

innerer Einströmung gezeichnet ist. Die hin- und hergehende Bewegung des Mittelpunktes der Koppel wird vom Kreuzkopfe *B* aus erzeugt, indem eine Stange *BC* den Endpunkt *C* eines bei *D* gelagerten Hebels fasst, an dessen Punkt *E* der Mittelpunkt der Koppel drehbar befestigt ist. Bei Hammermaschinen wird von der Verlängerung dieses Hebels über *D* hinaus die Luftpumpe angetrieben. Damit sich hierbei der Punkt *E* möglichst genau proportional mit dem Kolben bewegt, muss die Stange *BC* möglichst lang gemacht werden. Dadurch rückt die Koppel weit vom Cylinder weg, so dass auch die Schieber-schubstange lang ausfällt. Um die Koppel in Schwingungen zu versetzen, ist an ihr ein Arm *EF* angebracht, der von einem Punkte der Kurbelstange aus bewegt wird. Da aber eine einfache Verbindungsstange ihre Neigung zu stark ändern würde, schaltet Kirk einen um den Punkt *G* der Kurbelstange drehbaren Hebel *HGJ* ein, führt dessen einen Endpunkt *J* in einem Kreise um den festen Punkt *K* und bewegt die Koppel von seinem anderen Endpunkte *H* aus. Die günstigsten Längenverhältnisse der Stangen müssen ausprobiert werden. Man erhält aber keine besonders gleichförmige Schieberbewegung.

Noch verwickelter sind die Steuerungen von **Douglas*** und von **Payton****, bei denen die günstigsten Verhältnisse auch nur ausprobiert werden können.

Alle diese Abarten der Umsteuerung von Gooch haben bisher theils gar keine, theils nur eine sehr beschränkte Anwendung gefunden.

2. Kapitel.

Die Umsteuerung von Stephenson.†

§ 24. Beschreibung der Steuerung.

Die Steuerung von Stephenson ist die älteste der jetzt benutzten Umsteuerungen, zugleich die erste, die eine Änderung nicht nur des Drehungssinnes, sondern auch der Füllungsverhältnisse ge-

* Patentiert 1884. Engineering 1886, II, 104, an einer Lokomotive; Engineering 1889, II, 316 u. Forts.

** Engineering 1888, II, 172.

† Nach Clark, Railway Machinery, ist diese Steuerung von **Howe** erfunden und nur von Stephenson zuerst bei seinen Lokomotiven angewendet worden.

stattete. Sie ist in den Fig. 30 u. 31 auf Taf. V im Gerippe dargestellt. Dabei zeigen die kräftig ausgezogenen Linien wieder die Lage des Steuerungsgetriebes für den linken, die gestrichelten seine Lage für den rechten toten Punkt der Kurbel. In beiden Lagen steht auch die Steuerung selbst in ihrem toten Punkte.

Aus diesen Zeichnungen ist ersichtlich, dass die Steuerung von Stephenson, wie die von Gooch, auch zwei Exzenter besitzt, die ebenfalls als Vorwärts-Exzenter E'_v und Rückwärts-Exzenter E'_r unterschieden werden. Beide haben stets gleiche Halbmesser und meistens auch gleiche Voreilwinkel, wie sie in den Figuren zunächst angenommen sind. Von den Exzentern gehen wieder zwei gleich lange Exzenterstangen nach den beiden Endpunkten einer Koppel, die hier auch einen passend gekrümmten Gleitrahmen bildet. Die Stangen können ebenfalls offene, Fig. 30, oder gekreuzte, Fig. 31, sein, je nachdem die Vorwärts-exzenterstange am oberen, die Rückwärtsexzenterstange am unteren Endpunkte der Koppel angreift, oder umgekehrt. Die Koppel fasst einen Stein, A , der am äusseren Endpunkte der geradlinig geführten Schieberstange AS befestigt ist und überträgt so die Bewegung auf den Schieber. Bei der zunächst vorausgesetzten symmetrischen Anordnung steht die Koppelsehne für die beiden toten Punkte der Kurbel und für den toten Punkt der Steuerung senkrecht und symmetrisch zur Schubrichtung OS des Schiebers. In den Figuren sind diese beiden Stellungen mit $V'R'$ und $V''R''$ bezeichnet.

So weit wäre die Steuerung von Stephenson ganz ähnlich angeordnet, wie die von Gooch. Der Unterschied beider beruht nun darin, dass zur Änderung der Dampfverteilung bei Gooch die Schieberschubstange mit dem Steine in der Koppel verstellt wurde, während bei Stephenson, wo diese Stange ganz fehlt, die Koppel über dem in der Schubrichtung verbleibenden Steine senkrecht zu OS verschoben wird. Es ist selbstverständlich, dass dabei für Vorwärtsfahren der Endpunkt der Vorwärtsexzenterstange dem Steine genähert werden muss und umgekehrt. Die Koppel muss also nach der entgegengesetzten Seite verstellt werden, wie bei Gooch die Schieberschubstange.

Um die Koppel so verstellen zu können, ist sie an einer Hängestange BR' aufgehängt, oder durch eine solche unterstützt. Die Hängestange selbst ist an dem Aufwerfhebel CB der Steuerwelle C befestigt, welche durch die an einem zweiten Hebel CD angreifende Steuerstange vom Stande des Maschinenwärters aus eingestellt wird. Die Koppel wird von der Hängestange entweder in ihrer Mitte gefasst, und zwar gewöhnlich in der Mittellinie des Schlitzes, oder in dem

Angriffspunkte von einer der Exzenterstangen, wie in den Figuren. Infolge dieser Verstellung der Koppel braucht die Steuerung von Stephenson senkrecht zur Schubrichtung mehr Platz als die von Gooch.

An der Steuerwelle ist noch bei horizontalen Maschinen ein Gegengewicht oder eine Gegenfeder angebracht, die das Gewicht der Koppel, der Hängestange und die Hälfte des Gewichtes der Exzenterstangen bei der Änderung der Einstellung ausgleichen soll. Vertikale Maschinen brauchen natürlich keine solche Ausgleichung.

Da die Schieberstange, der Schieber und der Stein für die Bewegung in der Schubrichtung ein starres Ganzes bilden, so stimmt die Bewegung des Schiebers vollständig mit der des Steines überein. Der Mittelpunkt des Steines bleibt aber selbst ununterbrochen in der Mittellinie des Koppelschlitzes. Zur Untersuchung der Dampfverteilung genügt es daher, die Bewegung desjenigen Punktes des Koppelschlitzes zu bestimmen, der sich gerade in der Schubrichtung OS befindet.

§ 25. Gestalt und Aufhängung der Koppel.

Die Gestalt des Schlitzes in der Koppel bestimmt sich hier, wie bei Gooch, aus der Bedingung, dass die Mittellage des Schiebers für alle Einstellungen der Steuerung ungeändert bleiben sollte. Bei Stephenson lässt sich diese Forderung allerdings nicht ganz genau erfüllen, aber doch mit einer für alle Anwendungen durchaus genügenden Annäherung.

Den Ausgangspunkt für die Untersuchung müssen die beiden Totpunktlagen der Kurbel bilden, weil unter der Mittellage des Schiebers stets die Mitte zwischen seinen beiden zugehörigen Lagen verstanden wird. Ändert man nun die Einstellung der Steuerung für diese Totpunktlagen, so verschieben sich, s. Fig. 32, Taf. V, die Endpunkte der Exzenterstangen, das sind auch die der Koppelsehne, in Kreisbögen v', v'', r', r'' mit den Mittelpunkten E'_v, E''_v, E'_r, E''_r und von einem Halbmesser gleich der Länge l der Exzenterstangen.

Weiterhin müssen nun die Längen der Exzenterhalbmesser, der Exzenterstangen und der Koppelsehne gegenseitig so günstig vorausgesetzt werden, dass der Winkelausschlag der Koppelsehne genügend klein bleibt, um ihre Vertikalprojektion stets ihrer wirklichen Länge gleich setzen zu dürfen. Ferner muss eine Aufhängung der Koppel angenommen werden, bei welcher sie, und also namentlich auch ihre beiden Endpunkte, für die beiden Totpunktlagen der Kurbel je in die gleiche Höhe gelangen. Gleichzeitig liegen diese Punkte aber auch je auf einem der vorhin genannten Kreise.

Für eine bestimmte Einstellung der Steuerung befindet sich dann die Mittellage eines Endpunktes der Koppel auf der zugehörigen Horizontalen in der Mitte zwischen den beiden Kreisen v oder r . In Fig. 32 sind diese Mittellagen für einige Höhen angegeben. Dabei wurde beidseitig als Grenze eine Einstellung angenommen, bei welcher je der eine Endpunkt der Koppel in die Schubrichtung OS des Schiebers fällt. Die äussersten benutzten Punkte der Kreise v und r befinden sich daher in einem Abstände von OS , der gleich ist der ganzen Länge der Koppelsehne. Die zu jeder Einstellung gehörenden Mittellagen gehen am raschesten mit dem Zirkel auszuprobieren. Sie sind, so weit sie überhaupt angegeben werden konnten, mit V oder R und dem Grade der Steuerung als Zeiger bezeichnet.

Will man aber Aufschluss über den Verlauf des geometrischen Ortes der Mittellage erhalten, so muss man sie auf einem Umwege bestimmen. Das ist in Fig. 32 für V_{-2} geschehen. Die zugehörigen Totpunktstellungen des oberen Endpunktes der Koppelsehne befinden sich dabei in den Schnittpunkten der Horizontalen durch V_{-2} mit den Kreisen v' und v'' , also in A und B . Zeichnet man nun um O mit der Länge der Exzenterstange als Halbmesser den mit v' und v'' kongruenten Kreis c , der AB in C schneidet, zieht $E'_v D \parallel E''_v F \parallel OC$ bis zu den Kreisen v' und v'' und ferner CD und CF , so erhält man die Parallelogramme $OCDE'_v$ und $OCFE''_v$. Zieht man noch $OG \parallel E'_v A$ und $OH \parallel E''_v B$ bis zum Kreise c , so werden $OGAE'_v$ und $OHBE''_v$ ebenfalls Parallelogramme. Hieraus folgt nun, dass die Strecken AG, CF, BH und CD sämtlich unter sich und mit OE'_v und OE''_v parallel und gleich sind und dass DCF eine Gerade wird. Daher sind aber auch $AGFC$ und $BHDC$ Parallelogramme, so dass $GF \parallel ACB \parallel DH$ ist und sich diese drei Geraden in gleichen Abständen folgen. Zieht man endlich noch GJ und $HN \perp AB$, so ist $\triangle BHN \cong \triangle AGJ$ und daher $BN = AJ$. Hieraus folgt nun, dass der gesuchte Mittelpunkt der Strecke AB zusammenfällt mit dem Mittelpunkte der Strecke JN . Dieser liegt aber auch im Schnittpunkte der Geraden GH und AB und ist gleichzeitig Mittelpunkt der Sehne GH des Kreises c . Die Sehne GH selbst bestimmt sich dabei auf Grund der letzten Entwicklung so, dass ihre Vertikalprojektion gleich ist der Vertikalprojektion der Strecke $E'_v E''_v$. Sind die Stangen gekreuzt, so ändert sich an dieser Entwicklung nichts Wesentliches, nur wird eine Zeichnung weniger deutlich, weil sich die Gerade DCF und der Kreis c viel schleifender schneiden und gleichzeitig die Strecke AB kürzer ist.

Der geometrische Ort der Mittellagen zunächst des oberen Endpunktes der Koppel fällt hiernach zusammen mit dem geometrischen

Orte der Mittelpunkte derjenigen Sehnen des Kreises c , die mit der Strecke $E'_v E''_v$ gleiche Vertikalprojektion besitzen. Die Sehne selbst ändert ihre Länge. Sie ist am kürzesten, wenn sie vertikal, also symmetrisch zu OS steht, wobei ihr Mittelpunkt nach M auf OS fällt. Dieser Punkt könnte unter den gemachten Annahmen auch als V_{+4} oder R_{-4} bezeichnet werden. Er ist gleichzeitig die Mittellage des Endpunktes der Exzenterstange einer einfachen Schubkurbel und bestimmt sich nach § 2 und Fig. 2, Taf. I, unmittelbar über P . Entfernt man sich von dieser symmetrischen Lage, so neigt sich die Sehne immer stärker, sie selbst und der zugehörige Kreisbogen werden immer länger und die Pfeilhöhe immer grösser. Der gesuchte Ort der Mittellagen entfernt sich daher immer mehr vom Kreise c . Bei allen Anwendungen bleibt aber die Neigung der Sehne GH auch in ihren äussersten Lagen stets so gering, dass man die Änderung der Pfeilhöhe auf dem benutzten Gebiete vernachlässigen und als geometrischen Ort einen Kreis auch um O als Mittelpunkt mit OM als Halbmesser einführen darf. In der Figur ist dieser Kreis strichpunktiert und mit m bezeichnet, und es zeigt sich, trotz der ungünstigen Längenverhältnisse, dass die wirklichen Mittellagen, wenigstens zwischen V_0 und R_0 so genau als man überhaupt zeichnen kann, auf den Kreis m fallen. Weiter aussen geschieht das allerdings nicht mehr; so stark geneigte Teile dieses Kreises kommen aber bei den Anwendungen gar nicht mehr in Frage.

Wollte man bei der Bestimmung der Mittellagen die wirkliche Aufhängung der Koppel und ihre Schwingungen berücksichtigen, so müsste man die Punkte A und B in Fig. 32. verschieden hoch annehmen. Als Mittellage des betrachteten Endpunktes der Koppel würde man dann am besten den Mittelpunkt der jetzt geneigten Strecke AB einführen. Seine Bestimmung wäre genau die alte, die Figur würde sich nur so verschieben, als wenn OS gedreht worden wäre. Allerdings würde diese Drehung eine Änderung der Länge OM zur Folge haben, und zwar für jeden Grad der Steuerung um einen anderen Betrag. Fallen aber A und B nie in stark verschiedene Höhen, so bleiben diese Änderungen klein, und als geometrischer Ort der Mittellagen kann doch mit genügender Genauigkeit der vorige Kreis m beibehalten werden.

Für die Rückwärtsexzenterstange würde bei einer symmetrischen Steuerung eine genau symmetrische Untersuchung gelten. Daher fallen die beiden Kreise, in welchen die Mittellagen der Endpunkte der beiden Exzenterstangen, oder der Koppel angenommen werden dürfen, in einen zusammen. Verbindet man die zwei zusammengehörenden

Mittellagen der beiden Endpunkte der Koppel durch eine Gerade, so enthält diese auch die Mittellagen aller übrigen Punkte der Koppelsehne. Diese Gerade ist daher derjenige geometrische Ort, der schon in § 14 als die scheinbare Mittellage der Koppelsehne bezeichnet wurde. Sie bleibt, wie aus den letzten Entwicklungen folgt, bei einer Änderung der Einstellung der Steuerung Sehne des Kreises m , wobei es, so wie die Längenverhältnisse wirklich ausgeführt werden, gleichgültig ist, ob man die Länge der Sehne selbst, oder die Länge ihrer Vertikalprojektion als unveränderlich einführt. Nimmt man daher, um einfachere Ergebnisse zu erhalten, die Länge selbst unveränderlich an, so entspricht einer Änderung der Einstellung der Steuerung eine Drehung der scheinbaren Mittellage der Koppelsehne um den Mittelpunkt O der Welle.

Soll sich nun bei einer solchen Drehung die Mittellage des Schiebers, also auch die des Steines nicht ändern, so muss die Mittellinie des Schlitzes in der Koppel die Schubrichtung OS stets in dem nämlichen Punkte schneiden. Das kann aber nur dann geschehen, wenn der Schlitz in seiner scheinbaren Mittellage nach einem Kreisbogen mit O als Mittelpunkt gekrümmt wird. Welchen von diesen Kreisbögen man wählt, ist für die Unveränderlichkeit der Mittellage des Schiebers gleichgültig. Die Regelmässigkeit der weiteren Dampfverteilung erfordert aber, dass sich der Schlitz nur möglichst wenig von der Sehne entfernt. Daher würde es am besten sein, die Koppelsehne in die Mitte zwischen Sehne und Tangente des benutzten Bogens des Schlitzes zu legen. Eine solche Anordnung kommt aber bei Stephenson kaum vor. Man wählt vielmehr entweder den Kreis m selbst durch die Angriffspunkte der Exzenterstangen, wobei unter Umständen nicht die ganze Länge der Koppel ausgenutzt werden kann, oder man nimmt einen ausserhalb liegenden Kreis, der dann auch bei einteiliger Koppel ihre ganze Länge auszunutzen gestattet.

Die weitere Gestalt der Koppel bleibt wesentlich die gleiche, wie sie in den Fig. 24a bis 24c, Taf. IV, für die Steuerung von Gooch dargestellt ist. Nur kehrt die Koppel hier der Welle ihre hohle Seite zu, und daher müssen bei der Anordnung 24c die Augen für den Angriff der Exzenterstangen auch auf der hohlen Seite angebracht werden.

Je nach der Lage des Schlitzes gegenüber der Sehne muss also der Krümmungshalbmesser seiner Mittellinie bald etwas kürzer, bald etwas länger genommen werden als die Exzenterstange. Der hier eingeschlagene zeichnerische Weg gestattet daher eine genauere Be-

stimmung der Krümmung der Koppel als der gebräuchliche analytische, der für alle beliebigen Anordnungen auf einen Krümmungshalbmesser von genau der Länge der Exzenterstangen führt. Nur Hoefler* giebt einen abweichenden Wert an. Seine Formel ist aber recht unbequem und gilt auch nicht allgemein, sie setzt vielmehr ausdrücklich voraus, dass die Mittellinie des Schlitzes durch die Angriffspunkte der Exzenterstangen geht. Mit dem zeichnerisch gefundenen Werte stimmt seiner nicht genau überein, weil beide unter verschiedenartigen Annäherungen hergeleitet sind. Infolge solcher unvermeidlicher Annäherungen kann die Mittellage des Schiebers nie vollkommen unveränderlich erhalten werden. Doch bleiben die Abweichungen hinreichend klein, so dass die Dampfverteilung durchaus brauchbar ausfällt.

Die Einstellung der Steuerung von Stephenson auf eine bestimmte Dampfverteilung wird, wie schon angegeben wurde, durch ein Heben oder Senken der Koppel erreicht. Dazu ist die Koppel an einer Hängestange aufgehängt, oder durch eine solche unterstützt. Diese Stange lässt man am besten in der Mitte der Koppelsehne angreifen, weil so die Bewegung der Koppel für beide Seiten am gleichartigsten ausfällt. Gleichzeitig sollte die Hängestange aber auch möglichst lang sein, damit sich die Bahn ihres Angriffspunktes an der Koppel möglichst wenig von einer horizontalen Geraden entfernt. Daher lässt man die Hängestange auch oft an einem Endpunkte der Koppelsehne angreifen, und zwar womöglich am gleichen, wie die Exzenterstange für den am meisten benutzten Drehungssinn, um für diesen eine möglichst gute Bewegung zu erhalten.

Damit der Schieber wirklich auf beiden Seiten je gleich weit voröffnet, müsste der unterstützte Punkt der Koppel, in Fig. 31 auf Taf. V ihr oberer Endpunkt, für die beiden toten Punkte der Kurbel bei jeder Einstellung der Steuerung je in die gleiche Höhe gelangen. Dazu müsste aber der Endpunkt des Aufwerfhebels, an dem der andere Endpunkt der Hängestange angreift, je senkrecht über oder unter der Mittellage des unterstützten Punktes der Koppel stehen. Er müsste also einen Kreisbogen beschreiben, der gleichen Halbmesser besitzt und kongruent liegt wie der Bogen, in dem sich die Mittellage des unterstützten Punktes der Koppel selbst verschiebt. Dieser Bogen ist nun, wenn die Koppel in einem ihrer Endpunkte gefasst wird, ein Stück des Kreises m der Fig. 32, sonst ein konzentrischer. Jedenfalls liegt aber der Mittelpunkt dieses Kreises im Mittelpunkte O der Welle. Die Steuerwelle müsste also in der Senkrechten durch

* Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1891, 476.

das Wellenmittel gelagert werden und der Aufwerfhebel eine Länge erhalten, angenähert so gross wie die der Exzenterstangen. Es ist das eine ähnliche Forderung, wie für die Aufhängung der Schieber Schubstange bei der Steuerung von Gooch.

Aber auch bei Stephenson wird der Aufwerfhebel niemals so lang gemacht. Wenn es der Platz nicht anders gestattet, so wird die Steuerwelle auch nicht auf der Seite der Welle gelagert, sondern auf der des Cylinders. Man nimmt die daher rührende Unregelmässigkeit der Dampfverteilung und Ungleichheit des beidseitigen Voröffnens mit in Kauf, um eine bequemere Anordnung des ganzen Steuerungstriebes zu erhalten. Die weitere Bestimmung der Aufhängung erfolgt wesentlich wie bei der Schieber Schubstange von Gooch, nur dass der dort in Fig. 22, Taf. IV, stets symmetrisch zur Schubrichtung liegende Bogen der D hier dann unsymmetrisch ausfällt, wenn die Koppel in einem ihrer Endpunkte unterstützt wird.

§ 26. Herleitung des Diagrammes.

Bei der Steuerung von Stephenson lässt sich, gleich wie bei der von Gooch, ein mit Zirkel und Lineal allein zeichenbares Diagramm nur dann herleiten, wenn man wesentlich ähnliche Annäherungen zulässt wie dort. Man muss also auch hier alle Längenverhältnisse so günstig voraussetzen, dass man annehmen darf, für alle Einstellungen der Steuerung bewegten sich die beiden Endpunkte der Koppelsehne stets in zwei unter sich und mit der Schubrichtung des Schiebers parallelen Geraden, deren gegenseitiger Abstand ununterbrochen gleich der Länge der Koppelsehne bleibt. Durch eine Änderung der Einstellung der Steuerung ändern diese beiden Geraden ihre gemeinschaftliche Höhenlage gegenüber der unveränderlichen Schubrichtung des Schiebers. Man hat es also wieder mit der Zusammensetzung zweier geschränkter Schubkurbelbewegungen zu thun, deren Schränkungswinkel sich aber mit der Einstellung der Steuerung ändern. Die ganze Dampfverteilung ist nach früheren Untersuchungen leicht bestimmbar, sobald der Mittelpunktsort bekannt ist; es kommt also namentlich darauf an, diesen aufzusuchen. Zwei seiner Punkte lassen sich nun sofort besonders einfach angeben. Denkt man sich nämlich in Fig. 30, Taf. IV, die Koppel so weit gesenkt oder gehoben, dass der Endpunkt einer der beiden Exzenterstangen in die Schubrichtung OS des Steines gelangt, so übernimmt das zugehörige Exzenter allein die Führung des Schiebers und zwar wie durch eine einfache Schubkurbel, während das andere Exzenter und die Koppel vorübergehend ganz ausser Wirksamkeit treten. Das zugehörige Diagrammexzenter muss daher mit dem

einen, arbeitenden wirklichen Exzenter K'_v oder K'_r zusammenfallen. Daraus folgt aber, dass K'_v und K'_r zwei Punkte des gesuchten Mittelpunktsortes sind, die unter den der Figur zu Grunde liegenden Annahmen, als die beiden äussersten, mit $+4$ und -4 bezeichnet werden müssen. In Fig. 31, Taf. V, geht die Koppel allerdings nicht so weit auszulenken. Denkt man sie sich aber durch eine solche mit zwei Schilden ersetzt, oder legt man die Angriffspunkte der Exzenterstangen neben den Schlitz, so wird es doch möglich, V oder R nach OS zu bringen. Daher muss der Mittelpunktsort auch hier durch die wirklichen Exzenter K'_v und K'_r hindurchgehen, nur entsprechen diese Punkte keiner erreichbaren Dampfverteilung mehr.

Eine weitere wichtige und auch stets mögliche Einstellung der Koppel ist die zur Schubrichtung OS symmetrische, wie sie in den Figuren 30 u. 31 vorausgesetzt wurde. Dabei bewegt sich nach den zugelassenen Annäherungen der Mittelpunkt der Koppel in der Schubrichtung OS , also gerade so, wie sich der gleiche Punkt bei Gooch immer bewegt. Daher bestimmt sich das zugehörige Diagrammexzenter ± 0 wie dort, entweder über K_v (Fig. 30), indem man $K_v \pm 0 \perp OS$ zieht, oder man kann auch von der am Schlusse von § 13 und in Fig. 18, Taf. III, nachgewiesenen Beziehung Gebrauch machen, wonach $K'_v \pm 0$ um den Schränkungswinkel α gegenüber der Vertikalen geneigt ist, und kurz $K'_v \pm 0 \perp OV$ ziehen. Da dieses Diagrammexzenter einen Voreilwinkel von 90° erhält, so entspricht es dem toten Punkte der Steuerung. Der Punkt ± 0 fällt bei offenen Stangen, bei denen $\alpha > 0$ ist, ausserhalb der Verbindungslinie $K'_v K'_r$, s. Fig. 30, bei gekreuzten Stangen dagegen wegen $\alpha < 0$ innerhalb, s. Fig. 31.

Wird nun die Koppel in allgemeiner Höhenlage eingestellt, so dass z. B. wie in Fig. 33, Taf. V, ihr oberer Endpunkt, offene Stangen vorausgesetzt, um c_v über, der untere um c_r unter der Schubrichtung liegt, so muss das zugehörige Diagrammexzenter auf dem in § 14 allgemein entwickelten Wege bestimmt werden. Trägt man danach an die wirklichen Exzenter die zugehörigen, hier ungleichen Schränkungswinkel $K'_v OK_v = \alpha_v$ und $K'_r OK_r = \alpha_r$ an und zieht $K'_v K_v \perp OK'_v$ und $K'_r K_r \perp OK'_r$, so werden K_v und K_r die Diagrammexzenter zunächst für die beiden Endpunkte der Koppel. Teilt man jetzt noch die Verbindungslinie $K_v K_r$ durch den Punkt P im gleichen Verhältnisse, wie der Stein die Koppel, macht man also

$$PK_v : PK_r = c_v : c_r,$$

so wird P das Diagrammexzenter für die untersuchte Einstellung der Steuerung, also ein weiterer Punkt des Mittelpunktsortes.

Auf diese Art liesse sich der ganze Ort Punkt für Punkt bestimmen, ausgehend von immer anderen zusammengehörigen Wertepaaren von c_v und c_r . Die Zeichnung würde aber undeutlich ausfallen, weil die verschiedenen Geraden $K_v K_r$ sehr nahe zusammenrücken. Auch ginge so das Gesetz der Krümmung des Mittelpunktes nicht zu erkennen. Dieses muss aber aufgesucht werden, damit man den ganzen Ort aus einer möglichst kleinen Anzahl unmittelbar bestimmter Punkte genügend genau zeichnen kann. Das wahre Gesetz ist allerdings sehr verwickelt. Dagegen kommt man auf eine ganz einfache Linie, wenn man von der stets zulässigen Annahme ausgeht, dass der Schränkungswinkel für alle Einstellungen der Steuerung genügend klein bleibt, um $\sin \alpha = \tan \alpha$ setzen zu dürfen. Dann lässt sich, wie in § 13, Gleichung (12) und nach Fig. 33 setzen:

$$\tan \alpha_v = \frac{c_v}{l} = \frac{K'_v K_v}{OK'_v} \quad \text{und} \quad \tan \alpha_r = \frac{c_r}{l} = \frac{K'_r K_r}{OK'_r}. \quad (19)$$

Hieraus folgt, da $OK'_v = OK'_r = r$ ist:

$$\frac{K'_v K_v}{c_v} = \frac{K'_r K_r}{c_r} = \frac{r}{l}. \quad (20)$$

Für den toten Punkt der Steuerung wird $c_v = c_r = c$, gleich der halben Länge der Koppelsehne, und gleichzeitig $K'_v K_{v_0} = K'_r K_{r_0}$; daher ist auch:

$$\frac{K'_v K_{v_0}}{c} = \frac{K'_r K_{r_0}}{c} = \frac{r}{l}. \quad (21)$$

Da ferner nach den der ganzen Entwicklung zu Grunde gelegten Annahmen $c_v + c_r = 2c$ bleibt, also $c_r - c = c - c_v$ ist, so folgt mit Gleichung (20) und (21) auch, da sich r/l weghebt:

$$K'_r K_r - K'_r K_{r_0} = K_{r_0} K_r = K'_v K_{v_0} - K'_v K_v = K_{v_0} K_v. \quad (22)$$

Zwei zusammengehörige Diagrammexzenter für die beiden Endpunkte der Koppel sind also von K_{v_0} und K_{r_0} je gleich weit entfernt, liegen aber auf verschiedenen Seiten der Vertikalen $K_{v_0} K_{r_0}$.

Um nun das Diagrammexzenter der Schieberbewegung für die allgemeine Einstellung zu erhalten, muss man noch die Strecke $K_v K_r$ im Punkte P so teilen, dass sich nach Gleichung (20) verhält:

$$PK_v : PK_r = c_v : c_r = K'_v K_v : K'_r K_r. \quad (23)$$

Diese Teilung geht unter anderen auf folgendem Wege vorzunehmen: Man zieht durch K'_v und K'_r zwei Horizontalen und fällt auf sie Senkrechten aus den Punkten K_v und K_r , deren Fusspunkte A und B sind. Dann ist wegen ähnlicher Dreiecke und nach Gleichung (21) u. (23):

$$\frac{K'_v K_v}{K'_r K_r} = \frac{AK_v}{BK_r} = \frac{c_v}{c_r} = \frac{PK_v}{PK_r} = \frac{PA}{PB}. \quad (24)$$

Die Gerade AB teilt also $K_v K_r$ in dem verlangten Verhältnisse. Auf diesem Wege würde sich der gesuchte Punkt P allerdings nur durch einen unbrauchbar schleifenden Schnitt finden lassen. Die letzte Beziehung der Gleichung (24) zeigt aber, dass der Punkt P auch die Gerade AB in dem verlangten Verhältnisse teilt. Diese Gerade hat nun eine besonders einfache Lage. Da nämlich nach Gleichung (22) $K_v K_{r_0} = K_r K_{v_0}$ ist, und da wegen der Symmetrie der ganzen Steuerung beide Strecken auch gleich gegenüber OS geneigt sind, so müssen ihre horizontalen Projektionen ebenfalls unter sich gleich sein. Die beiden Punkte A und B befinden sich daher in beidseitig gleichen Abständen von der Vertikalen $A_0 K_{v_0} M K_{r_0} B_0$. Sie sind aber auch, weil sie in gleicher Höhe mit K'_v und K'_r liegen, von der Horizontalen OMS gleich weit entfernt. Und daraus folgt, dass die Gerade AB durch den Mittelpunkt M der Strecke $A_0 B_0$ gehen muss. Diese bequemer liegende Gerade AB kann man nun mit einem fast senkrechten Schnitte teilen, indem man zunächst die Verbindungslinie $K'_v K'_r$ durch den Punkt D im verlangten Verhältnisse

$$DK'_v : DK'_r = c_v : c_r \quad (25)$$

teilt und durch D eine Horizontale zieht, die dann AB in dem gesuchten Punkte P schneidet. Der Punkt D selbst lässt sich bestimmen, indem man $AD \parallel A_0 D_0$ zieht.

Für die verschiedenen Einstellungen der Steuerung erhält man dabei auf der Horizontalen durch K'_v eine Punktreihe der A , deren Abstände von K'_v proportional sind mit den c_v , auf der Vertikalen durch K'_r eine Punktreihe der D , deren Abstände von K'_r ebenfalls mit den c_r proportional sind, wenn auch in anderem Verhältnisse. Daher sind aber auch die beiden Punktreihen der A und der D unter sich proportional. Die Punkte des Mittelpunktsortes ergeben sich nun, indem Strahlen aus M nach den Punkten A zum Schnitte gebracht werden mit Horizontalen durch die entsprechenden Punkte D . Dadurch erhält man aber bekanntlich eine Parabel im Rechtecke $MA_0 K'_v D_0$. Der Mittelpunktsort der Steuerung von Stephenson wird also unter den zugelassenen Annäherungen eine Parabel durch die drei Punkte K'_v , K'_r und M oder ± 0 . Da OM die Achse der Parabel ist, M ihr Scheitel, so ist sie dadurch vollständig bestimmt.

Die Parabel ist aber nur auf einem verhältnismässig sehr kleinen Stücke zu beiden Seiten ihres Scheitels nötig. Daher kann man in der Annäherung noch weiter gehen und sie durch einen Kreisbogen ersetzen, der am einfachsten auch durch die gleichen drei Punkte K'_v , ± 0 und K'_r gelegt wird. Sein Mittelpunkt befindet sich, wegen der symmetrischen Lage von K'_v und K'_r , auf der Schubrichtung OS des

Schiebers, und zwar bei offenen Stangen auf der Seite der Welle, wie in Fig. 30, bei gekreuzten auf der Seite des Cylinders, wie in Fig. 31. Da die beiden Punkte K'_v und K'_r als die Mittelpunkte der wirklichen Exzenter unmittelbar gegeben sind, so braucht also nur noch der Punkt M , am einfachsten auf dem in Fig. 31 benutzten Wege, bestimmt zu werden, um dann sofort den ganzen Mittelpunktsort einzeichnen zu können. Die den einzelnen Graden der Steuerung entsprechenden Punkte auf diesem Orte teilen den Abstand der beiden Horizontalen durch K'_v und K'_r im gleichen Verhältnisse, wie gleichzeitig der Stein die Länge der Koppelsehne. Geht dabei die Koppel auf ihrer ganzen Länge auszunutzen, s. Fig. 30, so fallen die Diagrammexzenter für die äussersten Grade $+4$ und -4 mit den wirklichen Exzentern zusammen. Ist das nicht der Fall, s. Fig. 31, so liegen $+4$ und -4 innerhalb K'_v und K'_r .

Mit Rücksicht auf spätere Anwendungen soll hier noch eine wichtige, wenn auch nur angenähert geltende Eigenschaft des Mittelpunktsortes der Stephenson'schen Steuerung nachgewiesen werden. Man kann nämlich eine vorgeschriebene Bewegung der Koppel genügend übereinstimmend durch verschiedene Exzenter hervorbringen, wenn man diese richtig wählt und gleichzeitig die Länge der Koppelsehne in bestimmtem Verhältnisse mit ändert.

Soll bei einer Steuerung von Stephenson durch verschiedene Exzenter stets die gleiche Dampfverteilung erzeugt werden, so müssen alle diese Exzenter den gleichen Mittelpunktsort ergeben. Und da bei Stephenson der Mittelpunktsort durch die wirklichen Exzenter hindurchgeht, so müssen umgekehrt alle neuen Exzenter auf dem alten Mittelpunktsorte liegen. Es seien nun in Fig. 34, Taf. III, E und E' zwei solche gleichwertige Exzenter auf derselben Parabel $EE'PM$, x, y und x', y' ihre auf den Parabelscheitel bezogenen Koordinaten. Aus der am Schlusse von § 13 und in Fig. 18, Taf. III, nachgewiesenen Beziehung und aus der Gleichung der Parabel $y^2 = px$ folgt nun

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{x}{y} = \frac{y}{p}, \quad \operatorname{tang} \alpha' = \frac{x'}{y'} = \frac{y'}{p}. \quad (26)$$

Es bezeichne ferner c und c' die den beiden Exzentern entsprechende halbe Länge der Koppelsehne, l_0 den Halbmesser des Kreises mm der Fig. 32, Taf. V, auf dem sich die Mittellage der Endpunkte der Koppelsehne befindet, so wird:

$$\sin \alpha = \frac{c}{l_0}, \quad \sin \alpha' = \frac{c'}{l_0}. \quad (27)$$

Bleiben nun α und α' genügend klein, um $\sin = \operatorname{tang}$ setzen zu dürfen,

so folgt aus (26) u. (27) zunächst $y/p = c/l_0$ und $y'/p = c'/l_0$ und daraus

$$\frac{y}{c} = \frac{y'}{c'} = \frac{p}{l_0} = \text{const.} \quad (28)$$

Man kann hiernach bei einer Steuerung von Stephenson einen bestimmten Mittelpunktsort mit verschiedenen Exzentern erreichen, wenn diese Exzenter auf dem ursprünglichen Mittelpunktsorte liegen und die Angriffspunkte der Exzenterstangen an der Koppel proportional zur vertikalen Koordinate des Exzentermittelpunktes mit verschoben werden. Mit der Annäherung, mit der man $\sin \alpha = \text{tang } \alpha$ setzen und den Mittelpunktsort als Parabel ansehen darf, wird sich der gerade in die Schubrichtung des Schiebers fallende Punkt der Koppel bei allen solchen Exzentern stets gleich bewegen.

Für andere Punkte der Koppel ergibt sich allerdings eine weniger gute Übereinstimmung. Um das nachzuweisen, soll untersucht werden, wie sich bei einer allgemeinen Einstellung der Steuerung, bei der, wie in Fig. 34, Taf. III, rechts, die Koppel um u aus ihrer symmetrischen Lage gesenkt ist, der im Abstände c' über dem Mittelpunkte der Koppel befindliche Punkt bewegt, einmal, wenn zwei symmetrische Exzenter E vorhanden sind mit einer Länge der Koppelsehne gleich $2c$, das andere mal, bei zwei Exzentern E' mit einer Koppelsehne von der Länge $2c'$, entsprechend Gleichung (28).

Zunächst werde die Koppel durch die Exzenter E geführt vorausgesetzt. Dann bewegt sich der Endpunkt der Vorwärtsexzenterstange in e , im Abstände $c-u$ über OS . Das Diagrammexzenter für diese Bewegung findet sich nach Fig. 33, Taf. V, wenn man

$$EA = \alpha c \text{ und} \quad (29)$$

$$EB = \alpha(c-u) \quad (30)$$

macht, senkrecht unter B in C auf $EC \perp OE$. α bedeutet dabei eine von den Grössenverhältnissen der Steuerung und des Diagrammes abhängige Zahl. Nach der Figur und nach Gleichung (30) ist ferner:

$$CB = EB \cdot \text{tang } \delta = \alpha(c-u) \text{ tang } \delta. \quad (31)$$

Auf der Geraden BM erhält man das Diagrammexzenter für den in OS bewegten Punkt der Koppel in P , wenn P die Strecke BM im gleichen Verhältnisse teilt, wie OS den Abstand zwischen e und m . Zeichnet man dann noch die Vertikale DF so ein, dass sich verhält

$$PD:PC = DF:CB = (c'-u):(c-u),$$

so wird der Punkt D auf PC das Diagrammexzenter für denjenigen Punkt der Koppel, der sich auf e' bewegt. Hieraus und mit (31) folgt

$$DF = \alpha(c'-u) \text{ tang } \delta. \quad (32)$$

Der Schnittpunkt von CDP mit AM wäre das Diagrammexzenter für den Mittelpunkt der Koppel, und daher sind auch auf BM die gegenseitigen Abstände der vier Punkte B, F, P und M proportional mit den gegenseitigen Abständen der vier Horizontalen e, e', OS und m , und es verhält sich, auch mit (28), und auf der Geraden $ME'G$:

$$MF:MB = c':c = y':y = ME':MG = E'F:GB. \quad (33)$$

Hieraus folgt aber zunächst, dass F auf die Horizontale durch E' fällt.

Da E' auch auf der Parabel $MPE'E$ liegt, so ergibt sich aus der Zeichnung der Parabel im Rechtecke und nach Gleichung (28), dass sich verhalten muss:

$$EG:EA = (y - y'):y = (c - c'):c, \quad (34)$$

und daher ist, wenn EA aus Gleichung (29) eingesetzt wird:

$$EG = \alpha(c - c'). \quad (35)$$

Damit und mit Gleichung (30) wird ferner:

$$BG = EB - EG = \alpha(c' - u). \quad (36)$$

Endlich giebt Gleichung (33) und (36) noch:

$$E'F = \frac{c'}{c} GB = \alpha(c' - u) \frac{c'}{c}. \quad (37)$$

Es soll jetzt angenommen werden, dass die Koppel durch Exzenter E' geführt werde, und dass sich also bei der allgemeinen Einstellung der Steuerung der Endpunkt der Vorwärtsexzenterstange in der Horizontalen e' bewege. Dann liegt das Diagrammexzenter für diesen Punkt auf $E'H \perp OE'$ senkrecht unter dem Punkte, der die Strecke $E'J$ im Verhältnisse $(c' - u):c'$ teilt. Nun ist mit Gleichung (29) u. (35) und nach der Figur $GA = EA - EG = \alpha c'$, und hiermit und mit (36) $\frac{E'F}{E'J} = \frac{GB}{GA} = \frac{c' - u}{c'}$.

Daher ist aber F auch der gesuchte Punkt auf $E'J$, und das Diagrammexzenter für die Bewegung des Endpunktes der Vorwärtsexzenterstange in e' liegt senkrecht unter F auf FD in H . Aus der Figur und aus Gleichung (37) folgt dabei:

$$FH = E'F \cdot \tan \delta' = \alpha(c' - u) \frac{c'}{c} \tan \delta'. \quad (38)$$

Je nachdem man die Koppel durch Exzenter E oder E' bewegt, erhält man also für den in e' geführten Punkt nach Gleichung (38) und (32) verschiedene Diagrammexzenter D und H . Beide liegen auf derselben Vertikalen, und das Verhältnis ihrer Abstände von F wird:

$$\frac{HF}{DF} = \frac{c' \tan \delta'}{c \tan \delta}. \quad (39)$$

Da nach der Figur $\tan \delta = (s-x)/y$ und $\tan \delta' = (s-x')/y'$ ist, so schreibt sich dieses Verhältnis auch, wenn man es noch nach Gleichung (28) vereinfacht:

$$\frac{HF}{DF} = \frac{c'}{c} \frac{s-x'}{y'} \frac{y}{s-x} = \frac{s-x'}{s-x}. \quad (40)$$

Nun musste aber Fig. 34, um deutlich zu sein, in stark verzerrten Verhältnissen gezeichnet werden. In Wirklichkeit bleibt die Pfeilhöhe des benutzten Parabelbogens stets bedeutend kleiner. Daher bleiben auch die Koordinaten x und x' sehr klein gegenüber s und dürfen in Gleichung (40) neben s vernachlässigt werden, woraus

$$HF = DF \quad (40a)$$

folgt, so dass also diese beiden Diagrammexzenter in weiterer Annäherung zusammenfallen.

Was hier von den beiden Exzentern E und E' nachgewiesen wurde, gilt auch für je zwei ganz beliebige andere zwei Exzenter. Und das vorhin nach Gleichung (28) für die Dampfverteilung einer Stephenson'schen Steuerung gefundene Ergebnis lässt sich folglich dahin verallgemeinern, dass die ganze Bewegung der Koppel angenähert ungeändert bleibt, wenn man die Exzenter auf dem Mittelpunktsorte verschiebt und gleichzeitig die Länge der Koppelsehne proportional zur Vertikalprojektion dieser Verschiebung mit ändert. Allerdings geht diese Annäherung weiter als die frühere, man muss sie aber trotzdem bei einer späteren Anwendung zulassen, um dort einfache Beziehungen zu erhalten. Wenn übrigens die ganze Bewegung der Koppel für die verschiedenen Exzenter genügend genau als gleich angesehen werden darf, so folgt daraus als selbstverständlich, dass man auch jedes Exzenter einzeln und unabhängig vom anderen ändern kann.

§ 27. Die Dampfverteilung.

Die Dampfverteilung ändert sich bei der Steuerung von Stephenson wesentlich gleichartig, wie bei der von Gooch: Mit der Entfernung vom toten Punkte wächst der Halbmesser des Diagrammexzenters, während der Voreilwinkel abnimmt, so dass auch die Füllung immer grösser wird. Der besondere Verlauf dieser Änderungen weicht aber von dem bei Gooch ab, weil bei Stephenson der Mittelpunktsort gekrümmt ist. Das hat namentlich zur Folge, dass das Voröffnen veränderlich wird, und zwar ist es bei offenen Stangen für die grösste Füllung, bei gekreuzten Stangen für den toten Punkt am kleinsten. Setzt man die beiden Figuren 30 u. 31, Taf. V, in halber natürlicher Grösse gezeichnet voraus, so ergibt sich aus ihnen:

Grad der Steuerung:	0	1	2	3	4
offene Stangen, Füllung:	12,7	28,1	47,4	64,0	76,8 ⁰ / ₁₀₀
» » Voröffnen:	8,2	8,0	6,9	4,8	2,0 mm
gekreuzte Stangen, Füllung:	5,3	20,7	41,0	57,4	69,0 ⁰ / ₁₀₀
» » Voröffnen:	2,8	3,0	4,6	5,8	8,2 mm

In beiden Figuren sind gleiche Überdeckungen angenommen und gleiche Halbmesser der Diagrammexzenter für den 4. Grad. Dabei werden durch eine Kreuzung der Stangen alle Füllungsgrade verkleinert, im Mittel um rund 7 ⁰/₁₀₀. Die Raschheit der Änderung der Füllung wird also hier durch die Anordnung der Stangen nicht wesentlich beeinflusst. Das Voröffnen ändert sich sehr stark, trotzdem die Schränkungswinkel und auch die übrigen Grössen durchaus innerhalb der Grenzen der Ausführungen liegen. Dass diese Änderungen in beiden Figuren verschieden ausgefallen sind, rührt aber nicht von der Anordnung der Stangen, sondern daher, dass in beiden verschiedene Schränkungswinkel für den toten Punkt der Steuerung angenommen wurden.

Die starke Veränderlichkeit des Voröffnens ist ein Nachteil der Steuerung von Stephenson. Bei offenen Stangen verläuft zwar das Voröffnen so, wie es in § 20 als für Lokomotiven günstig angegeben wurde, es ändert sich aber doch zu stark. Gekreuzte Stangen sind dafür sogar ganz unzweckmässig. Bei Maschinen dagegen, die nur selten umgesteuert werden müssen, namentlich wenn sie noch wie die grossen Schiffsmaschinen eine besondere Vorrichtung zum Drehen der Kurbeln in eine gute Anfahrstellung besitzen, geht die Steuerung so anzuordnen, dass sie für die gebräuchlichen Füllungen ein günstiges Voröffnen ergibt. Wenn dieses dann auch bei den selten benutzten Füllungen ungünstig wird, so schadet das nicht viel.

Damit sonst die Dampfverteilung auf beiden Seiten des Cylinders möglichst gleichartig verläuft, sollten zunächst die Exzenterstangen möglichst lang sein. In dieser Richtung scheint nun die Steuerung von Stephenson der von Gooch weit überlegen, weil sie nicht auch noch eine lange Schieberschubstange nötig hat. Doch werden bei beiden Steuerungen die Exzenterstangen in Wirklichkeit verhältnismässig etwa gleich lang ausgeführt. Bei Lokomotiven machen es oft die Verbindungen des Rahmens mit den Führungslinealen unmöglich, die Koppel näher an den Cylinder zu legen. Ausserdem werden bei ihnen und auch bei den feststehenden Maschinen die Exzenterstangen so wie so genügend lang. Für Schiffsmaschinen ist dagegen die Steuerung von Stephenson ganz besonders geeignet und wird dort auch bevorzugt, weil diese wegen der verhältnismässig kurzen Kurbel-

stange für eine Schieberschubstange keinen Platz mehr bieten. Die Exzenterstangen werden aber auch hier nicht länger als bei Gooch.

Da der Stein gewöhnlich genau geradlinig geführt wird, während sich der unterstützte Punkt der Koppel in einem Kreisbogen bewegt, so muss die Steuerung von Stephenson ein mittelgrosses Springen zeigen, verglichen mit den Unterstützungen bei Gooch von der gleichen oder von verschiedenen Seiten der Schubrichtung des Schiebers.

Bei Lokomotiven übt das Spiel der Tragfedern angenähert den gleichen ungünstigen Einfluss aus wie bei Gooch.

Die Steuerung von Stephenson ist als die älteste gute Umsteuerung auch heute noch die am meisten angewendete. Nur bei Lokomotiven wird sie in einigen Ländern, namentlich in Belgien, Deutschland und der Schweiz, immer mehr durch andere Steuerungen verdrängt.

§ 28. Entwerfen einer neuen Steuerung.

Beim Entwerfen einer neuen Steuerung von Stephenson kann man wesentlich den gleichen Weg einschlagen, der oben für Gooch angegeben wurde, doch macht die gekrümmte Gestalt des Mittelpunktsortes einige Abweichungen nötig. Da nämlich die Krümmung für offene und gekreuzte Stangen entgegengesetzt verläuft, so muss von vornherein eine Entscheidung über die Anordnung der Stangen getroffen werden. Auf die Dampfverteilung übt die Art der Stangen, wie aus der Zusammenstellung in § 27, Seite 98 folgt, keinen wesentlichen Einfluss aus. Man wird daher bei der Wahl mehr äusserliche Umstände berücksichtigen müssen: den Sinn des Ausschlages des Steuerhebels und Platzverhältnisse, wie das schon bei der Steuerung von Gooch in § 21 besprochen wurde.

Zunächst kann nun wieder das Steuerungsdiagramm für den äussersten Grad der Steuerung gezeichnet werden wie früher. Bei offenen Stangen geht man dabei von den gleichen Zahlenwerten aus wie in den §§ 6 u. 21. Höchstens könnte es geraten erscheinen, weil der Mittelpunktsort der äusseren Deckungslinie die hohle Seite zukehrt, das Voröffnen oder den Voröffnungswinkel für die stärkste Füllung kleiner zu wählen als dort angegeben wurde, damit beide Grössen bei den am meisten benutzten schwächeren Füllungen nicht zu gross ausfallen. Bei gekreuzten Stangen wird man dagegen die stärkste Füllung eher etwas kleiner wählen, um kein zu grosses Exzenter zu erhalten. Das Voröffnen muss dagegen grösser genommen werden als früher, weil es sonst für die gebräuchlichen kleineren

Füllungen nicht genügen würde. So erhält man im Diagramme die beiden Punkte $+4$ und -4 .

Wird nun zunächst eine Anordnung der Koppel vorausgesetzt, die ihre ganze Länge auszunutzen gestattet, wie in Fig. 30, Taf. V, so sind diese beiden Diagrammexzenter auch schon die wirklichen Exzenter K_v' und K_r' . Damit sind im Maßstabe des Gerippes der Steuerung auch die beiden Exzentermittelpunkte E_v' und E_r' gegeben.

Weiterhin muss die Länge der Koppelsehne, $2c$, gewählt werden, in gleicher Weise wie früher. Bei horizontalen Maschinen ist also

$$2c = (2,5 \text{ bis } 3,0) E_v' E_r', \quad (41)$$

während bei vertikalen, wo die Koppel beim Umsteuern im Mittel senkrecht zur Richtung der Schwerkraft bewegt wird, $2c$ oft grösser vorkommt, nämlich:

$$2c \text{ bis über } 4 E_v' E_r'. \quad (41a)$$

Es fehlt jetzt nur noch die Länge der Exzenterstangen. Diese sollte möglichst gross sein. Man muss daher suchen, die Koppel so nahe an den Cylinder zu legen als es der Platz nur irgend gestattet. Ist danach die scheinbare Mittellage der Koppel in einer Zeichnung der Maschine festgelegt, so geht daraus die Länge der Exzenterstangen in der schon mehrfach benutzten Art zu bestimmen. Sie wird gleich dem Abstände der beiden Punkte P und V .

Sind diese Stücke bekannt, so geht der Mittelpunktort zu zeichnen, und es muss mit seiner Hülfe noch untersucht werden, ob die übrige Dampfverteilung günstig ausfällt und ob sie überhaupt brauchbar ist. Sonst müssen die Annahmen in geeigneter Weise abgeändert werden. Namentlich bei gekreuzten Stangen kann der Mittelpunktort in der Nähe seines Scheitels die äussere Deckungslinie schneiden. Einer solchen unbrauchbaren Dampfverteilung hilft man am einfachsten durch eine Verkleinerung der äusseren Überdeckung ab. Die dadurch bewirkte Vergrösserung der stärksten Füllung schadet nichts. Eine Wiederholung der ganzen Zeichnung mit geeigneteren Annahmen erscheint daher unnötig.

Soll die Koppel nicht in ihrer ganzen Länge ausgenutzt werden, so geht man auf Grund der Entwicklungen am Schlusse von § 26 zunächst so vor, als wenn ihre Länge nur gleich dem ausgenutzten Teile $2c'$ wäre und macht diesen, s. Fig. 31,

$$2c' = (2,5 \text{ bis } 3) (+4 - 4). \quad (42)$$

Nun verschiebt man die Angriffspunkte der Exzenterstangen an der Koppel nach auswärts, gleich weit wie bei Gooch, und nimmt gleichzeitig die wirklichen Exzenter K_v' und K_r' auf dem verlängerten Mittelpunktorte im gleichen Verhältnisse mit, macht also:

$$\frac{2c}{2c'} = \frac{K'_v K'_r}{+4 - 4} = 1,3 \text{ bis } 1,5. \quad (43)$$

Fallen bei einer grossen Maschine die Halbmesser der Exzenter zu gross aus, so kann man schliesslich die Exzentermittelpunkte auf dem Mittelpunktsorte und die Angriffspunkte der Exzenterstangen an der Koppel proportional näher zusammenrücken, dann wird $c' > c$, und die Endpunkte der Koppelsehne müssen für die äussersten Grade der Steuerung auf je die entgegengesetzte Seite der Schubrichtung verstellt werden.

§ 29. Unsymmetrische Steuerungen.

Bei der allgemeinsten Art der Unsymmetrie würden die Exzenter ungleiche Halbmesser und Voreilwinkel und die Exzenterstangen ungleiche Länge erhalten. Unabhängig von der Symmetrie befindet sich nun, wie in § 25 und Fig. 32, Taf. V, nachgewiesen wurde, die Mittellage des Endpunktes jeder Exzenterstange genügend genau in einem Kreisbogen m um O als Mittelpunkt. Im allgemeinsten Falle erhält man zwar für die beiden Endpunkte zwei verschiedene Kreisbögen, mit einer Änderung der Einstellung der Steuerung dreht sich aber die scheinbare Mittellage der Koppelsehne doch auch um O . Damit die Mittellage des Schiebers dabei ungeändert bleibt, muss also auch hier die Mittellinie des Koppelschlitzes in dieser scheinbaren Mittellage nach einem Kreisbogen um O gekrümmt sein. Dadurch erhalten aber die Angriffspunkte der Exzenterstangen verschiedene Abstände vom Koppelschlitz. Solche unsymmetrische Koppeln werden jedoch nicht ausgeführt, und es soll daher ausdrücklich weiterhin eine Koppel gewöhnlicher Anordnung vorausgesetzt werden. Dann müssen die beiden Kreisbögen m in einen zusammenfallen, der die Schubrichtung des Schiebers in M_0 schneidet, s. Fig. 35, Taf. III. Dagegen müssen die beiden Exzenterstangen verschieden lang genommen werden, nämlich $l_v = M_0 N_v$, $l_r = M_0 N_r$.

Um den Mittelpunktsort für eine solche unsymmetrische Steuerung zu finden, zieht man zunächst $K'_v K'_r$ und dann $K'_v A^*$ und $K'_r B$, beide senkrecht zu $K'_v K'_r$. Bei allgemeiner Einstellung mit den Koppelabschnitten c_v und c_r ist dann, wenn der Halbmesser des Kreises m wieder mit l_0 bezeichnet wird, genügend genau:

$$\text{tang } \alpha_v = \frac{c_v}{l_0}, \quad \text{tang } \alpha_r = \frac{c_r}{l_0}. \quad (44)$$

* In Fig. 35 ist aus Versehen der Punkt rechts neben K'_v mit K bezeichnet, anstatt mit A .

Die Diagrammexzenter K_v und K_r für die beiden Endpunkte der Koppel liegen dabei auf $K'_v K_v \perp OK'_v$ und $K'_r K_r \perp OK'_r$ in den Abständen, mit Gleichung (44):

$$K'_v K_v = r_v \tan \alpha_v = c_v \frac{r_v}{l_0}, \quad K'_r K_r = r_r \tan \alpha_r = c_r \frac{r_r}{l_0}. \quad (45)$$

Jetzt muss die Strecke $K_v K_r$ durch P im Verhältnisse von $c_v : c_r$ geteilt werden. Dazu zieht man, ähnlich wie bei den symmetrischen Steuerungen, $K_v A \parallel K_r B \parallel K'_v K'_r$, dann wird mit den Winkelbezeichnungen φ und ψ der Figur:

$$K_v A = K'_v K_v \sin \varphi \quad \text{und} \quad K_r B = K'_r K_r \sin \psi, \quad (46)$$

also mit Gleichung (45) und durch Division, wobei sich l_0 weghebt:

$$K_v A : K_r B = c_v r_v \sin \varphi : c_r r_r \sin \psi. \quad (47)$$

Nun ist $\angle OK'_v K'_r = \varphi$ und $\angle OK'_r K'_v = \psi$, weil die Schenkel bezüglich senkrecht aufeinander stehen. Zieht man noch $OC \perp K'_v K'_r$, so wird daher $OC = r_v \sin \varphi = r_r \sin \psi$, und damit vereinfacht sich Gleichung (47) in:

$$K_v A : K_r B = c_v : c_r \quad \text{und auch} \quad = AP : BP. \quad (48)$$

Das wäre also die gleiche Teilung, wie bei einer symmetrischen Steuerung, nur dass die ganze Figur geneigt steht. Doch zeigt sich auch noch in anderer Richtung eine Abweichung. Bezeichnet man nämlich die Punkte für die Einstellung des Mittelpunktes der Koppel in die Schubrichtung, also für $c_v = c_r = c$, mit dem Zeiger o , so liegt das zugehörige Diagrammexzenter zunächst im Mittelpunkte M der Strecke $K_{v_0} K_{r_0}$. Wegen $c_v = c_r$ folgt aber aus Gleichung (48) $K_{v_0} A_0 = K_{r_0} B_0$, und daher ist M auch Mittelpunkt der Strecke $A_0 B_0$. Ausserdem muss, da $K'_v A_0$ und $K'_r B_0$ beide $\perp K'_v K'_r$ gezogen waren, auch die Gerade durch M gehen, die im Mittelpunkte D_0 der Strecke $K'_v K'_r$ senkrecht auf dieser steht. Ferner folgt aus der Figur mit Gleichung (45):

$$K'_v A = K'_v K_v \cos \varphi = c_v \frac{r_v}{l_0} \cos \varphi, \quad K'_r B = K'_r K_r \cos \psi = c_r \frac{r_r}{l_0} \cos \psi,$$

$$K'_v A_0 = K'_v K_{v_0} \cos \varphi = c \frac{r_v}{l_0} \cos \varphi, \quad K'_r B_0 = K'_r K_{r_0} \cos \psi = c \frac{r_r}{l_0} \cos \psi.$$

Die Subtraktion dieser Gleichungen ergibt:

$$\left. \begin{aligned} K'_v A_0 - K'_v A &= AA_0 = (c - c_v) \frac{r_v}{l_0} \cos \varphi, \\ K'_r B - K'_r B_0 &= BB_0 = (c_r - c) \frac{r_r}{l_0} \cos \psi. \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

Da aber $c - c_v = c_r - c$ ist, so folgt durch Division das Verhältnis:

$$AA_0 : BB_0 = r_v \cos \varphi : r_r \cos \psi \quad \text{auch} \quad = CK'_v : CK'_r = \text{const.} \quad (50)$$

Das beweist aber, dass alle Geraden AB durch einen und denselben Punkt F auf A_0B_0 gehen müssen, der gleichzeitig auch auf der Verlängerung von OC liegt. Die Diagrammexzenter ergeben sich also als die Schnittpunkte des Strahlenbüschels aus F nach der Punktreihe der A oder B und eines Parallelenbüschels durch die proportionale Punktreihe der D auf $K'_vK'_r$, so dass der Mittelpunktort auch hier angenähert eine Parabel wird. Die Achsrichtung dieser Parabel ist $MD_0 \parallel OCF$, und da die beiden Punkte K'_v und K'_r symmetrisch gegenüber MD_0 liegen, so ist MD_0 selbst die Achse, M der Scheitel. In weiterer Annäherung geht aber die Parabel auch wieder durch einen Kreisbogen zu ersetzen, der durch die drei Punkte K'_v , K'_r und M bestimmt ist.

Giebt man wie gewöhnlich den Exzentern gleiche Halbmesser, so fallen die beiden Punkte C und D_0 zusammen; die Achse des Mittelpunktortes geht dann durch den Mittelpunkt der Welle, und die Punkte A_0 , K_{v_0} , M , K_{r_0} und B_0 kommen auf eine Gerade zu liegen, die gleichzeitig Scheiteltangente in M wird.

Unsymmetrische Steuerungen von Stephenson werden gelegentlich angewendet, um die Veränderlichkeit des Voröffnens für den häufiger benutzten Drehungssinn zu verkleinern. Man kann dann, wie z. B. bei Lokomotiven, das Voröffnen für zwei verschiedene Füllungen, die grösste und die gebräuchlichste, vorschreiben. Die Bestimmung der Verhältnisse des Steuerungsgetriebes lässt sich aber nur dann einfach durchführen, wenn gleiche Exzenter und ein kreisförmiger Mittelpunktort vorausgesetzt werden. Die Koppel soll dabei zunächst auf ihrer ganzen Länge ausnutzbar sein. Dann werden die beiden Diagrammexzenter, K'_v in Fig. 36, Taf. III, für die stärkste und A für die gebräuchliche Füllung, in bekannter Weise bestimmt. Ausserdem wählt man die Länge der Koppelsehne und ihre scheinbare Mittellage wie gewöhnlich. Damit finden sich: der Schränkungswinkel α für die Einstellung des Mittelpunktes der Koppel in die Schubrichtung und das zugehörige Diagrammexzenter K_{v_0} für den oberen Endpunkt der Koppel.

Wenn jetzt B der richtige Mittelpunkt des kreisförmigen Mittelpunktortes K'_vAM wäre, so würden folgende Beziehungen bestehen: Da $\angle OK'_vK_{v_0} = \angle OK_{v_0}M = 90^\circ$ ist, so liegen die vier Punkte O , K'_v , K_{v_0} und M auf demselben Kreise vom Durchmesser OK_{v_0} und mit C als Mittelpunkt. Dieser Kreis wurde übrigens schon in Fig. 18, Taf. III, eingeführt. Ferner sind als Peripheriewinkel über dem Bogen $K'_vK_{v_0}$ und als Winkel an der Grundlinie des gleichschenkeligen Dreieckes OCK'_v

$$\angle K'_vOK_{v_0} = \angle K'_vMK_{v_0} = \angle OK'_vC = \alpha. \quad (51)$$

Zieht man BCD , so schneidet diese Linie die Sehne MK'_v in deren Mitte senkrecht, und es ist, weil die Schenkel senkrecht aufeinander stehen

$$\angle MBD = \angle K'_v MK_{v_0} = \alpha. \quad (52)$$

Da nach Gleichung (51) und (52) auch $\angle OBC = \angle MBD = \angle OK'_v C = \alpha$ ist, so müssen die vier Punkte K'_v , C , O und B ebenfalls auf einem Kreise liegen, dessen Mittelpunkt sich in E befindet. Dieser Kreis ist durch die nur von dem Exzenter K'_v und dem Schränkungswinkel abhängigen drei Punkte O , K'_v und C vollständig bestimmt. Bei einer unsymmetrischen Steuerung von Stephenson mit Exzentern von gleichem Halbmesser liegt also der Mittelpunkt des kreisförmigen Mittelpunktsortes jedenfalls auf diesem Kreise um E .*

Hiernach findet sich B einfach in folgender Weise: Man zeichnet den Kreis durch O , K'_v und C um E und errichtet im Mittelpunkte F der Sehne $K'_v A$ $FB \perp K'_v A$. Der Schnittpunkt B dieser Senkrechten mit dem Kreise um E ist dann der gesuchte Mittelpunkt. Verlängert man noch den Mittelpunktsort $K'_v A M$ über M hinaus und bringt ihn zum Schnitte mit dem Kreise um O durch K'_v , so giebt der Schnittpunkt die Lage des Rückwärtsexzenter K'_r .

Die ganze Entwicklung ist zunächst für offene Stangen durchgeführt worden. Dabei rückt das Rückwärtsexzenter K'_r gegenüber einer symmetrischen Anordnung nach links, vielleicht sogar auf die innere Seite der äusseren Deckungslinie. Dann gingen aber die äussersten Grade rückwärts nicht mehr zu brauchen, denn es könnte das Anfahren in dieser Richtung vielleicht unmöglich werden.

Für gekreuzte Stangen gilt die vorige Entwicklung wesentlich ungeändert, nur dass dabei der Mittelpunkt E des Hilfskreises rechts unten von OK'_v zu liegen kommt. Soll dann eine ähnliche Dampfverteilung nach vorwärts erreicht werden, wie sie eben für offene Stangen angenommen wurde, so muss der Mittelpunktsort von links oben nach rechts unten geneigt sein. Dadurch rückt das Rückwärtsexzenter weiter von der äusseren Deckungslinie weg, so dass alle Grade nach rückwärts möglich werden. Dagegen wird das Voröffnen für die äussersten Grade sehr gross, wodurch das Anfahren in dieser Richtung jedenfalls erschwert, vielleicht sogar auch verunmöglicht wird. Im letzten Falle muss man einige der gemachten Annahmen ändern, oder auch auf die ursprünglich gewollte Dampfverteilung verzichten.

Will man bei einer unsymmetrischen Steuerung die Koppel nicht auf ihrer ganzen Länge ausnutzen, so geht man zunächst so vor, als

* Vgl. «Schweiz. Bauzeitung» 1895, Bd. 26, S. 132.

ob das doch der Fall wäre. Dann verlängert man die Koppel und verschiebt die Exzenter auf dem Mittelpunktsorte wie bei der symmetrischen Anordnung. Denn die Beziehungen, die dort zwischen einer solchen Verschiebung der Exzenter und der Verlegung der Angriffspunkte der Exzenterstangen an der Koppel nachgewiesen wurden, gelten auch unverändert bei unsymmetrischer Anordnung, wenn die Abstände der Exzentermittelpunkte von der jetzt geneigten Achse des als Parabel anzusehenden Mittelpunktsortes gezählt werden.

Auch die Steuerung von Stephenson geht wie die von Gooch im ganzen zu schränken, so dass der Mittelpunkt der Welle nicht auf der Schubrichtung des Schiebers liegt. Da aber diese Anordnung kaum je ausgeführt werden wird, so begnüge ich mich auch hier wie bei Gooch damit, auf die «Schweizerische Bauzeitung» 1883, I, Seite 75, hinzuweisen, wo ich sie genauer untersucht habe.

§ 30. Abarten der Umsteuerung von Stephenson.

Trotzdem die Steuerung von Stephenson die älteste und auch heute noch die am meisten benutzte Umsteuerung ist, sind nur ganz vereinzelt Abarten von ihr vorgeschlagen worden.

Nicht als eigentliche Abart ist die Anordnung anzusehen, bei der die Schieberstange in der Nähe des Steines statt mit einer Prismenführung mit einer fest gelagerten Hängestange unterstützt ist, wobei sie in der Nähe des Schieberkastens ein Gelenk erhalten muss. Legt man den Drehpunkt der Hängestange auf die Seite der Steuerwelle, so wird das Springen des Steines etwas verkleinert. Hauptvorteil ist aber der Ersatz der gleitenden Reibung durch Zapfenreibung und die sicherere Führung durch das Drehkörperpaar.

Eher geht die bei den amerikanischen Lokomotiven gebräuchliche Anordnung als Abart anzusehen. Dort sitzt nämlich der Stein am unteren Endpunkte eines um eine vertikale Mittellage schwingenden zweiarmigen Hebels, an dessen oberem Endpunkte die Schieberstange befestigt ist, die übrigens gewöhnlich, wenn auch nicht immer, ohne Einschaltung eines Gelenkes durch das Stopfzeug bis zum Schieber reicht. Durch diese Anordnung erhält man bei Zwillingmaschinen kongruente Cylinder.

Als eigentliche Abart könnte man, ähnlich wie bei Fink, nur ein Exzenter mit 90° Voreilwinkel anwenden, die Exzenterstange mit der Koppel aus einem Stücke herstellen und zur Änderung der Dampfverteilung die Koppel heben und senken. Dadurch erhielte man eine im ganzen sehr kurze Steuerung, aber auch wegen der geringen

Länge der Exzenterstange, eine ungleichförmige Dampfverteilung. Von anderer Seite ist diese Anordnung meines Wissens noch nicht vorgeschlagen worden.

Lobnitz* vermeidet bei einer Maschine mit drei unter je 120° versetzten Kurbeln die Exzenter ganz, indem er jeden Schieber unter Einschaltung einer Stephenson'schen Koppel je von den beiden anderen Kreuzköpfen aus bewegt. Das würde symmetrischen Exzentern mit 30° Voreilwinkel entsprechen. Natürlich muss der Hub der Kreuzköpfe durch Hebelvorrichtungen zuerst stark verkleinert werden. Diese Hebelübersetzung fällt ziemlich verwickelt aus und beeinträchtigt die Gleichförmigkeit der Schieberbewegung.

Um unveränderliches Voröffnen zu erhalten will **Miksche**** die Bewegung von den Exzentern durch einen senkrechten Schlitz abnehmen. An der Koppel hat er auch überall Prismenführungen. Die Anordnung erscheint kaum empfehlenswert.

Ferner hat noch **Mc Culloch**† eine Abart vorgeschlagen. Er benutzt nur ein einziges Exzenter mit 90° Voreilwinkel. Ein Punkt des Exzenterringes auf der vom Cylinder abgewendeten Seite wird durch eine Schwinge angenähert in der Schubrichtung des Schiebers geführt. Von zwei anderen symmetrisch zur Schubrichtung liegenden Punkten des Ringes gehen die beiden Exzenterstangen aus, die dann eine Stephenson'sche Koppel bewegen. Die beiden führenden Punkte des Exzenterringes beschreiben ellipsenartige Bahnen. Der einzige Vorteil dieser Anordnung wäre die Vermeidung zweier Exzenter.

Ausführungen von diesen eigentlichen Abarten der Steuerung von Stephenson sind mir nicht bekannt.

Dagegen ist eine andere Abart bei einigen Lokomotiven der Bahn Paris-Orléans ausgeführt worden††, um das Voröffnen unveränderlich zu erhalten. Zu diesem Zwecke sind beide Exzenter und Exzenterstangen als einfache, nicht geschränkte Schubkurbeln angeordnet. Die Endpunkte der Exzenterstangen bewegen zunächst zwei um die nämliche Achse drehbare Hebel. Von je einem anderen Punkte dieser Hebel gehen zwei Schubstangen nach den beiden Endpunkten der Koppel. Die Längenverhältnisse sind so gewählt, dass sich die beiden Hebel für die beiden toten Punkte der Kurbel genau decken. In diesen Lagen wird die Koppel nach einem Kreisbogen

* Engineering 1888, I, Seite 51. Patent vom 9. Dez. 1887.

** Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architekten-Vereins 1881, 102 und daraus Dingler 1881, 242, 314.

† Engineering 1888, II, Seite 369. Patent vom 6. Juli 1888.

†† Rev. gén. des chemins de fer 1890, 13¹, Seite 242.

gekrümmt, dessen Mittelpunkt in den jetzt zusammenfallenden Anfangspunkten der Schubstangen liegt. Die Anordnung braucht in der Länge gleich viel Platz, wie die Steuerung von Gooch, dagegen hat sie mehr Teile nötig, so dass die Unveränderlichkeit des Voröffnens doch zu teuer erkauft erscheint.

3. Kapitel.

Die Umsteuerung von Allan.

§ 31. Beschreibung der Steuerung.

Die Steuerung von Allan bildet, verglichen mit den bisher untersuchten Steuerungen von Gooch und von Stephenson, eine allgemeinere Anordnung der Umsteuerungen mit veränderlicher Koppel. Während nämlich zur Hervorbringung einer Änderung der Dampfverteilung bei Gooch nur der Stein, bei Stephenson nur die Koppel gehoben oder gesenkt wurde, werden bei Allan beide Stücke gleichzeitig verstellt. Aus den folgenden Untersuchungen geht zu ersehen, dass man der Koppel im allgemeinsten Falle innerhalb gewisser Grenzen jede beliebige Krümmung geben könnte, nur müsste der gegenseitige Betrag beider Verstellungen richtig danach bemessen werden, und umgekehrt. Allan hat nun die denkbar einfachste Gestalt der Koppel gewählt und sie geradlinig gemacht. Das ergibt eine Anordnung der Steuerung wie sie in Fig. 37, Taf. VI, dargestellt ist.

Auf der Welle O befinden sich wieder zwei Exzenter symmetrisch aufgekeilt, das Vorwärtsexzenter E_v und das Rückwärtsexzenter E_r . Von ihnen gehen zwei Exzenterstangen aus, die die Koppel in den beiden Punkten V und R fassen. Dabei liegt bei offenen Stangen, wie in der Figur, V über, R unter der Schubrichtung des Schiebers, bei gekreuzten Stangen V unter, R oberhalb.

Die Koppel wird, wie schon erwähnt, geradlinig ausgeführt. In der Figur ist sie in ihrer ganzen Länge ausnutzbar vorausgesetzt. Sie fasst den Stein A und bewegt so die Schieberschubstange AB , die im Punkte B gelenkig mit der geradlinig geführten Schieberstange BS verbunden ist.

Um die zur Änderung der Dampfverteilung nötige Verstellung der Koppel und der Schieberschubstange hervorbringen zu können,