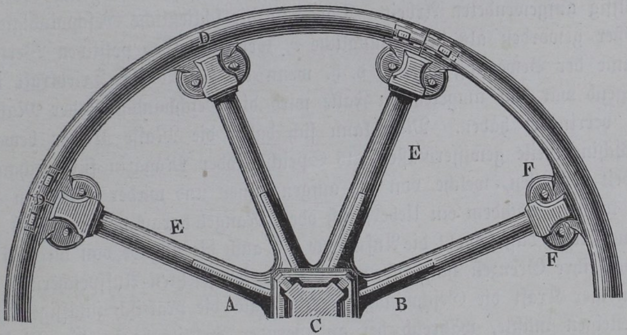
Setzt man überdies noch einen radiallaufenden Splint DE, Fig. 751, ein, so wird die Verbindung des Schwalbenschwanzes AB mit dem Radkranze R noch besonders verstärkt. Statt der Schwalbenschwänze wendet man auch wohl bloße Nasen oder Vorsprünge an, wie z. B. aus der Fig. 752 zu ersehen ist, welche überdies noch die Verbindung der Arme mit dem Wellkranze zeigt. Es ist AB der abgebrochen gezeichnete Arm, und es sind DD die Nasen im Radkranze und EE in der Rosette, FF ... und GG ... Bolzen, wodurch die Armenden gegen ihre Lagerungsflächen gedrückt werden.

Die Verbindungsstellen der Radfelgen liegen entweder zwischen den Verbindungsstellen mit den Radarmen, oder sie fallen mit diesen zusammen. Die letztere Anordnung zeigt Fig. 753. Die Arme des hier abgebildeten Rades bilden mit dem auf der Welle C aufgekeilten Wellkranze AB ein

Fig. 753.



Ganzes, und sind dagegen mit dem Radkranze durch Schwalbenschwänze D und Schraubenbolzen FF verbunden.

Wenn die Welle, worauf das Schwungrad sitzt, zur Ausgleichung der Gewichte ein Gegengewicht erfordert, so wird dieses mit dem Schwungrade verbunden, indem man an der dem Schwerpunkte des auszugleichenden Gewichtes gegenüber liegenden Stelle ein Stück Blei anbringt, wozu man gleich beim Gusse des Ringes eine Höhlung am inneren Umfange desselben aussparen kann.

Wirkung der Schwungräder. Die Wirkung von Schwungrädern hat man sich folgenderart vorzustellen. Wenn in einer Maschine irgend welcher Art die von der treibenden Kraft in einem gewissen kleinen Zeittheile verrichtete mechanische Arbeit genau denselben Betrag hat, wie die gleichzeitige Arbeit aller nutzbaren und schädlichen Widerstände zusammen, so wird in dieser Zeit die Geschwindigkeit der Maschine unverändert bleiben. Ist §. 190.

jedoch eine solche Gleichheit der elementaren Arbeiten von Kraft und Last nicht vorhanden, so stellt sich unter allen Umständen eine Aenderung in dem Gange der Maschine ein, und zwar nimmt dieselbe eine größere oder kleinere Geschwindigkeit an, je nachdem die treibende Kraft eine größere oder geringere Arbeit verrichtet als die Widerstände. Bezeichnet etwa A die Differenz dieser mechanischen Arbeiten während einer bestimmten Zeit, und ist M die gesammte auf einen Punkt reducirt gedachte Masse (s. Thl. I, §. 306) aller bewegten Theile der Maschine, so hat dieser Punkt seine zu Anfang der Zeit etwa mit v bezeichnete Geschwindigkeit zu Ende dieses Zeittheilchens in eine solche Geschwindigkeit v_1 verändert, für welche die Gleichung gilt

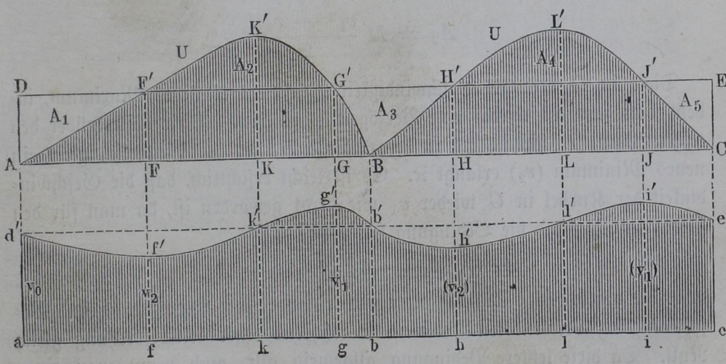
$$A = M \frac{v_1^2 - v^2}{2},$$

d. h. der Zuwachs an lebendiger Kraft der Maschine ist gleich der überschüssig aufgewendeten Arbeit. Dabei ist die schließliche Geschwindigkeit v_1 größer geworden als die anfängliche v, wenn A einen positiven Werth im Sinne der Bewegung gehabt, d. h. wenn die Arbeit der Triebkraft überwiegend war, im umgekehrten Falle wird die Geschwindigkeit der Maschine sich verringert haben. Man kann sich daher die Masse M der bewegten Maschinentheile gewissermaßen als Speicher oder Magazin für mechanische Arbeit vorstellen, welche von ihr aufgenommen und wieder abgegeben werden kann, je nachdem ein Ueberschuß oder Mangel daran vorhanden ist. Es ist natürlich, daß sowohl die Aufnahme als auch die Abgabe von mechanischer Arbeit ihre Grenzen hat, indem bei einer fortgesetzten Auffspeicherung von lebendiger Kraft die Geschwindigkeit sehr bald die praktisch zulässige Größe übersteigen müßte, während bei andauernder Arbeitsabgabe die Maschine schnell zur Ruhe kommen würde. Ein solcher Zustand fortwährender Beschleunigung findet immer nur während des sogenannten Anlaufes einer Maschine, d. h. zu Beginn ihrer Bewegung und zwar so lange statt, bis die zum normalen Betriebe erforderliche Geschwindigkeit erzeugt ist. Ebenso ist gegen Ende der Bewegung beim Abstellen der Maschine der sogenannte Auslauf als eine kurze Periode ununterbrochener Arbeitsabgabe von Seiten der bewegten Massen gekennzeichnet, welche Periode mit dem gänzlichen Stillstande der Maschine ihren Abschluß erreicht. Der zwischen dem Anlaufe und Auslaufe gelegene dem eigentlichen normalen Betriebe entsprechende Bewegungszustand der Maschine ist als der Beharrungszustand derselben aufzufassen, in welchem die Geschwindigkeit zwar gewissen Schwankungen unterworfen ist, die aus der Verschiedenheit von Kraft und Last in oben gedachter Weise entspringen, aber in diesem Zustande werden doch stets regelmäßige Perioden wiederkehren, innerhalb deren die Arbeit der Kraft gerade gleich derjenigen der Widerstände ist. Eine solche Periode ist z. B. bei den

Dampfmaschinen durch eine Umdrehung der Kurbel dargestellt, wie aus den Untersuchungen im sechsten Capitel hervorgeht, doch kommen auch Fälle vor, in denen die Dauer einer Periode nicht von derjenigen der Kurbeldrehung, sondern von der Natur des Arbeitsprocesses abhängt. Bei Eisenwalzwerken z. B. ist der Widerstand, welchen die Luppe oder Schiene dem Durchwalzen entgegensetzt, sehr bedeutend, wogegen in der Pause des Zurückführens der Schiene behufs erneueten Durchwalzens nur die Nebenhindernisse des Walzwerks zu überwinden sind. In dieser Zwischenzeit wird daher die ganze Arbeit der Betriebsmaschine zur Beschleunigung der Massen verwendet, welche vermöge der hierbei aufgenommenen lebendigen Kraft die Maschine bei dem darauf folgenden Auswalzen wesentlich unterstützen. Die Wirkung der Schwungmassen gewährt also hierbei die Möglichkeit, die Arbeit, welche eine verhältnißmäßig schwache Maschine während der ganzen Dauer einer Periode verrichtet, in dem kleineren Zeitraume des eigentlichen Arbeitsprocesses zu concentriren. Hiervon macht man ganz besonders Gebrauch bei gewissen Maschinen, wie z. B. bei Lochwerken und Prägmaschinen, bei denen der nur während ganz kurzer Zeit zu überwindende Widerstand eine so bedeutende Größe besitzt, daß zur directen Ueberwindung derselben durch die Dampfmaschine die letztere ganz außerordentliche Dimensionen erhalten müßte; während bei dem Vorhandensein eines Schwungrades von genügender Masse und Geschwindigkeit die Verwendung einer mäßig starken Maschine zum Ziele führt.

Man bekommt ein deutliches Bild von der Wirkung der Schwungräder z. B. bei Dampfmaschinen mittelst graphischer Darstellungen, welche sich an die in §. 153 in Bezug auf die Kurbelbewegung gegebenen anschließen. Es möge zu dem Zwecke in Fig. 754 die Grundlinie AC gleich dem Umfange

Fig. 754.



$2\pi r$ des Kurbelkreises einer doppeltwirkenden Dampfmaschine gemacht sein, so daß die Endpunkte A und C dem einen und die Mitte B dem anderen todten Punkte entsprechen. Ferner sei die Curve $AF'K'BL'C$ so gezeichnet, daß ihre Ordinaten die am Umfange des Kurbelzapfens von dem Dampfkolben ausgeübten tangentialen Umdrehungskräfte darstellen. Ist dann $AD = CE$ der gleichfalls auf den Kurbelarm reducirte constante Widerstand P der Maschine, so stellt das Rechteck AE die Arbeit des Widerstandes für eine Umdrehung dar und die zwischen der Curve $AK'BL'C$ und der Axe AC enthaltene Fläche repräsentirt die mechanische Arbeit des Dampfes für dieselbe Periode. Diese beiden Flächenräume haben für den Beharrungszustand der Maschine gleiche Größe. Nimmt man nun an, daß die Kurbel im todten Punkte A eine Geschwindigkeit v_0 habe, welche auf einer anderen Basis ac gleich ad' aufgetragen sein mag, so erkennt man, daß die Kurbel zunächst von dem Punkte A aus einer Verzögerung ausgesetzt ist, und zwar so lange, als die treibende Kraft oder die Ordinate der Curve U kleiner ist als der Widerstand $AD = P$. Die Geschwindigkeit v_0 der Kurbel in A wird daher in F einen geringeren Werth v_2 angenommen haben, welcher sich durch die Gleichung

$$A_1 = M \frac{{v_0}^2 - {v_2}^2}{2}$$

bestimmt, worin M die auf den Kurbelzapfen reducirten Massen aller bewegten Maschinentheile, und A_1 die durch die Fläche ADF' dargestellte Mehrarbeit des Widerstandes bedeutet. Die in dem Punkte F erlangte Geschwindigkeit $v_2 = ff'$ ist ein relatives Minimum, da im ferneren Verlaufe eine Beschleunigung eintritt, welche bis zum Punkte G andauert. Während der Bewegung von F bis G hat die durch die Fläche $F'K'G'$ dargestellte Mehrarbeit A_2 des Dampfes die Geschwindigkeit von v_2 auf v_1 gebracht, wofür man wieder hat

$$A_2 = M \frac{{v_1}^2 - {v_2}^2}{2}.$$

Diese in G erlangte Geschwindigkeit v_1 ist ein relatives Maximum, indem von jetzt an wieder eine Verzögerung eintritt. Diese dauert über den todten Punkt B hinaus bis zu dem Punkte H, wo die Geschwindigkeit ein neues Minimum (v_2) erlangt 2c. Es ist leicht ersichtlich, daß die Geschwindigkeit der Kurbel in C wieder v_0 wie in A geworden ist, da man für den Beharrungszustand die Bedingung hat

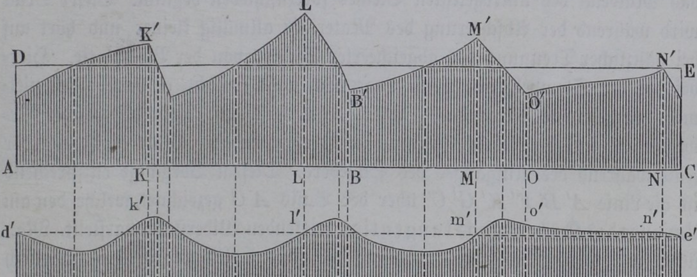
$$A_1 + A_3 + A_5 = A_2 + A_4,$$

d. h. die algebraische Summe aller nach einander auf Verzögerung und Beschleunigung verwendeten Arbeiten ist während einer Kurbeldrehung gleich Null. Da diese letztere Bedingung allgemein gilt, auch wenn man einen anderen als einen todten Punkt zum Ausgangspunkte wählt, so folgt, daß die Kurbel überhaupt in einem und demselben Punkte stets in dem gleichen Bewegungszustande sich befindet, d. h. die Periode der ungleichförmigen Bewegung ist eine ganze Umdrehung. Hinsichtlich der Curve $d'f'k'g'$ ... für die Geschwindigkeiten erkennt man übrigens, daß der einem größten Werthe der Umdrehungskraft KK' zugehörige Punkt k' ein Wendepunkt sein muß, denn in demselben hat die beschleunigende Kraft $p = \frac{P}{M}$ ihr Maximum, d. h. es ist $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$; und da allgemein $p = \frac{\partial v}{\partial t}$ ist, so ist für die Geschwindigkeitscurve in ~~f'~~ k' die Bedingung für den Wendepunkt erfüllt

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0.$$

In derselben Weise ist in Fig. 755 über der Grundlinie $AC = 2\pi r$ das Diagramm für den Umfangsdruck U in der Linie $AK'L'B'M'O'N'C$

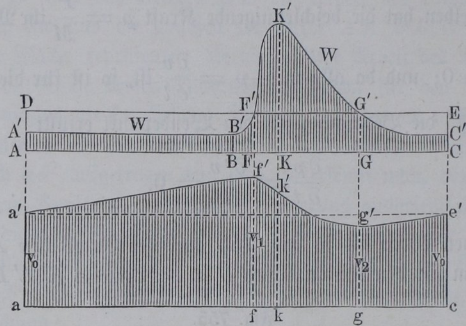
Fig. 755.



für den Hin- und Rückgang derjenigen zweicylindrigen Expansionsdampfmaschine gezeichnet, für welche in Figur 578 das Diagramm über dem Kolbenschube $2r$ angegeben worden, und demgemäß in $d'k'l'm'o'n'e'$ die Linie für die Geschwindigkeiten entworfen. Man erkennt daraus zur Genüge, wie eine derartige Zeichnung ein klares Bild nicht nur von der verhältnißmäßigen Größe der einzelnen Geschwindigkeitsschwankungen, sondern auch von deren gegenseitiger Lage zu einander gewährt.

In ähnlicher Art hat man auch das Diagramm in anderen Fällen z. B. für solche Arbeitsmaschinen zu zeichnen, bei welchen der Widerstand plötzlich in großem Betrage auftritt. In Fig. 756 (a. f. S.) z. B. ist der Bewegungszustand eines Lochwerkes veranschaulicht. Hierbei wird der den Lochstempel tragende Schieber durch eine Kurbel oder einen Excenter langsam auf- und niedergeführt, und hat derselbe nur während eines Theiles seines Niedergehens einen beträchtlichen Widerstand zu überwinden, welcher seinen größten Werth in dem Augenblicke erreicht, in welchem der Stempel

Fig. 756.

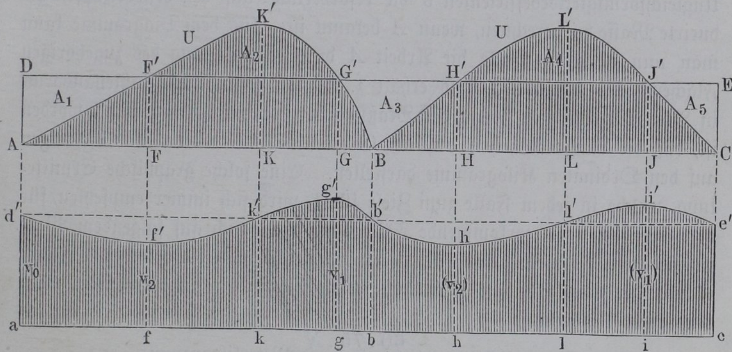


das Material des untergelegten Bleches fortzuschieben beginnt. Dieser Druck wird während der Abscheerung des Materials allmälig kleiner und hört auf bei gänzlicher Trennung des abgescheerten Stückes von der Blechplatte. Hierbei hat der Stempel seine tiefste Lage noch nicht erreicht, er bewegt sich vielmehr noch etwas durch das gestanzte Loch hindurch, während welcher Bewegung er nur die Nebenhindernisse zu überwinden hat. Letzteres ist auch der Fall während des Aufganges des Schiebers. Diesem Vorgange entsprechend ist die Linie $A' B' F' K' G' C'$ über der Basis $A C$ gezeichnet, welche den am Umfange des Kurbelzapfens tangential wirkenden Widerstand darstellt. Man sieht, wie dieser Widerstand während des ganzen Aufganges AB und noch ein Stück BF entsprechend einer Drehung 20 bis 30^0 verhältnißmäßig klein bleibt, um dann fast momentan von der Größe BB' auf diejenige KK' zu steigen, von welchem Betrage er allmälig und noch vor gänzlich beendetem Rückgange auf die ursprüngliche Größe der Nebenhindernisse $AA' = CC'$ herabsinkt. Wird nun die Kurbelwelle durch eine constante Umdrehungskraft, z. B. den Druck an einem auf ihr angebrachten Zahnrade, bewegt, so ist, wenn diese Kraft durch $AD = CE$ dargestellt ist, das Rechteck AE nunmehr die Arbeit der Betriebskraft während eines Stempelspieles. Dieses Rechteck muß wiederum gleichen Inhalt mit der zwischen der Basis AB und der Linie W des Widerstandes enthaltenen Fläche haben, und es lassen sich die Schwankungen der Geschwindigkeit ebenso bestimmen wie in den vorhergehenden Fällen. In der Figur stellt $aa' = ce'$ wieder die Geschwindigkeit v_0 in dem unteren todten Punkte vor, und es gehört wieder die größte

Geschwindigkeit v_1 dem Punkte F an, in welchem der Stempel schon einen gewissen Druck auf das untergelegte Blech ausübt. Die kleinste Geschwindigkeit v_2 stellt sich in dem Punkte G ein, wo der gesammte Nutz- und Nebenwiderstand auf die Größe des umdrehenden Räder- oder Riemendruckes GG' herabgegangen ist. Daß hier die starke Steigerung des Widerstandes auch eine schnelle Verminderung der Geschwindigkeit auf der Strecke fg zur Folge haben muß, ist selbstredend.

Grösse der Schwungmasse. Nunmehr bietet die Berechnung der in jedem einzelnen Falle erforderlichen Schwungmasse m keine Schwierigkeiten mehr dar. Wie man aus den vorstehenden Diagrammen, etwa dem in Fig. 757, für eine eincylindrige Maschine angegebenen ersieht, ist die Schwan- **§. 191.**

Fig. 757.



kung der Geschwindigkeit zwischen einem Minimalwerthe $ff' = v_2$ und dem darauf folgenden Maximum $gg' = v_1$ abhängig von der Größe der betreffenden Fläche $F'K'G' = A_2$. Ebenso bestimmt die unterhalb der Widerstandslinie DE gelegene Fläche $G'H'B = A_3$ die Abnahme der Geschwindigkeit von $gg' = v_1$ in $hh' = (v_2)$ und die Fläche $H'L'J' = A_4$ die Zunahme der Geschwindigkeit $ii' - hh'$. Endlich sind die beiden zusammenhängend zu denkenden Flächen

$$J'EC + ADF' = A_5 + A_1$$

wiederum maßgebend für die Abnahme der Geschwindigkeit von $ii' = (v_1)$ auf $ff' = v_2$.

Bezeichnet man nun mit A das absolut größte dieser Flächenstücke A_1, A_2, A_3 ..., so hat man für die beiden zugehörigen größten und kleinsten Werthe v_1 und v_2 der Geschwindigkeiten