

Allgemeine Theorie des Nalenz-Höfer-Verfahrens.

Von Dr. Ing. Gerhard Schramm, Reichsbahnbaumeister, Reichsbahndirektion Ludwigshafen a. Rh.

- A. Einleitung.
- B. Die Aufgabe und ihre grundsätzliche Lösung.
- C. Das Abbildungsverfahren.
 - 1. Allgemeines.
 - 2. Die Bildlinie eines Kreisbogens.
 - 3. Die Bildlinie des Übergangsbogens.
 - 4. Die Bildlinie eines vorhandenen Gleisbogens.
- D. Die Ermittlung der Abstände \bar{e} durch Konstruieren der Summenlinie.

A. Einleitung.

Um einen vorhandenen Gleisbogen neu abzustecken, kann man zwei verschiedene Wege einschlagen:

1. Man bestimmt durch eine Winkelmessung den Bogenzentriwinkel, legt gewisse Sehnen oder Tangenten des künftigen Bogens fest und mißt von diesen aus unter Benutzung von Visierstäben und Kurventabellen einzelne Punkte des neuen Bogens ein.

2. Man verschafft sich Klarheit über die Krümmungsverhältnisse des vorhandenen Bogens, ermittelt auf Grund dieser Erkenntnis die Abstände des neuen Bogens vom vorhandenen und legt die neue Bogenachse dadurch fest, daß man an beliebig vielen Stellen diese Abstände vom vorhandenen Bogen aus abträgt.

Den zweiten Weg geht das Nalenz-Höfer-Verfahren. Es liefert nicht irgend einen „Fehlerausgleich“ (vgl. unten), sondern eine regelrechte, klare und eindeutige Neuabsteckung, wie sie nach dem ersten Verfahren (mit Theodolit und Tabellen) nicht besser zu erzielen ist. Der Unterschied gegenüber diesem ist nur der, daß das Nalenz-Höfer-Verfahren fast zwangsläufig zur besten, wirtschaftlichsten Lösung führt, während diese bei anderen Methoden (besonders bei schwierigen Verhältnissen) nur unter großem Arbeitsaufwand und mehr zufällig einmal getroffen werden kann. Das Nalenz-Höfer-Verfahren ist daher, was Einfachheit und Vielseitigkeit der Anwendung anbetrifft, durch kein anderes zu übertreffen. Etwas anderes ist es jedoch mit der „Evolvententheorie“ dieses Verfahrens*). Diese ist unübersichtlich und schwer verständlich und mag schon manchen vom gründlichen Studium des Verfahrens abgeschreckt haben**).

Im folgenden wird nunmehr eine neue allgemeine Theorie des Nalenz-Höfer-Verfahrens gegeben, die nicht von einem Abwicklungsvorgang (Evolventen) ausgeht, sondern das Verfahren aus ganz einfachen mathematischen Beziehungen entwickelt***). Wegen des zur Verfügung stehenden Raums muß

*) Max Höfer: „Die Absteckung von Gleisbogen aus Evolventenunterschieden.“ Berlin 1927.

**) Auch die Ableitungen von Böhm (K. Böhm: „Der Gleisbogen als Standlinie“, Zeitschrift „Der Bahnbau“, 1929, Nr. 50 bis 52) befriedigen nicht ganz; denn auch dort ist an der Vorstellung einer „Abwicklung“ festgehalten. Gerade diese Vorstellung aber ist es, die einer tieferen Erkenntnis des Wesens des Verfahrens und einer Ableitung in allgemeiner Form hinderlich ist.

***) Diese Theorie ist zum ersten Male in der Schrift des Verfassers „Der vollkommene Gleisbogen, seine Gestaltung als Kurve mit stetigem Krümmungsverlaufe“, Verlag Julius Springer, Berlin, entwickelt worden. Dort diente sie jedoch nur als Grundlage für eine neuartige Gestaltung der Gleisbogen.

Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens. Neue Folge. LXVIII. Band. 16. Heft 1931.

darauf verzichtet werden, hier auf Einzelheiten der praktischen Anwendung einzugehen. Diese sollen der Gegenstand einer späteren Veröffentlichung sein. Ebenso werden umfassende Genauigkeitsuntersuchungen, die bisher fehlten, und die durch die neue Theorie möglich gemacht worden sind, besonders behandelt werden.

Es mag noch eine Bemerkung über die Benennung des Verfahrens Platz finden. Höfer hat verschiedentlich die Bezeichnung „Evolventenverfahren“ empfohlen. Wir halten diese nicht für geeignet und möchten die Benennung „Nalenz-Höfer-Verfahren“ vorschlagen, die sich ohnedies schon gut eingebürgert hat; und zwar aus folgenden Gründen: Erstens ist es nur recht und billig, wenn man dieses — man kann wohl sagen — geniale Verfahren mit den Namen derjenigen in Verbindung bringt, denen wir es verdanken. Zweitens aber hat das Verfahren an sich mit Evolventen nicht das geringste zu tun. Es besteht wohl, wie Höfer gezeigt hat, eine Möglichkeit, das Verfahren mit Hilfe von Bogenevolventen abzuleiten; jedoch ist diese Art der Ableitung sicher nicht die zweckmäßigste und kann, wie wir sehen werden, durch eine viel einfachere und allgemeinere Theorie ersetzt werden.

Die Bezeichnung „Bogenausgleichverfahren“, die auch in die Oberbauvorschriften gedragen ist, ist sogar irreführend; hat sie doch verschiedentlich die seltsam verschwommene Vorstellung hervorgerufen, daß es sich bei dem Verfahren um einen „Fehlerausgleich“ (etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate) handele. Demgegenüber muß ausdrücklich betont werden, daß es sich beim Nalenz-Höfer-Verfahren überhaupt nicht um Fehler im Sinne der Fehlerrechnung handelt, auch nicht darum, den ursprünglichen Zustand eines verfahrenen Gleisbogens wiederherzustellen, sondern lediglich um die Ermittlung der Abstände (nicht Fehler) eines neu herzustellenden Bogens mit gegebenen Krümmungsverhältnissen von einem vorhandenen Gleisbogen. Dabei kann der neue Bogen in gewissen Grenzen beliebig vom ursprünglichen Bogen abweichen; ja es läßt sich sogar ohne vorhandenen Gleisbogen aus einem gebrochenen Polygonzuge, dessen einzelne Winkel (die allerdings nicht zu groß sein dürfen) und Seiten bekannt sind, mit Hilfe des Nalenz-Höfer-Verfahrens ohne Kurventabellen ein Gleisbogen herstellen.

Selbstverständlich kann man, wie bei jeder Messung oder Absteckung, den vermutlichen Genauigkeitsgrad des Ergebnisses mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate abschätzen. Dies hat jedoch mit dem Verfahren an sich nichts zu tun.

B. Die Aufgabe und ihre grundsätzliche Lösung.

Gegeben ist ein vorhandener fehlerhafter Gleisbogen \bar{B}_1 mit unbekanntem Krümmungsverlauf.

Gesucht ist eine beliebige Anzahl von Punkten des neuen herzustellenden Bogens \bar{B}_2 mit gegebenem Krümmungsverlauf*).

In Abb. 1 ist ein Stück der beiden Bogen \bar{B}_1 und \bar{B}_2 dargestellt. Wenn man an einen beliebigen Punkt \bar{P}_1 des Bogens \bar{B}_1 eine Tangente legt und auf dieser in \bar{P}_1 die Senkrechte

*) Die Bedeutung der Überstreichungsstriche wird in Abschnitt C. 1. erklärt.

errichtet, so schneidet diese den Bogen \bar{B}_2 in einem Punkte \bar{P}_2 . Die Strecke $\bar{P}_1-\bar{P}_2$ nennen wir den „Abstand der beiden Bogen bei \bar{P}_1 “ und bezeichnen ihn mit dem Buchstaben \bar{e} . Wenn für alle Punkte des Bogens \bar{B}_1 diese Abstände \bar{e} bekannt sind, so kann man den Bogen \bar{B}_2 in einfacher Weise abstecken, indem man an beliebig vielen Punkten die betreffenden \bar{e} senkrecht vom Bogen \bar{B}_1 aus abträgt. Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist daher die Ermittlung der Abstände \bar{e} der beiden Bogen voneinander.

In Abb. 1 gebe die Gerade \bar{g} die Richtung der Anfangstangente des vorhandenen Bogens \bar{B}_1 an. Die Tangenten bei \bar{P}_1 und \bar{P}_2 schließen mit dieser Richtung die Winkel φ_1 und

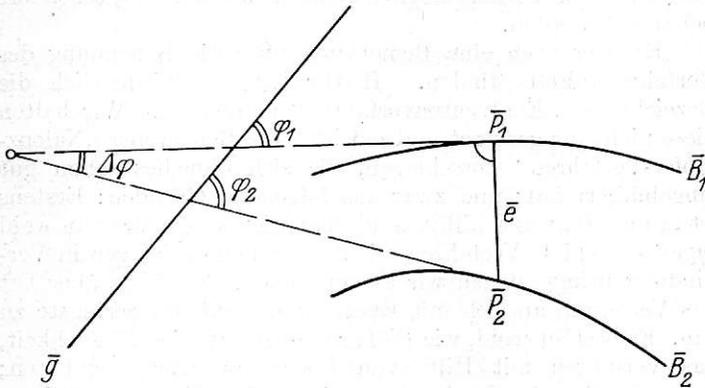


Abb. 1.

φ_2 ein, und der Winkel, den die beiden Tangenten miteinander bilden ist:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Diesen Wert nennen wir die „Winkeldifferenz der beiden Bogen bei \bar{P}_1 “.

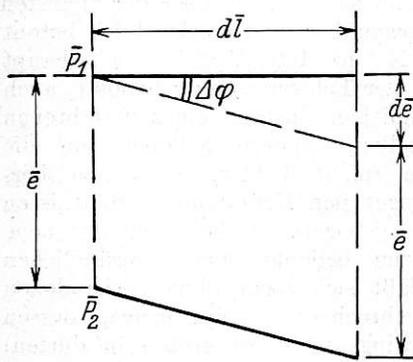


Abb. 2.

Bedingung 1: Der vorhandene Bogen \bar{B}_1 muß einen einigermaßen stetigen Verlauf haben und darf keine starken Knicke aufweisen.

Bedingung 2: Die soeben definierten Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ müssen überall kleiner sein als 5° ; d. h., wenn $\Delta\varphi$ in Bogenmaß gemessen ist:

$$\Delta\varphi < 0,0873.$$

Diese beiden Bedingungen sind in fast allen praktisch vorkommenden Fällen genügend genau erfüllt, so daß sie nur sehr selten ein Hindernis für die Anwendung des Verfahrens darstellen. Der Grund für die Notwendigkeit der Bedingung 1 wird im Abschnitte C. 4. erwähnt werden, während die Bedingung 2 in der folgenden Ableitung ihre Begründung erfährt.

Wir denken uns (Abb. 2) ein unendlich kleines Stück von der Länge $d\bar{l}$ der beiden Bogen \bar{B}_1 und \bar{B}_2 , das wir als geradlinig ansehen können. Auf diese Länge $d\bar{l}$ ändert sich der Abstand \bar{e} der beiden Bogen voneinander um das Stück $d\bar{e}$. Dieses ist aber, wie unmittelbar aus Abb. 2 ersichtlich:

$$d\bar{e} = d\bar{l} \cdot \text{tg } \Delta\varphi.$$

Da in der obenstehenden Bedingung 2 vorausgesetzt wurde, daß die Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ einen gewissen kleinen Wert nirgends überschreiten, so können wir in diese Gleichung statt $\text{tg } \Delta\varphi$ den Wert $\Delta\varphi$ einführen. Damit erhalten wir:

$$d\bar{e} = d\bar{l} \cdot \Delta\varphi.$$

Hieraus ergibt sich durch Integration:

$$\bar{e} = \int d\bar{l} \cdot \Delta\varphi.$$

Wenn an einem bestimmten Anfangspunkt \bar{A} der Abstand der beiden Bogen die Größe $\bar{e}_\bar{A}$ hat, so ist demnach der Abstand an einer beliebigen Stelle \bar{E} :

$$\bar{e}_\bar{E} = \bar{e}_\bar{A} + \int_{\bar{A}}^{\bar{E}} d\bar{l} \cdot \Delta\varphi.$$

Fallen nun die beiden Bogen an dem Anfangspunkt \bar{A} zusammen, d. h. ist: $\bar{e}_\bar{A} = 0$, so gilt:

$$\bar{e}_\bar{E} = \int_{\bar{A}}^{\bar{E}} d\bar{l} \cdot \Delta\varphi \quad \dots \quad 1)$$

Statt des unendlich kleinen Bogenstückes $d\bar{l}$ kann man auch ein konstantes Stück von der endlichen Länge $\Delta\bar{l}$ einführen unter der Voraussetzung, daß dieses Stück im Vergleich zum Bogenhalbmesser R genügend klein ist (etwa $\Delta\bar{l} \leq \frac{R}{100}$). Die Gl. 1) nimmt damit die folgende Gestalt an:

$$\bar{e}_\bar{E} = \Delta\bar{l} \cdot \sum_{\bar{A}}^{\bar{E}} \Delta\varphi \quad \dots \quad 1a)$$

Diese Gleichung ist für das Verfahren grundlegend*). Man erkennt, daß sich die Abstände \bar{e} an beliebiger Stelle durch eine Summierung ermitteln lassen, wenn die Winkeldifferenzen an genügend vielen Punkten bekannt sind. Die nächste Aufgabe ist daher die Ermittlung der $\Delta\varphi$. Sie wird dadurch ermöglicht, daß die beiden Bogen \bar{B}_1 und \bar{B}_2 auf einem Zeichenblatt in geeigneter Weise abgebildet werden. Dieses Abbildungsverfahren soll im folgenden festgelegt und untersucht werden.

C. Das Abbildungsverfahren.

1. Allgemeines.

In Abb. 3a ist ein beliebig gekrümmter Bogen \bar{B} dargestellt. Unter den Begriff „Bogen“ sollen hier auch die Endtangente, Zwischengerade usw. fallen; die Bogenkrümmung ist an solchen Stellen eben null. Diesem Bogen \bar{B} geben wir einen bestimmten positiven Durchfahrungsinn, für den grundsätzlich die Richtung der Streckenkilometrierung festgesetzt wird (in Abb. 3a durch einen Pfeil angedeutet). Auf der Anfangstangente \bar{g} wählen wir einen Anfangspunkt \bar{A} und bezeichnen die von \bar{A} aus im Bogen gemessenen Längen mit \bar{l} . Das Liniendifferential des Bogens heiße $d\bar{l}$, das zugehörige Winkeldifferential $d\varphi = \frac{d\bar{l}}{r}$, wobei r den Krümmungshalbmesser an

der betreffenden Stelle bedeutet. Dieser Bogen (Original) soll unter Zugrundelegung bestimmter Gleichungen in einer Bildebene (Zeichenblatt) abgebildet werden. Zu diesem Zwecke nehmen wir in der Bildebene ein rechtwinkliges Koordinatensystem X, Y an (Abb. 3b). Dem Durchfahrungsinn von \bar{B} ordnen wir die positive X -Richtung zu, die wir stets als von links nach rechts verlaufend annehmen. Ist der an die Anfangstangente \bar{g} anschließende Bogen \bar{B} ein Rechtsbogen, so wählen wir die positive Y -Richtung als von oben nach unten verlaufend (z. B. Abb. 3a, b); ist er dagegen ein Links-

*) Vergl. die Schrift „Der vollkommene Gleisbogen“. Dort ist die Ableitung der Grundgleichungen in noch etwas strengerer Form durchgeführt.

bogen, so wählen wir die positive Y-Richtung als von unten nach oben verlaufend. Dem Anfangspunkte \bar{A} des Originals ordnen wir im Bilde den Koordinaten-Nullpunkt A zu. Unter dx verstehen wir das Abszissendifferential und unter dy das zugehörige Ordinaten differential im Bilde.

Nach diesen Festsetzungen läßt sich nun die Originallinie (Bogen \bar{B}) in der Bildebene eindeutig umkehrbar abbilden unter Zugrundelegung der beiden folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} dx &= c_1 \cdot d\bar{l} \quad \dots \dots \dots 2) \\ dy &= c_2 \cdot d\varphi \quad \dots \dots \dots 3) \end{aligned}$$

In diesen Gleichungen sind c_1 und c_2 Abbildungskonstanten, deren Wahl von praktischen Gesichtspunkten abhängt. Die

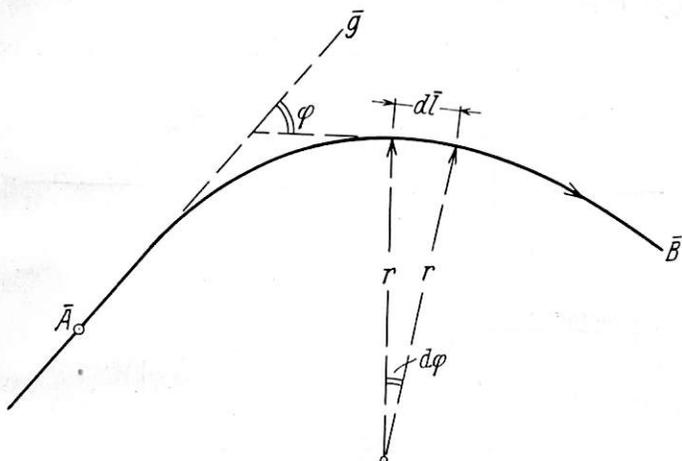


Abb. 3a. Original.

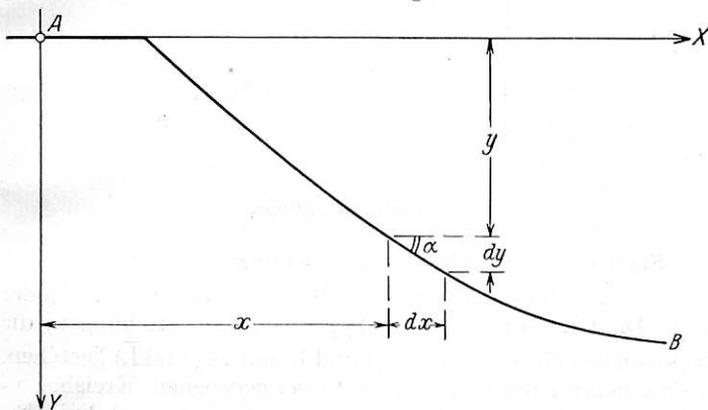


Abb. 3b. Bildlinie.

Konstante c_1 , die die Beziehung zwischen den Abszissenlängen des Bildes und den Linienlängen des Originals herstellt, nennen wir den „Längenmaßstab“; er ist als solcher eine unbenannte Zahl. Die Konstante c_2 , die die Beziehung zwischen den Ordinatenlängen des Bildes und den durchlaufenen Winkeln des Originals (in Bogenmaß) herstellt, nennen wir den „Winkelmaßstab“; er muß, wie ohne weiteres aus Gl. 3) ersichtlich ist, die Dimension Länge (cm) haben. (Übliche Werte für den Winkelmaßstab sind z. B. $c_2 = 50$ cm oder $c_2 = 100$ cm).

Aus Gl. 2) und 3) folgt:

$$x = c_1 \cdot l \quad \dots \dots \dots 2a)$$

$$y = c_2 \cdot \varphi \quad \dots \dots \dots 3a)$$

(Die bei dieser Integration auftretenden Integrationskonstanten sind zufolge der oben getroffenen Festsetzungen null.)

Die vom Anfangspunkte \bar{A} aus im Bogen gemessenen Längen (\bar{l}) des Originals sind demnach proportional den Abszissenlängen (x) im Bilde, und die auf die Anfangstangente \bar{g} bezogenen durchlaufenen Winkel (φ) des Originals sind proportional den Ordinatenlängen (y) im Bilde. Da gerade der

letzte Umstand bei diesem Abbildungsverfahren von ausschlaggebender Bedeutung ist, nennen wir die unter Zugrundelegung von Gl. 2) und 3) sich ergebende Bildfigur das „Winkelbild“ oder kurz die „Bildlinie“ des Bogens \bar{B} und bezeichnen sie mit B.

Im allgemeinen werden hier die Längen und Punkte des Originals von den ihnen entsprechenden des Winkelbildes durch Überstreichen unterschieden.

Wenn man nun in ein und dieselbe Bildfigur sowohl die Bildlinie B_1 des vorhandenen Bogens \bar{B}_1 , als auch die Bildlinie B_2 des neu herzustellen Bogens \bar{B}_2 einzeichnet (Abb. 4a), so sind die Ordinatenlängen d zwischen diesen beiden Bildlinien an jeder Stelle proportional den Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$, und man kann daher entsprechend Gl. 1a die Abstände \bar{e} für alle Punkte ermitteln, indem man zu den Differenzen d die Summenlinie (Abb. 4b) zeichnet. Damit ist die eingangs gestellte Aufgabe grundsätzlich gelöst.

Im folgenden wird nunmehr näher untersucht, welche Eigenschaften die Bildlinie hat, insbesondere wie die Bildlinie eines Kreisbogens mit Übergangsbogen gestaltet ist und wie man die Bildlinie eines beliebigen vorhandenen Gleisbogens konstruieren kann.

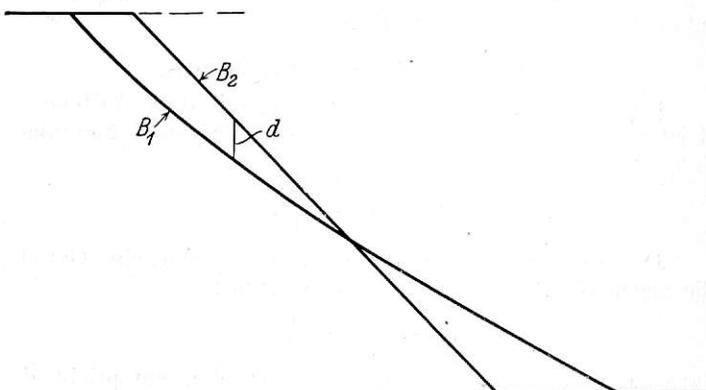


Abb. 4a.

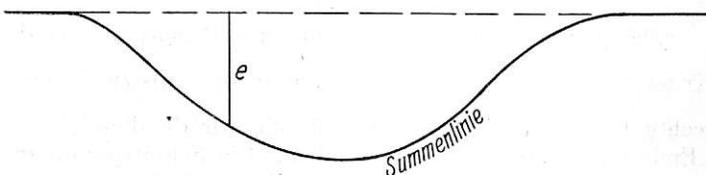


Abb. 4b.

Schreibt man in Gl. 3): $d\varphi = \frac{d\bar{l}}{r}$, so ergibt sich:

$$dy = c_2 \cdot \frac{d\bar{l}}{r}$$

Dividiert man diese Gleichung durch Gl. 2), so erhält man als Differentialgleichung der Bildlinie:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{c_2}{c_1} \cdot \frac{1}{r}$$

Bezeichnen wir den Neigungswinkel der Bildlinie gegen die Abszissenachse (Waagerechte) mit α (Abb. 3b), und führen wir der Einfachheit halber für den Wert $\frac{c_2}{c_1}$ die Bezeichnung c_3 ein:

$$c_3 = \frac{c_2}{c_1} \quad \dots \dots \dots 4)$$

so können wir schreiben:

$$\text{tg } \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{c_3}{r}$$

Wenn man nun eine Linie, deren Abszissen x proportional den im Bogen gemessenen Längen sind (nach Gl. 2a) und deren Ordinaten z proportional den Bogenkrümmungen an den betreffenden Stellen sind ($z = \frac{c_3}{r}$), als „Krümmungslinie“ bezeichnet, so kann man sagen: Die einzelnen Neigungen ($\text{tg } \alpha$) der Bildlinie sind gleich den Ordinaten der Krümmungslinie:

$$z = \text{tg } \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{c_3}{r} \quad \dots \dots \dots 5)$$

Hieraus ergibt sich durch Integration die Gleichung der Bildlinie:

$$y = \int z \cdot dx = \int \frac{c_3}{r} \cdot dx \quad \dots \dots \dots 6)$$

Damit sind wir zu dem wichtigen Ergebnisse gekommen:

Die Bildlinie ist die Integrallinie der Krümmungslinie.

Man kann demnach zu jedem Bogen mit gegebenen Krümmungsverhältnissen die Bildlinie durch Integration aus der Krümmungslinie ableiten; und nur aus diesem Grunde ist die Krümmungslinie für uns von Interesse, denn zur Ermittlung der Abstände e benötigen wir, wie wir oben gesehen haben, lediglich die Bildlinien der Bogen.

2. Die Bildlinie eines Kreisbogens.

Die Krümmung eines Kreisbogens mit dem Halbmesser R ist konstant. Die Ordinaten der zugehörigen Krümmungslinie (Abb. 5a) sind:

$$z = \text{tg } \alpha = \frac{c_3}{R}$$

Die Bildlinie (Abb. 5b) ist dementsprechend eine Gerade, die gegen die Abszissenachse die Neigung:

$$\text{tg } \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{c_3}{R}$$

hat. Die Abszissenlänge L dieser Geraden entspricht der Bogenlänge \bar{L} im Original; und zwar ist gemäß Gl. 2a):

$$L = c_1 \cdot \bar{L}$$

Die Anfangs- und Endtangente des Bogens, die ja die Krümmung $\frac{1}{r} = 0$ haben, stellen sich im Bilde als zwei waagerechte Geraden dar ($\text{tg } \alpha = 0$), für die wir die Bezeichnung „Endwaagerechten“ einführen wollen. Die Schnittpunkte der geneigten Bildlinie des Kreisbogens mit den Endwaagerechten (BA und BE) entsprechen dem Bogenanfangspunkte und -endpunkte im Original. Die Ordinaten y im Bilde sind gemäß Gl. 2b) den bis zu den betreffenden Punkten durchlaufenen Bogenzentriwinkeln φ proportional. Die Ordinate am Bogenende (bei BE), die gleich dem Abstände der Endwaagerechten ist, sei mit H bezeichnet. Sie entspricht dem Gesamtzentriwinkel φ_0 des Bogens, und zwar ist gemäß Gl. 2b):

$$H = c_2 \cdot \varphi_0 \quad \dots \dots \dots 7)$$

Nach φ_0 aufgelöst:

$$\varphi_0 = \frac{H}{c_2} \quad \dots \dots \dots 8)$$

Hierin ist φ_0 der Gesamtzentriwinkel in Bogenmaß. Will man den Zentriwinkel in Gradmaß ($\varphi_0^0 = \frac{180^0}{\pi} \cdot \varphi_0$) einführen, so nehmen diese Gleichungen die folgende Form an:

$$H = \frac{c_2 \cdot \pi}{180^0} \cdot \varphi_0^0 \quad \dots \dots \dots 7a)$$

und:

$$\varphi_0^0 = \frac{180^0}{c_2 \cdot \pi} \cdot R \quad \dots \dots \dots 8a)$$

Für den Kreisbogen gilt ferner, da $\text{tg } \alpha$ konstant ist:

$$\text{tg } \alpha = \frac{H}{L}$$

Man kann daher schreiben:

$$\text{tg } \alpha = \frac{H}{L} = \frac{c_3}{R} \quad \dots \dots \dots 9)$$

Nach R aufgelöst:

$$R = \frac{c_3}{\text{tg } \alpha} = c_3 \cdot \frac{L}{H} \quad \dots \dots \dots 9a)$$

Nach H aufgelöst:

$$H = L \cdot \text{tg } \alpha = c_3 \cdot \frac{L}{R} \quad \dots \dots \dots 9b)$$

Nach L aufgelöst:

$$L = \frac{H}{\text{tg } \alpha} = \frac{H \cdot R}{c_3} \quad \dots \dots \dots 9c)$$

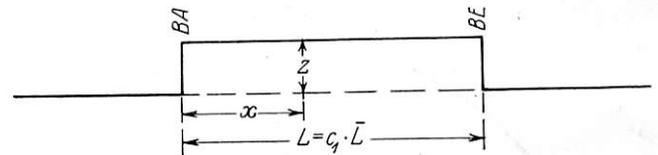


Abb. 5a. Krümmungslinie.

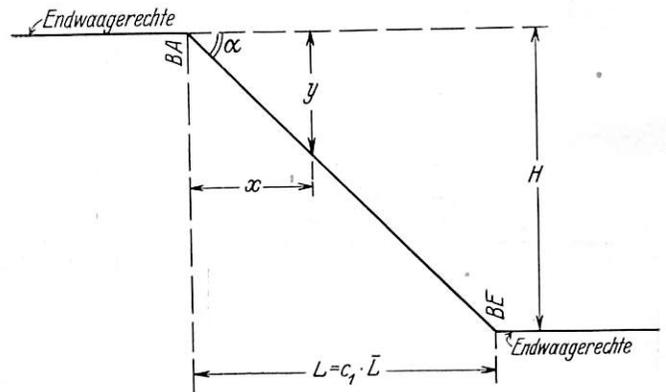


Abb. 5b. Bildlinie.

Statt L kann man in diesen Gleichungen selbstverständlich auch $c_1 \cdot \bar{L}$ schreiben, und statt H den Wert aus Gl. 7) oder 7a). Die Gleichungen 9) bis 9c) geben die Beziehungen, die zwischen den Größen $\text{tg } \alpha$, R , H und L (bzw. φ_0 und \bar{L}) bestehen. Insbesondere kann man aus Gl. 9) bei gegebenem Kreisbogenhalbmesser R die zugehörige Neigung $\text{tg } \alpha$ der Bildlinie berechnen, nachdem man sich für die Größe der Abbildungskonstanten c_1 und c_2 entschieden hat. Es ist daher ohne weiteres möglich, zu jedem gegebenen Kreisbogen die Bildlinie zu zeichnen.

Es sei besonders betont, daß im Winkelbilde nur waagrecht oder senkrecht gemessene Strecken einen Sinn haben, nie aber schräg gemessene.

Entsprechend der oben getroffenen Festsetzung über die positive Richtung der Y-Achse stellt Abb. 5b die Bildlinie eines Rechtsbogens dar; die Bildlinie eines Linksbogens würde von links nach rechts steigen (vergl. Abb. 7).

3. Die Bildlinie des Übergangsbogens.

Im Übergangsbogen soll entsprechend den geltenden Vorschriften*) die Bogenkrümmung linear von null auf den Wert $\frac{1}{R}$ zunehmen. Dementsprechend hat die Krümmungslinie des Übergangsbogens eine Gestalt nach Abb. 6a.

*) Wie diese vorgeschriebene Gestaltung der Übergangsbogen durch eine bessere ersetzt werden könnte, ist in der Schrift „Der vollkommene Gleisbogen“ behandelt.

Die konstante Übergangsbogenlänge im Original sei im folgenden mit \bar{l} bezeichnet. Ihr entspricht im Krümmungsbilde bzw. im Winkelbilde die Abszissenlänge $l = c_1 \cdot \bar{l}$. Am Übergangsbogenanfang (ÜBA) hat die Krümmungslinie die Ordinate null; am Übergangsbogenende (ÜBE) hat sie die Ordinate $z_1 = \frac{c_3}{R}$. Ihre Gleichung, bezogen auf Punkt A als Koordinatennullpunkt, lautet, wie sich an Hand der Abb. 6a leicht nachweisen läßt:

$$z = \frac{c_3}{1 \cdot R} \cdot x \quad \dots \quad 10)$$

Die Gleichung der Bildlinie (Abb. 6b) ergibt sich hieraus gemäß Gl. 6) durch Integration:

$$y = \frac{c_3}{2 \cdot 1 \cdot R} \cdot x^2 \quad \dots \quad 11)$$

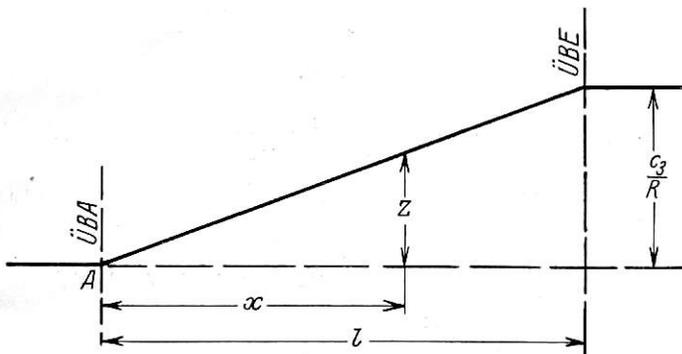


Abb. 6a. Krümmungslinie.

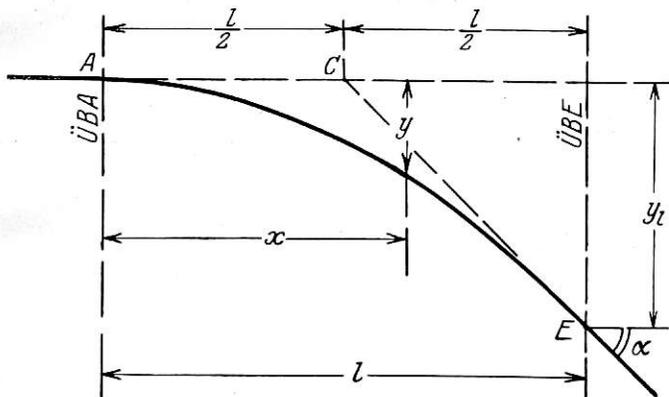


Abb. 6b. Bildlinie.

Dies ist die Gleichung einer quadratischen Parabel. Ihre Ordinate y_1 bei ÜBE ist:

$$y_1 = \frac{c_3}{2 \cdot 1 \cdot R} \cdot l^2 = \frac{c_3 \cdot l}{2 \cdot R}$$

und ihre Tangente bei ÜBE (im Punkte E) schneidet die Abszissenachse (Endwaagerechte) bei $x = \frac{l}{2}$ (Punkt C).

Die Konstruktion der quadratischen Parabel aus zwei Tangenten (A-C und E-C) mit ihren Berührungspunkten (A und E) darf hier als allgemein bekannt vorausgesetzt werden.

Die Bildlinie eines Kreisbogens mit auf beiden Seiten anschließenden Übergangsbogen von der Länge \bar{l} hat demnach (wenn der betreffende Bogen eine Linkskurve ist) eine Gestalt nach Abb. 7.

Tangieren zwei Kreisbogen mit verschiedenen Halbmessern R_1 und R_2 einander, so hat die Bildlinie an der betreffenden Stelle einen Knick, weil die Neigung ($\tan \alpha$) sich unvermittelt ändert. Die Bildlinie eines zweiteiligen Korbogens ohne Übergangsbogen hat daher z. B. eine Gestalt nach Abb. 8. Befindet sich zwischen den beiden Kreisbogen

ein Übergangsbogen von der Länge \bar{l} , so stellt sich dieser im Bilde als quadratische Parabel von der Abszissenlänge $l = c_1 \cdot \bar{l}$ dar, die die beiden Bildgeraden tangiert (Abb. 9).

Bevor wir nun zur Ermittlung der Bildlinie eines bestehenden Gleisbogens mit unbekanntem Krümmungsverhält-

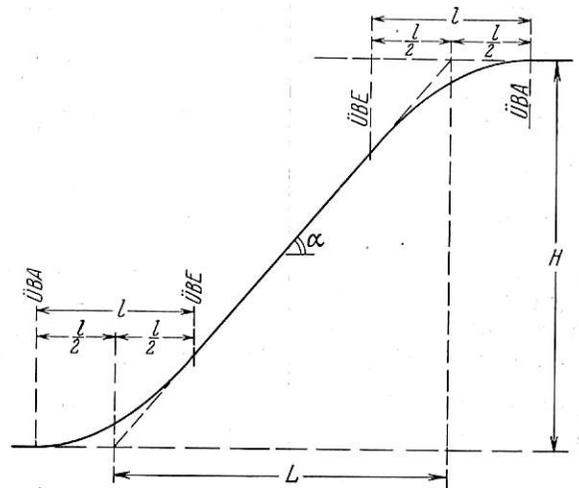


Abb. 7.

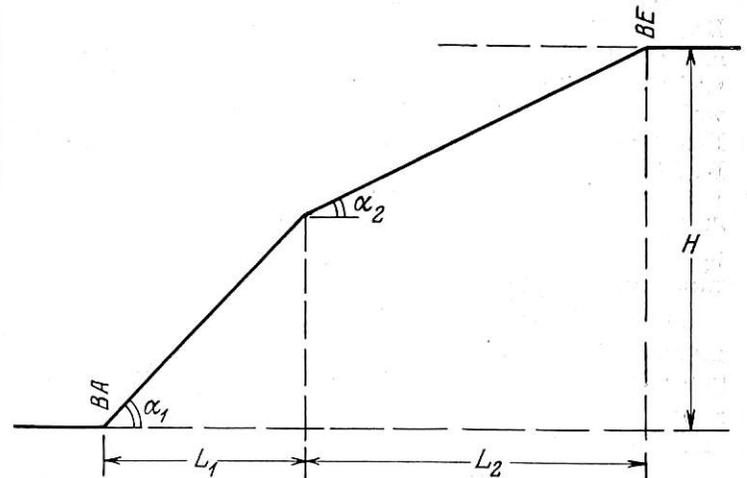


Abb. 8.

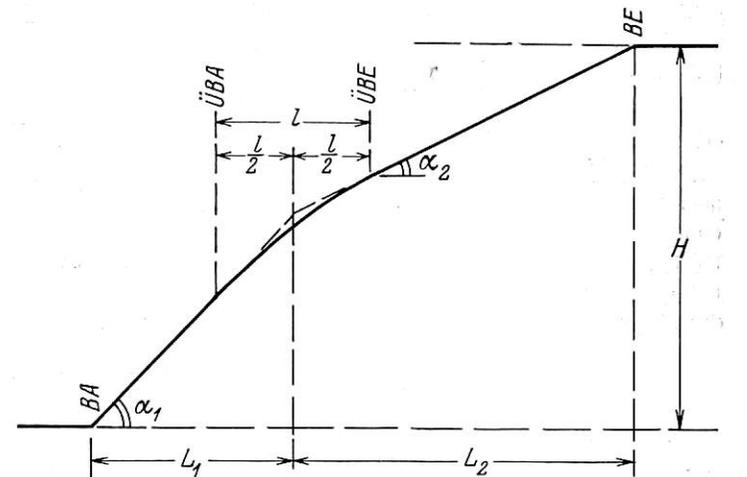


Abb. 9.

nissen übergehen, seien im folgenden die einander entsprechenden Stücke des Originals und der Bildlinie einander gegenübergestellt, da es darauf ankommt, daß man ein möglichst klares Bild vom Wesen der hier verwendeten Abbildung erhält.

Zusammenstellung.

Original	Bildlinie
Im Bogen gemessene Längen	Abszissenlängen (x)
Durchlaufene Winkel (φ)	Ordinatenlängen (y)
Bogenkrümmung ($\frac{1}{r}$)	Neigung der Bildlinie ($\text{tg } \alpha$)
Gerades Stück ($\frac{1}{r} = 0$)	Waagerechte Bildlinie ($\text{tg } \alpha = 0$)
Knick ($\frac{1}{r} = \infty$)	Senkrechte Bildlinie ($\text{tg } \alpha = \infty$)
Konstante Krümmung ($\frac{1}{R}$)	Gerade Bildlinie ($\text{tg } \alpha = \text{konstant}$)
Unvermittelte Änderung der Krümmung	Knick in der Bildlinie
Lineare Änderung der Krümmung (Übergangsbogen)	Quadratische Parabel
Bogenendtangente	Endwaagerechten
Bogenzentriwinkel (φ)	Abstand der Endwaagerechten (H)
Kreisbogenlänge (\bar{L})	Abszissenlänge ($L = c_1 \cdot \bar{L}$)
Übergangsbogenlänge (\bar{l})	Abszissenlänge ($l = c_1 \cdot \bar{l}$)

4. Die Bildlinie eines vorhandenen Gleisbogens.

Wie wir oben gesehen haben, läßt sich die Bildlinie eines Bogens mit gegebenem Krümmungsverlaufe als Integrallinie zur Krümmungslinie ermitteln. Bei einem bestehenden Gleisbogen mit unbekanntem, unregelmäßigem Krümmungsverlaufe dagegen ist diese Art der Ermittlung nicht möglich. Denn es läßt sich weder für den Verlauf der Krümmung eine Funktion angeben, noch kann man sie an unendlich vielen Punkten ermitteln. Man ist vielmehr darauf angewiesen, die Krümmung nur an einer beschränkten Anzahl von Punkten in konstanten Abständen ($\Delta \bar{l}$) zu bestimmen, und muß die Integration (Gl. 6) durch eine Summierung ersetzen.

Man wählt eine Länge $\Delta \bar{l}$. Diese sei die „Bogenteilung“ genannt, da man den vorhandenen Gleisbogen in konstante Teilstücke von der Länge $\Delta \bar{l}$ aufteilen muß. $\Delta \bar{l}$ darf nicht zu groß angenommen werden. Wenn R der ungefähre Halbmesser des betreffenden Gleisbogens ist, so sind am zweckmäßigsten Werte $\Delta \bar{l} \leq \frac{R}{100}$, jedoch im allgemeinen nicht größer als 5 m. Aus praktischen Gründen wird man für $\Delta \bar{l}$ möglichst keine unrunder Werte wählen, sondern runde Meter (z. B. 3 m, 4 m, 5 m).

Der Bogenteilung $\Delta \bar{l}$ entspricht im Krümmungsbilde oder im Winkelbilde die „Abszissenteilung“ $\Delta x = c_1 \cdot \Delta \bar{l}$.

Ist $\Delta \bar{l}$ genügend klein, so ist die Annahme zulässig, daß jeweils auf die Länge $\Delta \bar{l}$ die Krümmung des vorhandenen Gleisbogens konstant ist, d. h. daß sich dieser aus lauter kurzen Kreisbogen zusammensetzt. Man kann dann in Gl. 6) das Integralzeichen durch ein Summenzeichen ersetzen und erhält damit als Gleichung für die Ordinaten der Bildlinie:

$$y = \sum z \cdot \Delta x = \sum \frac{c_3}{r} \cdot \Delta x \quad \dots \quad 6a)$$

Die Bogenkrümmungen $\frac{1}{r}$ an den einzelnen Teilpunkten stellt man fest, indem man mit dem bekannten Pfeilhöhenmeßapparat in der Mitte einer Bogensehne (gespannten Schnur) von der Länge \bar{s} die zugehörigen Pfeilhöhen h mißt. Die Sehnenlänge \bar{s} wird als ein Vielfaches der Bogenteilung $\Delta \bar{l}$ gewählt, derart, daß:

$$\bar{s} = c_4 \cdot \Delta \bar{l} \quad \dots \quad 12)$$

Hierin wird die Konstante c_4 gewöhnlich zu 4 angenommen,

in Ausnahmefällen (z. B. bei Bogen mit sehr großen Halbmessern) auch zu 2. Im allgemeinen ist also: $\bar{s} = 4 \cdot \Delta \bar{l}$.

Es gilt nun bekanntlich die Gleichung (Abb. 10):

$$\frac{1}{r} = \frac{8 \cdot h}{\bar{s}^2} \quad \dots \quad 13)$$

Führt man diesen Wert für $\frac{1}{r}$ in Gl. 6a) ein, so ergibt sich für die Ordinaten der Bildlinie:

$$y = \sum \frac{8 \cdot c_3 \cdot \Delta x}{\bar{s}^2} \cdot h.$$

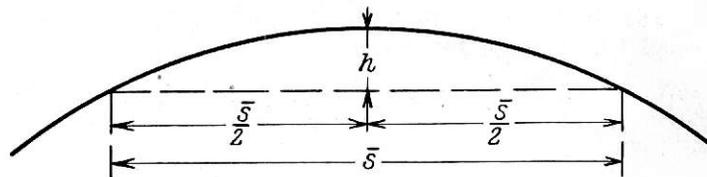


Abb. 10.

Für den konstanten Wert $\frac{8 \cdot c_3 \cdot \Delta x}{\bar{s}^2}$ führen wir der Einfachheit halber eine besondere Bezeichnung ein und schreiben:

$$c_5 = \frac{8 \cdot c_3 \cdot \Delta x}{\bar{s}^2} \quad \dots \quad 14)$$

Damit ergibt sich:

$$y = \sum c_5 \cdot h.$$

Abb. 11 a. Krümmungslinie.

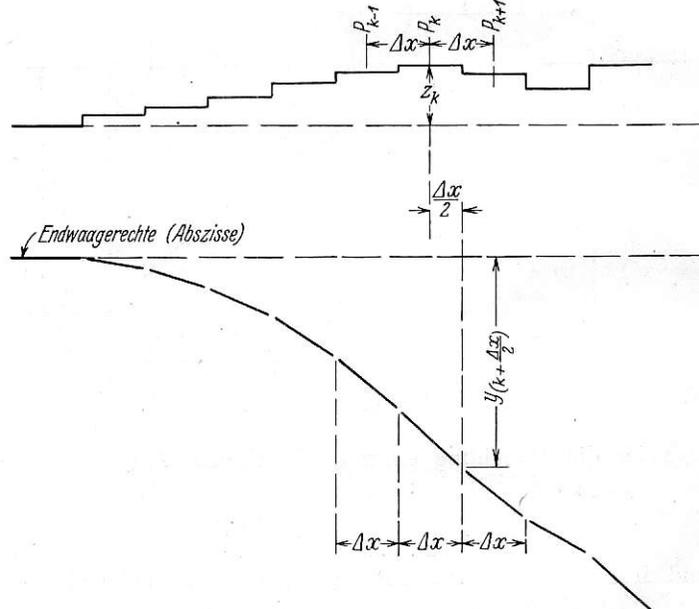


Abb. 11 b. Bildlinie.

Die Werte $c_5 \cdot h$ stellen die Ordinaten z der Krümmungslinie dar. Man erhält diese demnach, indem man die an den einzelnen Teilpunkten P gemessenen Pfeilhöhen h im Maßstabe c_5 von einer Abszisse aus als Ordinaten zu Papier bringt. Daher nennen wir die Konstante c_5 den „Pfeilhöhenmaßstab“. Die auf diese Weise ermittelte Krümmungslinie hat für den Anfang eines Rechtsbogens z. B. eine Gestalt nach Abb. 11 a. Sie verläuft nicht stetig, sondern ist treppenartig abgesetzt; denn wir haben oben die Annahme gemacht, daß die einzelnen Krümmungen jeweils auf die Länge $\Delta \bar{l}$ (das ist im Winkelbilde die Abszissenlänge Δx) konstant ist. Aus dieser Krümmungslinie kann man die Bildlinie (Abb. 11 b) als Summenlinie erhalten, indem man die einzelnen Ordinaten z an den

Man kann auch durch die Pfeilhöhenmessung selbst sich über den Verlauf der Krümmung an solchen Stellen dadurch von vornherein ein genaueres Bild verschaffen, daß man außer der durchgehenden Messung mit der Schnurlänge \bar{s} noch die folgende zusätzliche Messung ausführt: Man mißt an der betreffenden Stelle an einer Anzahl (etwa 8) aufeinanderfolgenden Teilpunkten die Pfeilhöhen mit einer Schnurlänge $\bar{s}_1 < \bar{s}$ (etwa $\bar{s}_1 = \frac{\bar{s}}{2}$ oder $\frac{\bar{s}}{3}$ oder $\frac{\bar{s}}{4}$). Die dabei abgelesenen

Pfeilhöhen multipliziert man mit dem Faktor $\left(\frac{\bar{s}}{\bar{s}_1}\right)^2$ und benutzt

diese Werte als Pfeilhöhen h zur Konstruktion der Bildlinie. Dieses Vorgehen ist jedoch etwas umständlich und seine Anwendung wird sich meist nicht lohnen, da man durch Übung bald das richtige Gefühl dafür bekommt, wie die oben beschriebene Verbesserung der Bildlinie vorzunehmen ist, so daß kein nennenswerter Fehler übrig bleibt.

Damit ist die Aufgabe, die Bildlinie eines vorhandenen Gleisbogens mit unbekanntem Krümmungsverhältnissen zu konstruieren, gelöst.

Der Oberbaumeßwagen der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft, der die durchlaufenen Winkel φ mittelst eines Kreisellkompasses mechanisch als Ordinaten zu Papier bringt, liefert damit selbstverständlich auch die Bildlinie der Gleisbogen; und zwar mit den Maßstäben $c_1 \approx 1:6630$ und $c_2 \approx 11,45$ cm. Diese Maßstäbe sind allerdings für die praktische Auswertung nach dem Nalenz-Höfer-Verfahren viel zu klein.

D. Die Ermittlung der Abstände \bar{e} durch Konstruieren der Summenlinie.

In Abb. 14a ist die Bildlinie B_1 des vorhandenen Gleisbogens \bar{B}_1 dargestellt. In die gleiche Figur ist die Bildlinie B des neuen abzusteckenden Bogens \bar{B} einzutragen. Wenn dieser neue Bogen ein Kreisbogen mit dem Halbmesser R sein und Übergangsbogen von der Länge \bar{l} haben soll, so muß die Bildlinie B eine Gestalt entsprechend Abb. 7 haben. Im folgenden wird die Bildlinie B des neuen Bogens stets „Entwurf“ genannt werden, während die Bildlinie B_1 des vorhandenen Gleisbogens kurz mit „Bildlinie“ bezeichnet werden soll. Von der Art des Entwurfs hängt die Gestalt des neuen Bogens und die Größe der Abstände \bar{e} ab, d. h. der Maße, um die der vorhandene Bogen seitlich zu verschieben ist, damit der neue Bogen entsteht. Da es uns in dieser Abhandlung nur um die theoretische Begründung des Verfahrens zu tun ist, soll hier nicht darauf eingegangen werden, welche Gesichtspunkte beim Einzeichnen des Entwurfs maßgebend sind, wenn der neue Bogen oder die Abstände \bar{e} bestimmten Anforderungen entsprechen sollen. Davon wird in einer späteren Abhandlung über die Praxis des Nalenz-Höfer-Verfahrens die Rede sein.

Die Ordinatendifferenzen d zwischen Bildlinie und Entwurf (Abb. 14a) sind den Winkeldifferenzen $\Delta\varphi$ proportional; und zwar ist entsprechend Gl. 3a):

$$\Delta\varphi = \frac{d}{c_2}, \quad (\Delta\varphi \text{ in Bogenmaß}).$$

Da für die Anwendbarkeit des Verfahrens als Bedingung 2 gefordert wurde, daß $\Delta\varphi < 0,0873$ ist, so gilt für die Ordinatendifferenzen d die Bedingung:

$$d < 0,0873 \cdot c_2.$$

Es ist daher beim Einzeichnen des Entwurfs darauf zu achten, daß die d diesen Grenzwert nicht überschreiten. Ist z. B. $c_2 = 50$ cm, so dürfen die d nicht größer sein als $0,0873 \cdot 50 = 4,37$ cm. Derart große Abstände der Bildlinie vom Entwurf werden in der Praxis aber nur selten in Frage kommen.

Setzt man in Gl. 1a) für $\Delta\varphi$ den Wert $\frac{d}{c_2}$ ein, so erhält man für den Abstand \bar{e} der beiden Bogen voneinander an beliebiger Stelle:

$$\bar{e} = \frac{\Delta\bar{l}}{c_2} \cdot \Sigma d.$$

Für den Ausdruck vor dem Summenzeichen führen wir eine besondere Bezeichnung ein und schreiben:

$$c_6 = \frac{\Delta\bar{l}}{c_2} \dots \dots \dots 15)$$

Damit lautet die Gleichung:

$$\bar{e} = c_6 \cdot \Sigma d \dots \dots \dots 1b)$$

Um die einzelnen Σd für alle Teilpunkte zu bekommen, zeichnet man zu den Differenzen d des Winkelbildes (Abb. 14a) die Summenlinie (Abb. 14b). Dies geschieht, indem man die einzelnen d mit dem Stechzirkel an den Punkten abgreift, an denen die Ordinaten der Bildlinie abgetragen sind, sie fortlaufend mit dem Zirkel summiert und die einzelnen Summen

Abb. 14a.

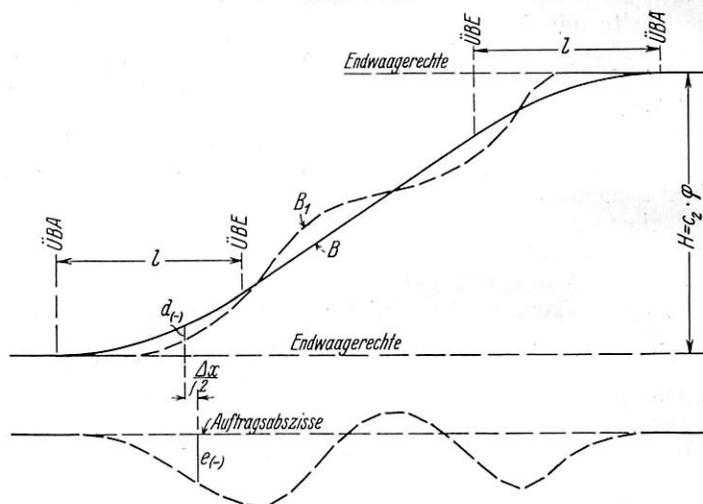


Abb. 14b. Summenlinie.

als Ordinaten von einer waagerechten Auftragsabszisse abträgt. Selbstverständlich sind die einzelnen Summen, wie bei jeder graphischen Summierung, wieder um das Maß $\frac{\Delta x}{2}$

nach rechts verschoben (nicht unter der Stelle, wo die d abgegriffen werden) zu Papier zu bringen (vergl. Abschnitt C. 4.).

Bezüglich der Vorzeichen gilt folgendes: Wir fassen, gleichgültig, ob die Bildlinien steigen oder fallen, die einzelnen Differenzen d dann als positiv auf, wenn an der betreffenden Stelle die Bildlinie B_1 des vorhandenen Bogens über dem Entwurf B liegt; im umgekehrten Falle als negativ. Im Summenbilde wählen wir als positive Ordinatenrichtung die Richtung von unten nach oben. Diese Festsetzungen sind beim Auftragen der Summenlinie zu beachten.

Wenn man die auf diese Art erhaltenen Ordinaten der Summenlinie mit e bezeichnet, so gilt:

$$\bar{e} = c_6 \cdot e \dots \dots \dots \text{Gl. 1c)}$$

Die Konstante c_6 stellt demnach den Maßstab dar, mit dem man die Ordinaten e der Summenlinie multiplizieren muß, damit man die wirklichen Abstände \bar{e} im Original bekommt. Wir nennen daher die Konstante c_6 den „Verschiebungsmaßstab“. Damit genügende Genauigkeit des Resultates gewährleistet ist, wird man es so einrichten, daß der Verschiebungsmaßstab nicht größer ist, als $c_6 = 20$. Am zweckmäßigsten sind die Werte $c_6 = 5$ oder $c_6 = 10$ (vergl. unten).

Positive e bedeuten Rechtsverschiebung, negative e bedeuten Linksverschiebung; d. h. positive Abstände \bar{e} sind, um die neue Bogenachse zu erhalten, vom vorhandenen Bogen nach rechts, negative nach links abzutragen (in Richtung der Kilometrierung gesehen).

Über die Wahl der Abbildungskonstanten wäre folgendes zu sagen:

Man wählt erstens die Bogenteilung $\Delta \bar{l}$. Für diese kommen, je nach der Größe des vorliegenden Bogenhalbmessers (vergl. Abschnitt C. 4.) Werte von 200 bis 500 cm in Frage.

Zweitens wählt man die Konstante c_4 . In der Regel nimmt man an $c_4 = 4$.

Drittens wählt man den Verschiebungsmaßstab c_6 . Am besten: $c_6 = 5$ oder $c_6 = 10$.

Viertens wählt man zum Auftragen der Bildlinie die Abszissenteilung Δx . Da man stets auf Millimeterpapier arbeitet, kommt hierfür nur $\Delta x = 0,5$ cm oder $\Delta x = 1$ cm in Frage; größere Werte haben keinen Zweck. Wenn die Gesamtzahl n der gemessenen Pfeilhöhen h größer als ≈ 100 ist, so wird man $\Delta x = 0,5$ cm wählen und für die Bearbeitung gewöhnliches Millimeterpapier verwenden; ist sie dagegen kleiner als ≈ 100 , so wird man $\Delta x = 1$ cm wählen und Papier mit 2 Millimeterteilung benutzen, das die Augen beim Arbeiten weniger anstrengt.

Hat man sich für diese vier Abbildungskonstanten ($\Delta \bar{l}$, c_4 , c_6 und Δx) entschieden, so liegen auch die übrigen Konstanten fest; und zwar ist:

der Längenmaßstab $c_1 = \frac{\Delta x}{\Delta \bar{l}}$ (gemäß Gl. 2);

der Winkelmaßstab $c_2 = \frac{\Delta \bar{l}}{c_6}$ (Gl. 15);

$$c_3 = \frac{c_2}{c_1} \text{ (Gl. 4);}$$

die Sehnenlänge (Schnurlänge) $\bar{s} = c_4 \cdot \Delta \bar{l}$ (Gl. 12);

der Pfeilhöhenmaßstab $c_5 = \frac{8 \cdot c_3 \cdot \Delta x}{s^2}$ (Gl. 14).

Um Irrtümer zu vermeiden, empfiehlt es sich, bei allen Untersuchungen nur ein einziges Längenmaß zu verwenden und zwar am zweckmäßigsten cm. Alle Längen, gleichgültig ob im Original oder im Bilde, sind demnach in cm zu nehmen und alle Flächen in cm^2 .

Wenn man den Abstand \bar{e} nur an einer Stelle haben will, so ist es nicht notwendig, daß man die Summenlinie konstruiert. Man kann ihn vielmehr ermitteln, wenn man die Differenzfläche bestimmt, die bis zu dem betreffenden Punkte von Bildlinie und Entwurf eingeschlossen wird. Setzt man in Gl. 1):

$$\Delta \varphi = \frac{d}{c_2} \quad \text{und} \quad \Delta \bar{l} = \frac{\Delta x}{c_1},$$

so ergibt sich allgemein:

$$\bar{e} = \frac{1}{c_1 \cdot c_2} \cdot \int d \cdot dx \quad \dots \quad 1d)$$

Hierin bedeutet $\int d \cdot dx$ nichts anderes als die soeben erwähnte Differenzfläche (in cm^2). Wenn in besonderen Fällen die Differenzen d als Funktion von x gegeben sind, so kann man die Fläche selbstverständlich durch Integration ermitteln.

Um das Verständnis für das Wesen des Verfahrens zu vertiefen und um zu zeigen, daß dasselbe notwendigerweise zu gleichen Ergebnissen führen muß wie andere Methoden, wollen wir an den beiden folgenden kleinen Beispielen die Anwendung dieser Gleichung zeigen.

1. Es soll die Gleichung für den Übergangsbogen abgeleitet werden.

Da wir rein rechnerisch vorgehen wollen, haben wir hinsichtlich der Abbildungskonstanten völlig freie Hand. Der Einfachheit halber wird angenommen: $c_1 = 1$, $c_2 = 1$ cm; es ist dann $c_3 = \frac{c_2}{c_1} = 1$ cm. (Die Abb. 15, 16a/b sind nicht maßstäblich zu verstehen; sie sollen nur zur Veranschaulichung dienen.)

Die Bogenanfangstangente wird als vorhandener Bogen \bar{B}_1 aufgefaßt; seine Bildlinie ist die waagerechte Abszissenachse (Abb. 15). Der durch Abtragen der Abstände \bar{e} von B_1 aus herzustellende Bogen \bar{B} ist der Übergangsbogen; seine Bildlinie B (Entwurf) ist dargestellt durch eine quadratische Parabel mit der Gleichung (Gl. 11):

$$y = \frac{1}{2 \cdot l \cdot R} \cdot x^2.$$

Da die Bildlinie B_1 ja mit der Abszissenachse zusammenfällt, so sind die Ordinaten y des Entwurfs in diesem Falle

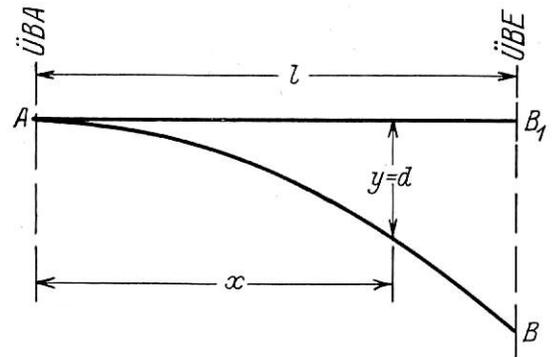


Abb. 15.

identisch mit den Differenzen d zwischen Bildlinie und Entwurf. Die Abstände \bar{e} , das sind in diesem Falle die Ordinaten y des Übergangsbogens im Original, ergeben sich nun nach Gl. 1d) zu:

$$\bar{e} = \bar{y} = \frac{1}{l} \cdot \int d \cdot dx = \int \frac{1}{2 \cdot l \cdot R} \cdot x^2 \cdot dx = \frac{x^3}{6 \cdot l \cdot R}.$$

Da $c_1 = 1$ ist, so ist $x = \bar{x}$ und $l = \bar{l}$, und man kann schreiben:

$$\bar{e} = \frac{\bar{x}^3}{6 \cdot l \cdot R}.$$

Dies ist die bekannte Gleichung für die kubische Parabel als Übergangsbogen.

2. Es soll das Maß \bar{f} errechnet werden, um das ein Kreisbogen mit dem Halbmesser R ohne Übergangsbogen nach innen verschoben werden muß, wenn man einen Übergangsbogen von der Länge \bar{l} einschalten will.

Die Konstanten werden wieder gleich 1 gesetzt. Der vorhandene Bogen ist die Anfangstangente mit dem anschließenden Kreisbogen; seine Bildlinie (Abb. 16a) ist die Linie A—C—E. Der Entwurf ist wieder dargestellt durch die quadratische Parabel A—D—E. Die Integrallinie zu den Differenzen d (Summenlinie) hat die Gestalt nach Abb. 16b. Das Maß \bar{f} , das gleich dem Abstände \bar{e}_1 am Übergangsbogenende ist, errechnet sich nach Gl. 1d) zu:

$$\bar{f} = \frac{1}{1} \cdot \int_0^1 d \cdot dx.$$

$\int_0^1 d \cdot dx$ ist aber der Inhalt der Fläche A—D—E—C—A.

Die Strecke C—D ist wegen der Parabelgestalt der Bildlinie gleich $\frac{y_1}{4}$. Damit hat die Fläche A—D—C—A den Inhalt:

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{y_1}{4} = \frac{1 \cdot y_1}{24}.$$

Die Fläche A—D—E—C—A ist doppelt so groß:

$$\int_0^l d \cdot dx = 2 \cdot \frac{l \cdot y_1}{24} = \frac{l \cdot y_1}{12}.$$

Da $\text{tg } \alpha = \frac{1}{R}$ ist (Gl. 9), so ist (Abb. 16 a):

$$y_1 = \frac{1}{2} \cdot \text{tg } \alpha = \frac{1}{2 \cdot R}.$$

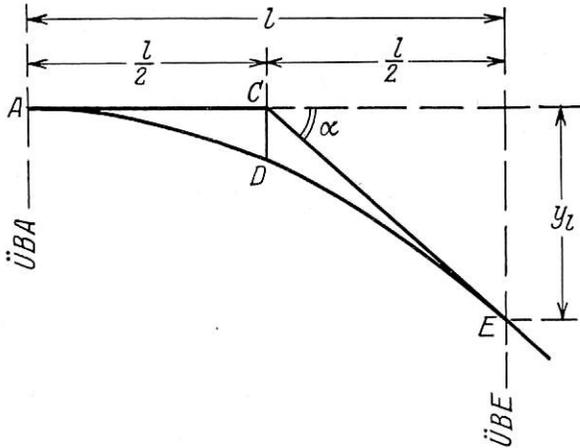


Abb. 16 a.

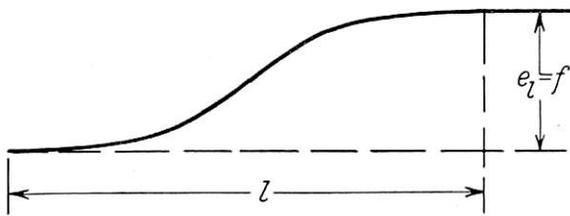


Abb. 16 b.

Setzt man diesen Wert für y_1 ein, so erhält man:

$$\int_0^l d \cdot dx = \frac{l^2}{24 \cdot R}.$$

Da $c_1 = 1$ ist, so ist $l = \bar{l}$ und man kann schreiben:

$$\bar{f} = \bar{e}_1 = \frac{\bar{l}^2}{24 \cdot R}.$$

Damit ist die Aufgabe gelöst.

Man mag aus diesen beiden Beispielen ersehen, wie leicht derartige Ableitungen mittelst des Nalenz-Höfer-Verfahrens

ausgeführt werden können, wenn man sich völlig von der Evolvententheorie und der Vorstellung eines „Abwicklungsvorganges“ frei gemacht hat und sich lediglich an das Abbildungsgesetz (Gl. 2 und 3) und an die Gleichungen für die Abstände \bar{e} (Gl. 1c und 1d) hält.

Das Nalenz-Höfer-Verfahren ist auch in solchen Fällen anwendbar, wo andere Methoden versagen. Würde beispielsweise bei einem Halbmesser $R = 200$ m eine Übergangsbogenlänge $\bar{l} = 130$ m gefordert und wollte man diesen Übergangsbogen als kubische Parabel nach der Gleichung $\bar{y} = \frac{\bar{x}^3}{6 \cdot \bar{l} \cdot R}$

abstecken, so würde sich am Übergangsbogenende statt des Halbmessers von 200 m ein solcher von ≈ 232 m ergeben, d. h. ein Fehler in der Krümmung von $\approx 16\%$. Die Krümmung der kubischen Parabel verläuft eben nur angenähert und in gewissen Grenzen geradlinig. Die Gleichung der Kurve, deren Krümmung genau eine lineare Funktion der Bogenlänge ist, kann nur in einer Reihenentwicklung gegeben werden (Klothoide) und ist für die praktische Anwendung zu schwerfällig. Mit Hilfe des Nalenz-Höfer-Verfahrens dagegen lassen sich Übergangsbogen von unbegrenzter Länge abstecken*). Es gestattet ganz allgemein die Herstellung von Kurven mit beliebigem gegebenen Krümmungsverlaufe, ohne jede Einschränkung und entspricht damit den Anforderungen des Gleisbogenabsteckens in vollendeter Weise; denn für einen Gleisbogen ist lediglich ein bestimmter Krümmungsverlauf zu fordern, nicht aber eine bestimmte Gleichung in bezug auf irgend ein Koordinatensystem. Das Nalenz-Höfer-Verfahren ist, über die Erfordernisse des Gleisbogenabsteckens hinausgehend, von gewissem mathematischen Interesse; denn es lehrt in seiner allgemeinsten Form, wie man bei beliebiger gegebener Krümmungsfunktion $\frac{1}{r} = \Psi(\bar{l})$ die zugehörige

Kurve konstruieren kann, auch in solchen Fällen, wo sich ihre Gleichung $\bar{y} = \lambda(\bar{x})$ nicht ermitteln läßt, und wie es möglich ist, analytisch eine Näherungsfunktion $\lambda_1(\bar{x})$ derart zu bestimmen, daß ihre Krümmungsfunktion sich in beliebig eng zu ziehenden Grenzen der Funktion $\Psi(\bar{l})$ anschmiegt.

*) Werden die Differenzen d zwischen Bildlinie und Entwurf dabei unzulässig groß, so muß man sich dem Entwurf zunächst mit einem Geradenzuge anschmiegen, so daß die d genügend klein bleiben. Der endgültige Bogen (die Abstände \bar{e}) ist sodann von dem Korbbogen aus abzustecken, der im Original diesem Geradenzuge des Bildes entspricht.

Über die Knicksicherheit des lückenlosen Gleises.

Von Dipl.-Ing. Josef Nemesek, Budapest.

Das lückenlose, durchgehend geschweißte Gleis ist und bleibt das sicherlich einmal erreichbare Ziel für die Entwicklung der Oberbaukunde. Die Hauptschwierigkeit bildet dabei die anscheinend zu niedrige Knicksicherheit der heute üblichen Oberbauarten.

Wir sind noch ziemlich weit entfernt von der restlosen Lösung sämtlicher Fragen. Auch die nachfolgenden Ausführungen wollen nur Teilgebiete behandeln, um

a) der Ausübung unter beschränkenden Annahmen Schlußfolgerungen und Berechnungen zu ermöglichen, sowie gewisse Einflüsse bei der Verwerfung zu klären;

b) Anleitungen zur rechnerischen Auswertung von Versuchs- und Erfahrungsergebnissen zu geben;

c) Winke und Anregungen für weitere Forschungen beizusteuern.

1. Es sei zunächst die reine Seitenverbiegung eines Gleises untersucht, die infolge einer Längsdruckkraft P auftritt;

hierzu sollen die Gleichgewichtsbedingungen an einer herausgegriffenen Halbwelle bestimmt werden.

Den Widerstand der Bettung gegen seitliche Verwerfung betrachten wir zunächst nicht als konstant, sondern als

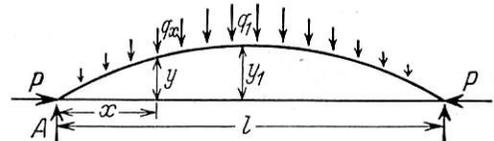


Abb. 1.

proportional zur seitlichen Ausweichung (ähnlich dem Ansatz der Bettungsziffer), so wird $q_x = q_1 \cdot \frac{dy}{dy_1}$ (s. Abb. 1).

Nimmt man in erster Annäherung (nur zu mathematisch einfacherer Fassung der Verteilung des Bettungswiderstandes) die Form der Schienenverbiegung vorläufig als Parabel an

also $y = \frac{4y_1x}{l^2}(l-x)$, so wird $dy:dy_1 = \frac{4x}{l^2}(l-x)$ und $q_x = 4q_1x \frac{l-x}{l^2}$.

Die Summe der Bettungswiderstände entlang der halben

Wellenlänge beträgt $A = \int_0^{\frac{l}{2}} q_x dx = \frac{q_1 l}{3}$.

Die Differenzialgleichung der elastischen Linie ist mit $EJ = \varepsilon$

$$\varepsilon \frac{d^2y}{dx^2} = -M = -Py + \frac{q_1 x}{3} + \int_0^x q \bar{x} (x - \bar{x}) d\bar{x}$$

oder

$$y'' = -\frac{P}{\varepsilon} y + \frac{q_1}{3\varepsilon} + \frac{q}{3l^2\varepsilon} (x^4 - 2lx^3).$$

Wenn wir die Bezeichnung $r = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ benützen, so ist die Lösung*)

$$y = -\frac{q}{Pr} \left\{ \frac{8}{l^2 r^3} \sin r \frac{l}{2} + \frac{1}{4} \sin rx + \frac{8}{l^2 r^3} \cos rx \right\} + \frac{q}{P} \left\{ \frac{x^4}{3l^2} - \frac{2x^3}{3l} - \frac{4\varepsilon x^2}{Pl^2} + x \left(\frac{1}{3} + \frac{4\varepsilon}{Pl} \right) - \frac{8\varepsilon^2}{P^2 l^2} \right\}.$$

Das ist die Gleichung der ausgebogenen Schiene.

Die größte Pfeilhöhe (Ausschlagweite) ist für $x = \frac{l}{2}$

$$y_1 = -\frac{q}{Pr} \left\{ \frac{8}{l^2 r^3} \left(\sin r \frac{l}{2} \operatorname{tg} r \frac{l}{2} + \cos r \frac{l}{2} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{tg} r \frac{l}{2} \right\} + \frac{q}{P} \left(\frac{5l^2}{48} + \frac{\varepsilon}{P} - \frac{8\varepsilon^2}{P^2 l^2} \right)$$

Hieraus läßt sich jener Bettungswiderstand bestimmen, der bei einer Ausbiegung von y_1 noch das Gleichgewicht hält.

$$q = y_1 \frac{P}{\frac{1}{r^2} - \frac{8}{r^4 l^2} \left(1 + \sin r \frac{l}{2} \operatorname{tg} r \frac{l}{2} + \cos r \frac{l}{2} \right) - \frac{1}{4r} \operatorname{tg} r \frac{l}{2} + 0.1042 l^2}$$

Diese Formel besagt auch, daß die Verwerfung eigentlich nur durch Unstetigkeit des Faktors ε (Kármán) oder durch Exzentrizität entstehen kann.

P ist hier die Längskraft $\alpha E Ft$, ε ist mit der Schiene und der Rahmenwirkung der benützten Schienenbefestigung gegeben. Bei einer bestehenden oder entstandenen Exzentrizität y_1 läßt sich ein relatives Maximum von q errechnen entsprechend den verschiedenen Werten von l . Da l nicht eine durch die Stababmessungen oder die Länge des ausknickenden Gleises bestimmte Größe ist, entsteht sie — wenn keine besonderen Umstände obwalten — in solchem Maße, daß sie immer den Größtwert von q zum Bestehen des Gleichgewichts fordert. Ist so bei einem auf die Gleisebene beschränkten Verwerfungsvorgang (ohne beeinflussende Mitwirkung etwaiger Anfangsspannungen, besonderer Exzentrizitäten oder Nachbarwellen) für eine gegebene Exzentrizität der zu $l_{q \max} = l'$ gehörende Seitenwiderstand q_{\max} nicht vor-

*) Es ist

$$-y = A \sin r(x+B) + \frac{2q}{31P} x^3 - \frac{q_1}{3P} x - \frac{qx^4}{3Pl^2} - \frac{4q\varepsilon x}{P^2 l} + \frac{4q\varepsilon x^2}{P^2 l^2} - \frac{8q\varepsilon^2}{P^3 l^2}.$$

Die Integrationskonstanten A und B bestimmt man aus den Anfangsbedingungen: $x=0, y=0$ und $x=\frac{l}{2}, y'=0$.

handen, so entsteht diese Halbwellenlänge l_1 tatsächlich und die Ausbauchung der Schiene schreitet allmählich oder sprungweise fort.

Somit kann aus der Gleichung $\frac{dq}{dl} = 0$ berechnet werden.

Wir führen $\frac{rl}{2} = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} = \alpha$ ein; dann wird

$$q = y \frac{P^2}{EI} c \text{ wobei } c = \frac{2\alpha^2}{0,8336\alpha^4 + 2\alpha^2 - 4 - \alpha^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{4}{\cos \alpha}}.$$

Die durch Differenzieren gewonnene transzendente Bedingungsgleichung

$$\alpha^4 (2 - 3,334 \cos^2 \alpha) + 2\alpha^3 \sin \alpha \cos \alpha + 2\alpha \sin \alpha - 16 (\cos^2 \alpha + \cos \alpha) = 0$$

ergibt als Lösung $\alpha = 2,5$; somit wird

$$l' = 5,0 \sqrt{\frac{EI}{P}}.$$

Mit dem Trägheitsradius $i = \sqrt{\frac{I}{F}}$ und $P = \alpha E Ft$,

$\alpha = 0,000012$; $E = 2150000$ ist

$$l = 1370 \frac{i}{\sqrt{t}}.$$

Es ist somit die Schienenlänge unabhängig von der Größe des Bettungswiderstandes; sie hängt vielmehr nur vom Trägheitsradius und im umgekehrten Verhältnisse von der Quadratwurzel der Spannungstemperatur ab.

Der zum Gleichgewicht erforderliche größte Seitenwiderstand ist wegen $\alpha = 2,5$ (und somit $c = 0,2162$)

$$q_{\max} = 0,218 \frac{P^2}{EI} y = 0,000067 \left(\frac{t}{i} \right)^2 y F.$$

Die Richtigkeit dieser Formel (Gleichgewichtsbedingung unter genannten Annahmen), die trotz ihrer Einfachheit auf einem schwer übersichtlichen Wege abgeleitet wurde, läßt sich mit einfachen Mitteln an einem beliebigen Beispiel angenähert beweisen, wenn man zur errechneten Schienenlänge l^1 das Gleichgewicht zeichnerisch mit einem Vektorpolygon untersucht, wobei als Ausbiegungslinie der Schiene ein sich dieser anschmiegender Stabszug angenommen wird.

2. Nimmt man einen gleichmäßigen Seitenwiderstand an, so haben wir den Fall der Abb. 2.

$$\text{Es ist } \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P}{\varepsilon} y + \frac{1}{2\varepsilon} q_1 x - \frac{1}{2\varepsilon} q x^2;$$

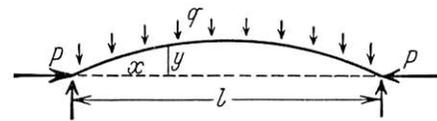


Abb. 2.

Nach ähnlichen Rechnungen wie oben wird

$$q = \frac{P^2}{EI} y c'', \text{ wo } c'' = \frac{1}{\frac{\alpha^2}{2} + \frac{\cos \alpha - 1}{\cos \alpha}}, \alpha = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}.$$

Die kritische Länge l^1 erhält man bei $\alpha = 2,3$, wobei $c'' = 0,196$ ist. Es ist somit $l' = 4,6 \sqrt{\frac{EI}{P}}$ und

$q = 0,196 \frac{P^3}{EI} y$ kg auf 1 cm Schienenlänge. Die Abweichung von Fall 1 beträgt ungefähr 10%.

3. Vernachlässigt man den Bettungswiderstand und sucht die Verwerfung durch konzentrierte Kräfte zu ver-

hindern, so haben wir den Fall nach Abb. 3 zu lösen. (Die Entfernung dieser zu berechnenden passiven Kräfte müßte $\frac{l'}{2}$ sein.)

$$y'' = -\frac{P}{EI}y + \frac{R}{2EI}x$$

$$y = -\frac{EIR}{P^2} \operatorname{tg} \alpha \sin rx + \frac{Rx}{2P}$$

$$y = -\frac{EIR \sin^2 \alpha}{P^2 \cos \alpha} + \frac{Rl}{4P}$$

$$R = 2 P^2 y \frac{1}{\alpha \sqrt{EIP} - 2EI \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha}} \quad \alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

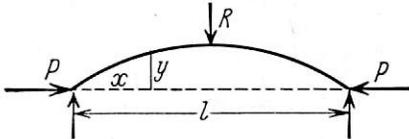


Abb. 3.

Um R_{\max} zu bekommen für ein y (das man etwas größer wählt als das in der Ausübung noch zulässige y), muß man α aus $\frac{1}{4} \sqrt{\frac{P}{EI}} - 1 = \operatorname{tg}^2 \alpha \cos \alpha$ berechnen und dann ist $l = 2 \alpha \sqrt{\frac{EI}{P}}$.

4. Greift man nicht aus einer Reihe gleichgroßer Wellen eine Halbwelle heraus, sondern nimmt man eine aus einer Geraden sich ausbiegende Halbwelle an, so muß an den Übergangsstellen mit einem Momentwiderstand gerechnet werden.

Für den Fall nach Abb. 4 lautet die Differentialgleichung der elastischen Linie: $\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{Py}{EI} + \frac{qlx}{4EI} + \frac{M}{EI}$. Die Lösung lautet $y_x = \frac{-ql}{4Pr} \sin rx - \frac{M}{P} (\cos rx - 1) + \frac{qlx}{4P}$. Da M unbekannt ist, muß es erst aus $\left[\frac{dy}{dx}\right]_{x=\frac{l}{2}} = 0$ berechnet werden

$$\text{zu } -\frac{M}{P} = \frac{ql}{4Pr} \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}; \text{ somit wird } y_x = \frac{ql}{4Pr} \frac{\cos rx + \cos \alpha - \cos \alpha \cos rx - \sin \alpha \sin rx - 1}{\sin \alpha} + \frac{qlx}{4P}$$

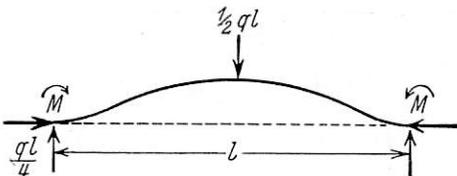


Abb. 4.

Die größte Pfeilhöhe y ist

$$y = \frac{ql}{2Pr} \frac{\cos \alpha - 1}{\sin \alpha} + \frac{ql^2}{8P} \text{ und}$$

$$q = \frac{P^2}{EI} y \frac{2}{\alpha^2 + 2\alpha \frac{\cos \alpha - 1}{\sin \alpha}} = \frac{P^2}{EI} y c'''$$

c''' und damit q wird bei $\alpha = 4,5$ zu einem Maximum; folglich ist

$$l' = 9,0 \sqrt{\frac{EI}{P}} \text{ und } q = 0,063 \frac{P^2}{EI} y$$

5. Nimmt man die Schiene wieder als eingespannt an (M), aber den Bettungswiderstand gleichmäßig verteilt (q), so

kommt man zu demselben Ergebnis wie unter den Annahmen des vorigen Beispiels.

$$\varepsilon y'' = -Py - \frac{1}{2} q x^2 + \frac{1}{2} qlx - M \quad \left(M = \frac{q \operatorname{tg} \alpha}{\alpha^2} - \frac{ql^2}{4\alpha} \right)$$

$$y = \frac{ql}{2Pr} \operatorname{cty} \alpha (\operatorname{tg} \alpha \sin rx + \cos rx - 1) - \frac{qx^2}{2P} + \frac{qlx}{2P}$$

$$q = \frac{P^2 y}{EI} c''', \quad l' = 9,0 \sqrt{\frac{EI}{P}}; \quad q = 0,064 \frac{P^2}{EI} y$$

6. Für besondere Wellenformen und zwar für ein begrenztes (verhältnismäßig kurzes) Schienenstück sei folgendes Beispiel behandelt (Abb. 6).

Es ist ein 30,0 m langes Versuchsgleis angenommen, dessen eingespannte Enden zusammengedrückt werden, und das mit solchen Richtungsfehlern behaftet war, daß sich ein solches Wellenbild herausgestellt hat. Es seien rechnerisch die Schienenlängen zu bestimmen und die zu einer Ausbiegung y und y' zum Gleichgewichte nötigen Bettungswiderstände (q).

Wir können die folgenden zwei Differentialgleichungen anschreiben:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{P}{EI} y + q \left(l_1 - \frac{l_2}{2} \right) x + M - \frac{x^2 q}{2}$$

$$\frac{d^2 y'}{dx^2} = -\frac{P}{EI} y' + \frac{ql_2}{2} - \frac{x'^2}{2} q,$$

in denen nur $\frac{P}{EJ} = r^2$ bekannt ist.

Die Lösung der ersten Gleichung erhält man wie folgt:

$$y = -A \sin r(x+B) + \frac{M}{P} + \frac{q \left(l_1 - \frac{l_2}{2} \right) x}{P} - \frac{qx^2}{2P} + \frac{EJq}{P^2}$$

$$x=0, y=0; \quad A \sin rB = \frac{M}{P} + \frac{EI}{P^2} q$$

$$x=0, \frac{dy}{dx} = 0; \quad rA \cos rB = \frac{q \left(l_1 - \frac{l_2}{2} \right)}{P}, \text{ wodurch}$$

$$\text{mit } 2l_1 - \frac{s}{2} = l_1 - \frac{l_2}{2} = \lambda$$

$$y = -\frac{q\lambda}{Pr} \sin rx - \left(\frac{M}{P} + \frac{EI}{P^2} q \right) \cos rx + \frac{M}{P} + \frac{q\lambda x}{P} - \frac{qx^2}{2P} + \frac{EJq}{P^2}$$

Durch die Bedingung $x=l_1, y=0$ erhalten wir

$$M = \frac{qP}{2Pr^2(1-\cos rl_1)} [2\lambda r \sin rl_1 + 2 \cos rl_1 - 2\lambda l_1 r^2 + l_1^2 r^2 - 2]$$

und nunmehr

$$y = -\frac{q\lambda}{Pr} \sin rx - \frac{q}{r^2 P} \cos rx + \frac{q}{2Pr^2} \frac{1 - \cos rx}{1 - \cos rl_1} [2\lambda r \sin rl_1 + 2 \cos rl_1 - 2\lambda l_1 r^2 + r^2 - 2] + \frac{q\lambda x}{P} - \frac{qx^2}{2P} + \frac{q}{Pr^2}$$

als Gleichung der ersten Halbwelle. Hierin ist aber noch unbekannt q, l_1 und λ .

Als Lösung der zweiten Differentialgleichung erhalten wir

$$y' = -\frac{EIq}{P^2} \left[\operatorname{tgr} \left(\frac{s}{2} + l_1 \right) \sin rx + \cos rx - 1 \right] - \frac{qx^2}{2P} + \frac{qx \left(\frac{s}{2} - l_1 \right)}{P}$$

Zur Errechnung von l_1 dient eine transzendente Bedingungsgleichung aus dem Zusammenhang

$$\left[\frac{dy}{dx} \right]_{x=l_1} = \left[\frac{dy'}{dx'} \right]_{x=0}$$

$$2 \sin rl_1 - 2r\lambda \cos rl_1 + \frac{\sin rl_1}{1 - \cos rl_1} [2\lambda r (\sin rl_1 - r l_1) +$$

$$+ 2 \cos rl_1 + r^2 - 2] + 2r\lambda - sr + 2 \operatorname{tgr} \left(\frac{s}{2} - l_1 \right) = 0.$$

Ist z. B. $P = 40000 \text{ kg}$; $E = 2150000 \text{ kg/cm}^2$; $J = 300 \text{ cm}^2$, $s = 3000 \text{ cm}$, so erhalten wir $l_1 = 11,92 \text{ m}$ und

$l_2 = 6,60$ m. Ist $P = 80000$ kg, so wird $l_1 = 8,95$ m und $l_2 = 12,10$ m.

Bleibt man im Rahmen des konkreten Beispiels ($P = 40000$ kg), so können die übrigen Unbekannten auch leicht berechnet werden.

$\frac{dy}{dx} = 0$ (für die erste Halbwelle gebildet) liefert als

Abszisse der größten Ausbiegung $x_1 = 7,76$ m, was in die Gleichung der Welle eingesetzt $y_{\max} = 7,57 q$ ergibt, woraus $q = 0,132 y_{\max}$ kg/cm folgt. Das Ergebnis zeigt, daß diese Form der Verwerfung nur bei hoher Längskraft möglich ist und daß andere Verwerfungsgefahren näher stehen. Nach dem Fall der Abb. 5 ist z. B. bei einem Druck von 40 t ein Bettungswiderstand von 0,16 kg/cm notwendig im behandelten Falle (Sehnenlänge 11,2 m).

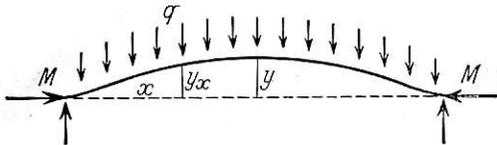


Abb. 5.

$y_{\max}^1 = 0,264 y_{\max}$; die gemeinsame Berührende zwischen den Halbwellen hat die Neigung $\text{tg } \alpha = 0,00441 y_{\max}$.

In den abgeleiteten Formeln ist für die Berechnung der Seitenverwerfung das auf die lotrechte Schwerachse bezogene Trägheitsmoment einzusetzen. Die Fälle 4 und 5 können auch auf Ausbiegungen in lotrechter Ebene angewandt werden, nur muß in diesem Falle das auf die waagerechte Achse bezogene Trägheitsmoment herangezogen werden. (Fall 2 und 3 kann auch bei Berechnung der Verwerfung in lotrechter Ebene gute Dienste leisten, insbesondere wenn l aus der Erfahrung bekannt ist.)

Die obige Berechnung der Wellenlänge bei beginnender Seitenverwerfung scheint mit den spärlichen Beobachtungen und Versuchen ziemlich gut übereinzustimmen, worüber vielleicht später noch besonders zu berichten sein wird.

Was die zum Gleichgewicht notwendigen Gegenkräfte anlangt, so liefern die Formeln nur die zu den als gegeben angenommenen (größten) Ausbauchungen (y_1) gehörenden Werte. Es sind so gewisse obere Grenzwerte des Widerstandes gegen Verwerfung zu errechnen, wenn man auf die (für den Höchstwert der Längskraft errechnete) Länge der Halbwelle oder Welle l eine gewisse Anfangsexzentrizität y_1 annimmt und zu dieser den Wert von q kg/m berechnet. Ist der Seitenwiderstand des Oberbaues größer als dieser berechnete Wert, ist ferner die Pfeilhöhe y_1 so groß angenommen, daß in Wirklichkeit keine solche vorgefunden werden kann (zumindest in den Wochen der größten Sommerhitze), so kann keine Verwerfung eintreten. Es können auch vergleichende Sicherheitsgrade angegeben werden.

Zu solchen Berechnungen bedürfen wir aber noch mehrere Versuche, wenn wir der Sicherheit halber nicht zu günstige Annahmen treffen wollen. Es sind nämlich bei einer solchen Berechnung folgende zwei Umstände in Betracht zu ziehen:

a) die Anfangsexzentrizität y_1 nimmt während des Anwachsens des Druckes auch selbst noch zu, auch bevor der Seitenwiderstand der Bettung erreicht wird; das folgt aus mehreren Gründen, die der Rechnung kaum zugänglich sind,

b) der Seitenwiderstand des Oberbaues bezieht sich bei hohen Drücken bereits auf ein wellenförmig angehobenes Gleis.

Die vollständige Lösung der Frage fordert die Angabe der Wellenlänge und der Pfeilhöhe für jede Längskraft und

für jene Längskraft, bei der die sprunghafte Verwerfung tatsächlich auftritt. Es läßt sich dies erreichen, wenn zu einer Gleichung, wie die oben abgeleiteten von der Form

$$q = y \varphi_1 (P_1 E_1 I)$$

noch eine zweite von der Form

$$q = \varphi_2 (y)$$

hinzugenommen wird, die am besten empirisch zu bestimmen sein wird und die den Widerstand des Oberbaues gegen Seitenverschiebung als Funktion der Verschiebungsgröße angibt.

Ohne eine solche Funktion φ_2 wird man niemals deduktiv das Problem lösen können, ebenso wie man den Schienen- druck niemals richtig berechnen kann ohne Annahme einer Bettungsziffer, d. h. des gesetzmäßigen Zusammenhanges zwischen Bodendruck und Senkung.

Die Annahme $q = \varphi_2 (y) = c$ ermöglicht keine physikalische Lösung; wenn diese Annahme der Wirklichkeit entsprechen würde, so könnte das Gleis bis zum Moment der sprunghaften Verwerfung sich überhaupt nicht verformen, und die Verwerfung hinge bloß von der Anfangsexzentrizität ab. Dagegen wissen wir aber, daß die Wellenbildung allmählich fortschreitend anwächst bis zur kritischen Pfeilhöhe.

Eigentlich müßte für eine genaue Lösung die waagerechte und die lotrechte Verformung gleichzeitig behandelt werden, da es keineswegs nachgewiesen ist, daß die beiden Verformungen sich einfach überlagern. Auf der Strecke selbst entstehen beide und es entwickeln sich auch beide Verformungsarten gemeinsam weiter. Die mathematischen Schwierigkeiten

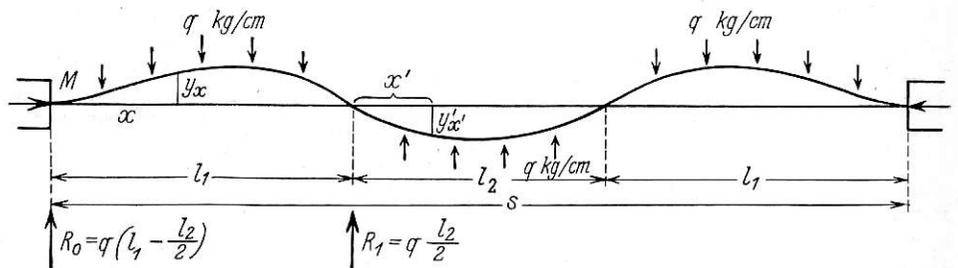


Abb. 6.

einer solchen genauen Lösung scheinen aber unüberwindbar zu sein, und man wird abgegrenzte und an genäherte Rechnungsarten letzten Endes im Versuchswege nachprüfen müssen.

Die Gleisverwerfung läßt sich physikalisch sozusagen in drei Abschnitten des Verwerfungsvorganges behandeln:

a) Anfangszustand mit beschränkten Verformungen, wobei wegen den geringfügigen Pfeilhöhen im ausgebogenen Schienenteile praktisch dieselbe Längskraft angenommen werden kann wie im unverbogenen Gleis.

b) Zwischenzustand mit anschaulicheren Verformungen, wobei schon ein entschiedener Selbstheilungsprozeß dadurch wirksam ist, daß die Verformungen (Verlängerungen) die Längskraft herabsetzen.

c) Gleichgewichtslage nach der Gleisverwerfung, wobei nicht nur die Längkraftverminderung in Betracht zu ziehen ist, sondern auch der Widerstand des Oberbaues gegen Längsverschiebung.

Phase b) behandelt zu haben das Verdienst Prof. de Vries Broekmans, dessen im Jahre 1913 in Delft gehaltener, im Druck erschiebener Vortrag (Knikkvastheid van het Spoor) leider in Deutschland lange unbekannt blieb. Er berechnet q aus der Differentialgleichung der elastischen Linie, führt die

Verminderung der Längskraft ein $\left(\frac{8}{3} \frac{EF}{l^2} y_1^2\right)$, bestimmt die

nötige maximale Seitenkraft aus $\frac{dq}{dy_1} = 0$, und gewinnt endlich l

aus $\frac{dq}{dl} = 0$.

Eben dieselbe Phase behandelte unlängst in diesem Blatte Privatdozent v. Gruenewaldt, wobei er die durch die sich bereits ausbildende Verwerfung eintretende Längskraftverminderung noch schärfer faßte und auch den Widerstand des Gleises gegen Längsverschiebung in Rechnung zog. Er ging von Arbeitsgleichungen aus, benützte sonst aber ebenfalls die Annahmen $\frac{dq}{dy_1} = 0$ und $\frac{dq}{dl} = 0$.

Verfasser ging einen anderen Weg*), indem er die ersten Verformungen mit Ausschlagsweiten von 5 bis 30 cm als die entscheidenden und wichtigsten ansah (Phase a); daher konnte er auch die zunächst geringe Druckkraftverminderung vernachlässigen, was übrigens nur zur Sicherheit gereicht. Auch suchte er nicht jene Ausbauchung (y_1), die den höchsten

*) Vortrag im Ungarischen Ingenieur- und Architekten-Verein 1928 und amtliche Berichte.

Tagung des Technischen Ausschusses des

Der Technische Ausschuss des Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen tagte unter dem Vorsitz der Direktion der Königl. Ungarischen Staatseisenbahnen am 10./11. Juni 1931 in Konstanz a. B. Die Leitung der Verhandlungen übernahm in Vertretung des Herrn Staatssekretärs Präsidenten von Samarjay Herr Ministerialrat von Láner.

Wie alljährlich wurde auch dieses Mal die Herausgabe einer Güteprobensammlung (Erhebungsjahr 1929/30) genehmigt. Die Güteprobensammlung wird von der Geschäftsführenden Verwaltung in Druck gelegt und verteilt werden. Außerdienstlich kann sie durch den Buchhandel (Verlag Julius Springer, Berlin W 9) bezogen werden.

Nach Entgegennahme einiger Zwischenberichte der Fachausschüsse über noch nicht erledigte Arbeiten und nach Zustimmung zu Vorschlägen zur Erledigung minder wichtiger Punkte nahm der Ausschuss einen Bericht des Herrn Direktor b. d. R., Professor Baumann, Vorsitzenden des Lokomotivbau-Fachausschusses, über die Reibungszahl μ' der quergleitenden Bewegung rollender Räder von Eisenbahnfahrzeugen entgegen. Der Bericht wird demnächst im Organ ausführlich veröffentlicht werden. Er behandelt die Reibungszahl μ' der quergleitenden Bewegung rollender, nicht angetriebener Räder, über die Reibungszahl μ' angetriebener Räder wird später berichtet werden, sobald die weiteren Forschungsarbeiten des Lokomotivbau-Fachausschusses Ergebnisse hierüber gezeitigt haben werden.

Anträge auf Zulassung neuer Verladearten für lange Betonrundeisen und Eisenbahnschienen führten dazu, daß als Grundlage für den Abschluß von Sonderabkommen zwischen den Eisenbahnverwaltungen nachstehende Richtlinien vom Technischen Ausschuss genehmigt wurden:

Richtlinien für die Verladung langer Schienen und langen Betonrundeisens auf zwei oder mehreren Wagen ohne Drehschemel als Grundlagen für den Abschluß von Sonderabkommen zwischen den Eisenbahnverwaltungen.

1. Schienen von 20 m bis 60 m Länge.

a) Zur Verladung der Schienen müssen Wagen mit Seitenwänden oder Rungen verwendet werden. Die Schienenladung muß in ihrer ganzen Höhe an den Enden durch Abstützung seitlich gehalten werden.

Etwa in der Mitte der Schienen müssen beiderseits der Ladung seitliche Begrenzungsanschlätze vorhanden sein.

b) Abstützungen und Begrenzungsanschlätze müssen die Schienen in der Höhe überragen, fest mit den Wagen verbunden sein und an den Seitenwänden oder Rungen anliegen.

c) Die Schienen müssen hochkantig gelagert werden. Die Schichten können einfach (Schienen nebeneinandergestellt) oder doppelt (Schienen ineinandergestürzt) sein.

Bettungswiderstand fordert, weil ihre Größe oft schon selbst verhängnisvoll ist. Zum anderen kommt die Verwerfung, wie Versuche zeigten, bei hohem Drucke schon nach kleinster vorhergehender Verformung (z. B. $y_1 = 3$ mm) zustande. In solchen Fällen kann offenbar von einer Längsdruckverminderung nicht die Rede sein. Die Bedingung $\frac{dq}{dl} = 0$ wandte auch Verfasser unabhängig von früheren Forschungen an.

In den letzten Jahren sind im „Organ“ Veröffentlichungen von Wattmann, Prof. Dr. Ammann, Dr. Gruenewaldt, Dr. Spangenberg und vom Verfasser erschienen, die fast das ganze Gebiet der Wärmedehnung in Langschienen der Lösung erschließen. Möge die Aussprache im „Organ“ dazu führen, daß auch diese wichtige und zeitgemäße Frage durch Rechnung und Beobachtung restlos und abschließend gelöst wird!

Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen.

Die Ladung darf nur aus zwei Schichten bestehen. Ist die untere Schicht einfach, so muß auch die obere einfach sein.

d) Die Schienen sind so zu lagern, daß die Räder jedes Wagens, namentlich die der Endwagen, möglichst gleichmäßig belastet sind und daß die Belastung jedes einzelnen Wagens nicht mehr als 90 % des angeschriebenen Ladegewichts beträgt.

e) Der Abstand zwischen Schienen und Seitenwänden oder Schienen und Rungen muß mindestens 30 cm, der Abstand der Begrenzungsanschlätze von der Ladung mindestens 10 cm betragen.

f) Die untere Schienenschicht muß auf mindestens 10 cm hohen Querbälkern ruhen, deren Oberflächen eben sind und ungefähr in gleicher Höhe über Schienenoberkante liegen. Die Querbälker müssen von Seitenwand zu Seitenwand, von Runge zur gegenüberstehenden Runge oder von Anschlag zum gegenüberstehenden Anschlag durchgehen. Zwischen die Schichten sollen Zwischenlagen aus Weichholz gelegt werden.

g) Die Schienenenden müssen von den Stirnwänden der Endwagen und von den äußersten Querbälkern Abstände in cm von mindestens je $20 + (10 \text{ mal Zahl der beladenen Wagen})$ haben, vergl. aber auch Absatz d.

h) Zur Sicherung gegen Längsverschiebungen sind die Schienen jeder Schicht durch Draht von mindestens 8 mm Dicke in der Weise zu verbinden, daß der Draht durch die Laschenlöcher gezogen oder die Schienenschicht mit dem Draht umschlungen wird. Kleine Längsverschiebungen der Schienen gegeneinander beim Durchfahren von Gleisbögen sollen durch diese Sicherungen nicht behindert werden.

i) Die Schraubenkupplungen sind so weit anzuziehen, daß die Puffer der Wagen etwas zusammengedrückt sind.

k) Es wird empfohlen, die Wagen mit Schienenladungen an den Schluß des Zuges zu stellen, die Züge nicht nachzuschieben und die Wagen nicht über Ablaufberge laufen zu lassen. Wagen mit Schienenladungen sollen nicht abgestoßen werden.

l) Wagen, die nach vorstehenden Richtlinien beladen sind, können in Zügen mit Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h befördert werden.

2. Betonrundeisen von 14 m bis 60 m Länge mit Dicken bis 55 mm.

a) Zur Verladung von Betonrundeisen müssen Wagen mit Seitenwänden oder Wagen mit Rungen verwendet werden.

b) Das Betonrundeisen muß unmittelbar auf den Fußboden der Wagen oder auf den fest mit den Wagen verbundenen Querbälkern gelagert werden.

c) Das Betonrundeisen ist so zu lagern, daß die Räder jedes Wagens, namentlich die der Endwagen, möglichst gleichmäßig belastet sind und daß die Belastung jedes einzelnen Wagens nicht mehr als 90 % des angeschriebenen Ladegewichts beträgt.

d) Die Ladung darf die Seitenwände oder Rungen in der Höhe nicht überragen.

e) Es wird empfohlen, das Betonrundeisen zu bündeln. Bei der Verladung von Rundeisen verschiedener Dicke sind die dicken Stäbe in die Mitte zu legen.

f) Bei der Verladung muß der Abstand zwischen Betonrunden und Seitenwänden oder Betonrunden und Rungen mindestens 15 cm betragen. Die Enden der Betonrunden müssen von den Stirnwänden der Endwagen Abstände in cm von mindestens je $10 + (5 \text{mal Zahl der beladenen Wagen})$ haben, vergl. aber auch Absatz c.

g) Die Schraubenkupplungen sind so weit anzuziehen, daß die Puffer der Wagen etwas zusammengedrückt sind.

h) Es wird empfohlen, die mit Betonrunden beladenen Wagen an den Schluß des Zuges zu stellen, die Züge nicht nachzuschieben und die Wagen nicht über Ablaufberge laufen zu lassen. Wagen mit Betonrundenladungen sollen nicht abgestoßen werden.

i) Wagen, die nach vorstehenden Richtlinien beladen sind, können in Zügen mit Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h befördert werden.

3. Schlußbestimmung.

Über die Beförderung einzelner Sendungen müssen sich die beteiligten Verwaltungen vorher verständigen, sofern sie nicht Sondervereinbarungen getroffen haben.

Um durch planmäßige Untersuchungen und durch Austausch der bei diesen Untersuchungen gesammelten Erfahrungen zur Erforschung und Klärung der Ursachen von Schienenbrüchen beitragen zu können, wurde beschlossen, eine Statistik über Schienenbrüche aufzulegen, die vom 1. Januar 1932 ab laufen soll.

Über die Frage der Überhöhung in Gleisbögen lag ein eingehender Bericht des Oberbau- und Bahnbau-Fachausschusses vor. Im Hinblick auf die bei verschiedenen Verwaltungen des Vereins Deutscher Eisenbahnverwaltungen geplanten größeren Fahrgeschwindigkeiten und mit Rücksicht auf die Standsicherheit der in letzter Zeit mit höhergelegtem Schwerpunkt gebauten Fahrzeuge war die Frage der in Gleisbögen anzuordnenden Überhöhung nach den vier verschiedenen Gesichtspunkten der Höhenabnutzung, der Betriebssicherheit, des ruhigen Laufes und der Wirtschaftlichkeit (Höhen- und Seitenabnutzung) behandelt worden.

Auf Grund der eingehenden Untersuchungen und Beratungen soll an Stelle des § 20 Abs. 2 der TV folgender Wortlaut in die TV aufgenommen werden:

2. In den Bögen der durchgehenden Hauptgleise soll der äußere Schienenstrang über den inneren Schienenstrang erhöht werden. Es wird empfohlen, die Überhöhung h

$$\text{nicht größer als } a \frac{V^2}{r} + b_1,$$

$$\text{nicht kleiner als } a \frac{V^2}{r} - b_2$$

William Busch †.

Am 11. Juni verstarb der Kommerzienrat William Busch, Vorsitzender des Aufsichtsrates der Linke-Hofmann-Busch A.-G., der Deutschen Wagenbauvereinigung und der Deutschen Waggon-Industrie (Deuwi). Geborener Hamburger, verband er Unternehmungsgeist mit kluger Vorsicht und ungewöhnlichem Verständnis für die jeweiligen Erfordernisse seiner Zeit. Schon mit jungen Jahren gründete er die Waggonfabrik Busch in Bautzen und später ein Zweigwerk in Weimar, denen er die Waggonfabrik Werdau angliederte. Von der Notwendigkeit der Einschränkung der Waggonindustrie nach Jahren glänzender Entwicklung und guter Beschäftigung für

zu machen, sie soll nicht größer als 150 mm sein und nicht kleiner als

$$11,8 \frac{V^2}{r} - 90.$$

In den Formeln bedeutet

h = Überhöhung in mm,

V = größte Fahrgeschwindigkeit im überhöhten Gleis in km/h,

r = Halbmesser des Gleisbogens in m,

$a = 8,$

$b_1 = 30,$ in Ausnahmefällen bis höchstens 40,

$b_2 = 30.$

Es wird empfohlen, die Überhöhung innerhalb der zulässigen Grenzen so groß wie möglich zu bemessen.

Die Prüfung der Frage, ob die einer gemeinschaftlichen Wagenbenutzung z. Z. entgegenstehenden Schwierigkeiten technischer Art sich beheben lassen, führte leider zu keinem Ergebnis, da unter den gegenwärtigen schwierigen Verhältnissen keine Möglichkeit gegeben ist, eine Vereinheitlichung der Wagenbauarten der Vereinsverwaltungen herbeizuführen.

Schließlich wurde eine Reihe von Auslegungsbeschlüssen zu Bestimmungen des Vereins-Wagenübereinkommens gefaßt, die an den Wagenaussschuß zur Aufnahme in das VWÜ weitergeleitet werden.

In Angelegenheiten des Technischen Vereinsorgans wurden einige Vertragsänderungen genehmigt und die Abrechnung des Jahrgangs 1930 zur Kenntnis genommen.

Nach Erledigung der Tagesordnung hielt Herr Oberregierungsrat Pogány, Generaldirektor der Donau-Save-Adria-Eisenbahngesellschaft (vormals Südbahngesellschaft) Budapest, einen Vortrag über: „Ästhetik und Dampflokomotive“. Der Vortragende gab an Hand einer Reihe von Lichtbildern einen Rückblick auf die verschiedenen ästhetischen Auffassungen und die begrifflichen Bestimmungen des Schönen und prüfte unter Zugrundelegung der modernen ästhetischen Theorie, in welchem Maße die neuzeitlichen Schönheitsgesetze an dem „König der Maschinen“, der Lokomotive, zur Geltung gelangen. Er analysierte die charakteristischen Lokomotiven Europas und der Neuen Welt und stellte Richtlinien für die Maschinenschönheit auf, deren Befolgung die Lokomotive zu einer künstlerischen Schöpfung gestaltet.

Der interessante Vortrag wurde mit lebhaftem Beifall aufgenommen.

Die nächste Sitzung des Technischen Ausschusses wird im Jahre 1932 in Budapest stattfinden. C.

Persönliches.

In- und Ausland durchdrungen, vereinigte er 1928 seine Werke mit den Linke-Hofmann-Werken in Breslau. Seine reichen Erfahrungen und die Achtung, die er allenthalben genoß, stellten ihn an die Spitze der Deutschen Wagenbauvereinigung, die er auch im Internationalen Waggonkartell*) vertrat. Beim Abschluß des letzten großen Lieferungsvertrages mit der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft wirkte er maßgebend mit und rettete so seine stark bedrohte Industrie vor unabsehbarer Schädigung durch Arbeitslosigkeit und Zerfall. Sein Hingang in schwerer Zeit bedeutet einen schmerzlichen Verlust für die deutsche Waggonindustrie. Schn.

*) Siehe Organ 1931, S. 210.

Berichte.

Bahnunterbau, Brücken und Tunnel; Bahnoberbau.

Schweißen von Stahlbauten.

Die Anwendung der elektrischen Lichtbogenschweißung bei der Herstellung von Stahlbauwerken nimmt eine immer größere Ausdehnung an. Hand in Hand damit geht eine schnelle Weiter-

entwicklung der konstruktiven Grundsätze; eine rege Forscher-tätigkeit sucht ihr die theoretischen Grundlagen zu liefern.

In den Heften Nr. 28, 30, 49 und 53/54 des vorigen und Nr. 2, 5, 8, 9 und 10 des laufenden Jahrgangs bringt die Zeitschrift

„Die Bautechnik“ und in den Heften Nr. 20 und 23 des vorigen und Nr. 1, 4 und 6 des laufenden Jahrgangs die Beilage „Der Stahlbau“ verschiedene Aufsätze hierüber. Eine Abhandlung in Heft 30 gibt eine Schilderung der Entwicklung im Jahre 1929 aus allen Ländern unter Angabe der Quellen. Über die seitdem ausgeführten Bauten greifen wir aus den übrigen Aufsätzen zusammenfassend einige besonders wichtige Punkte heraus.

1. Ausgeführte Bauten.

An neueren deutschen Bauausführungen sind zu nennen: ein einstieliges Bahnsteigdach im Bahnhof Kolberg (Bautechnik 1930, Heft 53/54), ein ebensolches in Fürstenberg-Mecklenburg (Bautechnik 1931, Heft 2), eine Turnhalle in Friedrichsort (Stahlbau 1931, Heft 9), eine Autohalle (Stahlbau 1931, Heft 6) und eine Straßenbrücke von 2×20 m Stützweite über die Bahn bei Eckelshausen (Bautechnik 1931, Heft 4). Hierzu kommen noch verschiedene Stahlhochbauten (Polizeiunterkunft Berlin-Köpenick, Stahlbau 1930, Heft 1, 3) und mehrere Brückenverstärkungen (Bautechnik 1931, Heft 10). In Nordamerika sind, wie einem Auszug aus der Zeitschrift Engineering News-Record vom 18. 9. 1930 (Stahlbau 1930, Heft 23) zu entnehmen ist, die Schweißungen von Stahlbauten namentlich des Hochbaues so zahlreich, daß sie keine Besonderheit mehr darstellen.

Zu diesen Anwendungen der Schweißtechnik kommt in neuester Zeit noch eine weitere: das Verschweißen der Rundeiseninlagen in Eisenbetonbauten, das ja der neue Entwurf für die deutschen Eisenbetonbestimmungen aus Sicherheitsgründen für Säulen von mehr als 3% Bewehrung vorschreibt, das aber nach einem Bericht in Heft 5 der Bautechnik in Nordamerika auch aus Gründen der einfachen Einbringung mit gutem Erfolg in weitergehendem Umfang angewendet wurde.

2. Bauliche Einzelheiten.

Durch Vergleich mit früheren Ausführungen ist zu ersehen, wie sich der Konstrukteur bereits der neuen Bauweise anzupassen gelernt hat.

Fast allgemein findet man die Anordnung durchgehender Schweißnähte auch dort, wo es statisch nicht notwendig wäre, damit das Eindringen von Wasser vermieden und das Verziehen der einzelnen Bleche hintangehalten wird. Diesem Punkt wird besonderes Augenmerk geschenkt. Die Verbiegungen lassen sich vermeiden durch sprunghaftes Vorheften im Abstand von 30 bis 50 cm mit Heftschweißungen von 20 bis 25 mm Länge und festes Einspannen der Bleche mit Klammern im Abstand von 0,5 m, teilweise auch unter Verwendung von Heftschrauben. Ebenso wird das lästige und darum nicht immer zuverlässige Überkopfschweißen durch konstruktive Maßnahmen allgemein vermieden. Wie zweckmäßig geschweißte Profile sein können, zeigen die Turnhalle, die beiden Bahnsteigdächer und die Autohalle in Oberhausen; bei Hochbauten werden allerdings sehr häufig noch Walzprofile verwendet.

Aus den beiden letzten der obigen Beispiele ist auch zu ersehen, daß es mitunter zweckmäßig sein kann nebenbei teilweise die Nietung beizubehalten. So wurden bei der Bahnsteighalle in Fürstenberg die Montagestöße genietet, damit die ganze Schweißarbeit in die Werkstatt verwiesen werden konnte, wo sie leichter nachzuprüfen war. Dieses Bestreben macht sich bei der Mehrzahl der Ausführungen geltend. Bei der Autohalle in Oberhausen sind die Eckpfosten genietet, da hier der teuren Schweißung eine Ersparnis an Werkstoff nicht gegenüberstand. Bei einem Hochbau in Nordamerika ist die Nietung wegen konstruktiven Schwierigkeiten bei einigen Blechträgern beibehalten worden.

Angaben über Ersparnisse werden gemacht beim Bahnsteigdach in Kolberg, wo sie 15% an Baustoff und 20% an Gesamtkosten betragen haben, bei der Turnhalle, wo die Gewichtserparnis 14% betrug, wenn sie sich auch unter entsprechendem Mehraufwand an Arbeit auf 20 bis 25% hätte bringen lassen, und bei den Unterzügen der Polizeiunterkunft mit 19% Gewichtserparnis.

Aus dem Beispiel der Aussteifungen am Blechträger der Straßenbrücke und ähnlichen Fällen ist ein weiterer Vorteil der Schweißung zu erkennen, nämlich die Möglichkeit weitere, für die Nietung ungünstig gelegene Anschlüsse von Baugliedern herzustellen und so eine wirksamere Aussteifung des Bauwerks zu erzielen.

3. Geräte und Arbeitsverfahren.

Die einschlägigen Firmen haben für den Baustellengebrauch eigene Schweißapparate mit Quersfeldschaltung geschaffen, die den besonderen Anforderungen des Schweißbetriebes (vergl. Bautechnik 1930, Heft 49 und 1931, Heft 8) am besten gerecht werden. In Nordamerika wurden bereits zufolge eines Berichtes im Canadian Machinery vom 18. September 1930 selbsttätige Schweißmaschinen verwendet mit einem Arbeitsfortschritt von etwa 0,2 m je Minute bei 6,35 mm Nahtstärke.

Auf die Prüfung und dauernde Überwachung der Schweißer scheint — die Straßenbrücke bei Eckelshausen ausgenommen — in Amerika mehr Gewicht gelegt zu werden als bei uns, während die konstruktiv-theoretische Entwicklung in Deutschland weiter fortgeschritten zu sein scheint.

Der Arbeitsaufwand beläuft sich nach verschiedenen Angaben ungefähr auf 0,68 m Naht je Tonne. Für 1 m Naht von 9,5 mm Dicke fallen etwa 0,9 Stunden an.

4. Festigkeitsversuche und Folgerungen.

Das schnelle Fortschreiten der neuen Bauweise rief sofort Wissenschaftler und wissenschaftlich eingestellte Praktiker auf den Plan. Neben den Versuchen über die Festigkeit reiner Schweißverbindungen war es in letzter Zeit das Zusammenwirken von Nietung und Schweißung, dem die Untersuchungen gelten, ein Gebiet, das deshalb von besonderer Bedeutung ist, weil es die Grundlage für die Verstärkung genieteter Brücken durch Verschweißen bestehender oder Aufschweißen neuer Teile bildet.

Wie bereits früher mitgeteilt, berichtet Professor Kayser in Darmstadt im Heft 13 des „Stahlbau“ 1930 über Versuchsreihen, die ihn zu dem Ergebnis führen, daß ein Zusammenwirken sehr wohl erreicht werden kann, wobei allerdings die Nieten nicht ausgenützt sind, so daß er für diese als zulässige Beanspruchung 850 kg/cm² und für Schweißnähte 750 kg/cm² vorschlägt.

Dipl.-Ing. Bühler, Sektionschef für Brückenbau bei der Schweizer Bundesbahn, hat diese Versuche nun weiter ausgedehnt (Stahlbau 1930, Heft 43) und kommt zu dem Schluß, daß eine verstärkende Schweißung in erster Linie etwa ein Drittel der bisherigen Nietfestigkeit zu ersetzen hat und erst der Überschuß die Festigkeit erhöht. Bühler entwickelt daraus einen ideellen Nietquerschnitt $F_{nid} = F_{neff} + \frac{F_s - 0,6 F_{neff}}{1,72}$ für Stirnschweißung;

das zweite Glied lautet bei Flankenschweißung $\frac{F_s - 0,8 F_{neff}}{2,23}$

Er weist nach, daß schon zu einer geringen Verstärkung ein großer Teil des bisherigen Nietquerschnittes als Schweißquerschnitt erforderlich sind. Hierzu kommt, daß diese Werte sich auf der rein statischen Festigkeit aufbauen, während das Verhalten der Schweiße unter wechselnden Beanspruchungen noch nicht genügend untersucht ist, so daß Bühler die Aussichten der Brückenverstärkung durch Schweißung nicht so günstig beurteilt.

Wie vielerlei Gesichtspunkte bei dem Versuch einer Berechnung kombinierter Anschlüsse zu beachten sind zeigt ein Aufsatz in Heft 3 des „Stahlbau“. Dr. Ing. G. Bierett beschreibt dort Versuche, die er an allerdings nicht besonders günstig angeordneten Verbindungen angestellt hat und kommt zu dem Schluß, daß infolge der Unsicherheit in der Berechnung bei nachträglichen Verstärkungen genieteter Knoten durch Schweißung den Nieten möglichst keine Kräfte zugewiesen werden. Besonders lehrreich ist die sich anschließende Diskussion, in der noch manche Punkte zur Geltung kommen, die in den Aufsätzen selbst nicht so klar ausgesprochen sind.

Sp.

Prüfung von aluminothermischen Schweißungen bei Schienenstößen in UdSSR.

Nachdem die Leitung der Oberbauabteilung der zentralen Eisenbahnverwaltung der UdSSR. das Schweißen der Schienenstöße auf den Strecken beschlossen hat, hat sie im Sommer 1929 eine Reihe von Prüfungen an aluminothermisch geschweißten Stößen vornehmen lassen, um das richtige Arbeitsverfahren sowie die den Anforderungen am besten entsprechende Zusammensetzung der Schweißmasse festzustellen.

Als Objekt zur Prüfung der Schweißung waren Schienen Typ IIIa gewählt worden (Gewicht 33,48 kg/m). Die Mehrzahl

der Schweißungen wurde an Schienen ein- und derselben Lieferung und Herstellung (Walzung) des Jahres 1928, ausgeführt. Weiterhin ist auch eine Reihe von Schweißungen an Schienen Typ IIa ausgeführt worden (Gewicht 38,416 kg/m). Zu den Probenschweißungen hatte man zuvor die Schienen auf Motorsägen in Stücke von 73,5 cm Länge geschnitten. Auf diese Weise sind im ganzen ungefähr 200 Probenschweißungen von Schienenstößen ausgeführt worden. Die Ausarbeitung des Programms der Versuche war dem Verfasser dieses Artikels übertragen und wurden unter dessen Leitung auch die Probenschweißungen vorgenommen.

Als Schweißeinrichtung diente die aus Deutschland bezogenen Klemmapparate der Firma: Prof. Dr. Hans Goldtschmidt. Die vorherige Erwärmung der Stöße erfolgte durch Benzol-Hochdruckgebläse, die von derselben Firma geliefert waren.

Das Programm umfaßte: Prüfung der aus Deutschland bezogenen Apparate, Feststellung des Verfahrens der Vorwärmung des Stoßes, Festsetzung des Normalgewichts des Thermitanteiles, Prüfungen bei Verwendung der Schlackenbrücke. Festlegung des Erkaltsverfahrens der geschweißten Stöße und Anleitung des Arbeiterpersonals.

Nach Beendigung der Vorschweißungen und Festsetzung des Arbeitsverfahrens waren im Programm 25 Kontrollschweißungen der kombinierten Methode und 25 der Stumpfschweißung vorgesehen. Auf statische Biegung und Schlagwirkung geprüft wurden die geschweißten Stöße im technischen (mechanischen) Laboratorium der zentralen wissenschaftlichen Prüfungsverwaltung des Volkskommissariats für Verkehr. Vor der Prüfung war noch ein Abhobeln der geschweißten Stöße längs der Schienenlauffläche und auf beiden Seiten des Schienenkopfs vorgenommen worden. Druck und Schlag führte man in allen Fällen auf den Schienenkopf aus. Die Schienen lagerten auf Stützen von 100 cm Spannweite. Bei der Prüfung auf statische Biegung wurde der jeweilige Widerstand (Bruchspannung auf die ursprüngliche Querschnittfläche) nach der Formel $\frac{p \cdot 1}{4 \cdot W}$

berechnet, wobei als W das geringste Widerstandsmoment des Schienenquerschnitts angenommen wurde. Bei Prüfungen auf Schlag mit einer Ramme (Gewicht des Rammhärens 100 kg) ist der erste Schlag aus einer Höhe von 2 m ausgeführt worden, die jedesmal um 1 m vergrößert wurde; die maximale Fallhöhe des Rammhärens war 12 m. Von den der Prüfung unterzogenen Stößen sind zwei stumpfgeschweißte und ausgeglühte Stöße bei der maximalen Fallhöhe nicht gebrochen.

Die ausgeführten Schweißungen lassen folgende Schlüsse ziehen:

1. Bei kombiniertem Schweißverfahren kann die vorhergehende Erhitzung des Stoßes durch einen Benzolerwärmer leicht bis zu einer Temperatur von 900° C gebracht werden, die am Schienenkopf gemessen wird. Eine derartige Erhitzung gibt nicht nur eine bedeutende Einsparung an Schweißmasse (30 bis 35%), sie gewährleistet auch eine höhere Güte der Schweißung, im Verhältnis zur üblichen Erhitzung des Stoßes über dem Kohlenfeuerbecken. Die zur Stoßwärmerung nötigen Hitzegrade wurden mittels eines elektrischen Thermopyrometers gemessen und registriert.

2. Bei der Stumpfschweißung kann die vorhergehende Erhitzung des Stoßes in einem bedeutend geringerem Maße als bei dem kombinierten Verfahren, ausgenützt werden. Die Temperatur der Erhitzung gemessen am Schienenkopf, darf dabei, auf Grund von Versuchen, 600° C nicht übersteigen. Bei höherer Erhitzung ist auf der Schienenoberfläche, an Stellen der höchsten Temperatur (Schienensteg) keine Schlackenschutzhaut vorhanden, weil hier die Schlacke vom Strahl der Schweißmasse leicht abgespült wird. In der harten Schlackenhaut entstehen dabei sog. „Fenster“, durch die die Schweißmasse eindringt, den Schienenstahl aufschmilzt und sich mit ihm vermengt. Der Stoßbruch ist in solchen Fällen stets grobkörnig, zuweilen sogar muschelförmig. Die Güte (Festigkeit) des Stoßes ist dann bedeutend geringer.

3. Bei Verwendung eines Benzolerwärmers zur vorhergehenden Erhitzung des Stoßes ist beim kombinierten Schweißverfahren die Ausführung einer Schlackenbrücke nicht unbedingt nötig. Wie bekannt, ist die Anwendung einer Schlackenbrücke empfohlen, um die unsymmetrische Anordnung des Schweißwulstes

auf der Schiene zu beseitigen. Beim Erwärmen des Stoßes durch einen Benzolerwärmer wird das Erstarren der Schlacke infolge der hohen Temperatur so stark verzögert, daß das geschmolzene Eisen Zeit hat, sich in der Schweißform zu beiden Seiten der Schiene selbständig auszugleichen.

4. Das Ausglühen in der Schweißform mittels eines Benzolerwärmers gibt keine wesentliche Vergrößerung der Schlagfestigkeit des Stoßes. Günstige Ergebnisse erzielt man bei Anwendung von Ausglühen auf Holzkohle unter Anblasen mittels eines Fußblasebalgs. Dabei muß die Kohle ins Feuerbecken geschüttet werden und in unmittelbarer Berührung mit der Schiene sein. Der Stoß wird bis zur Rotglut erhitzt und auf dieser Temperatur 20 Minuten lang gehalten. Daraufhin muß die Stoßstelle mit trockenem Sand, Schlacke oder Asche zugeschüttet werden damit sie langsam abkühlt.

5. Die Anwendung von Eisenmänteln (zur Verlangsamung des Erkalts der geschweißten Stöße), die unmittelbar nach der Schweißung um die Schweißform aufgestellt wurden, mit Füllung des freien Raumes zwischen Mantelwand und Schweißform aus trockenem Sande, hat keine wesentliche Vergrößerung der Güte des Stoßes ergeben.

6. Für die Schweißung von Schienenstößen Typ IIIa kann das folgende in der Übersicht 1 angegebene Verfahren empfohlen werden, das auf Grund der Ergebnisse der Probenschweißungen festgesetzt worden ist:

Übersicht 1.

Bedingungen der Schweißung Dauer einzelner Operationen	Kombiniertes Schweißverfahren	Stumpfschweißung
Gewicht der reinen Schweißmasse . .	4700 g	6000 g
Gewicht der Eisenabfälle (Schrot) . .	300 g	—
Gewicht von Ferrosilizium	150 g	—
Stärke der Schweißungsplatte (Schweißblech)	5 mm	—
Dauer der Vorwärmung des Stoßes mit Hilfe einer Benzolflamme bei Luftdruck im Zylinder von 4 Atmosphären und 0,75 mm Düsendurchmesser	14 Min.	7 Min.
Zeitverbrauch zur Vorbereitung der Schweißung	2 bis 3 Min.	2 bis 3 Min.
Dauer des Brennens der Schweißmasse im Tiegel (vom Aufflammen bis zum Ausgießen in die Schweißform) . .	13 Sek.	15 Sek.
Dauer des Ausgießens aus dem Tiegel in die Schweißform	9 Sek.	25 bis 30 Sek.
Dauer des Stoßwärmens durch die aufgeschmolzene Schweißmasse (die Zeit vom Ende des Ausgießens bis zum Anfang des Zusammenziehens des Stoßes)	3 Min.	3 Min.
Größe der Schienenverkürzung nach der Schweißung	Nicht unter 10 mm	Nicht unter 15 mm
Stärke der über dem Schienenkopf erhärteten Schlackenschicht	50 mm	70 mm
Gewicht des geschweißten Wulstes .	—	{ 3300 bis 3350 g

Die Ermittlung dieses Verfahrens erfolgte:

A. Nach dem kombinierten Verfahren auf Grund von 62 Schweißungen (davon 40 geprüft auf statische Biegung und 15 auf Schlag).

B. Nach dem Verfahren der Stumpfschweißung auf Grund von 30 Schweißungen (davon 16 geprüft auf statische Biegung und 11 auf Schlag).

Bei der Prüfung auf Schlag, war für stumpfgeschweißte Stöße die maximal erreichte Fallhöhe des Rammhärens im Durch-

schnitt gleich 4,5 m, nach dem kombinierten Verfahren geschweißte Stöße 3,7 m.

Im Durchschnitt ergaben die Versuche auf Biegung und Bruchlast:

1. Beim kombinierten Verfahren — 37 500 kg bzw. 64 kg/mm².
2. Beim Stumpfschweißverfahren — 33 200 kg bzw. 57 kg/mm².

In Anbetracht der großen Bedeutung der dynamischen Belastung, der die Schienen im laufenden Verkehr ausgesetzt sind, wurde das Stumpfschweißverfahren als grundlegend angenommen und es wurde daher nur für dieses die Kontrollversuche ausgeführt. Die Ergebnisse sind in Übersicht 2 angegeben. Die erhaltenen Zahlen übersteigen um ein Beträchtliches die Ergebnisse der vorausgegangenen Schweißungen nach demselben Verfahren. Das weist darauf hin, wie wichtig die Ausführung

2. An wichtigsten Gleisstellen wird ausschließlich das Stumpfschweißverfahren mit Anbringung von Sicherheitslaschen der leichten Form zugelassen.

Die Frage, welches Schweißverfahren auf den Hauptlinien am besten befriedigt, ist noch offen geblieben.

Boris Tchistjakow.

Dynamische Beanspruchung von Brücken.

Im Gegensatz zu der Untersuchung von Eisenbrücken mit Hilfe der in letzter Zeit vielfach beschriebenen Dehnungsmesser aller Art hat Prof. Dr. Ing. K u l k a in Hannover eine optische Meßmethode ausgearbeitet, die die Verschiebungen der einzelnen Knoten aus ihrer Ruhelage fortlaufend photographisch aufzeichnet. Aus

Übersicht 2.

Ergebnisse der Kontrollschweißungen und der Prüfung der Stöße, die nach dem Stumpfschweißverfahren geschweißt sind.

Typ der Schiene	Art der Schweißung	Ausgeführt					Durchschnittliche Ergebnisse			
		Schweißungen		Prüfungen			Statische Biegung			Schlag
		ohne nachfolgendes Ausglühen	mit nachfolgendem Ausglühen	auf statischer Biegung	auf Schlag	im Ganzen	Bruchlast in kg	maximale Ausbiegung in mm	jeweiliger Widerstand in kg/mm ² (Bruchfest)	
III a	Stumpfschweißung	19	13	10	10	20	42 250	59	72	für nicht ausgeglühte Stöße — 6,8 für ausgeglühte Stöße — 9,8

der Probenschweißungen mit gleichzeitiger Prüfung ihrer Güte für die Festsetzung eines richtigen Verfahrens.

In U d S S R. findet die Schweißung der Schienenstöße seit dem Jahre 1926 Anwendung, wo die Stöße auf der Brücke über den Fluß Schoscha, Oktoberbahn, stumpfgeschweißt wurden*). Die Ergebnisse dieser Schweißung waren vollkommen befriedigend. Die anfangs auf den geschweißten Stößen angebrachten Sicherheitslaschen wurden bald darauf entfernt, weil die Stöße zuverlässig waren.

Mit der Anwendung des Schweißens auf den Eisenbahnlinien der U d S S R. in weitestem Umfang mußte jedoch bei der Neuheit der Sache, dem Mangel an geübten Schweißern mit Abweichungen von den für normale Schweißung angegebenen Regeln gerechnet werden. Dieser Umstand erklärt die Vorsichtsmaßregeln, die die Verwaltung der Sowjetbahnen bei der Erlaubniserteilung von Stoßschweißungen auf den Hauptlinien trifft.

Zu diesen Beschränkungen sind zu zählen:

1. Die Schweißung nach dem kombinierten Verfahren wird nur für Stationsgleise bei Zuggeschwindigkeiten unter 35 km/Std. zugelassen.

*) Organ 1928, Heft 16.

diesen Verschiebungen lassen sich dann die unter der dynamischen Beanspruchung aufgetretenen Spannungen ermitteln.

Bei allen Messungen dieser Art stößt man, wie der Erfinder des obengenannten Verfahrens im Heft 26 des „Stahlbau“ 1930 schildert, immer wieder auf die auffallende Erscheinung, daß an verschiedenen Stellen ein und desselben Stabes angebrachte Dehnungsmesser im gleichen Zeitpunkt verschiedene, z. T. erheblich über dem zu erwartenden Betrag liegende Werte anzeigen, während die Durchbiegungen und Knotenpunktverschiebungen teilweise weit unter den der Berechnung entsprechenden Größen liegen.

Der Verfasser erklärt diesen scheinbaren Widerspruch daraus, daß sich dem Spannungszustand, der durch die Auswertung der Knotenpunktverschiebungen ermittelt wird und der allein mit dem der statischen Beanspruchung verglichen werden kann, eine Gruppe örtlicher Zusatzspannungen von der Art der Nebenspannungen überlagert, die aus Biegungs- und Torsionsschwingungen herrühren mögen, und ferner darauf, daß in vielen Fällen das Proportionalitätsgesetz nicht erfüllt ist. Er schlägt deshalb vor bei Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von Brücken stets beide Methoden vergleichend nebeneinander anzuwenden.

Sp.

Buchbesprechung.

VDE.-Vorschriftenbuch. 18. Auflage, im Verlag des VDE., in Leinen gebunden 18.— *R.M.*, VDE.-Mitglieder 16,20 *R.M.* (Ausgabe mit Daumenregister 2,60 *R.M.* mehr).

Die soeben erschienene 18. Auflage des Vorschriftenbuches des Verbandes Deutscher Elektrotechniker konnte im Umfang etwas verringert werdendurchHerausnahme zwar noch gültiger, inzwischen aber die Gegenwart nicht mehr stark berührender Bestimmungen.

Des weiteren sind die Vorschriften über elektrisches Spielzeug, über elektrische Fanggeräte und über elektrische Gas- und Feueranzünder, sämtlich vom Jahre 1927, ungültig geworden, desgleichen die Normalbestimmungen für den Anschluß von Motoren an öffentliche Elektrizitätswerke (1923).

Änderungen erfolgten u. a. an den Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlasser- und Steuergeräten, an den Vorschriften über Installationsmaterial (KPI. 1928), an den Regeln für galvanische Elemente, für Anodenbatterien, für Hochfrequenzheilgeräte, sowie an den Vorschriften für Außenantennen.

Gegenüber der letzten Auflage sind in der 18. Auflage die Normen für Betriebsspannungen elektrischer Starkstromanlagen, für Spannungen von Anlagen unter 100 V wieder aufgenommen, ebenso die Normen für die Abstufung von Stromstärken bei Apparaten.

Die neue Auflage entspricht somit dem Stand der Vorschriftenschaffung, wie sie mit dem 1. Januar 1931 für die deutsche Elektrotechnik gilt.