

Die Geschwindigkeit der gleichmäßigsten Drehkraft.

Jede Geschwindigkeit bringt, wie nun dargelegt wurde, eine andere Art der Arbeitsabgabe an die Kurbel mit sich. Die beste Art derselben, der gleichmäßigste Gang der Maschine wird aber gewiss dann erzielt werden, wenn die Geschwindigkeit so ermittelt wurde, dass der bei jedem Kolbengang im Schwungring anzusammelnde und wieder abzugebende Arbeitsüberschuss im Verhältniss zur Gesamtarbeit ein kleinster, d. h. wenn das Verhältniss der überragenden Fläche des Tangentialdruckdiagrammes gegen das Widerstandsrechteck ein Minimum wird.

Sollten bei mehreren verschiedenen Geschwindigkeiten, welche ohnedies nicht weit von einander abliegen können, diese Arbeitsdifferenzen fast gleich sein, so wird jene davon als die beste erscheinen, bei welcher die Perioden der Beschleunigung und der Verzögerung gleich lang andauern, d. h. bei welchen die Schnittpunkte der Drehkrafts- und der Widerstandslinie um gleiche Wegstücke von einander entfernt auftreten.

Es ist mir nun nicht gelungen, diese vortheilhafteste Geschwindigkeit durch directe strenge Rechnung zu finden, indem bei dem Versuche hiezu Gleichungen des vierten Grades in ganz undurchsichtigen und unbrauchbaren Formen erscheinen.

Es hat jedoch gar keine Schwierigkeit, diese günstige Geschwindigkeit auf Grund der einfachen graphischen Construction für jede Dampfspannung und Füllung zu ermitteln.

Es soll hier nun erst der Vorgang der Construction vorgeführt und dann gesucht werden, eine allenfalls auffindbare Eigenschaft der Curve der Geschwindigkeit der gleichmäßigsten Drehkräfte, fortan der Kürze halber „günstigste Geschwindigkeit“ genannt, in eine Formel zu fassen.

Auffindung der günstigsten Geschwindigkeit durch Construction.

1. Schubstange unendlich.

Zeichnet man das zu erwartende Dampfdiagramm (Fig. 22 im Texte) und trägt versuchsweise auf der aufsteigenden Drucklinie zu Beginn des Hubes von der oberen Ecke Längen gegen abwärts auf, welche den Werth von $q = 1, 2, 3 \dots$ Atm. ($\frac{F}{f} = 1, 2, 3 \dots$ Kilogr. Beschleunigungsdruck pr. 1 c^2 Kolbenfläche) bedeuten;

zieht man von diesen Punkten aus die Curven der Horizontaldrücke, wie es in dem Früheren gezeigt wurde, und zeichnet für jede dieser einzelnen Linien das Diagramm der Tangentialdrücke über dem ausgestreckten Wege des Kurbelzapfens als gemeinschaftliche Grundlinie;

zieht man ferner die Linie des auf den Kurbelkreis reducirten Widerstandes, indem man die von irgend einer der Drucklinien umschlossenen Flächen in ein Rechteck verwandelt:

so ist im gegenwärtigen Sinne jene Geschwindigkeit die günstigste, deren Tangentialdrucklinie von der Widerstandslinie am wenigsten und am gleichmäßigsten abweicht, und bei welcher die Länge der Ueberragung der halben Länge des Kurbelkreises am nächsten kommt.

Der Werth von $q_1 = \frac{F}{f}$, dessen Curve diese Bedingungen am besten erfüllt und darnach gewählt wird, gibt nach Formel (6) allgemein oder Formel (7) im Metermaß die Kolbengeschwindigkeit oder die Zahl der zugehörigen Umdrehungen für jede einzelne Länge des Kolbenshubes, wie bereits Seite 86 gezeigt und mit einem Beispiel erläutert wurde.

Es braucht nicht erst darauf aufmerksam gemacht zu werden, dass sich gleichzeitig mit diesem Vorgange auf graphischem Wege das Maximum der Geschwindigkeit für eben diese Druck- und Füllungsverhältnisse und die Art ihrer Arbeit dann ergibt, wenn man einfach mit der Linie $\frac{F}{f}$ von der Gegendrucklinie ansteigt.

Auffindung der günstigsten Geschwindigkeit durch Rechnung.

Wenn auf diese Weise eine Reihe von Diagrammen construirt wird, so zeigt sich an allen bei der günstigsten Geschwindigkeit (gleichförmigsten Drehkraft, kleine Füllungen vorausgesetzt) eine übereinstimmende Eigenschaft, welche man ihnen nur abzulesen braucht, um sie leicht in eine Formel zu kleiden:

Man erkennt nämlich, dass die günstigste Geschwindigkeit nahezu gleich mit jener ist, bei welcher die Tangentialdrucklinie in ihrer halben Länge (also bei der Kurbelstellung von 90 Grad gegen ihre todte Lage) eine horizontale Tangente erhält.

Diese Annahme, welche auch logisch vollkommen einleuchtet, sagt nichts Anderes als: in der Nähe des halben Hubes bleibe der drehende Druck auf die Kurbel constant.

Diese Annahme, in eine Formel gebracht, gibt (Ableitung im Anhang VI),

$$q_1 = \frac{F}{f} = 2p_1 \frac{l_1}{l} \dots \dots \dots (15)$$

Der Werth $p_1 \cdot \frac{l_1}{l}$ kann mit p_3 bezeichnet werden

$$p_3 = p_1 \frac{l_1}{l}.$$

Es ist das Maß für den Enddruck eines Dampfes von der Anfangsspannung p_1 , welcher von der Füllungslänge l_1 auf die ganze Hublänge l expandirt. Darnach schreibt sich die Gleichung (15) für die günstigste Geschwindigkeit auch noch:

$$q_1 = \frac{F}{f} = 2p_3 \dots \dots \dots (16)$$

Die Folgerungen aus dieser Formel sind im Nachstehenden gezogen.

Abhängigkeit der Gleichmäßigkeit der Drehkraft von Füllung und Geschwindigkeit.

Aus der Gleichung:

$$q_1 = \frac{F}{f} = 2 p_1 \frac{l_1}{l} \dots \dots \dots (15)$$

ergeben sich die Folgerungen:

- a) Die Geschwindigkeit der gleichmäßigsten Drehkraft wird desto höher, je höher die Dampfspannung und je höher die Füllung wird.
- b) Mit der Füllung darf man aber nicht höher, als bis zur Grenze $\frac{l_1}{l} = \frac{1}{2}$ gehen, wenn man einen möglichst gleichförmigen Gang der Maschine erreichen will; halbe Füllung kann nicht überschritten werden, weil dafür bereits (selbst ohne Berücksichtigung des Gegendruckes) $q_1 = \frac{F}{f} = p_1$ wird, wobei das überhaupt zulässige Maximum der Geschwindigkeit erreicht ist. (Für die Niederdruckcylinder der Verbundmaschinen wichtig.)
- c) Für höhere Füllungen als 0·5 gibt es keine günstigste Geschwindigkeit, keine Geschwindigkeit gleichmäßiger Drehkräfte mehr.
- d) Daher werden Maschinen mit hoher Füllung (über 0·5) desto gleichmäßiger wirken, mit je kleinerer Geschwindigkeit sie arbeiten.

Aus Gleichung (16) $q_1 = \frac{F}{f} = 2 p_3$ folgt:

- e) die Maschine erhält bei jener Geschwindigkeit die gleichmäßigste Drehkraft, bei welcher zu Beginn jedes Hubes ein Druck, gleich dem doppelten Enddruck auf den Kolben, zur Ingangsetzung der Massen verwendet wird.

Durch Einsetzen des letzten Werthes in die allgemeine Formel (6) ergibt sich aus:

$$q_1 = \frac{\pi^2}{2g} \frac{P}{f.l} \cdot v^2 = 2 p_3$$

die Bedingung für die gleichmäßigste Arbeit an der Kurbel einer Dampfmaschine, oder deren günstigste Geschwindigkeit:

$$v^2 = \frac{4g}{\pi^2} \cdot \left(\frac{f.l}{P} \right) \cdot p_3 \dots \dots \dots (17)$$

d. i. für Kilogramm und Metermaß:

α) für kleine Hochdruckmaschinen

$$\frac{P}{f} = 0.28 \quad \text{Hub bis } 0.7 \text{ m} \quad \dots \dots v^2 = 14 \cdot l \cdot p_3$$

β) für große Hochdruckmaschinen

$$\frac{P}{f.l} = 0.4 \quad \text{Hub über } 0.7 \text{ m} \quad \dots \dots v^2 = 10 p_3$$

γ) für kleine Niederdruckmaschinen

$$\frac{P}{f} = 0.20 \quad \text{Hub bis } 0.9 \text{ m} \quad \dots \dots v^2 = 20 \cdot l \cdot p_3$$

δ) für große Niederdruckmaschinen

$$\frac{P}{f.l} = 0.22 \quad \text{Hub über } 0.9 \text{ m} \quad \dots \dots v_2 = 18 p_3$$

wobei p_3 stets den zugehörigen Druck am Ende des Kolbenlaufes bedeutet.

Wir erkennen nun, dass bei allen jenen Maschinen, bei welchen die Füllung derart geregelt ist, dass der Druck des expandirten Dampfes am Ende des Kolbenshubes ein gleicher ist — auch gleiche Geschwindigkeiten zu herrschen haben, wenn die drehenden Drücke möglichst gleichmäßig vertheilt wirken, d. h. die Arbeit möglichst gleichmäßig geleitet werden soll — unabhängig, wie groß der Dampfdruck bei der Einströmung war.

Daher folgt:

f) Die günstigste Geschwindigkeit ist für alle jene Maschinen constant, deren Enddruck der gleiche ist.

digkeit. Ihr Maß ist der doppelte Enddruck, während das Maß der Maximalgeschwindigkeit (bei sonst gleichen Verhältnissen) im einfachen Anfangsdrucke liegt.

Daher folgt:

- g) Bei allen Maschinen, bei welchen der Anfangsdruck größer als der doppelte Enddruck ist, verbleibt die günstigste Geschwindigkeit kleiner, als die Maximalgeschwindigkeit.

Wird nun die wirkliche Ganggeschwindigkeit nahe jener des größten Gleichganges gebracht, so besitzen die ausschwingenden Massen zu Ende des Hubes eine Arbeit, welche per Flächeneinheit des Kolbens einen Druck gleich dem Beschleunigungsdruck, d. i. nahezu gleich dem doppelten absoluten Enddrucke entspricht. Diese Arbeit kann entweder an den Kurbelzapfen übertragen oder zur Compression des Enddampfes verwendet werden. Geschieht letzteres, so soll die Compression doch nur bis zu jener Höhe ansteigen, welche von den sich verzögernden Massen allein bewältigt werden kann, indem sonst die Kurbel den Mehrbetrag rückleitend decken müsste.

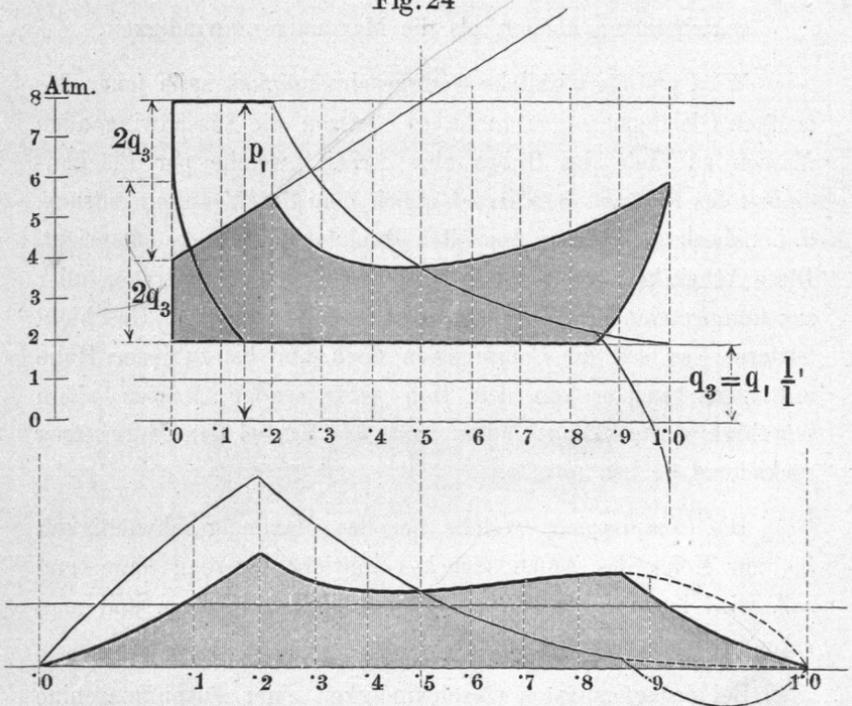
Die Compression, welche bei der Maximalgeschwindigkeit bis zur Höhe des Anfangsdruckes getrieben werden kann und soll, wird jetzt hier wesentlich kleiner bleiben müssen, und man erkennt als fernere Regel:

- h) Bei der günstigsten Geschwindigkeit einer Auspuffmaschine soll die Compression nicht bis zur Höhe des Anfangsdruckes steigen, sondern nur den Betrag des doppelten Enddruckes erreichen. (Dass ein geringes Ueberschreiten dieser Compressionshöhe zulässig ist und dem verspäteten Druckwechsel vorbeugt, wurde bereits im Anhang IV dargelegt.)

Da die Geschwindigkeit der gleichmäßigsten Drehkraft einer hoch expandirenden Maschine vom (doppelten) End-, also dem

Gegendrucke abhängt, so erkennt man ferner daraus, dass im Allgemeinen dem Hochdruckkolben einer Compoundmaschine eine höhere Geschwindigkeit gleichmäßigsten Ganges zukommt, als es bei freiem Auspuffe der Fall wäre. Auch darf sich die Compression an ihm höher, als in einer Eincylindermaschine erheben.

Fig. 24



Für Condensationsmaschinen, insbesondere Niederdruckcylinder von Verbundmaschinen, ist hier nur wenig beizufügen. Die Füllung von 0.5 wird dabei nicht überschritten, und wäre der Enddruck $p_3 = 0.28$ Atm., so gibt die Gleichung (17δ) $v^2 = 18 p_3 = 5.04$, also $v = 2.2$ m, und z. B. bei $l = 1$ m die Umdrehungszahl: $n = 66$ per Minute, jene Geschwindigkeit, bei welcher der größte Gleichgang herrscht.

Die größte, überhaupt noch zulässige Geschwindigkeit wäre für dieses Beispiel, wenn der Anfangsdruck $p_1 = 2 \cdot 0$, der Gegen-
druck $p_0 = 0 \cdot 2$ Atm. absolut beträgt, laut Gleichung (7) oder
Tabelle II, $v = 3 \cdot 70 m$ oder $n = 111$.

Geht die Maschine nun wirklich nur mit der kleineren
gleichmäßigeren Geschwindigkeit von $v = 2 \cdot 2 m$ oder 66 Um-
drehungen, wobei sie am Kolben nach Gleichung (7d₁) nur $q_1 =$
 $= \frac{1}{9} v^2 = \cdot 56$ Atm. am Hubanfang zum Ingangsetzen der Massen
benötigt und einen gleichen Betrag bei deren Ausschwingen am
Hubende wieder erbringt: so kann dieser in der Verzögerung
der Massen begründete Druck zur Compression des letzten Theiles
des Ausströmdampfes verwendet werden, ohne dass diese Com-
pression durch das Gestänge von der Kurbel zu leisten wäre.
Höhere Compression als diese $\cdot 56$ Atm. könnte nicht mehr durch
die ausschwingenden Massen gedeckt, sondern müsste durch die
Kurbel unterstützt werden.

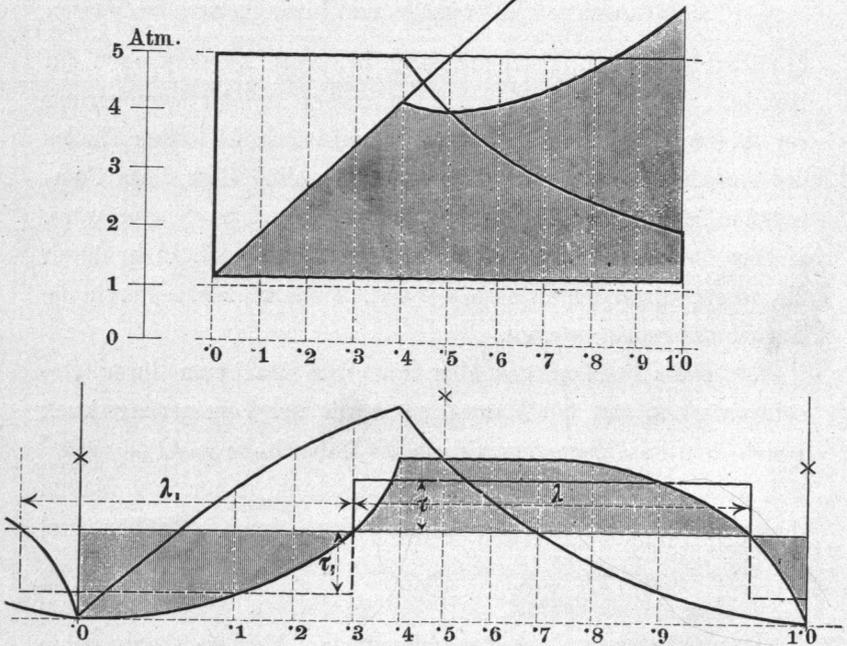
Ginge die Maschine aber mit dem Maximum ihrer Ge-
schwindigkeit, mit 111 Touren, so würde der Verzögerungsdruck
gleich dem Beschleunigungsdruck am Hubanfang $= (2 - \cdot 2) =$
 $1 \cdot 8$ Atm. betragen. Die Compression könnte daher jetzt bis zu
dieser Höhe, bis zur vollen Admissionsspannung getrieben und
ihr sonstiger Vortheil ausgenützt werden.

Man ersieht daraus, dass bei Maschinen, welche mit dem
größten Gleichgange arbeiten sollen, eine kleinere Compression
eingestellt werden muss, als bei solchen, welche für größtmögliche
Geschwindigkeit bestimmt sind. Die Compression soll, vom Stand-
punkte gleichmäßigster Drehkräfte, d. i. der günstigsten Geschwin-
digkeit betrachtet, nur den Ausschwing der Massen elastisch auf-
nehmen. Der Druck der durch den Zwang der Kurbelbewegung zur
Ruhe gedrängten Massen soll jetzt, wie zu Anfang der Beschleuni-
gungsdruck, $\frac{F'}{f} = 2 p_3$, gleich dem doppelten Enddrucke sein.

Große Füllungen (ad c).

Die Geschwindigkeit, bei welcher die Tangentendrucke den mindesten Schwankungen unterworfen sind, und bei welcher die Arbeit, welche in das Schwungrad und wieder zurückströmt, ein

Fig.25



Minimum wird, diese vorteilhafteste Geschwindigkeit ist nur bei kleinen Füllungen zu erreichen und findet ihre äußerste Grenze bei der Füllung 0·5, weil dann der Enddruck dem halben Initialdruck gleich wird, und daher der jetzt zur Beschleunigung verlangte doppelte Enddruck in den vollen Anfangsdruck, und die vorteilhafte Geschwindigkeit in die überhaupt noch zulässige übergeht.

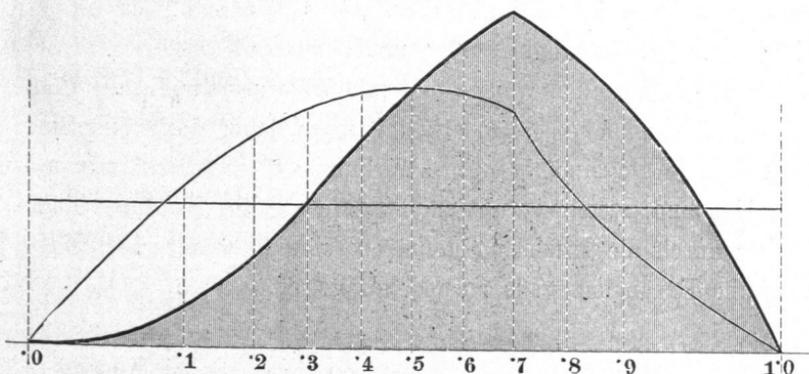
Aus Rücksicht auf den Gegendruck kann selbst nicht soweit gegangen, sondern muss dort eingehalten werden, wo:

$$\frac{F}{f} = (p_1 - p_0) = 2p_3$$

wird, wie dies in Fig. 25 dargestellt ist.

Wir sehen aber jetzt aus dem Diagramm, dass die drehenden Drücke, wenn auch immer noch constanter in ihrer wirklichen Größe, doch von keinem wesentlichen Vortheile in der Arbeitsabgabe, mehr begleitet sind; denn die Beschleunigungs- oder Ver-

Fig. 26



zögerungsflächen sind für die kleinste und größte Geschwindigkeit, welche letztere hier auch die günstigste Geschwindigkeit ist, fast genau gleicher Größe.

Bei Maschinen mit halber (0·4—0·5) Füllung kann man also wohl noch eine Geschwindigkeit der gleichen und mäßigsten Drehkräfte erreichen, doch ist diese von keinem verringern Einfluss mehr auf die Menge der durch das Schwungrad auszugleichenden Arbeitsdifferenzen.

Bei noch höheren Füllungen als 0·5 ginge aber der doppelte Enddruck über den Initialdruck, welcher das überhaupt zulässige Maximum der Geschwindigkeit begrenzt.

Daher gibt es für Maschinen für höhere Füllungen als 0·4 bis 0·5 keine günstigste Geschwindigkeit mehr, und die Unregelmäßigkeiten der Arbeit im Schwungrade schwanken desto beträchtlicher, je höher die steigenden Geschwindigkeiten die Grenze Null überschreiten.

In Fig. 26 ist das Kurbeldiagramm einer Maschine von 0·7 Füllung vorgeführt, und die Dampfdrucklinie, welche der Minimalgeschwindigkeit Null entspricht, und die Drucklinie der höchsten Geschwindigkeit eingezeichnet.

Aus dem Diagramm ist es in der That ersichtlich, dass die größere, wie auch jede mittlere Geschwindigkeit mehr Unregelmäßigkeiten in Druck und Arbeit mit sich bringt, als an die kleineren Geschwindigkeiten gebunden sind.

Eine Maschine, welche fast mit Volldruck (und ohne Compression, vergleiche später) arbeitet, muss daher desto langsamer arbeiten, je gleichmäßiger ihre Wirkung auf die Kurbel sein soll, ein Umstand, welcher wohl auch zu Anfang des Dampfmaschinenbaues durch die Erfahrung gefunden, aber in ungerechter Weise auf alle Expansionsgrade ausgedehnt wurde.

Zu kleine Füllungen.

Bei zu weit getriebener Expansion kann es in Auspuffmaschinen leicht vorkommen, dass der Enddruck kleiner als der Gegendruck wird, was sich durch eine Schleifenbildung im Dampfdiagramme kundgibt. Die der Schleife entsprechende Arbeit ist ein directer Verlust und daher sind zu kleine Füllungen stets zu vermeiden, wo immer der Dampf einen Werth hat.

Hätte aber irgendwo der Dampf keinen Werth, oder fände sich eine andere Verwendung des Abdampfes, die den Verlust wieder aufhebt, so wäre in der Schleifenbildung ein herrliches Mittel zur Erreichung gleichmäßigster Drehkräfte geboten, welches ähnlich wie die Compression, nur früher beginnend, den Schwung der Massen auffängt, und ein fast völlig symmetrisch gestaltetes Druckdiagramm zu erbringen vermag.