

BEOBACHTUNGEN
ÜBER DIE
ELASTISCHEN FORMÄNDERUNGEN
DES
EISENBAHN-GLEISES.

Von

Alexander Wasiutyński,

Ingenieur der Verkehrsanstalten, Directions-Ingenieur der Warschau-Wiener Eisenbahn.

Hierzu Zeichnungen auf den Tafeln XXXVIII bis XLIV.

ERGÄNZUNGSHEFT ZUM ORGAN FÜR DIE FORTSCHRITTE DES EISENBAHNWESENS, JAHRGANG 1899.

WIESBADEN.
C. W. KREIDEL'S VERLAG.
1899.

Inhalts-Uebersicht.

	Seite		Seite
I. Einleitung.			
1. Zweck und Bedeutung der Beobachtungen	293	11. Die Senkung und Durchbiegung der Schiene zwischen den Schwellen	311
2. Die Vorrichtungen, welche bisher zu Beobachtungen der elastischen Formänderungen verwendet sind	294	12. Die ständige und zufällige Ueberlastung und Entlastung der Lokomotivräder	315
II. Mefs-Vorrichtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn.		13. Die dynamische Wirkung der Tenderräder	317
1. Allgemeine Bauart	295	B. Formänderungen in wagerechtem Sinne und Formänderungen in Folge der Drehung der Schiene.	
2. Anordnung der Kugelspiegel bei der Beobachtung der Formänderungen in lothrechtem Sinne	296	1. Seitliche Bewegungen des Schienenkopfes	318
3. Genauigkeitsgrad der ermittelten Formänderungen in lothrechtem Sinne	296	2. Drehung der Schiene um ihre Längsachse	319
4. Beobachtung der Formänderungen in wagerechtem Sinne	296	3. Das seitliche Gleiten der Schiene auf ihren Stützen	319.
5. Anordnung der Kugelspiegel bei der Beobachtung der Drehung der Schiene	297	4. Die Kräfte, durch welche die seitlichen Schwankungen des Schienenkopfes verursacht werden	319
6. Die Gründung der Mefs-Vorrichtungen und die allgemeine Einrichtung der Beobachtungsstelle	297	5. Der Einfluß der Drehung der Schiene auf die Größe der Formänderung in lothrechtem Sinne	321
III. Ziel und Eintheilung der Beobachtungen. Beschreibung der Oberbauarten, welche den Beobachtungen unterzogen sind	298	V. Die Formänderungen des Oberbaues in den Schienenstößen	321
IV. Beobachtungen am ununterbrochen durchlaufenden Theile des Stranges.		A. Schienenstöße mit Seitenlaschen.	
A. Formänderungen in lothrechter Richtung.		a) Die Formänderungen in lothrechtem Sinne	322
1. Nachgiebigkeit des Dammes und des Bodens	299	1. Beobachtungs-Verfahren	322
2. Nachgiebigkeits-Ziffer der Unterlage der Schwellen (Bettungsziffer)	300	2. Allgemeine Kennzeichen der Formänderungen	322
3. Einbiegung der Schwellen	301	3. Einfluß der Art der Verbindungstheile auf die Formänderungen in den Schienenstößen	322
4. Die Senkung der Schwellen unter den Schienen	302	4. Senkung des Gleises im Schienenstöße	322
5. Die berichtigte Ziffer der Schwellen-Unterlage	304	5. Die ruhenden und schwebenden Schienenstöße	323
6. Bettungsziffer	304	6. Lange Laschen	324
7. Nachgiebigkeitsziffer des Unterbaues	307	7. Das Wandern der Schienen	324
8. Der Druck der Schiene auf die Schwelle	308	b) Die seitlichen Bewegungen und die Drehung der Schienen	324
9. Die Länge der Schiene und die Anzahl der Schwellen, auf welche der Raddruck übertragen wird	309	B. Formänderungen in Schienenstößen besonderer Art	324
10. Der Unterschied zwischen der Senkung der Schwellen und der Schienen über diesen	310	1. Blattstofs von Rüppell	325
		2. Die Stofsanordnung von Neumann, mit in die Schienen eingelassener Lasche (Kopflasche)	325
		3. Die Stofsfangschiene	325
		VI. Schlufsfolgerungen	326

Beobachtungen über die elastischen Formänderungen des Eisenbahn-Gleises.

Von Alexander Wasjutynski, Ingenieur der Verkehrsanstalten, Directions-Ingenieur der Warschau-Wiener Eisenbahn.

Hierzu Zeichnungen auf den Tafeln XXXVIII bis XLIV.

I. Einleitung.

1. Zweck und Bedeutung der Beobachtungen.

Die Ermittlung der auf eine Bauanordnung wirkenden Kräfte und der durch diese in den einzelnen Bestandtheilen veranlassten Spannungen bildet eine der wichtigsten Aufgaben des Ingenieurs, deren Lösung auf zwei Arten erstrebt werden kann: entweder mittels theoretischer Erörterungen und der auf solche gestützten Berechnungen oder mittels unmittelbarer Beobachtungen, wobei die Kräfte als Ursachen der Erscheinungen und die Formänderungen als Folgen der Einwirkung der Kräfte erwogen werden. Bei der Lösung von Aufgaben aus dem Bereiche des Eisenbahn-Oberbaues ist der Weg der theoretischen Erörterungen zur Zeit noch mit unüberwindlichen Schwierigkeiten verbunden. Die diesbezüglichen Arbeiten von Winkler, Schwedler, Zimmermann, Cholodecki u. A. ermöglichen lediglich eine näherungsweise Lösung der allereinfachsten Fälle dieser äußerst schwierigen Aufgaben, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß die in den betreffenden Berechnungen vorkommenden Festigkeits- und Elasticitäts-Zahlen einiger Baustoffe des Oberbaues noch durchaus nicht genügend festgestellt sind. Die Schwierigkeit der theoretischen Lösung von Aufgaben, welche sich auf den Widerstand des Eisenbahn-Oberbaues beziehen, ist eine Folge theilweise der Unmöglichkeit, die auf den Oberbau einwirkenden Kräfte genau festzustellen, theilweise aber der baulichen Eigenheiten des Eisenbahn-Gleises: der unumgänglichen Unterbrechung des Stranges im Stosse, der Senkung und Einbiegung der Schwellen u. s. w. Diese Umstände machen die Aufgaben schwierig und veranlassen uns zu einer bloß näherungsweise, auf verschiedenen, nicht immer zutreffenden Voraussetzungen beruhenden Lösung Zufucht zu nehmen.

Bei einem solchen Zustande der angeregten Frage gewinnt die Ermittlung der Arbeit des Oberbaues auf Grund unmittelbarer Beobachtungen eine ganz besondere Bedeutung, indem die Beobachtungen nicht nur eine Nachprüfung der auf theoretischem Wege gewonnenen Ergebnisse ermöglichen, sondern auch zuverlässige und unmittelbar anwendbare Werthe liefern, in Fällen, in welchen die Theorie wegen der verwickelten Umstände versagt.

Die wirkliche Arbeit der Bestandtheile des Eisenbahn-Oberbaues kann am zuverlässigsten auf Grund der Beobachtung der durch die Wirkung der Kräfte veranlassten elastischen Formänderungen abgeschätzt werden. Bleibende Formände-

rungen bezeugen, daß die Spannungen in einzelnen Bestandtheilen die Elasticitätsgrenze überschritten haben und geben daher einigermaßen ein Bild der Zerstörung, ohne jedoch zu erklären, auf welche Weise und in Folge von welchen Ursachen die Zerstörung eingetreten ist.

Das Eisenbahn-Gleis und seine Stützen sind den größten Formänderungen in lothrechter Richtung unterworfen. Diese Formänderungen sollen daher zunächst untersucht werden.

Die lothrechte Durchbiegung der Schiene zwischen den Stützen bringt die größte der in der Schiene vorkommenden Spannungen zum Vorschein. Nicht minder wichtig ist die Ermittlung der Senkung und Einbiegung der Schwellen.

Die Berechnung zeigt, daß der Steifigkeitsgrad der Stützen, auf welchen die Schiene ruht, einen sehr bedeutenden Einfluß auf die Größe der Spannungen ebenso der Schiene selbst, wie auch der Stofsverbindungen ausübt. Eine gleichmäßige Senkung des belasteten Gleises, welche hauptsächlich durch eine entsprechende Vertheilung der Schwellen erzielt werden kann, bildet die nothwendige Voraussetzung einer ruhigen Fahrt und gewinnt eine noch viel größere Bedeutung, wenn man berücksichtigt, daß von ihr wie auch von der allgemeinen Steifigkeit des Gleises die zeitweise Ueberlastung einzelner Achsen und Räder abhängt, welche einen Einfluß auf die dynamische Belastung des Gleises ausübt.

Es ist dabei einleuchtend, daß die Senkungsgröße der Schwellen abhängig ist von der zur Zeit noch sehr ungenügend erforschten Zusammendrückbarkeit der Bettung und des Unterbaues.

Die lothrechten Formänderungen, welche ihrer Richtung nach den größten im Gleise vorkommenden Spannungen entsprechen, bilden zwar die bedeutendsten, aber keineswegs die einzigen Aenderungen, welche unter der Einwirkung der bewegten Last im Gleise eintreten.

Die bewegte Last gelangt zur Erscheinung in zweifacher Weise: als statische Belastung durch die Fahrzeuge, welche in lothrechter Richtung auf das Gleis einwirkt und als Kräfte mannigfaltiger Art und Richtung, welche während der Bewegung der Züge hervortreten.

Es ist bekannt, daß die Richtung der Zugkraft der Lokomotive und der Trägheitskraft der Fahrzeuge, sogar in den geraden Strecken, nicht immer mit der Richtung des Gleises zusammenfällt. In Folge dessen entstehen nicht nur Längswirkungen, die das Wandern der Schienen veranlassen, sondern außerdem lothrechte Kräfte, welche die statische Wirkung der

Belastung vermehren und wagerechte, welche quer zur Gleisachse wirken und wagerechte Schwankungen des Gleises hervorrufen.

Endlich ist noch zu bemerken, daß bei einer Zusammenwirkung sämtlicher genannter Kräfte, welche im Allgemeinen nicht durch den Schwerpunkt des Schienenquerschnittes gehen, die Schiene auf Drehung um ihre Längsachse und auf Umkippen beansprucht wird.

Die Ermittlung der Formänderungen der Schiene, welche durch die wagerechten und verdrehenden Kräfte veranlaßt werden, hat eine wesentliche Bedeutung nicht nur wegen der Spannungen, welche in der Schiene selbst durch diese Kräfte entstehen, sondern auch wegen der Einwirkung dieser Kräfte auf die zur Befestigung der Schiene auf den Schwellen dienenden Bestandtheile, da bekanntlich der Widerstand dieser im Allgemeinen sehr gering ist.

Schließlich wäre noch zu bemerken, daß die Drehung der Schiene um ihre Längsachse einen Einfluß auf die Größe der sichtbaren Formänderungen der Schiene in lothrechter Richtung haben kann und daß in Folge dessen die Beobachtungen letzterer nachträglicher Berichtigung bedürften.

Die Formänderungen des Schienenstolzes, welcher immer noch den schwächsten Theil des Gleises bildet, erfordern besondere Berücksichtigung, nicht nur wegen der Unzulänglichkeit der zur Anwendung kommenden Schienenstoß-Anordnungen, sondern auch wegen der ungenügenden und meistens nicht genau bestimmbar Wirkung der Laschen oder anderer Verbindungsstücke, weswegen auch die im Schienenstoße vorkommenden Spannungen einer theoretischen Erwägung nur schwer unterzogen werden können.

Aus dem Obigen erhellt, daß Beobachtungen, welche die Ermittlung der Arbeit des Oberbaues bezwecken, sich einerseits auf alle Bestandtheile des Oberbaues, also auf die Schienen, die Verbindungstheile, die Schwellen und ihre Unterlage erstrecken sollen, andererseits nicht auf ein beliebiges Glied in der Längsrichtung des Gleises begrenzt werden können, sondern ein vollständiges Schienenpaar mit den zugehörigen Stößen umfassen müssen.

2. Die Vorrichtungen, welche bisher zu Beobachtungen der elastischen Formänderungen verwendet sind.

Die Beobachtung der elastischen Formänderungen ist durch das rasche Fortschreiten der Erscheinungen sehr erschwert. Die ihrer Größe nach unbedeutenden und für das Auge fast unbemerkbaren Bewegungen der einzelnen Bestandtheile des Oberbaues während der Ueberfahrt der Fahrzeuge können nicht unmittelbar gemessen werden und müssen deshalb mittels geeigneter Vorkehrungen selbstthätig aufgezeichnet werden.

Eine genaue Beschreibung dieser bereits ziemlich allgemein bekannten Meßwerkzeuge ist hier überflüssig, doch möge erwähnt werden, daß das einfachste vom Ingenieur *Flamache**) auf den belgischen Staats-Eisenbahnen in Anwendung gebracht

*) Vergl. *Compte rendu du congrès intern. des chemins de fer. Deuxième session. Milan 1887; vol. III.*

wurde. Es bestand im Wesentlichen aus einem ungleich-armigen Hebel, dessen kürzerer Arm unter den Schienenkopf gesteckt und dessen längerer mit einem Bleistift versehen war. Dieser Bleistift zeichnete in vergrößertem Maßstabe eine Schaulinie der Schwankungen der Schiene auf eine Trommel, welche mittels eines Uhrwerks gedreht wurde. Die Trommel und die Drehungsachse des Hebels waren an einem in der Nähe der Schiene in die Bettung geschlagenen Pflöckchen befestigt.

Später hat *Coüard**) für die von ihm auf der Paris-Lyon-Mittelmeer-Bahn angestellten Beobachtungen eine mittels Luftdruck betriebene Vorrichtung benutzt. Beide Enden eines Gummirohres sind durch Häute verschlossen, wobei die Eindrückungen, welche an der einen Haut erfolgen, am andern Ende wiederholt werden; hierbei wird die Schaulinie mittels eines Stiftes auf einer umlaufenden und mit einer Lage von Rufs bedeckten Trommel gezeichnet.

In Rußland war es der Ingenieur *J. Stecewicz***), welcher mittels eines von ihm erfundenen Werkzeuges auf der Tambow-Saratower Bahn und auf der Baltischen Bahn die ersten Beobachtungen dieser Art ausführte. Die Anordnung dieser Vorrichtung stimmt im Wesentlichen mit der der *Coüard'schen* überein, nur erfolgt die Uebermittlung der Eindrückungen nicht durch Luft, sondern durch Wasserdruck.

Alle diese Vorrichtungen, insbesondere aber die beiden zuletzt genannten, zeichnen sich durch scharfsinnig durchdachte Einzelheiten aus. Leider sind sie aber nicht frei von Mängeln, welche jeder Kraftübertragung mehr oder minder eigen sind und durch die Trägheit, durch den Einfluß der Wärmeänderungen, durch todten Gang u. dergl. verursacht werden. Zum Zwecke der Beseitigung der Fehler, welche durch die oben genannten Umstände, die veränderliche Elasticität der Federn und Häute, die verspätete Aufzeichnung der Erscheinungen und andere Ursachen entstehen, werden nachträglich Berichtigungen vorgenommen und die Schaulinien werden nach einem für jede Ordinate besonders festzustellenden Maßstabe umgezeichnet. Es ist aber einleuchtend, daß auch die am gewissenhaftesten vorgenommenen Berichtigungen nicht im Stande sind, alle Fehler in den Angaben der erwähnten Vorrichtungen zu beseitigen.

Einen nicht minder wichtigen Mangel bildet der Umstand, daß in Folge der Bauart das Glied, auf welches die Bewegungen des beobachteten Punktes unmittelbar übertragen werden, eine Stütze in unmittelbarer Nähe dieses Punktes haben muß. So lange es sich bloß um die Feststellung der Verschiebung der einzelnen Bestandtheile des Oberbaues gegen einander handelt, ist dieser Mangel von keiner besondern Bedeutung, in anderen Fällen aber kann er, wie wir später noch sehen werden, zu unrichtigen Ergebnissen führen.

*) Vergl. *Recherches expérimentales des conditions de stabilité des voies en acier, par M. Coüard. Revue générale des chemins de fer, Octobre 1887.*

**) Vergl. die Abhandlungen des Ingenieurs *Stecwicz* im russischen Journal des Ministeriums der Verkehrsanstalten (Januar 1892) und im Organ des Vereines der Ingenieure der Verkehrsanstalten (Nr. 9 und 10, 1895).

In der 5. Versammlung des internationalen Eisenbahn-Congresses zu London 1894 gab der Regierungsrath und Bau-director W. Ast aus Wien in seinem Berichte die Beschreibung einer von ihm sehr eigenartig erdachten Mefsvorrichtung, welche damals bereits zu den Beobachtungen auf der Kaiser Ferdinands-Nordbahn verwendet war. Die Schaulinien der Bewegungen werden mittels der Photographie, also ohne irgend welche Kraft- oder Bewegungs-Uebertragung erhalten. Zu diesem Zwecke besteht die Vorrichtung aus einer photographischen Dunkelkammer, in welcher die lichtempfindliche Platte durch ein Uhrwerk mit gleichmäfsiger Geschwindigkeit wagerecht bewegt wird. Diese Platte ist verdeckt und die Belichtung erfolgt nur durch einen 0,3^{mm} breiten lothrechten Spalt. An den beobachteten Punkten werden Metallschneiden mit spiegelnd geglätteter Kante wagerecht befestigt. Der Schnitt der glänzenden Kante mit dem lothrechten Spalte wird auf der lichtempfindlichen Platte durch einen Lichtpunkt abgebildet. Führt der beobachtete Punkt eine lothrechte Bewegung aus, so wird auf der sich gleichzeitig wagerecht bewegendes Platte eine Schaulinie dieser Bewegung gewonnen. Gegenüber dem obern Theile der Platte befindet sich eine Oeffnung, welche abwechselnd nach je einer halben Sekunde verschlossen und geöffnet wird. Somit erhält man auf dem Schaubilde eine Reihe von hellen und dunkeln Streifen, aus welchen die Geschwindigkeit der Bewegung ermittelt werden kann. Die ganze Vorrichtung wird in der Nähe des Gleises auf einer festen, von dem umgebenden Boden abgesonderten Gründung aufgestellt.

Im Jahre 1896 war auf der Warschau-Wiener Eisenbahn die Vornahme von Beobachtungen über den Oberbau in Vorschlag gebracht, wobei in Berücksichtigung der wesentlichen Vortheile des photographischen Verfahrens beschlossen wurde, dieses anzuwenden. Bei genauer Untersuchung der Ast'schen Einrichtung gelangte man aber zu der Ueberzeugung, dafs sie trotz befriedigender Leistung und trotz ihres sehr bemerkenswerthen Grundgedankens nicht frei von Uebelständen sei.

1. Die Mefsvorrichtung mufs auf unbeweglicher Gründung in der Weise aufgestellt werden, dafs sich das Objectiv in einer Entfernung von 0,70^m von der Schiene befindet. Die Gründung für die Ast'sche Vorrichtung bestand in einem Falle aus einem 8^m hohen, in einer ebenso tiefen Grube freistehenden Mauerpfeiler, in einem andern aus Pfählen, welche in gewisser Tiefe von dem umgebenden Boden befreit wurden (Abb. 1, Taf. XXXVIII). In Anbetracht der Schwierigkeiten, welche mit dem Aufbaue solcher Gründungen in unmittelbarer Nähe des Gleises verbunden sind, wurden sie in einer Entfernung von 7,5^m vom Gleise ausgeführt, die Mefsvorrichtung selbst aber befestigte man am Ende langer Balken, welche in der Mitte unterstützt und am andern Ende durch ein entsprechendes Gegengewicht belastet waren. Bei dem bedeutenden Eigengewichte der Vorrichtung und der Biegsamkeit der Balken wurde angenommen, dafs die Erschütterungen, welche ungeachtet der grofsen Länge der Pfähle etwa durch diese übertragen werden sollten, keine Wirkung auf die Vorrichtung äufsern. Trotz der grofsen Entfernung des Gerüsts wurde in Anbetracht der Stellung der Mefsvorrichtung eine Stützwand für den Eisenbahndamm erbaut. Eine noch gröfsere Ent-

fernung von den Schienen war nicht wohl zu erzielen, da ohnedies die erforderliche Länge der Dunkelkammer für dreifache Vergröfserung 3.0,70, also etwa 2^m betrug.

2. In Folge der oben genannten Bedingungen war die Stellung der Vorrichtung unveränderlich und die Beobachtungen konnten sich deshalb nur auf eine unbedeutende Länge, etwa blofs auf den Stofs und seine nächste Umgebung erstrecken.

3. Die Beobachtungen konnten nur an hellen, sonnigen Tagen vorgenommen werden, denn in Folge der raschen Bewegung der Platte und der dreifachen Vergröfserung, war bei dunkler Witterung die Belichtung auch bei Anwendung der lichtstärksten Objective von Zeifs ungenügend.

II. Mefsvorrichtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn.

1. Allgemeine Bauart.

Zum Zwecke der Vermeidung oben genannter Uebelstände wurden die allerdings lichtschwachen, aber aus anderen Rücksichten günstigen Objective für Fernwirkung und behufs Erlangung genügender Belichtung an den zu beobachtenden Punkten gewölbte, durch Sonnenstrahlen oder elektrisches Licht stark beleuchtete Spiegel verwendet. Das Objectiv für Fernwirkung hat zwei Linsengruppen, deren hintere, die Lichtstrahlen zerstreue, beweglich ist, so dafs ihr Abstand von der vordern, die Lichtstrahlen sammelnden je nach Bedarf verändert werden kann; demnach können mittels eines solchen Objectives auch aus bedeutender Entfernung Lichtbilder in grofsem Mafsstabe aufgenommen werden. Nach diesem Grundgedanken waren für die Warschau-Wiener Eisenbahn zwei Vorrichtungen folgender Art angefertigt*) Ein als Dunkelkammer dienendes Messingrohr a b (Abb. 2, Taf. XXXVIII) von 1,18^m Länge und 9 cm Durchmesser ist vorn mit einem die Lichtstrahlen sammelnden und ein verkleinertes Bild des Gegenstandes gebenden Objective a verbunden. Dieses verkleinerte Bild wird dann mit Hilfe eines im mittlern Theile des Rohres angebrachten, mittels eines Zahntriebes c verschiebbaren Mikroskopes vergrößert. Am hintern Theile des Rohres ist ein Kästchen N angebracht. In der das Rohr berührenden Wand dieses Kästchens befindet sich ein lothrechter Spalt t (Abb. 3 und 5, Taf. XXXVIII), durch welchen die Lichtstrahlen auf ein Bromsilberband, »East man's transparent film«, fallen. Das Bromsilberband ist 12 cm breit und 8 m lang und wird durch eine unmittelbar vor dem Spalte angebrachte, lothrecht gerippte Trommel in Bewegung gesetzt. Hierbei wird das Band durch zwei kleine Wellen z' z'' gegen die Trommel gedrückt. Damit die Abbildung des Gegenstandes auf dem lichtempfindlichen Bande in dreifacher Vergröfserung erscheint, mufs die Entfernung des Gegenstandes vom Objective a genau 3,45^m betragen.

*) Diese Vorrichtungen sind nach meinen Angaben in den Werkstätten des Ingenieur-Chemikers Herrn Lebidziński für photographische Gebrauchsgegenstände in Warschau angefertigt, welcher die Einzelheiten entwarf. Da sich hierbei zeigte, dafs die im Handel befindlichen Objective für Fernwirkung keine genügende Schärfe des Bildes geben, so hat Herr Lebidziński eine besondere Linsengruppe zusammengestellt, mit welcher ganz zufriedenstellende Ergebnisse erzielt wurden.

Die zur Ingangsetzung des Bandes dienende, lothrecht gerippte Trommel wird durch ein selbstständiges Uhrwerk d (Abb. 2, Taf. XXXVIII) in Bewegung gesetzt und zwar ist zu diesem Zwecke auf die Achse der Trommel außerhalb des Kästchens die mit Gängen versehene Schnurtrommel f gesetzt, in deren Gänge ein dicker Seidenfaden*) gewunden wird. Das zweite Ende dieses Fadens ist an der Trommel g des Uhrwerkes befestigt. Während des Laufes des Uhrwerkes g wird der Faden angezogen und das Band mit einer in den Grenzen von 5 bis 25 cm/Sek. beliebig veränderlichen Geschwindigkeit bewegt.

Im Kästchen befindet sich eine Zählvorrichtung k (Abb. 4, Taf. XXXVIII), zur Feststellung der Anzahl der Umdrehungen des Bandes und eine Vorrichtung p zum Verzeichnen des Endes einer jeden Aufnahme auf dem Bande. In der das Rohr berührenden Wand des Kästchens und zwar etwas höher als das Rohr, befindet sich eine schmale Oeffnung, welche durch die Anker eines kleinen Elektromagneten h abwechselnd geöffnet und verschlossen wird. Dieser Elektromagnet ist mit dem Pendel**) M für 0,5 Sek. Schwingungsdauer (Abb. 2, Taf. XXXVIII) verbunden. Somit erhält man im obern Theile der Aufnahmen eine durchbrochene Linie, aus welcher die Zeitdauer der Beobachtungen ersichtlich ist und welche zugleich zur Längenprüfung der geradlinigen Bewegung des Bandes dient. Zur wagerechten Einstellung dient eine Libelle q, welche auf dem Rohre befestigt und deren Achse in gleicher Richtung mit der des Rohres liegt.

Das Uhrwerk wird durch Drücken des Gummiballes i in Gang gesetzt; hierbei bleibt die lose auf der Achse steckende Trommel g unbeweglich, bis eine Verbindung zwischen ihr und dem Uhrwerke mittels des Elektromagneten r durch Hebung der Trommel hergestellt wird. Ein Zahnrad, welches sich auf der obern Endfläche der Trommel befindet, greift nun in ein anderes, fest auf der Achse sitzendes ein. Diese Vorrichtung verhindert eine ungleichmäßige Verschiebung des Bandes bei beginnendem Gange des Uhrwerkes. Die Herstellung und Aufhebung der Verbindung zwischen der Trommel und der Achse auf welcher sie sitzt, somit auch die Bewegung des Bandes und die Unterbrechung dieser Bewegung werden selbstthätig durch die erste Lokomotivachse bewerkstelligt, und zwar mit Hilfe zweier an den Enden der beobachteten Gleisstrecke angebrachten elektrischen Stromschlüsse s' s'' möglichst einfacher Bauart. Ist der Abstand zwischen diesen Stromschlüssen und die Zeitdauer der Beobachtung genau bekannt, so kann man leicht ebenso die Geschwindigkeit des Zuges, wie auch für einen gegebenen Augenblick die Stellung jeder Achse in Bezug auf den beobachteten Punkt ermitteln.

In den Punkten, deren Formänderungen beobachtet werden sollen, werden Kugelspiegel aus poliertem Stahle (Abb. 6 und 7, Taf. XXXVIII) von 3^{mm} Durchmesser angeschraubt.

2. Anordnung der Kugelspiegel bei der Beobachtung der Formänderungen in lothrechttem Sinne.

*) Im Jahre 1898 wurde der Seidenfaden durch eine Aluminiumkette ersetzt.

**) Das Pendel wurde später während der Beobachtungen im Jahre 1898 durch ein genau gehendes Uhrwerk ersetzt (Abb. 18, 19 und 20, Taf. XLI).

Bei der Beobachtung der Formänderungen in lothrechttem Sinne werden alle gleichzeitig beobachteten Kugelspiegel in einer Lothrechten befestigt, um die gegenseitige Lage der Punkte nach der Zeit feststellen zu können. Zu diesem Ende befestigt man die Kugelspiegel an kleinen Winkelleisen (Abb. 6, Taf. XXXVIII), von denen jedes mittels dreier Schrauben an dem beobachteten Punkte befestigt wird, wobei man die Kugel in für die Beobachtung bequeme Stellung bringen kann.

Die mittlere Schraube dient als Stiftschraube zur Befestigung des Winkels an der Schiene, die beiden äußeren Druckschrauben dienen zur Einstellung des Kugelspiegels. In einem der beobachteten Punkte befestigt man einen Doppelspiegel, aus zwei in unveränderlichem Abstände befestigten Stahlkugeln (Abb. 7, Taf. XXXVIII). Dieser Doppelspiegel dient zur Feststellung des lothrechten Maßstabes der Schaulinien. Die Aufstellung der Kugelspiegel in einer Lothrechten erfolgt mittels einer besondern Winkellehre, deren wagerechter Schenkel auf dem Schienenkopfe ruht. Die Kugelspiegel werden durch Sonnenstrahlen oder durch eine 1,20^m vor den Kugelspiegeln aufgestellte elektrische Bogenlampe von 12 Ampère mit Sammellinse beleuchtet. Die Beleuchtung durch unmittelbare oder gespiegelte Sonnenstrahlen ist ungünstig, weil sie nur an sonnigen Tagen verfügbar ist, weil sich ihre Strahlrichtung ändert und weil sie oft durch den Schatten der Fahrzeuge beeinträchtigt wird. Deshalb kam bei den Beobachtungen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn fast ausschließlich elektrisches Licht zur Verwendung.

Starke Beleuchtung eines Kugelspiegels giebt auf der an Stelle der Dunkelkammer eingesetzten Mattscheibe einen hell leuchtenden Punkt, welcher fast allein auf dem Bromsilberbande abgebildet wird, während die übrigen Theile des Spiegels und die umgebenden, weniger strahlenden Gegenstände bei der raschen Bewegung des Bandes kaum sichtbare Spuren zurücklassen.

3. Genauigkeitsgrad der ermittelten Formänderungen in lothrechttem Sinne.

Die Formänderungen lothrechter Richtung wurden in dreifacher Vergrößerung aufgenommen und bis auf 0,2^{mm} scharf gemessen. Somit sind die unten zusammengestellten Zahlenwerthe der lothrechten Bewegungen für 1 t des Raddruckes der Lokomotive bei 6,7 t mittlern Raddrucke bis auf $\frac{0,2}{3 \cdot 6,7} = 0,01$ mm genau bestimmt. Bei den durchschnittlichen Zahlenwerthen ist auch die dritte Decimale angegeben, um die Fehler bei Verwendung dieser möglichst zu verkleinern.

4. Beobachtung der Formänderungen in wagerechtem Sinne.

Die Beobachtung von nicht lothrechten Bewegungen mittels der beschriebenen Vorrichtung ist erschwert. Bei der Beobachtung der Formänderungen in lothrechter Richtung behalten die wagerechten Verschiebungen die Richtung der optischen Achse der Vorrichtung, fallen sogar fast genau mit dieser zusammen und deshalb konnte ihre beeinträchtigende Einwirkung ausgeschlossen werden.

Um jedoch mittels derselben Vorrichtung Aufnahmen der wagerechten Verschiebungen mit genügender Ausscheidung des Einflusses der lothrechten zu erhalten, wäre es nothwendig, die Achse des Fernrohres mit den letzteren in gleicher Richtung, also lothrecht unmittelbar bei der Schiene aufzustellen, was selbstverständlich unausführbar ist. Es war daher unvermeidlich, zu einer andern, wenn auch weniger günstigen Stellung der Vorrichtung Zuflucht zu nehmen. Zu diesem Zwecke ist das Fernrohr um seine Längsachse um 90° drehbar gemacht, wobei der Spalt wagerechte Lage annimmt (Abb. 18, Taf. XLI). Bei dieser Lage bewegt sich das Band vor dem Spalte in der Richtung von unten nach oben.

Die Mefsvorrichtung wurde unter einem Winkel von 60° gegen das Gleis aufgestellt. Hierbei ist die Entfernung von der beobachteten Einzelstelle an der Schiene etwas größer als bei rechtwinkliger Aufstellung zum Gleise.

So wurden die wagerechten Bewegungen sichtbar und zwar als Abweichungen von der lothrechten Richtung, in der sich das Band bewegte. Die lothrechten Schwankungen fielen mit der Richtung dieser Bewegung zusammen, hatten also keinen Einfluß auf die verzeichnete Größe der wagerechten Bewegungen und konnten bloß auf die Verzeichnung der letzteren in der Längsrichtung der Schaulinie einwirken. Ist die Größe der lothrechten Einbiegung für den betreffenden Zeitpunkt bekannt, so kann man aus der Schaulinie leicht die entsprechende wagerechte Abweichung feststellen, indem deren Lage dem gegebenen Zeitpunkte um die Größe der betreffenden lothrechten Einbiegung vorgeeilt ist.

Der Maßstab der in dieser Weise ermittelten, wagerechten Verschiebungen kann auf Grund folgender Betrachtungen festgestellt werden.

Die wagerechte Verschiebung $a b$ (Abb. 8, Taf. XXXVIII) ist im Schaubilde durch das Maß $a c$ angegeben, welches bei einem Winkel von $30^\circ = 0,5 \cdot ab$ ist. Ist das Fernrohr A rechtwinkelig zum Gleise aufgestellt, so werden die Formänderungen im Schaubilde in dreifacher Vergrößerung erhalten. Steht es dagegen bei B schief zum Gleise, so daß sein Abstand von dem beobachteten Punkte a größer wird, so vermindert sich die Vergrößerungsfähigkeit der Linsen bis auf $2^{1/2}$. Da hierbei der sichtbare Theil der wagerechten Verschiebungen gleich der Hälfte von deren wirklicher Größe ist, so erhält man diese wagerechten Verschiebungen in den Schaulinien $\frac{1}{2} \cdot 2^{1/2} = 1^{1/4}$ facher Größe.

In den Schaulinien der Tafeln sind sämtliche Formänderungen bequemen Vergleiches halber in dreifacher Vergrößerung dargestellt.

5. Anordnung der Kugelspiegel bei der Beobachtung der Drehung der Schiene.

Die Drehung der Schiene in dem beobachteten Punkte konnte mittels folgender Verwendungsweise der Kugelspiegel festgestellt werden.

Am Winkeleisen $a c d$ (Abb. 9, Taf. XXXVIII) werden zwei Kugelspiegel befestigt, einer am vortretenden Schenkel im Punkte a , der zweite, und zwar doppelt etwas höher und in größerer Entfernung vom Fernrohre in b . Die Kugeln b können

mittels der Schrauben c so eingestellt werden, daß der Abstand $a-b$ genau 10 mm beträgt. Dieser Abstand wurde mittels Mikrometers mit größter Schärfe hergestellt. In lothrechter Richtung beträgt der Abstand zwischen den Kugelspiegeln etwa 3 mm , somit entstehen im Schaubilde zwei Linien im Abstände von etwa 9 mm .

Wenn keine Drehung stattfindet, geben diese Kugelspiegel im Schaubilde zwei Linien unveränderlichen Abstandes. Wenn aber die Schiene, abgesehen von den lothrechten und wagerechten Bewegungen eine Drehung nach außen oder innen um ihre Längsachse ausführt, so muß der Abstand zwischen den Schaulinien dieser Kugelspiegel größer oder kleiner werden. Da der Winkel der Drehung sehr klein ist, so kann er gleich dem Verhältnisse der Aenderung des lothrechten Abstandes zwischen den Kugelspiegeln zu dem Mittenabstande der beiden Kugeln von 10 mm gesetzt werden. Da aber in den Schaubildern die lothrechten Maße dreifach vergrößert sind, so wird beispielsweise der Drehwinkel bei einer Aenderung des Abstandes der beiden Linien um $0,2 \text{ mm}$

$$\frac{0,2}{3 \cdot 10} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{1,2^\circ}{\pi} = 23'$$

betragen.

Der Abstand der genannten Linien wird mit Vergrößerungsgläsern und mittels eines besondern Maßstabes von $0,2 \text{ mm}$ Theilung unter Schätzung kleinerer Maße genau gemessen. Somit werden die Maße bis auf $0,1 \text{ mm}$ genau, was einem Drehwinkel von $11^{1/2}'$ entspricht.

Die beschriebene Anordnung ermöglichte gleichzeitig in einem Punkte zu beobachten:

- die lothrechten Bewegungen und die Verdrehung der Schiene mittels des rechtwinkelig zur Gleisachse aufgestellten Fernrohres A (Abb. 8, Taf. XXXVIII);
- die wagerechten Bewegungen der Schiene mittels des unter einem Winkel von 60° gegen die Gleisachse aufgestellten Fernrohres B.

6. Die Gründung der Mefsvorrichtungen und die allgemeine Einrichtung der Beobachtungsstelle.

Die Gründung für die Fernrohre war in folgender Weise hergestellt (Abb. 10 und 11, Taf. XXXVIII): In $4,25 \text{ m}$ Mittenabstand vom äußern Strange des Gleises waren vier im Grundrisse quadratische, $2,14 \text{ m}$ weite Brunnen gruben ausgehoben. Der Mittenabstand dieser Gruben war 4 m und ihre Tiefe unter S. O. betrug $7,40 \text{ m}$. In diesen Gruben waren aus Backsteinen und Cementmörtel quadratische, unten $1,60 \text{ m}$, oben 1 m breite Pfeiler aufgebaut. In jede fünfte Lagerfuge dieser Pfeiler waren Filzplatten gelegt. Da zwischen dem Pfeiler und den Seitenflächen der offen gebliebenen Baugrube ein freier Raum verblieb, so konnten die Erschütterungen des Bodens nur durch die Sohle auf den Pfeiler übertragen werden.

Auf den wagerechten Oberflächen der Pfeiler waren Auflagerplatten aus Stahl mittels Steinschrauben befestigt (Abb. 10, 11, Taf. XXXVIII und 18, Taf. XLI). Mit diesen Auflagerplatten war mittels Laschen ein Schienengleis verbunden, auf welchem die Unterstützungen der Fernrohre verschoben werden konnten. Jede dieser Unterstützungen bestand aus drei [Eisen, welche mit

einander in der aus den Lichtbildern Abb. 17 bis 20, Taf. XLI ersichtlichen Weise vernietet waren. Diese Unterstützungen, von welchen jede etwa 130 kg wog, waren an die Schienen mittels besonderer Krampen angeschraubt. Die Mefsvorrichtung war mit der Unterstützung durch drei Schrauben verbunden, wobei drei neben diesen angebrachte Mikrometerschrauben die Höheneinstellung in gewissen Grenzen erlaubten.

Somit sind sämtliche Verbindungsglieder zwischen der Mefsvorrichtung und dem gemauerten Fusse ausschließlich aus Metall und genügend steif. Die Mefsvorrichtung selbst ist ganz aus dickem Messingbleche gefertigt. Der die Beobachtungen Leitende kommt weder mit der Gründung noch mit der Mefsvorrichtung in Berührung und die einzige Vermittelung zwischen dem die Beobachtungen Leitenden und dem Werkzeuge bildet ein geschmeidiger Gummiball, mittels dessen die Ingangsetzung des Uhrwerkes vor Beginn der Beobachtungen bewirkt wird.

Die oben beschriebene Anordnung der Gründung ermöglichte die Verschiebung der Fernrohre auf eine Länge von 14 m entlang dem Gleise und somit die Beobachtung einer Schienenlänge von 12 m nebst den benachbarten Theilen der angrenzenden Schienen. Wenn beide Vorrichtungen gleichzeitig thätig waren, so wurden beide hinter einander in den elektrischen Stromkreis eingeschaltet, beide hatten also gemeinsame Stromschlüsse im Gleise und eine gemeinsame Uhr. Demzufolge war die Zeitdauer der Beobachtungen für beide Vorrichtungen genau gleich und die Halbsekundenschläge der Uhr wurden gleichzeitig auf beiden Schaubildern verzeichnet.

Die Gründung war durch Ueberdachung geschützt und in der Nähe waren zwei Buden aufgestellt. In der einen war eine Stromerzeugungs-Anlage eingerichtet, welche den Strom der Dynamomaschine mittels Stromwenders, Widerstandes, Ampèreters, Voltmeters u. s. w. auf die zum Beleuchten der Kugelspiegel dienenden Bogenlampen vertheilte oder dem die Elektromagnete der beiden Vorrichtungen erregenden Speicher zuführte. Mit dem Wärter der Dynamomaschine konnte sich der die Beobachtungen Leitende mittels eines Fernsprechers verständigen. In derselben Bude war am Fenster eine Schlosser-Werkbank aufgestellt und im hintern Theile war eine kleine Dunkelkammer zur Auswechslung des Bromsilberbandes errichtet. Die zweite Bude war für die Aufbewahrung der Mefsvorrichtungen und für den Aufenthalt eines Wächters eingerichtet.

Der Beobachtungspunkt war am Gleise Wien-Warschau 4 km von Warschau gewählt. Die Gleise liegen hier in der Geraden in 0,001 Neigung auf einem etwa 1,5 m hohen Damme, welcher im Jahre 1840 erbaut ist, und, wie die Bohrversuche zeigten, hauptsächlich aus Thon und Sand besteht. Auf dem oben genannten Gleise verkehren nach dem Sommerfahrplane 16 Personen- und Schnellzüge und 12 Güterzüge; die Geschwindigkeit der Personenzüge steigt bis etwa 64 km/St., die der Güterzüge ist wegen der Nähe des Güterbahnhofes nur gering. Somit war die Möglichkeit geboten, die Beobachtungen mit kurzen für die Aufstellung und Einrichtung der Vorrichtungen nothwendigen Unterbrechungen durchzuführen.

An den für die Gründung gewählten Stellen war der Boden durch Bohren untersucht (Abb. 12, Taf. XXXVIII), wobei sich zeigte, daß bis zu einer Tiefe von 10 m unter Schienen-

oberkante feiner Sand liegt, meistens mit Letten vermengt. In der Tiefe von 6,50 m finden sich Zwischenlagen von grobem Sande, mit Beimengungen von Steinen und Thon. Der Grundwasserspiegel liegt in einer Tiefe von 7,40 m unter S. O, in diese Tiefe wurde die Sohlenschicht der Gründung gelegt.

III. Ziel und Eintheilung der Beobachtungen. Beschreibung der Oberbauarten, welche den Beobachtungen unterzogen sind.

Die im Sommer 1897 begonnenen Beobachtungen erstreckten sich zunächst auf den damals an dieser Stelle befindlichen Oberbau mit 31,45 kg/m schweren und 6 m langen, seit 1879 im Gleise liegenden Schienen (Abb. 13, Taf. XXXIX), wobei jedes Schienenpaar auf acht 15 × 25 cm starken und 2,44 m langen, seit 1890 liegenden Eichenschwellen ruhte. Die Vertheilung der Schwellen unter dem Schienenpaare war folgende:

$$0,25 + 0,675 + 0,80 + 3 \cdot 0,85 + 0,80 + 0,675 + 0,25 = 6,00 \text{ m.}$$

Unterlegplatten waren nur auf den Stofschwellen angebracht. Diese Oberbauanordnung heisst im Folgenden I.

Später wurden sechs von diesen Schienenpaaren durch drei neue von 38 kg/m Gewicht und 12 m Länge ersetzt, wobei unter jedes Schienenpaar 16 Eichenschwellen der obigen Mafse verlegt wurden. Die Vertheilung der Schwellen unter dem Schienenpaare war folgende:

$$0,25 + 0,55 + 13 \cdot 0,80 + 0,55 + 0,25 = 12,00 \text{ m}$$

Dieser Oberbau erhielt auf jeder Schwelle zwei keilige Unterlegplatten und jede Platte wurde mit drei Nägeln befestigt. Die Beobachtungen bezogen sich auf das mittlere Schienenpaar. Diese Oberbauanordnung heisst im Folgenden II*) (Abb. 14, Taf. XXXIX).

Während der Beobachtungen wurden zunächst die Schwellen durch 2,70 m lange, sonst gleich und gleich vertheilte ersetzt. Diese Oberbauart heisst im Folgenden III (Abb. 15, Taf. XXXIX).

Später wurden die Stofschwellen zusammengeschoben, so dafs folgende Schwellenvertheilung entstand:

$$0,125 + 0,55 + 0,65 + 11 \cdot 0,85 + 0,65 + 0,55 + 0,125 = 12,00 \text{ m.}$$

Dieser Oberbau heisst im Folgenden IV (Abb. 16, Taf. XXXIX).

Bei diesen vier Oberbauanordnungen bestand die Bettung aus grobkörnigem, mit Kies vermengtem Grubensande, welcher in Folge des vieljährigen Dienstes und der vielmaligen Unterstopfung bereits einen bedeutenden Zusatz von erdigen Theilen enthielt.

Die Beobachtungen erstreckten sich im Jahre 1897:

1. auf die Zusammendrückbarkeit des Unterbaues, d. h. des Dammes und des Bodens in verschiedenen Tiefen;
2. auf die Zusammendrückbarkeit der Bettung zum Zwecke der Ermittlung der Bettungsziffer für die Oberbauten II und III;
3. auf die Einbiegung der Schwellen, behufs Feststellung der Form der elastischen Linie der belasteten Schwellen für die Oberbauten II und III;

*) Der volle Entwurf dieser Oberbauart ist in der Abhandlung des Verfassers angegeben: „Neuer Typus der Stahlschiene der Warschau-Wiener Eisenbahn“, welche im russischen „Journal des Ministeriums der Verkehrsanstalten“ 1894 abgedruckt ist.

4. auf die Senkung sämtlicher Schwellen eines Schienenpaares, um zu untersuchen, welchen Einfluß der Schienenquerschnitt und die Vertheilung und Länge der Schwellen auf die Senkung der Schwellen ausüben für die Oberbauten I, II, III und IV;

5. auf die Senkung der Schienen auf jeder Schwelle und am Stofse für die Oberbauten I, II, III und IV.

Außerdem wurden die Formänderungen der Schienenstöße in lothrechttem Sinne für folgende Stofsanordnungen beobachtet:

1. schwebender Stofs mit Winkellaschen für Oberbau I, (Abb. 13, Taf. XXXIX);
2. schwebender Stofs mit Doppelwinkel-Laschen und vier Bolzen für Oberbau II und III (Abb. 14, Taf. XXXIX);
3. schwebender Stofs mit längeren Doppelwinkel-Laschen und 6 Bolzen für Oberbau III (Abb. 15, Taf. XXXIX);
4. durch zwei dichtliegende Schwellen unterstützter Stofs für Oberbau IV (Abb. 16, Taf. XXXIX).

Um die Rückwirkung zu erkennen, welche die Verbesserung der Beschaffenheit der Bettung auf die Formänderungen ausübt und in der Voraussetzung, daß durch Verbesserung der Bettung die lothrechten Formänderungen, deren Einfluß auf die Schaulinien der wagerechten Formänderungen bei dem geschilderten Mefsverfahren nicht ganz ausgeschieden werden konnte, möglichst vermindert werden, wurde im Frühling 1898 auf der Beobachtungsstrecke die alte, aus grobem Sande und Kiese bestehende Bettung durch Granitschotter von etwa 4 cm Korn ersetzt. In der obern Lage dieser neuen Bettung war der Schotter mit Granitsplütern vermengt um das Unterstopfen zu erleichtern. Die alte Bettung war auf eine solche Tiefe ausgehoben, daß die neue Bettung den auf der Warschau-Wiener Eisenbahn zur Zeit eingeführten Querschnitt (Abb. 21, Taf. XXXVIII) erhalten konnte. Es zeigte sich dabei, daß die alte Bettung fast bis zu der für die neue Bettung festgestellten Tiefe von 53 cm unter Schwellenunterkante reichte.

Die Beobachtungen von 1898 erstreckten sich auf zwei Oberbauarten, von welchen die eine mit 38 kg/m schweren Schienen in Bezug auf die Verbindungstheile, Schwellen, deren Vertheilung u. s. w. mit der im Jahre 1897 beobachteten Anordnung IV (Abb. 16, Taf. XXXIX) übereinstimmte, die zweite aber aus 31,45 kg/m schweren und 9 m langen Schienen (Abb. 13, Taf. XXXIX) bestand, wobei unter dem Schienenpaare 13 eichene, 2,70 m lange Schwellen, von den oben angegebenen Querschnittsmassen in folgender Vertheilung verlegt waren:

$$0,25 + 0,50 + 10 \cdot 0,75 + 0,50 + 0,25 = 9,00 \text{ m.}$$

Die erste dieser Oberbauarten, welche sich von der Anordnung IV nur durch die Bettungsgattung unterscheidet, heißt im Folgenden IVa, die zweite, von der Anordnung I durch die Länge der Schienen von 9 m statt 6 m, durch die Länge der Schwellen von 2,70 m statt 2,44 m und durch deren Vertheilung verschiedene: V. Die Anordnung V unterschied sich von I auch dadurch, daß ausschließlich neue Schwellen, Schienen und Verbindungstheile verwendet waren, denen keine Anzeichen der Beschädigung oder Abnutzung anhafteten.

Für diese beide Oberbauten IVa und V beobachtete man in oben beschriebener Weise die gleichzeitig in lothrechttem und

wagerechtem Sinne eintretenden Formänderungen und die Drehung der Schiene über den Schwellen und in der Mitte zwischen den Schwellen (Abb. 18, Taf. XLI).

Behufs Vergleichung der lothrechten Formänderungen der Schiene über den Schwellen und in der Mitte zwischen den Schwellen wurden beide Fernrohre in einer Reihe rechtwinkelig zur Gleisachse aufgestellt, wobei das eine zur Aufnahme der Schaulinie der Formänderungen über einer Schwelle, das zweite zur gleichzeitigen Aufnahme der Schaulinie für die Mitte zwischen dieser und der nächstfolgenden Schwelle diente.

Für neue Bettung wurde deren Ziffer (Abb. 19, Taf. XLI), und auch die Nachgiebigkeit des Bodens in verschiedenen Tiefen bestimmt.

Endlich wurden die Schaulinien der Formänderungen in den im Jahre 1897 beobachteten Schienenstofsanordnungen (Abb. 20, Taf. XLI) in den Schienenstößen von Ruppell (Abb. 56—58, Taf. XLII) und Neumann (Abb. 59—61, Taf. XLII) und in den Stofsangschienen (Abb. 62—67, Taf. XLIII) aufgenommen. Zu diesem Zwecke wurden die Schwellen unter der 12 m langen Schiene in derselben Weise vertheilt, wie in der Anordnung bei dem Oberbau III; diese Anordnung heißt im Folgenden IIIa.

Die Aufstellungsweise der Fernrohre für jede Gruppe der Beobachtungen ist aus den Abb. 17 bis 20, Taf. XLI ersichtlich.

IV. Beobachtungen am ununterbrochen durchlaufenden Theile des Stranges.

A. Formänderungen in lothrechter Richtung.

1. Nachgiebigkeit des Dammes und des Bodens.

Die Ermittlung der Nachgiebigkeit des gewachsenen Bodens, des Dammes und der Bettung ist von großer Bedeutung, da die Spannungen in allen Theilen des Oberbaues von der Größe dieser Nachgiebigkeit abhängen. Außerdem wird durch die Untersuchung, inwieweit man die Unterstützungen der Mefsvorrichtung für unnachgiebig ansehen kann, die Möglichkeit geboten, den Genauigkeitsgrad der Beobachtungen zu beurtheilen.

In der Nähe des Eisenbahnkörpers ist der ganze Boden mehr oder weniger heftigen Erschütterungen ausgesetzt. Deshalb ist es nicht möglich, die wirkliche Bewegung jeder einzelnen Unterstüzung bei der Vorbeifahrt der Züge mit den beschriebenen Mitteln zu beobachten, man ist vielmehr genöthigt, sich mit der Beobachtung der gegenseitigen Bewegung der Unterstützungen zu begnügen.

Zu diesem Ende befestigte man auf einem der Pfeiler einen Kugelspiegel und stellte die Mefsvorrichtung auf den andern.

Die Aufstellungsweise war eine zweifache: die eine diente für Beobachtungen der lothrechten, die andere der wagerechten, zur Gleisachse rechtwinkelligen Bewegungen des Spiegels. In den erhaltenen Schaulinien waren Schwankungen der Unterstützungen in lothrechter Richtung von höchstens 0,15 mm, in wagerechter von höchstens 0,1 mm erkennbar. Wenn man berücksichtigt, daß die Bewegung beider Unterstützungen nicht gleichzeitig erfolgt und daß die vergleichsweise größte Orts-

änderung bei grössten entgegengesetzt gerichteten Abweichungen aus der Grundstellung stattfindet, so erkennt man, dass die wirkliche Bewegung der Vorrichtung in vorliegendem Falle die Hälfte der oben erwähnten Gröfsen nicht überschritten und somit höchstens 0,075^{mm} in lothrecht und 0,05^{mm} in waagrechtem Sinne betragen haben kann. Diese Genauigkeitsgrenzen stimmen überein mit dem auf S. 296 angegebenen Genauigkeitsgrade der Malse der aus den Schaulinien ermittelten Formänderungen. Die Schwankungen des Bodens selbst in der Ebene der Pfeilersohle, also in der Tiefe von 7,40^m, können gröfser gewesen sein, da die Schwankungen nach oben wahrscheinlich durch die in den Pfeilern verwendeten elastischen Zwischenlagen vermindert wurden.

Um die Nachgiebigkeit des Dammes in verschiedenen Tiefen feststellen zu können, waren dicht bei der Schiene zwischen den Schwellen mittels eines Handbohrers drei Bohrlöcher von etwa 100^{mm} Durchmesser hergestellt, deren Tiefe 0,5, 1,0 und 1,5^m betrug. In diese Bohrlöcher wurden eiserne Rohre von demselben Durchmesser eingelassen und in die so gebildeten Brunnen Gasrohre gerammt, von denen jedes bis 0,40^m unter die betreffende Brunnensohle reichte. Auf diesen Gasleitungsrohren befestigte man Kugelspiegel, deren Schaulinien beim Vorbeifahren der Züge aufgenommen wurden.

Die Schaulinien (Abb. 22, Taf. XXXVIII) beweisen, dass elastische Nachgiebigkeit des Bodens sogar in einer Tiefe von 1,50^m unter der Oberfläche der Bettung vorhanden ist.

Die grösste Nachgiebigkeit der Dammerde betrug beim Vorbeifahren der Züge in Millimeter auf eine Tonne des Raddruckes der Lokomotive:

Zusammenstellung I.

Tiefe unter der Oberfläche der Bettung m	Oberbauarten			
	I	III	IV a	V
	mm für 1 t Radlast			
0,50	0,15	—	—	0,11
1,00	0,11	0,09	0,09	0,08
1,50	0,09	0,07	0,06	0,07

2. Nachgiebigkeits-Ziffer der Unterlage der Schwellen, Bettungsziffer.

Nach Winkler*) wird das Verhältnis des Druckes p auf die Flächeneinheit der Schwellensohle zur Senkung y der Schwelle die Bettungsziffer genannt:

$$\text{Gl. 1) } \dots \dots \dots C = \frac{p}{y}$$

unter der Voraussetzung, dass in gewissen Grenzen die Schwellensenkung in geradem Verhältnisse zum Drucke auf die Flächeneinheit der Schwellensohle steht.

Die in dieser Weise ermittelte Gröfse C , welche den Ausdruck für den Steifigkeitsgrad der Unterlage der Schwellen bildet, ist selbstverständlich abhängig von der Beschaffenheit sämtlicher Stoffe, welche sich unter der Schwelle befinden und zwar bis zu einer Tiefe, in welcher der von der Schwelle

übertragene Druck sich auf immer gröfsere Fläche vertheilend, schliesslich keine Wirkung mehr ausübt. Aus den beschriebenen Beobachtungen über die Nachgiebigkeit des Bodens ist ersichtlich, dass die elastische Nachgiebigkeit des Bodens auf dem Beobachtungsposten beim Vorbeifahren der Züge sogar in einer Tiefe von 7,5^m unter S. O. noch bemerkbar war. Die elastische Nachgiebigkeit des Bodens in Tiefen von 0,5 bis 1,5^m gab Schaulinien, mittels deren der Einfluss jeder einzelnen Achse genau gemessen werden kann. Es ist auch selbstverständlich, dass die Gröfse dieses Bestandtheiles der allgemeinen Nachgiebigkeit der Unterlage der Schwellen verschieden sein wird, je nachdem das Gleis im Einschnitte oder auf dem Damme liegt, und dass diese Gröfse abhängig sein muss von der Höhe des Dammes, von der Beschaffenheit der Dammerde und von der Beschaffenheit des gewachsenen Bodens unter dem Damme, oder im Einschnitte.

Einer Gröfse nun, aus der der Einfluss der Bettung auf die Steifigkeit des Gleises für sich nicht zu beurtheilen ist, kann der Name »Bettungsziffer« zutreffender Weise nicht beigelegt werden und deshalb würde es zweckentsprechender sein, um Missverständnissen vorzubeugen, der Gröfse C eine andere Benennung, z. B. die unten vorgeschlagene: »Nachgiebigkeitsziffer der Schwellenunterlage« zu geben.

Auf der Warschau-Wiener Eisenbahn ist dieser Werth in einer Weise ermittelt, welche mit dem von Zimmermann auf den Elsass-Lothringen'schen Eisenbahnen angewendeten Verfahren*) im Wesentlichen übereinstimmt.

Für die Beobachtungen, welche behufs Ermittlung der Ziffer der Schwellenunterlage vorgenommen wurden, waren die beiden mittelsten Schwellen des Schienenpaares gewählt und auf jeder dieser Schwellen waren drei die Biegungslinie der Schwelle kennzeichnende Punkte bestimmt: in der Mitte, an der Schiene und am Ende. Diese Schwellen, ebenso wie auch alle übrigen Schwellen der Beobachtungstrecke, wurden sorgfältig unterstopft, jedoch ohne einen Grad der Sorgfalt, welcher das Gleis in einen ausnahmsweise guten Zustand versetzt hätte. Auf die Mitte der beobachteten Schwelle war eine durch ein in die Schiene gebohrtes Loch frei durchgehende, feste Stange geschraubt. Bei dieser Befestigungsweise (Abb. 23, Taf. XXXVIII) konnten mit einer Vorrichtung die Senkungen der Mitte der Schwelle, der Schiene und der Schwelle in der Nähe der Schiene aufgenommen werden. Die Senkung des Schwellenendes musste mit Hilfe der zweiten Vorrichtung aufgenommen werden, da eine vom Ende der Schwelle zur Schiene geführte Stange wegen der starken Verdrehung des Schwellenendes ganz unrichtige Ergebnisse liefern müsste.

Am Schwellenende war der Kugelspiegel an einer in die Schwelle eingedrehten Schraube von etwa 12^{mm} Durchmesser befestigt (Abb. 7, Taf. XXXVIII).

Um die Senkung der Schwelle unter der Schiene beobachten zu können und dabei den beeinträchtigenden Einfluss der Zusammendrückbarkeit der Schwelle auf die Ergebnisse der Beobachtung auszuschneiden, wurde folgende Vorrichtung verwendet:

*) Vorträge über Eisenbahnbau, Heft I.

**) Organ 1889, S. 141, 194, 227.

In der Nähe der untern Schwellenkante war von der Aufsenseite des Gleises ein durch die Schwelle durchgehender Bolzen b (Abb. 23, Taf. XXXVIII) mit dem Kopfe nach unten eingesetzt. Auf das obere Ende dieses Bolzens war über der Schwelle die Mutter c geschraubt und unter dieser ein Feder-ring d eingelegt, der den Bolzen nach oben zog. Somit wurden die Bewegungen der Schwellensole von dem am oberen Ende des Bolzens befestigten Kugelspiegel genau wiedergegeben. Ueber dem Bolzenkopfe und unter dem Federringe waren, um deren Eindrückung in die Schwelle entgegenzuwirken, breite Unterlegscheiben eingelegt.

Die Schaulinien der Schwellensenkung (Abb. 24, 25, Taf. XXXVIII und 26 und 27, Taf. XXXIX) wurden bei sehr langsamem Vorbeifahren einer einzelnen Lokomotive ohne Tender ermittelt. Der Abstand der äußeren Achsen der Lokomotive betrug bloß 3,4 m. Bei Schienen von 12 m Länge erstreckte sich die Senkung, wenn die mittlere Achse über der mittelsten Schwelle stand, nur bis zur dritten Schwelle von beiden Schienenstößen an gerechnet, d. h. die Senkung machte sich nur bei den gleichmäßig vertheilten Schwellen bemerkbar.

Bei 9 m langen Schienen erstreckte sich die Senkung auf alle Schwellen des Schienenpaares, ohne sich jedoch auf die Schwellen der benachbarten Schienenpaare zu übertragen.

In jeder Schaulinie ist der Verlauf der Senkung nur einer Schwelle während der Vorbeifahrt der Lokomotive dargestellt. In Anbetracht der vorliegenden Verhältnisse kann aber angenommen werden, daß die Senkung aller unter dem mittlern Theile der Schiene liegenden Schwellen in derselben Weise vorgeht. Um also die Größe der Senkung irgend einer Schwelle für einen bestimmten Augenblick festzustellen, genügt es, den Ort dieser Schwelle auf der Schaulinie zu ermitteln.

In derselben Weise kann für eine bestimmte Stellung der Lokomotive die Senkungsgröße in jedem der drei kennzeichnenden Punkte jeder der Schwellen, und somit auch die durchschnittliche Senkungsgröße der Schwelle ermittelt werden.

Die in den Schaulinien (Abb. 24 bis 27, Taf. XXXVIII u. XXXIX) angegebene Lage der Schwellen entspricht dem Augenblicke, in welchem die mittlere Achse der Lokomotive unmittelbar über der beobachteten Schwelle steht. Selbstverständlich könnte man sämtliche Schwellen nach rechts oder links verschieben, dann würde die Schaulinie einen andern Augenblick der Ueberfahrt der Lokomotive darstellen. Bei der in den Schaulinien dargestellten und für die Ermittlung der Ziffer der Schwellenunterlage angenommenen Stellung, befinden sich die in der Nähe des Stoßes liegenden Schwellen außerhalb der Senkungsstrecke und deshalb ist die Wahrscheinlichkeit der Annahme, daß sich sämtliche als Grundlage für die Berechnung gewählten Schwellen in gleichen Verhältnissen befinden, am größten.

Aus den ermittelten Senkungen y_1 , y_r und y_0 (Abb. 15 Taf. XXXIX) der drei kennzeichnenden Punkte einer Schwelle wurde die mittlere Senkung y dieser Schwelle berechnet, indem man die Fläche:

$$\text{Gl. 2) } \dots S = (y_1 + y_r) \frac{l_1}{2} + (y_r + y_0) \frac{l_2}{2} \dots$$

durch die halbe Länge der Schwelle l theilte.

Ist ω die Grundfläche, y die mittlere Senkung der Schwellen und P das Lokomotivgewicht, so folgt die Ziffer C aus:

$$\text{Gl. 3) } \dots C \cdot \Sigma \omega y = P \dots$$

In dieser Weise sind folgende Werthe der Ziffer der Schwellenunterlage ermittelt:

für Oberbau II:	von 3,9 bis 4,6, im Mittel 4,2,
< < III:	< 5,4 < 6,4, < < 5,8,
< < IVa:	< 4,0 < 4,7, < < 4,5,
< < V:	< 2,9 < 3,1, < < 3,0.

Die Anzahl der Schwellen, auf welche der Druck einer dreiaxigen Lokomotive mit 3,4 m Gesamttachsstand wirkt, betrug durchschnittlich für die Oberbauarten: II: 10,5, III: 10, IVa: 10 und V: 12,5.

Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß die im Jahre 1898 erfolgte Ersetzung des Grubenkieses durch Granitschotter eine Verminderung der Schwellenunterlage-Ziffer zur Folge hatte. Die Einwirkung der Bettung auf diese Ziffer kann jedoch nur auf Grund einer richtigen Beurtheilung der Ergebnisse der Beobachtungen über die Einsenkung sämtlicher Schwellen eines Schienenpaares abgeschätzt werden.

3. Einbiegung der Schwellen.

Dieselben Schaulinien, auf Grund deren die Schwellenunterlage-Ziffer ermittelt wurde, dienten auch zur Ermittlung der Form der elastischen Linie der Schwellen von 2,44 m Länge für Oberbau II (Abb. 24, Taf. XXXVIII) und 2,70 m Oberbau III, IV^a und V (Abb. 25, Taf. XXXVIII, Abb. 26 und 27, Taf. XXXIX).

Das Verhältnis der Senkungen der Schwelle in den drei für ihre Einbiegung kennzeichnenden Punkten in der Mitte, an der Schiene und am Ende wurde durch Ausmessung der diesen Punkten entsprechenden Senkungsflächen mittels Planimeter ermittelt. In dieser Weise sind die durchschnittlichen Vergleichswerthe der Senkungen der Schwelle in ihren drei Punkten für die ganze Zeitdauer des Formänderungsvorganges festgestellt. Bezeichnet man die Senkung der Schwelle in der Mitte, an der Schiene und am Ende durch y_0 , y_r und y_1 und nimmt man hierbei die Größe der Senkung der Schwelle an der Schiene gleich 100 an, so wird das ermittelte Verhältnis:

für die 2,44 m langen Schwellen: $y_0 : y_r : y_1 = 69 : 100 : 124$,
für die 2,70 m langen Schwellen:

bei dem Oberbau III:	$y_0 : y_r : y_1 = 75 : 100 : 68$,
< < < IV ^a :	$y_0 : y_r : y_1 = 74 : 100 : 64$,
< < < V:	$y_0 : y_r : y_1 = 91 : 100 : 78$.

Beträgt die Schwellen-Unterlage-Ziffer $C = 5$ für Grubensand und $C = 4$ für Schotter, welche Werthe durchschnittlich durch unmittelbare Beobachtung gewonnen wurden, und ist die Elasticitätszahl für Eichenholz $E = 120 \text{ t/qcm}$, so sollten nach den theoretischen Erörterungen Zimmermann's die soeben genannten Verhältnisse folgende Werthe haben:

für 2,44 m lange Schwellen: $y_0 : y_r : y_1 = 70 : 100 : 106$.

für 2,70 m lange Schwellen:

bei $C = 5$:	$y_0 : y_r : y_1 = 80 : 100 : 80$,
< $C = 4$:	$y_0 : y_r : y_1 = 83 : 100 : 83$.

Somit haben die Beobachtungen zu dem Ergebnisse geführt, daß sich die Schwellenköpfe bei 2,44 m langen Schwellen

mehr, und bei 2,70^m langen weniger senken, als nach der Theorie zu erwarten wäre. Das Verhältnis, welches für Oberbau V ermittelt wurde, zeigt besonders große Senkung in der Mitte und an den Enden, woraus man schliessen könnte, daß die beobachtete Schwelle steifer war, als die anderen.

Dessen ungeachtet stimmt die allgemeine Form der Biegelinie nach den Beobachtungen überein mit der nach der Theorie festgestellten, und zwar ist aus der Form dieser Linien ersichtlich, daß bei den 2,44^m langen Schwellen die Senkung an den Enden größer ist, als in der Mitte, und in der Mitte kleiner, als unter der Schiene, daß dagegen bei den 2,70^m langen Schwellen die Senkung in der Mitte und an den Enden kleiner ist, als unter der Schiene.

Bei der Ermittlung der günstigen Länge der Schwellen für eine bestimmte Oberbauart wird bekanntlich verlangt, daß sich die belastete Schiene während der Senkung nicht nach der einen oder andern Seite neigt, da dies eine für den Verkehr der Fahrzeuge schädliche Veränderung der Spurweite verursachen könnte.

Diese Bedingung wird annähernd erfüllt, wenn die Senkungen in der Mitte und an den Enden der Schwelle gleich sind. Ist die Länge der Schwellen unzureichend, so wird die Senkung an den Enden größer, was eine Spurerweiterung verursachen muß. Sind dagegen die Schwellen zu lang, so wird entgegengesetzt Spurverengung eintreten.

Nach den Erörterungen Zimmermann's ist diejenige Länge der Schwelle, welche gleiche Senkung in der Mitte und an den Enden giebt, nur in sehr beschränkten Grenzen von der Beschaffenheit der Bettung und der Schwellengestalt abhängig, und beträgt etwa 2,70^m. Jedoch beweisen die angeführten

Ergebnisse, daß wenn auch eine Länge der Schwelle von 2,44^m unbedingt unzureichend ist, doch bei 2,70^m Länge die Senkung an den Schwellenköpfen etwas kleiner wird als in der Mitte, woraus gefolgert werden kann, daß diese Länge bereits etwas zu groß ist.

Uebrigens ist die genannte Verschiedenheit der Senkung in der Mitte und an den Enden der 2,70^m langen Schwelle unbedeutend und ist vielleicht durch nicht genügend gleichmäßige Unterstopfung der Schwelle über ihre Länge verursacht. Ist die Mitte der Schwelle stärker gestopft, als die übrigen Theile, so kann die sichere Lage der Schwelle beeinträchtigt werden. Indem man dem vorzubeugen sich bestrebt, kann man leicht in den entgegengesetzten Fehler verfallen und die Schwellenmitte zu schwach stopfen.

4. Die Senkung der Schwellen unter den Schienen.

Außer den oben beschriebenen, behufs Ermittlung der Ziffer der Schwellenunterlage und der Einbiegung der Schwellen durchgeführten Beobachtungen über die Senkung der beiden mittleren Schwellen in verschiedenen Punkten, wurden auch an sämtlichen Oberbauten Beobachtungen zur Ermittlung der Senkungen unmittelbar unter den Schienen aller Schwellen eines Schienepaares und der Senkungen der Schiene selbst über den Schwellen angestellt (Abb. 28 bis 30, Taf. XXXIX und Abb. 31 und 32, Taf. XI). Zu diesem Ende befestigte man einen Kugelspiegel an einer in die Schwelle eingedrehten Schraube und einen andern am Schienenkopfe. In Zusammenstellung II sind die für jede Schwelle jeder der vier Oberbauarten ermittelten, durchschnittlichen Werthe der Senkung gesondert für Lokomotive und Tender vorgeführt.

Zusammenstellung II.

Nr. der Schwelle	Senkung der Schwelle in mm für 1 t Raddruck											
	unter der Lokomotive, für die Oberbauarten						unter dem Tender*) für die Oberbauarten					
	I	II	III	IV	IV a	V	I	II	III	IV	IV a	V
1	0,30	0,20	0,23	0,22	0,30	0,25	0,43	0,29	0,29	0,27	—	0,28
2	0,46	0,18	0,20	0,21	0,26	0,28	—	0,24	0,28	0,29	0,35	0,38
3	0,49	0,19	0,16	0,20	0,32	0,33	0,71	0,33	0,20	0,24	0,39	0,43
4	0,52	0,33	0,21	0,27	0,29	0,41	0,80	0,44	0,27	0,36	0,47	0,67
5	0,54	0,35	0,25	0,32	0,35	0,45	0,93	0,56	0,36	0,44	0,43	0,72
6	0,45	0,46	0,25	0,22	0,27	0,45	0,64	0,80	0,40	0,31	0,28	0,56
7	0,50	0,20	0,22	0,25	0,44	0,44	0,72	0,24	0,27	0,29	0,73	0,68
8	0,48	0,27	0,27	0,22	0,42	0,40	0,57	0,32	—	0,29	0,68	0,64
9	—	0,37	0,26	0,29	0,32	0,43	—	—	—	0,36	0,49	0,72
10	—	0,35	0,24	0,24	0,31	0,37	—	0,49	0,31	0,28	0,41	0,61
11	—	0,39	0,22	0,24	0,29	0,32	—	0,73	0,24	0,29	0,33	0,52
12	—	0,32	0,32	0,23	0,34	0,38	—	0,41	0,41	0,53	0,55	0,49
13	—	0,25	0,26	0,25	0,36	0,43	—	0,37	0,35	0,21	0,49	0,61
14	—	0,26	0,22	0,20	0,32	—	—	0,73	0,27	0,27	0,44	—
15	—	—	0,22	0,23	0,23	—	—	—	0,24	0,29	0,32	—
16	—	0,19	0,19	0,20	0,24	—	—	0,21	0,23	0,31	0,33	—
Durchschnittliche Senkung	0,468	0,287	0,232	0,237	0,316	0,384	0,686	0,442	0,294	0,315	0,447	0,562

*) Der Raddruck des Tenders ist gleich $\frac{3}{4}$ des Druckes bei voller Ladung angenommen.

Die Berechnung wurde in folgender Weise ausgeführt: Für jede Beobachtung wurde aus der Schaulinie die Größe der Senkung unter allen Rädern der Lokomotive und des Tenders ermittelt und die Summe dieser Größen durch das halbe Betriebsgewicht der Lokomotive beziehungsweise des Tenders geteilt. In dieser Weise wurde der beeinträchtigende Einfluss einer zufälligen Ueberlastung einzelner Räder auf die Ergebnisse der Berechnung möglichst ausgeschieden.

Die auf der Beobachtungsstrecke verkehrenden Lokomotiven waren meistens dreiachsige, mit einer Achsenbelastung von 13 t. Nur in den schnellfahrenden Zügen verkehrten vier- und fünfachsige Lokomotiven mit Drehgestell und mit einer Belastung der Triebachsen bis 15 t (Abb. 33, Taf. XL und 70, Taf. XLIV). Die Beobachtungen wurden bei Geschwindigkeiten von 8 bis 70 km/St. ausgeführt. Die mittlere war 43 km/St.. Dessen ungeachtet bemerkte man in den auf 1 t Radlast bezogenen Senkungen der Schwellen keine Unterschiede, welche ausschließlich auf die Verschiedenheit der Geschwindigkeit der Züge zurückzuführen wären. Allerdings schwanken die Größen der Schwellensenkung für jede Oberbauart in ziemlich weiten Grenzen, was jedoch der Ungleichmäßigkeit der Unterstopfung, Krümmung der Schiene in lothrechttem Sinne und der zufälligen Ueberlastung einzelner Räder, deren Einfluss auf die Durchschnittsergebnisse durch die oben erklärte Berechnungsweise nicht ganz beseitigt werden konnte, zuzuschreiben wäre. Die Bewegungen schwankten für hohe und geringe Geschwindigkeiten zwischen denselben Grenzen.

Dieser Umstand beweist, dass die dynamische Wirkung der Lasten in den oben bezeichneten Grenzen der Geschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf die Senkung der Schwellen, also auch der Schiene über den Schwellen hat. Deshalb sind in Zusammenstellung II die Ergebnisse sämtlicher Beobachtungen ohne Rücksicht auf die Geschwindigkeit zusammengestellt, bloß die Senkungen unter der Lokomotive sind gesondert von den Senkungen unter dem Tender aufgeführt. Die Formänderungen unter dem Tender werden später wegen ihrer eigenthümlichen Kennzeichen besonders erörtert werden.

Vergleicht man die Größe der Senkung der Schwellen unter der Lokomotive für die vier Oberbauarten mit einander, so erkennt man, dass sich die Senkung durch den Uebergang von der Anordnung I zu II, d. h. nach Einführung der stärkeren Schienen um 39 % verminderte; dass sich die Senkung nach dem Ersetzen der kürzeren Schwellen in II durch die längere in III noch um weitere 11 % verkleinerte und dass endlich nach dem Ersetzen der Anordnung III durch die Anordnung IV, wobei infolge Aneinanderrückens der Stofsschwellen der Mittenabstand der übrigen Schwellen größer wird, die Senkung um 1 % wächst.

In Zusammenstellung III sind die Ergebnisse der Beobachtungen mit den berechneten Schwellensenkungen verglichen, welche nach Zimmermann mit $C = 5$ für Grubenkies und $C = 4$ für Schotter, der Elasticitätszahl $E = 2000$ t/qcm für Stahl und $E = 120$ t/qcm für Holz ermittelt sind.

Aus Zusammenstellung III ist ersichtlich, dass die beobachteten Senkungen der Schwellen für die leichteren Schienen um 17 % größer und für die schwereren um 22—33 % kleiner

sind, als die berechneten. Somit ist der Einfluss der Schienenverstärkung auf die Steifigkeit des Oberbaues nach den Beobachtungen bedeutend größer als nach der Theorie. So z. B. sollte der Uebergang von 31,45 kg/m schweren und 6 m langen zu 38 kg/m schweren und 12 m langen Schienen der Theorie nach eine Vermehrung der Steifigkeit des Gleises bloß um 8,5 % bewirken, in Wirklichkeit wächst die Steifigkeit aber um 39 %. Die Vergrößerung der Steifigkeit, welche durch Ersetzen der 2,44 m langen Schwellen durch 2,70 m lange bei gleichen Schienen erzielt wird, beträgt der Theorie nach bloß 5 1/2 % in der Wirklichkeit aber 11 %. Bei gleichzeitiger Anwendung beider Verbesserungen steigt die Steifigkeit der Theorie nach bloß um 14 %, in der Wirklichkeit um 50 %.

Zusammenstellung III.

		Durchschnittliche Schwellensenkung für die Oberbauarten:					
		I	II	III	IV	IV a	V
Nach den Beobachtungen	in mm/t unter der Lokomotive . . .	0,468	0,287	0,232	0,237	0,316	0,384
	in %	100	61	50	51	68	82
Nach Zimmermann	in mm/t unter der Lokomotive . . .	0,401	0,367	0,345	0,362	0,429	0,430
	in %	100	91,5	86	90	107	107

Die erheblichen Abweichungen der theoretischen Ermittlungen von den Ergebnissen der Beobachtung können theilweise durch den Umstand erklärt werden, dass in den Erörterungen Zimmermann's zwar sämtliche wichtigeren Ursachen, welche Einfluss auf die Arbeit des Oberbaues haben, berücksichtigt wurden, dennoch aber bei der Ermittlung des von der Schiene auf die Schwellen übertragenen Druckes manche ungenügend begründete Annahmen gemacht werden mußten. Diesen Druck ermittelt Zimmermann für denjenigen der beiden folgenden Belastungsfälle, welcher das größere Ergebnis liefert:

1. Die Schiene ruht auf unendlich vielen nachgiebigen, gleich weit von einander entfernten Stützen und wird von Einzellasten über jeder zweiten Stütze beansprucht.
2. Die Schiene ruht auf drei nachgiebigen, gleich weit von einander entfernten Stützen und wird von einer Einzelast über der Mittelstütze beansprucht.

In Wirklichkeit wirkt aber eine Reihe von Lasten, der bei Berücksichtigung des Eigengewichtes der Schiene Stützdrücke entsprechen, deren Größe von den für die oben genannten beiden Belastungsfälle ermittelten Werthen bedeutend abweichen können. Eine andere Erklärung der genannten Abweichung der theoretischen Ermittlungen von den Ergebnissen der Beobachtungen wird später bei der Feststellung der Bettungsziffer und des wirklichen Schienendruckes gegeben werden.

5. Die berichtigte Ziffer der Schwellenunterlage.

Die Schwellenunterlage-Ziffer wurde oben auf Grund der Schaulinie der Senkung einer von den nicht am Stosse liegenden Schwellen, aber nicht immer derselben, ermittelt, wobei in den betreffenden Schaulinien die Lage der übrigen Schwellen angegeben wurde unter der Voraussetzung, dass die Senkung aller dieser Schwellen annähernd gleich sei. Diese Annahme, welche, soviel mir bekannt ist, bis jetzt von allen Beobachtern für zulässig erachtet wurde, ist aber unbegründet. In Folge der ungleichen Unterstopfung der Schwellen, sind die Unterschiede der Schwellensenkung ziemlich bedeutend, wovon man sich überzeugen kann, wenn man in den Zusammenstellungen die mittleren Werthe der größten Senkung einer jeden dieser Schwellen nachsieht. Für Schwelle 9 beträgt nach der Schaulinie Abb. 24, Taf. XXXVIII der mittlere Werth der größten Senkung in der Nähe der Schiene $0,35 \text{ mm}$, während nach Zusammenstellung II, in welcher die Senkungen der Schwellen für die Oberbauart II angegeben sind, die bei der über der Schaulinie dargestellten Stellung der Lokomotive an der Einbiegung theilnehmenden Schwellen 4 bis 14 eine mittlere Senkung von nur $0,32 \text{ mm/t}$ zeigten. Hieraus ist ersichtlich, dass die Schwellenunterlage-Ziffer auf Grund der Senkungsgröße einer sich vergleichsweise stark senkenden Schwelle ermittelt war und dass sie demzufolge bei der für zulässig anerkannten Verallgemeinerung des Verfahrens zu klein ausfiel.

Ein ähnlich wirkender Umstand dient zur Erklärung der bedeutenden Schwankungen der Werthe der Schwellenunterlage-Ziffer, welche Häntzschel auf Grund einiger Beobachtungen auf einem und demselben Beobachtungsgleise ermittelte*).

In dem vorliegenden Falle kann man die Ungenauigkeit beseitigen, indem man den nach der Schaulinie (Abb. 24, Taf. XXXVIII) erhaltenen Werth 4,2 in entsprechendem Verhältnisse auf

$$C' = 4,2 \cdot \frac{0,35}{0,32} = 4,6$$

vergrößert.

Ebenso muss die nach Schaulinie (Abb. 25, Taf. XXXVIII) erhaltene Ziffer 5,5 ersetzt werden durch:

$$C' = 5,5 \cdot \frac{0,28}{0,25} = 6,2.$$

Bei dieser Berichtigung ist vorausgesetzt, dass der Anfang und das Ende der Senkung einer jeden von den unter dem mittlern Theile der Schiene liegenden Schwellen einer und derselben Stellung der Lokomotive in Bezug auf die beobachtete Schwelle entspricht und dass die allgemeine Form der Einbiegung jeder dieser Schwellen gleich ist. Die Berichtigung ist somit gleichbedeutend mit einer im Verhältnisse zur wirklichen durchschnittlichen Schwellensenkung durchgeführten Vergrößerung oder Verkleinerung aller Ordinaten derjenigen Schaulinie, aus welcher die Schwellenunterlage-Ziffer ermittelt wurde.

Selbstverständlich ist diese Berichtigung nur bei der weitem Annahme zutreffend, dass die Unterstopfung während der Dauer der für die betreffende Ermittlung verworthenen Beobachtungen unverändert bleibt. Das trifft im vorliegenden Falle zu, da die

Schwellen während der Beobachtungen jeder der Oberbauarten gar nicht nachgestopft wurden.

Wenn man die Berichtigung an allen Beobachtungsergebnissen anbringt, welche zur Ermittlung der Schwellenunterlage-Ziffer benutzt sind, so erhält man:

für die Oberbauart	II: $C' = 4,4$ bis $5,2$ im Mittel	4,7
< < <	III: $C' = 5,8$ < $6,4$ < <	6,1
< < <	IVa: $C' = 4,6$ < $5,1$ < <	4,8
< < <	V: $C' = 3,3$ < $3,5$ < <	3,4

Auf Grund dieser Erwägungen, welche im Allgemeinen eine Bestätigung der in Zusammenstellung II vorgeführten Beobachtungsergebnisse bilden und aus welchen zu schliessen ist, dass die Ersetzung des Grubenkieses durch Granitschotter keinen günstigen Einfluss auf die Steifigkeit des Gleises ausübte, gelangt man gleichzeitig zu der Schlussfolgerung, dass die Schwellenunterlage-Ziffer von der Länge der Schwellen und vom Schienenquerschnitte abhängt. Bei gleicher Bettung, gleichem Schienenquerschnitte u. s. w. erlangt diese Ziffer den größten Werth für Oberbau III mit $2,70 \text{ m}$ langen Schwellen. Anderseits ist die Ziffer bei gleicher Bettung und gleicher Länge der Schwellen für den Oberbau IVa größer, als für V, d. h. sie ist größer für diejenige Oberbauart, in welcher die Schienen stärker sind. Wegen der geringen Anzahl der Beobachtungen kann zwar diese Abhängigkeit nicht genügend genau aufgeklärt werden, immerhin sind aber die Unterschiede in der durchschnittlichen Senkung bei gleichem Drucke auf die Flächeneinheit je nach der Größe und der Form der Druckfläche ganz verständlich und werden bestätigt durch die Ergebnisse der Beobachtungen von Häntzschel und Engesser.

6. Bettungsziffer.

Bei der Beurtheilung des Einflusses, welchen die Ersetzung des Grubenkieses durch Schotter auf die Steifigkeit des Gleises ausübt, können aus den soeben angeführten Gründen nur diejenigen Werthe der Schwellenunterlage-Ziffer mit einander verglichen werden, welche für gleiche Schwellenlänge und gleichen Schienenquerschnitt ermittelt wird, also nur die Werthe: für Oberbau III mit Grubenkiesbettung $C' = 6,1$ und für Oberbau IVa mit Schotterbettung $C' = 4,8$.

Aber auch dieses wäre unrichtig, da sich bei den Beobachtungen über die Nachgiebigkeit des Bodens, deren Ergebnisse oben bereits angeführt sind, zeigte, dass diese einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Größe der Schwellenunterlage-Ziffer ausübt. Soll dieser Einfluss ausgeschieden und soll die Steifigkeit der Oberbauarten III und IVa bezüglich des ausschließlichen Einflusses der Bettungsbeschaffenheit verglichen werden, so ist es nothwendig, für diese Oberbauarten den Werth der Schwellenunterlage-Ziffer unter Annahme eines völlig unnachgiebigen Unterbaues zu ermitteln; der in dieser Weise erhaltene Werth ist dann die wirkliche Bettungsziffer.

Zu diesem Zwecke kann die Schaulinie der Nachgiebigkeit des Dammes in einer Tiefe von $0,5 \text{ m}$ unter Bettungsoberfläche, also etwa für die Bettungsohle im neuen Querprofile des Bahnkörpers der Warschau-Wiener Eisenbahn verworthen werden.

*) Organ 1889, S. 141, 194 und 227.

Auf Grund der Beobachtungen von Schubert*) kann angenommen werden, daß sich in dieser Tiefe der von der Schwelle übertragene Druck annähernd gleichmäßig vertheilt und zwar auf eine Breite, welche nicht kleiner ist als der Mittenabstand der Schwellen, welcher im beobachteten Gleise 75 bis 85 cm betrug. Hieraus erhellt, daß, obwohl die Brunnengruben, in welche die zur Messung der Nachgiebigkeit in verschiedenen Tiefen dienenden Stangen eingelassen waren, nur dicht bei der Schiene und zwischen den Schwellenköpfen hergestellt wurden, dennoch angenommen werden darf, daß die Nachgiebigkeit des Bodens in derselben Tiefe unter der Schwelle ebenso groß ist, wie die zwischen den Schwellen gemessene.

Die Vertheilung des Druckes in derselben Tiefe in der Längsrichtung der Schwelle ist nicht bekannt, doch kann mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß diese Vertheilung des Druckes den Aenderungen der Senkung der verschiedenen Punkte der Schwelle folgt.

Somit kann die Schaulinie derjenigen Senkung der Schwelle unter der Schiene, welche eine Folge ausschließlich der Zusammendrückbarkeit der Bettung ist, leicht ermittelt werden, indem man in die Schaulinie der Senkung der Schwelle in diesem Punkte diejenige der Senkung des Unterbaues in der Tiefe der Bettungssohle einträgt; der Unterschied der Ordinaten stellt dann die Ordinaten der gesuchten Schaulinie dar. Die Ordinaten der Schaulinien der Senkung der Schwelle in der Mitte und am Ende sollen nach demselben Verhältnisse geändert werden.

Das Verfahren kann man vereinfachen, indem man sich damit begnügt, die Ordinaten der Schaulinie der Schwellensenkung in dem Verhältnisse zu verkürzen, in welchem die größten durchschnittlichen Senkungen der Schwelle unter den Lokomotivachsen verkleinert werden. Die größte Senkung der Dammerde in der Tiefe von 0,5 m unter Bettungsfläche hat für Oberbau I bei Grubenkiesbettung 0,15 mm/t betragen. Da aber die durchschnittliche größte Senkung der Schwellen derselben Art mit 0,47 mm/t ermittelt wurde, so wird das Verhältnis dieser Senkung der Zusammendrückbarkeit der Bettung ausgedrückt durch:

$$\frac{0,47}{0,15} = 1,47.$$

Bei Oberbau III war die Bettung dieselbe wie bei Oberbau I. Man kann deshalb annehmen, daß das obige Verhältnis für diese beiden Oberbauten gültig ist. Berücksichtigt man den für Oberbau III bereits ermittelten Werth der Schwellenunterlage-Ziffer $C' = 6,1$, so erhält man die Bettungsziffer für Grubenkies:

$$K = 6,1 \cdot 1,47 = 9,0.$$

*) Schubert: Planum, Bettung und Schwellenform des Eisenbahngleises. Organ 1897, S. 116 und 133. Bei diesen Beobachtungen wurde festgestellt, daß die Oberfläche der 95 cm breiten Thonlage bei einer Bettung, welche aus einer untern, 5 cm dicken Sandlage und einer obern, 80 cm unter Schwellensole dicken Schotterlage bestand und auf einer Lage von weichem Thone aufgeschüttet war, nach mehrfach hunderttausendmaliger Belastung der Schwelle mit 4 kg auf ein Quadratcentimeter der Schwellensole wagerecht blieb, während bei geringerer Dicke der Bettung ein Eindringen der Bettung in die Thonlage beobachtet wurde.

Für Schotterbettung in Oberbau V war die Nachgiebigkeit des Bodens unter der Bettungssole mit 0,10 mm/t ermittelt. Da aber die durchschnittliche größte Senkung der Schwellen derselben Art 0,38 mm betragen hat, so ist das Verhältnis dieser Senkung zur Zusammendrückbarkeit der Bettung:

$$\frac{0,38}{0,38 - 0,10} = 1,36.$$

Bei Oberbau IVa war die Bettung dieselbe wie bei I. Da aber für IVa die Schwellenunterlage-Ziffer mit $C' = 4,8$ ermittelt wurde, so ist die Ziffer der Schotterbettung:

$$K = 4,8 \cdot 1,36 = 6,5.$$

Somit beträgt der Widerstand der Schotterbettung gegen das Eindringen der Schwelle bloß $\frac{6,5}{9} = 72\%$ der entsprechenden Widerstandsgröße einer Bettung, welche aus Grubensand mit Beimengung von Kies besteht. Diese Eigenschaft konnten die früheren Beobachter nicht feststellen, weil die Beobachtungen an verschiedenen Orten, also bei nicht gleichem Unterbaue, dessen Nachgiebigkeit übrigens auch nicht ermittelt wurde, angestellt waren und weil bei der Ermittlung der Schwellenunterlage-Ziffer die Senkung nur einer Querschelle oder nur eines bestimmten Punktes der Langschwellen berücksichtigt wurde. So sind z. B. bei den von Häntzschel angestellten Beobachtungen über verschiedene Oberbauarten mit Querschwellen folgende durchschnittliche Werthe der Schwellenunterlage-Ziffer ermittelt:

für alte Bettung aus gewöhnlichem Kiese
auf festem Thonboden $C = 4,4$

für alte Schotterbettung auf ebensolchem
Boden $C = 5,3$

Dagegen hat derselbe Beobachter bei Oberbauarten mit Langschwellen erhalten:

für alte Kiesbettung auf festem Thonboden $C = 5,0$

für alte Schotterbettung auf ebensolchem
Boden $C = 4,6.$

Die letztgenannten Werthe bilden im gewissen Grade eine Bestätigung der auf der Warschau-Wiener Eisenbahn gewonnenen Ergebnisse. Indessen muß bemerkt werden, daß der auf Grund der Beobachtungen über die Senkung der Querschwellen festgestellte Werth der Schwellen-Unterlage-Ziffer größer für Schotter ist, als für Kies, dagegen die Beobachtungen über die Senkung der Langschwellen zu entgegengesetztem Ergebnisse führten, und daß die Ursache dieser Verschiedenheit in der unbestimmten und unzulänglichen Bezeichnung des Bodens als »festen Thonbodens«, dessen Nachgiebigkeit nicht ermittelt wurde, zu suchen ist.

Uebrigens befinden sich unter den Beobachtungen Häntzschel's auch manche, welche einige Schlußfolgerungen über die Nachgiebigkeit des Bodens ermöglichen. Hierher gehören die Beobachtungen über die Senkung der Querschwellen bei Anwendung frischer Kiesbettung, welche aufgeschüttet war: 1) auf leichtem Mutterboden, über welchen noch keine Züge gefahren waren; 2) auf festem, natürlichem Boden, welcher sich unter der Last der Züge bereits verdichtet hatte; 3) auf Felsen. Für diese drei Fälle wurden folgende Bettungsziffern ermittelt: $C = 2$, $C = 2,7$, $C = 4$. Somit betrug die Senkung des Bodens

50 bis 33% der allgemeinen Senkung der Schwelle. Leider waren diese Beobachtungen nur für eine Gattung der Bettung und bei ungleicher Bettungsdicke von 23 bis 53 cm angestellt. Dennoch kann festgestellt werden, daß im Falle 2 das Verhältnis der Zusammendrückbarkeit des Bodens zu der allgemeinen Senkung der Schwellen annähernd mit den auf der Warschau-Wiener Eisenbahn ermittelten Werthen für die Oberbauten I: 0,32 mm/t und V: 0,26 mm/t übereinstimmt.

Indem wir die Ergebnisse der obigen Erörterungen zusammenfassen und außerdem annehmen, daß bei gleicher Beschaffenheit und Dicke der Bettung und bei gleichem Unterbaue das Verhältnis der Senkung des Bodens unter Bettungsohle zur Senkung der Schwelle für verschiedene Oberbauarten gleich ist, erhalten wir für diejenigen Oberbauarten, für welche vorher die Schwellen-Unterlage-Ziffer ermittelt ist, die in Zusammenstellung IV angegebenen Werthe der Bettungsziffer.

Tabelle IV.

Oberbau	Gattung der Bettung	Berichtigte Schwellen-Unterlageziffer C'	Senkung der Schwellen in mm/t	Verhältnis der Senkung des Bodens unter der Bettungsohle zur Senkung der Schwellen	Bettungsziffer K
II	Grobkörniger Gruben-Sand mit Kiesbeimengung	4,7	0,287	0,32	6,9
III		6,1	0,232	0,32	9,0
IVa	Granitschotter	4,8	0,316	0,26	6,5
V		3,4	0,384	0,26	4,6

Somit ist die Bettungsziffer von der Beschaffenheit der Bettung und von der Oberbauart abhängig und schwankt für grobkörnigen Sand mit Kies in den Grenzen von 6,9 bis 9,0 und für Granitschotter in den Grenzen von 4,6 bis 6,5.

Auf Grund der Beobachtungen von Häntzschel war die Bettungsziffer für frische Kiesbettung auf Felsen mit $c=4$ ermittelt, aber aus einer andern Reihe von Beobachtungen, welche über alte Bettung angestellt sind, hat Häntzschel für Kies auf Felsen $C=7,3$ und für Kies auf Packlage $C=9$ erhalten.

Hieraus folgt, daß man, obwohl sich die Beobachtungsergebnisse von Häntzschel und diejenigen der Warschau-Wiener Eisenbahn auf ganz verschiedene Oberbauarten beziehen, wobei die oben angeführten Werthe von Häntzschel sogar für Gleise mit Langschwellen ermittelt wurden, und obwohl eine Vergleichung der Beschaffenheit der Bettung in diesen beiden Fällen nicht durchführbar ist, doch unter Berücksichtigung der weiten Grenzen, zwischen welchen die aus den Beobachtungsergebnissen abgeleiteten Werthe der Bettungsziffer meistens schwanken, annehmen kann, daß die Endergebnisse der Beobachtungen Häntzschel's mit den Endergebnissen der Beobachtungen, welche auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angestellt sind, genügend genau übereinstimmen.

Der auf Grund der Beobachtungen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn ermittelte Werth der Bettungsziffer für Grubensand mit Kies $K=9$, findet eine Bestätigung auch in den Er-

gebnissen der Beobachtungen, welche Ingenieur Stecewicz auf der Tambow-Saratower Eisenbahn und auf der Baltischen Bahn anstellte. Ingenieur Stecewicz hat nämlich folgende Werthe der Schwellen-Unterlageziffer erhalten: auf der Tambow-Saratower Eisenbahn von 3,5 bei Nullpunkten auf nachgiebigem Boden, bis 5 bei Einschnitten in festem Thonboden und auf der Baltischen Bahn: 9 im Einschnitte bei sehr festem Thonboden. Ingenieur Stecewicz behauptet jedoch, daß sich bei den Beobachtungen auf der Baltischen Bahn manche Schwellen fast gar nicht senkten; er glaubt deshalb die Möglichkeit einer Vergrößerung der Schwellen-Unterlage-Ziffer bis $C=45$ annehmen zu dürfen.

Die auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angestellten Beobachtungen berechtigen nicht zur Annahme der Wahrscheinlichkeit einer so hohen Schwellen-Unterlage-Ziffer. Auf Grund dieser Beobachtungen, welche sich auf zwei so grundverschiedene Bettungsarten, wie Grubensand mit Kies und Granitschotter bezogen haben, könnte man vielmehr zu der Ueberzeugung gelangen, daß die Werthe der Bettungsziffer für sämtliche Uebergangsstufen zwischen den beiden Bettungsarten zwischen den für die beiden festgestellten Grenzen, also zwischen $K=6,5$ für Schotter und $K=9$ für Sand mit Kies liegen müssen.

Die Schwellen-Unterlage-Ziffer muß selbstverständlich kleiner sein, als diese Werthe, und zwar wird die Größe dieses Unterschiedes unmittelbar von der Nachgiebigkeit des Unterbaues des Gleises, mittelbar aber auch selbstverständlich von der Vertheilung des von der Bettung auf den Unterbau übertragenen Druckes abhängig sein.

Eine Veränderung der Eigenschaften des unterstützenden Erdkörpers kann durch gehörige Trockenlegung erreicht werden, die bekanntlich eine wesentliche Rückwirkung auf den Zustand des Gleises ausübt.

Eine gleichmäßige Vertheilung des Druckes der Bettung auf den Erdkörper soll durch gehörige Dicke der Bettung erreicht werden. Aus den neuerdings ausgeführten Versuchen*) folgt, daß bei dem üblichen Schwellenabstände die Dicke der Bettung mindestens 35 cm unter Schwellensohle betragen soll.

Eine weitere Vergrößerung der Schwellen-Unterlage-Ziffer mittels Verbesserung der Eigenschaften der Bettung dürfte nur in verhältnismäßig geringem Maße erreichbar sein in Anbetracht des Umstandes, daß die Ziffer bei ganz gleicher Bettung je nach der Beschaffenheit des Unterbaues in den Grenzen von 3 bis 9 veränderlich ist, während die Werthe der Bettungsziffer sich für Schotter und Kies nur in den Grenzen von 6,5 bis 9 bewegen.

Es fragt sich, ob man etwa auf Grund der auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angestellten Beobachtungen zu der Schlusfolgerung gelangen kann, daß Sandbettung besser sei, als Schotterbettung, oder daß im Allgemeinen Verbesserung der Bettung als überflüssig zu betrachten sei. Das ist nicht der Fall. Denn bei den mannigfaltigen Aufgaben, welche die Bettung zu erfüllen hat, ist diejenige Bettung als die beste anzuerkennen, welche die meisten der zu fordernden Eigenschaften aufweist.

Die auf der Warschau-Wiener Eisenbahn vorgenommenen

*) Schubert, Organ 1897, S. 116 u. 133.

Beobachtungen hatten lediglich den Zweck, die elastischen Formänderungen des Oberbaues zu ermitteln, und deshalb wurden diese Beobachtungen unter Verhältnissen ausgeführt, bei welchen die bleibenden, durch die Senkung der Bettung verursachten Formänderungen den Genauigkeitsgrad der Messungen nicht überstiegen, oder einfacher gesagt, bei welchen diese bleibenden Formänderungen in den Schaulinien nicht sichtbar wurden.

Viel wichtiger für die sichere Lage des Oberbaues, als der geringe Unterschied der Elasticität der Bettung, ist aber der Widerstand der Bettung gegen bleibende Formänderungen, welcher von der gegenseitigen Unbeweglichkeit der Bestandtheile und ihrem Anhaften an der Schwelle, ferner von der Dauerhaftigkeit der Bettung, d. h. von ihrem Widerstande gegen Abnutzung und Verwitterung, und von der Wasserundurchlässigkeit der Bettung abhängig ist.

Dafs Granitschotter diese Eigenschaften in höherm Mafse besitzt, als Grubensand mit Kies, kann nicht bezweifelt werden. Dies wurde bewiesen nicht nur durch die Beobachtungen von Schubert, Bräuning u. A., sondern auch durch mehrjährige Erfahrungen vieler Eisenbahnen und wurde auch auf der Warschau-Wiener Bahn, wenn auch nur für einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum, festgestellt. Die Ersetzung der gewöhnlichen Bettung auf der Beobachtungstrecke durch Schotter und die Ausrichtung des Gleises war am 14. Juni 1898 beendet. Von da an bis zur Beendigung der Beobachtungen über die Oberbauart IVa am 20. August und ebenfalls im Zeitraume von der Beendigung der Legung des Oberbaues V am 25. September bis Ende November 1898 waren auf der Beobachtungstrecke keine Arbeiten zum Zwecke der Unterstopfung der Schwellen, des Ausrichtens des Gleises u. dergl. vorgenommen, da bei den oft ausgeführten Messungen keine Aenderungen in der Gleichmäßigkeit der Unterstopfung, in der Spurweite und in der Höhenlage der Stränge festgestellt wurden. Bei Anwendung von gewöhnlicher Grubenbettung während der Beobachtungen im Jahre 1897, wurde dagegen oft, sogar nach nicht ganz einem Monate, das wiederholte Nachstopfen mancher Schwellen, insbesondere der Stofschwelen, nothwendig.

Die Ergebnisse der Beobachtungen, welche wider Erwarten zur Ermittlung einer größern Nachgiebigkeit der Schotterbettung führten, beweisen also lediglich, dafs die allgemein anerkannten Vorzüge der Schotterbettung anderen, vorerwähnten Eigenschaften dieses Bettungstoffes zuzuschreiben sind.

7. Nachgiebigkeits-Ziffer des Unterbaues.

Die oben angeführten Endergebnisse der Beobachtungen und die auf sie gestützten Erwägungen ermöglichen eine Beurtheilung des Einflusses der Bettung auf die Gröfse der Senkung des Gleises.

Die soeben ermittelten Ziffern für zwei Bettungsarten bilden ein Mafs der Zusammendrückbarkeit der Bettung unter dem Schwellendrucke, unabhängig von dem Einflusse der Beschaffenheit des Unterbaues.

Es wäre erwünscht, ebenso ein von der Bettung unabhängiges Mafs für die Senkung des Bahnkörpers festzustellen. Zu diesem Ende wollen wir die Bettung als eine zwar schüttbare, aber unzusammendrückbare Schicht betrachten. Wird

vorausgesetzt, dafs die elastische Senkung des Bahnunterbaues bei elastischer und nicht elastischer Bettung gleich ist, und wird das Verhältnis des Bettungsdruckes auf die Flächeneinheit des Bahnkörpers in kg/qcm zur Senkunggröfse der letzteren in cm als Ziffer des Bahnkörpers bezeichnet, so kann man auf Grund der Schaulinie der Senkung eines bestimmten Unterbaues unter der Bettungsohle leicht die Ziffer des Unterbaues ermitteln.

Bei der Ermittlung der Unterbau-Ziffer kann dasselbe Verfahren angewendet werden, wie bei der Ermittlung der Schwellen-Unterlage-Ziffer, nur mufs bei der Feststellung des mittlern Druckes für eine bestimmte Belastung nicht die Summe der Sohlenflächen sämtlicher Schwellen, auf welche die Last übertragen wird, sondern die Gröfse der Unterfläche des bezüglichlichen Theiles der Bettung eingeführt werden. Diese letztere Gröfse kann mit genügender Genauigkeit berechnet werden, indem man die Summe der Sohlenflächen sämtlicher durch die Belastung beanspruchter Schwellen mit dem Verhältnisse des Mittenabstandes der Schwellen a zur Sohlenbreite der Schwellen b multiplicirt.

Die Unterbau-Ziffer N kann aber noch viel einfacher aus der bereits bekannten Schwellen-Unterlage-Ziffer C' und der Bettungsziffer K abgeleitet werden.

Bezeichnet man nämlich $\frac{a}{b}$ mit n , so kann die Abhängigkeit der drei Ziffern durch

$$\text{Gl. 4). } \frac{1}{C'} = \frac{1}{K} + \frac{1}{nN}$$

ausgedrückt werden, also ist:

$$\text{Gl. 5). } N = \frac{K \cdot C'}{n(K - C')}$$

In Zusammenstellung V sind die auf Grund der aus den vorher ermittelten Ziffern der Schwellen-Unterlage und der Bettung abgeleiteten Werthe der Unterbau-Ziffer zusammengestellt.

Tabelle V.

Oberbau	Mittenabstand der Schwellen a	Sohlenbreite der Schwellen b	$n = \frac{a}{b}$	Ziffern:		
				der Schwellenunterlage C'	der Bettung K	des Unterbaues N
II	80	25	3,2	4,7	6,9	4,6
III	80	25	3,2	6,1	9,0	5,9
IVa	85	25	3,4	4,8	6,5	5,4
V	75	25	3,0	3,4	4,6	4,4

Daraus folgt, dafs, wenn auch die Ziffern der Schwellen-Unterlage und der Bettung für verschiedene Oberbauarten sehr verschieden sind, doch die Unterbauziffer für diese Oberbauarten, wie zu erwarten war, nur in sehr engen Grenzen schwankt und näherungsweise gleich 5 angenommen werden kann.

Somit war der Widerstand des Unterbaues gegen Verdrückung bei gleichem Drucke auf die Flächeneinheit auf der Beobachtungstrecke der Warschau-Wiener Eisenbahn nur unerheblich kleiner, als der Widerstand einer 53 cm starken Schotterlage.

8. Der Druck der Schiene auf die Schwelle.

Die festgestellten Schwellen-Unterlage-Ziffern der durchschnittlichen Senkung der Schwellen und der Einbiegung der letzteren ermöglichen die Ermittlung des durchschnittlichen größten Druckes der Schiene auf die Schwelle für jede der beobachteten Oberbauarten, und zwar ohne Zuhilfenahme theoretischer Erwägungen. Beispielsweise verhalten sich für die Oberbauart IVa die Schwellensenkungen in der Schwellenmitte, an der Schiene und am Schwellenkopfe wie:

$$y_o : y_r : y_l = 74 : 100 : 64,$$

und demzufolge kann das Verhältnis der durchschnittlichen Schwellensenkung y_m zur Senkung an der Schiene y_r (Abb. 23, Taf. XXXVIII) wie folgt ausgedrückt werden:

$$y_m = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{75}{135} \cdot 0,74 + \frac{60}{135} \cdot 0,64 \right) y_r = 0,846 y_r.$$

Die Bettungsziffer für diese Oberbauart war in Zusammenstellung IV als Durchschnittsziffer aus vier Beobachtungen mit $C' = 4,8$ ermittelt. Die halbe Sohlenfläche der Schwelle beträgt $\omega = 135 \cdot 25 = 3375$ qcm.

Derjenige Druck der Schiene auf die Schwelle, welcher eine Senkung der Schwelle um 1 cm veranlassen könnte, müßte daher betragen:

$$\text{Gl. 6) } \dots D = C' \omega \cdot \frac{y_m}{y_r} = 4,8 \cdot 3375 \cdot 0,846 = 13,7 \text{ t.}$$

Da aber die größte Senkung sämtlicher Schwellen an den Schienauflagern bei Oberbau IVa nach den Beobachtungen 0,0316 cm/t für den Raddruck der Lokomotive beträgt, so ist der dieser Einsenkung entsprechende durchschnittlich größte Druck der Schiene auf die Schwelle:

$$\frac{P}{G} = 0,0316 D = 0,43 \text{ t.}$$

In Zusammenstellung VI sind die so ermittelten Werthe des durchschnittlich größten Druckes der Schiene auf die Schwelle für eine Tonne des Raddruckes für alle beobachteten Oberbauarten enthalten.

Zusammenstellung VI.

Oberbau	Verhältnis der Schwellensenkung in der Mitte, an der Schiene und am Ende $y_o : y_r : y_l$	Be-richtigte Schwellen-Unterlage-ziffer C'	Verhält-nis der mittleren Senkung der Schwelle zur Senkung an der Schiene $y_m : y_r$	Durchschnittlich größte Senkung an der Schiene sämtlicher Schwellen eines Schienen-paares cm/t	Schienendruck auf eine Tonne des Raddruckes $\frac{P}{G}$	
					nach den Beobachtungen	nach Gl. (10)
I	(69 : 100 : 124)	(3,3)	(0,951)	0,0468	(0,45)	0,52
II	69 : 100 : 124	4,7	0,951	0,0287	0,39	0,48
III	75 : 100 : 68	6,1	0,855	0,0232	0,41	0,50
IV	(75 : 100 : 68)	(6,1)	(0,855)	0,0237	(0,42)	0,51
IVa	74 : 100 : 64	4,8	0,846	0,0316	0,43	0,50
V	91 : 100 : 78	3,4	0,927	0,0384	0,41	0,49

Für die Oberbauarten I und IV ist die Schwellen-Unterlage-Ziffer nicht ermittelt. Da aber der Unterschied zwischen den Oberbauarten III und IV bloß in einer andern Vertheilung der Schwellen besteht, wobei die Anzahl der Schwellen auf ein Schienenpaar unverändert bleibt, so kann man die Schwellen-Unterlage-Ziffer für die Oberbauarten III und IV gleich annehmen. Bei Oberbau I ist die Bettung und die Schwellenlänge dieselbe wie bei II; diese Oberbauarten unterscheiden sich nur durch den Schienenquerschnitt. In derselben Weise, d. h. ebenfalls nur durch den Schienenquerschnitt, unterscheiden sich auch die Anordnungen V und IVa. Man könnte deshalb die Bettungsziffer für Oberbau I bestimmen mit $4,7 \cdot \frac{3,4}{4,8} = 3,3$. Diese GröÙe und die Schwellenunterlage-Ziffer für Oberbau IV sind aber nicht nachgewiesen, und deshalb sind diese Werthe in Zusammenstellung III eingeklammert.

Es wäre erwünscht, die oben vorgeführten, aus den Beobachtungen abgeleiteten Schlusfolgerungen mit theoretischen für statische Belastung ermittelten Werthen des größten auf die Schwelle wirkenden Druckes zu vergleichen. Die diesbezüglichen bekannten Formeln von Schwedler, Hoffmann u. A. sind aber leider auf ganz willkürliche, mit der wirklichen Vertheilung der Lasten nicht übereinstimmende Annahmen gestützt.

Die Formel von Schwedler:

$$\text{Gl. 7) } \dots \dots \dots \frac{P}{G} = \frac{\gamma + 2}{3\gamma + 2} *$$

ist unter der Voraussetzung abgeleitet, daß auf einen auf drei Stützen ruhenden Balken nur eine, in der Mitte des Balkens angreifende Einzellast wirkt, während die Schiene in Wirklichkeit von einer Reihe von Einzellasten beansprucht wird.

Die Formel von Hoffmann:

$$\text{Gl. 8) } \dots \dots \dots \frac{P}{G} = \frac{4\gamma + 1}{8\gamma + 1}$$

ist unter der Voraussetzung abgeleitet, daß die Einzellasten auf jede zweite Schwelle wirken.

Auf der Beobachtungstrecke der Warschau-Wiener Eisenbahn war dagegen der Mittenabstand der Schwellen bei den Oberbauarten I bis IVa: 80 bis 85 cm und bei V: 75 cm, während der Achsabstand der dreiachsigen Lokomotiven betrug:

für Güterzuglokomotiven 2 m und 1,40 m
und für Personenzuglokomotiven . . . 2,50 m und 2,40 m

Die Lokomotiven dieser beiden Arten hatten annähernd dieselbe Achsbelastung von 6,7 t und wurden nahezu gleich oft, vier- und fünfachsig Lokomotiven nur selten beobachtet. Aus

*) In dieser und in den nachfolgenden Formeln bedeutet:

$\gamma = \frac{B}{D}$, wo $B = \frac{6 E J}{a^3}$ die Last ist, welche in der Mitte eines auf zwei unbeweglichen Stützen frei aufliegenden Schienenstückes bei einer Stützweite, welche dem zweifachen Mittenabstande der Schwellen, also $2a$ gleich ist, eine Durchbiegung von 1 cm bewirkt;

$D =$ die Last, welche im Schienenaufleger auf die Schwellen wirkend eine Senkung der Schwelle unter der Schiene um 1 cm veranlaßt.

den Schaulinien ist ersichtlich, daß das Gleis zwischen Lokomotive und Tender nahezu in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt, woraus zu schliessen wäre, daß die Senkung der Stützen von der Tenderbelastung fast gar nicht beeinflusst wird. Man könnte deshalb annehmen, daß die statische Wirkung der Lokomotiven auf das Gleis gleichwerthig war mit der Wirkung von drei gleichen Einzellasten auf einen auf unendlich vielen nachgiebigen Stützen ruhenden Balken, wobei der mittlere Lastabstand etwa zwei bis drei mal größer ist, als der Mittenabstand der Stützen.

Wenn angenommen wird, daß der Träger mit unendlich vielen Stützen von den Einzellasten nicht über jeder zweiten, sondern über jeder dritten Stütze beansprucht wird, so ist der größte Stützdruck:*)

$$\text{Gl. 9) } \dots \dots \frac{P}{G} = \frac{\gamma + 1}{3\gamma + 1}$$

Wegen der beschwerlichen Ermittlung für jeden einzelnen Fall der genauen Werthe der Stützdrücke kann man im vorliegenden Falle den größten Stützdruck als näherungsweise gleich der halben Summe der Ausdrücke aus 8 und 9 annehmen. Somit wäre:

$$\text{Gl. 10) } \dots \dots \frac{P}{G} = \frac{1}{2} \left(\frac{4\gamma + 1}{8\gamma + 1} + \frac{\gamma + 1}{3\gamma + 1} \right)$$

Die auf Grund dieser Gleichung berechneten Werthe der größten Stützdrücke sind in der letzten Spalte der Zusammenstellung VI aufgeführt. Sie sind um 18—21% größer, als die entsprechenden, aus den Beobachtungen abgeleiteten Werthe. Das fast unveränderliche Verhältnis der beiden Reihen von Werthen, welche auf so verschiedene Weise ermittelt wurden, läßt die oben angeführten Voraussetzungen sowohl betreffs der Größe der Bettungsziffer für die Oberbauarten I und IV, als auch der theoretischen Ermittlung des größten Stützdruckes als zuverlässig erscheinen.

Daß diese theoretischen Stützdrücke größer sind, als die Werthe, welche aus den Beobachtungen der durchschnittlichen größten Druckbelastungen der drei Lokomotivräder ermittelt wurden, erklärt sich aus der Annahme unendlich vieler, statt dreier Stützen für Benutzung der theoretischen Formel.

Ferner nähert sich der wirkliche durchschnittliche Achsstand der Lokomotiven mehr dem dreifachen, als dem zweifachen Mittenabstände der Schwellen und die gewählte Art der theoretischen Ermittlung des Stützdruckes ist bloß eine näherungsweise richtige, daher ist die Schlussfolgerung richtig, daß die aus den Beobachtungen ermittelten Werthe des Stützdruckes mit den entsprechenden theoretischen Werthen, bei der Annahme einer statischen Belastung, genügend genau übereinstimmen, daß also keine durch dynamische Wirkungen veranlaßte Vergrößerung der Schwellensenkung eintritt. Darauf ist übrigens bereits bei der Betrachtung der Ergebnisse der Beobachtungen über die Schwellensenkung bei verschiedenen Geschwindigkeiten hingewiesen.

In Zusammenstellung III ist für sämtliche Schwellenarten und für die mittleren Werthe der Schwellen-Unterlage-Ziffer

*) Ast: „Die Schwelle und ihr Lager“, Organ, Beilage 1898, S. 69, C.W. Kreidel, Wiesbaden. Les traverses et leur assise. Compte rendu du congrès internat. des chemins de fer. V. session.

ein Vergleich der aus den Beobachtungen ermittelten mit den nach der Theorie von Zimmermann berechneten Schwellensenkungen vorgenommen, wobei die theoretischen Werthe sehr stark von den Beobachtungsergebnissen abweichen. Dagegen ersieht man aus den beiden letzten Spalten der Zusammenstellung VI, daß die Werthe des Schienendruckes, welche aus den Beobachtungsergebnissen abgeleitet wurden, für jede der Oberbauarten in denselben Grenzen schwanken, wie die entsprechenden nach der Theorie berechneten Werthe.

Die Ursache der Unstimmigkeit dieser Verhältnisse ist in der auf Grund der Beobachtungen festgestellten Verschiedenheit der Werthe der Schwellen-Unterlage-Ziffer für die einzelnen Oberbauarten zu suchen. Diese Werthe, von welchen der allgemeine Steifigkeitsgrad des Gleises wesentlich abhängt, mußten ebenfalls einen Einfluß auf die Ergebnisse der Rechnung ausüben. Da aber diese Abweichungen berücksichtigt wurden, und der Schienendruck für jede Oberbauart gemäß dem für sie festgestellten Werthe der Schwellen-Unterlage-Ziffer ermittelt wurde, gelangte man auf Grund der Beobachtungen und der Theorie zu nahezu gleichen Schlussfolgerungen.

9. Die Länge der Schiene und die Anzahl der Schwellen, auf welche der Raddruck übertragen wird.

Im Zusammenhange mit der obigen Erwägung der Größe des von der Schiene auf die Schwelle ausgeübten Druckes ist zu untersuchen, auf welche Länge der Schiene und auf welche Anzahl der Schwellen der Raddruck übertragen wird.

Die vor dem ankommenden Zuge liegenden Schienen sind Schwingungen unterworfen, und zwar auf einer nicht unbedeutenden Strecke, deren Länge von der Oberbauart und von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. In einer Entfernung von 3 bis 6 m vor dem vordern Rade erheben sich die Schienen etwas über ihre ursprüngliche Lage, kehren in 1,5 bis 3,5 m Abstand vom vordern Rade wieder in ihre ursprüngliche Lage zurück und fangen dann an, sich unter der Belastung einzusenken. Die Einsenkung der Schwellen beginnt etwas später, was eine Folge der nicht dichten Auflagerung der Schiene auf den Schwellen ist. Wegen der Langsamkeit der anfänglichen Senkung ist eine genaue Feststellung des Augenblickes der beginnenden Senkung der Schiene und der Schwellen schwierig. Es unterliegt aber keinem Zweifel, daß die Entfernung des Vorderrades der Lokomotive von dem beobachteten Punkte im Augenblicke des Beginnes der Senkung der Schiene oder der Schwelle sehr oft für zwei aufeinander folgende und von gleichen Lokomotiven bewegte Züge verschieden ist.

Dieser Umstand ist auf den Einfluß zufälliger Ursachen, z. B. ungleicher Ueberlastung der Räder oder ungleich dichter Auflagerung der Schiene auf den Schwellen zurückzuführen.

Schließlich haben aber diese Unterschiede, welche bis 1 m betragen, nur einen unerheblichen Einfluß auf die ermittelten Werthe der Schwellen-Unterlage-Ziffer ausgeübt. Der mittlere Abstand des Vorderrades der Lokomotive von dem beobachteten Punkte im Augenblicke des Beginnes der Senkung der Schiene oder der Schwelle ist in Zusammenstellung VII angegeben.

Zusammenstellung VII.

Oberbauart	Abstand des Vorderrades der Lokomotive von dem beobachteten Punkte, im Augenblicke des Beginnes der Einsenkung				Anzahl der Schwellen, welche sich vor dem Vorderrade der Lokomotive senkten.	Anzahl der Schwellen, auf welche die Belastung der Lokomotive übertragen wird bei 3,4 m Achsstand.
	der Schiene über der Schwelle		der Schwelle			
	im Durchschnitte für sämtliche Schwellen des Schienenpaares	im Durchschnitte nach Ausschluss der zwei letzten Schwellen an jedem Ende der Schiene	im Durchschnitte für sämtliche Schwellen des Schienenpaares	im Durchschnitte nach Ausschluss der zwei letzten Schwellen an jedem Ende der Schiene		
I	2,39	2,49	2,35	2,49	2,9	9,8
II	2,35	2,46	2,21	2,37	3,0	10,2
III	2,14	2,21	2,03	2,09	2,6	9,4
IV	2,07	2,19	1,93	2,06	2,4	8,8
IVa	2,21	2,26	2,11	2,22	2,6	9,2
V	2,02	2,14	2,04	2,14	2,9	10,3

Daraus ist ersichtlich, dass die Schwellen nahezu in derselben Entfernung von dem Vorderrade der Lokomotive sich zu senken beginnen, wie die Schienen. Diese Entfernung ist für die nicht am Stofse liegenden Schwellen und für die über diesen ruhenden Einzelstellen der Schienen etwas gröfser, als für die Stofsschwellen.

Diese Entfernung ändert sich nur wenig mit der Oberbauart. Für eine vergleichende Erwägung sind die in der fünften Spalte der Zusammenstellung VII vorgeführten Zahlen besonders geeignet, da diese sich auf die Schwellen im mittlern Theile des Schienenpaares beziehen, wo der Schwellenabstand gleich groß ist. Aus diesen Zahlen könnte man schliessen, dass die Länge, auf welche der Raddruck übertragen wird, bei schwachem Oberbaue I und V, bei kurzen Schwellen, Oberbau I und II, und bei nachgiebiger Bettung, Oberbau IVa und V, gröfser sei, als bei schweren Schienen mit langen Schwellen, welche auf wenig nachgiebiger Bettung ruhen, Oberbau III und IV. Zu der gleichen Schlussfolgerung gelangt man, wenn man bei Berücksichtigung des Schwellenabstandes die Anzahl der Schwellen ermittelt, auf welche der Druck des Vorderrades übertragen wird.

Berechnet man auf Grund dieser Angaben die Anzahl der Schwellen, auf welche die Last der zur Ermittlung der Schwellen-Unterlage-Ziffer verwendeten Lokomotive mit einem Gesamtachsstande der Triebachsen von 3,4 m übertragen wird, so wird ersichtlich, dass diese Anzahl um 1 bis 2 kleiner ist, als diejenige, welche bei der Ermittlung dieser Ziffer, also bei sehr geringer Geschwindigkeit der Lokomotive, erhalten wurde. (S. 301) Dieses Ergebnis beweist, dass der Schienendruck bei langsamem Aufbringen der Belastung auf eine gröfsere Anzahl der Schwellen übertragen wird, als bei raschem; da aber die Senkung der äufsern Schwelle im Allgemeinen sehr gering ist,

so kann dieser Umstand keinen wesentlichen Einfluss auf die Senkungsgröfse der übrigen Schwellen ausüben.

Der bei den Beobachtungen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn festgestellte, geringe Einfluss des Schienenquerschnittes auf die Länge der Senkung der Schiene unter der Belastung durch das Vorderrad, wird theilweise durch die Beobachtungen von Couard bestätigt. Couard behauptet zwar, dass der Druck des Vorderrades auf eine um so gröfsere Anzahl von Schwellen übertragen wird, je steifer und länger die Schienen sind, aber zur Bekräftigung dieser Behauptung führt er an, dass die von ihm beobachtete Senkung der Schiene unter dem Drucke des Vorderrades sich erstreckte: bei 5 m langen Schienen mit 7 Schwellen auf eine Länge von 1,5 bis 2,9 m und bei 10 m langen Schienen mit 12 Schwellen auf eine Länge von 1,7 bis 3,10 m vor dem Rade. Bei den bedeutenden, und, wie man aus Couard's Zusammenstellungen*) ersehen kann, sehr unregelmäßigen Schwankungen dieser Länge erscheint die von Couard angegebene Schlussfolgerung nicht genügend begründet, um so weniger, als die Anzahl der Schwellen unter den beiden der Beobachtung unterzogenen Schienen nicht im geraden Verhältnisse zur Schienenlänge stand.

10. Der Unterschied zwischen der Senkung der Schwellen und der Schienen über diesen.

Bei sämtlichen Beobachtungen über die Senkung der Schwellen und der Schienen über ihnen war die Senkung der Schienen etwas gröfser, als die der Schwellen, was unzweifelhaft durch das nicht genügend dichte Auflagern der Schiene auf den Unterlagplatten und dieser auf den Schwellen, dann durch die Zusammendrückbarkeit des Schwellenholzes verursacht wurde.

Diese Unterschiede schwanken nach Zusammenstellung VIII für jede der Oberbauarten in ziemlich weiten Grenzen, da die Gröfse der beiden Zwischenräume von verschiedenen Zufälligkeiten, z. B. von der Unebenheit der Flächen, von den Verkrümmungen der Schiene, und von dem nicht genügenden Eintreiben der Hakennägel beeinflusst wird, die Zusammendrückbarkeit des Schwellenholzes aber von der Holzgattung, vom Alter der Schwelle, vom Feuchtigkeitsgrade u. s. w. abhängt.

Zusammenstellung VIII.

Oberbau	Unterschied zwischen den Senkungen der Schiene und der Schwelle mm/t		
	von	bis	im Mittel
I	0,06	0,29	0,157
II	0,04	0,21	0,101
III	0,04	0,15	0,090
IV	0,02	0,26	0,093
IVa	0,04	0,16	0,093
V	0,00	0,07	0,018

Um feststellen zu können, welcher Bruchtheil des ganzen Unterschiedes zwischen den Senkungen der Schiene und der

*) Revue gén. des ch. de fer. 1887. II. p. 365.

Schwelle durch die Zusammendrückbarkeit der Schwelle verursacht wird, soll versucht werden, die GröÙe der Verdrückung der Schwelle zu ermitteln*), wobei die Elasticitätszahl für Eichenholz bei Druck rechtwinkelig zu den Fasern mit $E'' = 15 \text{ t/qcm}$ eingeführt wird.

Der Schienendruck $\frac{P}{G}$ für jede der Oberbauarten ist in Zusammenstellung VI (S. 308) angegeben.

Die Fläche der Schwelle ω , auf welche dieser Schienendruck übertragen wurde, beträgt bei den Oberbauarten I und V: $9,7 \cdot 15 = 145 \text{ qcm}$ und bei den übrigen $19 \cdot 15 = 285 \text{ qcm}$. Die Höhe der Schwelle ist $h = 15 \text{ cm}$.

Somit ist die Verdrückung der Schwelle für eine Tonne des Raddruckes:

$$\text{Gl. 11) } \dots \delta = \frac{P}{G} \cdot \frac{1}{E''} \cdot \frac{h}{\omega}$$

Die nach dieser Formel berechneten Werthe der Verdrückung der Schwelle und der nach ihrem Abzuge übrig bleibende, die GröÙe der offenen Zwischenräume ausdrückende Theil des Unterschiedes zwischen der Senkung der Schiene und der Schwelle sind in Zusammenstellung IX aufgeführt.

Zusammenstellung IX.

Oberbau	Senkung der Schwelle	Verdrückung der Schwelle	Offener Zwischenraum zwischen der Schiene, der Unterlagsplatte und der Schwelle	Senkung der Schiene über der Schwelle
	mm/t			
I	0,468	0,030	0,127	0,625
II	0,287	0,014	0,087	0,388
III	0,232	0,014	0,076	0,322
IV	0,237	0,015	0,078	0,330
IVa	0,316	0,015	0,078	0,409
V	0,384	0,028	-0,010	0,402

In die letzte Spalte ist die unmittelbar aus den Beobachtungen abgeleitete durchschnittliche Senkung der Schiene über der Schwelle eingetragen.

Aus Zusammenstellung IX ist ersichtlich, daß die offenen Zwischenräume für sämtliche Oberbauarten mit 12 m langen Schienen etwa $0,08 \text{ mm/t}$, oder im Ganzen etwa $0,08 \cdot 6,7 = \approx 0,5 \text{ mm}$, ausmachen. Bei der Oberbauart V ist der Unterschied zwischen der Senkung der Schiene und der der Schwelle ausschließlich auf die Verdrückung der Schwelle zurückzuführen**), woraus folgt, daß die Schiene bei diesem Oberbau ohne die offenen Zwischenräume, die sich bei den Oberbauten II, III, IV und IVa bemerkbar machten, auf der Schwelle ruhte.

Diese letztgenannten Oberbauarten unterscheiden sich in Bezug auf die Auflagerungsweise der Schiene von der Ober-

*) Die Verdrückung der Schwelle unter dem Drucke der Schiene konnte, wegen ihrer geringen GröÙe und wegen der Schwierigkeit gehöriger Befestigung eines Kugelspiegels in den oberen Fasern der Schwelle unter der Schiene, nicht unmittelbar während der Beobachtung gemessen werden.

**) Der ermittelte Unterschied zwischen der Senkung der Schiene und der der Schwelle ist sogar etwas kleiner, als die Verdrückung der Schwelle, was, wie noch weiter unten erklärt wird, durch eine Drehung der Schiene um ihre Längsachse nach innen verursacht wurde.

bauart V allein dadurch, daß bei ihnen je zwei keilige Unterlegplatten auf jeder Schwelle angebracht sind, während bei Oberbau V nur auf den Stofschwällen gewöhnliche Unterlegplatten verlegt sind. Demzufolge konnte bei den Oberbauarten II, III, IV und IVa der nach Abzug der Verdrückung der Schwelle ermittelte Unterschied zwischen der Senkung der Schiene und der der Schwelle nur dadurch verursacht werden, daß bei diesen Oberbauten die Flächen der Schiene, der Unterlegplatte und der Schwelle nicht genügend genau zusammenpaßten, und daß die Beseitigung des Uebelstandes durch Nachtreiben der Hakennägel wegen der größern Anzahl dieser Flächen, ihrer größern Ausmaße und wegen der größern Steifigkeit der Schiene bei den genannten Oberbauarten viel schwieriger war, als bei Oberbau V.

In Bezug auf die Oberbauart I, für welche der ermittelte Unterschied zwischen der Senkung der Schiene und der der Schwelle nahezu doppelt so groß ist, wie für die Oberbauarten, bei denen keilige Unterlegplatten verwendet sind, ist zu bemerken, daß die Ursache dieser abweichenden Erscheinung wahrscheinlich nicht in weiteren offenen Zwischenräumen, sondern in stärkerer Zusammendrückbarkeit der Schwellen dieser Oberbauart zu suchen ist. Auf S. 298 ist bereits erwähnt, daß sich die Beobachtungen im Jahre 1897 anfänglich ausschließlich auf das damals vorgefundene Gleis erstreckten. Dieses bestand aber aus 6 m langen Schienen, welche 1879 verlegt waren und auf 7 Jahre alten, d. h. im Jahre 1890 verlegten Eichenschwellen ruhten. Da der Schienendruck bei dieser Oberbauart sehr groß (Zusammenstellung VI, S. 308) und die Fläche, auf welche er sich vertheilt, klein ist, so erscheint die Annahme einer stärkern Zusammendrückung der Schwelle genügend begründet.

11. Die Senkung und Durchbiegung der Schiene zwischen den Schwellen.

Das Verhältnis der Senkung der Schiene zwischen den Schwellen zu der der Schwellen und der Schiene über diesen ist beobachtet für die Oberbauart IVa auf der Länge von der ersten bis zur neunten Schwelle und für die Oberbauart V auf der Länge von der ersten bis zur siebenten Schwelle. Beispiele der hierbei erhaltenen Schaulinien sind in Abb. 33 und 34 Taf. XL vorgeführt; die allgemeinen Endergebnisse sind aus Zusammenstellung X zu entnehmen.

Da eine dritte Meßvorrichtung nicht zu Gebote stand, konnte die Senkung der Schiene über zwei Stützen und in der Mitte zwischen ihnen nicht gleichzeitig beobachtet werden, und deshalb ist die Ermittlung der Biegungspfeile der Schiene zwischen den Stützen nicht unanfechtbar, da sich die SenkungsgroÙe der Schwellen in dem Zeitraume zwischen zwei Aufstellungen der Vorrichtungen ändern konnte. Um die hieraus entstehenden Fehler möglichst zu verringern, wurden die Beobachtungen nicht länger, als drei Tage nacheinander fortgesetzt, und da die Schwellen jeder der beobachteten Oberbauarten sogar in zwei Monaten nach der Legung und endgültigen Ausrichtung des Gleises keines Nachstopfens bedurften, so kann man wohl annehmen, daß die Aenderungen in der Senkung der einzelnen Schwellen im Zeitraume zwischen zwei einander folgenden Beobachtungen nur sehr unbedeutend sein konnten.

Auch ist noch zu bemerken, daß der Biegungspfeil aus dem Unterschiede der Senkung der Schiene zwischen den beiden Schwellen und der halben Summe der Senkung der Schiene über diesen abgeleitet wurde, und daß deshalb eine etwaige Ungenauigkeit der ermittelten Senkung einer dieser Schwellen nur in halber Größe zur Geltung kam.

Die Senkung der Schwelle und der Schiene über ihr bei Aufstellung des Rades zwischen dieser und einer der beiden benachbarten Schwellen ist ermittelt, indem in die Schaulinie eine Ordinate eingezeichnet wurde, deren Abstand von der Ordinate der größten Einbiegung gleich dem halben Mittenabstande der Schwelle war.*)

Was die Einbiegung unter den Lokomotivachsen betrifft, so ersieht man aus Zusammenstellung X**), daß der mittlere Biegungspfeil der Schiene für Oberbau IVa 0,122 mm/t und für Oberbau V 0,086 mm/t betrug.

Da die gleichmäßige Vertheilung der Schwellen erst mit Schwelle 3 anfängt, so erhalten wir die Werthe dieser mittleren Biegungspfeile für Oberbau IVa bei 85 cm Mittenabstand der Schwellen zu 0,125 mm/t und für Oberbau V bei 75 cm Mittenabstand der Schwellen zu 0,10 mm/t.

Um diese Ergebnisse mit denen der theoretischen Untersuchung zu vergleichen, bedienen wir uns der von Zimmermann aufgestellten Formel zur Berechnung des Biegungspfeiles eines auf vier nachgiebigen Stützen ruhenden durchlaufenden Trägers, welcher in der Mitte der mittlern Oeffnung mit einer Einzellast G belastet wird.***)

Der Biegungspfeil der mittlern Oeffnung im Lastangriffspunkte beträgt in diesem Falle auf die Gewichtseinheit der Last:

$$\text{Gl. 12) } \dots \frac{\delta}{G} = \frac{20\gamma + 11}{16(4\gamma + 10)B}$$

Das Trägheitsmoment der 38 kg/m schweren Schiene im Oberbau IVa ist 1141 cm⁴ und der 31,45 kg/m schweren Schiene im Oberbau V 768 cm⁴. Ist E = 2000 t/qcm², so wird:

$$\begin{aligned} \text{für Oberbau IVa } & \dots B = 22,3 \text{ t} \\ \text{« « V } & \dots B = 21,8 \text{ t} \end{aligned}$$

Die Größe D kann aus den in Zusammenstellung VI, (S. 308) vorgeführten Ergebnissen ermittelt werden:

$$D = C' \omega \cdot \frac{y_m}{y_r}$$

*) Die Schwellen waren in der Richtung von Warschau beziffert, die Züge verkehrten aber in der entgegengesetzten Richtung. Deshalb ist für die Richtung der Züge gemäß der in Zusammenstellung X angenommenen Bezeichnung beispielsweise die Schwelle 6 als die nach der Schwelle 7 folgende und nicht als die vor letzterer liegende zu betrachten.

**) Manche der auf die größte Senkung der Schwellen bezüglichen Zahlen der Zusammenstellung X stimmen nicht ganz mit den entsprechenden Zahlen der Zusammenstellung II (S. 302) überein, weil diese aus den Ergebnissen einer bedeutend größeren Anzahl von Beobachtungen abgeleitet sind.

***) Für diesen Belastungsfall sind die größten Momente größer, als bei einem auf unendlich vielen Stützen ruhenden Träger, welcher mit drei Einzellasten belastet wird, deren gegenseitiger Abstand 2—3 mal größer ist, als der Mittenabstand der Stützen. (Vergleiche die russische Abhandlung von A. A. Cholodecki: Untersuchungen über den Einfluß äußerer Kräfte auf den Eisenbahn-Oberbau. Kiew 1897.)

Somit ist:

$$\begin{aligned} \text{für Oberbau IVa } \dots D &= 4,8 \cdot 3375 \cdot 0,846 = 13,7 \text{ t}; \gamma = 1,68. \\ \text{« « V } \dots D &= 3,4 \cdot 3375 \cdot 0,927 = 10,6 \text{ t}; \gamma = 2,05. \end{aligned}$$

Der Biegungspfeil der Schiene ist:

$$\begin{aligned} \text{für Oberbau IVa } \dots \frac{\delta}{G} &= 0,0074 \text{ cm}, \\ \text{« « V } \dots \frac{\delta}{G} &= 0,0082 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Diese Werthe sind 20 bis 40 % kleiner, als die aus den Beobachtungen ermittelten. Es muß jedoch bemerkt werden, daß die Senkung der Stützen in der Formel bloß gleich der Senkung der Schwellen angenommen wurde; es unterliegt aber gar keinem Zweifel, daß die bei den Beobachtungen festgestellte lockere Auflagerung der Schiene eine nachträgliche Senkung der Schiene auf den Stützen verursacht und in Folge dessen einen Einfluß auf die Durchbiegung der Schiene ausübt. Aus den Beobachtungsergebnissen ist ersichtlich, daß der Schluß der Auflagerung der Schiene auf der Schwelle unter der Belastung unmittelbar von der Größe dieser Belastung abhängt. Hiervon kann man sich aus Zusammenstellung X leicht überzeugen, indem man die Unterschiede der Senkungsgrößen der Schienen und der Schwellen bei verschiedenen Stellungen des Rades mit einander vergleicht.

Demzufolge kann man die auf die Einheit des Schienen-druckes bezogene Senkung der Schiene in den Stützpunkten $\frac{1}{D}$ durch

$$\text{Gl. 13) } \dots \frac{1}{D} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}$$

ausdrücken, wenn $\frac{1}{D_1}$ denjenigen Theil der Senkung der Schiene bedeutet, welcher durch die Senkung der Schwelle verursacht wird und $\frac{1}{D_2}$ der übrige Theil der Schienensenkung ist, welcher in Folge des Andrückens der Schiene an ihre Stützen, oder in Folge des Eindringens der Schiene in die Schwellen entsteht.

Die Größe D_2 kann als das Verhältniß des Schienendrucks zum mittlern Werthe des beobachteten Unterschiedes zwischen den Senkungen der Schiene und der Schwellen (vergl. Zusammenstellungen VI und IX) ermittelt werden. Hierbei erhält man:

$$\begin{aligned} \text{für Oberbau IVa } \dots D_2 &= \frac{0,43}{0,0093} = 46,2 \\ \text{« « V } \dots D_2 &= \frac{0,41}{0,0018} = 222. \end{aligned}$$

Aus den in dieser Weise berichtigten Größen folgt:

$$\text{für Oberbau IVa } \frac{1}{D} = \frac{1}{13,7} + \frac{1}{46,2} = \frac{1}{10,5}; \gamma = \frac{22,3}{10,5} = 2,12,$$

$$\text{« « V } \frac{1}{D} = \frac{1}{10,6} + \frac{1}{222} = \frac{1}{10,2}; \gamma = \frac{21,8}{10,2} = 2,14,$$

und die entsprechenden Biegungspfeile der Schiene sind:

$$\text{für Oberbau IVa } \dots \frac{\delta}{G} = 0,0081$$

$$\text{« « V } \dots \frac{\delta}{G} = 0,0083.$$

gleich $z - y_r$ ist, kleiner werden und kann bloß $z' - y_r'$ und $z'' - y_r''$ betragen. Die Hebung ζ der Schiene über der Schwelle ist hierbei

$$\text{Gl. 14) } \dots \dots \dots \begin{cases} \zeta = z - y_r - (z' - y_r') \\ \zeta = z - y_r - (z'' - y_r'') \end{cases}$$

Aus Zusammenstellung X ersieht man, daß die Hebung der Schiene über der Schwelle bei Oberbau IVa wirklich vorkommt und im Mittel 0,021 mm/t ausmacht. Dagegen behält die Schiene bei Oberbau V in der Mitte der Schwellenbreite ihre Lage bei jeder beliebigen Stellung des Rades unverändert bei, denn die geringen, sich gegenseitig ausgleichenden Werthe von ζ sind mit Ausnahme derer für die der Stoffschwelle, auf welcher Unterlegplatten angebracht waren, bloß eine Folge der unvermeidlichen Ungenauigkeiten beim Messen der Ordinaten in den Schaulinien. Dieses Endergebnis der Beobachtungen über das Verhalten der ohne Unterlegplatten verlegten Schienen wird verständlich, wenn man berücksichtigt, daß die Schwellenkanten während der Biegung der Schiene zerdrückt werden. (Abb. 36, Taf. XXXIX).

Bezüglich des Biegungspfeiles der Schiene bei Oberbau IVa gelangt man zu der Schlußfolgerung, daß sein größerer Werth gegenüber dem Biegungspfeile des Oberbaues V durch ganz besondere, bisher nicht genügend aufgeklärte Umstände verursacht ist. Einen dieser Umstände bildet vermuthlich das Schwanken der Elasticitätszahl für Stahl. Nach verschiedenen Angaben wird diese in den Grenzen von 1700 bis 2200 t/qcm, in den obigen Berechnungen ist sie mit 2000 t/qcm angenommen. Betrüge der wirkliche Werth der Elasticitätszahl bei Oberbau IVa bloß 1700 t/qcm, so hätte das eine Vergrößerung des Biegungspfeiles um 10% zur Folge.

Am wahrscheinlichsten ist es jedoch, daß die in den Stützweiten 6—7 und 7—8 des Oberbaues IVa ermittelten Biegungspfeile, welche bedeutend größer sind, als die der benachbarten Stützweiten, bloß durch zufällig größere Senkung der Schwellen 7 und 8 veranlaßt sind. Diese größere Senkung der Schwellen 7 und 8 konnte eintreten nicht wegen schwächerer Unterstopfung, sondern wegen des Umstandes, daß diese Schwellen von der wenn auch nur statisch wirkenden Belastung ungünstiger beansprucht werden konnten.

Selbst wenn angenommen wird, daß vollständig genaue Geraderichtung der Schienen im Werke möglich sei, so werden diese doch nur sehr selten in solchem Zustande zum Verlegen gelangen. Abweichungen von der Geraden, welche 2—3 mm messen, kommen fast bei jeder Schiene vor, insbesondere aber bei langen, und deshalb konnte diesem Uebelstande auch in dem Beobachtungsgleise nicht vorgebeugt werden, obwohl die Schienen dafür mit besonderer Sorgfalt ausgewählt waren. Die Abweichungen von der Geraden in lothrechttem Sinne wurden bei sämtlichen Schienen der Beobachtungsstrecke gemessen, wobei sich herausstellte, daß die Beobachtungen, deren Ergebnisse in den Zusammenstellungen II und X verwerthet sind, an Schienen angestellt sind, welche im Gleise die in Abb. 37 bis 39, Taf. XXXIX dargestellte Längengestalt hatten.

Diese Abweichungen können, so gering sie auch sind, selbstverständlich einen Einfluß auf die Vertheilung der Belastung auf die einzelnen Achsen der dreiachsigen Lokomotive

oder des Wagens, sogar im Zustande der Ruhe ausüben. Während der Bewegung wird die Einwirkung dieser Unebenheiten noch bedeutend fühlbarer, und folglich konnte die aus Abb. 37, Taf. XXXIX, bei Schwelle 8, ersichtliche Einknickung der Schiene nicht ohne Einfluß auf die Senkungsgröße ebenso dieser, wie auch der in der Richtung der Züge nächstfolgenden Schwelle 7, bleiben, und mußte ebenfalls rückwärts auch auf die Durchbiegung der Schiene an dieser Stelle einwirken.

Auf Grund dieser Erwägungen, und indem wir die Beobachtungen über die Größe des Biegungspfeiles bloß auf diejenigen Theile der Schiene beschränken, welche die geringsten Abweichungen von der Geraden zeigten und sich am gleichmäßigsten auf den Stützen senkten, könnte man zur Schlußfolgerung gelangen, daß der Biegungspfeil für die Oberbauarten IVa und V unter der Belastung der Lokomotive etwa 0,10 bis 0,11 mm/t betragen hat, und somit um 25 bis 40% größer war, als der entsprechende, durch Rechnung festgestellte Werth von 0,08 mm/t.

Der oben angegebene theoretische Biegungspfeil bei statischer Belastung war jedoch unter Annahme bloß einer Einzellast ermittelt. Bei der Annahme einer Lasten-Reihe mußte der Biegungspfeil noch kleiner werden und dann wüchse die dynamische Wirkung, welche aus dem Vergleiche des theoretischen mit dem beobachteten Biegungspfeile gefolgert wurde.

Nach den theoretischen Untersuchungen von Cholodecki*) sind die größten Momente bei einem durchlaufenden Träger auf mehreren nachgiebigen Stützen unter drei Einzellasten um so kleiner, je kleiner der Abstand zwischen den Lasten ist. Wenn der Lastenabstand zwei bis drei Mal so groß ist, wie der Stützenabstand und wenn ebenso γ in den Grenzen von 1 bis 2 veränderlich ist, so sind die größten Momente um 5 bis 21% kleiner, als das Moment eines Trägers auf vier Stützen, welcher bloß mit einer Einzellast belastet wird.

Nach Ast**) wird der Biegungspfeil unter der Last bei 7 Stützen und $\gamma = 1$ bis 2 durch die Mitwirkung einer zweiten Last, welche der ersten gleich und deren Entfernung von der ersten gleich dem dreifachen Stützenabstande ist, um 9 bis 20% verkleinert.

Nach diesen Erörterungen sollte der Werth des dynamischen Druckes der Lokomotivräder, welcher vorher aus den Biegungspfeilen gleich dem 1,25 bis 1,40 des statischen ermittelt wurde, um etwa 15% vergrößert werden, so daß derselbe 1,44 bis 1,60 des statischen Druckes beträgt.

Dieses Endergebnis steht scheinbar im Widerspruche mit den Ergebnissen der Beobachtungen über die Senkung der Schwellen, in denen kein Einfluß der dynamischen Wirkungen auf die Vergrößerung des Druckes der Lokomotivräder erkennbar war. Der Augenblick der größten Senkung der Schwelle fällt aber nicht mit dem der größten Einbiegung der Schiene zusammen, und der Zuwachs des Druckes, welcher bei

*) Vergl. die russische Abhandlung von A. A. Cholodecki: Ueber den Einfluß der äußeren Kräfte auf den Eisenbahn-Oberbau. Kiew 1897.

**) Organ, Beilage 1898, C. W. Kreidel, Wiesbaden und Comptendu rendu du congrès intern. des ch. de fer. IVe session. V. A. S. 398.

Stellung des Rades zwischen den Schwellen bemerkbar wird, kann verschwinden, während das Rad auf die Schwelle übergeht. Wäre z. B. die Vergrößerung des Biegungspfeiles der Schiene bei dynamischer Belastung, wie Manche voraussetzen, eine Folge der Fliehkraft der Bewegung auf gekrümmter Bahn, so könnte diese Ursache nicht über den Stützen, sondern nur zwischen den Stützen wirken.

Die oben angeführten Ergebnisse finden im Allgemeinen eine Bestätigung in den Ergebnissen der Beobachtungen, welche auf anderen Eisenbahnen angestellt sind.

Nach den Beobachtungen von Häntzschel und Couard wächst die Senkung der Schwellen nicht, sondern wird eher kleiner mit wachsender Geschwindigkeit. Dagegen wachsen die Durchbiegungen der Schiene zwischen den Schwellen nach Couard nahezu in geradem Verhältnisse zu dieser.

Auf Grund der Beobachtungen von Flamache behauptet Ast, daß die Senkung der Schwellen unter der Lokomotive bei diesen Beobachtungen 1,1 bis 1,6 mal größer war, als die aus der Berechnung abgeleitete. Da aber die Bettungsziffer bei diesen Beobachtungen gar nicht ermittelt wurde, so kann diese Behauptung nur vermuthungsweise aufgestellt werden.

Nur bei den Beobachtungen von Stecewicz waren die Durchbiegungen der Schiene 1,65 mal und die Senkungen der Schwellen 2,5 mal größer, als die entsprechenden rechnungsmäßigen Werthe.

Uebrigens wurden die lothrechten Bewegungen bei allen genannten Beobachtungen mit einziger Ausnahme der Beobachtungen von Häntzschel, gegen einen in der Nähe der beobachteten Stelle des Gleises in den Boden eingetriebenen Pflock gemessen.

Die dynamischen Wirkungen, welche bei der Bewegung der Züge hervortreten und die auf das Gleis wirkende Belastung vermehren, können durch zweierlei Ursachen veranlaßt werden, entweder durch den ungleichmäßigen Gang der in Bewegung befindlichen Triebwerke und durch die Trägheit der Bestandtheile dieser, oder auch durch den unbefriedigenden Zustand des Gleises und dessen ungleichmäßige Senkung. Eine der Ursachen der ungleichmäßigen Senkung des Gleises ist in der Durchbiegung der Schiene zwischen den Stützen zu suchen. Diese kann im vorliegenden Falle auf Grund der in Spalte 9 der Zusammenstellung X angegebenen, aus den Beobachtungsergebnissen ermittelten Werthe des Unterschiedes zwischen der Senkung der Schiene zwischen den Stützen und über den Stützen abgeschätzt werden. Dieser Unterschied schwankt in den Grenzen von 0,005 bis 0,1 mm und beträgt im Mittel: für Oberbau IVa 0,044 mm/t und für Oberbau V 0,039 mm/t. Ast berechnet diesen Unterschied theoretisch, indem er die größte Senkung der Schiene in der Mitte zwischen den Schwellen aus der Formel für einen Träger mit vier nachgiebigen Stützen und einer Einzellast in der Mitte der mittlern Oeffnung:

$$\text{Gl. 15)} \quad \dots \quad \frac{y}{G} = \frac{16\gamma^2 + 112\gamma + 11}{12\gamma(2\gamma + 5)D}$$

und die Senkung der Schiene über der Schwelle aus der Formel für einen Träger mit drei nachgiebigen Stützen und einer Einzellast über der mittlern Stütze

$$\text{Gl. 16)} \quad \dots \quad \frac{y_r}{G} = \frac{\gamma + 2}{(3\gamma + 2)D}$$

ableitet.

Auf Grund der gewonnenen Ergebnisse gelangt Ast*) zu dem Schlusse, daß das Maß des Unterschiedes zwischen der Senkung der Schiene mitten zwischen den Schwellen und über den Schwellen in den üblichen Belastungsfällen nicht größer ist als 0,2 mm und deshalb behauptet er, daß das Rad bei gleicher Senkung der Schwellen und bei annähernd unveränderlicher Last in einer Geraden läuft, welche überall gleichen Abstand von der ursprünglichen Lage der Schiene hat.

Für die Oberbauarten IVa und V erhält man den Unterschied $\frac{y - y_r}{G}$, indem man die diesen Oberbauarten entsprechenden Werthe D und γ (S. 312) in die Gl. 15) und Gl. 16) einsetzt. Danach ist:

$$\text{für Oberbauart IVa} \quad \dots \quad \frac{y - y_r}{G} = 0,017 \text{ mm/t,}$$

$$\text{für Oberbauart V} \quad \dots \quad \frac{y - y_r}{G} = 0,018 \text{ mm/t.}$$

Somit sind die aus den Beobachtungen ermittelten Unterschiede zwischen der Senkung der Schiene mitten zwischen den Schwellen und über den Schwellen 2,2 bis 2,6 mal größer, als die entsprechenden theoretischen Werthe; immerhin sind aber diese Unterschiede bei einem mittlern Raddrucke der Lokomotive von 6,7 t nicht größer, als $0,044 \cdot 6,7 = 0,3 \text{ mm}$. Diese Größe ist verschwindend klein im Vergleiche mit den anderen Ursachen, durch welche lothrechte Bewegungen des Schwerpunktes der Fahrzeuge verursacht werden können; dahin gehören ungenaue Legung des Gleises, ungleichmäßige Senkung der Schwellen, Abnutzung oder unrichtige Abdrehung der Radreifen, Biegung der Tragfedern u. s. w.

Noch muß auf die Erscheinung hingewiesen werden, welche aus Zusammenstellung X ersichtlich wurde, daß die Senkung der Schwellen und der Schiene über diesen bei Stellung des Rades in der Mitte zwischen der gegebenen Schwelle und der vorhergehenden immer größer ist, als bei Stellung des Rades in der Mitte zwischen dieser Schwelle und der nachfolgenden. Die Ursache dieser Erscheinung ist wahrscheinlich in den Besonderheiten der dynamischen Wirkung einer Lastenreihe zu suchen, sie ist auch abhängig von der Zeitdauer der Einwirkung jeder der Einzellasten auf die Senkung der Schwelle.

12. Die ständige und zufällige Ueberlastung und Entlastung der Lokomotivräder.

Ermittelt man für jede Achse der dreiachsigen Lokomotive die Senkung der Schwellen und die Senkung der Schiene über den Schwellen für 1 t des Raddruckes, so wird sich zeigen, daß diese Senkungsgrößen nicht für alle Achsen gleich sind. Das Verhältniß der Senkung unter jeder der Achsen zur durchschnittlichen Senkungsgröße unter sämtlichen drei Achsen, ist in Zusammenstellung XI angegeben.

*) Organ, Beilage 1898, C. W. Kreidel, Wiesbaden und Comptendu du congrès intern. des ch. de fer. IVe session. V. A. S. 159.

Zusammenstellung XI.

Oberbau	Senkung unter einzelnen Lokomotivachsen, ausgedrückt in % der durchschnittlichen Senkung für 1 t des Raddruckes					
	der Schwellen			der Schienen		
	I	II	III	I	II	III
I	93	102	105	93	102	105
II	94	103	103	95	103	102
III	97	103	100	96	103	101
IV	94	104	102	93	104	103
IV a	94	107	99	94	105	101
V	95	105	100	95	105	100
	94,5	104,0	101,5	94,3	103,7	102

Die ungleiche Senkung, bezogen auf 1 t des Raddruckes, für die verschiedenen Räder ist nicht abhängig davon, ob das betreffende Rad ein äußeres, oder ein zwischen zwei anderen befindliches ist, vielmehr war die Senkung unter dem Vorderade aller dreiachsigen Lokomotiven bedeutend kleiner, als unter dem hintern, obwohl das Gleis in dem Zeitraume zwischen der Belastung durch die Lokomotive und durch den Tender, insbesondere beim Uebergange der Güterzüge (Abb. 28 bis 30, Taf. XXXIX) fast genau in seine ursprüngliche Lage zurückkehrte, somit die Tenderräder keinen Einfluss auf die Senkung unter der Lokomotive ausüben. Die Verschiedenheit der Senkungen kann auch keine Folge der ungleichen Einwirkung der Triebäder und Laufäder sein, denn die Verschiedenheit der Senkung unter den einzelnen Rädern war dieselbe bei den Güterzuglokomotiven, in welchen alle drei Achsen und bei den Personenzuglokomotiven, in welchen nur die beiden hinteren Achsen Triebachsen sind. Deshalb kann man nach Zusammenstellung XI, in welcher die Werthe für alle Oberbauarten fast gleich sind, zu dem Schlusse gelangen, dass die Ursache der ungleichen dynamischen Einwirkung der Räder der dreiachsigen Lokomotive allein im Triebwerke selbst und in der durch dieses verursachten Entlastung der vordern und Ueberlastung der hintern Achsen zu suchen ist.

Coüard behauptet auf Grund seiner Beobachtungen, dass sich bei jedem Schienenpaare die vordern Schwellen mehr senken, als die hintern und dass deshalb jede Schiene in gewissem Grade eine schiefe Ebene bildet, auf die die Lokomotive hinaufsteigen muss.

Aus den Beobachtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn kann man auf das Eintreten dieser Erscheinung nicht schliessen. Zwar machten sich zwischen den Senkungen der einzelnen Schwellen mehr oder minder bedeutende Unterschiede bemerkbar, doch muss deren Ursache hauptsächlich in der ungleichmäßigen Unterstopfung der Schwellen und in den zufälligen Mängeln des Gleises gesucht werden. So war die Senkung aller Schwellen bei Oberbau IV fast gleich, dagegen senkte sich bei Oberbau IV a, welcher sich nur durch die Beschaffenheit der Bettung von IV unterscheidet, die mittlern Schwellen mehr, als die äußern, was aller Wahrscheinlichkeit nach bloß durch eine etwas stärkere Unterstopfung der äußern Schwellen verursacht wurde.

Denkt man sich die Bewegung einer Lokomotive auf einem Gleise der Verhältnisse des Oberbaues IV und somit gleiche Senkung sämtlicher Schwellen und nimmt dabei an, dass die Belastung aller drei Achsen der Lokomotive gleich sei, so müsste man aus den Werthen der Zusammenstellung XI, aus denen eine ständige Ueberlastung der hintern Achsen ersichtlich ist, schliessen, dass die Bewegung wie auf einer schiefen Ebene erfolgt. Aus den Beobachtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn ist daher ersichtlich, dass die Ursache der genannten Erscheinung nicht in der Bauart des Gleises, sondern in der der Lokomotive zu suchen ist und dass diese Erscheinung auch dann eintreten müsste, wenn die statische Belastung der vordern Lokomotivachsen kleiner wäre, als die der hintern.

Die festgestellte stärkere dynamische Wirkung der hintern Lokomotivräder entspricht jedoch nur etwa einem von diesen Rädern übertragenen Unterschiede der Raddrucke von 10 %.

Dagegen ist aus den Zusammenstellungen ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den Senkungen der einzelnen Schwellen sogar bei ganz gutem Zustande des Gleises, in Folge verschiedener zufälliger Ursachen in bedeutend weitem Grenzen schwanken. Ebenso weichen die Werthe der statischen Belastung der einzelnen Lokomotivachsen bisweilen um 50 % und mehr von einander ab. Somit verschwinden die Unterschiede zwischen den Senkungen des Gleises, welche durch ungleiche dynamische Wirkung der Lokomotivräder verursacht werden, gegen die Unebenheiten des Schienenweges und deshalb bildet sich in der Wirklichkeit die gedachte Neigung der Schienen gegen den hintern Theil der Lokomotive nicht aus.

Die aus den Beobachtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn ersichtliche Entlastung der vordern Räder der dreiachsigen Lokomotiven kommt nicht bei allen dreiachsigen Lokomotiven vor, vielmehr zeigten sich bei den Beobachtungen von Stecewicz die vorderen Räder der dreiachsigen Lokomotiven immer überlastet.

Die größten beobachteten Abweichungen in der Senkung der Schiene über den Schwellen unter der Wirkung einzelner Räder für 1 t des Raddruckes, ausgedrückt in Procenten der durchschnittlichen Senkung unter allen Rädern derselben Lokomotive sind in Zusammenstellung XII angegeben:

Zusammenstellung XII.

Oberbau	Größte Senkung der Schiene unter dem Lokomotivrade	
	größer als die durchschnittliche um %	kleiner als die durchschnittliche um %
I	17	37
II	25	23
III	33	36
IV	23	26
IV a	19	25
V	18	20

Die größten Abweichungen in der Senkung unter den einzelnen Rädern sind ebenso bei großen, wie bei geringen Geschwindigkeiten vorgekommen. In einem und demselben Punkte des Gleises zeigten sich die Unterschiede in der Senkung

unter den einzelnen Lokomotivrädern von einem Zuge zum andern in sehr weiten Grenzen veränderlich. Demnach ist die Ursache dieser Abweichungen nicht in der verschiedenen Geschwindigkeit der verkehrenden Züge und auch nicht im Zustande des Gleises, sondern in der durch die Schwankungen der Tragfedern veranlassten zufälligen Ueberlastung der Räder zu suchen.

13. Die dynamische Wirkung der Tenderräder.

Alle vorgeführten Betrachtungen beziehen sich ausschliesslich auf die durch Lokomotivdruck hervorgebrachten Formänderungen. Diese Belastungsart wurde vorzugsweise der Betrachtung unterzogen, nicht nur, weil die durch sie verursachten Formänderungen an sich die grössten sind, sondern auch weil die Grösse der statischen Belastung des Lokomotivrades den geringsten Aenderungen unterworfen ist.

Das Gewicht einer Lokomotive einer bestimmten Bauart in betriebsfertigem Zustande schwankt in ziemlich engen Grenzen und hängt hauptsächlich vom Wasserstande im Kessel ab, welcher meistens nur um 10 bis 20 cm schwankt. Dagegen ist das Gewicht des Tenders und der Wagen und bei gegebenem Gewichte die Vertheilung der Belastung auf die einzelnen Achsen und sogar auf die Räder sehr bedeutenden Veränderungen unterworfen und deshalb ist eine genaue Ermittlung der betreffenden Werthe sehr erschwert, abgesehen davon, dass die Herausnahme des Tenders oder der Wagen aus dem Zuge behufs Ermittlung der Gewichte und der Vertheilung der Belastung aus Betriebsrücksichten unausführbar ist.

Um jedoch den Einfluss der Tenderräder auf die Grösse der Formänderungen beurtheilen zu können, war im Jahre 1898 das Gewicht der Tender verschiedener Bauart ermittelt und zwar in dem Belastungszustande, in welchem sie auf der Beobachtungstrecke verkehrten. Es zeigte sich, dass dieses Gewicht etwa 75 % des Gewichtes des voll belasteten Tenders betrug.

Die auf Grund dieser Angaben berechneten Grössen der durchschnittlich grössten Senkung der Schwellen unter der Last der Tender im Vergleiche mit den für den Lokomotivdruck gefundenen sind in Zusammenstellung XIII aufgeführt.

Zusammenstellung XIII.

	Durchschnittlich grösste Senkung der Schwellen bei Oberbau					
	mm/t					
	I	II	III	IV	IVa	V
Unter der Lokomotive . . .	0,468	0,287	0,232	0,237	0,316	0,384
Unter dem Tender . . .	0,687	0,441	0,293	0,315	0,447	0,562
bei einem Belastungszustande, welcher $\frac{3}{4}$ der vollen Belastung des Tenders entspricht						
Die Senkung auf 1 t des Raddruckes ist unter dem Tender grösser, als unter der Lokomotive, um %	46	54	26	34	41	46

Der grössere Unterschied zwischen der Wirkung der Lokomotiv- und der Tenderräder bei Oberbau II war wahrscheinlich eine Folge der Mängel des Gleises, durch welche auch die ungleichmässige Senkung der Schwellen dieser Oberbauart verursacht war (Zusammenstellung II, S. 302). Nach Ausschluss dieses grösseren Unterschiedes in der Oberbauart II kann man aus den übrigen Zahlen der Zusammenstellung XIII folgern, dass die grössere dynamische Wirkung der Tenderräder im Vergleiche mit den Lokomotivrädern von der Steifigkeit des Gleises, d. h. von der Bettungsziffer, von der Länge der Schwellen und von der Grösse ihres Mittenabstandes vom Schienenquerschnitte u. s. w. abhängt, wobei diese Steifigkeit durch die Zahlen der ersten Zeile der Zusammenstellung gekennzeichnet ist.

Aus derselben Zusammenstellung ist ersichtlich, dass die durch die stärkere dynamische Wirkung der Tenderräder verursachte Vergrößerung der Senkung der Schwellen für 1 t der statischen Belastung in den Grenzen von 26 bis 54 % schwankt.

Es muss noch bemerkt werden, dass die Tender, welche auf der Beobachtungstrecke verkehrten, nur Bremsachsen hatten.

Zu ähnlichen Schlüssen gelangt man auf Grund eines Vergleiches der in Zusammenstellung XIV angegebenen Vergrößerung der Senkung und Durchbiegung der Schiene für 1 t der statischen Belastung durch die stärkere dynamische Wirkung der Tenderräder.

Zusammenstellung XIV.

	Durchschnittlich grösste Senkung der Schiene		Pfeil der grössten Einbiegung der Schiene zwischen den Schwellen
	über den Schwellen	zwischen den Schwellen	
Oberbau IVa.			
Unter der Lokomotive mm/t	0,425	0,477	0,122
Unter dem Tender mm/t	0,662	0,710	0,157
Unter dem Tender grösser als unter der Lokomotive %	56	49	24
Oberbau V.			
Unter der Lokomotive mm/t	0,385	0,440	0,086
Unter dem Tender mm/t	0,553	0,646	0,117
Unter dem Tender grösser als unter der Lokomotive %	44	47	36

Der Unterschied zwischen der dynamischen Einwirkung der Tender- und Lokomotivräder auf die Senkung der Schiene über den Schwellen und zwischen diesen schwankt nahezu in denselben Grenzen wie derjenige, welcher aus der Senkung der Schwellen ermittelt war; die in Folge derselben Ursache entstehende Vergrößerung des Biegungs Pfeiles der Schiene zwischen den Schwellen übersteigt aber nicht 36 %.

Aus dem Obigen erhellt, dass die dynamische Wirkung der Tenderräder in anderer Weise zur Geltung kommt, als diejenige der Lokomotivräder, indem sie Vergrößerung nicht nur der Senkung der Schiene zwischen den Schwellen, sondern auch der Senkung der Schwellen und der Schiene über diesen verursacht.

Diese Erscheinung wird erklärlich, wenn man berücksichtigt, daß die dynamische Wirkung der Lokomotiv- und Tenderräder durch ganz verschiedene Ursachen veranlaßt wird. Die der Lokomotivräder ist wahrscheinlich allein Folge der Bewegung des Rades auf der biegsamen Schiene, während die der Tenderräder auch durch die ungenaue Form des Rades verursacht sein kann. Deshalb kommt die dynamische Wirkung des Lokomotivrades nur da zum Vorschein, wo das Rad keine Stütze findet, während sich die Stöße der Tenderräder auf der ganzen Länge der Schiene bemerkbar machen.

In den Zusammenstellungen XIII und XIV ist der dynamische Druck der Tenderräder bloß im Vergleiche zu einem eben solchen Drucke der Lokomotivräder ausgedrückt; da nun das Verhältnis des dynamischen Druckes zum statischen für die Lokomotive bereits bekannt ist, soll dieses Verhältnis auch für den Tender ermittelt werden.

Wie bereits oben bewiesen wurde, ist der dynamische Druck des Lokomotivrades über der Schwelle gleich dem statischen. Da aber der dynamische Druck der Tenderräder über den Schwellen, soweit das aus der Senkung der Schwellen und der Schiene über diesen beurtheilt werden kann, etwa 1,5 mal größer ist, als ein eben solcher Druck der Lokomotivräder (vergl. Zusammenstellungen XIII und XIV), so wird durch dieses Verhältnis zugleich ausgedrückt, um wie viel der statische Druck der Tenderräder bei Stellung über der Schwelle durch die dynamische Wirkung vergrößert wird.

Die dynamische Wirkung der Lokomotivräder giebt im Vergleiche mit dem statischen Drucke einen größeren Biegungs-
 Pfeil der Schiene und zwar bei Oberbau IV a einen 1,60 mal bei Oberbau V einen 1,44 mal größeren.

Da der Biegungs-
 Pfeil der Schiene unter dem Tender nach Zusammenstellung XIV 1,24 und 1,36 mal größer ist, als unter der Lokomotive, so ist die dynamische Wirkung der Tenderräder auf die Einbiegung der Schiene von $1,6 \cdot 1,24 = 1,98$ bis $1,44 \cdot 1,36 = 1,96$, d. h. rund zwei mal größer, als die der statischen Belastung.

Da die Vergrößerung des Biegungs-
 Pfeiles der Schiene unter dem Tenderrade durch zweierlei Ursachen veranlaßt wird, erstens durch Umstände, welche bei jedem auf einem biegsamen Träger rollenden Rade vorkommen, zweitens durch Umstände, welche eine besondere Eigenthümlichkeit der Tenderräder bilden, und da der Einfluß dieser zweiten Ursache allein bereits zu 50 % des statischen Druckes ermittelt wurde, während der Einfluß beider zusammen 100 % desselben Druckes beträgt, so muß der Einfluß der ersten dieser Ursachen 50 % des statischen Druckes des Rades ausmachen, d. h. eben so viel, wie im Mittel auch für die Lokomotivräder festgestellt wurde.

Aus Obigem erhellt, daß der mittlere Raddruck der Lokomotive bei der Berechnung des Druckes der Schiene auf die Schwellen, der Senkung der Schwellen, des Druckes auf die Bettung u. s. w. gleich dem statischen und beim Tender 1,5 mal größer, als der statische angenommen werden kann; dagegen soll der mittlere Raddruck der Lokomotive bei der Berechnung der auf die Schiene und auf die Verbindungsstücke im Stöße einwirkenden Momente 1,5 Mal und beim Tender 2 mal größer angenommen werden, als der statische Druck.

Soll die dynamische Wirkung der Tenderräder nicht größer sein, als die der Lokomotivräder, so muß der größte statische Druck T des Tenderrades folgenden Bedingungen genügen:

$$\text{Gl. 17) } \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} 1,5 T \leq G \\ 2 T \leq 1,5 G \end{array} \right\},$$

worin G der statische Druck des Lokomotivrades ist.

Da die zweite Bedingung in der ersten enthalten ist, so kann auch festgestellt werden:

$$\text{Gl. 18) } \dots \dots \dots T \leq \frac{2}{3} G.$$

Die vorgeführten mittleren Werthe des dynamischen Druckes der Räder waren aus Beobachtungen auf gerader, wagerechter und stets in gutem Zustande unterhaltener Strecke abgeleitet. Dessen ungeachtet betragen die Unterschiede des Raddruckes in Folge der Ueberlastung der Räder bis 37 %. Obwohl der dynamische Druck der Räder unter anderen Verhältnissen, z. B. bei Ueberhöhung des äußern Stranges in Bögen, bei größerer Senkungsfähigkeit des Gleises und bei weniger sorgfältiger Unterhaltung unzweifelhaft größer sein mußte, so bliebe doch das Verhältnis zwischen der Wirkung der Lokomotiv- und Tenderräder unverändert.

B. Formänderungen in wagerechtem Sinne und Formänderungen in Folge der Drehung der Schiene.

1. Seitliche Bewegungen des Schienenkopfes.

Unter den Schaulinien der Senkung der Schwellen und der Schiene über diesen (Abb. 31 und 32, Taf. XL) und der Senkung der Schienen zwischen den Schwellen (Abb. 40 und 41, Taf. XL) sind die gleichzeitig aufgenommenen Schaulinien der seitlichen Bewegungen des Schienenkopfes aufgezeichnet. Wie aus diesen Schaulinien ersichtlich ist, sind die seitlichen Bewegungen des Schienenkopfes in erheblich geringerm Maße von der Größe des Raddruckes abhängig, als die lothrechten. Bei Oberbau IV a haben die Querbewegungen des Schienenkopfes meistens nach außen stattgefunden und betragen nicht mehr als 1,5 mm, im Mittel nur etwa 1 mm. Querbewegungen nach innen sind seltener beobachtet und betragen nicht mehr als 1 mm, im Mittel nur etwa 0,6 mm. In einzelnen Fällen waren jedoch unter einer Lokomotive oder unter einem Tender plötzliche Aenderungen in der Richtung der Querbewegungen, oder sogar anhaltende seitliche Schwankungen des Schienenkopfes wechselweise in beiden Richtungen zu erkennen. Bei Oberbau V bemerkte man dieselben Erscheinungen bloß mit dem Unterschiede, daß die Querabweichungen des Schienenkopfes nach außen kleiner waren und im Mittel etwa 0,6 mm betragen, während die Querabweichungen nach innen ebenso oft, wie diejenigen nach außen vorgekommen sind und bis 1,75 mm wuchsen.

Um feststellen zu können, in wiefern die genannten Formänderungen von wagerechter Verschiebung oder von Drehung und Kanten der Schiene abhängig sein können, müssen wir zunächst die Ergebnisse der Beobachtungen über diese letztgenannten Formänderungen untersuchen.

Der Kürze wegen werden wir alle seitliche Verschiebungen der Schiene nach außen, welche Spurerweiterung verursachen, positiv, die entgegengesetzten negativ nennen.

2. Drehung der Schiene um ihre Längsachse.

Die drehende Bewegung der Schiene wurde mittels einer besondern Vorrichtung beobachtet (S. 297), wobei sich der lothrechte Abstand zwischen den Kugelspiegeln vergrößerte oder verkleinerte, je nachdem die Schiene nach außen oder nach innen kippte. Wegen der geringen Maße dieser Formänderungen und in Folge der gewählten Art der Ermittlung konnten diese Formänderungen auf den Schaulinien nicht dargestellt werden, deshalb müssen wir uns auf eine Zusammenstellung der bei den Beobachtungen gewonnenen Zahlenwerthe beschränken.

Bei Oberbau IVa wurde Drehung der Schiene nach außen wie nach innen beobachtet, wobei die Abweichungen in beiden Richtungen bis 35', im Mittel 4' nach außen betragen. Wenn angenommen wird, daß die Achse dieser Drehung in der Unterfläche der Schienenstütze liegt, so ist die betreffende größte seitliche Abweichung des Schienenkopfes gleich 1,4^{mm} nach jeder Seite.

In den meisten Fällen findet die Drehung der Schiene nach außen statt. Bei einem Drittel der Beobachtungen machte sich überhaupt keine Drehung bemerkbar.

Bei Oberbau V sind Drehungen der Schiene ausschließlich nach innen vorgekommen, im Mittel um 16' und höchstens um 46', was einer seitlichen Bewegung des Schienenkopfes von 1,5^{mm} entspricht.

Vergleicht man die gleichzeitig an derselben Stelle eintretenden seitlichen und drehenden Bewegungen mit einander, so findet man, daß diese Formänderungen am Schienenkopfe bezüglich ihrer Richtung und Größe verhältnismäßig selten übereinstimmen. Deshalb sollen diese seltenen Fälle der Uebereinstimmung als zufällige und die Formänderungen selbst als von einander unabhängige betrachtet werden.

Die seitliche Kopfbewegung der Schienen ist also in allen Fällen als Erfolg zweier gesonderter Ursachen, der Verschiebung und der Drehung zu erörtern.

3. Das seitliche Gleiten der Schiene auf ihren Stützen.

Wenn man von der seitlichen Abweichung des Schienenkopfes den durch die Drehung der Schiene verursachten Theil abzieht, so giebt der übrig bleibende Theil das Maß des seitlichen Gleitens der Schiene auf ihren Stützen an und zwar für Oberbau IVa in den Grenzen von +1,2 bis -0,4^{mm} und für den Oberbau V in den Grenzen von +1,7 bis -0,5^{mm}, wobei die durchschnittlichen Werthe dieser Verschiebungen +0,2 und +0,7^{mm} betragen.

4. Die Kräfte, durch welche die seitlichen Schwankungen des Schienenkopfes verursacht werden.

Um die eigentliche Bedeutung der vorgeführten Ergebnisse zu durchschauen, ist es nothwendig, zunächst ihre Ursachen zu untersuchen.

Das seitliche Gleiten der Schiene kann nur als Folge der wagerechten Kräfte eintreten, dagegen kann die Drehung um eine Längsachse durch lothrechte und wagerechte Kräfte verursacht werden.

Wirkt der lothrechte Druck des Rades in einem der äußeren Punkte n' oder n'' im Abstände a von der Mittelebene des Querschnittes auf die Schiene (Abb. 42, Taf. XL), so schneidet die Richtung dieses Druckes die Schienensohle im Abstände $a - \frac{1}{20}h$ oder $a + \frac{1}{20}h$ von der Mitte, worin h die Höhe der Schiene bedeutet.

In Folge des Kraftangriffes P*) außerhalb der Mittelebene wird die Zusammendrückung der Schwelle und ebenso die Verkleinerung des etwa vorhandenen offenen Zwischenraumes zwischen Schiene und Schwelle nicht gleichmäßig erfolgen.

Bezeichnet δ die Eindrückung der Schiene in die Schwelle bei gleichmäßiger Vertheilung des Druckes auf die Schienensohle, so wird die Eindrückung an den Schienenkanten m' und m'' bei schiefer Lastangriffe betragen:

1) wenn das Rad auf die äußere Seite der Schiene drückt:

$$\text{Gl. 19) } \dots \delta' = \delta \left(1 \pm \frac{6 \left(a - \frac{1}{20}h \right)}{b} \right),$$

2) wenn das Rad auf die innere Seite der Schiene drückt:

$$\text{Gl. 20) } \dots \delta'' = \delta \left(1 \pm \frac{6 \left(a + \frac{1}{20}h \right)}{b} \right).$$

Das Ergebnis der Eindrückung ist Drehung der Schiene um einen in der Mitte der Schienensohle liegenden Punkt.

Die seit 1894 auf der Warschau-Wiener Eisenbahn eingeführten 38 kg/m schweren Schienen sind in den Hauptgleisen bereits auf etwa 170 km Länge verlegt, während in den übrigen Theilen der Hauptgleise auf noch etwa 640 km Länge 31,45 kg/m schwere Schienen liegen. Die Breite des Schienenkopfes ist bei beiden Schienenarten verschieden und beträgt bei den 38 kg/m schweren 68^{mm}, bei den 31,45 kg/m schweren 56^{mm}.

Da die Länge der Gleise, in denen die schwereren Schienen liegen, im Vergleiche mit der Gesamtlänge der Gleise unerheblich ist, so hängt die Gestalt der abgenutzten Radreifen hauptsächlich von der geringen Kopfbreite der leichteren Schienen ab und die schweren Schienen werden daher überwiegend auf der äußeren Kante des Schienenkopfes belastet, (Abb. 43, Taf. XL), was auch durch die Art der Abnutzung dieser Schienen bestätigt wird. Dagegen müssen die leichteren Schienen, auch wenn die Räder auf der Mitte ihrer Oberfläche rollen, die Schwellen überwiegend an der Innenkante der Schiene belasten. (Abb. 44, Taf. XL).

Der Drehungswinkel der Schiene für die Grenzfälle wird unter der Annahme festgestellt, daß der Raddruck auf die schwerere Schiene in einer Entfernung von 14^{mm} von der äußeren, und auf die leichtere Schiene in derselben Entfernung von der inneren Kante des Schienenkopfes übertragen wird. Setzt man in die Gl. 19) $a = \frac{68}{2} - 14 = 20$ ^{mm}, die Breite der Unter-

*) Richtiger wird die zur Druckebene rechtwinkelige Seitenkraft von P ins Auge gefaßt. Da aber deren Neigung sehr gering ist, so können beide Kräfte als gleich angesehen werden.

legplatte für die 38 kg/m schweren Schienen $b = 190 \text{ mm}$, und die Höhe der Schiene vermehrt um die Dicke der Unterlegplatte $h = 148 \text{ mm}$ ein, so ist die Größe der Eindrückung in die Schwelle längs der Kanten der Unterlegplatte:

$$\delta' = \delta \left(1 \pm \frac{6(20 - 7,4)}{190} \right) = \delta (1 \pm 0,40)$$

Somit erhält man die Größen der Eindrückungen längs den Kanten der Unterlegplatte, indem man die Größe der Eindrückung bei gleichmäßiger Vertheilung des Druckes mit 1,4 und 0,6 multiplicirt.

Der dem größten Drehungswinkel der Schiene entsprechende größte Unterschied zwischen den Senkungen der Schiene und der Schwelle hat bei den Beobachtungen des Oberbaues IVa $0,21 \text{ mm/t}$ betragen. Diese Größe war jedoch mittels eines Kugelspiegels festgestellt, welcher am Schienenkopfe etwa 50 mm wagerecht von der äußern Kante der Unterlegplatte entfernt befestigt war.

In Folge dessen kann angenommen werden, daß der ermittelte Unterschied zwischen den Senkungen der Schiene und der Schwelle $0,6 + 0,8 \frac{190 - 50}{190} = 1,19$ mal größer war, als der Unterschied, welcher bei gleichmäßiger Vertheilung des Druckes eingetreten wäre. Somit ist

$$1,19 \delta = 0,21 \text{ G.}$$

Für den mittlern Raddruck $G = 6,7 \text{ t}$ ist:

$$\delta = \frac{0,21 \cdot 6,7}{1,19} = 1,14 \text{ mm.}$$

Die in Folge der Wirkung des Raddruckes außerhalb der Mittelebene eintretende Neigung der Schiene nach außen ist daher:

$$\frac{0,8 \cdot 1,14}{190} = 0,0048,$$

was einem Winkel von $17'$ entspricht.

Behufs Ermittlung der Größe der Eindrückung für die 31,45 kg/m schweren Schienen muß zunächst berücksichtigt werden, daß der der stärksten Drehung der Schiene nach außen entsprechende größte Unterschied der Senkungen der Schiene und der Schwelle für diesen Schienenquerschnitt bei den Beobachtungen unter der Lokomotive mit $0,07 \text{ mm/t}$ ermittelt wurde, wobei angenommen werden kann, daß diese Drehung bei derselben Grenzlage des Rades eingetreten ist, die oben für die 38 kg/m schweren Schienen vorausgesetzt wurde. Bei dieser Annahme kann der Werth der größten Eindrückung längs der Kanten der Schienensole berechnet werden, indem in die Gl. 19) eingesetzt wird:

$$a = \frac{56}{2} - 14 = 14 \text{ mm,}$$

$$b = 97 \text{ mm und } h = 123 \text{ mm,}$$

wobei sich ergibt:

$$\delta' = \delta \left(1 \pm \frac{6(14 - 6)}{97} \right) = \delta (1 \pm 0,5).$$

Die wagerechte Entfernung des Kugelspiegels von der äußern Kante der Schienensole war etwa 10 mm . Deshalb war die mittels dieses Kugelspiegels gefundene Größe der Eindrückung der Schiene:

$$\delta \left(0,5 + \frac{97 + 10}{97} \right) = 1,4 \delta,$$

während die mittlere Eindrückung in die Schwelle bei gleichmäßiger Vertheilung des Druckes und bei einem Raddrucke von $6,7 \text{ t}$

$$\delta = \frac{0,07 \cdot 6,7}{1,4} = 0,34 \text{ mm ist.}$$

Bei Beobachtung der 31,45 kg/m schweren Schienen waren jedoch Drehungen ausschließlich nach innen festgestellt. Behufs Ermittlung des größten Drehungswinkels bei Beanspruchung durch lothrechte Belastung soll deshalb angenommen werden, daß sich der Lastangriff in einer Entfernung von 14 mm von der innern Kante des Schienenkopfes befindet. Setzt man in die Gl. 20)

$a = \frac{56}{2} - 14 = 14 \text{ mm}$; die Breite der Schienensole $b = 97 \text{ mm}$ und die Schienenhöhe $h = 123 \text{ mm}$ ein, so erhält man:

$$\delta'' = \delta \left(1 \pm \frac{6(14 + 6)}{97} \right) = \delta (1 \pm 1,24),$$

woraus folgt, daß bei der gemachten Annahme die äußere Kante des Schienenfusses sich heben würde, so daß eine Verkleinerung der Druckfläche entstehen mußte. Die Breite dieser Fläche ist in vorliegendem Falle bekanntlich gleich dem dreifachen Abstände zwischen der wirkenden Kraft und der nächst liegenden äußern Kante der Druckfläche, also $\left(\frac{97}{2} - 20 \right) 3 = 85,5 \text{ mm}$, während die größte Eindrückung bei der innern Kante der Schienensole zweimal so groß ist, als die mittlere.

Dieses Ergebnis scheint zuverlässig zu sein, da, wie aus Zusammenstellung X ersichtlich ist, mittels eines Kugelspiegels in 10 mm Abstand von der äußern Kante der Schienensole die Größe der Eindrückung der Schiene in die Schwelle in vielen Fällen gar nicht festgestellt werden konnte.

Die Größe der Eindrückung dieser leichtern Schiene, bei gleichmäßiger Vertheilung des Druckes auf die ganze Breite der Schienensole, beträgt $0,34 \text{ mm}$. Berücksichtigt man nun die Verkleinerung der Fläche, auf welche der Druck übertragen wird, so erhält man den Werth der größten Eindrückung längs der innern Kante der Schienensole:

$$2 \cdot 0,34 \cdot \frac{97}{85,5} = 0,77,$$

und somit ist die Neigung der Schiene nach innen:

$$\frac{0,77}{85,5} = 0,009,$$

was einem Winkel von $31'$ entspricht.

Die unmittelbar bei den Beobachtungen festgestellten Werthe der größten Drehungswinkel der Schiene stimmen annähernd mit den soeben vorgeführten Werthen überein, welche auf Grund anderer Ergebnisse derselben Beobachtungen, und bei Annahme einer Beanspruchung ausschließlich durch lothrechte Belastung, berechnet wurden. Die beobachteten Erscheinungen einer Drehung der Schiene nach innen und gleichzeitigen Gleitens nach außen stehen deshalb nicht in Widerspruch mit einander.

Es ist zwar bei einigen Beobachtungen eine unbedeutende Verschiebung der Schiene nach innen bis zu $0,5 \text{ mm}$ festgestellt. Die Ursache dieser Verschiebung kann möglicherweise in den abgenutzten Radreifen gesucht werden, welche den Schienenkopf umfassen und bei Querbewegungen der Achse mitnehmen.

Die bei den Beobachtungen ermittelten Größen des Quergleitens der Schiene sind im Allgemeinen wegen der guten Befestigung der Schiene mittels in neue eichene Schwellen eingetriebener Hakennägel unerheblich. Nichts destoweniger beweist das Vorkommen dieses Gleitens, daß die wagerechten Kräfte, von welchen die Schiene beansprucht wird, sogar in gerader Strecke nicht unbedeutend sind. Wenn f_1 die Ziffer der Reibung zwischen Radreifen und Schiene, und f_2 die zwischen Schiene und Stütze bezeichnet, und wenn angenommen wird, daß die Achsenbelastung $2G$ zu gleichen Theilen auf beide Räder übergeht, so ergibt sich der Widerstand der Reibung gegen den seitlichen Druck des Rades:

$$\text{Gl. 21) } R = (f_1 + f_2) G.$$

Wird für trockene Schienen $f_1 = 0,25$ und für einen Oberbau ohne Unterlegplatten $f_2 = 0,50$ angenommen, so ergibt sich, daß eine wagerechte Verschiebung der Schiene, wie sie in dem oben angeführten Falle vorgekommen ist, nur durch einen seitlichen Druck verursacht werden kann, welcher größer ist, als $0,75G$.

Die Entlastung einzelner Räder war nach Zusammenstellung XII bei den Beobachtungen meistens nicht größer als 37% , und dabei machte sich meistens die Abweichung des Schienenkopfes in bestimmter Richtung andauernd unter einigen nach einander folgenden Rädern bemerkbar, woraus folgt, daß die Ursache dieser Abweichung nicht in der Entlastung einzelner Räder gesucht werden kann. Wenn die Werthe der Reibungsziffern auch vielleicht etwas zu hoch angenommen sind, so wird doch der zur Ueberwindung der Reibung nothwendige seitliche Druck des Rades jedenfalls größer sein, als $0,6G$. Das stimmt mit den Ergebnissen der Beobachtungen von Weber und Wöhler überein, obwohl in der letzten Zeit die das Gleis beanspruchenden wagerechten Kräfte etwa zwei mal kleiner angenommen wurden.*)

5. Der Einfluß der Drehung der Schiene auf die Größe der Formänderung in lothrechttem Sinne.

Das wagerechte und lothrechte Ausmaß des Krümmungshalbmessers ρ der Bahn des Kugelspiegels haben bei der 38 kg/m schweren Schiene (Abb. 43, Taf. XL) 127 mm und 38 mm , und bei der $31,45 \text{ kg/m}$ schweren (Abb. 44, Taf. XL) 100 mm und $38,5 \text{ mm}$ betragen. Deshalb ist ρ und der Winkel α , welchen der Halbmesser mit der Wagerechten bildet

bei der schweren Schiene $\rho_1 = \sqrt{127^2 + 45^2} = 134,7 \text{ mm}$ und

$$\alpha_1 = \text{arc. tg. } \frac{127}{45} = 70^\circ 29',$$

bei der leichten Schiene $\rho_2 = \sqrt{100^2 + 38,5^2} = 107 \text{ mm}$,

$$\alpha_2 = \text{arc. tg. } \frac{100}{38,5} = 68^\circ 58'$$

Der größte Drehungswinkel ist für die schwere Schiene $35'$ und für die leichte $46'$, somit ist das lothrechte Ausmaß der Formänderung

für die 38 kg/m schwere Schiene:

$$134,7 (\sin 71^\circ 4' - \sin 70^\circ 29') = 0,46 \text{ mm},$$

*) Zimmermann: Berechnung des Oberbaues. Handbuch der Ingenieurwissenschaften. V. Bd. II. Thl. S. 60.

für die $31,45 \text{ kg/m}$ schwere Schiene:

$$107 (\sin 69^\circ 44' - \sin 68^\circ 58') = 0,50 \text{ mm},$$

was etwa 17% der größten Senkung der Schiene ausmacht.

Der durchschnittliche Drehungswinkel der Schiene beträgt jedoch für die 38 kg/m schwere nur $4'$ nach außen, für die $31,45 \text{ kg/m}$ schwere bloß $16'$ nach innen, und deshalb können sich die in Zusammenstellung I, S. 300 angegebenen mittleren Werthe der Senkung der Schiene für Oberbau IVa um nicht mehr als $0,01 \text{ mm}$, und für Oberbau V um nicht mehr als $0,03 \text{ mm}$ ändern, und diese Berichtigung ist nur für Oberbau V von Bedeutung, da sie in diesem Falle auf eine der Ursachen des bei Oberbau V vorgefundenen, sehr unerheblichen Unterschiedes zwischen der Senkung der Schiene und der Senkung der Schwelle hinweist. Der Biegungspfeil der Schiene zwischen den Stützen ist gleich dem Unterschiede zwischen den Angaben der Kugelspiegel, welche gleichzeitig an der Drehung der Schiene theilgenommen haben, und deshalb konnte die Drehung der Schiene auf ihn gar keinen Einfluß ausüben.

V. Die Formänderungen des Oberbaues in den Schienenstößen.

Die bisher vorgeführten Beobachtungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den ununterbrochenen Theil des Gleises. Die Formänderungen in den Stößen müssen ihrer Eigenart wegen einer besonderen Untersuchung unterzogen werden.

Ast*) hat bewiesen und durch die Beobachtungen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn ist bestätigt worden, daß das Rad im mittlern Theile des Schienenpaares, wo der nicht unterbrochene Strang auf gleich weit von einander entfernten Schwellen ruht, bei Gleichheit der Senkung der Schiene über der Schwelle und zwischen den Schwellen und beim Fehlen von Wendepunkten in dem in Frage kommenden Theile der Biegungslinie der Schiene annähernd in einer Geraden rollt, welche überall gleichen Abstand von der Schienen-Oberkante während des Ruhezustandes hat. Damit das Rad ebenso über den Stoß gehe, ist es nothwendig, daß erstens die Laschen das Biegemoment unverkleinert von dem einen Schienenende auf das andere übertragen, denn nur bei Erfüllung dieser Forderung wird die Biegungslinie des Gleises im Stoße ununterbrochen fortlaufen, und daß zweitens die Senkung der Schienen im Stoße derjenigen im übrigen Theile des Schienenpaares gleich sei.

Eine ungeschwächte Uebergabe des Biegemomentes durch die Laschen ist jedoch, wie Zimmermann und Ast bewiesen haben, sogar vom theoretischen Standpunkte unmöglich. Deshalb wird die Stetigkeit der Biegungslinie im Stoße unterbrochen, und zwischen den beiden herabgebogenen Schienenenden entsteht eine winkelförmige Vertiefung, in welche das Rad hinabrollt.

Die zweite Bedingung, daß die Senkungsgröße im Stoße gleich der in den übrigen Theilen der Schiene sein muß, brauchte eigentlich bei Erfüllung der ersten nicht gestellt zu werden, da die Schiene dann bei gleichem Schwellenabstande im Stoße eine ebensolche Einbiegung annehmen müßte, wie in der Mitte.

*) Comptes rendus du congrès intern. des ch. de fer. IV Session. (St. Pétersbourg 1892.) V. A.

Da diese Erfüllung aber nicht möglich ist, so muß man sich mit einer Verkleinerung der Einbiegung des im Stofse geschwächten Gleises zufrieden geben, die mittels Verkleinerung der Schwellentheilung in und neben dem Stofse erreicht werden kann. *)

Die unzulängliche Wirkung der Stofslaschen, die anerkannte Nothwendigkeit einer Verstärkung des Stofses behufs Verminderung der durch ungleichmäßige Abnutzung der Schienen entstehenden Unterhaltungskosten und das Streben, die Beunruhigungen des Laufes der Fahrzege zu mindern, begünstigten die Einführung neuer Schienenstofsanordnungen, welche die theoretische Behandlung der sich auf die Arbeit des Schienenstofses beziehenden Aufgaben noch mehr erschweren.

Es soll nun untersucht werden, inwiefern Beobachtungen der elastischen Formänderungen dieses Theiles des Gleises zu besserer Lösung dieser Aufgaben beitragen können.

A. Schienenstöße mit Seitenlaschen.

a) Die Formänderungen in lothrechttem Sinne.

1. Beobachtungsverfahren.

Die Beobachtungen der Formänderungen in den Schienenstößen sind in folgender Weise ausgeführt: Winkeleisen mit Kugelspiegeln wurden an jedem der beiden Schienenenden, an der Lasche und an einem gegenüber dem Stofse eingeschlagenem Pflöckchen befestigt, und zwar in der Weise, daß alle Kugelspiegel in einer Lothrechten genau vor dem Stofse saßen. An dem in die Bettung eingetriebenen Pflöckchen war ein als Maßstab für die Schaulinien dienender Doppelspiegel befestigt. Der Abstand der zur Befestigung des Kugelspiegels an der Schiene dienenden Schraube vom Ende der Schiene betrug 15 mm. Die Beobachtungen wurden bei allen Oberbauarten bei verschieden stark angezogenen Bolzen angestellt und erstreckten sich ebenso über Stöße mit Laschen, wie auch ohne Laschen. Für Oberbau III wurden für einen Theil der Beobachtungen die üblichen Laschen durch längere mit 6 Bolzen ersetzt.

Bei der Aufnahme der Schaulinien waren meistens beide Meßvorrichtungen thätig; sie waren an den Enden des beobachteten Schienenpaares, gegenüber den Schienenstößen, aufgestellt (Abb. 20, Taf. XLI). Demzufolge war es möglich, Beobachtungen verschiedener, an einer und derselben Stelle nach einander angewendeter Stofsanordnungen anzustellen und auch gleichzeitig das Verhalten zweier verschiedener, an den Enden des beobachteten Schienenpaares angebrachter Stofsanordnungen unter demselben Zuge zu untersuchen.

2. Allgemeine Kennzeichen der Formänderungen.

Aus den vorgeführten Beispielen der Schaulinien (Abb. 45 bis 55, Taf. XL, XLII u. XLIII) ist ersichtlich, daß sich, wenn keine Laschen angebracht sind, jede Schiene für sich biegt; nachdem also das Rad am abgehenden Schienenende ange-

kommen ist, muß es auf das aufnehmende, bis dahin in Ruhe befindliche hinaufspringen, wonach sich das entlastete Schienenende sofort wieder hebt. *)

Im Schienenstofse mit Laschen kommt eine ähnliche Erscheinung vor, indem die Einbiegung jedes Schienenendes für sich nicht ganz verschwindet, aber durch die Wirkung der Laschen in einem Grade beschränkt wird, welcher von der Steifigkeit, den Mafsen und dem genauen Anliegen der Laschen abhängt.

Der Uebergang jedes Rades über den Stofs wird in der Schaulinie in den Stellen der größten Einbiegung durch einen nach oben gerichteten, zahnartigen Vorsprung, d. h. durch eine augenblickliche Hebung der Schienenenden gekennzeichnet. Diese Hebung entspricht dem Augenblicke, in welchem das Rad zwischen beiden Schienenenden schwebt, und auf das inzwischen in die Höhe geschleunigte, aufnehmende Schienenende hinaufspringt.

Diese Erscheinung kommt besonders deutlich zum Vorschein in den Schaulinien der Formänderungen, welche an Schienenstößen mit schwachen Schienen und Laschen (Abb. 45, Taf. XL und 54, Taf. XLIII) und nicht angezogenen Bolzen (Abb. 50, 52, 53, Taf. XLII und 55, Taf. XLIII) erhalten werden. Die Ganghöhe des Gewindes der Bolzen betrug 2,8 mm.

Die lothrechten Bewegungen der Schienen im Stofse gehen mehr oder weniger vollständig auf die Laschen und Stofschwelle und durch letztere auf die Bettung, sogar auf denjenigen Theil der letztern über, welcher sich unmittelbar unter dem Stofse in der Mitte zwischen den Stofschwelle befindet (Abb. 45, 46 und 47, Taf. XL).

3. Einfluß der Art der Verbindungstheile auf die Formänderungen in den Schienenstößen.

Die erhaltenen Schaulinien ermöglichen eine genaue Beurtheilung des Einflusses der Art der Verbindungsstücke auf die Formänderungen der Schienen im Stofse. Zu diesem Ende genügt es, die beim Uebergange der Lokomotiven gleicher Gattung mit annähernd gleicher Geschwindigkeit erhaltenen Schaulinien in gleichem Maßstabe zu zeichnen und auf einander zu legen, wie in Abb. 45, 46, 47 und 48, Taf. XL, gezeigt ist. Diese Schaulinien zeigen, daß die das Biegemoment von der einen Schiene auf die andere übertragenden Laschen die Weite der Schwankungen der Schienen im Stofse in verschiedenem Grade beschränken. Bei Oberbau I mit etwas abgenutzten Winkellaschen war diese Schwankungsweite am größten, am kleinsten war sie bei neuen langen Doppelwinkel-laschen mit sechs Bolzen.

4. Senkung des Gleises im Schienenstofse.

In der Zusammenstellung XV sind die mittleren Größen der Senkung beider Schienenenden eines Stofses mit bei fest

*) Eine Erklärung der Wirkungsweise des Schienenstofses nebst einer Beurtheilung der verschiedenen Schienenstofsanordnungen findet sich im Berichte des Verfassers: „Ueber die Verstärkung des Schienenstofses,“ welche in der XIII. Versammlung der russischen Eisenbahn-Ingenieure vorgelesen und im russischen „Organ des Vereines der Ingenieure der Verkehrsanstalten“ (1896) gedruckt ist.

*) In Abb. 45, Taf. XL, muß die gestrichelte Schaulinie der Senkung des aufnehmenden Schienenendes im Stofse nach links um 2 mm verschoben werden. Die unbedeutende Einbiegung dieses aufnehmenden Schienenendes, welche sich vor dem Uebergange des Rades über den Schienenstofs bemerkbar machte, wurde dadurch verursacht, daß sich das abgehende Schienenende in Folge des geringen Zwischenraumes zwischen den Schienen während der Biegung an das aufnehmende stemmte.

angezogenen Bolzen auf 1 t der Radlast der Lokomotive zusammengestellt; in der letzten Spalte sind zum Vergleiche die mittleren Senkungsgrößen der Schiene über den Schwellen angegeben.

Zusammenstellung XV.

Oberbau	Mittlere Senkung in den Stößen durch Lokomotive		Mittlere Senkung der Schiene über den Schwellen
	des abgebenden Schienenendes	des aufnehmenden Schienenendes	
	mm/t		
I	0,648	0,625	0,625
II	0,390	0,367	0,388
III mit kurzen Laschen	0,368	0,372	0,322
III mit langen Laschen	0,347	0,340	0,322
IV	0,330	0,325	0,330
IV a	0,371	0,353	0,409
III a m. kurzen Laschen	0,363	0,311	(0,409)
III a m. langen Laschen	0,332	0,280	(0,409)
V	0,54	0,58	0,402

Vergleicht man die Senkungen der beiden Schienenenden eines Stoßes mit einander, so sieht man, daß die Senkung des abgebenden Schienenendes in den meisten Fällen etwas größer ist, als die des aufnehmenden. Diese Erscheinung hängt, wie die, daß die Senkung einer Schwelle bei Stellung des Rades um einen halben Schwellenabstand vor und hinter der Schwelle nicht gleich ist, wahrscheinlich von der Zeitdauer der Wirkung der Belastung ab. Vergleicht man die mittleren Größen der Senkungen der Schienen im Stoße und über den Schwellen mit einander, so zeigt sich, daß die Senkung im Stoße bei den Oberbauarten I, II und III gleich oder größer ist, als die mittlere Senkung der Schiene über den Schwellen, obwohl der Mittenabstand der Stoßschwellen bloß $\frac{5}{8}$ des Mittenabstandes der unter dem mittlern Theile des Schienenpaares liegenden Schwellen beträgt. Bei Oberbau II zeigt sich im Verhalten der sehr starken Doppelwinkellaschen, deren Trägheitsmoment 85 % des Trägheitsmomentes der Schiene ausmacht, in dieser Beziehung kein wesentlicher Unterschied im Vergleiche mit den Winkellaschen des Oberbaues I. Somit reicht keine dieser Laschen zur Erhaltung der Stetigkeit der Biegung im Stoße aus. Sie genügen bei der angegebenen Schwellentheilung nur zur Sicherung einer annähernd gleichen Senkung des Gleises im Stoße und über den Schwellen.

Bei Oberbau IVa ist die mittlere Senkung der Schienen über den Schwellen größer, als die Senkung im Stoße, dagegen war bei Oberbau IV, welcher sich von IVa nur durch die Bettung unterscheidet, die mittlere Senkung der Schienen über den Schwellen kleiner, als im Stoße. Die Ursache dieser Verschiedenheit ist einleuchtend. Nachdem der Grubenkies durch Schotter mit geringerer Bettungsziffer ersetzt war, vergrößerte sich die Senkungsfähigkeit der Schwellen, aber die Durchbiegung im Stoße mußte bei gleichen Schienen und Laschen dieselbe bleiben. Die dadurch verursachte Ungleichmäßigkeit in der Senkung des Gleises könnte durch Vermehrung der Schwellen beseitigt werden. Dagegen hat sich bei Oberbau V die Senkung der Schwellen wegen der verhältnismäßig größeren

Schwellenzahl in dem Grade verkleinert, daß die Einbiegung der Schienen im Stoße größer wurde, als ihre Senkung über den Schwellen, obwohl diese beiden Größen bei Oberbau I gleich waren. Ebenso ist die Durchbiegung im Stoße bei Oberbau III, welcher sich von Oberbau II nur durch längere Schwellen unterscheidet, fast unverändert dieselbe geblieben, dagegen hat sich die Senkungsgröße der Schwellen verkleinert, weswegen beim Uebergange des Rades im Stoße eine Vertiefung entsteht. Dieses kann beseitigt werden entweder durch Auseinanderrücken der unter dem mittlern Theile des Schienenpaares liegenden Schwellen, oder, wenn man die allgemeine Steifigkeit des Gleises nicht vermindern will, durch Verkleinerung des Abstandes der Stoßschwellen.

Der auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angenommene Mittenabstand der Stoßschwellen von 50 cm ist jedoch bereits der möglichst geringste. Bei weiterer Verkleinerung wäre gute Unterstopfung der Stoßschwellen vom Stoße aus schon unmöglich. Deshalb wäre es in diesem Falle besser, die Stoßschwellen unmittelbar aneinander zu rücken und sie nur von außen zu unterstopfen, da dann keinenfalls ein seitliches Ausweichen der Bettung zwischen den Stoßschwellen vorkommen kann.

5. Die ruhenden und schwebenden Schienenstöße.

Bei der soeben erwähnten Lage der Stoßschwellen entsteht ein ruhender Stoß, in welchem die beiden Schienenenden auf zwei aneinander gerückten Schwellen ruhen. Dies veranlaßt uns, die Ursachen einer nähern Betrachtung zu unterziehen, wegen deren die ruhenden Stöße nicht mehr üblich sind und zugleich die Frage zu erörtern, ob die ruhenden Stöße wirklich keine Beachtung mehr verdienen.

Ein Uebelstand des ehemals gebräuchlichen, ruhenden Stoßes bestand darin, daß die Stoßschwelle in Folge der nacheinander eintretenden Einbiegungen der einen und der andern Schiene beständigen Schwankungen um ihre Längsachse unterworfen war, und sich deshalb sehr rasch senkte.

Die Steifigkeit des Gleises im Stoße ist so erheblich geringer, als im mittlern Theile des Schienenpaares, daß eine rasche Senkung der Stoßschwelle des ruhenden Stoßes bei der damals üblichen Entfernung von den nächsten Schwellen und bei dem schwachen Querschnitte der damaligen Laschen ganz begreiflich erscheint. Liegen dagegen unter dem Stoße zwei Schwellen, ist dabei, wie bei Oberbau IV angenommen wurde, der Mittenabstand von den nächst liegenden Schwellen 55 cm und der Mittenabstand der übrigen Schwellen 85 cm, so wird die Senkung sämtlicher Schwellen des Schienenpaares ganz gleich sein, wie Zusammenstellung I zeigt.

Es wurde auch hervorgehoben, daß die Stöße, welche die Räder beim Uebergange von einer auf die andere Schiene erleiden, bei ruhendem Stoße stärker seien, als bei schwebendem und daß die Schienenenden bei erstem wie Hämmer auf den Ambos auf die Unterlegplatte schlagend rasches Abnutzen der Schwellensohle bewirken.

Beide Uebelstände können vermieden werden, wenn unter jedem der beiden Schienenenden eine besondere Unterlegplatte angebracht wird und wenn jedes Schienenende auf einer besondern Schwelle ruht.

Andererseits ist es allgemein bekannt, daß der schwebende Stofs nicht weniger, als der durch eine Schwelle unterstützte, einer ungleichmäßigen Abnutzung unterworfen ist, weshalb auch die Stöße, welche die Räder auf dem schwebenden Stofse erleiden, immer stärker werden.

Einen andern, sehr wichtigen Uebelstand des schwebenden Stofses bilden die bleibenden Formänderungen der Schienenenden, welche sich in Folge der unzureichenden Wirkung der Laschen herunterbiegen. Diese von Coüard*) beschriebene Erscheinung ist auch auf der Warschau-Wiener Eisenbahn bei den aus 6 m langen und 31,45 kg/m schweren Schienen (Abb. 37, Taf. XXXIX) bemerkt worden. Diese Formänderung wurde mittels eines über den Schienenköpfen zwischen zwei Klemmen ausgespannten, dünnen Drahtes gemessen, wobei der Durchhang des Drahtes berücksichtigt wurde. Hierbei wurde festgestellt, daß die Einbiegung der Schienenenden in Bezug auf die Schienenmitte bis 7^{mm} und mehr beträgt.

Durch die Anwendung zweier unmittelbar an einander stofsender Schwellen kann dieser Verbiegung der Schienen im Stofse in nicht unbedeutendem Grade entgegengewirkt werden,

6. Lange Laschen.

Trägt man die Schaulinien der Formänderungen der Stöße mit kurzen und langen Laschen auf einander (Abb. 47, Taf. XI), so sieht man, daß sich die Schwankungsbreite der Schienenenden bei Anwendung langer Laschen verkleinert, der Stofs also steifer wird.

Lange Laschen haben aber noch den weitem Vorzug, daß sie eine Form erhalten können, welche ein Umfassen der ganzen Unterlegplatte ermöglicht. Deshalb wirken die langen Laschen dem Wandern der Schienen bedeutend besser entgegen, als die kurzen, welche sich nur gegen einen Hakennagel stemmen.

7. Das Wandern der Schienen.

In Bezug auf das Wandern der Schienen ist zu bemerken, daß, wenn es auch nach den neueren Untersuchungen durch sehr verschiedenartige Ursachen veranlaßt werden kann, doch eine der wichtigsten in dem bei den Beobachtungen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn festgestellten Hinaufspringen des Rades auf das aufnehmende Schienenende besteht.

Aus den Ergebnissen der Beobachtungen, welche auf verschiedenen Eisenbahnen ausgeführt sind, ist ersichtlich, daß sich das Wandern der Schienen hauptsächlich auf thonigen, ungenügend entwässerten Dämmen mit schlechter Bettung bemerkbar macht. Auf der Nicolai-Bahn (Linie St. Petersburg-Moskau) bemerkte man, daß sich das Wandern nach Ersetzung der 177^{mm} starken Schwellen durch 133^{mm} starke verstärkte und daß es auf denjenigen Streckentheilen die durchweg mit Schotterbettung beschüttet waren, überhaupt nicht vorgekommen ist.

Aus allem Gesagten erhellt, daß sich das Wandern der Schienen vermindert, wenn die Steifigkeit des Gleises vergrößert wird, da dabei die das Anstofsen des Rades an die Querfläche des aufnehmenden Schienenendes verursachende Einbiegung der Schienenenden am Stofse kleiner wird.

b) Die seitlichen Bewegungen und die Drehung der Schienen.

Die seitlichen Bewegungen und die Drehung der Schienen in zur Gleisachse rechtwinkeligem Sinne zeigen in den Stößen mit Doppelwinkel- und Winkellaschen nichts Besonderes im Vergleiche mit denselben Bewegungen im mittlern Theile der Schiene, von welchen sie weder in der Größe noch in der Richtung verschieden sind. Beispiele der Schaulinien der seitlichen Bewegungen der Schienenköpfe in den Stößen sind in Abb. 49, Taf. XL und 51, 52 und 53, Taf. XLII dargestellt.

Die Drehungsachse der Schiene liegt wahrscheinlich, wie aus vorgeführten Beobachtungsergebnissen erhellt, etwa in der Mitte der Schienensohle. Kommt also eine Drehung der Schiene nach innen des Gleises vor, so wird bei dem abgebenden Schienenende eher eine Senkung als eine Hebung des Rollkreises des Rades eintreten, um so mehr, da die Drehung durch Verlegung des Angriffes des Raddruckes nach der innern Kopfkante hin verursacht wird. Wird hierbei noch berücksichtigt, daß das aufnehmende Schienenende nach den Schaulinien der Formänderungen in den Schienenstößen (S. 322) beim Uebergange des Rades höher liegt, als das abgebende, so gelangt man zu dem Schlusse, daß Coüard's Ansicht, nach der die Ursache des Anstofsen des Rades im Schienenstofse und der in einiger Entfernung vom aufnehmenden Schienenende bemerkten Vertiefungen in einer Drehung des abgebenden Schienenendes zu suchen sei, dessen Kopf sich bei dieser Drehung und am Schienenstofse einen stufenförmigen Absatz bildet, durch die Beobachtungen der Warschau-Wiener Eisenbahn nicht bestätigt worden ist. Diese Vertiefungen finden ihre Erklärung in dem Umstande, daß das größte Biegemoment bei Stellung des Rades in einiger Entfernung von diesem Schienenende eintritt. Die augenblicklich angreifende Last des auf das aufnehmende Schienenende hinaufspringenden Rades veranlaßt zwar dieses Schienenende, sich herunterzubiegen, aber während der zu dieser Einbiegung des Schienenendes nothwendigen Zeit rollt das Rad weiter fort.

B. Formänderungen in Schienenstößen besonderer Art.

Die oben beschriebenen Beobachtungen über die elastischen Formänderungen in den Stößen mit seitlichen Laschen bestätigen, daß es bei diesen Stofsanordnungen nicht möglich ist, eine stetige Biegelinie des Gleises im Stofse zu erhalten. Die Folgen der genannten Mängel der Stofsanordnungen mit seitlichen Laschen sind schon beim Betriebe der ersten Eisenbahnen erkannt. Die unzähligen Schienenstofs-Anordnungen, welche in den letzten fünfzig Jahren erdacht und angewendet wurden, beweisen, daß die Nothwendigkeit der Verbesserung der üblichen Stofsanordnungen anerkannt wird und daß die diesbezüglichen Versuche bisher erfolglos blieben. Von den in letzter Zeit in Vorschlag gebrachten Schienenstofs-Anordnungen verdienen besondere Beachtung:

1. der Blattstofs von Ruppell (Abb. 56 bis 58, Taf. XLII)*),
2. die Stofsanordnung von Neumann**) mit in die Schienen eingelassener Lasche (Abb. 59 bis 61, Taf. XLII),

*) Note sur les déformations permanentes de la voie, par M. Coüard. Revue gén. des chemins de fer. 1897.

*) Organ 1891, S. 157.

**) Organ 1894, S. 233, 1897, S. 183.

3. die Stofsfangschiene*) (Abb. 62 bis 67 u. 74, Taf. XLIII).

Diese Schienenstofs-Anordnungen wurden bei der Warschau-Wiener Eisenbahn für 38 kg/m schwere Schienen angefertigt und probeweise angewendet. Nach Beendigung der Beobachtungen der Formänderungen in Stößen mit Seitenlaschen wurden im Jahre 1898 die genannten Stofsanordnungen im Beobachtungsgleise verlegt und beobachtet.

1. Blattstofs von Ruppell (Abb. 56 bis 58, Taf. XLII).

Bei dieser Stofsanordnung ist das Bestreben erkennbar, die Folgen einer durchgehenden Fuge der Lauffläche mittels Falzung zu mildern, von der angenommen wird, daß sie das Rad mittels der zweiten nicht unterbrochenen Hälfte des Schienenkopfes beim Uebergange über den Stofs unterstützt. Aus den Schaulinien (Abb. 68 und 69, Taf. XLIII) ist jedoch ersichtlich, daß der eigenthümliche zahnartige Vorsprung beim Uebergange des Rades über den Zwischenraum im Stofse beim Blattstofse zwar kleiner ist, als bei Seitenlaschen, aber doch vorkommt. Die bedeutenden Querbewegungen des Schienenkopfes beweisen, daß die Steifigkeit des Stofses in wagerechtem Sinne gering ist. Dessen ungeachtet ist der Uebergang des Rades über den Stofs ein ruhiger und auch bei sehr aufmerksamem Hören wird kein Anstossen des Rades im Stofse vernommen. Die Stofsschwellen behalten unverändert ihre Lage.

2. Die Stofsanordnung von Neumann, mit in die Schienen eingelassener Lasche (Kopflasche).

(Abb. 59 bis 61, Taf. XLII und 62, Taf. XLIII).

Diese Stofsanordnung bildet einen Uebergang vom Ruppell'schen Blattstofse zur Stofsfangschiene. Vom Ruppell'schen Stofse unterscheidet sich der Neumann'sche auch dadurch, daß wegen des stumpfen Stofses die übliche Schienenlänge beibehalten wird, während beim Blattstofse die Länge der Ueberblattung verloren geht. Die Neumann'sche Lasche erfüllt wie die Stofsfangschiene die Aufgabe, das Rad beim Ueberfahren der Stofslücke zu unterstützen, bei der Neumann'schen Anordnung wird aber im Gegensatze zur Stofsfangschiene die Lauffläche nicht verbreitert. Die Schaulinien der Formänderungen der Neumann'schen Stofsanordnung (Abb. 70 und 71, Taf. XLIV) unterscheiden sich nicht wesentlich von den mit dem Ruppell'schen Blattstofse erhaltenen. Dasselbe kann auch bezüglich der stofsreifen Fahrt während einiger Wochen nach Verlegung dieser Stofsanordnung gesagt werden. Später machte sich jedoch die nahezu unvermeidliche Verschiedenheit des Stoffes der Schiene und der Lasche bemerkbar. In den beobachteten Stößen waren die Laschen weicher, als die Schiene; deshalb wurden die Laschen an ihren Enden platt geschlagen und überdeckten die Zwischenräume. Die Stofsschwellen bedurften schon zwei Monate nach Verlegung des Nachstopfens.

3. Die Stofsfangschiene.

Diese Stofsverbindung wurde in zwei verschiedenen Anordnungen ausgeführt. Eine dieser Anordnungen (Abb. 62 bis 64, Taf. XLIII) wurde von der das Patent betreibenden

Berliner Gesellschaft angegeben, die andere (Abb. 65 bis 67, Taf. XLIII) vom Verfasser im Auftrage der Direction der Warschau-Wiener Eisenbahn entworfen. Diese zweite Anordnung unterscheidet sich von der ersten durch die Form des Füllstückes, dessen Berührungsflächen mit den Schienen des Gleises und mit der Stofsfangschiene in der zweiten Anordnung breit und genau angepaßt sind und dadurch, daß sich in der zweiten Anordnung zwischen den Köpfen der Fahrschienen und dem Kopfe der Stofsfangschiene ein freier Zwischenraum befindet, so daß die Bolzen nach Abnutzung des Füllstückes nachgezogen werden können. Außerdem ist bei der zweiten Anordnung jede Schiene unmittelbar durch Hakennägel auf der Stofsschwelle von außen befestigt und in Folge dessen war es nothwendig, eine kürzere Stofsfangschiene anzuwenden. In den beiliegenden Schaulinien (Abb. 72 und 73, Taf. XLIV) sind die Senkungen und die seitlichen Bewegungen der Fahrschienen und der Stofsfangschiene in beiden genannten Anordnungen dargestellt. Die Form der Schaulinien der beiden Fahrschienen beweist, daß die Kugelspiegel wegen ihrer Befestigungsart sehr stark zitterten; sie waren nämlich auf kleinen Winkeleisen angebracht, welche unmittelbar gegenüber dem Stofse durch Oeffnungen in der Stofsfangschiene und im Füllstücke hindurch gingen und an die Enden der beiden Fahrschienen angeschraubt waren. Ungeachtet eines möglichst starken Querschnittes dieser Winkeleisen und der festen Verbindung konnte der Uebelstand bei 10 cm Länge der Winkeleisen nicht vermieden werden. In Folge dessen geben die Schaulinien der Formänderungen dieser Stofsanordnungen nur einen Begriff von den allgemeinen Verhältnissen dieser Formänderungen, da die Schwingungen der Spiegel die geringen Verschiebungen der beobachteten Punkte überwogen.

Hierbei muß bemerkt werden, daß die elastischen Formänderungen, wenn sie auch unzweifelhaft sehr wichtige Merkmale für die Beurtheilung der Arbeit der einzelnen Bestandtheile des Oberbaues liefern und zwar für denjenigen Zustand des Oberbaues, bei welchem sie beobachtet sind, doch nicht als das einzige Beurtheilungsmittel bei der vergleichenden Werthschätzung der Zweckmäßigkeit verschiedener Bauarten dienen können.

Durch die bleibenden Formänderungen, also durch Einbiegung, Abnutzung einzelner Bestandtheile der Stofsverbindung wird die Wirkungsweise verändert und deshalb sollten sich die Beobachtungen nicht nur auf den neuen, sondern auch auf den abgenutzten Zustand der Schienenstöße beziehen.

Für die üblichen Schienenstöße mit Seitenlaschen sind die Arten der beständigen Formänderungen aus der vieljährigen Anwendung ziemlich gut bekannt. Bei der Beurtheilung der neuen Stofsanordnungen sollte die Prüfung auf bleibende Formänderungen stets die Ergänzung der Beobachtung der regelmäßigen Wirkung bilden. Obwohl sich nun die angestellten Beobachtungen lediglich auf elastische Formänderungen bezogen haben, so mögen doch aus diesen Erwägungen einige Bemerkungen über die Abnutzung der Stofsfangschienen in der kurzen Zeit von etwa drei Monaten seit dem Verlegen auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angefügt werden.

In Abb. 74, Taf. XLIII ist der Zustand dargestellt, in welchem sich die meisten dieser Stofsverbindungen zur Zeit befinden.

*) Organ 1898, S. 195 und 213, 1895, S. 20, 191 und 246.

Die Stofsfangschiene zeigt ziemlich starke Abnutzung auf der Seite, von welcher das Rad kommt; wenn das Rad die Stofsfangschiene verläßt, fällt es auf die Fahrschiene, was eine Abnutzung des Schienenkopfes an dieser Stelle verursacht. Diese Erscheinung wird erklärlich, wenn berücksichtigt wird, daß die Stofsfangschiene die Lauffläche verbreitert.

Bei der Erwägung der Ursachen der Drehung der Schienen um ihre Längsachse (S. 324) ist auf den Einfluß hingewiesen, welchen vergleichsweise geringe Vergrößerung der Breite des Schienenkopfes auf die Verlegung des Angriffspunktes des Radruckes nach außen ausübt.

Die Stofsfangschiene verbreitert die Lauffläche so bedeutend, daß wenn die Höhe der Stofsfangschiene der üblichen Neigung der Schienen und der Abschrägung der Radreifen entspricht, alle irgendwie abgenutzten Radreifen beim Ueberfahren des Stofses mit ihrem nicht abgenutzten Theile ausschließlich auf der Stofsfangschiene rollen müssen. Die nicht abgenutzten Radreifen werden dagegen nach Beginn der Abnutzung der Stofsfangschiene ausschließlich auf den Fahrschienen rollen. Diese Unbestimmtheit der Lage der Lauflinie, welche vom Grade der Abnutzung der Radreifen abhängt, wird ungleichmäßige Abnutzung der Schienen in den Uebergangspunkten von der einen zur andern Lage der Lauflinie zur Folge haben.

So weit aus den wenigen beobachteten Stößen überhaupt Schlüsse gezogen werden können, ist die Abnutzung bei der von der Warschau-Wiener Eisenbahn entworfenen Anordnung (Abb. 64 bis 67, Taf. XLIII) etwas gleichmäßiger, als bei der der Berliner Gesellschaft. Im Wesentlichen bleiben aber die Uebelstände in beiden Anordnungen gleich.

Da sämtliche genannten Schienenstöße besonderer Art auf der Warschau-Wiener Eisenbahn nur sehr kurze Zeit in Anwendung waren, so kann hier kein endgültiges Urtheil über sie gefällt werden.

Es wurde übrigens bereits erwähnt, daß die Beurtheilung der Zweckmäßigkeit der Bauarten die Grenzen derjenigen Aufgaben übersteigt, welche mittels der Beobachtungen der elastischen Formänderungen gelöst werden können.

VI. Schlusfolgerungen.

Aus den auf der Warschau-Wiener Eisenbahn angestellten Beobachtungen der elastischen Formänderungen des Eisenbahngleises können folgende Schlusfolgerungen gezogen werden:

1. Der Eisenbahn-Damm und der gewachsene Boden unter ihm und in seiner Nähe sind bei der Vorbeifahrt der Züge einer elastischen Senkung unterworfen, welche bei gutem gewachsenem Lehmboden und bei 1^m hohem, aus Thon mit Beimengungen von Sand bestehenden, etwa 60 Jahre lang durch die Last der Züge verdichtetem Damme sogar in einer Tiefe von 7,4^m unter S. O. und in einer Entfernung von 5^m von der Gleisachse noch bemerkbar ist.

2. Die elastische Senkung des Dammes in lothrechter Ebene der Schiene wird von der Bettungssohle nach unten immer kleiner. In dem unter 1 erwähnten Damme und bei 53 cm unter der Schwellensohle starker Bettung war die Senkung des Dammes unter der Bettungssohle, je nach der Beschaffen-

heit der Bettung, gleich einem Viertel bis Drittel der Senkung der Schwelle.

3. Das Verhältnis des von der Schwellensohle auf eine Flächeneinheit der Unterlage der Schwellen übertragenen Druckes in kg zur Senkungsgröße der Schwelle in cm ist von den Eigenschaften nicht nur der Bettung, sondern auch des Unterbaues und des gewachsenen Bodens abhängig und deshalb ist es unrichtig, diesem Verhältnisse den Namen »Bettungsziffer« beizulegen. Dieses, »Schwellen-Unterlage-Ziffer« genannte Verhältnis wird gleich der wirklichen Bettungsziffer, wenn die Senkung der Oberfläche des Erdkörpers, auf welchem die Bettung ruht, gleich Null ist.

4. Die Schwellen-Unterlage-Ziffer soll aus der Senkung aller derjenigen Schwellen ermittelt werden, auf welche der Druck der Lasten, deren Wirkung zur Ermittlung der Ziffer diente, übertragen wurde.

5. Die Bettungsziffer ist abhängig nicht nur von der Beschaffenheit der Bettung, sondern auch von den Mafsen der Bestandtheile des Oberbaues.

6. Die Bettungsziffer für die auf der Warschau-Wiener Eisenbahn beobachteten Arten beträgt:

- a) für eine 53 cm unter Schwellensohle dicke Bettung aus grobkörnigem Grubensande mit Beimengungen von Kies: von 6,9 bis 9 kg/cm²;
- b) für eine ebenso dicke Bettung aus durchschnittlich 40^{mm} starkem Granitschotter: von 4,6 bis 6,5 kg/cm².

7. Wird das Verhältnis des Bettungsdruckes auf eine Flächeneinheit des Unterbaues in kg zu dessen Senkung in cm »Unterbau-Ziffer« genannt und wird vorausgesetzt, daß die Bettung eine zur Erlangung gleichmäßiger Vertheilung des Schwellendruckes auf den Unterbau genügende Dicke besitzt, so kann die gegenseitige Abhängigkeit der Schwellen-Unterlage-Ziffer C, der Bettungsziffer K und der Unterbau-ziffer N annähernd durch die Gleichung:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{K} + \frac{1}{nN}$$

ausgedrückt werden, worin $n = \frac{a}{b}$ das Verhältnis des Mittenabstandes der Schwellen zur Breite der Schwellensohle bezeichnet.

Die so ermittelte »Unterbauziffer« beträgt für den unter 1 näher bezeichneten Fall $N = 5$.

8) Für die mittleren Senkungsgrößen der Schwellen in der Schwellenmitte, an der Schiene und am Schwellenkopfe wurden bei Annahme annähernd gleichmäßiger Unterstopfung der Schwellen auf ihrer ganzen Länge folgende Verhältnisse ermittelt:

- a) bei 2,44^m langen Schwellen und den schwereren Schienen: (Oberbau II):
69 : 100 : 124,
- b) bei 2,70^k langen Schwellen und den schwereren Schienen (Oberbau III und IV a);
74 : 100 : 66,
- c) bei 2,70^m langen Schwellen und den leichteren Schienen (Oberbau V):
91 : 100 : 78.

9) Die Senkungsgröße der Schwellen verändert sich annähernd gleichartig von der Schienenmitte gegen die Schienenenden zu und hängt von der Schwellen-Unterlage-Ziffer, der Vertheilung der Schwellen und vom Schienenquerschnitte ab. Ist der Schienenstofs ein schwebender und beträgt der Mittenabstand der Stofsschwellen 50 cm, der der übrigen Schwellen 75 bis 85 cm, so senken sich die Schwellen unter dem mittlern Theile der Schiene im Allgemeinen mehr, als die in der Nähe des Stofses befindlichen.

10) Zufällige Einflüsse, wie z. B. ungleichmäßige Unterstopfung der Schwellen und unbedeutende Verkrümmungen der Schiene in lothrechttem Sinne können die Senkung einzelner Schwellen in sorgfältig unterhaltenem Gleise um 50 % ändern.

11) Bei Fahrgeschwindigkeiten bis zu 64 km/St. ist ein Einfluß der Geschwindigkeit auf die Senkungsgröße der Schwellen für 1 t des Raddruckes nicht bemerkbar.

12) Der größte Druck der Schiene auf die Schwelle beträgt bei Lokomotivachsständen gleich dem Zwei- bis Dreifachen des Mittenabstandes der Mittelschwellen 0,39 bis 0,44 des Raddruckes.

13) Die Länge, auf welcher sich die Schiene und die Schwellen unter dem Drucke des Rades senken, ist nur sehr wenig vom Schienenquerschnitte, von der Vertheilung der Schwellen und von der Beschaffenheit der Bettung abhängig. Die Entfernung des vordern Rades von dem beobachteten Punkte in dem Augenblicke, in welchem sich die Schiene oder Schwelle in diesem Punkte zu senken beginnt, hat für die beobachteten Oberbauarten zwischen 1,93 m und 2,49 m gelegen.

14) Die Senkung der Schiene über den Schwellen ist im Allgemeinen größer, als die Senkung der Schwellen. Dieser Unterschied, welcher hauptsächlich durch die offenen Zwischenräume zwischen Schiene, Unterlegplatte und Schwelle, durch die Zusammendrückbarkeit und durch theilweises Zermalmen des Schwellenholzes bedingt wird, hängt von der Oberbauart ab. Bei neuen Schwellen und eben erfolgter Befestigung der Schienen ist dieser Unterschied in Gleisen ohne Unterlegplatten kleiner, als in Gleisen mit Unterlegplatten.

15) Die größte Senkung der Schiene zwischen den Schwellen ist nur um ein Geringes größer, als über den Schwellen. Dieser Unterschied war durchschnittlich nicht größer, als 0,3 mm.

16) Obwohl die dynamische Wirkung der Lokomotivräder keine größere Senkung der Schwellen bewirkt, als die statische Belastung, so verursacht sie dennoch eine Vergrößerung des Biegungspfeiles der Schiene zwischen zwei benachbarten Schwellen um etwa 50 %.

17) Bei den auf der Warschau-Wiener Eisenbahn verkehrenden, dreiachsigen Lokomotivgattungen ist die vordere Achse durchschnittlich um 6 % entlastet, während die beiden übrigen Achsen überlastet sind, und zwar durchschnittlich die mittlere um 4 %, die hintere um 2 %.

18) In einer geraden, sorgfältig unterhaltenen Gleisstrecke beträgt die größte zufällige Ueberlastung für die einzelnen Lokomotivräder nicht mehr, als 35 % und die größte zufällige Entlastung nicht mehr, als 37 %.

19) In Folge der dynamischen Wirkung der Tenderräder wird die Senkung der Schwellen gegenüber ruhender Belastung annähernd um 50 % und der Biegungspfeil der Schiene zwischen den Schwellen annähernd um 100 % vergrößert.

20) Aus den Schlusfolgerungen 16) und 19) ist ersichtlich, daß es, wenn die dynamische Wirkung der Tenderräder auf das Gleis nicht größer sein soll, als die der Lokomotivräder, nothwendig ist, die Achsbelastung des Tenders in betriebsfähigem Zustande kleiner als zwei Drittel der größten Achsbelastung der Lokomotive zu halten.

21) Die Drehung der Schiene um ihre Längsachse kann in der geraden Strecke nach innen und nach außen stattfinden. Bei den Beobachtungen betrug der Drehungswinkel bis 46'.

22) Die wagerechte Verschiebung der Schiene rechtwinkelig zur Gleisachse betrug bis 1,7 mm nach außen und bis 0,5 mm nach innen.

23) Die Querbewegung des Schienenkopfes wird in gerader Strecke durch die Drehung der Schiene um ihre Längsachse und durch das Gleiten der Schiene auf ihren Stützen verursacht, wobei beide Bewegungen gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung stattfinden können.

24) In gerader, sorgfältig unterhaltener Strecke sind die durch eine bewegte Last auf beide angegebenen Weisen verursachten Querbewegungen des Schienenkopfes nach außen und innen nicht größer, als 1,75 mm.

25) Bei allen beobachteten Schienenstößen gewöhnlicher Art mit Seitenlaschen in Winkel- und Doppelwinkelform und vier und sechs Bolzen, dann bei den Schienenstößen, welche auf zwei unmittelbar aneinander stoßenden Schwellen ruhen und in den Stofsanordnungen von Rüppell und Neumann vermögen die Laschen die unabhängigen Bewegungen beider Schienenenden nur bis zu gewissem Grade zu beschränken, können aber diese Formänderungen nicht verhindern. Der Wirksamkeitsgrad der Laschen in dieser Beziehung hängt von der Stofsanordnung und von dem genauen Anliegen der Laschen an der Schiene ab.

26) Haben beide Schienenenden im Stofse im unbelasteten Gleise gleiche Höhenlage, so wird das noch unbelastete aufnehmende Schienenende in den Schienenstößen mit seitlichen Laschen und ohne Laschen beim Uebergange des Rades höher liegen als das bereits belastete abgebende, also muß das Rad von dem abgebenden Schienenende auf das aufnehmende hinaufspringen.

27) Das Verhältnis der Senkung der Schienen im Stofse zu ihrer Senkung über den Schwellen hängt nicht nur von dem Mittenabstande der Stofsschwellen und vom Schwellenabstande unter dem mittlern Theile der Schiene, sondern auch von der Schwellen-Unterlage-Ziffer, von den Mäßen der Schwellen und vom Schienenquerschnitte ab.