

### Die Verarbeitung der Kraftangriffe in hölzernen Eisenbahnschwellen.

(2. Teil der Versuchsergebnisse.)

Von Prof. Dr. Ing. Carl Pirath, Stuttgart.

Hierzu Tafel 17.

#### I. Einführung.

In meiner Abhandlung „Die Verarbeitung der Kraftangriffe in hölzernen Eisenbahnschwellen“ im Org. Fortschr. Eisenbahnwes. Heft 5, 1932 habe ich über das Versuchsprogramm zur Untersuchung des Arbeitsvermögens des Schwellenholzes nähere Mitteilung gemacht und den ersten Teil der Versuchsergebnisse bekanntgegeben. Diese Ergebnisse bezogen sich auf den Teil A: Statische Versuche und Teil B: Vorversuche für die dynamischen Versuche, während die Ergebnisse zu Teil C: Dynamische Versuche und Teil D: Prüfung der Widerstandsfähigkeit der verschiedenen Schwellenarten gegen Fäulniserscheinungen am Bohrloch noch nicht vorlagen. Inzwischen sind die Untersuchungen abgeschlossen worden.

Während mit den zur Verfügung stehenden Mitteln der Teil C ganz erledigt werden konnte, war die Finanzierung der Versuche für Teil D wegen der zunehmenden schwierigen Wirtschaftslage nicht mehr in vollem Umfange möglich, so daß diese Versuche nicht durchgeführt werden konnten. Die Versuchsergebnisse zum Teil C lassen jedoch gewisse Rückschlüsse auf die Bedeutung der Fäulniserscheinungen am Borloch zu, so daß der Teil D wenigstens in seiner Wichtigkeit für das Arbeitsvermögen des Schwellenholzes und die Haftfestigkeit der Schwellenschrauben beurteilt werden kann. Die Versuche wurden in der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart durchgeführt, wobei für die Lösung der z. T. schwierigen versuchstechnischen Fragen wie beim ersten Teil die Mitarbeit der Herren Professor O. Graf, Leiter der Versuchsabteilung für Bauingenieurwesen, Dipl.-Ing. F. Kauffmann, Regierungsbaumeister G. Wattenberg und später E. Haigis besonders wertvoll war.

#### II. Versuchsmethode zu Teil C: Dynamische Versuche.

Der Zweck der dynamischen Versuche war, festzustellen

1. den Verlauf der Schraubenspannkraft unter betriebsmäßiger Belastung des Oberbaus nach 10 bis 15 Jahren,
2. das Verhalten der Unterlegplatte unter betriebsmäßiger Belastung des Oberbaus nach 10 bis 15 Jahren.

Es konnten für die Punkte 1 und 2 die gleichen Versuchsmethoden angewendet werden.

##### 1. Die Versuchsanlage.

Es war die Aufgabe zu lösen, das Verhalten der Schraubenspannkraft, der Unterlegplatte und der Schwellen des Oberbaus bei betriebsmäßiger Belastung nach 10 bis 15 Jahren auf Grund von Laboratoriumsversuchen zu untersuchen. Demnach waren Dauerversuche mit geeigneten Dauerversuchsmaschinen durchzuführen, die soweit als möglich den tatsächlichen Verhältnissen des Betriebs nahekamen. Aus diesem Grund mußten von den Elementen, die die Schraubenspannkraft sowie die Betriebstüchtigkeit und das Lebensalter der hölzernen Eisenbahnschwellen im wesentlichen beeinflussen und bestimmen, möglichst viele im Dauerversuch wirksam

werden. Während die Angriffe der bewegten Lasten und Kräfte des Eisenbahnbetriebs nach Richtung und Größe weitgehend, wenn auch nicht vollkommen nachgeahmt werden konnten, mußte von vornherein zum großen Teil auf die Einwirkung der wechselnden Witterungseinflüsse von Regen, Sonnenschein und Frost verzichtet werden. Wohl war es möglich, zur Nachahmung des Regens und Sonnenscheins die Schwellen während des Dauerversuchs, der für jeden Versuchskörper  $1\frac{1}{2}$  bis 2 Monate dauerte, abwechselnd naß und trocken zu machen, aber es war naturgemäß der zeitliche Faktor von 10 bis 15 Jahren und der ständige starke Wechsel bei den Witterungseinflüssen in keiner Weise nachzuahmen. Die Dauerversuche mußten weiterhin auf die Rollwirkungen der bewegten Lasten, die sich aus der verschiedenen Höhenlage belasteter und unbelasteter Gleisteile ergeben, verzichten, da sonst die Versuchsmaschine zu verwickelt geworden wäre. Unbedingt notwendig war es aber, wenn die Dauerversuche überhaupt einen Wert haben sollten, die Lastwechsel, denen das Gleis im Betriebe in 10 bis 15 Jahren unterworfen wird, im Versuch nachzuahmen. Die Nachahmung der senkrechten Lastkraftwechsel gestaltete sich dabei wesentlich einfacher als die der waagerechten Lastkraftwechsel, die sich aus den Schlingerbewegungen der Fahrzeuge ergeben. Doch konnte schließlich die Versuchseinrichtung für beide Belastungsarten aufgebaut werden. Um das Verhalten des Oberbaus unter rein senkrechter Belastung sowie unter senkrechter nebst waagerechter Belastung zu untersuchen und die Bedeutung beider Kraftwirkungen zu erkennen, wurden die Versuchskörper beiden Belastungsfällen in der Dauermaschine zu bestimmten Zeiten unterworfen.

Die für die Versuche zugrunde gelegte Lastwirkung zwischen Rad, Schiene und Schwelle wurde unter Bezug auf die Ausführungen in der ersten Abhandlung ermittelt zu

4,2 t senkrechter Druck  
und 1,7 t waagerechter Druck.

Die für ein Betriebsjahr aufzubringenden Lastwechsel wurden bemessen nach den durchschnittlichen betrieblichen Belastungen im Jahr auf den Hauptgleisen der Deutschen Reichsbahn. Im Jahre 1929 waren die Hauptbahnen der Reichsbahn durchschnittlich täglich belastet mit

300 Personenwagen zu je 3 Achsen	=	900 Achsen
1000 Güterwagen zu je 2,1 Achsen	=	2100 Achsen
		<hr/>
		3000 Achsen

Da von den Hauptbahnen  $\frac{2}{3}$  zweigleisig und  $\frac{1}{3}$  eingleisig sind, so beträgt die jährliche Belastung eines Gleises:

$$\frac{3000}{1,67} = 1800 \text{ Achsen oder Lastwechsel täglich}$$

und  $1800 \cdot 340 = 610000$  Achsen oder Lastwechsel jährlich.

Auf stark belasteten Strecken liegen naturgemäß die Lastwechsel über dieser Zahl und steigen im allgemeinen bis zu 1,2 Millionen, doch kann aus dem Verhalten des Oberbaus bei durchschnittlichem Lastwechsel das Verhalten auf Strecken mit höherem Lastwechsel abgeleitet werden. Für eine Betriebs-

zeit von 10 bis 15 Jahren waren demnach in den Versuchsmaschinen die Versuchskörper

10.610000 bis 15.610000

oder 6,1 Millionen bis 9,25 Millionen Lastwechseln zu unterwerfen.

Schwieriger war die Frage zu lösen, in welcher Form der Oberbau den Dauerversuchen zu unterwerfen sei, ob mit oder ohne Schotterbett, da ein den tatsächlichen Verhältnissen entsprechendes Schotterbett die Dimension der Versuchsmaschine stark beeinflusste und teure Maschinen erforderte. Äußerste Beschränkung in der Verwendung der zur Verfügung stehenden Geldmittel zwang dazu, auf vorhandene Versuchsmaschinen der Materialprüfungsanstalt zurückzugreifen. Sie waren für die Art des Versuchs maßgebend. Es standen zunächst nur Dauerversuchsmaschinen zur Verfügung, die einen Einbau eines Schotterbetts nicht zuließen. Erst später konnte gelegentlich der Versuche über Zertrümmerung von Bettungstoffen unter den Betriebslasten der Eisenbahnen\*) ein vollständiger Oberbaukörper einschließlich Bettung einer Dauer-

lastung. Bei beiden Maschinen wirkt die Belastung auf einen Querbalken, der aus einem Schienenstück bestand, und von diesem auf die Mitte der Schienenköpfe der Versuchskörper. Die Belastung wurde durch den Pulsator erzeugt und mittels Drucköl auf die Prüfmaschine übertragen\*). Auf diese Weise konnten gleichzeitig zwei Versuchskörper den Dauerversuchen unterworfen und damit Kosten gespart werden. Die 60 cm langen Schwellenabschnitte lagern je auf zwei Stahlwalzen mit 50 cm Auflagerentfernung entsprechend dem theoretischen Druckmittelpunkt der Schwellen im Schotterbett. Zwischen den Stahlwalzen und dem Schwellenholz sind zur genügenden Druckverteilung 6 cm breite Flacheisen angeordnet. Dadurch wurde erreicht, daß die Nachgiebigkeit des Bettungstoffes bei Belastung genügend nachgeahmt wird und die elastische Verteilung des Schotterdrucks in den Schwellen sich den Verhältnissen des Betriebes weitgehend anpaßt.

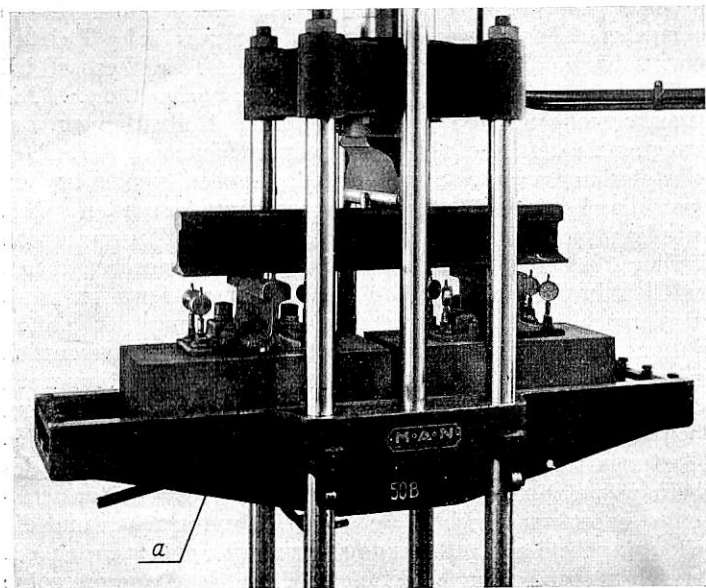


Abb. 1. Versuchseinrichtung für senkrechte Dauerbelastung.

belastung unterworfen und dabei auch das Verhalten der Schraubenspannkräfte und Schwellen unter den Betriebslasten festgestellt werden. Es konnte aber bei diesem letzten Versuch mit Rücksicht auf die beschränkten Mittel nur die Prüfung von zwei Holzschwellen durchgeführt werden.

Gemäß dem Sinn und dem Ziel des Versuchsprogramms waren dem Dauerversuch die gleichen Schwellen und Befestigungsmittel zu unterwerfen, die auch bei den statischen Versuchen verwendet worden waren. Demnach waren Versuchskörper für verdübelte und unverdübelte Schwellen herzurichten. Als Oberbauform wurde der neue Reichsoberbau K gewählt. Da das Verhalten von vier Schwellenarten: unverdübelten Kieferschwellen, mit Einschlagdübel und Schraubdübel verdübelten Kieferschwellen und unverdübelten Buchenschwellen zu untersuchen war, waren vier Versuchskörper, bestehend aus der Schiene, dem Pappelholzplättchen, der Unterlegplatte, den Klemmschrauben, Schwellenschrauben und der Schwelle herzurichten.

Die Versuchseinrichtung für die ohne Schotterbett durchgeführten Versuche zeigt Textabb. 1 für senkrechte Belastung und Textabb. 2 für senkrechte nebst waagerechte

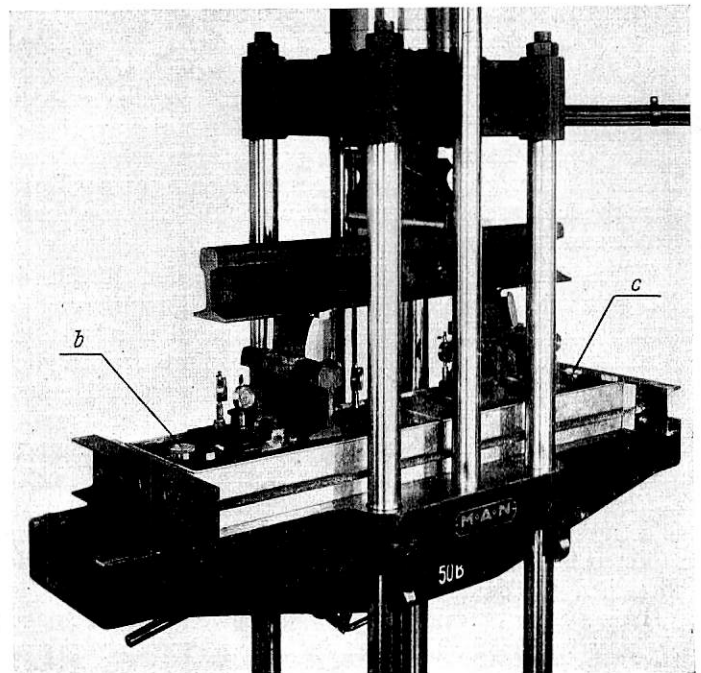


Abb. 2. Versuchseinrichtung für senkrechte und waagerechte Dauerbelastung.

Die in Textabb. 1 in der Versuchsmaschine aufgebauten Versuchskörper haben Buchenschwellen ohne Dübel bzw. Kieferschwellen mit Einschlagdübeln üblicher Form. In der Versuchsmaschine der Textabb. 2 sind Kieferschwellen mit Schraubdübeln üblicher Form bzw. Kieferschwellen ohne Dübel eingebaut. Der in Textabb. 2 noch zu erkennende Umbau der Versuchskörper ist lediglich angebracht, um die Prüfmaschine vor den unerwünschten Einwirkungen des zur Anfeuchtung der Schwellen nötigen Wassers zu schützen. Die horizontale Kraft, die auf die Versuchskörper wirken soll, wurde in der Maschine der Textabb. 2 durch ein schräg gestelltes Zwischenglied zwischen Schiene und Belastungsbalken nachgeahmt. Dieses Zwischenglied ist so angebracht, daß der Angriffspunkt der Horizontalkraft am Schienenkopf der Wirklichkeit entspricht. Die Schrägstellung des Zwischenglieds ergab sich aus der Überlegung, daß im allgemeinen die horizontalen, aus Schlingerbewegungen sich ergebenden Kräfte 25% der senkrechten Kräfte betragen. In der Maschine konnten nur die nach außen wirkenden Horizontalkräfte am Schienenkopf nachgeahmt werden, nicht die im Gleis nach innen wirkenden. Die Nachahmung der letztgenannten Kräfte

\*) C. Pirath, „Versuche über die Zertrümmerung von Bettungsschotter unter den Betriebslasten der Eisenbahn“ in Org. Fortschr. Eisenbahnwes., Heft 23, Jahrg. 1932.

\*) O. Graf, „Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut.“ VDI-Verlag 1931.

hätte die Maschine außerordentlich kompliziert, ohne daß wesentlichere Ergebnisse für den Dauerversuch erzielt worden wären.

Die Versuchskörper sind mit besonderen Meßeinrichtungen ausgerüstet, die dem Messen der Spannkraft der Schwellenschrauben während des Dauerversuchs dienen, sowie der Feststellung der Verschiebungen der Unterlegplatte in senkrechter und waagerechter Richtung. Zum Messen der Schraubenspannkraft wurden sogenannte Meßschrauben verwandt. Es sind dies Schwellenschrauben aus Chromnickelstahl, die mit einer Meßuhr und mit einem Meßdraht besetzt sind, der in der ausgebohrten Schwellenschraube die Dehnungen der Schraube mitmacht und sie auf die Meßuhr überträgt. Durch besondere Versuche wurden die Meßschrauben geeicht auf das Verhältnis der Dehnungen zu den mit ihnen proportional verlaufenden Spannungen.

Das meßbereite Einbringen der Meßschrauben in den Probekörper erfolgte in der Weise, daß mit dem Aufsetzen des Schraubenkopfes auf die Unterlegplatte, also von dem Augenblick an, bei dem die Schraube bei ihrem Eindrehen die Verspannung der Unterlegplatte mit der Schwelle einleitete, die Dehnung der Schraube gemessen und bis zum festgesetzten Eindrehmoment von 35 m/kg an der Meßuhr abgelesen wurde. Die weiteren Anzeigen der Meßuhr im Verlauf der Dauerversuche wurden dann auf diesen Meßuhrstand ständig bezogen, so daß der Wechsel der Schraubenspannungen hieraus genau abgeleitet werden konnte.

Um die Einsenkungen der Mitte der Unterlegplatte gegenüber der Schwellenoberkante zu messen, wurde eine Meßmarke a (Textabb. 1) angebracht. Zur Messung der seitlichen Bewegung der Unterlegplatte wurden die Meßstellen b und c (Textabb. 2) eingerichtet.

Die Versuchsanordnung für den Dauerversuch mit Schotter ist in Textabb. 3 entsprechend der Abb. 1 meiner Abhandlung im Org. Fortschr. Eisenbahnwes. H. 23, 1932 wiedergegeben. Da es sich bei dieser Dauerversuchseinrichtung in erster Linie um die Ermittlung der Zertrümmerung des Schotters unter eisernen und hölzernen Schwellen handelte, konnten nur zwei Probekörper mit Holzschwellen untersucht werden. Es waren dies Kiefernswellen mit Einschlag- und Schraubdübeln, damit nochmals das Verhalten dieser Schwellenarten geprüft werden konnte.

## 2. Die Versuchsdurchführung.

Zur Festlegung der betriebsmäßigen Belastung und ihres Einflusses auf das Verhalten des Oberbaus wurde grundsätzlich davon ausgegangen, die Zahl der Lastwechsel in der Minute nach den äußersten Fällen betrieblicher Bewegungen der Fahrzeuge zu bemessen. Zwischen den Versuchsergebnissen dieser äußersten Fälle liegt dann das normale Verhalten des Oberbaus, soweit es in dem Laboratoriumsversuch erfaßt werden kann. Als äußerster Fall nach oben wurde zunächst eine höchste Zuggeschwindigkeit von 125 km/h und als äußerster Fall nach unten die mittlere Rangiergeschwindigkeit von 12 km/h gewählt. Da sich bei Versuch 1 ergab, daß 125 km/h eine sehr schnelle Aufeinanderfolge der Lastwechsel mit sich brachte und das Material nur sehr schwer in seinem elastischen Verhalten folgen konnte, wurde für den Versuch 2 eine kleinere Geschwindigkeit von 95 km/h gewählt. Auf diese Weise konnte auch eine weitere und zwar dritte Versuchsstufe eingeschaltet werden zur Beurteilung des Verhaltens des Oberbaus in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge.

Unter Zugrundelegung eines Achsabstandes von 4,5 m ergeben sich dann bei

Versuch 1 für  $v = 125 \text{ km/h} = 466$  Lastwechsel in der Minute,

Versuch 2 für  $v = 95 \text{ km/h} = 350$  Lastwechsel in der Minute,

Versuch 3 für  $v = 12 \text{ km/h} = 43$  Lastwechsel in der Minute.

Dem Belastungswechsel nach Versuch 1 wurden unverdübelte Buchenschwellen und Kiefernswellen mit Einschlagdübeln unterworfen (Textabb. 1), dem Belastungswechsel nach Versuch 2 unverdübelte Kiefernswellen und Kiefernswellen mit Schraubdübeln (Textabb. 2) und schließlich dem Belastungswechsel nach Versuch 3 Kiefernswellen mit Einschlag- und Schraubdübeln (Textabb. 3).

Die Herrichtung der Probekörper für den Dauerversuch mußte so erfolgen, daß alle Schwellen und Schwellen-

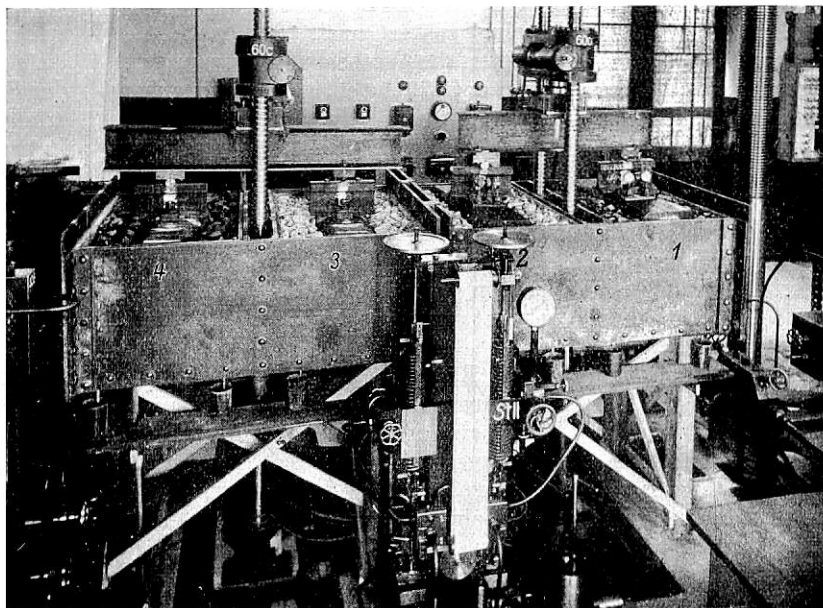


Abb. 3.

Versuchseinrichtung mit Schotterbettung für senkrechte Dauerbelastung.

schrauben möglichst gleichen Bedingungen unterworfen wurden. Hierzu war es notwendig, alle Schwellenschrauben mit dem gleichen Drehmoment von 35 m/kg, das auf Grund der früheren Versuche dem höchst zulässigen Drehmoment des nachgiebigsten Schwellenholzes entspricht, einzubringen. Weiterhin mußten die gesamten Spannkraft der vier Schwellenschrauben für jeden Versuchskörper gleich sein und zusammen 8000 kg betragen, was nach den früheren Vorversuchen für die ungünstigste Holzart ohne Überbeanspruchung erreichbar ist. Daß hierbei die Festigkeit vor allem des Buchenholzes nicht genügend für die Schraubenspannkraft ausgenutzt ist, ist erklärlich, aber es mußten, um brauchbare Vergleiche für das Nachlassen der Schraubenspannkraft zu erhalten, die gleichen Drehmomente und die gleichen gesamten Spannkraft der vier Schrauben zugrunde gelegt werden.

Die Vorversuche zu den dynamischen Versuchen hatten ergeben, daß die Schraubenspannkraft nach dem Einbringen der Schrauben in die Schwellen selbsttätig bis zu einem gewissen Grade abklingen. Um dieses Abklingen der Schraubenspannkraft unmittelbar aus den Dauerversuchen auszuschalten, wurden die Probekörper 8 bis 14 Tage in einem geschlossenen Raum gelagert, bis die Schraubenspannkraft zur Ruhe gekommen waren. Dann erst wurden die Probekörper in die Dauerversuchsmaschine eingebaut und den Dauer-

versuchen unterworfen. Während der gesamten Versuchszeit war dafür gesorgt, daß stets die gleiche Temperatur in den Versuchsräumen vorhanden war und auch das zum Anfeuchten der Schwellen benutzte Wasser dieser Temperatur entsprach, um Temperaturspannungen in den Schrauben möglichst zu verhindern.

Da sich bei früheren Zugversuchen gezeigt hatte, daß die für die Haftfestigkeit der Schwellenschrauben kritische Verbindung bei verdübelten Schwellen zwischen Dübel und Schwelle und nicht zwischen Schraube und Dübel liegt, wurde die Oberkante der Dübel 2 bis 3 mm unter die Schwellenoberkante gelegt, so daß die Haftfestigkeit zwischen Dübel und Schwelle maßgebend und wirksam für die Schraubenspannkkräfte, die auf die Unterlegplatte wirken, werden konnte.

Die Versuchsdurchführung vollzog sich bei allen Versuchseinrichtungen grundsätzlich so, daß bei jedem Lastwechsel der Oberbau mit 4200 kg belastet und bis auf 250 kg entlastet wurde. In bestimmten Zeitabständen, anfangs nach 500000 Lastwechseln, später nach durchschnittlich 1000000 Lastwechseln, wurden die Wechselbelastungen unterbrochen und die Probekörper auf 42,5 kg entlastet entsprechend dem halben Gewicht des Querbalkens. In diesem entlasteten Zustand wurden die Meßuhren abgelesen und daraus die vorhandenen Schraubenspannkkräfte berechnet. Ferner wurden die bleibenden Einsenkungen der Mitte der Unterlegplatte gegenüber der Schwellenoberfläche und die waagerechten Verschiebungen der Unterlegplatte gemessen. Anschließend wurden dann jedesmal die Probekörper mit 4200 kg ruhend belastet und die gleichen Ablesungen vorgenommen.

Zur Nachahmung der Einwirkungen des Regens auf den Zustand des Oberbaus wurden bei dem Versuch 1 (Textabb. 1) nach 11,5 Millionen Lastwechseln die Probekörper aus der Prüfmaschine herausgenommen und 17 Stunden ganz in Wasser gelegt (Wasserlagerung). Dann wurden sie in diesem feuchten Zustand einer weiteren Wechselbelastung unterworfen unter ständigem regelmäßigen Anfeuchten der oberen Schwellenflächen (Wasserzugabe). Nach dreitägiger Dauerbelastung oder nach insgesamt 13,4 Millionen Lastwechseln wurden die Probekörper zwei Tage in einen Trockenschrank gelegt, dessen Lufttemperatur entsprechend der höchsten Sonnenhitze 45° Celsius betrug. Nach den Erfahrungen mit Holztrockenanlagen wurde durch diese Trocknung der nasse Schwellenholz nur zu einem geringen Teil in einen normalen Feuchtigkeitszustand versetzt, während der übrige Teil noch starken Feuchtigkeitsgehalt aufwies und diesen auch bei den weiteren Dauerversuchen im wesentlichen behielt. Das ist bei der späteren Beurteilung des Spannkraftverlaufs zu beachten. Anschließend wurden die Probekörper wieder Lastwechseln unterworfen, bis insgesamt 15 Millionen Lastwechsel aufgebracht waren.

Bei dem Versuch 2 (Textabb. 2) wurden die Schwellen nach 5,0 Millionen Lastwechseln durch regelmäßiges Begießen ohne Herausnahme aus der Prüfmaschine, also während der Dauerversuche angefeuchtet. Da nach 7,6 Millionen Lastwechseln der weitere Verlauf der Schraubenspannkkräfte keine wesentliche Änderung ihrer Tendenz erwarten ließ, wurde der Versuch abgebrochen.

Bei dem Versuch 3 (Textabb. 3) wurde der Schotter regelmäßig zwischen den Lastwechseln 1,3 Millionen und 1,8 Millionen sowie zwischen 2,3 und 2,8 Millionen während des Dauerversuchs angefeuchtet. Die Schwellen erhielten unmittelbar kein Wasser, wohl aber erhöhte sich ihre Feuchtigkeit unter der Anfeuchtung des Schotters. Zwischen den Anfeuchtungszeiten verloren Schotter und Schwellen allmählich an Feuchtigkeitsgehalt. Da für die eigentliche Prüfung des Schotters der Versuch mit 2,5 Millionen Lastwechseln nach 0,8 Millionen

Lastwechseln für Vorversuche abgeschlossen werden konnte, war auch die Prüfung der Schraubenspannkkräfte an dieses Maß gebunden, zumal Mittel zur Weiterführung nicht zur Verfügung standen. Im übrigen genügten auch, wie wir sehen werden, die bis dahin gewonnenen Ergebnisse über den Verlauf der Spannkkräfte und die Lage der Unterlegplatte zur Schwelle.

### III. Versuchsergebnisse zu den Dauerversuchen.

Die Versuchsergebnisse geben Aufschluß über den Verlauf der Schraubenspannkkräfte, das Verhalten der Unterlegplatte zur Schwelle und sonstige Erscheinungen (als Folge des Betriebs), die sich bei den Dauerbelastungen, denen die Versuchskörper unterworfen wurden, zeigten.

Auf Grund der periodischen Ablesungen an den einzelnen Meßschrauben sind die zur Zeit der Ablesung vorhandenen Schraubenspannkkräfte berechnet worden. Um die Unterschiede der Schraubenspannkkräfte bei unbelastetem und belastetem Gleis und damit die Bedeutung der Nachgiebigkeit des Schwellenholzes für die Schraubenspannkkräfte zu erfassen, erfolgten jedesmal die Ablesungen bei unbelasteten und mit Betriebslast von 4200 kg belasteten Probekörpern. Als unbelastet ist der mit  $Q = 42,5$  und 250 kg Gewicht der Versuchseinrichtung belastete Probekörper anzusehen.

Die Ergebnisse der drei Versuche sind in den Abb. 1 bis 5, Taf. 17 enthalten, und zwar zeigt Abb. 1, Taf. 17 den Verlauf der Spannkkräfte einer jeden einzelnen der vier Schrauben bei unbelastetem Probekörper für Versuch 1. Eine gleiche Darstellung für Versuch 2 und 3 erübrigt sich, da sie keine grundsätzlichen Unterschiede gegenüber derjenigen des Versuchs 1, also der Abb. 1, Taf. 17 aufweist. Dagegen wurde für jeden der drei Versuche aus dem Verlauf der Spannkkräfte der einzelnen Schrauben der in den Abb. 2 bis 5, Taf. 17 dargestellte Verlauf der Summe der Spannkkräfte der vier Schrauben und zwar bei unbelastetem wie bei belastetem Probekörper abgeleitet. Zum besseren Vergleich des Verlaufs der Summe der vier Spannkkräfte bei verschiedenen Schwellenarten ist auf den Abb. 2 bis 5, Taf. 17, außerdem die Abnahme der Schraubenspannkkräfte im Verlauf der Dauerversuche bei unbelasteten Probekörpern gegenüber den Spannkkräften bei Beginn der Dauerversuche aufgetragen. Schließlich enthält die Abb. 5, Taf. 17 für alle drei Versuche den Verlauf der Summe der Spannkkräfte der vier Schrauben der verschiedenen Schwellen bei unbelastetem Gleis und die Abnahme dieser Schraubenspannkkräfte gegenüber den Spannkkräften bei Beginn der Dauerbelastung. Alle Spannkkräfte sind in den Abbildungen im Sinne des Zwecks der Versuche in Abhängigkeit zu der Zahl der Lastwechsel dargestellt.

Da die Dauerversuche, wie bereits erwähnt, nach dem selbsttätigen Abklingen der Schraubenspannkkräfte begonnen wurden, so ist zunächst aus allen Abbildungen zu erkennen, daß die Anfangsspannkraft der Einzelschraube durchschnittlich unter 2000 kg und die Summe der Spannkkräfte der vier Schrauben unter 8000 kg liegt. Die Schraubenspannkkräfte der Buchenschwellen sind dabei am stärksten abgeklungen, was den Feststellungen bei den Vorversuchen zu den dynamischen Versuchen, über die früher schon berichtet wurde, durchaus entspricht. Im ähnlichen Verhältnis zu diesen früheren Feststellungen liegt auch das Abklingen der Spannkkräfte in den übrigen Schwellenarten, so daß eine wertvolle Gegenkontrolle der früheren Versuche vorliegt.

Der Verlauf der Spannkkräfte der Einzelschrauben nach Abb. 1, Taf. 17 zeigt die verhältnismäßig starken Unterschiede in den Schraubenspannkkräften eines Probekörpers. Diese Unterschiede bleiben auch im allgemeinen im Verlauf

der Dauerbelastung bestehen, so daß sich eine im Durchschnitt gleichmäßige Abnahme der einzelnen Schraubenspannkkräfte ergibt. Sie sind z. T. auf das ungleichmäßige Gefüge des Schwellenholzes zurückzuführen, dann aber vor allem, wie Einzelmessungen der Schrauben beim Aufplatten der Unterlegplatte ergaben, auf Spannungen in der Unterlegplatte, die auf die Spannkkräfte der Schwellenschrauben wirken und sie in verschiedenem Maße beeinflussen.

Alle Schrauben weisen eine mehr oder weniger große Spannungszunahme auf bei Erhöhung der Feuchtigkeit der Schwellen durch Wasserlagerung oder Wasserzugabe während des Versuchs und eine mehr oder weniger große Spannungsabnahme bei Verringerung des Feuchtigkeitsgehalts durch Trockenlagerung in höheren Temperaturen, als sie bei den Dauerversuchen vorlagen, oder durch Austrocknen der Schwellen während des Dauerversuchs. Die Zeiten, zu denen während des Dauerversuchs der normale Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper nach oben und unten verändert wurde, sind in den Zeichnungen eingetragen. Ebenso ist die Zeit der Wasserlagerung und der Trockenlagerung in ihnen enthalten.

Bei Versuch 1 (Textabb. 1 und Abb. 1, Taf. 17), bei dem der extreme Fall einer 17stündigen Wasserlagerung mit anschließendem,  $1\frac{1}{2}$ tägigem regelmäßigem Anfeuchten der Schwellen während der Dauerversuche und eines zweitägigen Austrocknens der Schwelle bei  $45^{\circ}$  Celsius Temperatur vorliegt, zeigen sich in sehr charakteristischer Form die Wirkungen dieser Veränderungen im Feuchtigkeitsgehalt der Schwellen auf die Schraubenspannkkräfte. Bei der Durchfeuchtung der Schwellen auf dem Wege der Wasserlagerung erhöhten sich die Spannkkräfte um das 0,25 bis 1,8fache der vorherigen Spannkkräfte und nach der Trockenlagerung hatten sie, nachdem der Probekörper wieder normale Temperatur angenommen hatte, um das 0,05 bis 0,2fache abgenommen. Daß die Abnahme der Spannkkräfte nach der Trockenlagerung verhältnismäßig gering war, ist auf den noch starken Feuchtigkeitsgehalt eines Teiles der Schwellen zurückzuführen (s. S. 266). Auch der mehr oder weniger waagerechte Verlauf der Spannungslinie bei der anschließenden Dauerbelastung nach der Trockenlagerung erklärt sich hieraus. Der unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalt der Schwelle des Probekörpers entspricht den Verhältnissen des wirklichen Betriebs. Denn auch unter der Einwirkung der Witterungsverhältnisse werden die Schwellen in ihren einzelnen Querschnittsteilen einen verschiedenen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Dieser Unterschied im Feuchtigkeitsgrad der Schwellenteile wird Spannungen im Schwellenholz verursachen, die nicht unbeeinflußt von den Lastwechseln sich entwickeln und die daher auch den Verlauf der Schraubenspannkkräfte in der Versuchsschwelle nach der Trockenlagerung in erster Linie erklären. Während der Wasserzugabe im Dauerversuch nahmen, wie auch die Abb. 3 bis 4, Taf. 17 zeigen, die Spannkkräfte der Schrauben mehr oder weniger zu.

Die Ursachen dieser Erscheinungen sind in dem Quellen des Holzes beim Durchfeuchten und im Schwinden des Holzes beim Austrocknen zu suchen. Quellendes Holz wirkt auf die Schraubenwindungen, übt besondere Kräfte auf sie aus und erhöht die Schraubenspannkkräfte. Schwindendes Holz lockert die innige Verbindung zwischen den Schraubengängen und dem Schwellen- oder Dübelholz, entlastet die Schraubenwindungen und führt daher zu einer Verringerung der Schraubenspannkkräfte.

Bei dem Versuch 2 (Textabb. 2 und Abb. 3, Taf. 17) ist das Anfeuchten der Schwellen nur während des Dauerversuchs erfolgt, also nicht durch eine Wasserlagerung. Die Probekörper wurden 5 Tage lang einer Wasserzugabe ausgesetzt. Auch hier ist eine Zunahme der Spannkkräfte festzustellen. Bei dem Versuch 3 (Textabb. 3 und Abb. 4, Taf. 17)

wurde nur der Schotter angefeuchtet, dagegen nicht die Schwelle unmittelbar, doch zeigt auch hier der Verlauf der Spannkkräfte infolge der Einwirkung der Wasserzugabe zum Schotter im allgemeinen eine nach oben gerichtete Tendenz.

Da die Tränkung der Schwellen, wie besondere Untersuchungen gezeigt haben, die Durchfeuchtung der Schwellen mit Wasser nicht wesentlich verhindert gegenüber ungetränkten Schwellen, so wird in erster Linie die Durchfeuchtung und damit das Quellen des Holzes durch das Holzgefüge bestimmt. Einzelne Schrauben sowohl der Buchen- wie der Kiefernschwelle zeigten nach Bloßlegen der in der Schwelle sitzenden Schrauben am Schluß des Versuchs 1 an mehreren Gewindengängen zahlreiche Wassertröpfchen mit Durchmessern bis zu 1 mm. Das Aussehen und die Anordnung dieser Wassertröpfchen war so, als hätte sich Wasserdampf an der Schraube niedergeschlagen. Das uneinheitliche Holzgefüge erklärt die verschieden starke Reaktion der Schraubenspannkkräfte auf den Feuchtigkeitsgehalt und das Quellen des Holzes.

Aus dem Verlauf der Spannungen der einzelnen Schrauben ergibt sich für jeden Probekörper die Spannungslinie der Summe der Spannkkräfte der vier Schrauben, wie sie die Abb. 2 bis 4, Taf. 17 zeigen. Ihr charakteristisches Bild ist daher grundsätzlich das gleiche wie bei den einzelnen Schrauben, was die Abnahme der Schraubenspannkkräfte unter der Dauerbelastung und den Spannungsverlauf beim Anfeuchten und Trocknen der Schwellen anlangt. Die Abbildungen lassen aber auch erkennen, daß die Spannkkräfte der Schwellenschrauben unter der Wirkung der Lastwechsel einem ständigen Wechsel unterworfen sind. Jede Belastung der Schwellen durch Betriebslasten vermindert, wie die Spannungslinien bei belastetem und unbelastetem Gleis zeigen, die Schraubenspannkkräfte um 20 bis 30% der Spannkraft beim unbelasteten Gleis. Dieser Spannungswechsel in den Schrauben verursacht auch einen Wechsel in der Beanspruchung der in den Schraubengängen sitzenden Holzfasern und wird dort eher zu Ermüdungserscheinungen führen als bei den Schrauben selbst. Hierin liegt in erster Linie die Erklärung für das allmähliche Nachlassen der Schraubenspannkkräfte mit der Zunahme der Lastwechsel, wie es bei allen Schrauben zu erkennen ist, solange keine Änderung im Feuchtigkeitsgehalt der Schwelle auftritt.

Es ist weiter zu berücksichtigen, daß bei jedem Lastwechsel die Schrauben zwar durch das Eindringen der Unterlegplatte in das Schwellenholz eine Entlastung erfahren, aber durch die Enden der in der Mitte sich leicht durchbiegenden Unterlegplatten eine relativ nach oben gerichtete Kraft erhalten, die exzentrisch an dem von der Schiene gesehen auswärts gelegenen Rand des Schraubenkopfes angreift. Diese exzentrische Beanspruchung des Schraubenkopfes bei jedem Lastwechsel erzeugt eine horizontale Kraft in der Schraube, die sich auswirken kann, solange zwischen Schraubenschaft und Unterlegplatte im Schraubenloch der Unterlegplatte ein Spielraum besteht, was im allgemeinen der Fall ist. Es wird also mit der Zunahme der Lastwechsel unter der Einwirkung dieser Horizontalkräfte eine ständige, wenn auch kleine Seitenbewegung der Schraube eintreten, die sich in der Schwelle fortpflanzt und schließlich den festen Sitz der Schraube im Holz beeinträchtigt. Auch hierin liegt eine Erklärung für eine allmähliche Abnahme der Schraubenspannkkräfte bei normaler Feuchtigkeit der Schwelle.

Diese beiden Ursachen für die Abnahme der Schraubenspannkkräfte äußern sich unabhängig von der allmählichen Einsenkung der Unterlegplatte in die Schwelle, so lange die Schrauben überhaupt noch Spannkkräfte aufweisen. Tritt diese Einsenkung ein, so werden die Schraubenspannkkräfte entsprechend kleiner, und es wird damit auch die Verbindung zwischen Unterlegplatte und Schwelle, soweit

sie von den Schrauben abhängig ist, weniger starr. Die Spannungslinie für die Schrauben bei belastetem Gleis in den Abb. 2 bis 4, Taf. 17 lassen diesen Vorgang schon deutlich erkennen, da bei Belastung des Gleises mit 4200 kg die Unterlegplatte sich 0,2 bis 0,3 mm eindrückt und der in den Abbildungen dargestellte Spannungsabfall gegenüber unbelastetem Gleis eintritt. Hierbei handelt es sich aber um elastische Einsenkungen, die bei Fortfall der Last sofort wieder verschwinden, so daß die Schraubenspannkkräfte wieder hochschnellen. Dieses Versuchsergebnis bestätigt die im Bericht 1 auf Seite 104 und Abb. 8 bekanntgegebenen Feststellungen über das Verhalten der Schraubenspannkkräfte bei Druckbelastung der Unterlegplatte.

Treten nun aber dauernde Einsenkungen der Unterlegplatte in das Schwellenholz ein, so wird auch das damit verbundene Abfallen der Schraubenspannkkräfte dauernd bleiben. In der Tat sind nun bei den Versuchen 1 bis 3 dauernde Einsenkungen eingetreten, jedoch bei jedem Versuch von verschiedenem Ausmaß.

Die Ursachen, auf welche das verschieden starke Einarbeiten der Unterlegplatten in die Schwellen im vorliegenden Fall bei Kiefernswellen — nur bei diesen sind Vergleiche möglich — bei gleicher Lastwechselzahl zurückzuführen ist, erklären sich bei Betrachtung der drei Versuche wie folgt: Während bei dem Versuch 1 bei 3,3 Millionen Lastwechseln, also nach 5 bis 6jähriger Betriebsbelastung die durchschnittlich bleibende Einsenkung der Unterlegplatte in der mit Einschlagdübeln versehenen Kiefernswelle nur 0,08 mm beträgt, ist sie bei gleicher Lastwechselzahl bei Versuch 2 in der unverdübelten Kiefernswelle 0,18 mm, also nahezu 2,3mal so groß, und bei Versuch 3 bei der mit Einschlagdübeln versehenen Kiefernswelle 0,61 mm, also nahezu achtmal so groß. Die Erklärung liegt bei der verschiedenen Zahl der Lastwechsel in der Minute, die 466 bei Versuch 1, 350 bei Versuch 2 und 43 bei Versuch 3 betrug.

Die Abnahmelinie der Schraubenspannkkräfte bei der mit Einschlagdübeln ausgestatteten Kiefernswelle des Versuchs 1 zeigt keine wesentlichen Unterschiede gegenüber der Abnahmelinie der unverdübelten Buchenschwelle. Verfolgt man aber ihr in manchen Teilen steileres Abklingen gegenüber der Buchenschwelle, so fällt dieses Abklingen durchweg mit der Zunahme der Einsenkungen der Unterlegplatte zusammen. Da diese Einsenkungen verhältnismäßig sehr gering sind, so sind auch die Unterschiede der Abnahmelinien beider Schwellenarten gering.

Eine zur Verhütung von mechanischen Abnutzungen der Schwelle notwendige feste Verspannung der Unterlegplatte mit der Schwelle ist daher sowohl bedingt durch mögliche Verhinderung der Einsenkung der Unterlegplatte in die Schwelle wie auch durch die Art der Verbindung zwischen Unterlegplatte und Schwelle. Das zeigt vor allem der fast gleichmäßige Abfall der Schraubenspannkkräfte im Versuch 1 für eine Buchenschwelle und eine mit Einschlagdübeln ausgestattete Kiefernswelle. Die Einsenkung der Unterlegplatte in die Schwelle wird um so mehr maßgebend für die Spannkraft der Schrauben sein, je besser die Schrauben für die Erzielung einer möglichst großen Haftfestigkeit im Holz ausgebildet sind.

Tragen wir in einem Koordinatensystem auf der Abszisse die Zahl der Lastwechsel in der Minute und als Ordinate die oben angegebenen Einsenkungen bei 3,3 Millionen Lastwechseln ein, so ist die Verbindung der Ordinatenpunkte nahezu eine Gerade (Abb. 6, Taf. 17). Diese Einsenkungslinie wird sich mit der weiteren Zunahme der Lastwechsel in der Minute asymptotisch an die Abszissenachse anlegen und daher die in der Abbildung dargestellte Form haben. Die Ein-

senkung der Unterlegplatte in die Schwelle wird also im wesentlichen bestimmt durch die Zahl der Lastwechsel in der Minute, denen das Gleis unterworfen wird. Je geringer diese Zahl ist, um so stärker, je größer sie ist, um so geringer ist die Einsenkung. Je mehr die Lastzeit hat, sich auf die Struktur des Holzes auszuwirken, um so mehr gibt das Holz nach. Bei dem Versuch 1 mit seinen 466 Lastwechseln in der Minute folgen die Lastwechsel so schnell aufeinander, daß der Schwellenstoff nicht genügend folgen kann und die volle elastische Verarbeitung der Lasten durch die Schwelle nicht eintritt. Bei Versuch 2 mit seinen 350 Lastwechseln in der Minute ist das schon eher möglich, und bei Versuch 3 mit 43 Lastwechseln in der Minute in ausgiebigstem Maß der Fall, so daß hier die stärksten Einsenkungen vorliegen. Es kann der Vorgang verglichen werden mit einem Eisläufer, der eine dünne Eisdecke im schnellen Lauf gefahrlos passieren kann, dagegen sofort einbricht, wenn er langsam läuft oder sich auf das Eis stellt. Im ersten Fall fehlt dem Gewicht des Eisläufers die zeitliche Wirkung, die nötig ist, um die erforderliche Zerstörungsarbeit am Eisgefüge zu leisten.

Ganz allgemein wird das Einarbeiten der Unterlegplatte in die Schwelle um so langsamer eintreten, je schneller ein Gleis befahren wird. Es wird dagegen um so stärker sein, je langsamer das Gleis befahren wird. Die an den Versuchsschwellen festgestellte Einsenkung der Unterlegplatte war in keinem Fall durch Bewegungen der Unterlegplatte oder durch Abscheren der Holzfasern entstanden, da die Verspannung zwischen Unterlegplatte und Schwelle durch die Schrauben dies verhinderte, sondern sie war eine Ermüdungserscheinung des Holzgefüges infolge der Druckeinwirkungen der Lasten.

Diese vielleicht auffallend erscheinende Abhängigkeit der Einsenkung der Unterlegplatte von der Fahrgeschwindigkeit findet in der Praxis eine Bestätigung durch Beobachtungen, die an Hafengleisen gemacht wurden. Da die Hafengleise in der Regel mit neuem Oberbau verlegt werden, so bieten sie im Gegensatz zu den aus alten Oberbaustoffen meist hergestellten Rangiergleisen einen zuverlässigen Ausgangspunkt für Feststellungen über die Einsenkung von Unterlegplatten bei geringen Fahrgeschwindigkeiten. Außerdem liegt bei ihnen eine verhältnismäßig gleichmäßige Belastung der Gleise vor. Ich konnte verschiedentlich in Deutschland und den Vereinigten Staaten von Amerika die verhältnismäßig frühe Einarbeitung der Unterlegplatten in neue Schwellen bei Hafengleisen beobachten, die offenbar auch auf die stets vorliegende geringe Fahrgeschwindigkeit neben der Einwirkung schwerer Lasten zurückzuführen ist.

Die vorliegenden Versuche haben im Gegensatz zu manchen anderen Versuchen über die Einsenkung der Gleise unter den rollenden Rädern den Einfluß der Fahrgeschwindigkeit eindeutig darlegen können, da in allen Fällen die gleiche Last angewendet wurde und damit die Verschiedenheit der Belastung, die in der Praxis infolge ungleicher Achslasten der Fahrzeuge und auch an den Stößen mehr oder weniger vorliegt, ausgeschaltet werden konnte. Daß bei kleinen oder großen Achslasten die von der Achsfolge abhängigen Einsenkungen kleiner oder größer sein werden, ist natürlich und wird von dem betrieblichen Charakter der Gleise und ihrer Belastung bestimmt. Untersuchen wir weiterhin stark belastete Strecken auf die Häufigkeitsziffer der Fahrgeschwindigkeit, so sind im allgemeinen die mit Güterzuggeschwindigkeit, also mit 45 km/h gefahrenen Achsen vier- bis fünfmal zahlreicher als die mit Personenzuggeschwindigkeit, also mit 60 bis 80 km/h gefahrenen Achsen. Es wird also die Einsenkung der Unterlegplatte auf diesen Strecken durch eine mittlere Fahrgeschwindigkeit in erster Linie bestimmt. Es entspricht daher

durchaus den Ergebnissen der Versuche, wenn auf stark belasteten Hauptstrecken nach praktischen Feststellungen die Einsenkungen der Unterlegplatte verhältnismäßig früh eintreten, denn das Schwergewicht der Fahrgeschwindigkeit ihrer Betriebslasten liegt bei 40 bis 50 km/h, bei der die Einsenkungen nach Abb. 6, Taf. 17 bereits ein beträchtliches Maß bei fünfjähriger Betriebsbelastung betragen.

Betrachten wir die Spannungslinien der Schrauben vom Standpunkt des praktischen Betriebs, so müßten die Schraubenspannkraft auf Grund der Ergebnisse der Dauerversuche 10 bis 15 Betriebsjahre ausreichen, um die Unterlegplatte anhaltend genügend mit der Schwelle zu verspannen und damit jedes Nachziehen der Schrauben unnötig und das Zerstören der Schwellen unmöglich zu machen. Die Praxis der Bahnunterhaltung zeigt, daß dies in keiner Weise der Fall ist, sondern daß nach 3 bis 4 Jahren im allgemeinen die Schrauben nachgezogen werden müssen, da sie nicht mehr die genügende Spannkraft aufweisen. Hier spielen nun zweifellos die Witterungseinflüsse und die Liegedauer der Schwellen im Gleis, also der praktische Witterungs- und Zeitfaktor, die beide im Dauerversuch nicht genügend erfaßbar sind, eine besondere Rolle. Der Verlauf der Spannkraft bei dem ein- bis zweimaligen Wechsel von Regen und Sonnenschein bei den Dauerversuchen zeigt den Weg, dieses Mißverhältnis zu erklären.

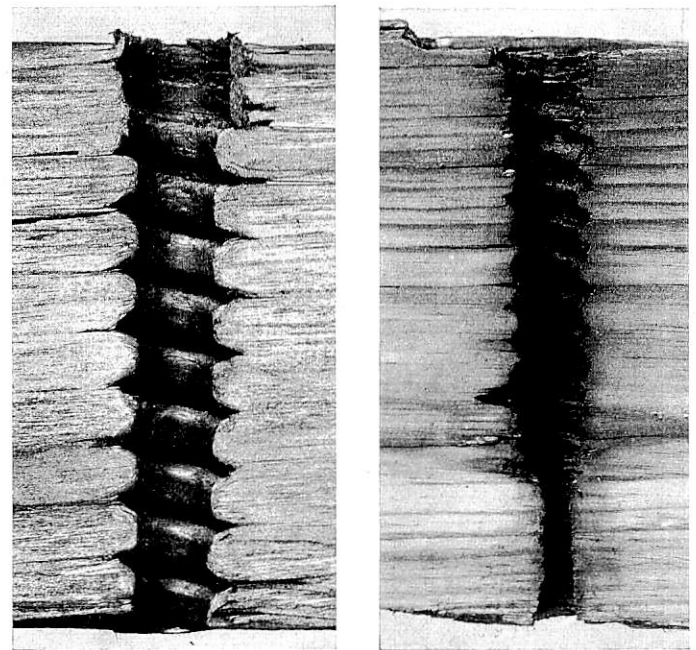
Wir haben bei den Dauerversuchen die starken Einflüsse des Quellens und Schwindens des Schwellenholzes auf die Schraubenspannkraft festgestellt. Bei nassen Schwellen nehmen die Spannkraft zu, was zwar günstig ist für die feste Verbindung der Unterlegplatte mit der Schwelle, aber sehr ungünstig für das Gefüge und die Widerstandskraft des Schwellenholzes werden kann. Es ist bekannt, daß bei Sättigung des Holzes durch Wasser die Festigkeit des Holzes senkrecht und parallel zur Faser um die Hälfte abnimmt gegenüber der Festigkeit in normalem, trockenem Zustand. Erzeugt demnach das Quellen des nassen Holzes höhere Spannkraft in den Schrauben und daher stärkere Druck- und Scherkräfte zwischen Schraubengewindungen und Schwellenholz, so wird mit der Zeit eine Überbeanspruchung des Holzes und damit eine Verringerung der Widerstandsfähigkeit der durch die Schraubengänge abgelenkten Holzfasern eintreten. Das wird um so eher der Fall sein, je mehr die Schrauben bis an die Grenze der Festigkeit des Holzes zur Erzeugung möglichst hoher Spannkraft eingebracht sind, was zum Nutzen einer möglichst festen Verspannung zwischen Unterlegplatte und Schwelle verlangt werden muß. Unter den ständig wechselnden Witterungseinflüssen des Jahres ändert die Schraube allmählich ihre Spannkraft und wird schließlich locker.

Es ist nun anzunehmen, daß die Sättigung des Holzes mit Wasser verhältnismäßig früh zwischen Schraube und Holz eintreten kann. Von den Seiten der Schwellen wird das Wasser nicht so schnell an die Schwellenschrauben gelangen können, wie gerade über den Weg des Bohrlochs selbst. Gelingt es demnach, das Regenwasser möglichst lange von den Bohrlochfern zu halten, so wird die Erhaltung der Schraubenspannkraft am besten gewährleistet sein.

Der Zutritt des Regenwassers zum Bohrloch kann im Betrieb von unten und oben erfolgen. Von unten wird eine wasserdurchlässige Bettung am besten das Wasser von den Bohrlochfern fernhalten. Dem Zutritt von oben sind dagegen manche Möglichkeiten und Erleichterungen geboten. Es ist eine nicht fortzuleugnende Tatsache, daß bei leicht sich durchbiegenden Unterlegplatten beim Befahren des Gleises ein ständiges Pumpen (Abstoßen und Ansaugen) von Regenwasser im oberen Schwellenholz eintritt, wodurch allmählich Wasser in die Schraubenlöcher geradezu hineingepreßt wird. Die

starr ausgebildeten Stühle oder Unterlegplatten aus Gußeisen, wie sie auf den holländischen und englischen Bahnen verwendet werden, haben diese Wirkung nicht, so daß bei ihnen eine auffallend gute und gleichmäßige Verspannung zwischen Unterlegplatte und Schwelle gewährleistet ist und Wasser nur schwer seinen Weg unter die Unterlegplatte und damit zu den Bohrlochern findet. Auch der ohne Unterlegplatten verlegte gute französische Oberbau ist der Gefahr eines Wassereindringens am Bohrloch weniger ausgesetzt, weil bei ihm das Wasser nicht wie bei einer dünnen Unterlegplatte allseitig in die Bohrloch hineingepreßt wird.

Die Tatsache und die Bedeutung der hier gegebenen Erklärung für das schnelle Lockerwerden von Schraubverbindungen ist auch aus dem Vergleich der Schwellenlochquerschnitte der Versuchsschwellen mit gleichartigen Betriebsschwellen nach Textabb. 4 bis 6 zu erkennen.



Schwelle des Dauerversuchs 2 (12 Jahre)      Schwelle des Betriebsgleises (13 Jahre)

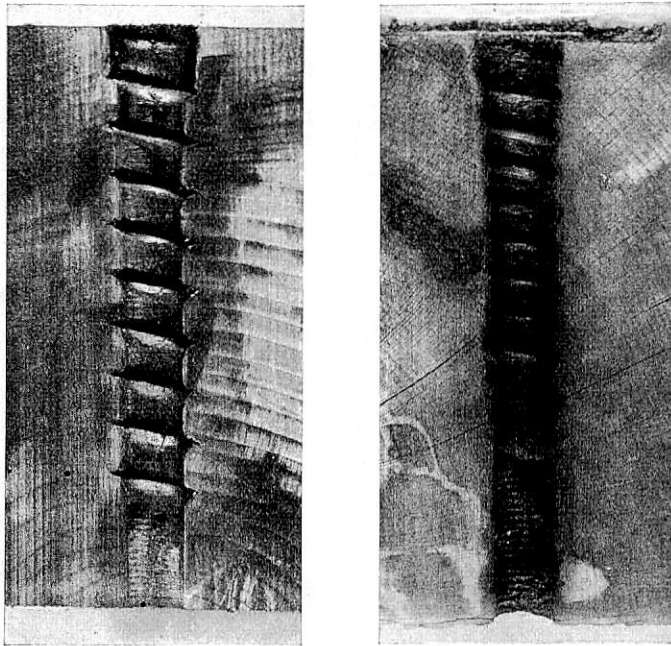
Abb. 4. Zustand des Bohrlochs einer unverdübelten Kiefernschwelle des Dauerversuchs 2 und des Betriebsgleises.

Für die Betriebsschwellen wurde für diesen Vergleich aus einer größeren Zahl von Schwellenquerschnitten derjenige gewählt, der ein durchschnittliches Zustandsbild des Bohrlochs zeigte. In Textabb. 4 ist der Querschnitt durch die im Dauerversuch 2 geprüfte unverdübelte Kiefernschwelle dem Querschnitt durch eine alte unverdübelte Kiefernschwelle des Hakenplattenoberbaus, die 13 Jahre im Betriebsgleis bei durchschnittlich 280 000 Lastwechseln im Jahre gelegen hat, gegenübergestellt. Die in der Dauerversuchsmaschine einer 12jährigen Dauerbelastung unterworfenen Schwelle zeigt noch gesunde, unzerstörte, volle Schraubengänge. Die Schwelle, die 13 Jahre im Betriebsgleis gelegen hat, weist aber alle Merkmale eines stark veränderten Bohrlochs mit verschlissenen Schraubengängen im Schwellenholz auf. Bei ihr sind die im Dauerversuch nicht voll nachzunehmenden Einflüsse der Witterung klar zu erkennen.

Ein ähnliches Bild zeigt Textabb. 5 für die im Dauerversuch 1 behandelte Buchenschwelle mit 20 Betriebsjahren gegenüber einer Buchenschwelle, die 18 Jahre im Betriebsgleis bei durchschnittlich 920 000 Lastwechseln im Jahr gelegen hat. Dem gesunden Bohrloch der Schwelle des Dauerversuchs steht die verwüstete Bohrlochwandung der Betriebs-

schwelle gegenüber. Tritt zu den Zerstörungserscheinungen des Holzes unter der Einwirkung des Wassers noch eine verrostete Schwellenschraube, so kommen sich beide, Schraube und Schwelle, in der Verminderung der Haftfestigkeit und in der Lockerung der Unterlegplatte entgegen.

Über das Verhalten der verdübelten Schwellen gibt Textabb. 6 näheren Aufschluß. In ihr ist der Querschnitt der mit Einschlagdübeln ausgestatteten Kieferschwelle des Versuchs 3 mit 6 Betriebsjahren, sowie der Querschnitt der mit Schraubdübeln ausgestatteten Kieferschwelle des Versuchs 3 mit 6 Betriebsjahren einem Querschnitt einer mit Einschlagdübeln versehenen alten Kieferschwelle, die 6 Jahre im Betriebsgleis bei durchschnittlich 420000 Lastenwechseln im Jahr gelegen hat, und einer mit Schraubdübel ausgestatteten Kieferschwelle gegenübergestellt, die 12 Jahre im Betriebsgleis bei durchschnittlich 630000 Lastwechseln im Jahr gelegen



Schwelle des Dauerversuchs 1 (20 Jahre)      Schwelle des Betriebsgleises (18 Jahre)

Abb. 5. Zustand des Bohrlochs einer unverdübelten Buchenschwelle des Dauerversuchs 1 und des Betriebsgleises.

hat und bereits als neue Schwelle mit Schraubdübeln versehen war. Eine kieferne Betriebsschwelle mit Einschlagdübeln von mehr als 6 Jahren Liegedauer war mit Rücksicht auf die erst in der Nachkriegszeit erfolgte Einführung des Einschlagdübels nicht zu erhalten. Für die Betrachtung und Beurteilung der Querschnitte der verdübelten Schwellen ist noch zu beachten, daß die neben den Einschlagdübeln vielfach vorhandenen kleinen dunklen Flecke von dem Teer, in das die Dübel vor dem Einbringen getaucht wurden, herrühren und nicht etwa, was nicht ohne weiteres aus dem Bild genau zu erkennen ist, auf schlechten Zustand oder Fäulniserscheinungen des Schwellenholzes zurückzuführen sind.

Es ist nun zunächst zu erkennen, daß der Einschlagdübel nach dem Dauerversuch im Schwellenholz völlig satt anliegt und ein Abbruch oder eine Verschiebung der Zähne des Dübels gegenüber dem Schwellenholz nicht eingetreten ist. Der Spannungswechsel scheint spurlos an der guten Verbindung zwischen Dübel und Schwelle vorübergegangen zu sein. Sätze die Schwellenschraube noch im Einschlagdübel, so würde ihre Spreizwirkung im unteren Teil des Dübels noch stärkere Verspannung zwischen Dübel und Schwellenholz ergeben, als sie ohne Schraube das Bild zeigt.

Der Schraubdübel zeigt demgegenüber nicht überall den festen Sitz im Schwellenholz, was sich auch im Verlauf seines Spannungsabfalls gezeigt hat, der ungünstiger ist als beim Einschlagdübel.

Bei den dem Dauerversuch unterworfenen Schwellen zeigen beide Dübelarten ein ähnlich scharfes und gesundes Bild der durch die Schrauben im Dübelholz eingearbeiteten Windungen, wie sie in der Buchenschwelle der Textabb. 5 des Dauerversuchs festzustellen sind. Also auch hier haben die Dauerbelastungen und die mit ihnen verbundenen Spannungswechsel zu keinen schädlichen Erscheinungen geführt. Ganz allgemein zeigen aber die Schraubengänge der Einschlagdübel eine innigere Verspannung und Anpassung an das Gewinde der Schrauben als die Schraubdübel. Das ist darauf zurückzuführen, daß der Einschlagdübel im unteren Teil seines Bohrlochs wesentlich enger ist als der Durchmesser des Schraubenschaftes und nun die dünneren Wandungen des Einschlagdübels infolge der Spreizung von der Schraube gegen die Schwellenwandungen gepreßt werden, so daß Schraube, Dübel und Schwelle ein Ganzes bilden. Der Schraubdübel dagegen wird ohne Spreizung in die Schwelle eingeschraubt und besitzt eine Bohrung mit dem Durchmesser des Schraubenschaftes.

Ein anderes Bild zeigt dagegen wieder das Schraubenloch der im Betriebsgleis verwendeten, mit Schraubdübeln verdübelten Schwelle. Hier haben die Einflüsse des Regens und der Zeit zu einer Lockerung des Holzgefüges im Schraubbohrloch geführt. Die Schraubengänge im Dübel sind nicht mehr so stark ausgeprägt und ähnlich verwittert wie bei der Kiefern- und Buchenschwelle ohne Dübel. Der Sitz des Schraubdübels in der alten Schwelle zeigt, daß die Verbindung zwischen Dübel und Schwelle den Fäulniserscheinungen weniger ausgesetzt ist und gesund bleibt. Das ist besonders wichtig für den empfehlenswerten Fall, daß die Dübelkopfoberkante gegen die Schwellenoberkante um einige Millimeter versenkt ist und damit die Kraftübertragung für die Haftfestigkeit der Schrauben an der Berührungsfläche zwischen Dübel und Schwelle liegt. An den Schraubdübeln der Betriebsschwelle ist zu erkennen, daß das Quellen des Holzes infolge der Witterungseinflüsse auf die Dübelgänge kaum einen Einfluß ausgeübt hat. Bei den Schrauben und dem Holz ist das nicht der Fall, so daß hier beim Quellen die Holzfasern zerstört werden können.

Ein recht gesundes Bild zeigt der Querschnitt der Schwelle eines Betriebsgleises mit Einschlagdübel, die als altbrauchbare Schwelle verdübelt wurde und in diesem Zustand noch 6 Jahre im Betriebsgleis bei durchschnittlich 420000 Lastwechseln im Jahr gelegen hat. Der Dübel sitzt fest im Schwellenholz. Fäulniserscheinungen an der Berührungsfläche zwischen Dübel und Schwelle sind nicht vorhanden, wohl vor allem deshalb, weil die getränkten Dübel vor dem Einbringen in Teer getaucht wurden. Die Verteilung des Teers ist deutlich an den dunklen schmalen Flächen im Schwellenholz neben dem Dübel zu erkennen. Vor allem aber sind die wenig verwitterten Schraubengänge im Dübel auffallend, die ein fast ähnlich gesundes Bild zeigen wie bei den Versuchsschwellen. Es ist anzunehmen, daß bei den Einschlagdübeln, deren Wandungen durch die Schrauben besonders stark an die Schwellenwandung gepreßt werden, eine starke Verdichtung des Dübelholzes und eine innige Verbindung zwischen Schraube und Dübel eintritt, so daß das Eindringen von Wasser im Bohrloch des Dübels in besonderem Maße erschwert wird. Da alle Dübel nach dem Rüping-Verfahren getränkt werden, so ist die gut durchtränkte Holzschicht des Dübels, die die Schraube umgibt, stärker und dichter als bei den unverdübelten Schwellen. Dadurch wird ein Auslaugen des Holzes oder eine Beseitigung der Tränkungs-schutzschicht in den Zellenwandungen des Holzes, selbst unter Druck etwa von oben eindringenden

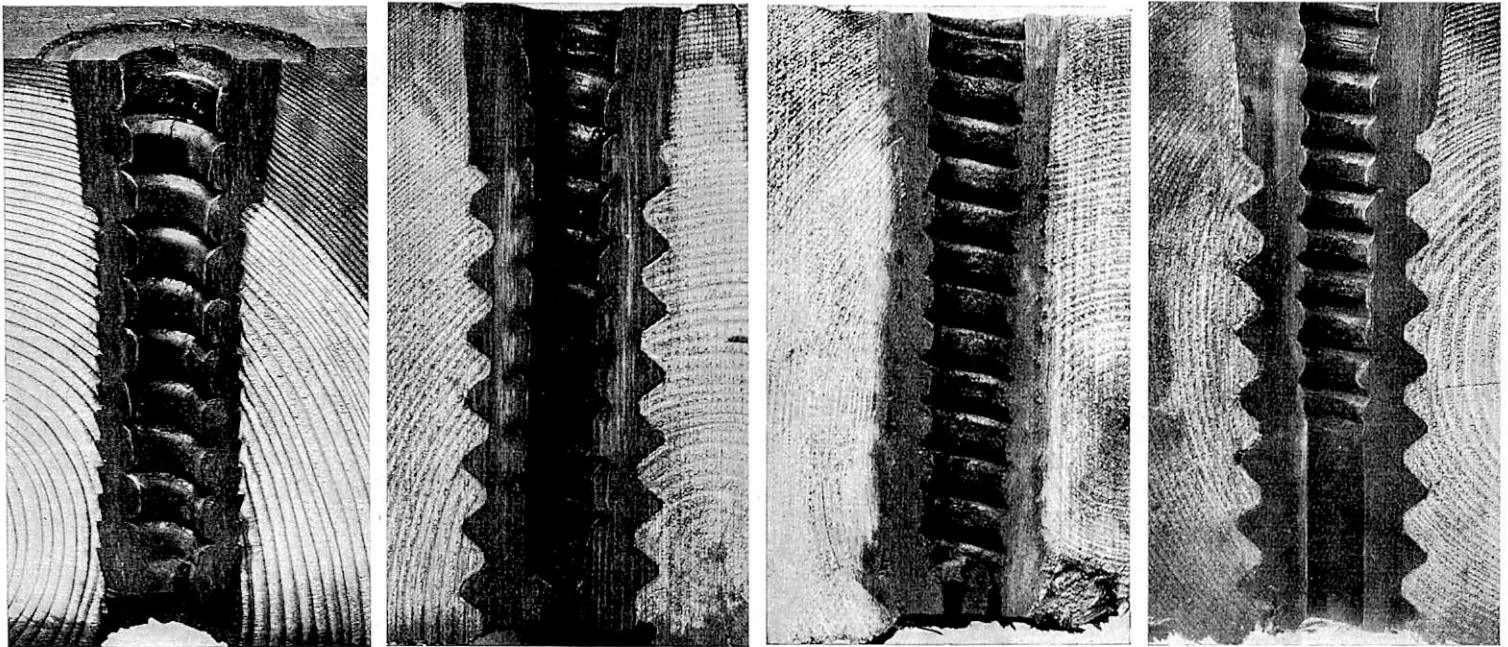


Wassers nur sehr langsam eintreten können. Ein Vergleich der unverdübelten kiefernen Betriebsschwelle (Textabb. 4) mit den mit Schraub- und Einschlagdübeln versehenen kiefernen Betriebsschwellen (Textabb. 6) zeigt deutlich diese günstige Wirkung der Verdübelung in der Praxis, trotzdem es sich bei allen Querschnitten der unverdübelten Schwellen, die in Betriebsgleisen gelegen haben, um Schwellen der württembergischen Eisenbahnen handelt, die vor der Tränkung gebohrt und dann getränkt wurden, so daß auch die Bohrlöcher Fäulnisschutz erhielten.

Das Verfahren der Bohrung der Schwelle vor dem Tränken ist in Württemberg schon seit der Einführung der Schwellentränkung, also seit langer Zeit üblich. Da auch die Dübel der Betriebsschwellen getränkt und außerdem vor dem Einbringen in die Schwelle in Teer getaucht wurden, so haben wir es bei allen in dieser Abhandlung angezogenen, ver-

testigkeit sein. Die Versuche und ihre Vergleiche mit Betriebsschwellen haben die große Bedeutung einer guten Tränkung der Bohrlöcher, die heute allgemein angeordnet ist, dargetan.

Die seitlichen Bewegungen der Unterlegplatte gegenüber der Schwelle waren bei senkrechter und senkrechter nebst waagerechter Belastung des Versuchs 1 und 2 die gleichen. In beiden Fällen betrug sie 0,08 bis 0,15 mm. Es handelte sich dabei keineswegs um ein Gleiten der Unterlegplatte auf der Schwelle, sondern um Verschiebungen, die sich aus der elastischen Nachgiebigkeit des Schwellenholzes ergaben. Dafür spricht auch die Größe der Verschiebungen. Es waren an den Schwellen oder an den Unterlegplatten keinerlei Schleifstellen nach Abschluß der Versuche zu erkennen. Jedenfalls aber zeigen die Messungen das Auftreten und die Neigung seitlicher Bewegungen, die so lange unschädlich sind,



1. Schwelle des Dauerversuchs 3 mit Einschlagdübeln (6 Jahre). — 2. Schwelle des Dauerversuchs 3 mit Schraubdübeln (6 Jahre). — 3. Schwelle des Betriebsgleises mit Einschlagdübeln (6 Jahre). — 4. Schwelle des Betriebsgleises mit Schraubdübeln (12 Jahre). —  
Abb. 6. Zustand des Bohrlochs verdübelter Kiefernswellen des Dauerversuchs 3 und des Betriebsgleises.

dübelten und unverdübelten Betriebsschwellen mit Schwellen zu tun, deren Bohrlöcher nach dem heutigen Stand einer kunstgerechten Tränkung gegen Fäulniserscheinung geschützt wurden. Ohne diese Imprägnierung würden zweifellos die Verwüstungen der Bohrlöcher zum Nachteil der Haftfestigkeit der Schrauben größer sein. Daß trotzdem auch bei den hier behandelten Betriebsschwellen Verwitterungs- oder Fäulniserscheinungen an den Gewindegängen festzustellen sind, ist, wie bereits erörtert, vor allem darauf zurückzuführen, daß beim Befahren der Gleise mit der Zeit Wasser von oben unter der Unterlegplatte zwischen Schraube und Bohrloch eingepreßt wird, und dabei allmählich eine stärkere Auslaugung des Holzes eintritt, als durch Holzrisse und capillarisch eindringendes Wasser es vermag. Hierbei werden die mit Imprägnierungsstoffen bedeckten Zellwände der feinen Holzzellen allmählich ihre Schutzschicht verlieren. Je dichter in diesem Fall wie beispielsweise bei den Buchenschwellen und den Einschlagdübeln das die Schrauben umgebende imprägnierte Holz ist, um so langsamer wird dieser Auslaugungsprozeß vor sich gehen und um so dauerhafter wird der feste Sitz der Schrauben im Holz und ihre Haft-

als die Unterlegplatte fest mit der Schwelle verspannt ist, dagegen zu mechanischer Abnutzung des Holzes führen, wenn diese Verspannung infolge lockerer Schrauben nicht mehr vorhanden ist.

Wie sehr im übrigen unter den Belastungswechseln sich auch die Klemmplatten unter der üblichen Schrauben- und Federringverspannung bewegen, zeigte sich besonders deutlich bei Versuch 1. Neben den Klemmplatten hatte sich am Schienenfuß und an der Unterlegplatte Roststaub abgelagert. Als Folge der Scheuerbewegungen zwischen der Unterlegplatte und dem der Schiene zugewendeten Kopf einer Schwellenschraube hatte sich Roststaub abgesetzt, was wohl auf die Bewegungen zwischen der bei jeder Belastung sich etwas durchbiegenden Unterlegplatte und dem dann exzentrisch beanspruchten Schraubenkopf zurückzuführen ist.

#### IV. Schlußfolgerungen.

Die Dauerversuche haben grundsätzlich die im ersten Bericht auf Grund der statischen Versuche gegebene Beurteilung der Verarbeitung der Kräfte in den verschiedenen Schwellenarten bestätigt.

Es haben sich während der Dauerversuche keine Ermüdungserscheinungen der Schraubenbefestigung gezeigt, die als besonderer Nachteil einer bestimmten Befestigungsart anzusehen wären. Die Spannkkräfte der Schrauben verändern sich unter der Dauerbelastung bei verdübelten und unverdübelten Schwellen bei gleichen Lastwechseln in der Minute in nahezu gleicher Weise, solange keine bleibende Einsenkung der Unterlegplatte in die Schwelle, vor allem aber keine Verwitterung des Schraubenlochs eintritt. Treten jedoch derartige Erscheinungen ein, so lassen die Spannkkräfte der Schrauben wesentlich nach.

Die Einsenkungen der Unterlegplatte in die Schwelle hängen in erster Linie von der Festigkeit des Holzes und der Zahl der Lastwechsel in der Minute ab. Sie treten daher besonders bei Kiefernholz und langsamem Befahren der Gleise ein, weniger dagegen bei Buchenholz und schnellem Befahren der Gleise.

Der verhältnismäßig günstige Verlauf der Schraubenspannkkräfte bei den Dauerversuchen, der auch bei 10 bis 15 nachgeahmten Betriebsjahren noch eine genügende Verspannung der Unterlegplatte mit den Schwellen zeigt, kennzeichnet die große Bedeutung der Witterungseinflüsse für die Schraubenspannkkräfte im Betrieb. Die im Dauerversuch festgestellten Änderungen der Spannkkräfte der Schrauben infolge Quellens und Austrocknens des Holzes, wie es bei Regen und Trockenheit eintritt, verursachen zusammen mit dem Belastungswechsel einen ständigen Spannungswechsel zwischen Schraube und Schwellenholz, der schließlich zur Ermüdung der Holzfasern der Schwelle führt. Die damit verbundene schädliche Wirkung für die Schraubenspannkkräfte kann noch durch das Eindringen von Wasser zwischen Schraube und Holz erheblich verstärkt werden, denn wenn unter der belasteten Unterlegplatte Wasser in die Bohrlöcher eingepreßt wird, werden auch getränkte Bohrlöcher allmählich mehr und mehr ausgelaugt werden. Es setzen dann Fäulnis am Holz des Bohrlochs sowie Rostangriffe an der Schraube ein, die beide zur Lockerung des Schraubensitzes führen. Im Zusammenwirken aller dieser Erscheinungen liegt in erster Linie das Lockerwerden von Schrauben begründet. Tritt dazu noch gleichzeitig ein Einarbeiten der Unterlegplatte in das Schwellenholz, so löst sich allmählich die Verspannung zwischen Unterlegplatte und Schwelle, und die mechanische Abnutzung des Schwellenholzes unter den gelockerten Unterlegplatten beginnt.

Für die Gestaltung des Oberbaus ergeben sich hieraus die wichtigen Forderungen, die Unterlegplatten, wenn solche überhaupt vor allem bei Hartholz für notwendig gehalten werden, möglichst starr herzustellen, um Durchbiegungen unter den Lasten zu vermeiden und die Schwellenlöcher vor Wasserandrang weitestgehend

zu schützen. Dieser Schutz kann in besonderem Maße erzielt werden, wenn die Unterlegplatte so starr ausgebildet wird, daß sie sich nicht ungleichmäßig durchbiegt und damit das Einpressen von Regenwasser in die Bohrlöcher möglichst verhindert wird. Spielräume zwischen Schraubenschaft und Unterlegplatte im Schraubenloch der Unterlegplatte verursachen bei nicht genügend starr ausgebildeter Unterlegplatte besondere horizontale Beanspruchungen der Schrauben und beeinträchtigen ihren festen Sitz. Diese Spielräume sind daher zu vermeiden, um so mehr als sie auch horizontale Bewegungen der Unterlegplatte unter der Wirkung der horizontalen Kräfte begünstigen. Auf der anderen Seite werden die Witterungsverhältnisse auf den gesunden Zustand des Schraubenlochs um so weniger Einfluß ausüben können, je besser das Schwellenholz am Bohrloch und das Dübelholz getränkt und je dichter das die Schrauben unmittelbar umgebende Schwellen- und Dübelholz ist. In dieser Hinsicht hat die Buchenholzschwelle und der Einschlagdübel in der Kiefernschwelle besondere Vorzüge.

Für die zweckmäßige Gestaltung der Einschlagdübel ergibt sich hieraus die Forderung, durch eine kegelförmige Bohrung des Dübels und Verstärkung der unteren Dübelwandungen eine möglichst starke Spreizung und damit ein starkes Anpressen der Dübelwandungen an das Schwellenholz beim Einbringen der Schwellenschrauben zu erzielen. Die Bohrung ist so zu wählen, daß nur Druckbeanspruchungen und möglichst keine Biegebeanspruchungen beim Einbringen der Schrauben in den Dübelwandungen auftreten, damit eine Zerstörung des Dübels vermieden wird. Es wäre eine Bohrung vorzuziehen, die der elastischen Formänderung des Holzes möglichst weitgehend gerecht wird. Die bisher benutzten Einschlagdübel entsprechen nach besonderen Versuchen diesen Forderungen bis auf kleinere Verbesserungen in ihren Einzelabmessungen. Was für die Einschlagdübel verlangt wird, trifft sinngemäß auch für die Pflockdübel zu.

Die Ergebnisse der Dauerversuche legen den Gedanken nahe, in Betriebsgleisen das Verhalten der Schraubenspannkkräfte in Abhängigkeit von den Betriebslasten, der Einsenkung der Unterlegplatte in die Schwelle und den Witterungseinflüssen fortlaufend für einen längeren Zeitabschnitt zu beobachten und zu messen. Es wären verschiedene Schwellenarten des Gleises mit Meßschrauben zum Bestimmen der Schraubenspannkkräfte und mit Meßvorrichtungen zur Bestimmung der Bewegung der Unterlegplatte auszurüsten und diese in bestimmten Zeitabschnitten je nach Witterung abzulesen. Die Versuchsanordnung würde denkbar einfach sein und nur geringe Kosten verursachen. Der Wert derartiger Untersuchungen dürfte für die zweckmäßige Ausbildung und Unterhaltung des Oberbaus nicht zu unterschätzen sein.

## Zur Dynamik des Eisenbahnoberbaues.

### Berechnungen am eingefahrenen Schienenstoß.

Von Dr. Saller, Regensburg.

Es scheint bei uns kaum bekannt zu sein, daß es eine einfache mathematische Kurve gibt, die die Gestalt des eingefahrenen Schienenstoßes recht treffend wiedergibt. Man heißt sie „defektive Hyperbel“. Sie hat die Gleichung  $y = \frac{a}{x^2 + b^2}$  oder wenn wir die Ordinaten  $y$  nach unten wie üblich als negativ einführen

$$y = - \frac{a}{x^2 + b^2} \dots \dots \dots 1)$$

Zum Beispiel haben wir für einen um 5 mm eingefahrenen Schienenstoß mit  $b = 0,1$  m, wenn wir die Abszissen im Maßstab 1:10, die Ordinaten stark, hier zehnmal vergrößert, auftragen, die Abb. 1. Auf je 1 m beiderseits läuft sich die Abbiegung aus. Sie beträgt hier nur mehr 0,00005 m. Wir befinden uns also praktisch auf der Höhe des durchgehenden, unberührten Schienenstranges. Nun wird natürlich die tatsächliche Bahn der Last, die den Schienenstoß befährt, nicht die hier gegebene sein, sie wird sich vielmehr unter der Last, und zwar besonders unter der Einwirkung

des ungefederten Teiles, wieder verändern, etwa wie in Abb. 1 punktiert eingezeichnet; aber der Endzustand wird doch wieder annähernd die Form einer solchen defektiven Hyperbel

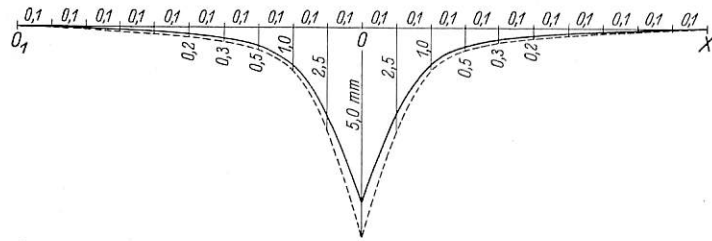


Abb. 1.

annehmen. Zu dem Druck des ungefederten Teiles der Verkehrslast kommt dann noch der durch die Federung des Fahrzeuges übertragene Druck des Fahrzeugkastens (Abb. 2).

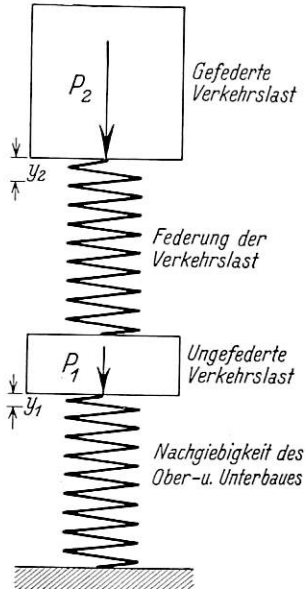


Abb. 2.

Es ist dann in Gl. 1) X durch  $1-x$  zu ersetzen und Gl. 1) wird

$$y_1 = - \frac{a}{(1+b^2) - 2x + x^2} \dots \dots \dots 2)$$

Es wird  $\frac{dy_1}{dx} = \frac{2ax - 2a}{(1+b^2 - 2x + x^2)^2}$ . Die lotrechte Beschleunigung  $\frac{d^2y_1}{dx^2} = \frac{2a(1+b^2 - 2x + x^2)^2 + (2a - 2ax)(1+b^2 - 2x + x^2)(4x - 4)}{(1+b^2 - 2x + x^2)^4}$ .  
Für  $x=1$  wird  $\frac{d^2y_1}{dx^2} = \frac{2a}{b^4}$ .

Der Bahndruck aus der unabgefederten Masse ergibt sich durch Hinzufügung der Trägheitskraft zum Gewicht dieser Masse zu  $P_1 + \frac{P_1}{g} \frac{d^2y_1}{dx^2} = P_1 + \frac{P_1(1+b^2 - 2x + x^2)2a + (2a - 2ax)(1+b^2 - 2x + x^2)(4x - 4)}{(1+b^2 - 2x + x^2)^4}$ .

Der Größtdruck für  $x=1$  wird  $P_1 + \frac{P_1 2a}{g b^4}$ . Die Trägheitskraft verdoppelt sich, da die Beschleunigung nach unten mit einemmal in die gleich große nach oben gewandelt wird.

Zu diesem Drucke der ungefederten Masse tritt noch der durch die Feder übertragene Druck des Fahrzeugkastens hinzu  $P_2 + k(y_2 + y_1)$ , wobei sich  $y_2 + y_1$  berechnen läßt aus der Differentialgleichung  $P_2 \frac{d^2y_2}{dx^2} - k(y_2 + y_1) = 0$ , der Bewegungsgleichung des abgefederten Gewichtes.

Setzt man  $y_1$  aus 2) ein, so wird  $P_2 \frac{d^2y_2}{dx^2} - k y_2 + \frac{k a}{(1+b^2) - 2x + x^2} = 0$ , die Schwingung des abgefederten Gewichtes  $P_2$  infolge des eingefahrenen Schienenstoßes, eine Differentialgleichung, die wohl das Schicksal der weitaus meisten für die Dynamik des Eisenbahnoberbaues bisher aufgestellten Formeln teilt, nämlich daß eine einfache exakte Lösung bei den verwickelten Beiwerten bisher nicht möglich ist. Man könnte sich nur auf Annäherungsverfahren beschränken, wie solche im Org. Fortschr. Eisenbahnwes. 1926, Heft 21, S. 425 nachgewiesen sind. Auch Timoshenko gibt in seinem neuen Buch „Schwingungsprobleme der Technik“, Berlin: Julius Springer 1932, S. 94 ein Beispiel numerischer Lösung solcher pseudoharmonischer Schwingungen auf dem Wege der Näherung.

Der Vorgang wird naheliegenderweise dadurch wesentlich verwickelter, daß am Übergang von der ersten auf die zweite Kurvenhälfte ein sehr maßgebender Stoßdruck auftritt.

### Das Anziehen von Eisenbahnwagen.

Von Reichsbahnoberrat A. Lange, Dresden.

Die nachstehende Untersuchung gibt einen Überblick über die Kräfte, die beim Anziehvorgang in den Zugfedern der Fahrzeuge auftreten, über die Geschwindigkeiten, mit denen sich die Fahrzeuge bewegen und über die Zeiten, in denen sich die Vorgänge abspielen. An der Hand der Ableitungen kann der Einfluß von Federn verschiedener Härte auf den Anziehvorgang untersucht werden. Ferner können die Gedankengänge auch bei der Untersuchung von Unfällen, die auf die Überbeanspruchung von Zugfedern zurückzuführen sind, verwendet werden.

Wir nehmen an, ein Zugteil I, bestehend aus n gleichen Wagen W werde von einer Lokomotive L (Zugkraft  $Z = n \rho W$ ) mit der gleichmäßigen Geschwindigkeit  $V_n$  vorwärts bewegt. Von ihm werde dann eine hinter ihm stillstehende Gruppe von m ebensolchen Wagen (Zugteil II) ergriffen. Der Teil II sei gestreckt, so daß beim Anziehen auf die einzelnen Wagen zu gleichen Zeiten die gleichen Kräfte  $P_2$  ausgeübt werden. Die auf die einzelnen Wagen des Zugteils I beim Anziehen des Teils II wirkenden Kräfte  $P_1$  müssen nach der gemachten

Annahme untereinander auch gleich sein. Die Zugstangen und die Kupplungen sollen als starr und gewichtslos angenommen werden.

Abb. 1 stellt schematisch das Aussehen des betrachteten Zuges in zwei unmittelbar benachbarten Augenblicken des Anziehvorgangs dar. Eine einfache geometrische Überlegung (der Weg von A über B nach B' und zurück über A' nach A ist gleich Null) ergibt die Grundgleichung  $(V-v).dt = d\Delta l + d\Delta l_2$ . Hierin bedeuten v und V die Geschwindigkeiten der Zugteile II und I,  $\Delta l_2$  die Längenänderung einer Wagenfeder und  $\Delta l$  die der Zughakenfeder der Lokomotive infolge der beim Ingangsetzen des Teils II auftretenden Kräfte.

Streng genommen hat der Zugteil I keine einheitliche Geschwindigkeit V, sondern Lokomotive und Wagen werden sich im allgemeinen mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen. Untereinander während des ganzen Anziehvorgangs gleich werden diese Geschwindigkeiten jedoch, wenn sich die Kräfte, die auf die einzelnen Fahrzeuge des Teils I wirken,

wie die Massen dieser Fahrzeuge verhalten. Dann wirkt auf die Lokomotive die Kraft  $X = P_1 \cdot \frac{L}{W}$ . Diese Voraussetzung, die nichts anderes bedeutet, als daß man Teil I als materiellen Punkt auffaßt, ist erfüllt, wenn der Teil I nur aus der Lokomotive allein besteht oder im Verhältnis zu Teil II unendlich groß ist. Nachstehende Ergebnisse gelten also genau nur für diese beiden Fälle; im übrigen sind sie nur als Näherungswerte zu betrachten.

Die Längenänderung der Zugfedern der Fahrzeuge, abhängig von einer auf sie wirkenden Kraft P, stellen wir dar durch die Beziehung  $\Delta l = c_w \cdot P^{\frac{1}{3}}$  bei den Wagen und  $\Delta \lambda = c_1 \cdot P^{\frac{1}{3}}$  bei der Lokomotive. Mit  $c_w = 0,0038$  und  $c_1 = 0,0068 \frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$  gerechnet ergibt sich folgende Tafel. In dieser sind  $\Delta l'$  und  $\Delta \lambda'$  die tatsächlichen Längenänderungen der jetzt meist gebrauchten Zugfedern.

P (kg)	$\Delta l$ (m)	$\Delta l'$	$\Delta \lambda$ (m)	$\Delta \lambda'$
2000	0,048	0,044	0,086	0,086
4000	0,060	0,063	0,108	0,109
6000	0,069	0,075	0,124	0,124
8000	0,076	0,080	0,136	0,136
10000	0,082	0,084	0,147	0,146
12000	0,087	0,088	0,156	0,155
16000	—	—	0,171	0,167
20000	—	—	0,185	0,172

Eine Betrachtung der Abb. 1 liefert folgende Ausgangsgleichungen

$$\left. \begin{aligned} a) m \cdot (P_2 - \rho W) &= X + n \cdot P_1 \\ b) m \cdot (P_2 - \rho W) &= M_2 \cdot \frac{dv}{dt} \\ c) -X - n \cdot P_1 &= M_1 \cdot \frac{dV}{dt} \\ d) v \cdot M_2 &= M_1 \cdot (V_n - V) \\ e) (V - v) \cdot dt &= d\Delta\lambda + d\Delta l_2 \end{aligned} \right\} \text{Gl. 1)}$$

nach dem Satze vom Antrieb

bereits oben gefunden. Aus Gl. 1 a) in Verbindung mit der Annahme  $X = P_1 \cdot \frac{L}{W}$  findet man noch

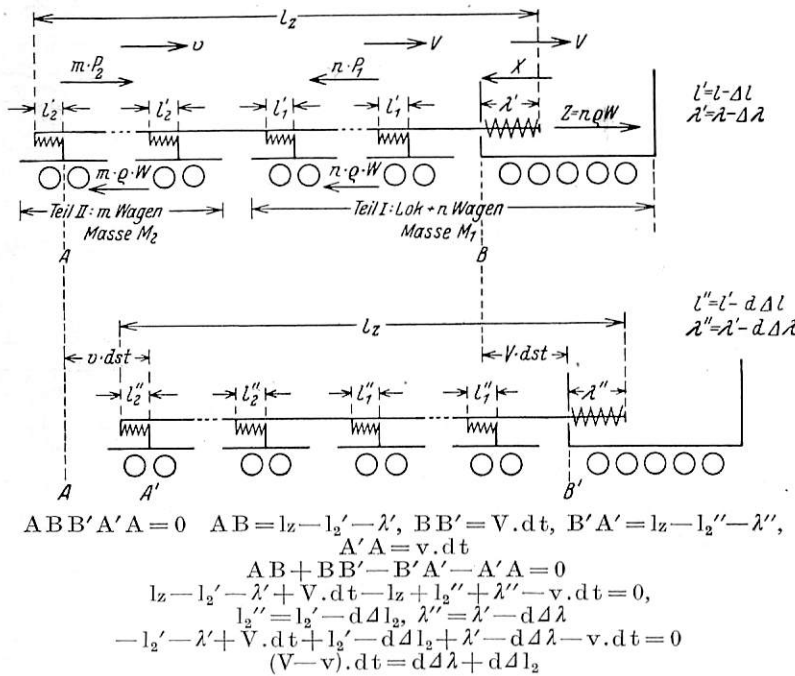
$$f) P_2 = P_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} + \rho \cdot W \quad \text{und} \quad g) X = a \cdot (P_2 - \rho W),$$

wo  $a = \frac{L \cdot M_2}{W \cdot M_1}$  ist.

Auf die Lokomotivfeder wirkt die Kraft  $X + (m + n) \cdot \rho \cdot W$  und auf jede Wagenfeder des Teils II die Kraft  $P_2 + \rho \cdot W$ . Es ergibt sich also  $\Delta \lambda = c_1 \cdot [X + (m + n) \rho W]^{\frac{1}{3}}$  und  $\Delta l_2 = c_w \cdot (P_2 + \rho \cdot W)^{\frac{1}{3}}$  und hieraus, wenn  $m + n - a = b$  gesetzt wird

$$d\Delta\lambda + d\Delta l_2 = \frac{1}{3} \cdot \left[ c_w \cdot (P_2 + \rho W)^{-\frac{2}{3}} + a \cdot c_1 \cdot (a P_2 + b \rho W)^{-\frac{2}{3}} \right] \cdot dP_2$$

Schreibt man aus Gl. 1b)  $dt = \frac{M_2 \cdot dv}{m \cdot (P_2 - \rho \cdot W)}$  und unter Zuhilfenahme der Gl.1d)  $V - v = \frac{M_1 \cdot V_n - v \cdot (M_1 + M_2)}{M_1}$



so ergibt sich aus der Gl. 1e)

$$\int_0^v [v \cdot (M_1 + M_2) - M_1 \cdot V_n] dv = -\frac{m \cdot M_1}{3 M_2} \cdot \int_{\rho W}^{P_2} (P_2 - \rho W) \cdot \left[ \frac{c_w}{(P_2 + \rho W)^{\frac{2}{3}}} + \frac{a \cdot c_1}{(a P_2 + b \rho W)^{\frac{2}{3}}} \right] dP_2$$

Die Auflösung der Integrale bietet keine Schwierigkeiten. Für v findet man eine quadratische Gleichung und aus dieser ergibt sich die Beziehung

$$v/P_2 \text{ zu } v = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} \cdot \left[ 1 \mp \sqrt{1 - A \cdot \left\{ c_w \cdot \left[ (P_2 + \rho W)^{\frac{1}{3}} \cdot (P_2 - 7 \rho W) + 6 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot (\rho W)^{\frac{4}{3}} \right] + \frac{c_1}{a} \cdot \left[ (a P_2 + b \cdot \rho W)^{\frac{1}{3}} \cdot (a P_2 - (4a + 3b) \rho W) + 3 \cdot ((m+n) \cdot \rho W)^{\frac{4}{3}} \right] \right\}} \right] \quad \text{Gl. 2)}$$

worin  $A = \frac{m \cdot (M_1 + M_2)}{2 M_1 \cdot M_2 \cdot V_n^2}$  ist.

Setzt man  $P_2 = \rho W$ , so wird der Faktor von A gleich Null und es wird  $v = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} \cdot (1 \mp 1)$ , also  $v_1 = 0$  und

$$v_2 = \frac{2 M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2}$$

Wird der Wert unter der Wurzel gleich Null, so erreicht, wie leicht zu erkennen ist,  $P_2$  seinen größten Wert und v

wird  $v_m = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} = \frac{v_1 + v_2}{2}$ . Der Maximalwert von  $P_2$  läßt sich in geschlossener Form nur darstellen, wenn die Reibung vernachlässigt wird. In diesem Fall nimmt Gl. 2) folgende Form an

$$v = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} \cdot \left[ 1 \mp \sqrt{1 - A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}}} \right] \quad \text{Gl. 2a)}$$

worin  $k = c_w + a^{\frac{1}{3}} \cdot c_1$  ist. Hieraus ergibt sich

$$P_{2max} = (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}} \quad \text{Gl. 2b)}$$

Für  $v_1, v_m$  und  $v_2$  findet man, nunmehr aber bei  $P_2 = 0$  dieselben Werte wie oben.

Zur Ermittlung der Beziehung  $V/P_1$  kann man sinngemäß genau so verfahren wie oben bei der Bestimmung von

$$V = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} \cdot \left[ 1 \pm \frac{M_2}{M_1} \sqrt{1 - A \cdot \left\{ c_w \cdot \left[ \left( P_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} + 2 \varrho W \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( P_1 \cdot \frac{M_1}{M_2} - 6 \varrho W \right) + 6 \sqrt[2]{2} \cdot (\varrho W)^{\frac{4}{3}} \right] + \frac{c_1}{a} \cdot \left[ \left( P_1 \cdot \frac{L}{W} + (m+n) \cdot \varrho W \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( P_1 \cdot \frac{L}{W} - 3 \cdot (m+n) \cdot \varrho W \right) + 3 \cdot ((m+n) \cdot \varrho W)^{\frac{4}{3}} \right] \right] \dots \text{Gl. 3)}$$

Hieraus ergibt sich, wenn  $P_1 = 0$  gesetzt wird  $V_1 = V_n$ ,  $V_2 = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \cdot V_n$  und  $V_m = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} = \frac{V_1 + V_2}{2} = v_m$ .

Vernachlässigt man die Reibung, so wird

$$V = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2} \cdot \left[ 1 \pm \frac{M_2}{M_1} \cdot \sqrt{1 - A \cdot k \cdot \left( \frac{M_1 \cdot P_1}{M_2} \right)^{\frac{4}{3}}} \right] \dots \text{Gl. 3a)}$$

und hieraus folgt in geschlossener Form

$$P_{1\max} = \frac{M_2}{M_1} \cdot (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}} \dots \text{Gl. 3b)}$$

Wir haben in Abb. 2 ein Zahlenbeispiel mit und ohne Reibung dargestellt und zwar für den Fall, daß eine Lokomotive drei Wagen anzieht. Die Zahlenwerte, mit denen wir hier i. A. immer rechnen wollen, sind folgende:  $L = 150000 \text{ kg}$ ,  $W = 30000 \text{ kg}$ ,  $V_n = \frac{1}{4} \text{ m/sec}$ ,  $g = 10 \text{ m/sec}$  und  $\varrho = \frac{1}{100}$ . Für dieses Beispiel sind, da  $n = 0$  ist, die Ergebnisse genau richtig.

Der Einfluß der Reibung, der zunächst (Linie 1 und 2) etwa 40% beträgt, steigt mit wachsender Reibungsziffer schnell an. Sind z. B. die anzuziehenden Wagen leicht gebremst ( $\varrho = \frac{1}{30}$ ), so steigt  $P_2$  von  $\sim 1500 \text{ kg}$  bei  $\varrho = 0$  bereits auf mehr als das Doppelte ( $P_2 = 3200 \text{ kg}$ ) an (Linie 1 und 3).

Die Gl. 2b) und 3b) setzen uns in die Lage, die größten Kräfte zu ermitteln, die bei gegebenen Fahrzeugen auf die Federn wirken können. Die größte Beanspruchung der Lokomotivfeder tritt offenbar ein, wenn die Lokomotive versucht eine sehr große Zahl von Wagen anzuziehen.  $X_{\max}$  ergibt sich aus  $X = P_1 \cdot \frac{L}{W}$  und der Gl. 3b) zu  $X_{\max} = a \cdot (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}}$ .

Setzt man hierin die Werte von A und k ein, schreibt man gemäß der gemachten Annahme  $M_1 = \frac{L}{g}$  und  $M_2 = \frac{m \cdot W}{g}$

und  $m = \infty$ , so ergibt sich  $X_{\max} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot L \cdot V_n^2 \cdot g}{g \cdot c_1}}$ ; mit den

oben angenommenen Zahlenwerten gerechnet  $X_{\max} = 12030 \text{ kg}$ . Die Zugfedern der Lokomotiven können (s. Tafel S. 274) Kräfte bis zu 20 t aufnehmen. Eine solche Kraft tritt auf bei einer

Geschwindigkeit von  $V_n = 20000^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot c_1}{2 \cdot L}} = 0,35 \text{ m/sec}$ .

Diese verhältnismäßig geringe Geschwindigkeit wird von der beschleunigt anfahrenen Lokomotive L bei einer angenommenen Zugkraft von nur 5000 kg schon nach einem Laufweg (Durchhang der ersten Kupplung) von  $s = \frac{V_n^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot Z} = 0,18 \text{ m}$  erreicht.

Die Lokomotive vermag den langen Wagenzug selbstverständlich gar nicht in Bewegung zu setzen.  $v$  bleibt nach Gl. 2) ständig gleich Null; V dagegen sinkt von  $V_1 = V_n$  am Anfang des Vorgangs über  $V_m = 0$  bis auf  $V_2 = -V_n$  am Ende desselben herab. Die Geschwindigkeit der Lokomotive kehrt sich also um. Das Ende des Anziehvorgangs, soweit wir uns hier mit ihm beschäftigen wollen, ist erreicht, wenn  $X = 0$  ist, wenn also auf die Lokomotive von dem angezogenen Teil keine Kraft mehr ausgeübt wird, also die Kupplung hinter der Lokomotive ihre Spannung verliert.

$$t = \frac{k}{3V_n} \int_0^{P_2} \frac{dP_2}{P_2^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{1 - A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}}}} = \frac{k}{3V_n} \cdot \left[ 3P_2^{\frac{1}{3}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \cdot A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \cdot \frac{1}{9} \cdot A^2 \cdot k^2 \cdot P_2^{\frac{8}{3}} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \cdot \frac{1}{13} \cdot A^3 \cdot k^3 \cdot P_2^{\frac{12}{3}} + \dots \right) \right]_{0}^{P_2} \dots \text{Gl. 6)}$$

$v/P_2$ . Man muß lediglich die Integrationsgrenzen beachten; bei V sind diese „ $V_n$  bis V“ und bei  $P_1$  „Null bis  $P_1$ “. Man kann aber auch  $V/P_1$  aus Gl. 2) unmittelbar herleiten, indem man sie mit Gl. 1d) und 1f) verbindet. In beiden Fällen findet man

Unter der Annahme, daß man die Reibung vernachlässigt, tritt die größte Beanspruchung der Wagenfeder ein, wenn ein sehr großer Zugteil I einen einzelnen Wagen anzieht. Dann wird  $M_1 = \frac{L + nW}{g}$  und  $M_2 = \frac{W}{g}$  und es ergibt sich nach Gl. 2b), wenn  $n = \infty$  und  $m = 1$  gesetzt wird

$$P_{2\max} = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot W \cdot V_n^2 \cdot g}{g \cdot c_w}} = 5568 \text{ kg.}$$

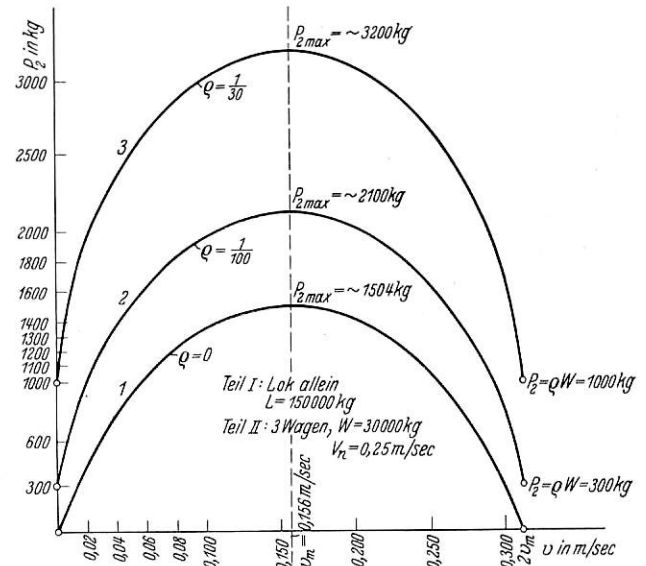


Abb. 2.

Die größte Kraft, die die Wagenfeder aufnehmen kann, ist 12 t. Diese Kraft wird erreicht, wenn

$$V_n = \sqrt[4]{\frac{g \cdot c_w}{2 \cdot W}} \cdot 12000^{\frac{4}{3}} = 0,42 \text{ m/sec}$$

ist. Überbeanspruchungen der Fahrzeugfedern treten also schon bei verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten des anziehenden Zugteils ein.

Bei der Ermittlung der Dauer des Anziehvorgangs soll die Reibung grundsätzlich vernachlässigt werden.

Nach Gl. 1b) ist  $dt = \frac{M_2 \cdot dv}{m \cdot P_2}$ . Bildet man  $dv$  aus

Gl. 2a) und setzt es in vorstehende Gleichung ein, so erhält man

$$dt = \frac{k \cdot dP_2}{3 \cdot V_n \cdot P_2^{\frac{2}{3}} \sqrt{1 - A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}}}} \dots \text{Gl. 5)}$$

Die Größe  $\left( 1 - A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$  kann man nach dem binomischen Satz entwickeln, da der Wert unter der Wurzel niemals negativ, sondern (für  $P_{2\max} = (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}}$ ) höchstens gleich Null werden kann. Führt man dies aus und integriert man gliedweise, so erhält man

$P_2 = P_{2max}$  entspricht der halben Dauer des Vorgangs, die ganze Dauer wird also nach Einsetzen der Grenzen  $P_2 = 0$  und  $P_{2max} = (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}}$

$$T = \frac{2k}{V_n} \cdot (A \cdot k)^{-\frac{1}{4}} \cdot C_1 = 2 C_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 M_1 \cdot M_2 \cdot k^3}{m \cdot (M_1 + M_2) \cdot V_n^2}} \dots \text{Gl. 7),}$$

wo  $C_1 = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} + \frac{1.3}{2.4} \cdot \frac{1}{9} + \frac{1.3.5}{2.4.6} \cdot \frac{1}{13} + \frac{1.3.5.7}{2.4.6.8} \cdot \frac{1}{17} + \dots \approx 1,27$  ist.

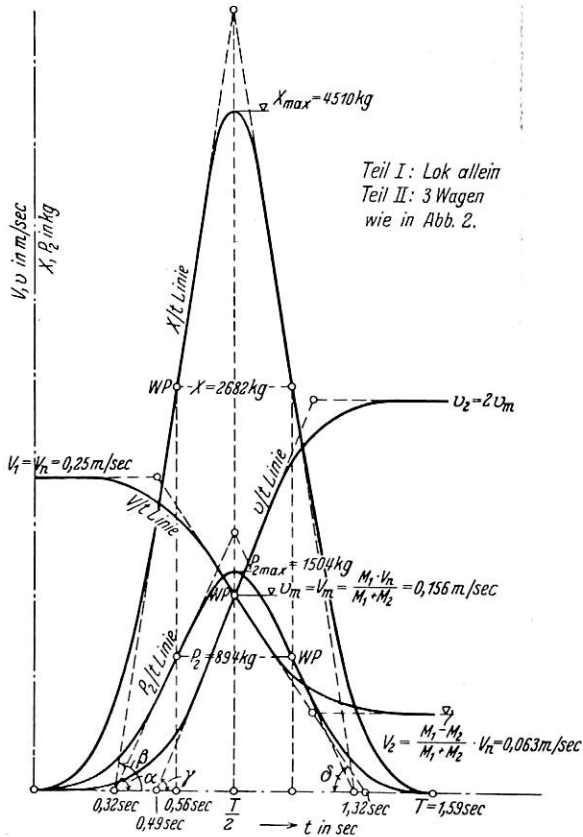


Abb. 3.

Drückt man die Massen durch die Gewichte der Fahrzeuge aus, so wird  $T = 2 C_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 W \cdot (L + n W) \cdot k^3}{g \cdot (L + (n + m) W) \cdot V_n^2}}$ . Am schnellsten geht das Anziehen vor sich, wenn ein sehr großer Teil I einen einzelnen Wagen anzieht. In diesem bereits oben behandelten Fall wird  $n = \infty$  und  $m = 1$  und

$$T = 2 C_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 W \cdot c_w^3}{g \cdot V_n^2}} = 0,68 \text{ Sek.}$$

Versucht aber die Lokomotive allein einen sehr großen Zugteil II anzuziehen, so ergibt sich

$$(n = 0, m = \infty) T = 2 C_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 L \cdot c_1^3}{g \cdot V_n^2}} = 1,58 \text{ Sek.}$$

Einen besonders guten Einblick in den Verlauf des Anziehungsvorgangs gewähren die Kraft und die Geschwindigkeits-

Zeitlinien. Diese sollen daher noch etwas näher betrachtet und in einem Beispiel aufgezeichnet werden.

Aus Gl. 5) folgt  $\frac{d P_2}{d t} = \frac{3 V_n}{k} \cdot P_2^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{1 - A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}}} = z$ .

Aus  $\frac{d z}{d P_2} = 0$  ergibt sich ein Wendepunkt bei  $P_2 = (2 A k)^{-\frac{3}{4}}$ .

Die zugehörige Zeit  $t'$  findet man aus Gl. 6) zu

$$t' = \frac{k \cdot C'}{V_n} \cdot (2 A \cdot k)^{-\frac{1}{4}}$$

worin

$$C' = 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{1}{2}\right) + \frac{1.3}{2.4} \cdot \frac{1}{9} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1.3.5}{2.4.6} \cdot \frac{1}{13} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 + \dots \approx 1,07$$

ist. Die Neigung der Tangente im Wendepunkt wird  $\frac{d P_2}{d t} = \tan \alpha = \frac{3}{2} \cdot V_n \cdot (A \cdot k)^{-\frac{1}{2}}$ . Die Tangenten beim

Anfang und Ende des Vorgangs sind waagrecht. Die Ermittlung weiterer Kurvenpunkte mittels Gl. 6) ist sehr einfach, da  $A \cdot k \cdot P_2^{\frac{4}{3}}$  immer ein echter Bruch ist.

Durch die  $P_2/t$ -Linie ist die  $X/t$ -Linie vollständig bestimmt, da  $X = a \cdot P_2$  ist (Gl. 1g). Bemerkenswert ist noch, daß sich die Wendetangenten beider Linien (die Wendepunkte liegen auf derselben Ordinate) auf der Abszissenachse schneiden.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeits-Zeitlinien geht man ebenfalls von Gl. 1b) und 1c) aus. Man erhält  $\frac{d v}{d t} = \frac{m \cdot P_2}{M_2}$  und  $\frac{d V}{d t} = -\frac{m \cdot P_1}{M_2}$ . Hierin hat man nur die  $P$  nach Gl. 2a) und 3a) durch  $v$  und  $V$  zu ersetzen. Durch nochmalige Differentiation findet man, daß die Linien je einen und zwar einen und denselben Wendepunkt bei  $v_m = V_m = \frac{M_1 \cdot V_n}{M_1 + M_2}$  haben, sich also in diesem Punkte schneiden. Die Neigungen der Wendetangenten ergaben sich zu  $\frac{d v}{d t} = \tan \gamma = \frac{m}{M_2} \cdot (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}}$  im einen und  $\frac{d V}{d t} = \tan \delta = -\frac{m}{M_1} \cdot (A \cdot k)^{-\frac{3}{4}}$  im andern Fall. Im Sonderfall  $M_1 = M_2$  sind diese Neigungen entgegengesetzt gleich.

In Abb. 3 haben wir die Zeitlinien aufgezeichnet und zwar für denselben Fall, der in Abb. 2 behandelt ist. Die Ermittlungen gelten, da  $n = 0$  ist, nicht nur näherungsweise sondern genau.

Man kann auch die Geschwindigkeitslinien aus den Kraftlinien ableiten. Beispielsweise ist bei Teil II  $\frac{W}{g} \cdot \frac{d v}{d t} = P_2$

oder  $v = \frac{g}{W} \cdot \int_0^{P_2} P_2 \cdot d t$ . Man braucht also nur die Fläche

der  $P_2/t$  Linie mit der Konstanten  $\frac{g}{W} = \frac{1}{3000}$  zu multiplizieren, um die zugehörige Geschwindigkeit zu erhalten.

In derselben Weise kann man natürlich auch aus den Flächen der Geschwindigkeitslinien die zugehörigen Wegelängen finden ( $ds = v \cdot dt$ ,  $s = \int v \cdot dt$ ).

## Rundschau.

### Bahnunterbau, Brücken und Tunnel; Bahnoberbau.

#### Eisenbetonfahrbahntafeln ohne Bettung.

Die kanadische National-Bahn hat kürzlich zwei bemerkenswerte eingleisige Wegunterführungen hergestellt, bei denen die Fahrbahntafeln aus Eisenbeton fertig in zwei Teilen eingefahren wurden. Die eine der beiden Brücken befindet sich in Sherbrooke, Quebec, die andere in der Nähe von St. George, Ontario. Beide

Brücken sind in der gleichen Weise hergestellt worden. In Sherbrooke hat die Fahrbahntafel eine Länge von 16,16 m, was eine Lichtweite von 14,00 m ergibt. Die Brückenöffnung ist durch einen Pfeiler in zwei Öffnungen geteilt, von denen die eine 5,25 m, die andere, einschließlich einem 1,52 m breiten Fußweg, 7,00 m weit ist.

Die Fahrbahntafel der Brücke bei St. George hat eine Länge von 17,85 m, was eine Lichtweite von 15,80 m ergibt. Die Öffnung ist durch einen Mittelpfeiler in zwei gleich große Öffnungen von je 7,30 m Breite, von denen je 1,22 m auf die Fußwege entfallen, unterteilt.

Die Konstruktionsdicke der Sherbrooke-Brücke beträgt 61 cm, die der Brücke bei St. George 76,5 cm. Diese war hier nur durch die Abmessungen des bisherigen Brückenüberbaues, der erneuert wurde, bedingt. Um Änderungen an der Höhenlage des Gleises zu vermeiden, wurde die Fahrbahntafel 15,5 cm stärker hergestellt, als es die statische Berechnung erfordert hätte.

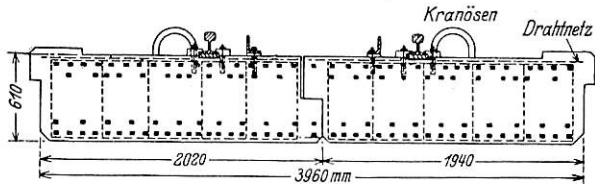


Abb. 1.

Die Fahrbahntafeln wurden in zwei der Länge nach geteilten Hälften von je 1,98 m Breite hergestellt, als zwei voneinander unabhängige Bauwerksteile. Jeder Teil trägt eine Schiene des Gleises, so daß sich die Verkehrslast gleichmäßig aus beiden Streifen verteilt.

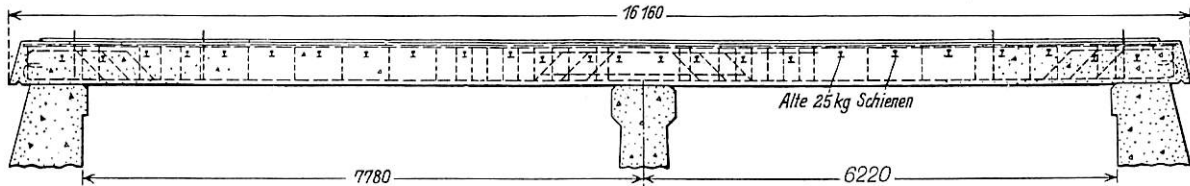


Abb. 2.

Die Schienen wurden auf eingelassene Eichenholzplatten ohne Bettung verlegt. Die Eichenholzplatten sind getränkt und liegen in einer Aussparung von 146 mm Breite und 12 mm Tiefe. Die Schienen werden mit besonderen Klammern im Abstand von 61 cm auf beiden Seiten befestigt, die durch Bolzen von 19 mm Durchmesser gehalten werden. Die Bolzen sind in einbetonierte versenkte Gewinderöhre verschraubt. Die Fahrzeuge werden außerdem durch Leitschienen, bestehend aus Winkeleisen  $127 \times 102 \times 19$  im Abstand 27,4 cm von Schienenmitte, gesichert.

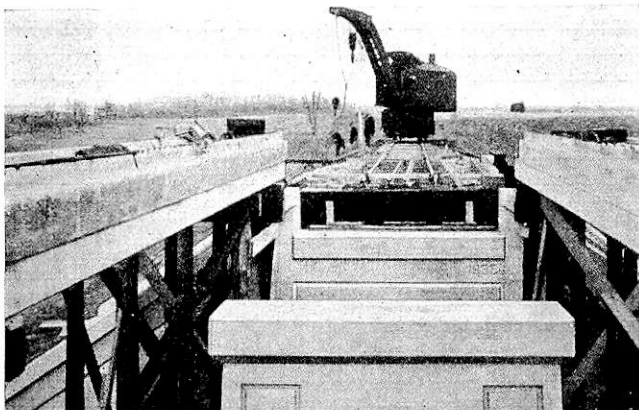


Abb. 3. St. George-Brücke. Behelfsbrücke entfernt, Fahrbahntafel fertig zum Einheben. (11.00 Uhr vorm.)

Diese Leitschienen sind in gleicher Weise auf der Fahrbahntafel mit Bolzen befestigt, wie die Fahrschienen.

Beide Fahrbahnhälften sind in der Mitte mit einem Falz gestoßen, der beiderseits um 7,6 cm übergreift (s. Abb. 1). Bei Anordnung des Falzes wurde in der oberen Hälfte eine Längsfuge von 12,7 mm Weite und in der Mitte eine horizontale Fuge von 9,5 mm Höhe vorgesehen. Die horizontale Fuge wird mit einem Bleiband von  $76,2 \times 9,5$  mm Querschnitt ausgelegt, während die obere Längsfuge mit Asphalt ausgegossen wird. Zur besseren Abdichtung sind auf beiden Hälften oben auf die ganze Länge

Bleibänder von  $254 \times 3,2$  mm Querschnitt an einer Kante einbetoniert, die nach Verguß der Fuge zusammengeschlagen und überlappt verlötet werden.

Die Fahrbahntafeln sind als durchlaufende Träger auf drei Stützen bemessen. Sie haben aber eine zusätzliche Bewehrung auf der Unterseite erhalten, um die Zugspannungen während des Einfahrens aufzunehmen. Sie sind außerdem in der Querrichtung zur Sicherung beim Einfahren durch alte Eisenbahnschienen bewehrt (s. Abb. 2).

Um eine ganz genaue Lage der Eiseneinlagen beim Betonieren sicherzustellen, wurden die oberen und unteren Eisen durch senkrechte Flacheisen, die angeschweißt wurden, zu festen Rahmen verbunden.

Um ein ganz genaues Betonieren, insbesondere zur Erreichung eines guten Anschlusses der beiden Hälften in der Längsfuge, zu erreichen, wurde die Rüstung für die beiden Fahrbahnhälften bemessen, trotzdem beide Teile nacheinander betoniert wurden. Die Bewehrung wurde von oben in die Schalung eingehängt und jeder Teil wurde in einem Arbeitsgang ohne Unterbrechung im Gießverfahren betoniert.

Der Teil, bei dem der Falzvorsprung in der unteren Querschnittshälfte liegt, wurde zuerst hergestellt. Dann wurde die zweite Hälfte, nur durch ein eingefettetes Brett zum Freihalten der oberen Fuge, durch den Bleistreifen auf dem horizontalen Absatz und durch ein Zinkblech in der unteren Fuge vom ersten

Teil getrennt, unmittelbar an diesen anbetoniert. Der erste Teil diente also hier als Schalung für den zweiten Teil. Zur Beschleunigung des Abbindens wurde je nach der Temperatur ein Zuschlag von Kalziumchlorid verwendet. Probestücke zeigten nach 28 Tagen eine Festigkeit von 263 bis  $311 \text{ kg/cm}^2$ , während nur  $210 \text{ kg/cm}^2$  vorgeschrieben waren.

Neben den Brückenöffnungen wurden Holzgerüste für die Fahrbahntafeln errichtet. Jede Hälfte der Tafeln wog bei Sherbrooke 61 t und bei St. George 80 t. Ein Lokomotivkran von 152 t Tragfähigkeit verbrachte sie zunächst vom Werkplatz auf

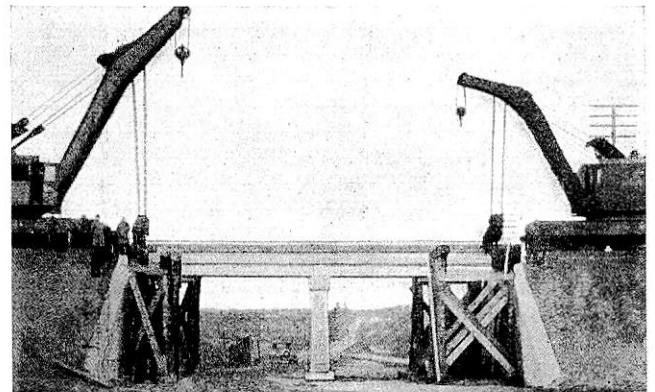


Abb. 4. St. George-Brücke: Einheben der zweiten Fahrbahntafel. (11.35 Uhr vorm.)

die Gerüste. Die Tragfähigkeit des Kranes hätte wohl die Herstellung der Fahrbahntafeln in einem Stück gestattet. Es war aber fraglich, ob die frische Dammschüttung neben den Widerlagern bei dieser ungeheuren Einzellast nicht nachgegeben hätte. Hauptsächlich aus diesem Grunde wurden sie in zwei Teilen hergestellt.

Der Transport auf die Hilfsgerüste und das Einheben in die Brückenöffnung geschah während Zugspausen. Nach Sperrung des Gleises wurden mit dem Kran die bisherige Brücke bzw. die Behelfsbrücke ausgehoben und die längs lagernden neuen Fahr-

bahntafeln eingehoben. Bei St. George dauerte diese Arbeit einschließlich Verlegen der Bleibänder, Vergießen und Zulöten der Längsfuge und Befestigen der Schienen 2 Std. 10 Min., dabei konnte die ganze Arbeit ohne übermäßige Eile durchgeführt werden, da eine noch längere Zugspause zur Verfügung stand.

Nachstehend die Einzelzeiten der Ausführung:

Ende der Vorbereitungszeit und Sperrung des Gleises . . . . .	um 10.30 Uhr
Gleis und Behelfsbrücke entfernt . . . . .	„ 11.00 „
Erste Fahrbahntafel eingebaut . . . . .	„ 11.20 „
Zweite Fahrbahntafel eingebaut . . . . .	„ 11.35 „
Fahrbahn zum Gleisbau fertig . . . . .	„ 12.05 „
Gleis fertig, Gerüst z. T. entfernt . . . . .	„ 12.25 „
Gerüst ganz entfernt, Gleis frei . . . . .	„ 12.40 „

Mf.

Rly. Age, 5. August 1933, Nr. 6.

### Brückenumbau in Indien.

Die Indus-Brücke bei Kotri ist in den Jahren 1931 bis 1933 umgebaut worden. Der etwa zwei Jahre dauernde Umbau zeigt, in welchem Umfang die kolonialen Länder, die früher als Hauptstütze des europäischen Marktes gegolten haben, es verstanden haben, sich vom Mutterland und von der europäischen Arbeit unabhängig zu machen.

Die Brücke, die in ihrem Hauptteil aus fünf Öffnungen von je 110 m Länge besteht, war für die neueren, schweren Lokomotiven zu schwach geworden; außerdem mußte bisher auch der

ganze Straßenverkehr über die einspurige Eisenbahnfahrbahn geleitet werden, weil eine besondere Fahrbahn für Straßenfahrzeuge fehlte. Beim Umbau wurden die Hauptträger verdoppelt, indem man unmittelbar außerhalb der bisherigen Halbparabelträger weitere Träger derselben Form einbaute. Diese neuen, rund 200 t schweren Träger wurden über eine über die ganze Brückenlänge verlaufende Kranbahn paarweise eingefahren und dann unter Belastung eingebaut. Die Kranbahn wurde zu diesem Zweck auf die vorhandene Brücke besonders aufgebaut; einer der Kranwagen erhielt elektrischen Antrieb. Die Fahrbahn wurde vollständig erneuert; die Teile der alten Fahrbahn wurden dazu verwendet, um auf der einen Brückenseite eine auf Auslegern ruhende besondere Straßenfahrbahn anzusetzen. Der Umbau der alten Fahrbahn wurde in Einzelstrecken von etwa 30 m Länge während Zugspausen von 2 ½ bis 3 ½ Stunden ausgeführt. Der Eisenbahn- und Straßenverkehr wurde also kaum in Mitleidenschaft gezogen.

Die neuen Träger und Fahrbahnen wurden von einem einheimischen Unternehmen in Kalkutta hergestellt und zwar unter ausschließlicher Verwendung von in Indien gefertigten Walzprofilen. Die Arbeit ist eine der umfangreichsten, die bisher in Indien ausgeführt worden sind. Die Pläne zum Einbau der verschiedenen Teile stammen von der Brückenbauabteilung der Indischen Nordwest-Bahn, die auch den Einbau selbst leitete. Nur beim eigentlichen Entwurf der erforderlichen Verstärkungsarbeiten waren neben der Bahngesellschaft auch noch englische Ingenieurfirmen beteiligt.

R. D.

(The Railw. Eng. 1933, Nr. 639.)

## Verschiedenes.

### 30 Jahre Einphasen-Wechselstrombahnbetrieb in Deutschland.

Vor 30 Jahren, am 4. Juli 1904, vollzog sich bei Berlin ein Ereignis, das für die Entwicklung des Eisenbahnwesens von großer Bedeutung war. Die Elektrizität hatte sich die Straßenbahn erobert und versuchte nun, auch in das Gebiet der Fernbahnen einzudringen. Bei den viel größeren Leistungen und viel größeren Übertragungsweisen war es verständlich, daß die Elektrotechniker glaubten, mit weit höheren Spannungen arbeiten zu müssen als bei den Straßenbahnen. In Amerika, in der Schweiz und in Deutschland trat fast gleichzeitig der Gedanke auf, sich dazu des Wechselstroms zu bedienen. Die AEG, die in Deutschland diesen Standpunkt vertrat, hatte sich von der Preußisch-hessischen Staatsbahnverwaltung das Recht einräumen lassen, die Strecke Niederschöneweide — Spindlersfeld für Wechselstrombetrieb einzurichten und zwei Triebwagen auf ihr laufen zu lassen. Am 4. Juli 1904 nahmen diese Versuche ihren Anfang. Der schwierigste Teil der Aufgabe bestand in der Schaffung eines Wechselstrommotors, dessen Zugkraft-Charakteristik der einer Dampflokomotive entsprechen mußte. Er wurde nach dem Patent Winter-Eichberg entwickelt, die Spannung des Fahrdrahtes, die man mit 6000 Volt festgelegt hatte, wurde ihm ohne Umspannung zugeführt. Die hohe Spannung mahnte zu besonderer Vorsicht, denn jede Berührung eines spannungsführenden Teiles wirkte tödlich. Die Stromleitungen im Wagen wurden daher besonders sorgfältig verlegt und bedeckt, und alle Apparate wurden in einer Kammer untergebracht, die nur geöffnet werden konnte, nachdem der Stromabnehmer von der Fahrleitung abgeschaltet worden war. Die Fahrleitung war ebenfalls völlig neu zu entwerfen. Es war nicht nur die bisher nicht gebräuchliche hohe Spannung, die Schwierigkeiten bot, auch die größere Geschwindigkeit stellte neue Aufgaben. Die AEG versuchte hier zum ersten Male die sogenannte Kettenfahrleitung, die sich später nicht nur die Eisenbahnen schnell eroberte, sondern auch bei Straßen- und Kleinbahnen vielfach Anwendung fand.

Die Versuche hatten Erfolg. Die Preuß. Staatsbahnen entschlossen sich, den Wechselstrom anzuwenden und richteten mit ihm den Vorortverkehr in Hamburg ein. Mit der Spannung ging man dann bald auf 15000 Volt herauf, mit den Wellen allerdings von 25 auf 16 $\frac{2}{3}$  herunter. Das konnte man mit dem einfachen Reihenstrommotor und ohne die Winter-Eichberg-Einrichtung noch bewältigen. Mit diesen Änderungen ist das Wechselstromsystem dann nicht nur in Deutschland und Österreich, sondern auch in der Schweiz und in den nordischen Ländern angenommen worden, und auch Amerika besitzt eine größere Anzahl von Wechselstrombahnen.

Der „Sprung aus dem Gleise“. Der wirtschaftliche Kampf zwischen Auto und Reichsbahn. Der Behälterverkehr. Von Max Krusemark und Reinhold Bräuer. 56 Seiten. 2,— R.M. Verlag J. Schweitzer, München.

In dem Werk ist nach einer allgemeinen Betrachtung über Wirtschafts- und Verkehrsnot die bisherige Entwicklung des Behälterverkehrs kurz geschildert. Die Verfasser kommen dabei zu dem Schluß, daß die bisherige Entwicklung einseitig den Belangen der Reichsbahn Rechnung getragen habe und es deshalb notwendig ist, auch durch Gedanken von außen, nämlich aus den am Behälterverkehr interessierten Kreisen der Wirtschaft, der Weiterentwicklung zu dienen. Es wird ein neues Behältersystem vorgeschlagen, durch das die Fortbewegung der Behälter auf der Straße erleichtert wird. Als geeignetes Mittel hierzu wird das sogenannte Stafettenfahrzeug, bei dem der Laderaum (Behälter) in Form eines Anhängers über den Zugwagen geschoben wird, angesehen. Auf- und Abladen geschieht ohne Schwierigkeiten in Minuten. Weiter ist die Einwirkung des Behälterverkehrs auf die Wirtschaft, die Entwicklung von Spezialbehältern nach den Bedürfnissen der Wirtschaft und die Beschaffung der nötigen Einrichtungen im Rahmen des Arbeitsbeschaffungsprogrammes erörtert. Zum Schluß sind Gedanken über die Umgestaltung der vorhandenen Bahnanlagen durch Schaffung von Behälterbahnhöfen zusammengetragen.

Le.

Deutscher Stahl — Deutsche Arbeit. Din-Format A 5, 54 Seiten mit 13 Abbildungen. Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf. 1934. Steif broschiert R.M. —,80.

Die gelegentlich der Ausstellung „Deutsches Volk — Deutsche Arbeit“ erschienene Schrift dient dem Zweck, den deutschen Volksgenossen mit der Lage und den Lebensbedingungen der Eisen- und Stahlindustrie bekanntzumachen und ihm zu zeigen, inwiefern auch seine Lebenslage im eisernen Zeitalter unmittelbar und mittelbar mit der Industrie von Stahl und Eisen verknüpft ist.

Als weiterer Teil des Nickelhandbuchs geht uns zu:

„Nickel-Chrom I. Teil: Korrosionsbeständige Nickellegierungen“.

Das Heft behandelt im ersten Abschnitt die Frage der Korrosionsbeständigkeit im allgemeinen und vermittelt dem Leser einen Einblick in die Vielheit der Einflüsse, von denen ein chemischer Angriff abhängig ist. Die nächsten Abschnitte schildern die handelsüblichen Legierungen, ihre Eigenschaften und ihre besondere Verwendung.

Die Schrift kann kostenlos vom „Nickel-Informationsbüro m. b. H., Frankfurt a. M.“ bezogen werden.