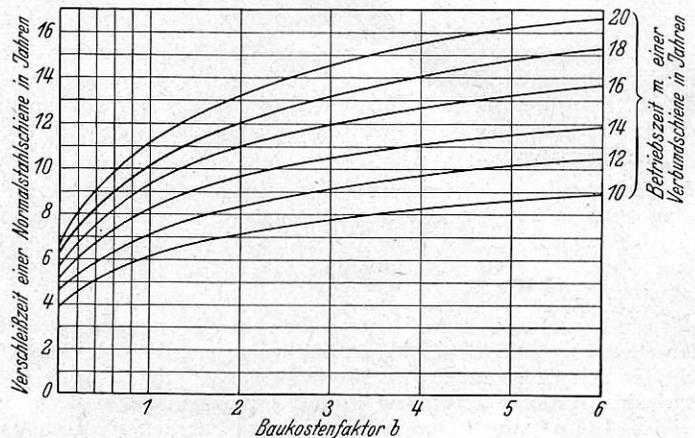
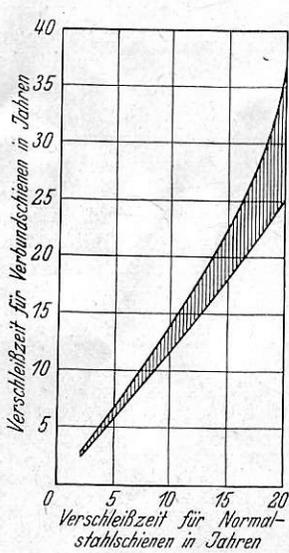


Bild 6. Rentabilitätsgleiche Lebensdauer einer Normalstahlschiene und einer Verbundschiene.

wirtschaftlich sein können, wenn sie noch vor dem völligen Verschleiß aus anderen Gründen ausgebaut werden müssen. Es wird daher eine weitere Rechnung durchgeführt, um die Liege- (nicht Verschleiß-) dauer eines Verbundschienengleises zu bestimmen, wenn dieses einem Normalstahlgleis rentabilitätsgleich ist, also

$\frac{K_1}{K_2} = 1$ wird. Die Einsetzung dieses Wertes in die für $\frac{K_1}{K_2}$ abgeleitete Formel ergibt:



$$100 t_n = \frac{3,82 + 100 t_m (1,52 + b)}{0,667 + b}$$

Die Annahme verschiedener Werte für m und b ergibt unter Benutzung von Zinseszinstabellen die zugehörigen Werte für n und die dementsprechenden Kennlinien von Bild 6. Die Verschleißzeit n der bisherigen Schienen und der durch Veranschlagung festzustellende Baukostenfaktor b bestimmen einen Punkt in Bild 6, dessen Lage auf oder zwischen den Kennlinien die Liegedauer der Verbundschienen angibt, die mindestens erforderlich ist, wenn diese der Normalstahlschiene überlegen sein soll. Man ersieht aus Bild 6, daß selbst bei kleinem Baukostenfaktor b , wie er im Eisenbahnbau zumeist vorkommen wird (während die hohen Werte von b in der Regel nur bei Straßenbahnen eintreten), auf Strecken sehrstarken Verschleißes, z. B. auf Stadtbahnen, in Tunneln, auf sehr starken Gefälls-, Brems- und Kurvenstrecken die Wirtschaftlichkeit der Verbundschiene gewährleistet sein wird, weil dafür das Durchhalten einer entsprechend längeren Betriebszeit von der Verbundschiene erwartet werden darf.

Bild 7. Rentabilitätsvergleich von Weichen in Verbund- und in Normalstahl, wenn Preis-, Bau- und Schrottfaktor zwischen den Grenzen $V = 1,19$, $b = 0,5$, $s = 0,13$, entsprechend der unteren Linie und $v = 1,23$, $b = 0$, $s = 0,19$, entsprechend der oberen Linie liegen. Die gestrichelte Fläche kennzeichnet das Gebiet der Wirtschaftsgleiche.

Auch für den Weichenbau kommt die Verwendung von Verbundschienen in Frage und es werden daher von beiden in Betracht kommenden Werken die für diesen Zweck meistgebrauchten Sonderformen als Verbundschienen gewalzt. Um auch hier

einen Vergleich der beiden Schienensorten zu ziehen, kann die vorher abgeleitete Formel für $\frac{K_1}{K_2}$ benutzt werden, wenn man den einzelnen Buchstaben die Bedeutung unterlegt, daß alle Werte sich auf die Gesamtanlage beziehen. Wird $\frac{K_1}{K_2} = 1$ gesetzt, so folgt:

$$100 t_m = \frac{z(1 - v) + 100 t_n(1 + b - s)}{v + b - s}$$

Um bei üblichen Verhältnissen allgemeine Grenzwerte festzustellen, sind für einige Weichenanlagen gängiger, aber ganz verschiedener Art Preise und Gewichte nach abgegebenen Angeboten zusammengestellt (siehe Tabelle).

Man erkennt, daß die Werte für v und s trotz großer Verschiedenheit der Weichenanlagen sich nur in engen Grenzen bewegen. Der Baukostenfaktor b wird kaum über 0,5 steigen, sich also zwischen 0 und 0,5 bewegen. Berücksichtigt man, daß aus der Formel für t_m , wie leicht ersichtlich, der größte Wert für t_m erhalten wird, wenn man für v und s die kleinsten Werte, für b den größten einsetzt, und daß aus den entgegengesetzten Grenzwerten für v , s und b der kleinste und größte Wert für t_m hervorgeht, so ist ersichtlich, daß durch Einsetzen einer Reihe verschiedener Werte von t_n in obige Formel die entsprechenden oberen und unteren Grenzwerte von t_m gewonnen werden können. Eine dementsprechende Rechnung ergibt die Kennlinien Bild 7. Der Gebrauch dieser Linien setzt voraus, daß in jedem einzelnen Falle Annahmen für die gegebenenfalls wahrscheinliche Lebens- oder Liegedauer der Weichenanlage sowohl in Normal- wie in Verbundstahl zu machen sind. Die Tatsache, daß durch Aufschweißen besonders abgenutzter Teile eine Verlängerung der Lebensdauer einer Anlage sowohl bei Normal- wie bei Verbundstahl erzielt werden kann, erschwert eine solche Schätzung, immerhin aber ist erkenntlich, daß es viele Fälle geben wird, wo die Verwendung der Verbundschiene wirtschaftlicher ist als die der Normalstahlschiene.

Wenn im Weichenbau bisher nur selten von der Verbundschiene Gebrauch gemacht wurde, dürfte daher für die Zukunft eine umfangreichere Verwendung in Aussicht stehen.

Die Verbundschiene ist als Ergebnis zäher und fleißiger Entwicklungsarbeit deutscher Technik zu betrachten. Im Ausland ist ihre Herstellung bisher noch nicht gelungen, obwohl ihr Wert, wie umfangreiche Bestellungen erweisen, dort sehr wohl erkannt ist.

Kennzahlen für ausgeführte Kreuzungs- und Weichenanlagen

1 Art der Anlage	2 Gewicht kg	3 Angebot-Preis		5 Schrott Wert RM s R	6 Verhältnis der Spalten	
		Norm. St. RM R	Verbund RM v R		4/3 v	5/3 s
		Vignolweichen				
Einfache Weiche 8 a, 1:9, R=190 m Normsp. Baulänge 27 m. Eisenschwellen, Drehzunge, Stellbock ohne Laterne. Alles Zubehör mit Endlaschen	11 100	2 760	3 340	530	1,21	0,19
Einfache Weiche S 49, 1:9, R=190 m Normsp. Baulänge 27 m. Eisenschwellen, Federzunge, Stellbock mit Laterne. Alles Zubehör mit Endlaschen	13 850	4 300	5 100	660	1,19	0,15
Doppelte Kreuzungsweiche S 49, 1:9, R=190 m Normsp. Baulänge 33 m. Eisenschwellen, Gelenkzungen, Stell- und Signalböcke mit Laterne. Alles Zubehör mit Endlaschen	24 900	8 300	10 170	1 200	1,23	0,14
Doppelte Kreuzungsweiche S 49, 1:9, R=300 m Normsp. Baulänge 45 m. Eisenschwellen, Gelenkzungen, Stell- und Signalböcke ohne Laterne. Alles Zubehör mit Endlaschen	38 700	14 520	17 645	1 850	1,22	0,13

Verschiedenes.

60 Jahre elektrische Straßenbahn.

Am 16. Mai d. J. jährte sich zum 60. Male der Tag der Betriebseröffnung der ersten dem öffentlichen Verkehr dienenden elektrischen Straßenbahn der Welt.

Diese 2,45 km lange meterspurige Bahn wurde rund zwei Jahre, nachdem Werner von Siemens auf der Berliner Gewerbeausstellung des Jahres 1879 die bekannte kleine Rundbahn in Betrieb gesetzt hatte, mit einfachsten Mitteln in Groß-Lichterfelde gebaut, als der Versuch, die Genehmigung zum Bau einer elektrischen Hochbahn in der Friedrichstraße in Berlin zu erhalten, im Jahre 1880 wegen zu großer Widerstände aufgegeben werden mußte. Die für die geplante Hochbahn vorgesehene Ausführung wurde im wesentlichen beibehalten, so auch die Verwendung der voneinander isolierten Fahrschienen zur Strom-Hin- und Rückleitung. Dieses war auch bei der Lichterfelder Bahn möglich, da sie auf eigenem Bahnkörper errichtet werden konnte und nur die geringe Spannung von etwa 150 V vorgesehen war. Zur Isolation dienten lediglich die Holzschwellen, also keine besondere Isolation, obgleich man für die Hochbahn die Verwendung von Glas- oder Schlackenschwellen oder von Hartglas-Schienenstühlen zur Verbesserung der Isolation in Erwägung gezogen hatte. Der Isolationswiderstand der beiden Fahrschienen gegeneinander war dann auch nicht sehr groß; er betrug je nach den Witterungsverhältnissen 5,5 bis 7,5 Ohm (oder etwas mehr). Verhältnismäßig große Leckströme mußten daher auftreten, so daß es keineswegs sicher erschien, ob die Bahn auch bei schlechtem Isolationswiderstand betrieben werden konnte. Groß war daher die Freude, als sich später heraus-

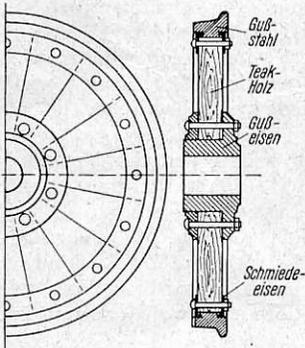


Bild 1.

stellte, daß auch bei Regenwetter ein sicherer Betrieb möglich war und ungefähr die gleichen Geschwindigkeiten erreicht wurden wie bei gutem Wetter.

Auch die Räder des Triebwagens mußten voneinander und vom Fahrgestell des Wagens isoliert sein, was durch Verwendung von Holzscheibenrädern (Bild 1) erreicht wurde. Diese Holzscheibenräder hatten dabei noch den Vorteil, daß sie geräuschkämpfend wirkten, was für die Lichterfelder Bahn ohne Bedeutung war, aber für die geplante Hochbahn von großem Vorteil gewesen wäre.

In dem Triebwagen war ein quergelagerter Hauptstrommotor (eine Siemenssche D-Maschine) eingebaut, der beide Achsen mittels Drahtspiralschnüren antrieb. Einfache Walzenschalter nebst Widerständen vervollständigten die elektrische Ausrüstung. Die Fahrtrichtung wurde bei dieser Bahn im Gegensatz zur Ausstellungsbahn, die ein Umkehrgetriebe verwendete, erstmalig durch Umschalten des Motors gewechselt, und zwar wurde die Stromrichtung im Anker umgekehrt. Der Motor hatte eine Leistung von etwa 5 PS bei einer Geschwindigkeit von 15 km/h und war in stande, dem Fahrzeug von etwa 3,3 t Leergewicht und etwa 4,8 t Höchstgewicht (wovon 500 kg auf den Motor entfielen) auf ebener gerader Strecke eine Geschwindigkeit von 25 bis 30 km/h zu erteilen, während nur eine Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h behördlich zugelassen war.

Ursprünglich bestand die Absicht, immer nur einen Wagen verkehren zu lassen. Schon 1882 wurde aber der Versuch gemacht, gleichzeitig zwei Wagen in Betrieb zu nehmen; dabei stellte sich heraus, daß die Geschwindigkeit nur wenig niedriger war als bei einem Wagen. Ein großes Ereignis für die damalige Zeit. Auch der Versuch, mit zwei zusammengeschalteten Triebwagen zu fahren (1. Oktober 1882) und beide Wagen vom vorderen Führerstand aus mittels einer mechanischen Kupplung der Fahrschalter der beiden Wagen zu steuern, führte zu einem vollen Erfolg.

Zur Stromversorgung diente ein in der Wasserpumpstation in Lichterfelde aufgestellter Hauptstromgenerator, der je nach Belastung eine Spannung bis 150 V erzeugte. Schwierigkeiten traten im Anfang dadurch auf, daß die Straßenjugend es bald heraus hatte, sich durch Herstellung von Kurzschlüssen, indem sie über

beide Fahrschienen Drahtenden legte, in angenehmster Weise die Zeit zu vertreiben, aber auch dann, wenn Pferde an den Straßenkreuzungen zufällig beide Schienen gleichzeitig berührten und zu Fall kamen. Die Kreuzungsstellen mußten daher von der übrigen Strecke isoliert und stromlos befahren werden; später wurde sie aber durch Schütze während der Zeit des Befahrens unter Spannung gesetzt.

Obgleich die Bahn nur zu Versuchszwecken gebaut wurde und nur eine Versuchszeit von zwei Jahren vorgesehen war und außerdem während dieser Zeit andere Bahnen mit oberirdischer Stromzuführung entstanden, ist sie mit vielen Änderungen und einigen Erweiterungen rund 49 Jahre in Betrieb gewesen. Bei der ersten Erweiterung im Jahre 1890 wurde für die Erweiterungstrecke von etwa 1,4 km Länge eine Stromzuführung durch Oberleitung ge-

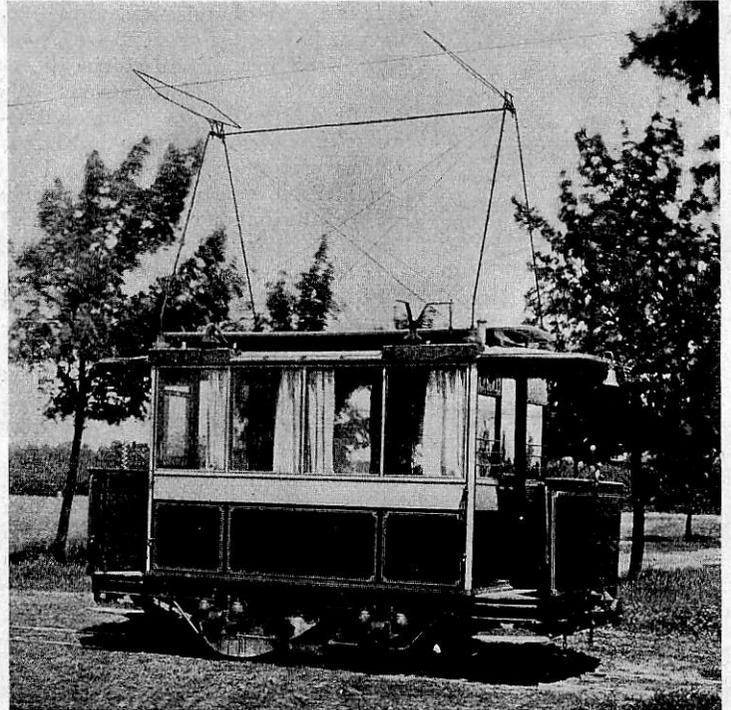


Bild 2.

wählt und der erste Bügelabnehmer (Bild 2) eingeführt. Die alte Strecke wurde daraufhin 1893 umgebaut und ebenfalls für Bügelbetrieb eingerichtet. Auch dieses System der Stromabnahme, das in den folgenden Jahren seine Überlegenheit über das in Amerika entwickelte System mit Rollenstromabnehmern erwies, hat also in Lichterfelde seinen Ursprung.

Die Bahn ging am 1. April 1906 in den Besitz des Kreises Teltow über und nach der Gründung von Groß-Berlin an die Berliner Verkehrs-Gesellschaft. Am 15. Februar 1930 wurde dann der Betrieb auf dieser meterspurigen Strecke eingestellt.

Viel ist in den 60 Jahren, die seit der Betriebseröffnung dieser ersten elektrischen Bahn in Lichterfelde vergangen sind, auf dem Gebiet der elektrischen Zugförderung erreicht worden. Neue Nahverkehrsmittel wurden entwickelt, die mit der elektrischen Straßenbahn in Wettbewerb traten. Die Leistungsfähigkeit der elektrischen Straßenbahn wurde aber stets verbessert, was am besten daraus hervorgeht, daß die eingebaute elektrische Motorleistung von etwa 1 kW/t bei der Lichterfelder Bahn auf etwa 10 kW/t bei den neuzeitigen Straßenbahnwagen erhöht wurde. So ist es der elektrischen Straßenbahn gelungen, auch heute noch das leistungsfähigste und wirtschaftlichste Nahverkehrsmittel des Oberflächenverkehrs zu sein, besonders geeignet für den Massenverkehr. Aber auch im Stadtschnell-, Vorort- und Fernverkehr hat sich der elektrische Betrieb einen führenden Platz errungen; er ist allen anderen Betriebsarten überlegen, wenn es sich um große Leistungen und große Geschwindigkeiten handelt. W.

Der Wiederabdruck der in dem „Organ“ enthaltenen Originalaufsätze oder des Berichtes, mit oder ohne Quellenangabe, ist ohne Genehmigung des Verfassers, des Verlages und des Herausgebers nicht erlaubt und wird als Nachdruck verfolgt.