Der Maschinenbau

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1863

Theorie der Dampfmaschinen

urn:nbn:de:bsz:31-270981

alle mit Doppelmaschinen versehen, aber auch zum Betrieb von solchen Fabriken, welche eine grosse Gleichförmigkeit der Bewegung erfordern, werden sie oftmals gebraucht. Dass sie unvermeidlich sehr komplizirt sind, ist selbstverständlich.

Theorie der Dampfmaschinen.

Effektberechnung der Maschinen. Wir haben bereits in den Prinzipien der Mechanik (Seite 212, 2te Auflage) nachgewiesen, dass in allen Maschinen ein Beharrungszustand ihrer Bewegung und Thätigkeit eintritt, und haben auch durch elementare Betrachtungen gezeigt, wie die Bewegung und Wirkungsweise bei einer einfachen Dampfmaschine im Beharrungszustand erfolgt. In den folgenden Theorien werden wir den Gegenstand durch analytische Mittel verfolgen und dadurch zu allgemeinen Regeln gelangen. Wie die Bewegung einer Dampfmaschine während des Anlaufes erfolgt, kann selbst mit einem grossen Aufwand von analytischen Apparaten nur sehr schwierig verfolgt werden, und die Kenntniss dieser Vorgänge ist wenigstens in praktischer Hinsicht von geringer Bedeutung, indem die regemässige nützliche Thätigkeit einer Dampfmaschine doch nur im Beharrungszustand vorhanden ist. Wir übergehen daher den Anlauf, nehmen an, es sei der Beharrungszustand vorhanden und stellen uns die Aufgabe, die Gesetze dieses Zustandes ausfindig zu machen. Dabei legen wir die Betrachtung einer Maschine mit einem Cylinder zu Grunde und unterscheiden die vier Fälle: 1) wenn der Dampf ohne Expansion und ohne Condensation wirkt; 2) ohne Expansion mit Condensation; 3) mit Expansion ohne Condensation; 4) mit Expansion mit Condensation.

Im Beharrungszustand sind am Anfange jedes Kolbenschubes identische Zustände vorhanden, sind also die Geschwindigkeiten, die lebendigen Kräfte, die Dampfspannungen, der Wassergehalt des Kessels gleich gross. Diese Identität der Zustände am Anfang und Ende jedes Kolbenschubes ist nur unter folgenden Umständen möglich:

1) muss die Wirkung, welche der Dampf während eines Kolbenschubes entwickelt, gleich sein der Wirkung, welche während eines Kolbenschubes durch die Totalität der Widerstände consumirt wird;
2) muss in den Kessel während jeden Kolbenschubes so viel Wasser gebracht werden, als während dieser Zeit verdampft wird;

3) muss die Dampfmenge, welche bei einem Kolbenschub aus dem Kessel in die Maschine übertritt, eben so gross sein als die Dampfmenge, die während eines Kolbenschubes produzirt wird.

Werden diese Gleichheiten mit mathematischer Schärfe analytisch ausgedrückt, so erhält man drei Gleichungen, die den Beharrungszustand charakterisiren und aus welchen alle diesen Zustand betreffenden Fragen beantwortet werden können.

Nennen wir:

O den Querschnitt des Dampfcylinders,

l die Länge des Kolbenschubes,

v die mittlere Geschwindigkeit des Kolbens, die gefunden wird, wenn man die Länge des Kolbenschubes durch die Zeit eines Kolbenschubes dividirt,

l_1 die Länge des Weges, den der Kolben zurücklegt bis die Absperrung eintritt, d. h. bis die Kommunikation zwischen Cylinder und Kessel aufhört. Bei nicht expandirenden Maschinen ist l_1 nicht viel kleiner als l, bei expandirenden Maschinen richtet sich l_1 nach dem Expansionsgrad,

m den Coeffizienten für den schädlichen Raum, d. h. m ist die Zahl, mit welcher das Volumen $O\,l$ multiplizirt werden muss, um zu erhalten die Summe der Volumen 1) eines Dampfkanales, 2) des Raumes zwischen dem Cylinderdeckel und dem Kolben, wenn dieser am Ende des Schubes steht; es ist also $m\,O\,l$ dieser schädliche Raum,

y den Druck des Dampfes auf einen Quadratmeter der Kolbenfläche, nachdem der Kolben vom Anfang des Schubes an einen Weg x zurückgelegt hat. Bei nicht expandirenden Maschinen ist y von $x = o$ bis $x = l$ beinahe constant; bei expandirenden Maschinen jedoch nur von $x = o$ bis $x = l_1$. Um den Beharrungszustand ganz allgemein zu charakterisiren, wollen wir aber y als eine Funktion von x ansehen,

ϱ den Druck, welcher, nachdem der Kolben einen Weg x zurückgelegt hat, auf jeden Quadratmeter der Kolbenfläche wirken müsste, um zu überwinden: 1) theils den in dieser Kolbenstellung vor dem Kolben wirklich herrschenden Gegendruck, 2) die sämmtlichen Reibungen und sonstigen Nebenhindernisse, welche der Bewegung entgegen wirken. Der wahre Werth von ϱ ist im Allgemeinen eine komplizirte Funktion der Konstruktionselemente der Maschine und der Wirkungsweise des Dampfes. Die Grösse ϱ, die wir den schädlichen Widerstand nennen wollen, ist also in dem Sinne zu verstehen, dass $O\,(y-\varrho)$ die nützliche Kraft ausdrückt, mit welcher der Kolben in dem Augenblick fortgetrieben wird, nachdem er vom Anfang des Kolbenschubes an einen Weg x zurückgelegt hat,

p_1 den Druck des Dampfes im Cylinder hinter dem Kolben, nachdem derselbe einen Weg l_1 zurückgelegt hat, also im Momente der Absperrung,

y_m ϱ_m die mittleren Werthe von y und ϱ, d. h. diejenigen constanten Werthe, welche während eines Kolbenschubes eben so grosse Wirkungen produziren würden, wie die veränderlichen Werthe. Nach den in den Prinzipien der Mechanik, Seite 62, festgestellten Begriffen ist demnach:

$$y_m l = \int_0^l y\, dx, \quad \varrho_m l = \int_0^l \varrho\, dx \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

S die Dampfmenge in Kilogrammen, welche in jeder Sekunde im Kessel gebildet wird,

s die Dampfmenge in Kilogrammen, welche in jeder Sekunde durch unvollkommene Verschlüsse und Dichtungen verloren geht,

R den auf den Kurbelkreis reduzirten nützlichen Widerstand, welchen die zu betreibenden Arbeitsmaschinen verursachen, d. h. R ist gleich der Kraft, mit welcher in jedem Augenblick auf den Kurbelzapfen nach einer auf dem Kurbelhalbmesser senkrechten Richtung eingewirkt werden muss, um die Widerstände der Arbeitsmaschinen zu überwinden. Wir betrachten R als eine constante Grösse,

q die Wassermenge in Kilogrammen, welche in jeder Sekunde in den Kessel gefördert werden muss,

E in Kilogrammmetern, N in Pferdekräften den Nutzeffekt der Maschine.

Diese Bezeichnungen vorausgesetzt, können wir nun die Bedingungsgleichungen des Beharrungszustandes aufstellen. Es ist

$\int_0^l y\, dx$ die Wirkung des Dampfes während eines Kolbenschubes,

$\int_0^l \varrho\, dx$ die Gegenwirkung des schädlichen Widerstandes, $\frac{1}{2} R l \pi$ die Wirkung, welche dem nützlichen Widerstand während eines Kolbenschubes entspricht. Wegen der ersten, Seite 519 ausgesprochenen Bedingung hat man demnach:

$$\int_0^l y\, dx = \int_0^l \varrho\, dx + \frac{1}{2} R l \pi \quad . \; . \; . \; . \quad (2)$$

oder wegen (1):

$$O\,l\,y_m - O\,l\,\varrho_m = \frac{1}{2}\,R\,\pi\,l$$

demnach:

$$y_m = \frac{1}{2}\,\frac{R\,\pi}{O} + \varrho_m \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Es ist ferner $v\,\frac{\frac{1}{2}\,l\,\pi}{l} = \frac{1}{2}\,\pi\,v$ die Geschwindigkeit des Kurbelzapfens (die mittlere), demnach $R\,\frac{1}{2}\,\pi\,v$ der in Kilogrammmetern ausgedrückte nützliche Effekt der Maschine, demnach:

$$\frac{1}{2}\,\pi\,R\,v = E = 75\,N \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

oder auch wegen (3):

$$O\,v\,(y_m - \varrho_m) = E = 75\,N \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Bei jedem Kolbenschub wird nicht nur das Volumen $O\,l_1$, sondern auch das Volumen $m\,O\,l$ des schädlichen Raumes mit Dampf erfüllt. Bei jedem Kolbenschub wird daher ein Dampfvolumen $O\,l_1 + m\,O\,l = O\,(l_1 + m\,l)$ verbraucht. Allein im Moment der Absperrung ist die Spannung des Dampfes gleich p_1, wiegt also ein Kubikmeter $(\alpha + \beta\,p_1)$ Kilogramm, also ist der Dampfverbrauch bei jedem Schub $O\,(l_1 + m\,l)\,(\alpha + \beta\,p_1)$ Kilogramm. Die Zeit eines Schubes ist aber $\frac{1}{v}$, daher ist der mittlere Dampfverbrauch in jeder Sekunde:

$$\frac{O\,(l_1 + m\,l)\,(\alpha + \beta\,p_1)}{\frac{1}{v}} = O\,v\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p_1)$$

Wir erhalten daher wegen des dritten der Seite 520 ausgesprochenen Sätze

$$S = O\,v\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p_1) + s \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

Die Bedingung der richtigen Wasserlieferung in den Kessel ist:

$$S = q \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Bei diesen Rechnungen sind die Wärmeverluste nicht in Anschlag gebracht, die durch Abkühlung der Wände des Cylinders und der Zuleitungsröhren entstehen können. Indessen wenn man will, kann man diese Verluste in s inbegriffen denken.

Diese Gleichungen sind total unabhängig von den physikalischen Eigenschaften des Dampfes und von jeder Hypothese. Sie sind nur der allgemeine Formalismus, nach welchem die Dampfmaschinen zu berechnen sind, sei es, dass man sich zu einer oder der andern oder zu gar keiner Wärmetheorie bekennt. Diese Gleichungen (3), (5), (6) würden absolut richtige Resultate liefern, wenn man im Stande wäre, die darin erscheinenden Grössen y_m ϱ_m p_1 und s mit mathematischer Schärfe zu bestimmen. Dies ist aber aus zwei Gründen nicht möglich, erstens, weil die physikalischen Gesetze des Dampfes nicht genau bekannt sind, zweitens, weil es eine zu schwierige mathematische Aufgabe ist, die Bewegungen und Zustandsänderungen des Dampfes bei seinem Uebergang aus dem Kessel in den Cylinder und sein Entweichen aus denselben zu verfolgen. Wir müssen uns also bei der Benutzung der aufgestellten Gleichungen mit Annäherungen begnügen.

Nicht expandirende Maschinen. Bei nicht expandirenden Maschinen ist l_1 sehr nahe gleich l. Was da in der Maschine vorgeht, während der Kolben den Rest $l - l_1$ seines Schubes zurücklegt, werden wir in der Folge bei der Theorie der Steuerungen kennen lernen. Hier wollen wir uns erlauben $l_1 = l$ zu setzen, wodurch allerdings ein kleiner Fehler begangen wird. Die Spannung y des Dampfes hinter dem Kolben richtet sich theils nach der Spannung des Dampfes im Kessel, theils nach den Widerständen, welche dem Uebergang des Dampfes aus dem Kessel nach dem Cylinder entgegentreten, theils nach den Querschnitten der Dampfkanäle, endlich nach der Geschwindigkeit des Kolbens. Sind diese Widerstände klein, sind ferner die Dampfkanäle weit, und ist die Kolbengeschwindigkeit eine gemässigte, so muss man auch ohne alle Rechnung erkennen, dass bei einer nicht expandirenden Dampfmaschine die Spannung des Dampfes hinter dem Kolben während der ganzen Dauer des Schubes nur äusserst wenig veränderlich sein kann, ist es also unter solchen Umständen erlaubt, y als eine Constante anzusehen. Nennen wir diesen constanten Werth von y, p, so dürfen wir setzen $y = y_m = p_1 = p$. Dadurch begehen wir einen Fehler, der zur Folge hat, dass wir die Wirkung der Maschine zu günstig berechnen, denn die wirkliche Dampfspannung muss, wenn der Kolben am schnellsten geht, also in der Mitte seines Schubes sich befindet, kleiner ausfallen als am Anfange und am Ende des Schubes. Trägt man den vom Kolben zurückgelegten Weg x als Abscisse, die Pressung des Dampfes gegen den Kolben als Ordinate auf, Taf. XXVI., Fig. 9, so ist A B E C D der Vorgang, wenn der Druck während des ganzen Schubes A D constant bleibt, dagegen A B F C D der wirkliche Vorgang und namentlich bei rascher Bewegung des Kolbens. In beiden

Fällen ist der Dampfverbrauch der gleiche, aber die Wirkung des Dampfes ist bei constant bleibendem Druck grösser, als bei veränderlichem. Hieraus erkennt man aber auch, dass eine mässige Geschwindigkeit des Kolbens hinsichtlich der Wirkung des Dampfes auf den Kolben vortheilhaft ist.

Der schädliche Widerstand ϱ ist eine sehr zusammengesetzte Funktion von verschiedenen Einflüssen. Der Werth von ϱ richtet sich 1) nach der Spannung, die in dem Raume herrscht, nach welchem der Dampf aus dem Cylinder entweicht. Dieser Raum ist, bei Condensationsmaschinen der Condensator, bei nicht condensirenden Maschinen die atmosphärische Luft; 2) nach dem Querschnitte des Ausströmungskanals und überhaupt nach den Hindernissen, die der Ausströmung des Dampfes entgegenwirken. Weite Kanäle sind günstig, enge ungünstig; 3) nach der Geschwindigkeit des Kolbens. Eine mässige Geschwindigkeit ist günstig, eine rasche ungünstig; 4) nach der Totalität der Reibungswiderstände der Maschine und der Widerstände, welche die Bewegung der Hilfsapparate, Pumpen etc. verursacht. Eine sehr vollkommene Ausführung der Maschine und einfache Konstruktionsweise sind in dieser Hinsicht vortheilhaft. Dieser Theil des Gesammtbetrages von ϱ_m ist bei nicht expandirenden und nicht condensirenden Maschinen am kleinsten, bei expandirenden und condensirenden Maschinen am grössten. Erfolgt die Bewegung des Kolbens sehr rasch und sind die Querschnitte der Kanäle enge, so ist γ merklich veränderlich, und zwar am Anfang des Kolbenschubes beträchtlich gross und erst gegen das Ende des Kolbenschubes hin mässig. Ist dagegen die Geschwindigkeit des Kolbens eine mässige und sind die Querschnitte der Entweichungskanäle sehr weit, so ist ϱ beinahe constant, so dass man dann $\varrho = \varrho_m = r$ setzen darf, wobei r den in diesem Falle beinahe constanten Werth von ϱ bedeutet. Man sieht hieraus, dass hinsichtlich des schädlichen Vorderdruckes eine geringe Geschwindigkeit des Kolbens und weite Entweichungskanäle vortheilhaft sind.

Noch muss bemerkt werden, dass der Werth von r für grosse Maschinen kleiner ausfällt als für kleine Maschinen, wegen der nicht unbeträchtlichen Kolbenreibung. Diese ist nämlich dem Umfang des Kolbens proportional, während die Kraft der Maschine dem Querschnitt des Kolbens proportional ist; das Verhältniss zwischen dem Reibungswiderstand und der Gesammtkraft der Maschine fällt demnach bei grossen Maschinen günstiger aus als bei kleinen.

Durch weitläufige Rechnungen, die ich hier nicht produziren will, habe ich für r folgende Annäherungswerthe gefunden:

1) für Watt'sche Niederdruckmaschinen:

$$r = 1758 + 30 \frac{O}{\Omega} v + 45 h + 269 D + \frac{367}{D}$$

2) für Hochdruckmaschinen ohne Condensation ohne Expansion bei einer Spannung des Dampfes von:

$$2 \text{ At.} \ldots\ldots r = 10652 + 12 \frac{O}{\Omega} v + 531 D + \frac{414}{D}$$

$$3 \text{ „} \ldots\ldots r = 11044 + 38 \frac{O}{\Omega} v + 635 D + \frac{631}{D}$$

$$4 \text{ „} \ldots\ldots r = 11469 + 71 \frac{O}{\Omega} v + 1090 D + \frac{828}{D}$$

$$5 \text{ „} \ldots\ldots r = 12450 + 114 \frac{O}{\Omega} v + 1610 D + \frac{1005}{D}$$

Die constanten Zahlen in diesen Ausdrücken rühren vorzugsweise her von der Spannung, die in dem Raum herrscht, nach welchem der Dampf entweicht. Die Glieder, welche $\frac{O}{\Omega} v$ als Faktor enthalten, drücken den Einfluss aus, welchen das nicht plötzliche, sondern allmählige Entweichen des Dampfes verursacht. Ω ist der Querschnitt des Ausströmungskanals. Ein enger Kanal und grosse Geschwindigkeit sind nachtheilig, was schon früher ausgesprochen wurde. Die dem Durchmesser D des Dampfcylinders direkt proportionalen Glieder beziehen sich vorzugsweise auf die Reibung der Schwungradswelle. Diese ist bei grossen Maschinen grösser als bei kleinen, was seinen Grund darin hat, dass die Schwungräder bei grossen Maschinen wegen ihres langsamen Ganges verhältnissmässig schwerer ausfallen, als bei kleineren Maschinen.

Die dem Durchmesser D verkehrt proportionalen Glieder rühren vorzugsweise von der Kolbenreibung her. Diese ist also bei kleinen Maschinen grösser als bei grossen. Der Grund hiervon liegt in dem Umstande, dass die Kolbenreibung dem Umfang, die Kraft, welche den Kolben treibt, dagegen dem Querschnitt des Kolbens proportional ist.

Der in jeder Sekunde entstehende Dampfverlust s entsteht vorzugsweise am Umfang des Kolbens, weil dieser doch niemals absolut genau an den Cylinder anschliesst. Dieser Verlust richtet sich daher 1) nach der Genauigkeit, mit welcher die Kolbendichtung an der Cylinderwand anschliesst, 2) nach der Differenz der Spannungen hinter und vor dem Kolben, 3) nach dem Durchmesser des Cylinders. Nach Rechnungen, die ich hier nicht wiedergeben will, ist annähernd:

$$s = (0{\cdot}022 + 0{\cdot}027\, n)\, D \text{ Kilogramm}$$

wobei D den Durchmesser des Dampfcylinders in Metern und n die Spannung des Dampfes im Cylinder hinter dem Kolben bedeutet.

Für eine gut gearbeitete, mit hinreichend weiten Zu- und Abströmungskanälen versehene und mit mässiger Geschwindigkeit laufende Maschine, die noch ohnedies gegen Wärmeverluste wohl verwahrt ist, dürfen wir nach den vorausgegangenen Erläuterungen annähernd setzen:

$$y = y_m = p_1 = p, \quad \varrho = \varrho_m = r, \quad s = o, \quad l_1 = l$$

und dann geben die Gleichungen (3) bis (7):

$$\left.\begin{aligned} p &= \frac{1}{2}\,\frac{R\,\pi}{O} + r \\ 75\,N &= O\,v\,(p - r) \\ S &= O\,v\,(1 + m)\,(\alpha + \beta\,p) \\ S &= q \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Wir wollen diese Gleichungen zur Beantwortung verschiedener die Dampfmaschinen betreffenden Fragen benutzen, werden uns aber dabei so benehmen, wie wenn dieselben nicht bloss Annäherungen, sondern absolute Wahrheiten ausdrückten. Die Zahl dieser Gleichungen ist 4, die Anzahl der darin enthaltenen variablen Grössen p, R, r, O, v, E, N, S, q ist dagegen 9. Wenn also 5 von diesen 9 Grössen gegeben werden, können die andern 4 berechnet werden. Es können demnach $\frac{9 \times 8 \times 7 \times 5}{1 \times 2 \times 3 \times 4} = 105$ verschiedene Fragen gestellt und beantwortet werden.

Von diesen 105 möglichen Aufgaben wollen wir nur einige, die ein besonderes praktisches Interesse haben, behandeln.

Leistungen einer bestehenden Maschine, erster Fall. Eine Maschine sei aufgestellt und im Gang. Der Querschnitt O des Cylinders wird gemessen. Die Dampfspannung p, der Widerstand r und die Geschwindigkeit v wird beobachtet. Man soll bestimmen: 1) den nützlichen Widerstand R, 2) den Nutzeffekt N der Maschine, 3) die Dampfproduktion S pro 1 Sekunde, 4) die Wassermenge q.

Aus den Gleichungen (8) folgt:

$$\left.\begin{aligned} R &= \frac{2\,O}{\pi}(p - r) \\ N &= \frac{O\,v\,(p - r)}{75} \\ S &= O\,v\,(1 + m)\;(\alpha + \beta p) \\ q &= S \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

wodurch die gestellte Frage beantwortet ist.

Leistungen einer bestehenden Maschine, zweiter Fall. Eine Maschine sammt Kessel ist aufgestellt. Die Dimensionen der Einrichtung werden abgemessen. Der Maschine wird ein gewisser nützlicher Widerstand R aufgebürdet und der Kessel wird so geheizt, dass in jeder Sekunde eine Dampfmenge von S Kilogrammen produzirt wird. Man soll bestimmen: 1) die Dampfspannung p, welche im Cylinder eintritt, 2) die Geschwindigkeit v des Ganges, 3) den Nutzeffekt N, 4) die Wassermenge q.

Die erste der Gleichungen (8) gibt unmittelbar:

$$p = \frac{1}{2}\,\frac{R\,\pi}{O} + r \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

Durch Division der zweiten und dritten der Gleichungen (8) findet man:

$$N = \frac{1}{75}\,\frac{p - r}{(1 + m)\;(\alpha + \beta\,p)}\;S \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (11)$$

Die dritte der Gleichungen (8) gibt:

$$v = \frac{S}{O\,(1 + m)\;(\alpha + \beta\,p)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (12)$$

Die vierte dieser Gleichungen gibt endlich:

$$q = S \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (13)$$

Aus (10) sieht man, dass die im Cylinder hinter dem Kolben eintretende Dampfspannung von dem nützlichen Widerstand R, von dem Cylinderquerschnitt und vom schädlichen Widerstand, nicht aber von der Dampfproduktion abhängt. Die Spannung fällt gross aus, wenn R gross, O klein und r gross ist, d. h. wenn man einer kleinen Maschine einen grossen Widerstand zu überwinden aufbürdet, so tritt im Beharrungszustand im Cylinder eine hohe Dampfspannung ein. Bei einem bestimmten Werth von p ist wegen (11) der Nutzeffekt der Maschine der Dampfproduktion proportional. Die Geschwindigkeit v der Maschine ist, wie (12) zeigt, der Dampfproduktion proportional.

Vortheilhafteste Thätigkeit einer Dampfmaschine. Für die vortheilhafteste Thätigkeit einer Maschine muss $\frac{75\,N}{S}$, d. h. muss die nützliche Wirkung, welche 1^{Klg} Dampf entwickelt, möglichst gross ausfallen.

Aus der zweiten und dritten der Gleichungen (8) folgt:

$$\frac{75\,N}{S} = \frac{p-r}{(1+m)\;(\alpha+\beta\,p)} = \frac{1-\frac{r}{p}}{(1+m)\left(\beta+\frac{\alpha}{p}\right)} \quad . \quad (14)$$

Nun ist aber $\frac{\alpha}{p}$ eine gegen β sehr kleine Grösse, kann also gegen β vernachlässigt werden. Dieser Ausdruck wird also gross, wenn $\frac{r}{p}$ klein ist, d. h. die Thätigkeit einer nicht expandirenden Maschine wird vortheilhaft, wenn die Dampfspannung hinter dem Kolben gross ist im Verhältniss zum schädlichen Widerstand r. Ist r klein (wie bei einer Watt'schen Condensationsmaschine), so wird die Thätigkeit der Maschine bereits bei einer kleinen Dampfspannung p vortheilhaft. Ist r gross (wie bei einer nicht condensirenden Maschine), so muss p gross sein, damit die Thätigkeit vortheilhaft ausfällt. Diese nicht condensirenden Maschinen erfordern demnach hohe Dampfspannungen.

Berechnung der Hauptgrößen für eine neu zu erbauende Maschine. Für eine neu zu erbauende Maschine ist zunächst gegeben N und ist es angemessen, anzunehmen p, r, v, m. Die zu suchenden Grössen sind: O, S, q, R.

Man findet aus (8):

$$\left.\begin{aligned} O &= \frac{75\,N}{v\,(p-r)} \\ S &= O\,v\,(1+m)\,(\alpha+\beta\,p) \\ R &= \frac{2}{\pi}\;O\;(p-r) \\ q &= S \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (15)$$

Wie die Grössen p r v angenommen werden sollen, hängt ab von den Anforderungen, die man an die Maschine stellt. Verlangt man gute Effektleistungen, so muss v klein und p im Verhältniss zu r gross genommen werden. Warum v klein genommen werden muss, ist Seite 524 gesagt worden. Verlangt man, dass die Maschine sehr klein ausfallen soll, so muss p im Verhältniss zu r und muss auch v gross angenommen werden. Ganz vorzügliche Leistungen darf man von einer nicht expandirenden Maschine nicht verlangen, denn wenn man auch die Dampfspannung p ausserordentlich gross annimmt, wird doch die Leistung nicht so gross, wie bei einer expandirenden Dampfmaschine mit mässiger Dampfspannung, und bei einer so hohen Dampfspannung wird es sehr schwierig, den Kessel hinreichend fest zu machen und in allen Theilen des Cylinders dampfdichte Verschlüsse hervorzubringen. Zweckmässig ist daher die Anwendung einer nicht expandirenden Maschine nur in solchen Fällen, wenn es nicht so sehr auf Brennstoffökonomie, sondern auf Einfachheit der Konstruktion ankommt. Wir nehmen daher

$$r = 1{\cdot}5 \times 10000 = 15000, \quad p = 35000, \quad m = 0{\cdot}05, \quad v = 1$$

Sollte aber eine möglichst compendiöse Maschine verlangt werden, dann kann man in Rechnung bringen $r = 15000$, $p = 60000$, $m = 0{\cdot}05$, $v = 3$ Meter und es ist in diesem Fall noch zweckmässig, den Kolbenschub verhältnissmässig sehr klein anzunehmen, weil dadurch der Cylinder kurz ausfällt, eine kurze Schubstange genügt, unmittelbar eine grosse Rotationsgeschwindigkeit des Schwungrades erzielt wird und alle Querschnittsdimensionen der Organe schwach sein können; denn diese Querschnitte richten sich nicht nach der Geschwindigkeit, sondern nur nach der Kraft, mit welcher der Kolben getrieben wird, und diese Kraft fällt natürlich bei grosser Kolbengeschwindigkeit klein aus. Allein von einer so schnell laufenden, mit hoher Dampfspannung arbeitenden Maschine mit kurzem Schub kann man sich keine grosse Dauer versprechen und noch weniger eine gute Effektleistung. Diese ungünstigen Verhältnisse sind in manchen Fällen und namentlich bei den Maschinen der Lokomotiven nicht zu vermeiden. Von den Lokomotiven wird heut zu Tage stets eine Kraftleistung von wenigstens 100 bis 150 Pferde gefordert, und für den Personentransport eine Fahrgeschwindigkeit von 16 bis 20^m in einer Sekunde. Räderwerke sind da nicht anwendbar, Condensation ist auch nicht zulässig und durch Expansion ist wegen der durchaus nothwendigen Kolbengeschwindigkeit nicht viel zu erreichen. Um nun die geforderten Leistungen durch eine möglichst compendiöse Einrichtung zu erzielen, werden Dampfspannungen von 6 bis 8 Atmosphären zugelassen und eine Kolbengeschwindigkeit von $2{\cdot}5$ bis 3^m und muss überdies noch der Kolbenschub kurz genommen werden.

Expansionsmaschinen mit einem Cylinder. Bei den Expansionsmaschinen mit einem Cylinder hat die Steuerung die Einrichtung, dass die Kommunikation zwischen dem Kessel und dem Cylinder aufgehoben wird, nachdem der Kolben einen Weg l_1, der nur ein Theil des ganzen Kolbenschubes l ist, zurückgelegt hat. Bis zu diesem Moment darf man annehmen, dass die Spannung des Dampfes im Cylinder einen constanten Werth p hat. Von dem Moment der Absperrung an wird aber das Volumen, in welches der Dampf eingeschlossen ist, immer grösser und grösser, nimmt also die Dichte und Spannkraft des Dampfes ab. Um nun die Wirkung des Dampfes während eines Schubes zu berechnen, müssen wir zunächst seine Spannung für einen beliebigen Augenblick des Zustandes der Expansion bestimmen. Zu diesem Behufe nehmen wir an, dass während der Expansion keine Condensation eintrete, und dass der Dampf während seiner Expansion seine Kesseldampf-Natur nicht ändert. Diese Voraussetzungen sind nicht ganz richtig, aber doch annähernd.

Nennen wir y die Spannung des Dampfes hinter dem Kolben, nachdem derselbe vom Anfange des Schubes an einen Weg x zurückgelegt hat, der grösser als l_1 ist. Im Moment der Absperrung ist ein Volumen $O\,l_1 + m\,O\,l$ mit Kesseldampf von einer Spannkraft p gefüllt, beträgt also das Gewicht der eingeschlossenen Dampfmenge $(O\,l_1 + m\,O\,l)(\alpha + \beta\,p) = O\,(l_1 + m\,l)(\alpha + \beta\,p)$. Nachdem nun der Kolben einen Weg x zurückgelegt hat, beträgt das Volumen des Dampfes $O\,x + m\,O\,l = O\,(x + m\,l)$ und die Spannung ist y, daher das Gewicht $O\,(x + m\,l)(\alpha + \beta\,y)$. In der Voraussetzung, dass kein Dampf condensirt wurde, ist also:

$$O\,(x + m\,l)(\alpha + \beta\,y) = O\,(l_1 + m\,l)(\alpha + \beta\,p)$$

Hieraus folgt:

$$y = \frac{l_1 + m\,l}{x + m\,l}\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) - \frac{\alpha}{\beta} \quad \dots \quad (16)$$

Nun können wir die Wirkung des Dampfes bei einem Schub berechnen. Diese ist:

$$O\,y_m\,l = O\,p\,l_1 + \int_{l_1}^{l} O\,y\,dx$$

demnach, wenn für y sein Werth aus (16) eingeführt wird:

$$O\,y_m\,l = O\,p\,l_1 + O\int_{l_1}^{l}\left[\left(\frac{l_1 + m\,l}{x + m\,l}\right)\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) - \frac{\alpha}{\beta}\right] dx$$

Durch Integration folgt:

$$y_m = \frac{l_1}{l}\,p - \frac{\alpha}{\beta}\left(1 - \frac{l_1}{l}\right) + \left(\frac{l_1}{l} + m\right)\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) \text{lognat} \frac{l + m\,l}{l_1 + m\,l} \quad (17)$$

Nehmen wir an, dass der schädliche Widerstand constant sei, dass also $\varrho_m = r$ gesetzt werden kann, so wird:

$$y_m - \varrho_m = \left[\frac{l_1}{l} + \left(\frac{l_1}{l} + m\right) \text{lognat} \frac{l + m\,l}{l_1 + m\,l}\right]\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right) \quad (18)$$

Setzt man zur Abkürzung:

$$\frac{l_1}{l} + \left(\frac{l_1}{l} + m\right) \text{lognat} \frac{l + m\,l}{l_1 + m\,l} = k \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

so wird (18):

$$y_m - \varrho_m = \left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)\right] \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

Substituirt man diese Werthe von $y_m - \varrho_m$ in die Gleichungen (3) und (5), so erhält man:

$$\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right) = \frac{1}{2} \frac{R\,\pi}{O} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

$$O\,v\left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right) k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)\right] = E = 75\,N \quad . \quad . \quad (22)$$

Die Gleichung, welche die Gleichheit der Dampfproduktion und Dampfkonsumtion ausdrückt, erhalten wir aus (6), wenn wir p statt p_1 setzen. Es ist demnach für Expansionsmaschinen:

$$S = O\,v\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p) + s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (23)$$

Endlich ist noch:

$$S = q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

Diese Ergebnisse (19) bis (24) enthalten die Theorie der Expansionsmaschinen mit einem Cylinder. Wir wollen auch hier mehrere Aufgaben zur Lösung bringen.

Leistungen einer bestehenden expandirenden Maschine, erster Fall. Eine expandirende Maschine existirt und befindet sich im regelmässigen Gang. Der Cylinderquerschnitt und der Expansionsgrad $\frac{l_1}{l}$ wird durch Messungen bestimmt, die Dampfspannung p und der schädliche Widerstand r werden ebenfalls ermittelt. Es soll berechnet werden N, S, q, R.

Die Gleichung (19) gibt zunächst k, dann findet man R vermittelst (21), hierauf N oder E vermittelst (22), sodann S aus (23), endlich q aus (24) und somit ist die vorgelegte Frage beantwortet.

Leistungen einer expandirenden Maschine, zweiter Fall. Der Cylinderquerschnitt O und der Expansionsgrad $\frac{l_1}{l}$ sind bekannt. Es soll bestimmt werden: 1) die Dampfspannung p, 2) die Effektleistung, 3) die Wasserförderung q, vorausgesetzt, dass der Maschine ein gewisser nützlicher Widerstand R zu überwinden aufgebürdet wird und dass im Kessel in jeder Sekunde eine Dampfmenge S erzeugt wird. Gegeben sind also O, $\frac{l_1}{l}$, m, r, S, R, zu suchen dagegen p, v, N, q.

Man bestimmt zuerst den Werth von k vermittelst der Gleichung (19):

$$k = \frac{l_1}{l} + \left(\frac{l_1}{l} + m\right) \text{lognat} \frac{l + m\,l}{l_1 + m\,l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

Dann gibt die Gleichung (21) für p folgenden Werth:

$$p = \frac{\frac{1}{2}\frac{R\,\pi}{O} + \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)}{k} - \frac{\alpha}{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

Nun folgt aus (23):

$$v = \frac{S - s}{O\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

und endlich aus (22):

$$N = \frac{O\,v}{75\left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right)k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)\right]} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Bedingungen der vortheilhaftesten Effektleistung. Diese Bedingung ist, dass $\frac{75\,N}{S}$ möglich gross sein soll. Aus (22) und (23) folgt, wenn man s vernachlässiget:

$$\frac{75\,N}{S} = \frac{\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right)k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)}{\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p)}$$

oder

$$\frac{75\,N}{S} = \frac{1}{\beta}\,\frac{1}{\frac{l_1}{l} + m}\left(k - \frac{\alpha + \beta\,r}{\alpha + \beta\,p}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

Nun sind p und $\frac{l_1}{l}$ zwei von einander unabhängige Grössen; es handelt sich also darum, diejenigen Werthe von p und von $\frac{l_1}{l}$ zu bestimmen, für welche $\frac{75\,N}{S}$ ein Maximum wird. Der vortheilhafteste Werth von p ist offenbar, wie aus (29) zu ersehen ist, eine im Verhältniss zu dem schädlichen Widerstand möglichst grosse Dampfspannung. Der vortheilhafteste Werth von $\frac{l_1}{l}$ wird bestimmt, indem man den Differenzialquotienten $\frac{d\left(\frac{75\,N}{S}\right)}{d\left(\frac{l_1}{l}\right)}$ sucht und denselben gleich Null setzt. Bezeichnet man zur Abkürzung $\frac{l_1}{l}$ mit ξ, so hat man:

$$k = \xi + (\xi + m) \operatorname{lognat}\left(\frac{1+m}{\xi+m}\right)$$

und

$$\frac{75\,N}{S} = \frac{1}{\beta}\,\frac{1}{\xi+m}\left(k - \frac{\alpha+\beta\,r}{\alpha+\beta\,p}\right)$$

Differenzirt man diese Gleichungen, so findet man:

$$\frac{dk}{d\xi} = 1 + \operatorname{lognat}\left(\frac{1+m}{\xi+m}\right) - 1 = \operatorname{lognat}\left(\frac{1+m}{\xi+m}\right) \quad . \quad . \quad (30)$$

$$\frac{d\left(\frac{75\,N}{S}\right)}{d\xi} = \frac{1}{\beta}\left[(\xi+m)\frac{dk}{d\xi} - k\right]\frac{1}{(\xi+m)^2} + \frac{1}{\beta}\,\frac{\alpha+\beta\,r}{\alpha+\beta\,p}\,\frac{1}{(\xi+m)^2} \quad (31)$$

oder wegen (30):

$$\frac{d\left(\frac{75\,N}{S}\right)}{d\xi} = \left(-\frac{1}{\beta}\,\xi + \frac{1}{\beta}\,\frac{\alpha+\beta\,r}{\alpha+\beta\,p}\right)\frac{1}{(\xi+m)^2}$$

Dieser Ausdruck verschwindet für

$$\xi = \frac{\alpha+\beta\,r}{\alpha+\beta\,p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

Für diesen Werth von ξ wird die Spannung am Ende des Kolbenschubes vermöge (16):

$$y = \left[\frac{\xi+m}{1+m}(\alpha+\beta\,p) - \alpha\right]\frac{1}{\beta}$$

$$y = \frac{r}{1+m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

oder weil m gegen die Einheit eine kleine Grösse ist:

$$y \text{ nahe} = r$$

d. h. die vortheilhafteste Expansion ist diejenige, bei welcher die Spannung des Dampfes im Cylinder hinter dem Kolben am Ende des Kolbenschubes nur noch gleich ist dem schädlichen Widerstand. Ist diese vortheilhafteste Expansion vorhanden, so läuft die Maschine am Ende des Kolbenschubes ganz kraftlos und wird nur durch die lebendige Kraft des Schwungrades getrieben. Die Geschwindigkeit der Maschine wird daher gegen das Ende des Kolbenschubes hin rasch abnehmen, demnach ungleichförmig gehen, dies ist aber ein Nachtheil, und daher ist es nicht zweckmässig, die hinsichtlich der Dampfbenutzung vortheilhafteste Expansion eintreten zu lassen, sondern eine etwas schwächere, so dass gegen das Ende des Kolbenschubes hin die Maschine doch noch mit merklicher Kraft getrieben wird. In Worten ausgedrückt, sind also die Bedingungen der vortheilhaftesten Effektleistung einer expandirenden Dampfmaschine: 1) eine im Verhältniss zum schädlichen Widerstand r hohe Dampfspannung; 2) ein Expansionsgrad, bei welchem am Ende des Kolbenschubes die Spannung des Dampfes hinter dem Kolben nur noch gleich ist dem schädlichen Widerstand r. Diese Ergebnisse der Rechnung sind selbstverständlich und hätten auch ohne Rechnung eingesehen werden können.

Abmessungen einer neu zu erbauenden expandirenden Maschine. Für eine neu zu erbauende Expansionsmaschine ist gegeben N und muss angenommen werden r, p, $\frac{l_1}{l}$, v. Die zu suchenden Grössen sind: O, S, R, q.

Man berechne zuerst den Werth von k vermittelst (19), d. h. vermittelst

$$k = \frac{l_1}{l} + \left(\frac{l_1}{l} + m\right) \text{lognat} \frac{l + m\,l}{l_1 + m\,l} \quad \ldots \quad (33)$$

sodann findet man aus (22):

$$O = \frac{75\ N}{v\left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right)k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)\right]} \quad \ldots \quad (34)$$

ferner aus (21):

$$R = \frac{2\,O}{\pi}\left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right)k - \left(\frac{\alpha}{\beta} + r\right)\right] \quad \ldots \quad (35)$$

ferner aus (23):

$$S = O\,v\left(\frac{l_1}{l} + m\right)(\alpha + \beta\,p) + s \quad \ldots \quad (36)$$

endlich aus (24):

$$q = S \quad \ldots\ldots\ldots \quad (37)$$

Die passenden Annahmen für p, $\frac{l_1}{l}$ und v richten sich auch hier nach dem Zweck, dem die Maschine zu dienen hat. In den meisten praktischen Fällen ist es am angemessensten, die Maschine so anzuordnen, dass sie bei mässiger Dampfspannung und mässiger Expansion ihre normale Leistung hervorzubringen vermag, also nicht zu sehr angestrengt ist, wenn sie ihren normalen Dienst verrichtet. Für solche Fälle kann man nehmen, vorausgesetzt dass nicht condensirt wird: $r = 15000$, $p = 35000$, $\frac{l_1}{l} = \frac{1}{2}$, $v = 1^m$. Für den Fall aber, dass die Maschine nicht nur expandiren soll, sondern dass auch Condensation gebraucht wird, kann man setzen:

$$r = 6000, \quad p = 20000, \quad v = 1, \quad \frac{l_1}{l} = \frac{1}{2}$$

Will man ein möglichst günstiges Güteverhältniss erzielen, so muss man eine im Verhältniss zum schädlichen Widerstand sehr hohe Dampfspannung und eine starke Expansion in Anwendung bringen. Damit aber die Kesseleinrichtung nicht zu schwierig und die Herstellung guter Dampfdichtungen möglich wird, muss man durchaus die Condensation eintreten lassen, denn thut man dies, so wird selbst für einen mässigen Werth von p das Verhältniss $\frac{r}{p}$ klein und ist eine starke Expansion auch bei mässiger Dampfspannung möglich. Der Vortheil der Anwendung der Condensation besteht wesentlich nur darin, dass dadurch mit schwächeren Dampfspannungen den Bedingungen einer vortheilhaften Verwendung des Dampfes entsprochen werden kann. Die Nachtheile der Condensation bestehen darin, dass die Condensationsmaschinen wegen des Condensationsapparates viel komplizirter sind als nicht condensirende Maschinen.

Theorie der Woolf'schen Maschine mit zwei Cylindern. Diese Maschine ist zur Expansion des Dampfes mit zwei Cylindern, mit einem kleineren A und einem grösseren B versehen, und der Dampf wird zuletzt, nachdem er in den Maschinen gewirkt hat, condensirt. Der Dampf wirkt zuerst während des ganzen Schubes mit gleichförmiger Kraft (zuweilen auch mit Expansion) auf den Kolben der kleinen Maschine, entweicht hierauf nach der Dampfkammer der grossen Maschine und wirkt auf den Kolben dieser Maschine, zuletzt entweicht er nach dem Condensator. Der Raum hinter dem kleinen Kolben kommunizirt stets mit dem Dampfkessel. Der Raum vor dem grossen Kolben mit dem Condensator. Die Räume vor dem kleinen und hinter dem grossen Kolben sind stets in Kommunikation. Der Dampf, welcher am Anfang des Kolbenschubes in dem kleinen Cylinder vor dem Kolben eingeschlossen ist, befindet sich am Ende des Kolbenschubes in dem grossen Cylinder hinter dem Kolben, hat daher während des Kolbenschubes expandirend gewirkt, und zwar gegen den kleinen Kolben zurücktreibend, gegen den grossen Kolben vorwärts treibend. Um die Rechnungen nicht zu sehr auszudehnen, wollen wir uns erlauben, die schädlichen Räume und das Volumen des Verbindungsrohres zwischen den beiden Maschinen zu vernachlässigen.

Es sei, Tafel XXVI., Fig 10, o und l für den kleinen Cylinder, O, L für den grossen Cylinder der Querschnitt und die Länge des Kolbenschubes, p die Spannung des Dampfes hinter dem kleinen Kolben während des ganzen Schubes, y die variable Spannung zwischen den beiden Kolben, nachdem der kleine Kolben einen Weg x zurückgelegt hat, r der auf einen Quadratmeter des grossen Kolbens reduzirte schädliche Widerstand. Durch r wird also überwunden: 1) der vor dem grossen Kolben herrschende Druck, 2) die Reibungswiderstände der Maschine, 3) der Widerstand, den die verschiedenen Pumpen der Bewegung entgegensetzen.

Beim Beginn des Kolbenschubes ist der kleine Dampfcylinder vor dem Kolben mit Dampf von einer Spannung p erfüllt, beträgt also diese Dampfmenge $o\,l\,(\alpha + \beta\,p)$ Kilogramm. Nachdem der kleine Kolben einen Weg x und gleichzeitig der grosse Kolben einen Weg $x\,\frac{L}{l}$ zurückgelegt hat, ist diese Dampfmenge $o\,l\,(\alpha + \beta\,p)$ in einem Raum $o\,(l - x) + O\,x\,\frac{L}{l}$ eingeschlossen und seine Spannung ist y. Daher hat man:

$$o\,l\,(\alpha + \beta\,p) = \left[o\,(l - x) + O\,x\,\frac{L}{l}\right](\alpha + \beta\,y) \quad . \quad . \quad (1)$$

demnach:

$$y = \left(\frac{\alpha}{\beta} + p\right)\frac{1}{1 + \left(\frac{O\,L}{o\,l} - 1\right)x} - \frac{\alpha}{\beta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Am Anfange des Kolbenschubes ist $y = p$, heben sich also die Pressungen gegen die beiden Flächen des kleinen Kolbens auf, wirkt also der kleine Kolben nicht treibend, wohl aber der grosse Kolben und zwar mit voller Kraft, denn hinter dem Kolben wirkt der Dampf mit einer Spannung p.

Am Ende des Kolbenschubes ist y sehr klein und kann selbst nur gleich r sein. Dann wird am Ende des Kolbenschubes der grosse Kolben nicht getrieben, wohl aber der kleine mit einer Kraft $o\,(p - r)$. Diese Expansionsmaschine ist also niemals ganz kraftlos, wie dies bei einer eincylindrischen Maschine am Ende des

Kolbenschubes der Fall sein kann. Daran kann man schon erkennen, dass die Woolf'sche Maschine eine grössere Gleichförmigkeit der Bewegung gewährt, als eine eincylindrige Expansionsmaschine.

Die nützliche Wirkung eines ganzen Schubes ist nun:

$$\int_0^l \left[o\,(p-y)\,dx + O\,(y-r)\,\frac{L}{l}\,dx \right] =$$

$$\int_0^l \left(o\,p - O\,r\,\frac{L}{l} \right) dx + \int_0^l \left(O\,\frac{L}{l} - o \right) y\,dx =$$

$$\left(o\,p - O\,r\,\frac{L}{l} \right) l + \left(O\,\frac{L}{l} - o \right) \int_0^l y\,dx$$

oder wenn man für y seinen Werth aus (2) einführt:

$$\left(o\,p - O\,r\,\frac{L}{l} \right) l + \left(O\,\frac{L}{l} - o \right) \int_0^l \left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p \right) \frac{1}{1 + \left(\frac{O\,L}{o\,l} - 1 \right) x} - \frac{\alpha}{\beta} \right] dx$$

Dieser Ausdruck wird durch Integration und Reduktion:

$$o\,l \left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p \right) \left(1 + \text{lognat}\,\frac{O\,L}{o\,l} \right) - \frac{O\,L}{o\,l} \left(\frac{\alpha}{\beta} + r \right) \right]$$

Nun ist $\frac{l}{v}$ die Zeit eines Schubes und $75\,N$ der in Kilogr.-Meter ausgedrückte Nutzeffekt; daher erhält man:

$$75\,N = o\,v \left[\left(\frac{\alpha}{\beta} + p \right) \left(1 + \text{lognat}\,\frac{O\,L}{o\,l} \right) - \frac{O\,L}{o\,l} \left(\frac{\alpha}{\beta} + r \right) \right] \quad . \quad (3)$$

Bei jedem Kolbenschub wird der kleine Cylinder vom Kessel aus mit Dampf gefüllt, man hat daher:

$$S = o\,v\,(\alpha + \beta\,p) + s \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (4)$$

Es liegt in der Natur der Sache, dass es an und für sich ganz gleichgiltig ist, ob die Expansion des Dampfes mit einem Cylinder, oder mit zwei oder drei erfolgt. Vom rein prinzipiellen Standpunkt aus beurtheilt, sind also alle Expansionsmaschinen gleichwerthig. Da aber die Maschinen mit zwei oder mehreren Cylindern in ihrer Konstruktion komplizirter sind, dadurch etwas mehr Reibung verursachen und jedenfalls auch kostspieliger sind, so würde man den eincylindrigen Maschinen den Vorzug geben müssen, wenn nicht der Umstand wäre, dass diese Woolf'sche zweicylindrige Msschine eine grössere Gleichförmigkeit der Bewegung gewährt. Um diesen Nachtheil der eincylindrigen Expansionsmaschine zu beseitigen, werden gegenwärtig sehr oft zwei gekuppelte Maschinen, von denen jede eincylindrig ist, angewendet und die Kupplung geschieht in der Art, dass die Schwungradswelle mit zwei unter rechtem Winkel gegeneinander gestellte Kurbeln versehen wird, auf welche die beiden Maschinen einwirken. Diese gekuppelten Maschinen sind zwar noch komplizirter als eine Woolf'sche Maschine, allein wir werden in der Folge in der Schwungradstheorie erfahren, dass bei gekuppelten Maschinen ungemein leichte Schwungräder ausreichen, um einen hohen Gleichförmigkeitsgrad zu erzielen.

Wir schliessen hiermit die allgemeine Theorie der Dampfmaschinen; die Theorie der sogenannten Wasserhaltungsmaschinen oder überhaupt der einfach wirkenden Dampfmaschinen mit Ventilsteuerung werden wir bei den Pumpwerken behandeln.

Wir gehen nun zum Studium der Dampfmaschinendetails über.

Die Steuerungen.

Einleitendes. Die Steuerungen sind Vorrichtungen, durch welche das geeignete und rechtzeitige Ueberströmen des Dampfes aus dem Kessel nach dem Cylinder und Abströmen aus dem Cylinder nach dem Condensator oder in die freie Luft bewirkt wird.

Die Steuerung geschieht 1) mit Schiebern, 2) mit Ventilen, 3) mit Schiebern und mit Ventilen. Wir werden in Folgendem nur die Schiebersteuerungen erklären und die Ventilsteuerungen erst bei den einfach wirkenden Wasserhaltungsmaschinen behandeln.

Schiebersteuerungen gibt es sehr viele. Wir beschränken uns aber nur diejenigen zu erklären, welche gegenwärtig noch im Gebrauch sind.

Einfache Schiebersteuerung für nicht expandirende Maschinen. Wir legen unserer Erklärung eine Maschine mit horizontalem Cylinder zu Grunde und nehmen an, dass der Schieber direkt von der Schwungradswelle aus bewegt werde.

Auf Tafel XXVI., Fig. 11 sind $f\,f_1$ die Dampfkanäle, die nach den Cylinderenden führen, g ist der Kanal, welcher bei condensirenden Maschinen nach dem Condensator, bei nicht condensirenden Maschinen in's Freie führt, h ist der Steuerungsschieber in seiner