Berechnung

der

Dampfmaschinen

nach der

de Pambour'schen Theorie.

Auf Veranlassung der Königlichen Technischen Deputation für Gewerbe

bearbeitet

von

W. Nottebohm.

Berlin,
gedruckt bei J. Petsch.

1841.

Allgemeine Eigenschaften des Wasserdampfes
und
Entwickelung der allgemeinen Gleichungen zur Berechnung der doppeltwirkenden Rotations-Dampfmaschinen.

Erstes Kapitel.

Ueber die Bildung und mechanische Wirkung des Dampfes.

Die Wirkungen des Dampfes bilden die Grundlage aller Untersuchungen und Berechnungen der Dampfmaschinen, und es kommt also zunächst darauf an, die Gesetze seiner Bildung und mechanischen Wirkung in der Kürze zu erörtern und folgende Eigenschaften desselben hervorzuheben:

1) Seine Spannkraft, Expansivkraft, oder der Druck, den er auf die Wand des ihn einschließenden Gefäßes ausübt, und der gewöhnlich in Pfunden auf den Quadratzoll oder Quadratfuß Fläche, zuweilen auch in Atmosphären, ausgedrückt wird.

2) Seine Temperatur, nach Graden des Thermometers.

3) Seine Dichtigkeit, oder das Gewicht einer Volumeneinheit desselben.

4) Sein relatives Volumen, oder das Dampf-Volumen in Beziehung auf das Volumen Wasser, aus dem sich derselbe gebildet hat. So ist z. B. das relative Volumen des Dampfes unter einem Atmosphärendruck circa 1700 Mal größer als das Volumen Wasser, woraus derselbe entstand, wohingegen das absolute Volumen von dem Rauminhalt des Gefäßes abhängt, worin derselbe enthalten ist.

Indem man das Dampfvolumen nicht auf das Gewicht, sondern ebenfalls auf das Volumen Wasser bezieht, aus dem sich dasselbe bildete, erreicht man bei Berechnung der Dampfmaschinen manche Bequemlichkeiten, wie sich später zeigen wird.

Der Dampf hat in dem Augenblicke, wo er sich im Kessel entwickelt und mit der Flüssigkeit noch in Berührung ist, ganz andere Eigenschaften, als wenn er von dieser getrennt ist. Bleibt nemlich der Dampf mit dem Wasser in Berührung, so erhöht sich mit der Temperatur zugleich auch seine Spannkraft und Dichtigkeit, und derselbe befindet sich dann für seine Temperatur im Maximum der Dichtigkeit und der Spannkraft, so daß eine beständige Abhängigkeit zwischen der Temperatur und Spannkraft statt findet. Wird dagegen der Dampf von der Flüssigkeit, woraus er sich entwickelt hat, getrennt, und darauf seine Temperatur erhöht, so kann kein Maximum der Dichtigkeit ferner statt finden, weil letztere nicht durch neu hinzutretenden Dampf erhöht wird; es ist also die vorhin erwähnte unveränderliche Abhängigkeit zwischen Spannkraft und Temperatur für diesen Fall nicht anzunehmen.

Behufs der Auffindung des Gesetzes zur Bestimmung der Spannkraft des mit der Flüssigkeit in Berührung stehenden Dampfes, wenn die Temperatur gegeben ist, und umgekehrt, sind bereits seit langer Zeit viele Versuche angestellt, besonders mit Dämpfen von geringem Drucke; für höhere Spannungen wurden dagegen verhältnißmäßig nur wenige Versuche gemacht, weil diese mit großen Kosten, Schwierigkeiten und Gefahren verbunden sind.

Die Versuche mit hochgespannten Dämpfen, welche Arago und Dulong im Auftrage der Akademie der Wissenschaften ausführten, übertreffen in Bezug auf Großartigkeit und Genauigkeit alle Untersuchungen dieser Art *). Die Dampfspannungen von 1 bis 24 Atmosphären wurden durch Quecksilbersäulen in 80 Fuß hohen Krystallglasröhren unmittelbar gemessen, und aus den Resultaten dieser Beobachtungen von den genannten Experimentatoren eine Formel abgeleitet, welche für einen Druck über 4 Atmosphären eine hinreichende Genauigkeit gewährt. Von 1 bis 4 Atmosphären ist dagegen die von Tredgold aufgestellte und von Mellet abgeänderte Formel weit genauer, und für geringere Druckkräfte als 1 Atmosphäre stimmt die Formel von Southern am besten mit der Erfahrung überein.

Da also keine dieser Formeln für alle Temperaturen mit den Versuchen ganz genau übereinstimmt, indem das wahre Gesetz zwischen Spannkraft und Temperatur des mit seiner Flüssigkeit in Berührung stehenden Dampfes zur Zeit noch unbekannt ist, so kann man sich nicht ausschließend bloß einer dieser Formeln bedienen, sondern jede nur innerhalb der Gränzen anwenden, wo ihre Resultate am besten mit directen Versuchen stimmen.

Die auf Preußisches Maaß und Gewicht reducirten Formeln, worin p den Dampfdruck in Pfunden auf 1 Quadratzoll und t die Temperatur des Dampfes in Graden des Celsiusschen Thermometers ausdrückt, sind nun folgende:

a) Formel von Southern für Spannkräfte bis zu 1 Atmosphäre:

$$p = 0{,}050517675 + \left[\frac{46{,}278 + t}{145{,}36}\right]^{5{,}13} \cdot 14{,}625.$$

$$t = 86{,}1649 \sqrt[5{,}13]{p - 0{,}050517675} - 46{,}278.$$

b) Formel von Mellet für Spannkräfte von 1 bis 4 Atmosphären.

$$p = \left[\frac{75 + t}{174}\right]^{6} \cdot 14{,}625.$$

$$t = 111{,}267 \sqrt[6]{p} - 75.$$

c) Formel von Arago und Dulong für Spannkräfte über 4 Atmosphären:

$$p = [0{,}28658 + 0{,}0072003 \cdot t]^{5} \cdot 14{,}625.$$

$$t = 81{,}214 \sqrt[5]{p} - 39{,}8011.$$

*) Exposé des recherches faites par ordre de l'Académie des Sciences, pour déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau à de hautes temperatures.

Pogg. Ann. B. XVIII. S. 438.

Gesetze von Mariotte und Gay-Lussac.

Das von Mariotte entdeckte und von den Physikern Arago und Dulong bis zu Druckkräften von 27 Atmosphären bestätigte Gesetz besteht in folgendem:

> Die Expansivkraft des Dampfes oder eines Gases ändert sich im umgekehrten Verhältnisse seines Volumens, wenn die Temperatur constant bleibt.

Bezeichnen demnach v und v′ die Volumen desselben Gewichtes Dampf p, und p′ die dazu gehörigen Spannkräfte, so findet für eine constante Temperatur die Gleichung statt:

$$\text{I.}\quad \frac{p}{p'} = \frac{v'}{v}.$$

Das Gay-Lussacsche Gesetz bestimmt ferner Folgendes:

> Aendert sich die Temperatur eines gegebenen Gewichts einer elastischen Flüssigkeit, wenn die Spannung constant bleibt, so ist die Volumen-Zunahme genau den Temperatur-Erhöhungen proportional, und zwar beträgt diese für jeden Grad Celsius = 0,00375 des Volumens desselben Gewichtes der elastischen Flüssigkeit bei 0° Temperatur.

Aus den später von Rudberg angestellten Versuchen*) hat sich indessen ergeben, daß die wahre Ausdehnung für jeden Grad Celsius nicht 0,00375 sondern 0,00364 des Volumens der elastischen Flüssigkeit bei 0° beträgt, weshalb der letztere Werth hier überall zum Grunde gelegt ist.

Setzt man also das Volumen eines gegebenen Gewichtes Dampf bei 0° Temperatur = V, so ist das Volumen v bei t° Temperatur:

$$v = V + V \cdot 0{,}00364\,t.$$

Für dasselbe Gewicht Dampf unter demselben Drucke, aber bei t′° Temperatur ist ebenso das entsprechende Volumen:

$$v' = V + V \cdot 0{,}00364\,t'.$$

Eine Verbindung dieser beiden Ausdrücke liefert die folgende Gleichung:

$$\text{II.}\quad \frac{v}{v'} = \frac{1 + 0{,}00364\,t}{1 + 0{,}00364\,t'}.$$

Das Mariottesche Gesetz setzt voraus, daß die Temperatur constant bleibt, wenn der Druck sich ändert; dahingegen macht das von Gay-Lussac aufgestellte Gesetz die Bedingung, daß der Druck constant bleibt, wenn die Temperatur sich ändert. Beide sind also, einzeln genommen, für Dämpfe, die mit ihrer Flüssigkeit in Berührung stehen, offenbar nicht anwendbar; indessen läßt sich aus ihrer Verbindung eine Relation ableiten, welche die durch eine gleichzeitige Temperatur- und Druckveränderung bewirkte Aenderung des Volumens angiebt, und diese ist dann also auf Dämpfe anwendbar, die mit der Flüssigkeit, woraus sie sich entwickeln, noch in Berührung stehen.

Gesetzt, man habe das Volumen eines gegebenen Gewichts Dampf zu bestimmen, welcher von dem Drucke p′ und der Temperatur t′ zu dem Drucke p und der Temperatur t übergeht, so kann man

*) Pogg. Ann. XLIV. p. 119—123.

zuerst annehmen, daß der Dampf von dem Drucke p' zu dem Drucke p übergeht, ohne seine Temperatur zu ändern, und hat dann für die Volumen V und v' nach dem Mariotteschen Gesetze (I.):

$$V = \frac{p'v'}{p}.$$

Nimmt man alsdann an, daß dieser Dampf von der Temperatur t' zu der Temperatur t übergeht, ohne den Druck zu ändern, so ist nach dem Gay-Lussacschen Gesetze (II.) das relative Volumen:

$$v = \frac{V(1+0{,}00364t)}{1+0{,}00364t'};$$

und wenn für V der obige Werth gesetzt wird:

$$\text{III.} \quad v = \frac{v'p'}{p} \cdot \frac{1+0{,}00634t}{1+0{,}00634t'}.$$

Diese Gleichung bestimmt das Gesetz, wonach sich das relative Volumen des Dampfes in Folge einer gegebenen gleichzeitigen Druck- und Temperatur-Veränderung ändert. Nun ist das Volumen Wasserdampf unter dem Drucke einer Atmosphäre (zu 15,018 Pfund pro Quadratzoll) und bei 100° Celsius, wenn derselbe mit dem Wasser noch in Berührung steht, circa 1700 Mal größer, als das Volumen Wasser, woraus er entstanden ist. Setzt man demnach für p', t' und v' diese Werthe in die vorhin aufgestellte allgemeine Gleichung, so erhält man:

$$v = 1700 \cdot \frac{15{,}018}{p} \cdot \frac{1+0{,}00364t}{1+0{,}00364 \cdot 100},$$

oder nach gehöriger Reduction: $\text{III.} \quad v = 18717{,}4 \cdot \frac{1+0{,}00364t}{p}.$

Die früher mitgetheilten Formeln von Southern, Mellet und Arago bestimmen die Temperatur des mit seiner Flüssigkeit noch in Berührung stehenden Dampfes als Function des Drucks, dagegen giebt die vorige Formel das relative Volumen des Dampfes in einem beliebigen Zustande als Function des Drucks und der Temperatur. Eliminirt man demnach aus diesen Gleichungen die Temperatur t, so erhält man eine Relation, welche das Volumen des im Maximum der Dichtigkeit befindlichen Dampfes als eine Function seiner Spannkraft ausdrückt. Wenngleich auf diese Weise sich sehr leicht Tafeln berechnen lassen, welche die Spannkräfte mit den dazu gehörigen Temperaturen und relativen Dampfvolumen enthalten, so läßt sich doch namentlich bei Dampfmaschinen nicht immer vorher entscheiden, ob die Formel von Southern, von Mellet, oder die von Arago und Dulong angewendet werden muß, indem jede von diesen — wie schon bemerkt — nur innerhalb bestimmter Gränzen sich der Wahrheit nähert; außerdem machen die darin vorkommenden Wurzelgrößen sie für den praktischen Gebrauch höchst unbequem. Aus diesen Gründen hat de Pambour folgende Nährungsformeln aufgestellt, welche das relative Volumen des Dampfs bloß als Function der Spannkraft bestimmen:

a) Formel für geringe Druckkräfte von $\frac{1}{3}$ bis 2 Atmosphären, wie solche bei Condensations-Dampfmaschinen vorkommen:

$$\text{IV.} \quad \mu = \frac{10000}{0{,}4227 + 0{,}002511\,p}.$$

b) Formel für höhere Druckkräfte, wie solche bei Hochdruckmaschinen ohne Condensation vorkommen:

$$\text{V.} \quad \mu = \frac{10000}{1{,}421 + 0{,}002236\,p}.$$

Diese beiden Formeln beziehen sich auf Preußisches Maaß und Gewicht, und es bezeichnet darin μ die Anzahl der Kubikfuße Dampf, welche sich unter einem Drucke von p Pfunden pro Quadratfuß aus einem Kubikfuß Wasser entwickeln.

Die zur Bildung des Wasserdampfes unter irgend einem Drucke erforderliche Wärmemenge war lange Gegenstand der Untersuchungen der berühmtesten Physiker. Wenn die Temperatur des Wassers unter dem Druck der freien atmosphärischen Luft so erhöht wird, daß sich dasselbe in Dampf verwandelt, so muß dieser denselben Druck wie die atmosphärische Luft ausüben; allein die Temperatur des Wassers oder des Dampfes steigt dann niemals über 100° Celsius, so viele Wärme demselben auch noch ferner von dem Feuer mitgetheilt werden mag. Diese fortwährend dem Wasser zugeführte Wärme muß demnach in den Dampf übergehen und dort gebunden werden, weil sie auf das Thermometer keine Wirkung ausübt und erst bei Condensirung des Dampfes wieder frei wird. Die gebundene oder latente Wärme wird also offenbar dazu verwendet, die Wasser-Molecüle in der, ihrem neuen elastisch-flüssigen Zustande entsprechenden Entfernung von einander zu erhalten. Schon die Versuche von Watt zeigten, daß der Dampf in dem Augenblicke seiner Bildung immer dieselbe Menge Wärme enthält, unter welchem Drucke er sich auch gebildet haben mag, und die Versuche von Sharpe und Clement haben seitdem dies näher bestätigt. Da demnach die Summe der freien und gebundenen Wärme des Wasserdampfes eine constante Größe ist, die nach den angestellten Versuchen 64° Celsius beträgt, so muß die Quantität der gebundenen Wärme desto kleiner werden, je höher die Temperatur des Dampfes oder die freie Wärme steigt.

Zur genauen Berechnung der Dampfmaschinen ist es wesentlich nöthig, das Gesetz zu kennen, wonach sich die Temperatur des Dampfes ändert, wenn sich die Spannkraft desselben in der Maschine ändert; und da die Wirkungen des Dampfes von seinem Volumen abhängen, so müssen die Veränderungen bestimmt werden, welche dieses Volumen in Folge der Temperatur- und Druckveränderungen während seiner Wirkung in der Maschine erfährt. Gewöhnlich nimmt man bei Berechnung der Dampfmaschinen an, daß der Dampf während seiner Wirkung in der Maschine stets dieselbe Temperatur behält, unter der er sich gebildet hat, so daß also bei allen Druckveränderungen das Mariottesche Gesetz anwendbar bliebe. Da sich aber alle elastischen Flüssigkeiten bei ihrer Ausdehnuug zugleich abkühlen, so ist jenes Gesetz nur unter der Voraussetzung gültig, daß der Dampf Zeit genug hat, von den ihn einschließenden erhitzten Körpern die erforderliche Wärme wieder aufzunehmen, was jedoch bei der Schnelligkeit der Dampfbewegung nicht wohl anzunehmen ist.

Um zu entscheiden, welche von diesen Ansichten die richtige ist, hat de Pambour viele Versuche gemacht, deren Resultate er in seinem Werke über Dampfwagen mittheilt. Zu diesem Zwecke hat derselbe an dem Kessel einer Locomotive ein Thermometer und ein Manometer, so wie zwei ähnliche Instrumente an der Röhre angebracht, durch welche der Dampf nach seiner Wirkung in der Maschine entweicht, und dann die gleichzeitigen Angaben beobachtet. Der Dampf im Kessel hatte bei diesen Versuchen einen Druck von 40 bis 60 Pfund pro Quadratzoll, und er entwich nach seiner Wirkung unter einem Drucke von 15 bis 20 Pfund in die Atmosphäre. Behielte nun der Dampf während seiner Wirkung in der Maschine die Temperatur, bei der er sich bildete, unverändert bei, so würde er zwar mit einem Drucke von 15 bis 20 Pfund auf den Quadratzoll, aber auch mit der dem Drucke von 40 bis 60 Pfund entsprechenden Temperatur aus der Maschine getreten seyn. Bei mehreren Hunderten von Versuchen fand dies aber durchaus nicht statt, sondern der Dampf trat ganz genau mit der seinem jedesmaligen Drucke entsprechenden Temperatur aus der Maschine.

Diese Versuche berechtigen demnach zu der Annahme, daß der Dampf während seiner Wirkung in der Maschine in dem seiner Temperatur entsprechenden Zustande des Maximums der Dichtigkeit bleibt, so daß zwischen Temperatur und Druck stets dieselbe Relation stattfindet, wie bei den mit ihrer Flüssigkeit in Berührung stehenden Dämpfen.

Die Formeln IV und V, welche das relative Volumen des Dampfes als Function des Drucks darstellen, sind also auf die Volumen-Veränderungen des Dampfes in der Maschine anwendbar. Bezeichnet man in diesen Formeln die constanten Zahlwerthe mit n und m, so hat man allgemein:

$$\mu = \frac{1}{n + mp};$$

und es bezeichnet also darin der Ausdruck $n + mp = \frac{1}{\mu}$ die Dichtigkeit des Dampfes in Bezug auf das Wasser, woraus sich derselbe bildete. Für den Druck p' ergiebt sich das Volumen μ' nach derselben Formel:

$$\mu' = \frac{1}{n + mp'}.$$

Vergleicht man beide Ausdrücke mit einander, so ergiebt sich der folgende:

$$\text{VI.} \quad \frac{\mu}{\mu'} = \frac{\frac{n}{m} + p'}{\frac{n}{m} + p}.$$

Die Dampfvolumen stehen daher nicht, wie nach dem Mariotteschen Gesetze angenommen wurde, im umgekehrten Verhältnisse der Druckkräfte selbst, sondern im umgekehrten Verhältnisse der, um eine constante Größe vermehrten Druckkräfte.

Zweites Kapitel.

Temperatur- und Druckveränderungen des Dampfes während seiner Wirkung in der Maschine.

Wird irgend eine Maschine in Betrieb gesetzt, und ist die bewegende Kraft größer als der Widerstand, so findet anfangs eine geringe Bewegung statt, welche sich aber so lange beschleunigt, bis die Geschwindigkeit eine Größe erreicht hat, die sie nicht zu überschreiten vermag. Von diesem Zeitpunkte an ist also die Geschwindigkeit eine gleichförmige, wobei die Kraft genau dem Widerstande das Gleichgewicht hält; denn wäre die Kraft größer oder kleiner, so müßte entweder eine Beschleunigung oder Verzögerung der Bewegung statt finden.

Bei einer Dampfmaschine ist der Druck des Dampfes im Cylinder die bewegende Kraft, und folglich, für eine vorausgesetzte gleichförmige Bewegung, genau so groß, wie die gegen den Kolben wirkende Last. Hieraus folgt, daß der Dampf bei seinem Uebergange aus dem Kessel in den Cylinder seine Expansivkraft ändert und einen Druck annimmt, der genau so groß, wie der von dem Widerstand herrührende ist.

Tritt nämlich der unter irgend einem beliebigen Drucke im Kessel gebildete Dampf oberhalb des Kolbens, wenn dieser seinen höchsten Stand erreicht hat und in Ruhe ist, so muß er sich anfangs ausdehnen, weil der Querschnitt des Cylinders bedeutend größer ist, als der der Dampfzuleitungs-Röhren. Da aber fortwährend frischer Dampf aus dem Kessel hinzuströmt, so wird das Gleichgewicht des Druckes im Kessel und im Cylinder sehr bald wieder hergestellt, und in Folge desselben fängt darauf der Kolben eine langsame Bewegung abwärts an, die sich der ganzen Maschine und Last mittheilt und allmälig zunimmt. Wird alsdann zu Ende des Kolbenlaufes der Dampf abgesperrt, so setzt dessenungeachtet die ganze bewegte Masse vermöge der Trägheit des Schwungrades die Bewegung noch fort. Der unterhalb des Kolbens neu hinzuströmende Dampf findet denselben also jetzt schon nach aufwärts in Bewegung, und indem er ihm abermals eine neue Quantität von Bewegung giebt, wird diese der ganzen Masse und dem Schwungrade mitgetheilt und darin aufgehäuft. Da also der Kolben bei jedem Hube einen Zusatz an Geschwindigkeit erhält, so wird seine Bewegung eine beschleunigte.

Der Dampf wird im Kessel fortwährend mit derselben Schnelligkeit entwickelt und strömt in den Cylinder; aber in dem Maaße wie sich der Kolben rascher bewegt, findet der Dampf bei seinem Eintritt in den Cylinder einen größern Raum, bei dessen Ausfüllung er eine kleinere Spannung annehmen muß, und hat endlich der Kolben die der Schnelligkeit der Dampfbildung im Kessel entsprechende Geschwindigkeit angenommen, so muß nothwendig der Druck des Dampfes im Cylinder dem Widerstande des Kolbens gleich, und die Bewegung eine gleichförmige seyn. Bezeichnet demnach R den Widerstand und P' den Dampfdruck im Cylinder, beide Größen auf die Einheit der Kolbenfläche bezogen, so ist in dem Augenblicke, wo die gleichförmige Bewegung eingetreten ist:

$$\text{I.} \quad P' = R.$$

Die Intensität der Kraft ist hier im Grunde nichts anderes als die Schnelligkeit der Dampferzeugung im Kessel; auch muß nothwendig das erzeugte Dampfquantum dem verbrauchten gleich seyn. Gesetzt also, es verdampften in der Minute N Kubikfuß Wasser, und aus einem Kubikfuß bildeten sich bei einem Drucke P im Kessel v Kubikfuß Dampf, so wäre das in der Minute erzeugte Dampfvolumen $= vN$. Sobald dieser Dampf in den Cylinder tritt, nimmt er den Druck P' an, und wenn man dabei vorläufig voraussetzt, daß die Temperatur bei dem Uebergange von dem Drucke P zu dem P' constant bleibt, so nimmt, zufolge des Mariotteschen Gesetzes, sein Volumen im umgekehrten Verhältnisse der Spannkräfte zu, und man hat also die Proportion:

$$P' : P = vN : vN \cdot \frac{P}{P'}.$$

Aus dem im Kessel gebildeten Dampfvolumen vN entsteht also im Cylinder das Volumen $vN \cdot \frac{P}{P'}$.

Ist ferner c die Geschwindigkeit des Kolbens pro Minute, und a der Cylinderquerschnitt, so ist das verbrauchte Dampfvolumen = ac; und da dieses dem erzeugten gleich seyn muß; so entsteht die Gleichung:

$$\text{II.} \quad ac = vN \cdot \frac{P}{P'},$$

und mit Berücksichtigung des Werthes von P′ in Gleichung I erhält man hieraus die Geschwindigkeit des Kolbens:

$$\text{III.} \quad c = \frac{vN}{a} \cdot \frac{P}{R}.$$

Nimmt man dagegen c als bekannt an, so ergiebt sich der gegen den Kolben wirkende Widerstand:

$$\text{IV.} \quad R = \frac{vNP}{ac};$$

und endlich erhält man daraus die Verdampfung:

$$\text{V.} \quad N = \frac{acR}{vP}.$$

Die vorhin in ihrem Grundprincipe angedeutete Theorie beruht also auf der Annahme, daß der im Kessel unter dem Drucke P gebildete Dampf bei seinem Eintritt in den Cylinder eine Spannkraft P′ annimmt, welche genau durch den gegen den Kolben wirkenden Widerstand bestimmt wird. Diese Spannkraft ist also nur in seltenen Fällen der im Kessel statt findenden gleich; in der Regel aber beträchtlich davon verschieden, so daß kein constantes Verhältniß zwischen beiden angenommen werden kann. Wenn man also bei Berechnung einer Dampfmaschine den Dampfdruck im Kessel als unvermindert im Cylinder wirksam in Rechnung stellt, wie dies gewöhnlich geschieht, so begeht man einen oft so bedeutenden Fehler, daß nur durch ein Reductions-Coefficient, der die Verluste wegen Reibung, Schnelligkeit der Dampfzuströmung, Oeffnen der Ventile u. s. w. unverhältnißmäßig groß erscheinen läßt, der so berechnete Effect mit der wirklichen Leistung der Maschine nothdürftig in Einklang gebracht werden kann.

Die Richtigkeit der vorhin angedeuteten Theorie ergiebt sich ferner noch aus folgenden Betrachtungen:

1) Wenn Dampf aus dem Kessel durch die Röhrenleitung in den Cylinder tritt, dessen Querschnitt beiläufig zehn Mal größer ist, so wird, wie vorhin schon bemerkt, derselbe sich anfangs ausdehnen und im Fall der Kolben unbeweglich ist, sehr bald dieselbe Spannung wie im Kessel annehmen. Da aber der Kolben nur einen gewissen von der Last abhängigen Widerstand leistet, und seine Bewegung anfängt, sobald der Dampf eine eben so große Spannkraft wieder erlangt hat, so muß also der Dampf im Cylinder stets genau denselben Druck ausüben, wie der Widerstand. Wäre z. B. die Spannkraft der Dämpfe im Kessel 50 Pfund auf den Quadratzoll, und betrüge der Widerstand auf den Quadratzoll Kolbenfläche 40 Pfund, so könnte auch der Dampf im Cylinder nur 40 Pfund Spannung annehmen. Für den Cylinder hat demnach der Kolben die Function eines Sicherheits-Ventils.

2) Hätte der Dampf im Cylinder dieselbe Expansivkraft wie im Kessel, oder ständen beide im einem gewissen constanten Verhältnisse zu einander, so müßte, da die in der Minute im Kessel erzeugte Dampfmenge bei demselben Drucke vom Cylinder consumirt, und folglich ihn x Mal füllen würde, nothwendig folgen, daß die Maschine bei allen Belastungen dieselbe Geschwindigkeit haben muß, wenn der Druck im Kessel constant bleibt. Gegentheils zeigt aber die gemeine Erfahrung, daß eine Maschine schneller geht, wenn die Last abnimmt, und umgekehrt. Liefert z. B. der Kessel pro Minute 100 Kubikfuß, welche bei einem Widerstande R den Cylinder 100 Mal füllen, so kann bei einem Widerstande $\frac{1}{2}$R der Dampf sich doppelt so viel ausdehnen, um ebenfalls wieder mit der Last ins Gleichgewicht zu

kommen. Die 100 Kubikfuß Dampf sind also jetzt im Stande, den Cylinder 200 Mal zu füllen, und es wird mithin die Last $\frac{1}{2}$R mit einer doppelt so großen Geschwindigkeit als der Widerstand R bewegt werden, wie es sich auch in der That verhält.

3) Hätte der Dampf im Cylinder dieselbe Expansivkraft wie im Kessel, oder ständen beide in irgend einem constanten Verhältnisse, so müßte eine Locomotive bei Zurücklegung desselben Weges, da die Räder immer dieselbe Anzahl von Umläufen machen, und so lange sie bei demselben Drucke im Kessel arbeitet, stets dieselbe Quantität Wasser verbrauchen. Nun zeigen aber alle Versuche und Beobachtungen, daß die Maschine bei Zurücklegung eines und desselben Weges und bei constanter Dampfspannung im Kessel, desto mehr Wasser verbraucht, je größer die zu bewegende Last ist; es muß also nothwendig die Spannung des Dampfes im Cylinder nur durch den Widerstand bestimmt werden. Endlich

4) Da die verbrauchte Menge Brennmaterial der gebildeten Dampfmenge proportional ist, so müßte die Quantität desselben bei Zurücklegung derselben Strecke ebenfalls immer dieselbe seyn; allein die Erfahrung zeigt, daß der Verbrauch an Brennmaterial mit der Belastung wächst und abnimmt.

Diese Thatsachen und noch viele andere, welche nach der bisher gebräuchlichen Theorie völlig unerklärbar sind, ergeben sich aus der vorhin entwickelten Wirkungsart des Dampfes in der Maschine auf eine ganz natürliche Weise, so wie überhaupt diese Theorie das ganze Spiel der Maschine in das hellste Licht setzt.

Drittes Kapitel.

Einfluß der Regulator-Oeffnung auf den Effect der Maschine.

Während des Ganges einer stationairen Dampfmaschine wird die Dampfklappe durch das konische Pendel in Bewegung gesetzt, und dadurch die zum Durchgange des Dampfes bestimmte Oeffnung, je nach der Größe der zu bewegenden Last, vergrößert oder verkleinert.

Durch die Verengung der Regulator-Oeffnung wird zwar keinesweges der Dampfdruck im Cylinder verringert, da dieser, wie bereits nachgewiesen, nur von dem Widerstande abhängig ist; wohl aber muß dadurch die Menge des in einer gewissen Zeit durchströmenden Dampfes vermindert werden. Kann also der Dampf nicht mehr frei nach dem Cylinder strömen, so muß, da immer dieselbe Menge entwickelt wird, derselbe sich mehr und mehr im Kessel anhäufen, und seine Dichtigkeit und Expansivkraft so lange steigern, bis diese endlich so groß wird, daß entweder die gebildete Dampfmenge durch die verengte Oeffnung in den Cylinder gelangen, oder durch das Sicherheitsventil entweichen kann. Die Größe der Regulator-Oeffnung hat also auf den Dampfdruck im Kessel einen directen Einfluß.

Ist das Sicherheitsventil zu sehr belastet, und die Verengung der Regulator-Oeffnung nur mäßig, so daß der im Kessel sich anhäufende Dampf sehr bald die erforderliche Dichtigkeit erlangt, um das ganze sich bildende Dampfquantum in den Cylinder abzuführen, worin sich derselbe verhältnißmäßig ausdehnt und einen dem Widerstande gleichen Druck wieder annimmt: so sind immer die im vorigen

Kapitel entwickelten Formeln gültig, wenn darin für P der neue stattfindende Druck, und für N die neue Verdampfung, im Fall solche sich geändert hat, substituirt wird.

Ist dagegen das Sicherheitsventil weniger belastet, so daß der Dampf dasselbe hebt, ehe er diejenige Expansivkraft erlangt, um ganz durch die verkleinerte Regulator-Oeffnung in den Cylinder zu gelangen, so muß, da ein Theil des gebildeten Dampfes ungenutzt entweicht, der Effect der Maschine nothwendig vermindert werden. Da nun aber vN diejenige Dampfmenge bezeichnet, welche im Cylinder wirksam ist, so bleiben die Formeln auch für diesen Fall vollkommen anwendbar, wenn für vN die Differenz zwischen der ganzen im Kessel gebildeten und der durch das Sicherheitsventil entwichenen Dampfmenge substituirt wird.

Das ganze, während einer gewissen Zeit verdampfte Wasserquantum läßt sich in den Speisebehältern, namentlich bei Locomotiven, unmittelbar messen. Die Menge des verdampften Wassers, welche durch das Sicherheitsventil entweicht, läßt sich bestimmen, indem man beobachtet, wie hoch dasselbe gehoben wird. Wird alsdann der Abfluß des Dampfes nach dem Cylinder völlig abgeschlossen, so daß die ganze Dampfmenge durch das Sicherheitsventil entweicht, und beobachtet man wieder die Hubhöhe des Ventils, so giebt das Verhältniß der ersten Höhe zu der zweiten das Verhältniß der verlorenen Dampfmenge zu der Totaldampfmenge. Ein noch genaueres Resultat wird erhalten, wenn man den durch das Sicherheitsventil entwichenen Dampf condensirt, und also direct das verlorene Wasserquantum bestimmt.

In den vorigen Fällen wurde vorausgesetzt, daß nach Verengung der Regulator-Oeffnung die Verdampfung im Kessel constant blieb. Wird aber in dem Augenblicke, wo der Dampf durch das Sicherheitsventil entweicht, die Intensität des Feuers vermindert, so daß das Ventil sich wieder schließt, so nimmt die in der Zeiteinheit erzeugte Dampfmenge natürlich ab. Setzt man also für N die diesem Falle entsprechende Verdampfung in obige Formeln, so bleiben sie vor wie nach richtig.

Untersucht man diese 3 Fälle etwas genauer, so ergiebt sich folgendes:

a) Im ersten Falle, wo das Feuer dieselbe Intensität behält, die Oeffnung des Regulators verkleinert wird, aber das Sicherheitsventil verschlossen bleibt, wird der Druck P im Kessel größer. Da aber in den gedachten Formeln P mit dem relativen Volumen v, d. h. mit der Anzahl der Kubikfuß Dampf, welche sich unter diesem Drucke aus 1 Kubikfuß Wasser bilden, multiplicirt vorkommt, und da dieses Volumen im umgekehrten Verhältnisse der Dichtigkeit des Dampfes steht, und die Dichtigkeit selbst fast im directen Verhältnisse des Druckes variirt, so bleibt das Product vP beinahe constant. Da endlich die Verdampfungskraft eines Kessels auch für verschiedene Spannungen dieselbe bleibt, wie gewöhnlich angenommen wird, so muß auch N constant bleiben, und also die Maschine nach Verkleinerung der Regulator-Oeffnung denselben Effect haben wie vorher.

b) Im zweiten Falle, wo die Regulator-Oeffnung sich verengt, aber außerdem noch Dampf durch das Sicherheitsventil entweicht, verursacht die Verengung der Oeffnung zwar keinen Effectverlust, wie eben nachgewiesen, aber es findet eine, der durch das Sicherheitsventil entwichenen Dampfmenge proportionale Verminderung der Wirkung statt.

c) Im dritten Falle, wo die Regulator-Oeffnung verengt und zugleich die erzeugte Dampfmenge verringert wird, muß nothwendig auch der Effect um eben so viel verringert werden.

Der zweite Fall kommt fast immer bei Locomotiven vor, weil die Widerstände durch die Neigung der Bahn so veränderlich sind, daß stets ein kräftiges Feuer unterhalten werden muß, um nöthigenfalls augenblicklich die Kraft verstärken zu können. Der dritte Fall findet bei stationairen Maschinen Anwendung, indem zur Ersparung an Brennmaterial die Intensität des Feuers gewöhnlich vermindert wird, wenn die zu bewegende Last abnimmt.

Viertes Kapitel.

Entwickelung der allgemeinen Gleichungen zur Berechnung der Dampfmaschinen.

Die vorhin im ersten Kapitel bereits aufgestellte Relation, welche die Anzahl μ der Kubikfuße Dampf bestimmt, die sich unter einem Drucke p auf den Quadratfuß aus 1 Kubikfuß Wasser entwickeln, war:

$$\text{I.}\quad \mu = \frac{1}{n + mp};$$

sie entspricht allen Veränderungen, welche der Dampf während seiner Wirkung in der Maschine erleidet, da derselbe, wie ebenfalls vorhin nachgewiesen, fortwährend das seiner Temperatur entsprechende Maximum der Dichtigkeit behält.

Bezeichnet nun N die Anzahl der Kubikfuße Wasser, welche unter p Pfund Druck auf den Quadratfuß verdampfen, so entstehen daraus μ N Kubikfuß Dampf, und setzt man diese gleich M, so ist zunächst:

$$\mu N = M, \quad \text{oder} \quad \mu = \frac{M}{N},$$

und mit Rücksicht auf Gleichung (I):

$$\text{II.}\quad \frac{M}{N} = \frac{1}{n + mp}.$$

Aus demselben Volumen Wasser N erhält man bei p′ Pfund Druck M′ Kubikfuß Dampf, so daß ebenso folgende Gleichung besteht:

$$\text{III.}\quad \frac{M'}{N} = \frac{1}{n + mp'}.$$

Beide Gleichungen (II und III) mit einander verbunden liefern die folgende:

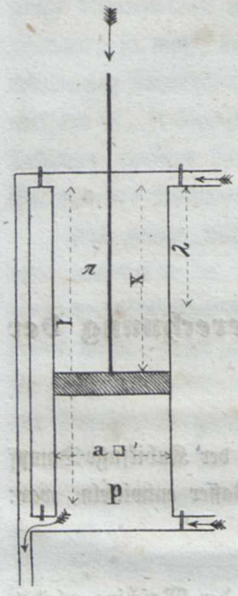
$$\frac{M}{M'} = \frac{n + mp'}{n + mp}, \quad \text{oder}$$

$$\text{IV.}\quad p = \frac{M'}{M} \cdot \left[\frac{n}{m} + p'\right] - \frac{n}{m}.$$

Nach Aufstellung dieser Relation sollen nun zur Erreichung der größten Allgemeinheit im Folgenden die Gleichungen für eine Condensations- und Expansions-Maschine entwickelt werden, wobei aber folgende zwei Bedingungen zum Grunde gelegt sind:

1) Die Bewegung der Maschine ist gleichförmig, so daß die Kraft genau dem Widerstande gleich ist, und

2) Das vom Cylinder verbrauchte Dampfquantum ist gleich dem in derselben Zeit im Kessel erzeugten.



Der Dampfdruck im Kessel sei P Pfund auf den Quadratfuß, und bei seinem Eintritt in den Cylinder verringere sich dieser nach Maaßgabe des Widerstandes auf P'. Der ganze Hub betrage 1 Fuß; λ sei der in dem Augenblick der Dampfabsperrung vom Kolben durchlaufene Weg; s die Länge des freien Raumes an beiden Enden des Cylinders, welcher sich bei jedem Hube mit Dampf anfüllt, und a die Kolbenfläche in Quadratfußen. Endlich bezeichne x den Weg, welchen der Kolben, vom Anfange des Hubes gerechnet, durchlaufen, wenn der expandirte Dampf den Druck π angenommen hat.

Während der Kolben den unendlich kleinen Weg dx zurücklegt, ist die Wirkung des Dampfes:

$$a \pi \, dx.$$

In dem Augenblick der Absperrung war das Dampfvolumen $= a[\lambda + s]$, aber nach Zurücklegung des Weges $x = a[x + s]$.

Setzt man in die vorige Gleichung IV die beziehlichen Werthe, nemlich $p = \pi$, $M' = a(\lambda + s)$, $M = a(x + s)$ und $p' = P'$, so entsteht folgende Gleichung:

$$\pi = \frac{\lambda + s}{x + s} \cdot \left[\frac{n}{m} + P'\right] - \frac{n}{m},$$

und wenn man mit adx multiplicirt:

$$a \pi \, dx = a\left(\frac{n}{m} + P'\right) \cdot \frac{\lambda + s}{x + s} \cdot dx - a \cdot \frac{n}{m} \cdot dx.$$

Wird von diesem Ausdruck das Integral genommen von $x = \lambda$ bis $x = 1$, so erhält man den durch die Expansion des Dampfes bewirkten Effect, und um den ganzen Effect zu erhalten, muß die vor Abschluß des Dampfes verrichtete Arbeit, nemlich $a \lambda P'$ noch hinzuaddirt werden. Nun befindet sich aber, wie wir vorausgesetzt haben, die Maschine im Zustande gleichförmiger Bewegung, so daß die Kraft genau dem Widerstande gleich ist; wäre also der von dem Widerstande ausgeübte Druck auf jeden Quadratfuß Kolbenfläche gleich R, so ist die wirkliche Arbeit der Maschine während eines Kolbenlaufs $= aRl$; also:

$$aRl = a\lambda P' + a\left(\frac{n}{m} + P'\right)(\lambda + s)\int_{\lambda}^{l} \frac{dx}{x + s} - a \cdot \frac{n}{m} \int_{\lambda}^{l} dx.$$

Wird die Integration innerhalb der angegebenen Gränzen ausgeführt, so erhält man nach gehöriger Reduction:

$$1) \quad aRl = a \cdot [\lambda + s]\left[\frac{n}{m} + P'\right]\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\,\text{nat.}\,\frac{l + s}{\lambda + s}\right] - \frac{n}{m} \cdot al.$$

Um nun die Bedingung zu erfüllen, daß das in der Zeiteinheit von dem Kessel erzeugte Dampfquantum dem verbrauchten gleich sei, setze man die in einer Minute verdampfte und dem Kessel zugeführte Wassermenge $= N$ Kubikfuß, so entstehen daraus unter dem Drucke P' im Cylinder nach der Formel II $\frac{N}{n + mP'}$ Kubikfuß Dampf.

Das verbrauchte Dampfvolumen während eines Kolbenlaufs ist $a(\lambda + s)$, und wenn pro Minute z Hübe erfolgen $= az(\lambda + s)$.

Da also in der Minute z Mal der Weg l durchlaufen wird, so ist die Geschwindigkeit für diese Zeit $c = zl$, und also $z = \frac{c}{l}$. Setzt man demnach für z diesen Werth, so ist das consumirte Dampfvolumen in der Minute $= ca \cdot \frac{\lambda + s}{l}$, und es findet folgende Gleichung statt:

$$2)\quad \frac{N}{n + mP'} = ac \cdot \frac{\lambda + s}{l}.$$

Eliminirt man aus diesen Gleichungen (1 und 2) die Größe P′, so entsteht:

$$3)\quad c = \frac{N}{a(n + mR)} \cdot \left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\,\text{nat}\,\frac{l + s}{\lambda + s}\right].$$

Diese Formel berücksicht genau den Umstand, daß sich die Spannung des Dampfes während seiner Wirkung in der Maschine ändert, und zugleich auch die Temperatur den entsprechenden Werth annimmt.

Nähme man an, die Temperatur bleibe constant, und bezeichnet wieder mit v die Anzahl der Kubikfuß Dampf aus 1 Kubikfuß Wasser unter dem Drucke P im Kessel, so wäre das aus N Kubikfuß Wasser erzeugte Volumen $= vN$. Nimmt nun dieser Dampf bei seinem Eintritt in den Cylinder den Druck R an, so verändert sich das Volumen im umgekehrten Verhältnisse des Drucks, d. h. es wird gleich $v \cdot \frac{NP}{R}$. Setzt man diesen Werth statt $\frac{N}{n + mR}$ in obige Gleichung (3), und außerdem $\lambda = l$ und $s = 0$, so entsteht die folgende Gleichung:

$$c = \frac{vPN}{aR},$$

die bereits im zweiten Kapitel gefunden wurde.

Die Größe R bezeichnet den Gesammt-Widerstand in Bezug auf die Flächeneinheit des Kolbens, und besteht offenbar aus mehreren Theilen, diese sind:

1) Der von der eigentlichen Last der Maschine herrührende Widerstand Q.

2) Der Widerstand, welcher aus der Reibung der unbelasteten Maschine entspringt, f.

3) Je größer die von der Maschine zu bewegende Last ist, desto mehr muß die Reibung in der Maschine selbst zunehmen; man kann also den Zuwachs an Reibung proportional der Last setzen und ihn demnach ausdrücken durch δQ. Endlich

4) Sey p der Widerstand, der bei einer Condensations-Maschine von der unvollkommenen Condensation, und bei einer Maschine ohne Condensation von dem atmosphärischen Drucke herrührt.

Bei Locomotiven kommen noch einige Widerstände hinzu, die später bei Berechnung derselben angeführt werden.

Der Totalwiderstand ist demnach:

$$R = (1 + \delta)Q + p + f,$$

und wird dieser Werth in Gleichung (3) eingeführt, so entsteht folgende Gleichung:

$$c = \frac{N}{a} \cdot \frac{\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat}\,\frac{l + s}{\lambda + s}}{n + m[Q(1 + \delta) + p + f]}.$$

Setzt man zur Abkürzung $\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\mathrm{nat}\frac{l+s}{\lambda+s}=k$, welcher Ausdruck sich für Maschinen ohne Expansion auf das Verhältniß $\frac{l}{l+s}$ reducirt, so wird die vorige Gleichung:

$$\text{(A).}\quad c=\frac{N}{a}\cdot\frac{k}{n+m[(1+\delta)Q+p+f]}.$$

In dieser Formel ist die Größe $\frac{N}{n+mR}$ das aus dem Wasservolumen N unter dem Drucke R erzeugte Dampfvolumen; man erhält also die gesuchte Geschwindigkeit c, wenn man dieses Volumen durch die Kolbenfläche a dividirt, und mit der Größe k multiplicirt.

Entwickelt man aus der vorigen Gleichung die Größe aQ, so erhält man die Last, welche eine gegebene Maschine mit einer gegebenen Geschwindigkeit bewegen kann, nemlich:

$$\text{(B).}\quad aQ=\frac{Nk}{(1+\delta)mc}-\frac{a}{1+\delta}\left[\frac{n}{m}+p+f\right].$$

Eliminirt man dagegen die Größe N, so erhält man die Quantität Wasser, welche die Maschine in der Minute verdampfen muß, nemlich:

$$\text{(C).}\quad N=ac\cdot\frac{n+m[Q(1+\delta)+p+f]}{k}.$$

Der Nutzeffect E wird ausgedrückt durch aQc; multiplicirt man demnach die Gleichung (B) mit c, so entsteht:

$$\text{(D).}\quad E=aQc=\frac{Nk}{(1+\delta)m}-\frac{ac}{1+\delta}\left[\frac{n}{m}+p+f\right].$$

Multiplicirt man ferner die Gleichung (A) mit aQ, so erhält man für den Nutzeffect noch folgenden Ausdruck:

$$\text{(E).}\quad E=aQc=\frac{QNk}{n+m[Q(1+\delta)+p+f]}.$$

Der Nutzeffect einer Maschine ist also nicht von dem Drucke abhängig, unter welchem sich der Dampf im Kessel bildet, sondern wesentlich von der Menge des in der Zeiteinheit verdampften Wassers.

Die folgende Tafel ist für Rotationsmaschinen berechnet, bei welchen der freie Raum s an beiden Enden des Cylinders $= 0{,}05\cdot l$ ist. Bei Maschinen ohne Krummzapfen ist dieser Spielraum dagegen bedeutend größer und beträgt mit den daran gränzenden Durchgängen circa 0,1 des Kolbenlaufs.

Hülfstafel

zur numerischen Berechnung der Formeln in Bezug auf Rotations-Maschinen.

Vor der Absperrung des Dampfes durchlaufener Theil des Hubes, oder Werth von $\frac{\lambda}{l}$	Zugehöriger Werth des Bruches $\frac{l}{\lambda+s}$	Zugehöriger Werth von k oder von $\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.n.\frac{l+s}{\lambda+s}$	Vor der Absperrung des Dampfes durchlaufener Theil des Hubes, oder Werth von $\frac{\lambda}{l}$	Zugehöriger Werth des Bruches $\frac{l}{\lambda+s}$	Zugehöriger Werth von k oder von $\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.n.\frac{l+s}{\lambda+s}$
0,10	6,667	2,613	0,51	1,786	1,539
0,11	6,250	2,569	0,52	1,754	1,523
0,12	5,882	2,526	0,53	1,724	1,507
0,13	5,556	2,485	0,54	1,695	1,491
0,14	5,263	2,446	0,55	1,667	1,476
0,15	5,000	2,408	0,56	1,639	1,461
0,16	4,762	2,371	0,57	1,613	1,445
0,17	4,546	2,336	0,58	1,587	1,431
0,18	4,348	2,301	0,59	1,563	1,417
0,19	4,167	2,268	0,60	1,539	1,402
0,20	4,000	2,235	0,61	1,515	1,388
0,21	3,846	2,203	0,62	1,493	1,374
0,22	3,704	2,173	0,63	1,471	1,361
0,23	3,571	2,142	0,64	1,449	1,347
0,24	3,448	2,114	0,65	1,429	1,334
0,25	3,333	2,085	0,66	1,409	1,321
0,26	3,226	2,059	0,67	1,389	1,308
0,27	3,125	2,032	0,68	1,370	1,295
0,28	3,030	2,006	0,69	1,351	1,282
0,29	2,941	1,980	0,70	1,333	1,269
0,30	2,857	1,955	0,71	1,316	1,257
0,31	2,778	1,931	0,72	1,299	1,240
0,32	2,703	1,908	0,73	1,282	1,233
0,33	2,632	1,884	0,74	1,266	1,221
0,34	2,564	1,862	0,75	1,250	1,210
0,35	2,500	1,840	0,76	1,235	1,197
0,36	2,439	1,818	0,77	1,220	1,186
0,37	2,381	1,797	0,78	1,205	1,175
0,38	2,326	1,776	0,79	1,191	1,164
0,39	2,273	1,755	0,80	1,177	1,152
0,40	2,222	1,736	0,81	1,163	1,141
0,41	2,174	1,716	0,82	1,149	1,131
0,42	2,128	1,697	0,83	1,136	1,119
0,43	2,083	1,678	0,84	1,123	1,109
0,44	2,041	1,660	0,85	1,111	1,099
0,45	2,000	1,642	0,86	1,099	1,088
0,46	1,961	1,624	0,87	1,087	1,078
0,47	1,923	1,606	0,88	1,075	1,067
0,48	1,887	1,589	0,89	1,064	1,057
0,49	1,852	1,572	0,90	1,053	1,047
0,50	1,818	1,555			

Fünftes Kapitel.

Bestimmung des größten Effectes der Maschine, wenn die Expansion als gegeben vorausgesetzt wird.

Wenn man die im vorigen Kapitel in ihrer Allgemeinheit aufgestellte Gleichung (D),

$$E = aQc = \frac{Nk}{(1+\delta)m} - \frac{ac}{1+\delta}\left(\frac{n}{m} + p + f\right),$$

welche den Effect der Maschine ausdrückt, näher betrachtet, so springt gleich in die Augen, daß letzterer mit der Zunahme der Geschwindigkeit c abnimmt. Geht man nun auf die früher für c entwickelte Gleichung (2) im vierten Kapitel:

$$c = \frac{N}{a(n + mP')} \cdot \frac{l}{\lambda + s}$$

zurück, so ergiebt sich, daß diese Geschwindigkeit um so kleiner wird, je größer P' ist; denn nach unserer Voraussetzung sind die Größen l, λ, s, a, n und m constant. Da nun für P' der möglichst größte Werth $= P$ ist, so wird die Bedingung des Minimums von c durch $P' = P$ erfüllt, und die kleinste Geschwindigkeit ist also

$$\text{I.}\quad c' = \frac{N}{a(n + mP)} \cdot \frac{l}{\lambda + s}.$$

Da $\frac{N}{n + mP}$ die Anzahl der Kubikfuß Dampf ausdrückt, welche sich unter dem Drucke P aus N Kubikfuß Wasser bilden, so kann man diese auch nach der Formel im zweiten Kapitel durch vN darstellen, wo v das relative Volumen des Dampfes unter dem Drucke P bezeichnet. Demnach hat man ebenso:

$$\text{I}'.\quad c' = \frac{vN}{a} \cdot \frac{l}{\lambda + s}.$$

Der Werth von v wird nach den im ersten Kapitel mitgetheilten Formeln berechnet und ist genauer als der Näherungswerth $\frac{1}{n + mP}$. Man kann dieses Verfahren überall anwenden, wo die Größen n und m in der Form $n + mP$ vorkommen.

Da sich zwischen Kessel und Cylinder Leitungsröhren befinden, welche dem durchströmenden Dampfe einen gewissen Widerstand entgegensetzen, so kann, strenge genommen, P' niemals ganz den Werth P erreichen und die Geschwindigkeit wird also stets etwas größer als c' seyn.

Diese Geschwindigkeit für das Maximum des Nutzeffects ist nicht für alle Maschinen unter übrigens gleichen Umständen dieselbe, sondern sie ändert sich, wie die Gleichung I zeigt, in directem Verhältnisse der Verdampfung N und im umgekehrten des Cylinder-Querschnitts. Hat z. B. eine Dampfmaschine das Maximum des Nutzeffects bei irgend einer Geschwindigkeit, so läßt sich leicht eine andere construiren, welche den größten Effect bei einer ganz andern Geschwindigkeit liefert. Es ist nemlich nichts weiter nothwendig, als entweder den Durchmesser des Cylinders größer oder kleiner zu machen, oder den Cylinder unverändert beizubehalten, und dagegen die Dimensionen des Kessels zu ändern; ja schon eine Zu= oder Abnahme der Intensität des Feuers muß nothwendig eine Veränderung in der Geschwindigkeit der Maschine zur Folge haben. Die Geschwindigkeit muß also für jede Maschine besonders berechnet werden, und dies macht wenige Schwierigkeiten, indem dazu nur die Verdampfungsfähigkeit des Kessels bekannt zu sein braucht, die entweder aus der vom Feuer berührten Fläche abgeleitet, oder durch Versuche bestimmt werden kann.

Setzt man den vorhin für das Maximum des Effectes ermittelten Werth von c' aus Gleichung (I) in die Formel (B) des vierten Kapitels, nemlich in

$$aQ = \frac{Nk}{(1+\delta)mc} - \frac{a}{1+\delta} \cdot \left(\frac{n}{m} + p + f\right),$$

so erhält man die Belastung aQ', welche die Maschine mit der Geschwindigkeit c' zu bewegen im Stande ist, nemlich:

$$\text{II.} \quad aQ' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{\lambda + s}{l} \cdot k\left(\frac{n}{m} + P\right) - \frac{a}{1+\delta} \cdot \left(\frac{n}{m} + p + f\right).$$

Um für die zur Hervorbringung der größten Wirkung Q' bei der kleinsten Geschwindigkeit c' nöthige Verdampfungskraft zu bestimmen, hat man nur nöthig, aus Gleichung (I) den Werth von N zu entwickeln, wodurch erhalten wird:

$$\text{III.} \quad N = ac'(n + mP)\frac{\lambda + s}{l}.$$

Oder man setze in Gleichung (C) des vorigen Kapitels, nemlich in:

$$N = ac \cdot \frac{n + m[(1+\delta)Q + p + f]}{k}$$

für Q und c obige Werthe Q' und c', und findet dann:

$$\text{III}^{\text{I}}. \quad N = ac' \cdot \frac{n + m[(1+\delta)Q' + p + f]}{k}.$$

Der größte Nutzeffect bei einer gegebenen Expansion ergiebt sich aus dem Producte der beiden Gleichungen I und II, nemlich $aQ'c'$. Führt man diese Multiplikation wirklich aus, so erhält man:

$$\text{IV.} \quad E_{\text{Max.}} = aQ'c' = \frac{N}{(1+\delta)m}\left[k - \frac{l}{\lambda + s} \cdot \frac{n + m(p+f)}{n + mP}\right].$$

In dieser Gleichung sind n und m Constanten, f und δ sind für eine gegebene Maschine ebenfalls constant und für Maschinen desselben Systems wenig von einander verschieden; p ist von der größeren oder geringeren Vollkommenheit der Condensation abhängig, und somit in gewisser Beziehung unveränderlich. Das Maximum des Nutzeffects ist also nicht von dem Querschnitt des Cylinders, sondern nur von der Verdampfung N und dem Drucke, worunter solche statt findet, abhängig. Nimmt man ganze Füllung des Cylinders an, so daß $\lambda = l$ wird, so ist sogar der Hub ohne den geringsten Einfluß auf den Effect. Die Dimensionen des Cylinders können auch in der That den Effect nicht verändern, da der Cylinder nur ein Kraftfortpflanzungsmittel, ein Zwischenglied zwischen Kraft und Widerstand ist. Auch die Geschwindigkeit muß dabei nothwendig ohne Einfluß sein, da dieselbe für eine bestimmte Dampferzeugung je nach der Größe des Cylinder=Durchmessers alle möglichen Werthe annehmen kann.

Es kann demnach der Nutzeffect einer Dampfmaschine nicht nach dem Durchmesser ihres Cylinders berechnet werden.

Sechstes Kapitel.

Bestimmung des absoluten Maximums des Effectes einer Dampfmaschine.

Die im vorigen Kapitel aufgestellten Gleichungen haben ergeben, daß eine Maschine bei einer gegebenen Expansion am vortheilhaftesten mit ihrer größten Belastung, welche durch die Gleichung II ausgedrückt wird, arbeitet. Es kommt nun noch darauf an, unter allen verschiedenen Expansionen, deren jeder in Bezug auf die Geschwindigkeit ein Maximum der Belastung entspricht, diejenige zu suchen, welche für die vortheilhafteste Geschwindigkeit den größten Nutzeffect gewährt, den man das **absolute Maximum** des Effectes nennt.

Die Gleichung (IV), welche das Maximum des Nutzeffectes ausdrückt, ist:

$$E_{Max.} = aQ'c' = \frac{N}{(1+\delta)m} \cdot \left[k - \frac{l}{\lambda+s} \cdot \frac{n+m(p+f)}{n+mP}\right],$$

oder wenn man für k den Werth setzt:

$$E_{Max.} = aQ'c' = \frac{N}{(1+\delta)m} \cdot \left[\frac{\lambda}{\lambda+s} + \text{log. nat.} \frac{l+s}{\lambda+s} - \frac{l}{\lambda+s} \cdot \frac{n+m(p+f)}{n+mP}\right],$$

Nimmt man von diesem Ausdrucke in Bezug auf die veränderliche Größe λ das Differential und vergleicht dieses mit Null, so ergiebt sich:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{n+m(p+f)}{n+mP}.$$

Dieser Ausdruck kann auch folgendermaaßen geschrieben werden:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{\dfrac{1}{n+mP}}{\dfrac{1}{n+m(p+f)}},$$

und es bezeichnet dann der Zähler des zweiten Theiles $\frac{1}{n+mP}$ die Anzahl der Kubikfuß Dampf, welche sich unter dem Drucke P, und der Nenner $\frac{1}{n+m(p+f)}$ die Anzahl der Kubikfuß Dampf, die sich unter dem Drucke (p + f) aus 1 Kubikfuß Wasser entwickeln. Dieser Werth von $\frac{\lambda}{l}$, oder das Verhältniß zwischen dem bis zur Dampf-Absperrung von dem Kolben durchlaufenen Wege und dem ganzen Hube, muß also zur Bestimmung des absoluten Maximums des Nutzeffectes in die früher entwickelten Gleichungen eingeführt werden.

Wird die Expansion nicht zu weit getrieben, so kann man zur Vereinfachung der Formeln die Temperatur-Veränderung des Dampfes unberücksichtigt lassen. Unter dieser Voraussetzung ist dann in der obigen Gleichung n gleich Null, und sie reducirt sich auf folgende:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{p+f}{P}.$$

Setzt man diesen Werth in die Gleichungen I, II und III, so erhält man folgende:

Die Geschwindigkeit:

$$c'' = \frac{vN}{a} \cdot \frac{lP}{l(p+f)+Ps}.$$

Die Belastung:

$$aQ'' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l(p+f)+Ps}{l} \log.\text{nat.} \frac{(l+s)P}{l(p+f)+Ps}.$$

Die Verdampfung:

$$N = \frac{ac''}{v} \cdot \frac{l(p+f)+Ps}{lP}.$$

Der Effect:

$$E_{\text{absol. Max.}} = aQ''c'' = \frac{vNP}{1+\delta} \log.\text{nat.} \frac{(l+s)P}{l(p+f)+Ps}.$$

Anwendung

der

in den vorhergehenden Kapiteln entwickelten Formeln auf doppeltwirkende Rotations-Dampfmaschinen.

Berechnung der Hochdruckmaschinen, welche ohne Expansion und Condensation arbeiten.

I. Stationäre Maschinen.

In diesen Maschinen wird der Dampf unter einem sehr hohen Drucke entwickelt und nach seiner Wirkung frei in die Atmosphäre getrieben, so daß also der äußere Luftdruck der Bewegung des Kolbens entgegen wirkt. Da diese Maschinen einen Krummzapfen haben, der den Kolbenlauf genau begränzt, so beträgt hier der Spielraum s an beiden Enden des Cylinders, mit Einschluß der angränzenden Durchgänge nur $\frac{1}{20}$ des Hubes, also $s = \frac{1}{20}l$.

Wird ferner in den im vierten Kapitel entwickelten Formeln $\lambda = 1$ gesetzt, weil die Expansion gleich Null ist, so erhält man folgende Gleichungen:

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit und Belastung:

Die Geschwindigkeit, nach der Gleichung A:

$$c = \frac{l}{a(l+s)} \cdot \frac{N}{n + m[Q(1+\delta) + p + f]}.$$

Die Belastung des Kolbens, nach der Gleichung B:

$$aQ = \frac{l}{l+s} \cdot \frac{N}{(1+\delta)mc} - \frac{a}{1+\delta}\left(\frac{n}{m} + p + f\right).$$

Die Verdampfung, nach der Gleichung C:

$$N = \frac{l+s}{l} ac\left[n + m[Q(1+\delta) + p + f]\right].$$

Der Nutzeffect:

$$E = aQc.$$

b) Für das Maximum des Nutzeffects, nach den Formeln des fünften Kapitels:

Die Geschwindigkeit, nach der Gleichung I:

$$c' = \frac{l}{a(l+s)} \cdot \frac{N}{n + mP}.$$

Die Belastung des Kolbens, nach der Gleichung II:

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta} \cdot (P - p - f).$$

Die Verdampfung, nach der Gleichung III:

$$N = \frac{l+s}{l} \cdot ac'(n + mP).$$

Der Nutzeffect:

$$E_{Max.} = aQ'c'.$$

Werden ganz genaue Resultate verlangt, so müssen die Größen f und δ in diesen Gleichungen durch specielle, den Umständen entsprechende Versuche ermittelt werden; indessen kann man, so lange diese noch nicht angestellt sind, in den gewöhnlichen Fällen jene Größen nach den von de Pambour mit Locomotiven angestellten Versuchen näherungsweise bestimmen. Nach diesen Versuchen betrug nemlich die Reibung, ohne Ladung und nach Abzug der zur Fortbewegung des eigenen Gewichts der Maschine auf den Bahnschienen erforderlichen Kraft, für jeden Quadratfuß Kolbenfläche 148 Pfund und die Zunahme der Reibung für die Ladung $\frac{1}{7}$ derselben.

Demnach ist für Hochdruckmaschinen ohne Expansion und Condensation:
$f = 148$ Pfund, $\delta = 0{,}14$, $p = 2162{,}61$ Pfund, $s = 0{,}051$, $n = 0{,}0001421$ und $m = 0{,}0000002236$.
Führt man diese Werthe mit Ausnahme von f und δ, welche für jede Maschine besonders zu bestimmen sind, in die Gleichungen ein, so erhält man nach gehöriger Reduction und mit Weglassung der letzten Decimal-Ziffern folgende praktische Formeln:

a) Für eine gegebene Geschwindigkeit oder Belastung:

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen pro Minute:

$$c = \frac{N}{a} \cdot \frac{10000}{6{,}569 + 0{,}00235\,[f + Q(1+\delta)]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ = 4259306 \cdot \frac{N}{c(1+\delta)} - \frac{a}{1+\delta}\,[2798 + f].$$

Die verdampfte Wassermenge pro Minute in Kubikfußen:

$$N = \frac{ac}{10000}\Big[6{,}569 + 0{,}00235\,[Q(1+\delta) + f]\Big]$$

Der Nutzeffect:

$$E = aQc.$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes:

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen pro Minute:

$$c' = \frac{N}{a} \cdot \left(\frac{10000}{1{,}49 + 0{,}00235\,P}\right).$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta} \cdot (P - f - 2162{,}61).$$

Die verdampfte Wassermenge pro Minute in Kubikfußen:

$$N = \frac{ac'}{10000} \cdot (1{,}49 + 0{,}00235\,P).$$

Der Nutzeffect:

$$E_{Max.} = aQ'c'.$$

Der Nutzeffect in Pferdekräften:

$$E_{Pferdek.} = \frac{E}{30600},$$

das Moment einer Pferdekraft pro Minute zu 30600 gerechnet.

Werden pro Minute B Pfund Brennmaterial verbraucht, so ist der Nutzeffect von 1 Pfund Brennmaterial:

$$E_{1\,Pfd.\,Brennmat.} = \frac{E}{B}.$$

Verdampft die Maschine pro Minute N Kubikfuß Wasser, so ist der Nutzeffect von 1 Kubikfuß:

$$E_{1\,Kubffs.\,Wasser} = \frac{E}{N}.$$

Erforderliche Quantität Brennmaterial für 1 Pferdekraft $= \frac{30600B}{E}$.

Anzahl der Kubikfuße Wasser für 1 Pferdekraft $= \frac{30600N}{E}$.

1 Pfund Brennmaterial liefert Pferdekräfte $= \frac{E}{30600B}$.

1 Pfund Wasser liefert Pferdekräfte $= \frac{E}{30600N}$.

Anwendung der vorigen Formeln auf einen besonderen Fall.

Eine bereits construirte Maschine habe folgende Dimensionen und Verhältnisse:

1) die Kolbenfläche a: . . . . 1,48 □Fuß,
2) der Kolbenhub l: . . . . 1,29 Fuß,
3) die verdampfte Wassermenge pro Minute, N = 0,61 Kubikfuß,
4) der Cokeverbrauch pro Minute, B = 7,75 Pfund,
5) der Dampfdruck im Kessel pro □Fuß, P = 9620,58 Pfund.

Man soll die Effecte ermitteln, welche diese Maschine liefern kann, wenn sich der Kolben mit einer Geschwindigkeit von 250 Fuß, von 300 Fuß und endlich mit der zum Maximum des Nutzeffects gehörigen Geschwindigkeit bewegt.

Setzt man diese Werthe in die vorigen Gleichungen, so erhält man nachstehende Resultate:

	Für die Geschwindigkeiten $c = 300$ Fuß	Für die Geschwindigkeiten $c = 250$ Fuß	Für das Maximum des Nutzeffectes
Die Geschwindigkeit des Kolbens pro Minute......	300	250	171
Die Belastung des Kolbens in Pfunden........	3772	5291	9490
Die Belastung für jeden Quadratfuß Kolbenfläche...	2548	3575	6412
Verdampfte Wassermenge in Kubikfuß pro Minute...	0,61	0,61	0,61
Anzahl der Pfunde in der Minute 1 Fuß gehoben..	1131600	1322750	1622790
Nutzeffect in Pferdekräften: $\frac{E}{30600}$..........	36,9	43,2	53,0
Nutzeffect von 1 Pfund Brennmaterial: $\frac{E}{B}$.......	146013	170677	209392
» » 1 Kubikfuß Wasser: $\frac{E}{N}$.........	1855082	2168443	2660311
Brennmaterial in Pfunden zu einer Pferdekraft: $\frac{30600\,B}{E}$	0,21	0,18	0,15
Wassermenge in Kubikfuß » » » $\frac{30600\,N}{E}$	0,016	0,014	0,011
1 Pfund Brennmaterial liefert Pferdekräfte.....	4,7	5,5	6,8
1 Kubikfuß Wasser » »........	60,5	70,8	86,8

II. Locomotiven.

Zu den Hochdruckmaschinen, welche ohne Condensation und Expansion arbeiten, gehören auch die Locomotiven, weshalb die Formeln für stationäre Maschinen zur Berechnung derselben ebenfalls anwendbar sind, wenn dabei noch folgende Umstände berücksichtigt werden:

1) die Maschine muß ihr eigenes Gewicht fortbewegen, wodurch der eigentliche Nutzeffect vermindert wird.

2) Die benutzten Dämpfe entweichen durch die Blaseröhre in den Schornstein, um darin durch Verstärkung des Zuges die Thätigkeit des Feuers zu erhöhen und den Nachtheil der kleinern vom Feuer berührten Fläche des Kessels unschädlich zu machen, wodurch aber ebenfalls eine gewisse Kraft verbraucht wird.

3) Die Luft setzt dem bewegten Wagenzuge einen Widerstand entgegen, der dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional und mithin veränderlich ist.

4) Entweicht eine Menge Dampf durch die Sicherheitsventile, wodurch ein beträchtlicher Verlust statt findet.

Setzt man die zur Fortbewegung der bloßen Maschine erforderliche Kraft $= \varrho$, den von der Wirkung der Blaseröhre herrührenden Widerstand der Geschwindigkeit c proportional $= p'c$, und den Widerstand der Luft $= gc^2$, alles auf den Quadratfuß Kolbenfläche bezogen, so ist der in den vorigen Gleichungen mit Q bezeichnete Totalwiderstand bei Locomotiven:

$$= Q + \varrho + gc^2$$

und der Druck gegen den Kolben:

$$p + p'c.$$

Mit Berücksichtigung dieser Werthe hat man demnach die Relationen:

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit und Ladung:

$$c = \frac{1}{a(1+s)} \cdot \frac{N}{n + m[(1+\delta)(Q+\varrho+gc^2) + p + p'c + f]}$$

$$aQ = \frac{1}{1+s} \cdot \frac{N}{m(1+\delta)c} - \frac{a}{1+\delta}\left(\frac{n}{m} + p + p'c + f\right) - a(\varrho + gc^2)$$

$$N = \frac{1+s}{1} \cdot ac\left[n + m[(1+\delta)(Q+\varrho+gc^2) + p + p'c + f]\right]$$

$$E = aQc.$$

b) Für das Maximum des Effectes:

$$c' = \frac{1}{1+s} \cdot \frac{N}{a(n+mP)}$$

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta}(P - p - p'c - f) - a(\varrho + gc^2)$$

$$N = \frac{1+s}{1} ac'(n + mP)$$

$$E_{Max.} = aQ'c'.$$

In diesen Formeln bezeichnet c die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen pro Minute, wie früher; indessen ist es oft bequemer, dafür die Geschwindigkeit der Maschine selbst einzuführen.

Bestimmung der Constanten in den obigen Gleichungen.

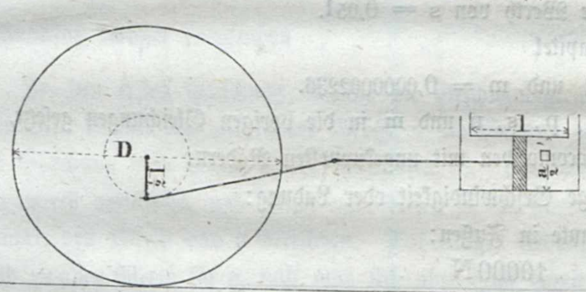
Die Reibung bei Locomotiven mit freien Rädern beträgt für den Quadratfuß Kolbenfläche 148 Pfund, und mit gekuppelten Rädern 185 Pfund. Der Zuwachs an Reibung beträgt $\frac{1}{7}$ der Belastung. Für ganz genaue Resultate sind diese Widerstände vorher durch Versuche zu ermitteln, und sie werden dann je nach der Constructions-Art der Locomotiven von den so eben angegebenen Werthen vielleicht etwas abweichen, in den gewöhnlichen Fällen sind solche aber ausreichend genau und man kann also setzen:

a) für Locomotiven mit freien Rädern $f = 148$ Pfund,
b) » » » gekuppelten » $f = 185$ »
und c) » » $\delta = \frac{1}{7}$.

Einfluß der Blaseröhre. Nachdem der Dampf in den Cylindern wirksam gewesen ist, wird derselbe durch die mit einer engen Mündung versehene Blaseröhre in den Schornstein geleitet. Indem nun der Dampf mit großer Schnelligkeit herausgetrieben wird, reißt er die Luft im Schornstein mit sich fort und bildet auf diese Weise einen luftverdünnten Raum, den die durch das Feuer strömende Luft auszufüllen strebt. Bei dem geringen Zuge des Schornsteins ist eine derartige künstliche Anfachung des Feuers so nothwendig, daß die Maschine unbrauchbar wird, sobald die Blaseröhre zerbrochen oder schadhaft geworden ist. Es springt in die Augen, daß der Zug desto rapider, folglich die Dampferzeugung binnen einer bestimmten Zeit, und somit der Effect der Locomotive, desto größer sein muß, je enger das Mundstück der Blaseröhre ist; indessen darf nicht verkannt werden, daß zum schnellen Austreiben des Dampfes auch eine größere Kraft consumirt wird. Für das Maximum des Effectes muß demnach die Mündung der Blaseröhre eine bestimmte Größe haben, und zwar ist der Durchmesser derselben für die gewöhnlichsten Fälle durch die Erfahrung zu $2\frac{1}{4}$ bis $2\frac{1}{2}$ Zoll festgesetzt. Hat z. B. die Mündung der Blaseröhre einen Durchmesser von $2\frac{1}{2}''$ und jeder der Cylinder $11''$ im Durchmesser, so ist die Geschwindigkeit, mit der der Dampf ausströmen muß $\frac{2(11)^2}{(2\frac{1}{2})^2}$ er circa achtunddreißig Mal größer als die Geschwindigkeit des Kolbens.

Nach den neuesten Versuchen von de Pambour*) variirt der von der Blaseröhre herrührende Druck im directen Verhältnisse der Verdampfung und Geschwindigkeit der Maschine und im umgekehrten Verhältnisse der Größe der Mündung der Blaseröhre. Verdampft die Maschine pro Stunde 60 Kubikfuß Wasser und ist die Mündung der Blaseröhre für diesen Fall, wie gewöhnlich, = 3,96 □Zoll, so wäre danach bei einer Geschwindigkeit der Locomotive von v Meilen pro Stunde der Druck pro Quadratfuß Kolbenfläche

$$= 25{,}2\,v \text{ Pfund Engl.}$$



Bezeichnet c die Geschwindigkeit der Kolben in der Minute in Fußen, D den Durchmesser der Treiberäder und l den Kolbenhub, so ist die Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde $= \frac{60 D \pi}{10560} \cdot \frac{c}{l}$. Die zu den Versuchen benutzte Locomotive Star hat 5füßige Treiberäder und 12 Zoll Kolbenlauf, mithin ist D = 5 und l = 1. Werden diese Werthe in die vorige allgemeine Gleichung eingeführt, und selbige auf Preußisches Maaß und Gewicht reducirt, so ergiebt sich der von der Blaseröhre herrührende Widerstand pro Quadratfuß Kolbenfläche in Pfunden

$$= 2{,}38\,c = p'c, \quad \text{oder}$$

$$p' = 2{,}38.$$

Widerstand der Luft. Bezeichnet Σ die dem Widerstande der Luft ausgesetzte Fläche in Quadratfußen Englisch, und v die Geschwindigkeit in engl. Meilen pro Stunde, so ist nach den Angaben von de Pambour der Luftwiderstand in Pfunden

$$= 0{,}002687\,\Sigma v^2.$$

Wird die Geschwindigkeit der Kolben in Fußen pro Minute = c gesetzt, so ist, bei denselben Bezeichnungen wie vorhin, die Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde $= \frac{60 D \pi}{10560} \cdot \frac{c}{l} = v$.

*) A Practical Treatise on Locomotive Engines. By F. M. G. de Pambour. London 1840.

Setzt man diesen Werth in obigen Ausdruck und reducirt nach dem Cartesischen Grundsatz den gesammten Luftwiderstand auf den Quadratfuß Kolbenfläche, so ist dieser, wenn die Summe der beiden Kolbenflächen a Quadratfuß beträgt:

$$= 1{,}20915 \Sigma c^2 \frac{D^3 \pi^3}{al^3 (5280)^2} \text{ Pfund.}$$

Für die gebräuchlichen mittleren Dimensionen ist $D = 5$, $a = 1{,}57$ und $l = 1{,}33$. Werden diese Werthe eingeführt und alle auf Preußisches Maaß und Gewicht reducirt, so erhält man den Luftwiderstand pro Quadratfuß Kolbenfläche

$$= 0{,}000052595 \Sigma c^2 \text{ Pfund Preuß.}$$

Die Größe Σ ist abhängig von der Anzahl der Wagen und der Höhe ihrer Ladung. Die dem Luftwiderstande ausgesetzte Fläche eines hoch geladenen Güterwagens rechnet de Pambour zu 66 □Fuß, und außerdem für jeden Wagen mit Einschluß des Tenders und der Locomotive noch 9,4 □Fuß.

Für einen Zug von 15 Wagen wäre also $\Sigma = 66 + 9{,}4 \cdot 15 = 207$ □Fuß, und mithin der Luftwiderstand pro Quadratfuß Kolbenfläche in Pfunden durchschnittlich

$$= 0{,}01\, c^2 = g c^2, \text{ oder}$$

$$g = 0{,}01.$$

Der Druck der Atmosphäre pro □Fuß in Pfunden, oder der Zahlenwerth von p ist 2162,61.

Der Spielraum der Kolben, oder der Werth von $s = 0{,}051$.

Endlich ist nach Formel V im ersten Kapitel

$$n = 0{,}0001421 \text{ und } m = 0{,}0000002236.$$

Werden diese Werthe von f, δ, p', g, p, s, n und m in die vorigen Gleichungen gesetzt, so erhält man folgende praktische Formeln für Locomotiven mit ungekuppelten Rädern:

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Ladung:

Die Geschwindigkeit der Kolben pro Minute in Fußen:

$$c = \frac{10000\, N}{a[6{,}9 + 0{,}00267\,(Q + \varrho) + 0{,}0056\, c + 0{,}000026\, c^2]}.$$

Die Belastung der Kolben in Pfunden:

$$aQ = 3736233 \frac{N}{c} - a[2584{,}3 + \varrho + 2{,}08\, c + 0{,}01\, c^2].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Minute:

$$N = \frac{ac}{10000}[6{,}9 + 0{,}00267(Q + \varrho) + 0{,}0056\, c + 0{,}000026\, c^2].$$

Der Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E = aQc.$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes:

Die Geschwindigkeit der Kolben pro Minute in Fußen:

$$c' = \frac{10000\, N}{a[1{,}49 + 0{,}002348\, P]}.$$

Die Belastung der Kolben in Pfunden:

$$aQ' = a[0{,}877\, P - 2026{,}8 - \varrho - 2{,}08\, c - 0{,}01\, c^2].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Minute:

$$N = \frac{ac'}{10000}[1{,}49 + 0{,}002348\,P].$$

Der Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E_{Max.} = aQ'c'.$$

Der Nutzeffect in Pferdekräften . . . . $\frac{E}{30600}$.

Werden pro Minute B Pfunde Brennmaterial verbraucht, so ist der Effect von 1 Pfund

Brennmaterial . . . . $\frac{E}{B}$.

Der Nutzeffect von 1 Kubikfuß Wasser . . . . $\frac{E}{N}$.

Die erforderliche Quantität Brennmaterial für 1 Pferdekraft . . . . $\frac{30600\,B}{E}$.

Kubikfuße Wasser für 1 Pferdekraft . . . . $\frac{30600\,N}{E}$.

1 Pfund Brennmaterial liefert Pferdekräfte . . . . $\frac{E}{30600\,B}$.

1 Kubikfuß Wasser desgleichen . . . . $\frac{E}{30600\,N}$.

In der ersten Gleichung, welche die Geschwindigkeit c der Kolben für eine beliebige Belastung ausdrückt, kommt die unbekannte Größe c im Nenner noch in der zweiten Potenz vor, so daß also eine Gleichung vom dritten Grade aufzulösen ist. Um dies zu vermeiden, kann man für c einen Näherungswerth annehmen, und indem man diesen in den Nenner der gedachten Gleichung als constante Größe einführt, den Werth von c berechnen. Bei einiger Uebung giebt der erste Versuch schon einen ausreichend genauen Werth für c, will man sich aber nicht damit begnügen, so ist nur nöthig mit dem gefundenen Resultate die Operation zu wiederholen.

Anwendung der vorigen Formeln auf eine Locomotive, welche folgende Dimensionen und Verhältnisse hat.

Die Oberfläche der beiden Kolben a . . . . = 1,132 □ Fuß.
Der Kolbenlauf l . . . . = 1,45 Fuß.
Der Durchmesser der Treiberäder D . . . . . = 3,88 »
Der Dampfdruck im Kessel pro □ Fuß oder P . = 8640 Pfund.
Die pro Minute verdampfte Wassermenge N . . = 0,85 Kubikfuß.
Die Consumtion an Brennmaterial pro Minute B = 8 Pfund.

Das Gewicht der Locomotive incl. Tender betrage 250 Centner, und wenn man die zur Fortbewegung derselben erforderliche Kraft zu 0,39 Pfund pro Centner annimmt, so ist der ebenso große Widerstand = 97,5 Pfund. Dieser Widerstand wirkt gegen jeden Quadratfuß Kolbenfläche mit $97{,}5 \cdot \frac{D\pi}{2\,al}$ Pfund, mithin ist der Werth von $\varrho = 362$ Pfund.

Werden diese Werthe in die vorigen Gleichungen eingeführt, so erhält man für die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit, und ferner für die beliebig angenommenen Geschwindigkeiten der Kolben von 400 und 375 Fuß pro Minute folgende Resultate.

	Für die Geschwindigkeiten $c = 400$ Fuß	$c = 375$ Fuß	Für das Maximum des Nutzeffectes
Geschwindigkeit der Kolben in Fußen pro Minute . . .	400	375	344,8
Belastung der Kolben in Pfunden	1851	2659	3716
Belastung pro □Fuß Kolbenfläche	1635,1	2348,9	3282,6
Effect ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben	740400	997125	1281276
Nutzeffect in Pferdekräften	24,2	32,5	41,8
Verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Minute . .	0,85	0,85	0,85
Consumirtes Brennmaterial in Pfunden pro Minute . .	8	8	8
Nutzeffect von 1 Pfund Brennmaterial	92550	124640	160159
Nutzeffect von 1 Kubikfuß Wasser	871059	1173088	1507383
Brennmaterial in Pfunden zu einer Pferdekraft	0,33	0,24	0,19
Wasser in Kubikfußen desgleichen	0,03512	0,02615	0,02033
1 Pfund Brennmaterial liefert Pferdekräfte	3,02	4,06	5,22
1 Kubikfuß Wasser desgleichen	28,4	38,2	49,1

Will man, wie dies gewöhnlich geschieht, die Geschwindigkeit der Locomotive selbst in Meilen pro Stunde und die Ladung in Centnern ausdrücken, so kann dies auf folgende Weise geschehen.

1) Ist c die Geschwindigkeit der Kolben in Fußen für die Minute, so ist die Geschwindigkeit der Locomotive pro Stunde $= c\dfrac{60\pi D}{2 \cdot 1 \cdot 24000}$ Meilen. Die Kolbengeschwindigkeit c muß also mit $0{,}003927\dfrac{D}{l}$ multiplicirt werden, um die Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde zu erhalten.

In dem vorigen Beispiel war $D = 3{,}88$ und $l = 1{,}45$, also $0{,}003927\dfrac{D}{l} = 0{,}0105$. Demnach ist

für die Geschwindigkeit der Kolben pro Minute von . . .	400 Fuß	375 Fuß	344,8 Fuß
die Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde .	4,20 »	3,93 »	3,62 »

2) Aus den Versuchen, welche de Pambour in den Jahren 1834 und 1836 auf der Liverpool-Manchester Eisenbahn anstellte, ergab sich die Reibung der Wagen zu 6 bis 8 Pfund Englisch pro Tonne, wofür aber Wood $8\frac{1}{2}$ bis 9 Pfund berechnet. Je nachdem also die eine oder andere dieser Angaben zum Grunde gelegt wird, beträgt die Reibung der Wagen nach Abzug des Luftwiderstandes für den Preußischen Centner 0,29, 0,39, 0,42 oder 0,44 Pfund. Diese Werthe sollen mit Z bezeichnet werden.

Der gegen die Kolben wirkende Widerstand aQ ist, wenn derselbe auf die Radperipherie reducirt wird $= \frac{2l}{D\pi}aQ$. Da nun das Fortziehen von 1 Centner Ladung eine Kraft von Z Pfund erfordert, so ziehen $\frac{2l}{D\pi}aQ$ Pfund eine Ladung von $\frac{2l}{ZD\pi}aQ$ Centnern.

Man erhält also die Last in Centnern, welche eine Locomotive ziehen kann, wenn die auf die Kolben wirkende, in Pfunden ausgedrückte Belastung aQ durch den Factor $0{,}63662\frac{1}{ZD}$ multiplicirt wird. Für die im vorigen Beispiel angenommenen Werthe von D und l und für $Z = 0{,}39$ ist also dieser Factor $= 0{,}61$; und demgemäß ergiebt sich:

für die Geschwindigkeit der Kolben von .	400 Fuß	375 Fuß	344,8 Fuß
die Belastung (aQ) der Kolben in Pfunden	1851 »	2659 »	3716 »
und die fortzuschaffende Last in Centnern .	1129 »	1622 »	2267 »

Gleichungen zur unmittelbaren Bestimmung der Geschwindigkeit der Locomotiven in Meilen pro Stunde, und der fortzuschaffenden Last in Centnern, mit Berücksichtigung aller Hindernisse.

Setzt man die Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde = C, so ist nach dem Vorigen $C = 0{,}003927\frac{D}{l}c$; also

$$\text{I.} \quad c = \frac{Cl}{0{,}003927D}.$$

Bezeichnet ferner W die Anzahl der Centner, welche die Locomotive mit der Geschwindigkeit C fortzuschaffen vermag, und Z, wie früher, die Zugkraft in Pfunden für jeden Centner Ladung, so ist ebenfalls nach dem Vorigen $W = 0{,}003927\frac{1}{ZD}aQ$; also

$$\text{II.} \quad aQ = \frac{ZWD}{0{,}63662l}.$$

Beträgt endlich das Gewicht der Locomotive incl. Tender M Centner, und die zur Fortbewegung derselben erforderliche Zugkraft ebenfalls Z Pfund pro Centner, so ist der daraus für die Kolben entspringende Widerstand $= ZM\frac{D\pi}{2l}$, und also pro Quadratfuß Kolbenfläche $= ZM\frac{D\pi}{2al}$ Pfund. Dieser Widerstand ist in den allgemeinen Gleichungen mit ϱ bezeichnet, so daß man also hat:

$$\text{III.} \quad \varrho = \frac{\pi ZMD}{2al}.$$

Setzt man sowohl diese, als auch die früher berechneten Zahlenwerthe der übrigen Größen in die allgemeinen Gleichungen, so ergeben sich nach gehöriger Reduction für Locomotiven mit ungekuppelten Rädern folgende practische Formeln, wobei alle Hindernisse berücksichtigt sind.

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung.

Die Geschwindigkeit in Meilen pro Stunde:

$$C = \frac{N}{al}\cdot\frac{785{,}4\cdot D}{138{,}3 + 0{,}084\frac{DZ}{al}(M+W) + \frac{Cl}{D}\left(34{,}8\frac{Cl}{D} + 28{,}5\right)}.$$

Die fortzuschaffende Last in Centnern:

$$W = 9340{,}58 \cdot \frac{N}{ZC} - \frac{al}{ZD}\left[1645{,}22 + \frac{ZMD}{al} + \frac{Cl}{D}\left(338{,}448 + 412{,}82\frac{Cl}{D}\right)\right].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Stunde:

$$60N = \frac{alC}{785{,}4D}\left[8298 + 4{,}8\frac{DZ}{al}(M + W) + \frac{Cl}{D}\left(2088\frac{Cl}{D} + 1710\right)\right].$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes.

Die Geschwindigkeit in Meilen pro Stunde:

$$C' = \frac{785{,}4\,ND}{al(29{,}84 + 0{,}0469\,P)}.$$

Die fortzuschaffende Last in Centnern:

$$W' = \frac{al}{ZD}\left[0{,}55843\,P - 1290{,}333 - \frac{ZMD}{al} - \frac{Cl}{D}\left(338{,}448 + 412{,}82\frac{Cl}{D}\right)\right].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Stunde:

$$60N = \frac{alC'}{785{,}4D}(1790{,}4 + 2{,}814\,P).$$

Anwendung dieser Formeln auf eine Locomotive von nachstehenden Dimensionen und Verhältnissen.

Die Oberfläche der beiden Kolben, oder a . . . = 1,132 □ Fuß.
Der Kolbenlauf, oder l . . . . = 1,45 Fuß.
Der Durchmesser der Treiberäder, oder D . . . = 3,88 „
Der Dampfdruck im Kessel pro □ Fuß, oder P . = 8640 Pfund.
Die pro Minute verdampfte Wassermenge, oder N = 0,85 Kubikfuß.
Das Gewicht der Maschine incl. Tender, oder M = 250 Centner.
Die Reibung pro Centner, oder Z . . . . . = 0,39 Pfund.

Werden diese Werthe in die vorigen Formeln gesetzt, so erhält man für die beliebigen Geschwindigkeiten von 5 und 4,5 Meilen pro Stunde, und endlich für die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit folgende Werthe für die Lasten, welche die Maschine fortzuschaffen vermag.

	Für die beliebig angenommene Geschwindigkeit pro Stunde von	von	Für die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit von
Geschwindigkeit der Locomotive in Meilen pro Stunde	4,5	4	3,62
Die fortzuschaffende Last in Centnern	605	1505	2267

Verdampfungsvermögen der Locomotiven.

Der Kessel einer Locomotive von der bis jetzt üblichen Construction besteht bekanntlich aus dem Feuerkasten, worin das Brennmaterial angeschürt wird, aus dem horizontalliegenden cylindrischen Theil, dem Rauchkasten mit dem Schornstein, und aus einer Anzahl Röhren, welche durch den cylindrischen Theil führen, und den Feuerkasten mit dem Rauchkasten verbinden. Da der Zug bei der geringen Höhe des Schornsteins durch den in denselben aus der Blaseröhre strömenden Dampf hervorgebracht wird, so muß die Größe ihrer Mündung und die Geschwindigkeit der Maschine auf die Verdampfung von Einfluß sein.

Was zunächst den ersten Umstand betrifft, so ist für eine gegebene innere Fläche der Feuerröhren ein bestimmter Zug oder eine gewisse Größe der Blaseröhre-Mündung erforderlich, um die aus dem Brennmaterial entwickelte Flamme bis zum äußersten Ende der Feuerröhren zu führen. Wird die Blaseröhre über diese Grenze hinaus verengt und also der Zug verstärkt, so ist die nächste Wirkung davon, daß die Flamme nicht allein die ganze Fläche der Feuerröhren bespült, sondern noch weiter bis in den Schornstein reicht, wodurch aber die Verdampfung begreiflich nicht weiter gefördert werden kann. Bei einer mehr und mehr verkleinerten Oeffnung muß endlich der Zug so rapide werden, daß der größte Theil der Luft unverbrannt durch das Feuer strömt.

Wird dagegen die Mündung der Blaseröhre mehr erweitert als erforderlich ist, um die Flamme bis zum Ende der Feuerröhren zu führen, so kommt ein Theil ihrer innern Oberfläche nur mit den erhitzten Gasen und Dämpfen in Berührung, wodurch die Verdampfung nothwendig verringert werden muß. Da indessen die mittlere Größe der Blaseröhre-Mündung sich sehr bald durch die Versuche feststellt, so kommen nur kleine Größen-Aenderungen derselben in Betracht, welche aber nach den Versuchen von so geringem Einflusse auf die Verdampfung sind, daß solche füglich vernachlässigt werden können.

Der Einfluß der Geschwindigkeit der Maschine auf die Verdampfung ist dagegen erheblicher. Aus den Versuchen, welche de Pambour im Jahre 1836 anstellte, leitet derselbe das Gesetz ab: daß die Wassermengen, welche eine Locomotive bei verschiedenen Geschwindigkeiten verdampft, sich wie die vierten Wurzeln aus den Geschwindigkeiten verhalten. Da nun aus diesen Versuchen bei der Geschwindigkeit von 18,15 Meilen pro Stunde sich die Verdampfung pro □Fuß vom Feuer berührte Fläche zu 0,198 Kubikfuß Wasser ergab, so ist für Preuß. Maaß die Wassermenge, welche eine Locomotive bei der Geschwindigkeit von C Meilen pro Stunde und Quadratfuß Feuerfläche verdampft,

$$= 0{,}13703 \sqrt[4]{C} \text{ Kubikfuß.}$$

Hat dagegen die Maschine keine Blaseröhre, oder steht dieselbe still, so verdampft jeder □Fuß pro Stunde nur

$$0{,}0359 \text{ Kubikfuß.}$$

Diese Angaben gelten indeß nur für eine mittlere Größe der Blaseröhre-Mündung von circa 3,54 □Zoll, und für Kessel, bei denen das Verhältniß der innern Fläche des Feuerkastens zur ganzen vom Feuer berührten Fläche nicht zu sehr von dem Verhältniß 1 : 6 abweicht.

Von der auf diese Weise bestimmten Wassermenge, welche eine Locomotive pro Stunde erfordert, kommt außer dem durch die Sicherheitsventile herbeigeführten Dampfverlust nur ein Theil davon dampfförmig in den Cylindern zur Wirksamkeit, während ein anderer Theil durch den abströmenden Dampf mechanisch mit fortgerissen und durch die Blaseröhre in die Atmosphäre getrieben wird.

Hat nemlich die Maschine einen Ueberschuß an Kraft, d. h. ist die Verdampfungskraft derselben so groß, daß sie die gewöhnliche Ladung mit einer größeren als die vorgeschriebene Geschwindigkeit ziehen kann, und muß also, um letztere nicht zu überschreiten, das Regulatorventil theilweise verschlossen werden, so findet eine Anhäufung des Dampfes und eine gleichzeitige Vermehrung seiner Spannung statt, wodurch das Sicherheitsventil gehoben und ein Theil des gebildeten Dampfes nutzlos entfernt wird. Findet dagegen dieser Uebelstand bei ganz geöffnetem Regulatorventil statt, so sind die Dampfdurchgänge zu enge und die Maschine ist fehlerhaft construirt. Ebenso zeigt sich ein derartiger Verlust, wenn die Maschine mit einer mäßigen Ladung eine schiefe Ebene hinansteigt. Da also dieser von den Sicherheitsventilen herbeigeführte Dampfverlust theils von der Constructionsart der Maschine abhängt, theils durch andere Umstände mehr oder weniger bedingt wird, so ist eine allgemeine numerische Bestimmung desselben nicht möglich, sondern muß für jeden besondern Fall ermittelt werden.

Der Verlust an Wasser, welches mechanisch mit fortgerissen wird, ist dagegen erheblicher. Die Ursachen dieser Erscheinung sind die Erschütterungen und Stöße während der Bewegung, die geringe Erhebung der Mündung der Dampfröhre oberhalb des Wasserspiegels, der kleine Dampfraum und die reißende Schnelligkeit, mit der sich der Dampf im Innern des Kessels entwickelt und durch die Wasserfläche bricht. Außerdem wird diese Erscheinung beobachtet, wenn das Feuer zu lebhaft brennt, wenn das Wasser unrein ist, so daß sich auf der Oberfläche ein Schaum bildet, wenn der Kessel zu sehr mit Wasser angefüllt, oder bei Ingangsetzung der Maschine das Regulatorventil nicht nach und nach, sondern plötzlich geöffnet wird.

Nach den Versuchen von de Pambour beträgt dieser Verlust durchschnittlich 0,24 der Verdampfung des Kessels, so daß also die nach der Feuerberührungsfläche ermittelte Wassermenge mit 0,76 multiplicirt werden muß, um diejenige zu erhalten, welche in Dampf verwandelt wirklich in den Cylindern zur Thätigkeit gelangt. Der hierdurch verursachte Verlust an Brennmaterial steht aber nicht in demselben Verhältnisse, weil das mechanisch mit fort gerissene Wasser nur die im Kessel statt findende sensible Wärme, dagegen das in Dampf verwandelte außer derselben noch die zu seinem Bestehen erforderliche latente Wärme enthält.

Bezeichnet demnach Σ die ganze vom Feuer berührte Fläche des Kessels in Quadratfußen, so kann diese pro Stunde $= 0{,}13703\,\Sigma\sqrt[4]{C}$ Kubikfuß Wasser verdampfen, und mit Berücksichtigung des vorhin angegebenen Verlustes kommen davon zur Wirksamkeit $= 0{,}76 \cdot 0{,}13703\,\Sigma\sqrt[4]{C}$ Kubikfuß.

Da nun in den allgemeinen Gleichungen die pro Minute zu verdampfende Wassermenge in Kubikfußen mit N bezeichnet ist, so erhält man nach gehöriger Reduction:

$$\text{I.}\quad N = 0{,}0017357\,\Sigma\sqrt[4]{C}.$$

$$\text{II.}\quad \Sigma = 576{,}13\,\frac{N}{\sqrt[4]{C}}.$$

Soll z. B. eine Locomotive zur Erreichung eines bestimmten Effectes bei einer Geschwindigkeit von 4 Meilen pro Stunde 0,8 Kubikfuß Wasser pro Minnte verdampfen, so erhält man nach Gleichung II die dazu erforderliche ganze vom Feuer berührte Fläche = 325,90 Quadratfuß.

Verbrauch an Brennmaterial.

Bereits im zweiten Kapitel ist nachgewiesen, daß der in dem Kessel erzeugte Dampf bei seinem Eintritt in den Cylinder seine Spannkraft ändert, indem er diejenige annimmt, welche dem Widerstande des Kolbens entspricht. Gesetzt nun, eine Locomotive durchlaufe zwei Mal ein und denselben Weg bei derselben Dampfspannung im Kessel, aber mit verschiedenen Belastungen, so muß, da dieselbe Anzahl von Kolbenstößen oder Radumläufen dazu erforderlich ist, auch dieselbe Anzahl von mit Dampf angefüllten Cylindern verbraucht werden. Da aber während der einen Fahrt die Belastung größer ist, als während der andern, so müssen nothwendig die Dampfspannungen in den Cylindern ebenfalls verschieden sein. Nun verhalten sich bei gleichem Volumen die Dampfspannungen wie die Dichtigkeiten oder wie die Gewichte, und da das Gewicht des Dampfes gleich ist dem Gewichte des Wassers, aus dem sich derselbe bildete, so verhalten sich die während der beiden Fahrten verdampften Wassermengen wie die Dampfspannungen in den Cylindern, oder wie die resp. Belastungen oder Widerstände der Kolben. Da nun das verbrauchte Wasser im Kessel zuerst in Dampf verwandelt ist, der während der beiden Fahrten dieselbe Spannung hat, so müssen also die verbrauchten Quantitäten Brennmaterial sich wie die Widerstände der Kolben verhalten. Der Verbrauch an Brennmaterial ist also nicht von der Geschwindigkeit, sondern von der Belastung abhängig.

Diese Betrachtungen geben für die Bestimmung des Brennmaterials, welches eine Locomotive bei verschiedenen Belastungen consumirt, den richtigen Maaßstab, wenn nur für einen Widerstand dieser Verbrauch durch Versuche ermittelt ist.

Es bezeichne B das consumirte Brennmaterial eine Locomotive bei dem Kolbenwiderstande R, und ebenso B^I bei dem Widerstande R^I, so ist zunächst nach dem Vorigen:

$$1)\quad B : B^I = R : R^I.$$

Läßt man die von der Luft und der Blaseröhre herrührenden Widerstände unberücksichtigt, so ist bekanntlich der gegen jeden Quadratfuß Kolbenfläche wirkende Widerstand nach den Ermittelungen im vierten Kapitel:

$$= (1 + \delta) Q + p + f.$$

Bezeichnet ferner, wie früher, W die Belastung in Centnern, D den Durchmesser der Treibräder, l den Kolbenlauf, Z die Reibung pro Centner und a die Summe der Kolbenflächen, so ist nach dem Vorigen:

$$Q = \frac{WDZ}{0{,}63662\,al},$$

also der Widerstand pro Quadratfuß Kolbenfläche:

$$= (1 + \delta)\frac{WDZ}{0{,}63662\,al} + p + f.$$

daher der gesammte Widerstand:

$$R = \frac{(1 + \delta)\,WDZ}{0{,}63662\,l} + a(p + f),$$

und ebenso:

$$R' = \frac{(1 + \delta)\,W^IDZ}{0{,}63662\,l} + a(p + f).$$

Mit Bezug auf die vorige Proportion (1) ist demnach:

$$\text{I.}\quad \frac{B}{B'} = \frac{W + \dfrac{0{,}63662\,(p+f)\,al}{(1+\delta)\,ZD}}{W^{I} + \dfrac{0{,}63662\,(p+f)\,al}{(1+\delta)\,ZD}}.$$

Man hat also nur nöthig, für jede Maschine den Ausdruck $\frac{0{,}63662\,(p+f)\,al}{(1+\delta)\,ZD}$ zu berechnen, und den so gefundenen Werth zu W und W^{I} zu addiren, um die Proportion $B : B'$ zu bilden.

Wäre z. B. $a = 1{,}48$ □Fuß, $l = 1{,}29$ Fuß, $D = 4{,}85$ Fuß, $\delta = 0{,}14$, $f = 148$ Pfund, $p = 2162{,}61$ Pfund und $Z = 0{,}4$ Pfund, so ist der Zahlenwerth des obigen Ausdruckes $= 1269$; also in Gleichung I.:

$$\frac{B}{B'} = \frac{W + 1269}{W^{I} + 1269}.$$

Mittelst dieser Formel kann also der Brennmaterial-Verbrauch einer Maschine für eine beliebige Belastung gefunden werden, wenn derselbe für eine bekannte Belastung bereits durch einen Versuch bestimmt ist.

Aus den von de Pambour angestellten Versuchen ergab sich, daß für Locomotiven von der bis jetzt üblichen Construction der Verbrauch an Cokes zur Verdampfung einer bestimmten Menge Wasser von dem Verhältniß der Fläche des Feuerkastens zur ganzen vom Feuer berührten Fläche abhängig ist. Die Resultate dieser Versuche, welche auf Preußisches Maaß und Gewicht reducirt sind, enthält nachstehende Tabelle.

Verdampfte Wassermenge pro Stunde in Kubikfußen	Coke-Verbrauch pro Stunde in Pfunden	Verhältniß zwischen der ganzen vom Feuer berührten Fläche und der des Feuerkastens	Coke-Verbrauch pro Kubikfuß Wasser in Pfunden
43,36	534,09	4,46	12,31
58,13	693,05	6,52	11,92
58,34	565,10	8,68	9,68

Aus den Beobachtungen, welche auf der Great Western Eisenbahn gemacht sind, ergiebt sich, daß das vortheilhafteste Verhältniß zwischen der Fläche des Feuerkastens und der ganzen vom Feuer berührten Fläche des von 1 : 10 ist.

Bezeichnet also, wie früher, N die pro Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen, so ist je nach der Constructionsart der Kessel der Coke-Verbrauch pro Minute mit Bezug auf die vorige Tabelle bezüglich $= 12{,}31\,N$, oder $= 11{,}92\,N$, oder $= 9{,}68\,N$ Pfund.

Die zu den obigen Versuchen benutzten Cokes waren Worsleycokes von bester Qualität. Wurden dagegen Cokes von Gaswerken benutzt, so war der Verbrauch um 12 Prozent größer, ohne den Verlust, welcher durch die Zerreiblichkeit derselben statt fand, mitzurechnen.

Widerstand der schiefen Ebenen auf Eisenbahnen.

Die schiefen Ebenen auf Eisenbahnen sind für den raschen und zweckmäßigen Verkehr große Uebel, die leider nicht immer vermieden werden können. Bei dem Hinauffahren des Wagenzuges vergrößert sich nemlich in Folge der Schwerkraft der Widerstand um so mehr, je größer die Neigung der schiefen Ebene ist.

Es betrage auf einer horizontalen Bahn die Zugkraft, oder der von der Reibung herrührende Widerstand für jeden Centner Ladung Z Pfund, so ist solche für W Centner = ZW Pfund. Fährt dagegen der Wagenzug eine schiefe Ebene von der Länge L und Höhe 1 hinauf, und ist das Gewicht der Maschine = M Centner, so ist die ganze zu bewegende Masse W + M Centner, und die daraus resultirende Kraft parallel mit der schiefen Ebene $= \frac{W+M}{L}\,110$ Pfund. Die erforderliche Zugkraft Z^{I} in Pfunden ist also:

$$\text{I.}\quad Z^{I} = ZW + \frac{W+M}{L}\,110.$$

Wäre z. B. W = 2000 Centner, M = 200 Centner, Z = 0,4 Pfund und L = 100, so ist die erforderliche Zugkraft auf der horizontalen Bahn $= 0{,}4 \cdot 2000 = 800$ Pfund. Der nöthige Zusatz an Zugkraft auf der schiefen Ebene ist $\left(\frac{2000+200}{100}\right)110 = 2420$ Pfund, also die ganze Zugkraft $800 + 2420 = 3220$ Pfund; d. h. um auf der vorhin gedachten schiefen Ebene eine Last von 2000 Centner aufwärts zu bewegen, ist eine Kraft erforderlich, die auf einer horizontalen Bahn $= \frac{3220}{0{,}4} = 8050$ Centner zu ziehen vermag.

Aus diesem einzigen Beispiel geht schon hervor, wie höchst nachtheilig schiefe Ebenen von bedeutender Steigung auf Eisenbahnen sind; aber dennoch werden sie aus einer übel verstandenen Oeconomie, um nemlich die Anlagekosten zu vermindern, noch häufig ohne Noth und ohne Rücksicht auf den Betrieb der Bahn angeordnet. Immer sollte es Grundsatz bleiben, daß der Zweck der Anlage einer Eisenbahn nicht allein der ist, eine feste und glatte, sondern auch eine möglichst wagerechte Transport-Bahn zu bilden. Sind indessen bei Anlage einer Eisenbahn aus lokalen Ursachen schiefe Ebenen nicht zu vermeiden, und will man keine stationairen Dampfmaschinen, die immer für den Verkehr sehr störend sind, anwenden, so giebt es zwei Hülfsmittel: entweder muß nemlich die Ladung im Allgemeinen so geringe sein, daß sie die Kraft der Maschinen auf den schiefen Ebenen nicht übersteigt, oder es müssen Hülfsmaschinen aufgestellt werden.

Nur auf zwei Rampen der Liverpool-Manchester-Eisenbahn, deren Steigung $\frac{1}{96}$ und $\frac{1}{89}$ beträgt, übersteigt der Widerstand der Wagen die Kraft der Maschinen. Die übrigen schiefen Ebenen werden mit erhöhter Dampfspannung, aber mit geringerer Geschwindigkeit von den Maschinen erstiegen, und ihre Schnelligkeit beim Herabfahren auf derselben und in der Ebene wird dann durch eine entsprechende Verengung der Regulator-Oeffnung gemäßigt.

Uebersteigt dagegen der Widerstand der Wagen die Kraft der Maschine, so wird solche durch eine Locomotive unterstützt, welche bloß zu diesem Zwecke am Fuße der Rampe aufgestellt ist. Die Construction dieser Hülfsmaschinen ist auf einen langsamen Gang, aber auf eine größere Kraftäußerung berechnet. Sie haben in der Regel Cylinder von 11,6″ bis 13,5″ Durchmesser und 15,5″ Hub. Zur Vergrößerung der Adhäsion sind 4 Räder derselben von 4,3 Fuß Höhe gekuppelt, und das Gewicht der ganzen Maschine ist bis auf 240 Centner vermehrt.

Dagegen sind auf der Darlington-Eisenbahn so viele schiefe Ebenen, daß die Aufstellung von Hülfslocomotiven bei jeder derselben nicht ausführbar war. Die Ladungen müssen daher im Allgemeinen so gering angenommen werden, daß die Maschinen sie ohne Hülfe die steilsten Rampen hinaufziehen können.

Von der andern Seite betrachtet, erhält dagegen die Locomotive, wenn sie den Fuß einer Rampe erreicht, durch folgenden Umstand einen ansehnlichen Zuwachs an Kraft. Da sich nemlich die Geschwindigkeit, und also auch der Dampfverbrauch plötzlich bedeutend verringert, und das Feuer bei der früheren rapiden Schnelligkeit der Maschine noch eine Zeit lang die volle Wirkung behält, mithin dieselbe Menge Wasser verdampft, so wird nothwendig die Spannung des Dampfes im Kessel bedeutend vermehrt und dadurch die Kraft der Maschine verstärkt. Dies gilt indessen nur für kurze Rampen; denn wenn die schiefe Ebene eine bedeutende Länge hat, so nimmt bei der geringen Geschwindigkeit der Maschine die Intensität des Feuers schnell ab, und der obige Ueberschuß an Kraft geht bald wieder verloren.

Adhäsion der Räder auf Schienen.

Die Adhäsion der Räder auf den Schienen giebt der Dampfkraft einer Locomotive die nöthigen festen Stützpunkte; denn wenn solche nicht hinreichend groß ist, so wird zwar der Dampf die Räder drehen, aber die Maschine bleibt dann auf derselben Stelle. Der Adhäsionswiderstand muß daher stets größer sein, als die zur Fortbewegung der Wagen erforderliche Kraft. Die Kenntniß der Größe der Adhäsionskraft ist demnach für die Berechnung der Locomotiven von großer Wichtigkeit, indem nur mit Hülfe derselben die Last bestimmt werden kann, welche die Maschine eine Rampe hinaufzuziehen vermag.

Es springt in die Augen, daß die Größe der Adhäsion je nach Beschaffenheit der Oberflächen der Schienen und Radreifen, und nach dem augenblicklichen Zustande derselben in Folge der Witterung, veränderlich sein muß. Sie ist nämlich am größten, wenn die Oberfläche der Schienen entweder ganz trocken oder ganz naß ist, weil sie in beiden Fällen durchaus von Unreinigkeiten befreit sind. Sind dagegen die Schienen feucht und theilweise mit Koth bedeckt, wie bei neblichtem Wetter im Winter und Herbst, so ist die Adhäsion der Räder auf den Schienen am Geringsten. Zur Bestimmung der Adhäsionskraft sind von de Pambour, Wood u. A. viele Versuche angestellt, deren Resultate Folgende waren.

Nach den Angaben des Ersteren zog die Locomotive Fury zehn beladene Wagen, welche nebst dem 5 Tonnen schweren Tender zusammen 56,16 Tonnen wogen, die Whiston-Rampe auf der Liverpool-Manchester-Eisenbahn hinan. Die Ladung auf der Rampe war in Bezug auf Zugkraft gleich einer Last von 244 Tonnen auf einer horizontalen Bahn, d. h. sie leistete einen Widerstand von 1952 Pfund Englisch. Das ganze Gewicht der Maschinen betrug 8,2 Tonnen; es kommen aber davon nur 5,5 Tonnen auf zwei der Adhäsion unterworfene Räder, so daß die Maschine eine Last gleich dem 44½fachen Drucke auf die Treibräder zu ziehen vermochte, ohne daß ein Gleiten der Räder statt fand. Die Adhäsionskraft betrug demnach $\frac{1}{6,3}$ des auf die Treibräder lastenden Gewichtes. Dieser Versuch wurde unter den günstigsten Umständen bei gänzlicher Trockenheit der Schienen angestellt, und das Resultat kann daher nur als ein Maximum der Wirkung der Adhäsion betrachtet werden.

Waren dagegen die Schienen feucht und schlüpfrig, so konnte die Maschine nur noch 5 beladene Wagen oder 75 Tonnen mit Einschluß des Tenders ziehen. Setzt man den Widerstand zu 8 Pfund Englisch pro Tonne, so ist derselbe für obige 75 Tonnen = 600 Pfund; also in diesem Falle die Adhäsionskraft gleich $\frac{1}{20}$ der auf die Triebräder wirkenden Last. Die Werthe von $\frac{1}{6}$ und $\frac{1}{20}$ können als die Grenzen der Adhäsionskraft angenommen werden.

Aus diesen und aus den Versuchen, die auf den Killingworth, Stanhope-Tyne und Newcastle-Carlisle-Eisenbahnen ebenfalls mit wirklich in Betrieb stehenden Locomotiven angestellt worden sind und die von Wood mitgetheilt werden, geht hervor, daß die Größe der Adhäsions-Kraft

a) bei schlechter Witterung, wenn die Schienen naß und schlüpfrig sind, zu 0,05;

b) für einen mittleren Zustand der Schienen zu 0,06;

und c) bei schönem Wetter, oder wenn die Schienen entweder ganz naß oder ganz trocken, also von allem Schmutze befreit sind, zu 0,1;

des auf den Treibrädern ruhenden Gewichtes der Locomotive in der Praxis angenommen werden kann.

Ist demnach, wie früher, die Länge der Rampe = L, und deren Höhe = 1, und bezeichnet W die Ladung oder das Gewicht des Wagenzuges in Centnern, Z die Zugkraft in Pfunden für 1 Centner auf einer horizontalen Bahn, M^I das auf den Treibrädern ruhende Gewicht der Locomotive in Centnern und φ den Adhäsionscoefficienten, so ist zunächst der Adhäsionswiderstand $= 110 \cdot \varphi M^I$ Pfund.

Die abwärts wirkende Kraft der Last W, parallel der schiefen Ebene ist $= \frac{110 \cdot W}{L}$ Pfund, und die erforderliche Zugkraft für W Centner auf einer horizontalen Bahn = ZW Pfund. Demgemäß muß folgende Gleichung statt finden:

$$110 \cdot \varphi M^I = \frac{110 \cdot W}{L} + ZW; \text{ oder}$$

$$\text{I.} \quad W = \frac{110 \cdot \varphi L M^I}{110 + ZL}.$$

Diese Gleichung bestimmt die Last in Centnern, welche eine Locomotive eine schiefe Ebene von bekannter Steigung hinaufzuziehen vermag, ohne daß ein Gleiten der Räder statt findet.

Bei dem früher erwähnten mit der Maschine Fury angestellten Versuche ergab sich zwar die Adhäsion zu $\frac{1}{6,3}$ des auf den Treibrädern lastenden Gewichtes; indessen ist es zweckmäßiger, sich mit der Ladung innerhalb der vorhin angegebenen Gränzen zu halten, weil durch ein theilweises Gleiten, wie es bei dem Maximum der Ladung nur zu leicht statt findet, die Schienen und Räder bedeutend abgenutzt werden. So ist auf der Stanhope-Tyne-Eisenbahn, wo die Maschinen stets das Maximum der Ladung zu ziehen haben, die Abnutzung der Räder nach Wood um ein Drittel größer, als auf der Newcastle-Carlisle-Eisenbahn, wo die Ladung stets nur geringe ist. Auf der ersteren Bahn legen die Räder eine Strecke von 3214, auf der letzteren Bahn dagegen eine Strecke von 4285 deutsche Meilen zurück, ehe die Kränze abgedreht zu werden brauchen.

Die vorige Formel: $W = \frac{110 \cdot \varphi L M^I}{110 + ZL}$ dient auch zur Bestimmung des Gewichtes einer Locomotive, wenn solche auf einer schiefen Ebene von bekannter Steigung eine bestimmte Ladung W ziehen soll, ohne daß ein Gleiten der Räder statt findet. Es ergiebt sich nämlich:

$$\text{II.} \quad M^{I} = \frac{W\,[110 + ZL]}{110 \cdot \varphi L}.$$

Nach diesen Formeln können sehr leicht Tafeln berechnet werden, da die Zugkraft Z pro Centner durch viele Versuche ziemlich genau bestimmt ist.

III. Doppelt wirkende Watt'sche Maschinen.

Die doppelt wirkenden Watt'schen Maschinen arbeiten mit niedrig gespannten Dämpfen bei ganzer Füllung des Cylinders und mit Anwendung der Condensation. Die Spannung der Dämpfe im Kessel übertrifft die der Atmosphäre gewöhnlich nur um $1\frac{1}{2}$ bis 3 Pfund auf den Quadratzoll, oder 216 bis 432 Pfund pro Quadratfuß. Die Dämpfe strömen ununterbrochen während des ganzen Kolbenlaufes in den Cylinder. Hat der Kolben seinen höchsten oder tiefsten Stand erreicht, so wird der Cylinderraum unter- oder oberhalb des Kolbens mit dem Condensator in Verbindung gesetzt. Während nun die benutzten Dämpfe hier größtentheils niedergeschlagen werden, und also nur noch einen geringen Druck gegen den Kolben ausüben, wird auf der andern Seite desselben frischer Dampf aus dem Kessel hinzugeführt. Die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens wird mittelst des Balanciers, der Pleylstange und des Krummzapfens in eine rotirende verwandelt.

Die vorhin für Hochdruckmaschinen entwickelten Formeln sind demnach auch für diese Maschinen vollständig anwendbar, nur ist hierbei der Werth von P, der den Dampfdruck im Kessel pro Quadratfuß bezeichnet, bedeutend kleiner; dasselbe ist mit p der Fall, weil dieser Buchstabe hier nicht, wie früher, den atmosphärischen, sondern den von der unvollkommenen Condensation der Dämpfe herrührenden Gegendruck auf den Quadratfuß Kolbenfläche bezeichnet.

Bestimmung der Constanten.

Hat das zur Condensation benutzte Wasser eine mittlere Temperatur von höchstens 15° Celsius, so beträgt in gut gebauten Maschinen der Druck im Condensator gewöhnlich nur 1,54 Pfund auf den Quadratzoll oder 222 Pfund pro Quadratfuß; indessen ist, wie Versuche dargethan haben, der Druck der unvollkommen condensirten Dämpfe gegen den Kolben bedeutend größer. Das Ueberströmen des Dampfes aus dem Cylinder nach dem Condensator ist nämlich von dem Druckunterschiede des im Cylinder bleibenden Dampfes und des luftverdünnten Raumes im Condensator abhängig, und da beide Druckkräfte erst nach Verlauf einer gewissen Zeit einander gleich werden können, so muß der zu Anfang des Kolbenlaufs gegen seine Fläche noch wirkende Druck nothwendig größer sein, als der Gegendruck im Condensator, weil gegentheils kein Ueberströmen des Dampfes statt finden könnte. In der That geben auch die mit dem Watt'schen Spannungsmesser direct angestellten Versuche den mittleren, auf den Kolben wirkenden, Druck der unvollkommen condensirten Dämpfe für die gewöhnlichen Geschwindigkeiten und üblichen Abmessungen der Durchgangsöffnungen um 2,56 Pfund auf den Quadratzoll, oder um 370 Pfund auf den Quadratfuß, höher an, als er im Condensator ist. Da nun dieser, wie vorhin erwähnt, durchschnittlich 222 Pfund auf den Quadratfuß beträgt, so ist also

$$p = 370 + 222 = 592 \text{ Pfund}.$$

Ueber die Größe der Reibung liegen für diese Maschinen einige practische Bestimmungen vor. Es haben nemlich viele mit Watt'schen Maschinen angestellte Versuche dargethan, daß bei kleinen, weniger genau construirten Maschinen und bei mäßiger Belastung die Reibung auf den Quadratzoll Kolbenfläche 2,56 Pfund, oder auf den Quadratfuß 370 Pfund; dagegen in großen, sehr genau gearbeiteten Maschinen nur 1,54 Pfund auf den Quadratzoll, oder 222 Pfund auf den Quadratfuß beträgt, worin zugleich die Kraft zur Bewegung der Luft- und Kaltwasserpumpe mit einbegriffen ist. Unter einer mäßigen Belastung versteht man bei diesen Maschinen eine solche, die gegen jeden Quadratzoll Kolbenfläche circa mit 8,22 Pfund, oder gegen den Quadratfuß mit 1184 Pfund drückt, und da man nach den mit Locomotiven angestellten Versuchen die von der Belastung herrührende Reibungszunahme zu $\frac{1}{7}$ derselben annehmen kann, so kommen von den obigen 1184 Pfund für die Last = 1036 und für die Reibung 148 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche. Bringt man von der summarisch angegebenen Reibung diese additionelle Reibung in Abzug, so erhält man als Werth der Reibung in den unbelasteten Watt'schen Maschinen 370 — 148 = 222 Pfund bis 222 — 148 = 74 Pfund auf den Quadratfuß. Die erstere Angabe gilt nemlich für Dampfmaschinen bis circa 10 Pferdekraft, deren Cylinder bis 17 Zoll im Durchmesser groß sind, und die letztere für größere Maschinen bis zu 100 Pferdekraft mit Cylindern von etwa 47 Zoll Durchmesser.

Die Größe f ist also:

a) für kleine Maschinen . . . = 222 Pfund.
b) für mittelstarke Maschinen . . = 148 » und
c) für große Maschinen . . . = 74 »

Der Zuwachs an Reibung kann ebenso, wie bei den Locomotiven berechnet werden, nemlich $\delta = \frac{1}{7}$; und da der Kolbenhub durch den Krummzapfen genau begränzt wird, so ist hier ebenfalls wie früher $s = 0{,}051$ anzunehmen.

Endlich ist für Condensationsmaschinen nach Kapitel I: $n = 0{,}00004227$ und $m = 0{,}0000002511$.

Setzt man die Werthe von n, m und s in die allgemeinen Gleichungen des IV und V Kapitels — da obige Werthe von p, f und δ nur Näherungswerthe sind, und zur Erlangung genauer Resultate für jeden besondern Fall durch specielle Versuche ermittelt werden müssen — und setzt man überdies $\lambda = 1$, weil keine Expansion angewendet wird, so erhält man folgende practische Formeln:

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in der Minute in Fußen:

$$c = \frac{N}{a} \cdot \frac{10000}{0{,}44 + 0{,}00264 [Q(1 + \delta) + p + f]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ = 3792835 \frac{N}{(1 + \delta)} - \frac{a}{1 + \delta} [168 + p + f].$$

Die in der Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen:

$$N = \frac{ac}{10000} \Big[0{,}44 + 0\,00264 \big(Q(1 + \delta) + p + f \big) \Big].$$

Der Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E = aQc = 3792835\frac{N}{1+\delta} - \frac{ac}{1+\delta}[168+p+f].$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in der Minute in Fußen:

$$c' = \frac{N}{a} \cdot \frac{10000}{0{,}44+0{,}00264P}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta}[P-p-f].$$

Die in der Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen:

$$N = \frac{ac'}{10000}[0{,}44+0{,}00264P].$$

Der größte Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E_{\text{Max.}} = aQ'c' = \frac{N}{1+\delta} \cdot \frac{10000[P-p-f]}{0{,}44+0{,}00264P}$$

Anwendung dieser Formeln auf einen besondern Fall.

Eine von Watt für die Albion-Mühlen zu London erbaute Maschine hat folgende Dimensionen und Fähigkeiten:

Durchmesser des Cylinders 33 Zoll, daher die Kolbenfläche $a = \frac{(2{,}75)^2\pi}{4} = 5{,}939$ □Fuß.

Der Kolbenhub . . . . $l = 7{,}76$ Fuß.

Spielraum im Cylinder . . . . $s = 0{,}051$.

Dampfdruck im Kessel auf den Quadratfuß . . . . . . $P = 2442$ Pfund.

Verdampfte Wassermenge in Kubikfußen in der Minute . . . . . . $N = 0{,}848$ Kubikfuß.

Verbrauchte Steinkohlen in der Minute in Pfunden . . . . . . $B = 6{,}5$ Pfund.

Führt man diese Werthe in die Formeln ein, so erhält man für die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit, so wie für die beliebig angenommenen Geschwindigkeiten des Kolbens von 277 und 248 Fuß in der Minute folgende Effecte:

	Für c = 277 Fuß	Für c = 248 Fuß	Für das Maximum des Effectes
Die Geschwindigkeit des Kolbens in der Minute in Fußen, oder c	277	248	207
Die Belastung des Kolbens in Pfunden, oder aQ	5454	6645	8866
Die in der Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen, N	0,848	0,848	0,848
Effect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben, oder E	1510758	1647960	1835262
Nutzeffect in Pferdekräften, $\frac{E}{30600}$	49,3	53,8	60,0
Nutzeffect von 1 Pfund Brennmaterial, $\frac{E}{B}$	232424	253532	282348
» » 1 Kubikfuß Wasser: $\frac{E}{N}$	1781554	1943349	2164224
Pfunde Brennmaterial zu 1 Pferdekraft, $\frac{30600\,B}{E}$	0,13	0,12	0,10
Kubikfuß Wasser zu 1 Pferdekraft, $\frac{30600\,N}{E}$ . .	0,017	0,015	0,014
1 Pfd. Brennmaterial liefert Pferdekräfte, $\frac{E}{30600\,B}$	7,5	8,2	9,2
1 Kubikfuß Wasser liefert Pferdekräfte, $\frac{E}{30600\,N}$	58	63	70

IV. Doppelt wirkende Cornwall'sche Dampfmaschinen.

Die Cornwall'schen doppelt wirkenden Dampfmaschinen sind Rotations-Maschinen, oder im Allgemeinen doppelt wirkende Watt'sche Maschinen mit Condensation, die aber mit höher gespannten Dämpfen von ungefähr $52\frac{1}{2}$ Pfund pro □Zoll oder $3\frac{1}{2}$ Atmosphäre arbeiten, und so eingerichtet sind, daß von der Expansion des Dampfes, die Watt nur bei seinen einfach wirkenden Maschinen anwendete, Gebrauch gemacht werden kann.

Die im IV und V Capitel entwickelten Hauptformeln für Dampfmaschinen mit Expansion und Condensation sind also auf diese Maschinen anwendbar, wenn die darin vorkommenden Constanten die entsprechenden Werthe erhalten.

Bestimmung der Constanten.

Die Reibung der unbelasteten Watt'schen Maschinen kann, wie bereits früher nachgewiesen, für kleine Cylinder bis 17 Zoll Durchmesser zu 222 Pfund und für größere Cylinder bis 47″ Durchmesser zu 74 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche angenommen werden. Die Reibung der Cornwall'schen Maschinen muß, so lange nicht directe Versuche darüber vorliegen, nach derselben Regel geschätzt werden; da indessen bei diesen Maschinen, Behufs der Expansion, größere Cylinder in Anwendung kommen, so daß ein Cylinder von 47 Zoll Durchmesser nur zu denen von mittlerer Größe gehört, so kann der Werth der Reibung der unbelasteten Maschinen durchschnittlich zu 74 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche angenommen werden. Es wird also zunächst $f = 74$ Pfund gesetzt.

Die durch eine Belastung verursachte Zunahme der Reibung kann ebenso wie in den Watt'schen Maschinen und Locomotiven gleich $\frac{1}{7}$ dieses Widerstandes gesetzt werden, also ist $\delta = 0{,}14$.

Wird ferner der Gegendruck der unvollkommen condensirten Dämpfe wie vorhin zu 592 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche angenommen, so ist ebenso $p = 592$ Pfund, und also das Glied $(p + f) = 666$ Pfund.

Da aber der so eben angegebene Werth der Reibung nur ein Näherungswerth ist, der nach den Dimensionen der Cylinder variirt, auch der vom Condensator herrührende Gegendruck von der Constructionsart der Maschine und der Menge und Temperatur des Condensationswassers abhängig ist, so erscheint es als zweckmäßiger, das Glied $(p + f)$ in den Formeln beizubehalten, und erst für jeden besondern Fall den entsprechenden Werth dafür zu substituiren.

Der Kolbenhub wird durch den Krummzapfen genau begränzt, mithin beträgt der freie Raum s des Cylinders, wie in fast allen Rotations-Maschinen 0,051.

Endlich sind die Werthe der Coefficienten n und m für Condensationsmaschinen, nach Kapitel I, $n = 0{,}00004227$ und $m = 0{,}0000002511$.

Setzt man diese Werthe in die allgemeinen Gleichungen, worin k den Ausdruck $\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + \lambda}{\lambda + s}$ bezeichnet, so erhält man folgende practische Formeln:

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung und eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute:

$$c = \frac{N}{a} \cdot \frac{10000\,k}{0{,}42 + 0{,}0025\,[(1 + \delta)\,Q + p + f]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ = 3982477\,\frac{Nk}{c(1 + \delta)} - \frac{a}{1 + \delta}[168 + p + f].$$

Der Nutzeffect ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E = aQc = 3982477\,\frac{Nk}{1 + \delta} - \frac{ac}{1 + \delta}[168 + p + f].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen in der Minute:

$$N = \frac{ac}{10000\,k}\left[0{,}42 + 0{,}0025\,[Q\,(1 + \delta) + p + f]\right].$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes und eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute:

$$c' = \frac{l}{\lambda + s} \cdot \frac{10000\,N}{a[0{,}42 + 0{,}0025\,P]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta}\left[\frac{\lambda + s}{l} k[168 + P] - 168 - p - f\right].$$

Der Nutzeffect ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E_{\text{Max.}} = aQ'c' = 3982477\,\frac{N}{1+\delta}\left[k - \frac{l}{\lambda + s} \cdot \frac{168 + p + f}{168 + P}\right].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen in der Minute:

$$N = \frac{\lambda + s}{l} \cdot \frac{ac'}{10000}[0{,}42 + 0{,}0025\,P].$$

c) Für das absolute Maximum des Nutzeffectes.

Die Dampffüllung des Cylinders: $\frac{\lambda}{l} = \frac{168 + p + f}{168 + P}$.

Für die Anwendung dieser Formeln muß zuerst der Werth von k bekannt sein, da aber die Expansion, mit der die Maschine arbeitet, oder vielmehr der Punkt des Kolbenlaufes, wo die Absperrung eintritt, gegeben ist, nemlich das Verhältniß $\frac{\lambda}{l}$, so kann aus der im IV Kapitel mitgetheilten Tafel unmittelbar der Werth von k und der des correspondirenden Bruches: $\frac{l}{\lambda + s}$ entnommen werden. Oder man sucht die Werthe von $\frac{l}{\lambda + s}$ und $\frac{\lambda}{\lambda + s}$ und demnächst den gemeinen Logarithmen von $\frac{l + s}{\lambda + s}$, welchen man durch Multiplication mit dem hyperbolischen Logarithmen der Zahl 10 = 2,302585 . . . in einen natürlichen Logarithmen verwandelt, und erhält auf diese Weise den Werth von

$$k = \frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}.$$

Es ist Anfangs schon bemerkt worden, daß die Cornwall'schen Maschinen in der Regel mit einem Totaldruck im Kessel von circa $52\frac{1}{2}$ Pfund auf den Quadratzoll arbeiten, daß die Reibung der unbelasteten Maschinen im Mittel zu 74 Pfund, und der Gegendruck der unvollkommen condensirten Dämpfe zu 592 Pfund berechnet werden kann, so daß also p + f = 666 Pfund für den Quadratfuß, oder $\frac{666}{144} = 4{,}625$ Pfund für den Quadratzoll beträgt. Nach Kapitel I erhält man die zu einem Dampfdruck von 4,625 Pfund auf den Quadratzoll gehörige Temperatur t in Graden Celsius nach den Formeln von Southern:

$$t = 86{,}1649\sqrt[5{,}13]{4{,}625 - 0{,}050517675} - 46{,}278 = 69{,}613^0 \text{ Celsius}.$$

Ferner nach der Formel von Mellet die zu einem Dampfdrucke von $52\frac{1}{2}$ Pfund auf den Quadratzoll gehörige Temperatur:

$$t' = 111{,}267\sqrt[6]{52{,}5} - 75 = 140{,}3077^0 \text{ Celsius}.$$

Setzt man diese zwei Werthe nach einander in die Formel III des I Kapitels, so erhält man die entsprechenden Dampfvolumen ν und ν', nemlich:

$$\nu = 18717{,}4 \frac{1 + 0{,}00364 \cdot 69{,}613}{4{,}625} = 5072{,}47 \text{ Kubikfuß},$$

$$\nu' = 18717{,}4 \frac{1 + 0{,}00364 \cdot 140{,}3077}{52{,}5} = 538{,}60 \text{ Kubikfuß}.$$

Nun wird die zum absoluten Maximum gehörige Expansion durch die Gleichung im VI Kapitel:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{\frac{1}{n + mP}}{\frac{1}{n + m(p + f)}}$$

bestimmt, worin nach den Formeln IV und V des I Kapitels der Zähler $\frac{1}{n + mP} = \nu'$ und der Nenner $\frac{1}{n + m(p + f)} = \nu$ ist; mithin ergiebt sich für die Cornwall'schen Dampfmaschinen die Dampffüllung des Cylinders für das absolute Maximum des Nutzeffectes im Allgemeinen:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{538{,}60}{5072{,}47} = 0{,}106 \ldots,$$

$$\text{oder } \lambda = 0{,}106 \cdot l.$$

Da es etwas weitläuftig ist, für eine gegebene Spannung zuerst die Temperatur und dann erst das entsprechende Volumen Dampf zu bestimmen, wie es eben geschehen ist, so kann man dasselbe gleich nach der Näherungsformel im VI Kapitel berechnen; darnach ist nun:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{0{,}4227 + 0{,}002511 \cdot 666}{0{,}4227 + 0{,}002511 \cdot 7560} = 0{,}107 \ldots$$

und man ersieht hieraus zugleich, daß die Resultate dieser verschiedenen Formeln gut mit einander stimmen.

Der vorige Bruch $\frac{\lambda}{l} = 0{,}106$ zeigt, daß für das absolnte Maximum des Nutzeffectes der Dampfzufluß auf $\frac{1}{10}$ des Hubes abgeschlossen werden muß, wenngleich die Expansion aus mehreren Gründen, namentlich um Stöße zu vermeiden, nie so weit getrieben wird. Indessen ist der Werth dieses Bruches, wie ein Blick auf die Formel zeigt, von der Größe der Reibung, von der mehr oder weniger vollkommenen Condensation und von dem Dampfdrucke abhängig. Ist nemlich die Reibung größer und die Condensation unvollkommener, so wird jener Bruch auch größer, und es muß also der Dampf später abgeschlossen werden; steigt dagegen der Dampfdruck im Kessel, so findet das Gegentheil statt. Der Werth von $\lambda = 0{,}10 \cdot l$ ist daher nur als ein Durchschnittswerth zu betrachten und für jede Maschine besonders zu bestimmen.

Die vorhin unter (b) aufgestellten Formeln bestimmen für eine gegebene Expansion den größten Effect; die Formel (c) dagegen bestimmt diejenige Expansion, welche unter allen möglichen Expansionen den größten Nutzeffect gewährt. Führt man also den darnach berechneten Werth von λ in die Gleichungen (b) ein, so entsprechen diese dem absolut größten Nutzeffecte, welchen die Maschine überhaupt zu liefern im Stande ist.

Anwendung der allgemeinen Formeln.

Als Beispiel zur Anwendung der Formeln werde angenommen, die vorhin berechnete Watt'sche Maschine in den Albion-Mühlen zu London sei in eine Cornwall'sche umzuändern. Der Dampf soll im Kessel bis zu $52\frac{1}{2}$ Pfund Druck auf den Quadratzoll gespannt, und der Abfluß desselben nach dem Cylinder abgesperrt werden, wenn der Kolben $\frac{1}{4}$ des Hubes zurückgelegt hat. Es soll ferner, Behufs der Expansion, sowohl der Cylinderdurchmesser als auch der Hub vergrößert werden, so daß die Maschine dann folgende Dimensionen bekömmt:

Durchmesser des Cylinders 4 Fuß, also die Kolbenfläche $a = 2^2\pi = 12{,}564$ Quadratfuß.

Kolbenhub . . . . $l = 9{,}75$ Fuß.

Vor Beginn der Expansion von dem Kolben durchlaufener Weg $\lambda = 0{,}25\,l$.

Dampfdruck im Kessel $52\frac{1}{2}$ Pfund auf den Quadratzoll, also . $P = 7560$ Pfund.

Spielraum des Kolbens . . . . $s = 0{,}05\,l$.

Nach diesen Dimensionen kann die Reibung der unbelasteten Maschine f zu 74 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche angenommen werden.

Setzt man ferner voraus, die Condensation sei eben so vollkommen, wie in den Watt'schen Maschinen, so ist $p = 592$ Pfund.

Da endlich zur Bildung des Dampfes unter verschiedenen Druckkräften dieselbe Wärmemenge, und also ziemlich dieselbe Quantität Brennmaterial erforderlich ist, so wird der Kessel bei dem Dampfdrucke von 7560 Pfund auf den Quadratfuß dieselbe Quantität Wasser in der Minute verdampfen und dazu dieselbe Pfundzahl Brennmaterial consumiren, wie früher bei dem Drucke von 2442 Pfund.

Die Werthe von $N = 0{,}848$ Kubikfuß und von $B = 6{,}5$ Pfund pro Minute bleiben also ungeändert.

Setzt man nun diese Werthe in die Formeln, so erhält man für die beliebig angenommenen Geschwindigkeiten des Kolbens von 250 und 200 Fuß, für die zum Maximum des Effectes gehörige Geschwindigkeit in der Minute, und endlich für die halbe und viertel Dampffüllung des Cylinders, so wie für die zum absoluten Maximum des Effectes gehörige Expansion folgende Effecte:

	Effecte der Maschine bei einer gegebenen Expansion			Größte Effecte der Maschine bei verschiedenen Expansionen	
	für die Geschwindigkeit $c = 250$	für die Geschwindigkeit $c = 200$	für die zum größten Effect gehörige Geschwindigkeit	für eine gegebene Expansion	für die zum absoluten Maximum gehörige Expansion
Die Dampffüllung des Cylinders, $\frac{\lambda}{l}$	0,25	0,25	0,25	0,50	0,10
Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute, c .	250	200	116	63	233
Die Belastung des Kolbens in Pfunden, aQ	15514	21691	44083	63650	24191
Verdampftes Wasser in der Minute in Kubikfuß, N.	0,848	0,848	0,848	0,848	0,848
Effect, ausgedrückt in Pfunden, in der Minute 1 Fuß gehoben, E	3878500	4338200	5113628	4009950	5636503
Effect in Pferdekräften, $\frac{E}{30600}$.	126,7	141,7	167,1	131,0	184,2
Verbrauchtes Brennmaterial in Pfunden pro Minute, B . . .	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Effect von 1 Pfund Brennmaterial in Pferdekräften	19,5	21,8	25,7	20,1	28,3
Effect von 1 Kubikfuß Wasser in Pferdekräften	149,4	167,1	197,0	154,4	217,2
Pfunde Brennmaterial zu 1 Pferdekraft, $\frac{B}{E}$	0,051	0,045	0,038	0,049	0,035
Kubikfuß Wasser zu 1 Pferdekraft, $\frac{N}{E}$	0,0066	0,0059	0,0050	0,0064	0,0046

V. Evan'sche Dampfmaschinen, oder Columbian steam engines.

Die Evan'schen Dampfmaschinen sind Hochdruckmaschinen, welche mit Expansion, aber ohne Condensation arbeiten. Die Spannung des Dampfes im Kessel beträgt in der Regel 8 Atmosphären oder circa 120 Pfund auf den Quadratzoll. Der Dampf strömt so lange ununterbrochen in den Cylinder bis der Kolben ungefähr den dritten Theil seines Hubes vollendet hat, worauf das Einlaßventil abgeschlossen wird, und der Dampf bloß vermöge seiner Expansion den Kolben bis zu Ende seines Laufes treibt. Der im Cylinder wirksam gewesene Dampf entweicht gleich in die Atmosphäre, indem von der Condensation gewöhnlich kein Gebrauch gemacht wird.

Wegen der hohen Dampfspannung sind für die Evan'schen Maschinen nur sehr kleine Cylinder nöthig, so daß in Maschinen von mittlerer Stärke der Cylinderdurchmesser ungefähr halb so groß ist, als in den kleinsten Watt'schen Maschinen. Da nun für beide Systeme von Dampfmaschinen die gesammte Reibung ziemlich dieselbe ist, so wird die für kleine Watt'sche Maschinen zu 222 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche berechnete Reibung bei den Evan'schen auf eine viermal kleinere Fläche vertheilt, so daß solche in den letzteren Maschinen für den Quadratfuß Kolbenfläche $4 \cdot 222 = 888$ Pfund beträgt. Man kann also $f = 888$ Pfund annehmen.

Der Zuwachs an Reibung für die Einheit der Belastung kann, wie in allen früher bereits erwähnten Systemen von Dampfmaschinen, zu $\frac{1}{7}$ derselben angenommen werden; es ist also $\delta = 0{,}14$.

Da ferner diese Maschinen einen Krummzapfen haben, der den Kolbenhub genau begrenzt, so wird, wie früher $s = 0{,}051$ gesetzt.

Der Druck der Atmosphäre auf den □Fuß beträgt $= 2162{,}61$ Pfund, also ist $p = 2162{,}61$ Pfund.

Endlich haben die Größen n und m nach Gleichung V im I Kapitel folgende Werthe $n = 0{,}0001421$ und $m = 0{,}0000002236 \ldots$

Da die vorigen Werthe der Größen f und δ nur Näherungswerthe sind, welche zur Erreichung genauer Resultate durch specielle Versuche bestimmt werden müssen, so können bloß die numerischen Werthe der Constanten n, m und p in die allgemeinen Gleichungen des IV und V Kapitels eingeführt werden, und es entstehen dann folgende praktische Formeln, worin k den Ausdruck $\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{1+s}{\lambda+s}$ bedeutet.

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung und eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute:

$$c = \frac{N}{a} \cdot \frac{10000\,k}{6{,}25 + 0{,}00224\,[Q(1+\delta) + f]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ = 4472272\,\frac{Nk}{c(1+\delta)} - \frac{a}{1+\delta}[2798 + f].$$

Die in der Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen:

$$N = \frac{ac}{10000\,k}\Big[6{,}25 + 0{,}00224\,[Q(1+\delta) + f]\Big].$$

Der Nutzeffect ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E = acQ = \frac{1}{(1+\delta)}[4472272\,Nk - ac(2798 + f)].$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes und für eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute:

$$c' = \frac{1}{\lambda + s} \cdot \frac{10000\,N}{a[1{,}42 + 0{,}002236\,P]}.$$

Die Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ' = \frac{a}{1+\delta}\left[\frac{\lambda+s}{l}k(635{,}5+P) - 2798 - f\right].$$

Die in der Minute verdampfte Wassermenge in Kubikfußen:

$$N = \frac{\lambda+s}{l}\cdot\frac{ac'}{10000}[1{,}42 + 0{,}002236\,P].$$

Der größte Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E_{\mathrm{Max.}} = aQ'c' = 4472272\,\frac{N}{1+\delta}\left[k - \frac{l}{\lambda+s}\cdot\frac{2798+f}{635{,}5+P}\right].$$

c) Für das absolute Maximum des Nutzeffectes.

Die Dampffüllung des Cylinders:

$$\lambda = \frac{2798+f}{635{,}5+P}.$$

Substituirt man also den hiernach für die Dampffüllung $\frac{\lambda}{l}$ berechneten Werth in den Gleichungen (b) für den größten Effect bei einer gegebenen Expansion, so erhält man die Formeln für das absolute Maximum des Effectes.

Setzt man in der obigen Gleichung $P = 17280$ Pfund, d. h. nimmt man den Dampfsdruck im Kessel zu 120 Pfund auf den Quadratzoll an, und setzt überdies für die Reibung f den früher bereits berechneten Werth von 888 Pfund, so ist

$$\frac{\lambda}{l}\cdot\frac{2798+888}{635{,}5+17280} = 0{,}205\ \ldots$$

Die Evan'schen Dampfmaschinen liefern also für diese Annahmen den größtmöglichen Effect, wenn der Dampf auf $\frac{1}{5}$ des Hubes abgeschlossen wird und während der übrigen $\frac{4}{5}$ desselben durch Expansion wirkt; indessen gilt hier dieselbe Bemerkung, welche bereits Seite 44 bei Cornwall'schen Maschinen gemacht worden, daß nemlich in der Praxis die Expansion nie so weit getrieben wird.

VI. Dampfmaschinen mit einem besondern Expansions-Cylinder, oder sogenannte Woolf'sche Maschinen.

Die Woolf'schen Dampfmaschinen sind Hochdrucker, welche mit Expansion und Condensation arbeiten, und sich von den Cornwall'schen Maschinen nur dadurch unterscheiden, daß die Expansion in zwei ungleich großen Cylindern statt findet. (Siehe die Skizze auf Seite 50).

Der kleine Cylinder steht oben und unten mit dem Dampf-Kessel in Verbindung; außerdem communicirt der obere Theil des kleinen mit dem unteren Theile des großen, und der untere Theil des kleinen mit dem oberen Theile des großen Cylinders.

Der in den oberen Theil des kleinen Cylinders eintretende Dampf wirkt Anfangs mit seinem vollen Druck auf den Kolben; sobald derselbe aber bei einem bestimmten Punkte des Hubes abgeschlossen wird, treibt er ihn bloß vermöge seiner Expansion bis zu seinem tiefsten Stande. In diesem Augenblicke wird die Verbindung zwischen dem oberen Theile des kleinen und dem unteren Theile des großen

Cylinders hergestellt, so daß der bereits im kleinen Cylinder wirksam gewesene Dampf nun in den großen Cylinder unterhalb des Kolbens tritt und diesen durch seine Ausdehnung in die Höhe treibt. Zu derselben Zeit wird aber auch die Verbindung zwischen dem Dampfkessel und dem unteren Theile des kleinen Cylinders eröffnet, so daß auch der Kolben des letzteren sich gleichzeitig aufwärts bewegt. Endlich wird der Dampf nach seiner Wirkung im großen Cylinder, wie gewöhnlich, condensirt.

Da die beiden Kolben durch die Art der Dampfzuführung eine gleichzeitige auf- und niedergehende Bewegung annehmen, so werden die beiden Kolbenstangen durch Hängeschienen mit ein und demselben Balancier, der mittelst der Pleylstange und des Krummzapfens die Hauptbetriebswelle in Bewegung setzt, verbunden. Der Befestigungspunkt für die zum großen Cylinder gehörige Hängeschiene liegt aber weiter vom Mittelpunkte des Balanciers, als der vom kleinen Cylinder, wodurch also der Hub des ersteren größer, und eine zweckmäßige Expansion möglich gemacht wird.

Die ganze Wirkungsart des Dampfes ist daher im Allgemeinen genau so, wie bei den früher betrachteten Maschinen, nur erleiden die Formeln in Folge der verschiedenen Größe der beiden Cylinder einige Modifikationen, welche im Folgenden näher angegeben sind.

Es bezeichne:

P den Dampfdruck im Kessel pro □Fuß;

P' den Druck des Dampfes im kleinen Cylinder, ehe derselbe durch Expansion wirkt;

A die Kolbenfläche des großen Cylinders in □Fußen;

a die Kolbenfläche des kleinen Cylinders in □Fußen;

L die Hubhöhe des großen Kolbens in Fußen;

l die Hubhöhe des kleinen Kolbens in Fußen;

λ diejenige Länge des Hubes vom kleinen Kolben bis zu dem Punkte, wo die Absperrung des Dampfes erfolgt;

s den Spielraum im kleinen, und endlich

s^{I} den Spielraum im großen Cylinder, beide in Längen der resp. Cylinder ausgedrückt.

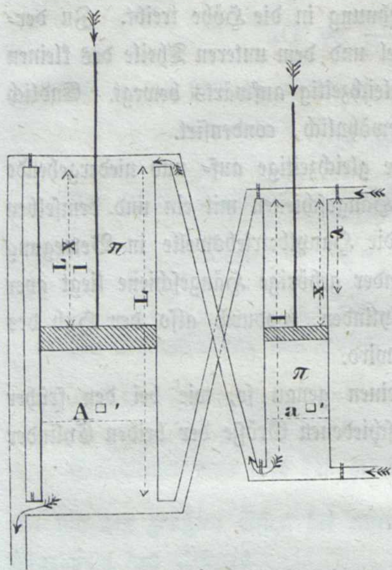
Es ist einleuchtend, daß für den Zustand der gleichförmigen Bewegung der Maschine die Kraft genau dem Widerstande das Gleichgewicht halten muß. Erstere besteht aus der Wirkung des direct aus dem Kessel strömenden Dampfes auf den kleinen Kolben und aus dem Drucke des bereits im kleinen Cylinder wirksam gewesenen Dampfes auf den großen Kolben vermöge seiner Expansion. Der Widerstand dagegen besteht aus dem Gegendrucke des im großen Cylinder wirksamen Dampfes gegen den kleinen Kolben, aus dem Drucke der unvollkommen condensirten Dämpfe im Condensator gegen die andere Kolbenfläche des großen Cylinders und endlich aus der Reibung und Belastung der Maschine.

Diese verschiedenen Wirkungen sollen im Folgenden nach der Reihe näher bestimmt werden.

1) Wirkung des Dampfes im kleinen Cylinder. Nach der Gleichung 1. im IV Kapitel ist die Wirkung des Dampfes im kleinen Cylinder während eines Kolbenhubes von 1 Fuß, wenn derselbe auf $1-\lambda$ Fuß Länge durch Expansion wirkt:

$$= a(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P'\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]-\frac{n}{m}al.$$

2) Wirkung des Dampfes im großen Cylinder. Der im großen Cylinder während eines Hubes thätige Dampf ist derjenige, welcher bereits vorher im kleinen Cylinder wirksam war und darin bei einem Drucke von P' Pfund pro Quadratfuß einen Raum von der Länge $\lambda + s$ ausfüllte.



Nimmt man nun an, der kleine Kolben habe die Länge x durchlaufen und in diesem Augenblicke sei die Spannung des Dampfes unterhalb des kleinen und oberhalb des großen Kolbens $= \pi$, so muß, nach Gleichung IV. im IV Kapitel, zwischen den beiden Druckkräften π und P' und den dazu gehörigen Dampfvolumen die mit M und M' bezeichnet werden sollen, folgende Relation statt finden:

$$\pi = \frac{M'}{M} \cdot \left[\frac{n}{m} + P'\right] - \frac{n}{m}.$$

Da die Hübe von den Längen L und l in derselben Zeit erfolgen, so durchläuft der große Kolben den Weg $\frac{L}{l}x$, während der kleine die Länge x zurücklegt. Der in diesem Augenblicke mit Dampf erfüllte, so eben mit M bezeichnete Raum unterhalb des kleinen und oberhalb des großen Kolbens ist $= A\left[\frac{L}{l}x + s^{I}\right] + a(l + s - x)$, oder:

$$M = x\frac{AL - al}{l} + a(l + s) + As^{I}.$$

Dagegen war das mit M' bezeichnete Dampfvolumen unter dem Drucke P':

$$M' = a[\lambda + s].$$

Setzt man diese Werthe in obige Gleichung zur Bestimmung von π, so erhält man folgenden Ausdruck:

$$\pi = \frac{a(\lambda + s)}{x\frac{AL - al}{l} + a(l + s) + As^{I}}\left[\frac{n}{m} + P'\right] - \frac{n}{m}.$$

Während nun der kleine Kolben den unendlich kleinen Weg dx zurücklegt, durchläuft der große Kolben den Weg $\frac{L}{l}dx$, und die Wirkung gegen den letzteren ist dann $= \pi\frac{AL}{l}dx$.

Denselben Ausdruck erhält man, wenn die vorige Gleichung für π mit $\frac{AL}{l}dx$ multiplicirt wird, nemlich:

$$\pi\frac{AL}{l}dx = \frac{a(\lambda + s)dx}{x\frac{AL - al}{l} + a(l + s) + As^{I}}\left[\frac{n}{m} + P'\right]\frac{AL}{l} - \frac{nAL}{ml}dx.$$

Setzt man zur Abkürzung $\frac{AL - al}{l} = V$, und $a(l + s) + As^{I} = W$, so erhält die vorige Gleichung folgende Gestalt:

$$\pi\frac{AL}{l}dx = \frac{a(\lambda + s)\,dx}{Vx + W}\left[\frac{n}{m} + P'\right]\frac{AL}{l} - \frac{n}{m} \cdot \frac{AL}{l}dx.$$

Diese Gleichung bestimmt die Wirksamkeit des expandirten Dampfes im großen Cylinder, während der unendlich kleinen Kolbenbewegung dx. Integrirt man also innerhalb der Gränzen $x = o$ und $x = l$, so erhält man daraus die während eines Kolbenhubes verrichtete Arbeit; nemlich:

$$= \frac{AaL(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)}{l} \int_o^l \frac{dx}{Vx + W} - \frac{nAL}{ml} \int_o^l dx,$$

und wenn die Integration wirklich ausgeführt wird:

$$= a(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)\frac{AL}{Vl} \cdot \log.\text{nat.}\left(\frac{Vl + W}{W}\right) - \frac{n}{m}Al.$$

3) Wirkung des im großen Cylinder expandirten Dampfes auf den kleinen Kolben. Der gegen den kleinen Kolben wirkende Dampf hat ebenfalls die vorhin schon bestimmte Spannung π, wenn derselbe den Weg x zurückgelegt hat. Der während des unendlich kleinen Weges dx ausgeübte Widerstand ist also $= a\pi dx$, und derselbe Ausdruck wird erhalten, wenn man die Gleichung für π mit adx multiplicirt. Es entsteht dann:

$$a\pi dx = \frac{a^2(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)dx}{Vx + W} - \frac{na}{m}dx.$$

Die durch den Widerstand des Dampfes gegen den kleinen Kolben verursachte Wirkung während eines Kolbenhubes ist also:

$$= a^2(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)\int_o^l \frac{dx}{Vx + W} - a\frac{n}{m}\int_o^l dx,$$

und wenn innerhalb der angegebenen Gränzen integrirt wird,

$$= a(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)\frac{a}{V} \cdot \log.\text{nat.}\left(\frac{Vl + W}{W}\right) - \frac{n}{m}al.$$

4) Wirkung der unvollkommen condensirten Dämpfe auf den großen Kolben. Der Condensator steht mit dem großen Cylinder in Verbindung, mithin wirkt auch der von den unvollkommen condensirten Dämpfen herrührende Druck zunächst unmittelbar auf den großen Kolben; bezeichnet man denselben pro Quadratfuß Kolbenfläche in Pfunden, wie früher, mit p, so ist die Gesammtwirkung während eines Kolbenhubes $= ALp$.

5) Reibung der unbelasteten Maschine. Wird der Reibungswiderstand der unbelasteten Maschine für den Quadratfuß der beiden Kolbenflächen A und a des großen und kleinen Cylinders in Pfunden mit F und f bezeichnet, so ist die von diesen Kräften während eines Kolbenhubes hervorgebrachte Wirkung $= AFL + afl$.

6) Belastung der Maschine. Da die Maschine zwei ungleich große Cylinder hat, so kann die Last, welche sie zu bewegen vermag, nicht füglich auf die Einheit der Kolbenflächen bezogen werden, wie es bei den früher betrachteten Maschinen geschehen ist, sondern es wird angenommen, die Last betrage überhaupt R Pfunde und der Angriffspunkt derselben durchlaufe während eines Kolbenhubes den Weg h. Die Wirkung dieses von der Last herrührenden Widerstandes ist demnach während eines Kolbenhubes $= Rh$.

7) Reibung der belasteten Maschine. Da die Reibung von dem Drucke der einzelnen Maschinentheile auf einander abhängig ist, so muß dieselbe im Verhältnisse der Belastung zu- und abnehmen. Bezeichnet man demnach den Zuwachs an Reibung für jede Einheit der Belastung R, und bei derselben Geschwindigkeit gemessen, mit δ, so ist die dadurch während eines Kolbenhubes hervorgebrachte Wirkung $= \delta Rh$.

8) Gesammt-Widerstände der Reibung und Belastung. Die von den letzten drei Widerständen hervorgebrachten Wirkungen während eines Kolbenhubes sind demnach $= Rh + \delta Rh + AFL + afl$, oder $= Rh[1 + \delta] + AFL + afl$.

Bedingungsgleichung für die gleichförmige Bewegung der Maschine.

Für den Zustand der gleichförmigen Bewegung der Maschine muß, wie bereits früher nachgewiesen, die Kraft genau dem Widerstande gleich sein; da nun vorhin die von der Kraft und den Widerständen hervorgebrachten Wirkungen während eines Kolbenhubes einzeln bestimmt sind, so muß nach gehöriger Reduction folgende Gleichung statt finden:

$$a(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \text{log. nat.}\left(\frac{l + s}{\lambda + s}\right) + \frac{AL - al}{Vl} \cdot \text{log. nat.}\left(\frac{Vl + W}{W}\right)\right] - \frac{n}{m}AL$$
$$= (1 + \delta)Rh + AFL + afl + ALp.$$

Setzt man endlich für V und W die Werthe, so erhält man folgenden Ausdruck:

$$\text{I.}\quad a(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P'\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \text{log. nat.}\frac{l + s}{\lambda + s} + \text{log. nat.}\frac{A(L + s^{I}) + as}{a(l + s) + As}\right] - \frac{n}{m}AL$$
$$= (1 + \delta)Rh + AFL + afl + ALp.$$

Ausdruck für die Bedingung der Gleichheit zwischen dem erzeugten und dem consumirten Dampfquantum.

Bezeichnet wie früher N die Anzahl der Kubikfuße Wasser, welche pro Minute verdampfen, so ergiebt sich die Anzahl der Kubikfuße Dampf, die sich daraus unter dem Drucke P′ pro Quadratfuß entwickeln, nach den Formeln IV und V im I Kapitel $= \frac{N}{n + mP'}$, worin n und m die früher angegebenen Constanten sind.

Erfolgen ferner ψ Kolbenhübe pro Minute, so consumirt der kleine Cylinder in derselben Zeit $\psi(\lambda + s)a$ Kubikfuß Dampf. Setzt man nun die Geschwindigkeit des kleinen Kolbens pro Minute $= c$, so ist $\psi l = c$, also $\psi = \frac{c}{l}$, und wenn dieser Werth substituirt wird, so findet folgende Gleichung statt:

$$\text{II.}\quad \frac{N}{n + mP'} = \frac{c(\lambda + s)}{f}a.$$

Ausdrücke für die Größe der Belastung und deren Geschwindigkeit, so wie für das Verdampfungsvermögen und den Effect der Maschine.

Entwickelt man aus den vorigen beiden Gleichungen I und II die Größe P′ und setzt überdies zur Abkürzung:

$$\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\,\frac{l + s}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\,\frac{A(L + s^{I}) + as}{a(l + s) + As^{I}} = K,$$

so erhält man nach gehöriger Reduction:

$$c = \frac{AL}{Nl} \cdot \frac{K}{n + \frac{m}{AL}(Rh(1 + \delta) + AFL + afl + ALp)}.$$

Da c die Geschwindigkeit des kleinen Kolbens ist, so ergiebt sich die Geschwindigkeit c′ des großen aus der Proportion

$$c : l = c' : L, \text{ also } c' = \frac{L}{l}c.$$

Ferner erhält man die Geschwindigkeit C des Angriffspunktes der Last R aus der Proportion:

$$c : l = C : h, \text{ also } C = \frac{h}{l}c.$$

Multiplicirt man demnach die vorige Gleichung durch $\frac{h}{l}$, so erhält man die Geschwindigkeit der Last, nemlich:

$$\alpha)\ C = \frac{hN}{AL} \cdot \frac{K}{n + \frac{m}{AL}(Rh(1 + \delta) + AFL + afl + ALp)}.$$

Entwickelt man aus dieser Gleichung die Größe R, so wird die Belastung in Pfunden erhalten, welche die Maschine mit einer Geschwindigkeit von C Fuß in der Minute zu bewegen vermag, nemlich:

$$\beta)\ R = \frac{1}{1 + \delta}\left[\frac{NK}{mC} - \frac{nAL}{mh} - \frac{AFL + afl + ALp}{h}\right].$$

Eliminirt man dagegen aus derselben Gleichung die Größe N, so erhält man die Anzahl der Kubikfuße Wasser, welche pro Minute verdampfen müssen, wenn die Last R mit der Geschwindigkeit C bewegt werden soll; nemlich:

$$\gamma)\ N = \frac{ACL}{hK} \cdot \left[n + \frac{m}{AL}(R(1 + \delta)h + AFL + afl + ALp)\right].$$

Der Effect der Maschine wird ausgedrückt durch das Product CR; multiplicirt man demnach die Gleichung (β) mit C, so erhält man den Effect E, oder die Anzahl Pfunde, welche in der Minute 1 Fuß gehoben werden, nemlich:

$$\delta)\ E = \frac{NK}{mC(1 + \delta)} + \frac{C}{1 + \delta}\left[\frac{nAL}{mh} + \frac{AFL + afl + ALp}{h}\right].$$

Ebenso erhält man den Effect durch Multiplication der Gleichung (α) mit R:

$$\varepsilon)\ E = \frac{hKNR}{AL\left[n + \frac{m}{AL}(Rh(1 + \delta) + AFL + afl + ALp)\right]}.$$

Gleichungen für den größten Nutzeffect bei einer gegebenen Expansion.

Aus der vorigen Gleichung (E), welche den Nutzeffect für eine gegebene Expansion und eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung ausdrückt, geht hervor, daß der Effect der Maschine mit der Abnahme der Geschwindigkeit C wächst. Geht man nun auf die früher entwickelte Gleichung (II) $\frac{N}{n+mP'} = c\frac{(\lambda+s)a}{l}$ zurück, und reducirt die Geschwindigkeit c des kleinen Kolbens auf den Angriffspunkt der Last R, indem man c mit $\frac{h}{l}$ multiplicirt, so zeigt die daraus hervorgehende Gleichung

$$C = \frac{Nh}{a(\lambda+s)n+mP'},$$

daß C desto kleiner wird, je größer P′ ist. Nun ist P der größtmögliche Werth für P′, mithin ist die Bedingung für das Minimum von C und das Maximum des Effectes

$$P' = P,$$

d. h. die Dampfspannungen im kleinen Cylinder und im Kessel müssen einander gleich sein.

Setzt man also für P′ jetzt P, so erhält man die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit pro Minute:

$$\alpha')\ C' = \frac{Nh}{a(\lambda+s)(n+mP)},$$

und wenn dieser Werth statt C in Gleichung (β) eingeführt wird, so erhält man den entsprechenden Werth von R^I, nemlich die dem Maximum des Nutzeffectes entsprechende größte Belastung der Maschine in Pfunden, und zwar:

$$\beta')\ R^I = \frac{1}{h(1+\delta)}\left[aK(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P\right)-\frac{nAL}{m}-(AFL+afl+ALp)\right].$$

Das Verdampfungsvermögen ergiebt sich durch Elimination von N aus der vorigen Gleichung für C′, nemlich:

$$\gamma')\ N = \frac{aC'(\lambda+s)}{h}(n+mP).$$

Für eine gegebene Expansion erhält man den größten Nutzeffect aus dem Producte C′R′; und wenn man diese Multiplikation wirklich ausführt, so ist:

$$\varepsilon')\ E_{Max.} = C'R' = \frac{N}{m(1+\delta)}\left[K-\frac{nAL+m[AFL+afl+ALp]}{a(\lambda+s)(n+mP)}\right].$$

Gleichung für das absolute Maximum des Nutzeffectes.

Für eine gegebene Expansion sind im Vorhergehenden die Gleichungen für den größten Nutzeffect entwickelt. Es kommt nunmehr noch darauf an, unter allen möglichen Expansionen diejenige zu bestimmen, welche für die Maschine am vortheilhaftesten ist, und alsdann natürlich das absolute Maximum des Nutzeffectes liefern muß.

Man setze zu dem Ende in Gleichung (ε'), welche das Maximum des Effectes für eine gegebene Expansion ausdrückt, statt K dessen Werth, so verwandelt sich solche in folgende:

$$E_{Max.} = \frac{N}{m(1+\delta)}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\mathrm{nat}.\frac{l+s}{\lambda+s}+\log.\mathrm{nat}.\frac{A(L+s^I)+as}{a(l+s)+As^I}-\frac{nAL+m(AFL+afl+ALp)}{a(\lambda+s)(n+mP)}\right].$$

Wird diese Gleichung in Bezug auf die veränderliche Größe λ differentiirt und das Differential mit Null verglichen, so erhält man nach gehöriger Reduction:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{AL\left[n + m\left(F + f\frac{al}{AL} + p\right)\right]}{al(n + mP)}.$$

Diese Formel bestimmt also die dem absoluten Maximum des Nutzeffects entsprechende Expansion, und wenn man den darnach berechneten Werth in die vorigen Formeln des größten Nutzeffectes für eine gegebene Expansion substituirt, so erhält man das absolute Maximum des Nutzeffectes.

Anwendung der vorigen Formeln.

Die vorigen Formeln sind für die numerische Berechnung nicht schwieriger als diejenigen, welche für andere Systeme von Dampfmaschinen bereits früher entwickelt worden sind. Zur Berechnung des Werthes der Größe K gewährt die im vierten Kapitel mitgetheilte Tafel eine wesentliche Erleichterung, da der Werth von einem Theile derselben, nemlich von $\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}$, unmittelbar daraus zu entnehmen ist. Der andere Theil des Ausdruckes K, nemlich $\log.\text{nat.}\frac{A(L + s^{I}) + as}{a(l + s) + As^{I}}$, bietet auch keine Schwierigkeiten dar, weil man nur nöthig hat, den gemeinen Logarithmen desselben durch 2,30259... zu multipliciren, um den gesuchten natürlichen Logarithmen zu finden.

Die vorigen allgemeinen Formeln werden aber erst practisch brauchbar, wenn die darin vorkommenden Größen f, F, p und δ für die verschiedenen Verhältnisse und Dimensionen der Maschinen dieses Systemes durch genaue Versuche bestimmt sind. So lange diese Versuche jedoch fehlen, können nur Näherungswerthe angewendet werden, die sich aus der Aehnlichkeit der Woolf'schen Maschinen mit denen der bereits früher kennen gelernten Systeme ableiten lassen. Bei den doppelt wirkenden Watt'schen Maschinen wurde für kleine Cylinder bis 17 Zoll Durchmesser die Reibung der unbelasteten Maschine zu 222 Pfund auf den Quadratfuß, und für große Cylinder bis 47 Zoll Durchmesser zu 74 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche berechnet. Bedenkt man nun, daß jeder Kolben der Woolf'schen Maschine ungefähr dieselbe Reibung erzeugt, als ob die Maschine nur einen Cylinder hätte, so scheint es, als könne man ohne einen merklichen Fehler zu begehen, obige Reibungswiderstände auch hier je nach der Größe der beiden Cylinder anwenden und also darnach f und F bestimmen. Die Zunahme der Reibung für die Einheit der Belastung kann indessen, wie bei allen vorhin betrachteten Maschinen berechnet werden, d. h. es wird $\delta = 0{,}14$ gesetzt.

Der Druck der unvollkommen condensirten Dämpfe gegen den großen Kolben ist, wie bei allen Condensationsmaschinen, hauptsächlich von der Menge und Temperatur des Condensationswassers abhängig, und kann eben so groß wie in den Watt'schen Maschinen angenommen werden. Es ist also $p = 592$ Pfund pro Quadratfuß.

Ferner ist, wie fast in allen mit einem Krummzapfen versehenen Maschinen der Spielraum $s^{I} = 0{,}05L$ und $s = 0{,}05l$.

Endlich haben die Constanten n und m nach Kapitel (I) folgende Werthe: $n = 0{,}00004227$ und $m = 0{,}0000002511$.

Führt man bloß die Werthe von n und m in die Gleichungen ein, indem die übrigen nur Näherungswerthe sind, so erhält man zur Berechnung der Woolf'schen Dampfmaschinen folgende praktische Formeln, wenn zur Abkürzung gesetzt wird

$$K = \frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{A L + s^{\mathrm{I}}) + as}{a(l + s) + As}.$$

a) Für eine beliebige Geschwindigkeit oder Belastung und für eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit der Last in Fußen in der Minute:

$$C = \frac{10000\,hKN}{0{,}42\,AL + 0{,}0025\,[R(1 + \delta)h + AFL + afl + ALp]}.$$

Die Belastung in Pfunden:

$$R = \frac{1}{h(1 + \delta)C}\left[3982477 \cdot hNK - CAL\left(168{,}3 + f\frac{al}{AL} + F + p\right)\right].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen in der Minute:

$$N = \frac{C}{10000 \cdot hK}\left[0{,}42\,AL + 0{,}0025\,[Rh(1 + \varrho) + ALF + alf + ALp]\right].$$

Nutzeffect in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E = CR.$$

b) Für das Maximum des Nutzeffectes und eine gegebene Expansion.

Die Geschwindigkeit der Last in Fußen pro Minute:

$$C' = \frac{1}{\lambda + s} \cdot \frac{10000 \cdot hN}{al\,[0{,}42 + 0{,}0025\,P]}.$$

Die Belastung der Maschine in Pfunden:

$$R' = \frac{1}{h(1 + \delta)}\left[aK(\lambda + s)(168{,}3 + P) - AL\left(168{,}3 + f\frac{al}{AL} + F + p\right)\right].$$

Die verdampfte Wassermenge in Kubikfußen pro Minute:

$$N = \frac{aC'(\lambda + s)}{10000 \cdot h}\,[0{,}42 + 0{,}0025\,P].$$

Der Nutzeffect ausgedrückt in Pfunden in der Minute 1 Fuß gehoben:

$$E_{\mathrm{Max.}} = C'R'.$$

c) Für das absolute Maximum des Nutzeffectes.

Die zum absoluten Maximum des Nutzeffectes gehörige Expansion bestimmt die Gleichung:

$$\frac{\lambda}{l} = \frac{AL}{al} \cdot \frac{168{,}3 + F + f\frac{al}{AL} + p}{168 + P}.$$

Setzt man den hiernach berechneten Werth von $\frac{\lambda}{l}$ in die Gleichungen für das Maximum des Nutzeffectes, so erhält man die Formeln für das absolute Maximum desselben.

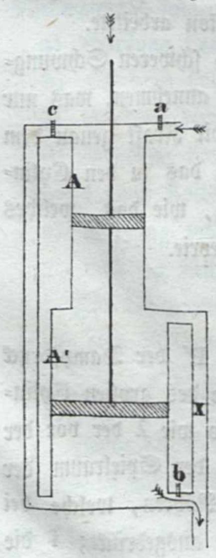
VII. Condensations- und Expansions-Dampfmaschinen mit zwei über einander stehenden Cylindern, oder sogenannte Sims'sche Maschinen.

Diese Sims'schen Dampfmaschinen bilden gleichsam den Uebergang von den doppelt wirkenden zu den einfach wirkenden Maschinen der verschiedenen Systeme, und da solche erst seit einigen Jahren bekannt sind, so erscheint es zweckmäßig, der eigentlichen Berechnung derselben erst einige erläuternde Worte vorauszuschicken.

Die ersten Dampfmaschinen von Watt, welche nach und nach die atmosphärischen Maschinen verdrängten, waren bekanntlich einfach wirkend, indem der Dampf darin nur beim Niedergange des Kolbens thätig ist. Die aufsteigende Bewegung desselben wurde, wenn die Maschine zum Wasserheben in den Bergwerken diente, durch das Gewicht der Pumpengestänge, und wenn dieses nicht hinreichte, oder selbige zu anderen Zwecken benutzt wurden, durch ein am anderen Ende des Balanciers angebrachtes Gegengewicht bewirkt, welches also beim Kolben-Niedergange als Last, bei seinem Aufgange dagegen als Kraft in der Maschine wirksam war. Diese Maschinen hatten ferner kein Schwungrad und die Bewegung derselben war ungleichförmig, indem zu Ende eines jeden Hubes der Kolben vollständig zur Ruhe kam.

Die später vielfach angewendeten sogenannten einfach wirkenden Cornwall'schen Maschinen weichen von diesen Watt'schen Maschinen in der Construction nicht ab, sondern sie unterscheiden sich nur dadurch von den letzteren, daß bei jenen der Dampf von höherer Spannung (50 bis 60 Pfund auf den Quadratzoll) und das Expansions-Princip in seiner vollsten Ausdehnung in Anwendung gebracht, und dadurch der Nutzeffect von der Gewichtseinheit Brennmaterial bedeutend gesteigert wurde.

In neuester Zeit hat man angefangen, diese Maschinen auch zum Betriebe anderer mechanischer Vorrichtungen z. B. in Werkstätten u. s. w. zu benutzen, weil man die Beobachtung machte, daß solche bei einem genau abgepaßten Gegengewichte und einem hinreichend schweren Schwungrade eine gleichförmige Geschwindigkeit annehmen, und dabei verhältnißmäßig einen größeren Nutzeffect als doppelt wirkende Maschinen gewähren.



Der Mechaniker James Sims in Cornwall, welcher mehrere Maschinen dieser Art, und namentlich eine für das hiesige Hohe Finanz-Ministerium baute, hat in Nr. 878 des Mechanics Magazine vom Juni 1840 eine beachtenswerthe Verbesserung derselben bekannt gemacht, wonach dieselbe folgende Einrichtung hat:

Zwei Cylinder A und A′ von gleicher Höhe, aber von verschiedenem Durchmesser sind auf einander geschraubt. Der obere Theil des kleinen Cylinders A steht durch das Ventil a mit dem untern Theile des großen Cylinders A′, und dieser hinwieder mittelst des Ventiles b mit dem Condensator in Verbindung. Der Raum zwischen den beiden Kolben communicirt stets mittelst der Röhre x mit dem Condensator. Beide Kolben sind fest mit einander verbunden.

Im höchsten Stande der Kolben wird zuerst das Verbindungsventil c geschlossen, dann das Condensator-Ventil b, und fast gleichzeitig das Dampfventil a geöffnet; die Kolben bewegen sich daher abwärts. Ist ein Theil des Hubes vollendet, so wird das Ventil a wieder verschlossen, und die Kolben werden durch die Ausdehnung des Dampfes vollends bis zu ihrem tiefsten Stande getrieben, während der Dampf unterhalb des großen Kolbens durch das Ventil b in den Condensator strömt. Nunmehr wird das Condensatorventil b geschlossen, dagegen das Verbindungsventil c geöffnet, und der oberhalb des kleinen Kolbens wirksam gewesene Dampf tritt also auch unterhalb des großen Kolbens und drückt diesen wieder in die Höhe.

Die von Sims angeordnete Verbesserung der in Rede stehenden Maschinen besteht also darin, den beim Aufsteigen des Kolbens ganz unwirksamen Dampf durch Anwendung eines zweiten größeren Kolbens zum Aufwärtsbewegen desselben zu benutzen, und erst dann auf die gewöhnliche Weise zu condensiren.

Die Sims'sche Maschine bedarf also nur eines verhältnißmäßig kleinen Gegengewichtes und kann demnach in Bezug auf Dampfconsumtion eine einfach wirkende, aber in Bezug auf die Wirkungsart des Dampfes eine doppelt wirkende Maschine genannt werden.

Die Kosten einer solchen Maschine sind nur in so weit etwas größer, als dazu ein zweiter größerer Cylinder mit Kolben und Kolbenstange erforderlich ist. Dagegen ist die Steuerung nicht complicirter, indem ebenfalls nur drei Ventile zu bewegen sind. Nur ein Uebelstand, nemlich die jedenfalls höchst mühsame Liederung des großen Kolbens, scheint erheblich zu sein; auch ist von Sims nicht angegeben, wie und auf welche Weise diese bewerkstelligt werden soll.

Aus dem Vorigen geht zur Genüge hervor, daß die Sims'schen Maschinen den gewöhnlichen Cornwall'schen überlegen sind, daß aber ihre Anwendung nur bis zu etwa 10 Pferdekräften, also überhaupt nur für kleinere Maschinen zweckmäßig erscheint, weil sonst der untere Cylinder, dessen Querschnitt nach Sims circa 3 mal so groß als der des obern sein soll, zu groß wird.

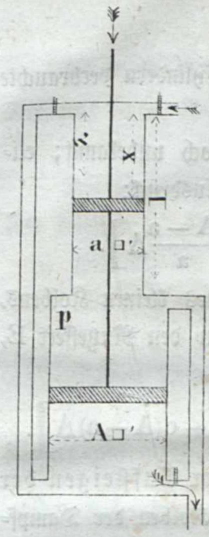
Sims hat bereits zwei nach diesem Systeme gebaute Maschinen in Betrieb; die eine, eine Wasserhebungsmaschine, soll nach seinen Angaben 27 Procent mehr Nutzeffect haben, als eine andere gewöhnliche einfach wirkende Cornwall'sche Maschine von denselben Dimensionen und Verhältnissen, obgleich erstere unter sehr ungünstigen Umständen arbeitet, indem sie nur durchschnittlich 3,18 Hube in der Minute machen darf Die andere dagegen, eine Rotations-Maschine, ergab 50 Procent Nutzeffect mehr als eine doppelt wirkende Boulton-Watt'sche Maschine, die ohne Expansion arbeitete.

Die Erfahrung hat gelehrt, daß die mit Gegengewichten und einem hinreichend schweren Schwungrade versehenen, einfach wirkenden Rotationsmaschinen eine gleichförmige Bewegung annehmen, was nur der Fall sein kann, wenn sowohl beim Auf- als beim Niedersteigen des Kolbens die Kraft genau dem Widerstande gleich ist. Diese Thatsache, so wie die nothwendige Bedingung, daß das in den Cylindern während einer gewissen Zeit wirksame Dampfquantum eben so groß sein muß, wie das, welches der Kessel während derselben Zeit erzeugte, bilden die Grundlage der folgenden Theorie.

Entwickelung der allgemeinen Gleichungen.

Es sei P der Dampfdruck im Kessel in Pfunden auf den Quadratfuß und P′ der Dampfdruck im Cylinder vor der Dampfabsperrung; a die Kolbenfläche des kleinen und A die des großen Cylinders in Quadratfußen; l der Hub des kleinen und großen Kolbens in Fußen, so wie λ der vor der Absperrung des Dampfes durchlaufene Weg der Kolben, ebenfalls in Fußen; s der Spielraum der beiden Kolben und der Inhalt der Oeffnungen in den Ventilgehäusen und Röhren, welche bei jedem Hube nutzlos mit Dampf angefüllt werden, in Längen der resp. Cylinder ausgedrückt; f die

Reibung der unbelasteten Maschine in Pfunden pro Quadratfuß Fläche des kleinen Kolbens; p der Druck der unvollkommenen condensirten Dämpfe im Condensator in Pfunden pro Quadratfuß; Q die eigentliche Nutzlast der Maschine in Pfunden pro Quadratfuß der kleinen Kolbenfläche; δ der Zuwachs der Reibung für jede Einheit der Belastung Q, und endlich Δ das am andern Ende des Balanciers angebrachte Gegengewicht in Pfunden pro Quadratfuß der Differenz $(A-a)$ beider Kolbenflächen.



Gleichung zwischen Kraft und Widerstand beim Niedergehen der Kolben. Während die Kolben bei ihrem Niedergange den Weg λ durchlaufen, wirkt der Dampf gegen den kleinen Kolben mit seinem vollen Drucke P', der in aller Strenge genommen stets kleiner als P sein muß, und demnächst von da an auf die Länge $l-\lambda$ bloß vermöge seiner Ausdehnung.

Es werde angenommen, die Kolben hätten den Weg x zurückgelegt und die anfängliche Dampfspannung P' sei in Folge der Expansion bis auf π gesunken, so ist das mechanische Moment des expandirten Dampfes für die unendlich kleine Kolbenbewegung dx:

$$= a\pi dx,$$

und die ganze Wirkung des Dampfes im kleinen Cylinder während des Kolben-Niederganges nach Gleichung 1 des vierten Kapitels gleich

$$a(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P'\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]-al\frac{n}{m}.$$

Da der Raum zwischen den beiden Kolben stets mit unvollkommen condensirten Dämpfen von der Spannung p angefüllt ist, so entspringt daraus eine abwärts gerichtete Kraft, deren Wirkung während eines Kolbenniedergangs durch:

$$(A-a)pl$$

ausgedrückt werden kann.

Die Wirkungen der nach entgegengesetzter Richtung thätigen Kräfte sind während eines Kolben-Niederganges folgende:

a) Wirkung von den unvollkommen condensirten Dämpfen gegen den großen Kolben $= Alp$.

b) Wirkung von der Reibung der unbelasteten Maschine auf den kleinen Kolben $= alf$.

c) Wirkung von der eigentlichen Belastung der Maschine auf den kleinen Kolben $= alQ$.

d) Wirkung von dem in Folge der Belastung der Maschine verursachten Reibungszuwachs auf den kleinen Kolben $= alQ\delta$.

e) Wirkung von dem am andern Ende des Balanciers angebrachten Gegengewichte, auf die Differenz der beiden Kolbenflächen bezogen, $= (A-a)\Delta l$.

Für die vorausgesetzte gleichförmige Bewegung muß in jedem Punkte des Kolbenlaufs die Kraft genau dem Widerstande gleich sein, mithin die folgende Gleichung statt finden:

$$\text{I.}\quad a(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P'\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]-al\frac{n}{m}+(A-a)pl = Alp+alf+alQ(1+\delta)+(A-a)\Delta l.$$

Wenn die Maschine in der Minute z Doppelhübe macht, oder die Kolben den Weg 2l in der Minute z mal durchlaufen, so ist die Geschwindigkeit derselben, welche mit c bezeichnet werden soll, $= 2lz$, also $z = \frac{c}{2l}$.

Da nun bloß beim Niedergange der Kolben frischer Dampf aus dem Kessel strömt, so werden pro Minute $a(\lambda + s)z$ Kubikfuße gebraucht, und wenn in derselben Zeit N Kubikfuße Wasser im Kessel verdampfen, so findet mit Bezug auf Gleichung I im IV. Kapitel folgender Ausdruck statt:

$$\frac{a(\lambda + s)c}{2l} = \frac{N}{n + mP'}, \text{ oder}$$

$$\text{II.}\quad P' = \frac{2Nl}{amc(\lambda + s)} - \frac{n}{m}.$$

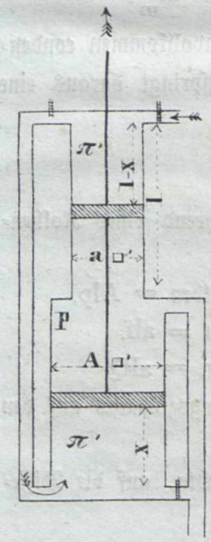
Diese Gleichung drückt also die Bedingung aus, daß das in der Minute von den Cylindern verbrauchte Dampfquantum dem in derselben Zeit im Kessel erzeugten gleich ist.

Der in diesen beiden Gleichungen vorkommende Werth von P' ist vorläufig noch unbekannt; eliminirt man daher diese Größe, so entsteht nach gehöriger Reduktion der folgende Ausdruck:

$$\text{III.}\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{acm}\left(\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right) - \left(\frac{n}{m} + p + f\right) - \frac{A - a}{a}\Delta\right].$$

Nun ist Q die in Pfunden ausgedrückte Nutzlast für jeden Quadratfuß Fläche des kleinen Kolbens, und da diese mit c Fuß Geschwindigkeit pro Minute bewegt wird, so erhält man den Nutzeffect E, durch Multiplication der vorigen Gleichung mit ac, nämlich:

$$\text{IV.}\quad E = Qac = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{m}\left(\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right) - ac\left(\frac{n}{m} + p + f\right) - c(A - a)\Delta\right].$$



Gleichung zwischen Kraft und Widerstand beim Aufsteigen der Kolben. In dem Augenblicke, wo beim Niedergange der Kolben der Dampfzufluß aus dem Kessel abgesperrt wurde, hatte bekanntlich der Dampf die Spannung P' und füllte einen Raum $= a(\lambda + s)$. Von da an nahm die Spannung desselben allmählig ab, und es werde angenommen, dieselbe sei im tiefsten Kolbenstande, wo jener Dampf nunmehr einen Raum $(l + s)a$ füllte, bis auf π gesunken, so kann letztere nach der allgemein aufgestellten Formel IV im IV Kapitel ausgedrückt werden, wie folgt:

$$\pi = \frac{\lambda + s}{l + s}\cdot\left(\frac{n}{m} + P'\right) - \frac{n}{m}.$$

Mit dieser Spannung wirkt der Dampf zu Anfang der aufsteigenden Bewegung sowohl gegen den großen als kleinen Kolben, also auf eine Fläche von $(A - a)$ Quadratfußen. Durch die fernere Expansion nimmt diese Spannung π aber immer mehr ab, und es werde angenommen, solche habe sich, nachdem die Kolben eine gewisse Länge x zurückgelegt, bis auf π' ermäßigt, so ist das mechanische Moment der Wirkung des Dampfes während der unendlich kleinen Kolbenbewegung dx gleich $\pi'(A - a)dx$.

Da aber π' nach der Formel (IV) durch $\frac{(l + s)a}{al + s(A + a) + (A - a)x}\cdot\left(\frac{n}{m} + \pi\right) - \frac{n}{m}$ ausgedrückt werden kann, so ist die Wirkung des expandirten und bereits beim Niedergange der Kolben thätig gewesenen Dampfes während der aufsteigenden Bewegung der Kolben gleich

$$(A - a)\left[a(l + s)\left(\frac{n}{m} + \pi\right)\int_0^l \frac{dx}{al + s(A + a) + (A - a)x} - \frac{n}{m}\int_0^l dx\right];$$

oder, wenn innerhalb der angegebenen Grenzen die Integration wirklich vollzogen wird, gleich

$$(A-a)\left[\frac{a(l+s)\left(\frac{n}{m}+\pi\right)}{A-a}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-\frac{n}{m}l\right].$$

Wird der vorhin für π ermittelte Werth substituirt, so erhält man:

$$(A-a)\left[\frac{2Nl}{mc(A-a)}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-\frac{n}{m}l\right].$$

Zu dieser Wirkung des expandirten Dampfes kommt noch die des Gegengewichts, bezogen auf die Differenz beider Kolbenflächen, mit:

$$l(A-a)\Delta.$$

Die Wirkungen der nach entgegengesetzter Richtung wirkenden Kräfte beim Aufsteigen der Kolben sind folgende:

a) Wirkung der unvollkommen condensirten Dämpfe zwischen den beiden Kolben $=(A-a)lp$.

b) Wirkung von der Reibung der unbelasteten Maschine, auf den kleinen Kolben bezogen, $= afl$.

c) Wirkung von der Nutzlast Q und der daraus entspringenden Reibungszunahme, bezogen auf den kleinen Kolben, $=(1+\delta)Qal$.

Für die vorausgesetzte gleichförmige Bewegung muß in jedem Augenblicke die Kraft genau dem Widerstande gleich sein, mithin muß folgende Gleichung bestehen:

$$(A-a)\left[\frac{2Nl}{mc(A-a)}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-\frac{n}{m}l+\Delta l\right]=l\left[p(A-a)+af+(1+\delta)aQ\right],$$

woraus man nach gehöriger Reduktion erhält:

$$\text{V.}\quad Q=\frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{acm}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-\frac{A-a}{a}\cdot\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)-f\right].$$

Da Q die Nutzlast in Pfunden pro Quadratfuß Fläche des kleinen Kolbens bezeichnet, so erhält man ebenso wie früher durch Multiplication dieser Gleichung mit a und c den Nutzeffekt E, nemlich:

$$\text{VI.}\quad E=Qac=\frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{m}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-c(A-a)\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)-acf\right].$$

Die Gleichungen IV und VI drücken für die vorausgesetzte gleichförmige Bewegung ein und dasselbe aus, das heißt: beide bestimmen den Nutzeffekt eines und desselben Dampfvolumens, welches bei jedem Doppelhube aus dem Kessel strömt. Eine Verbindung beider Ausdrücke liefert die folgende Gleichung:

$$\text{VII.}\quad \Delta=\frac{1}{c(A-a)}\left[\frac{N}{m}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\text{log. nat.}\frac{1+s}{\lambda+s}-\text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}\right]+c\left(\frac{n}{m}+p\right)\left(\frac{A}{2}-a\right)\right].$$

Für den Fall, daß kein Gegengewicht erforderlich ist, wird $\Delta = o$ und es entsteht daher:

$$\text{VIII.}\quad \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}-\frac{c}{2N}(n+mp)A=\frac{\lambda}{\lambda+s}+\text{log. nat.}\frac{1+s}{\lambda+s}-\frac{c}{N}(n+mp)a,$$

woraus die Größe A durch Proberechnungen bestimmt werden kann.

Wird der obere Cylinder bei jedem Doppelhube ganz mit Dampf angefüllt, also keine Expansion angewendet, so wird $\lambda = 1$ und die vorigen Gleichungen gehen für diese Annahme in Folgende über:

a) Für die Bewegung der Kolben abwärts:

$$\text{IX.}\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{acm}\cdot\frac{l}{l+s} - \left(\frac{n}{m}+p+f\right) - \frac{A-a}{a}\Delta\right].$$

$$\text{X.}\quad E = Qac = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{m}\cdot\frac{l}{l+s} - ac\left(\frac{n}{m}+p+f\right) - c(A-a)\Delta\right].$$

b) Für die Bewegung der Kolben aufwärts:

$$\text{XI.}\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{acm}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - \frac{A-a}{a}\cdot\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right) - f\right].$$

$$\text{XII.}\quad E = Qac = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{2N}{m}\cdot \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - c(A-a)\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right) - acf\right].$$

c) Zur Bestimmung des Gegengewichtes Δ:

$$\text{XIII.}\quad \Delta = \frac{1}{c(A-a)}\left[\frac{l}{l+s}\cdot\frac{N}{m} - \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} + c\left(\frac{n}{m}+p\right)\left(\frac{A}{2}-a\right)\right].$$

d) Zur Bestimmung der Kolbenfläche A, wenn kein Gegengewicht angewendet wird:

$$\text{XIV.}\quad \text{log. nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - \frac{c}{2N}(n+mp)A = \frac{l}{l+s} - \frac{N}{c}(n+mp)a.$$

Bestimmung der kleinsten Geschwindigkeit der Kolben und des größten Nutzeffects.

Es ist eine allgemein bekannte Thatsache, daß jede Dampfmaschine eine desto größere Geschwindigkeit annimmt, je geringer die Last wird, welche sie bei constanter Verdampfung zu bewegen hat, und umgekehrt. In Bezug auf den Effect kann also die Geschwindigkeit einer Maschine nichts weniger als willkührlich sein.

Betrachtet man die Gleichung (II) etwas genauer, so bemerkt man leicht, daß die von der Größe der zu bewegenden Last abhängige Dampfspannung P′ wächst, wenn die Geschwindigkeit c kleiner wird, und umgekehrt. Der größtmögliche Werth von P′ ist = P, also der dazu gehörige kleinste Werth von c, den wir mit c′ bezeichnen wollen:

$$\text{XV.}\quad c' = \frac{2Nl}{a(\lambda+s)(n+mP)}.$$

Nun zeigen aber beide Gleichungen IV und VI, daß der Effect einer Maschine bei constanter Verdampfung desto größer wird, je kleiner c ist. Setzt man daher in die früheren Gleichungen den durch die vorige Gleichung (XV) bestimmten kleinsten Werth von c, nemlich c′, so erhält man folgende Gleichungen, welche bei einer gegebenen Expansion den größten Nutzeffect ausdrücken:

a) Für die Bewegung der Kolben abwärts:

$$\text{XVI.}\quad Q' = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda+s} + \text{log. nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right) - \left(\frac{n}{m}+p+f\right) - \frac{A-a}{a}\Delta\right].$$

$$\text{XVII.}\quad E' = Q'ac' = \frac{ac'}{1+\delta}\left[\frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda+s} + \text{log. nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right) - \left(\frac{n}{m}+p+f\right) - \frac{A-a}{a}\Delta\right].$$

Ebenfalls kann der Effect ausgedrückt werden, wenn das Product der beiden Gleichungen XV und XVI mit a multiplicirt wird, nemlich:

$$\text{XVII}'.\quad E' = Q'ac' = \frac{2N}{m(1+\delta)}\cdot\left[\frac{\lambda}{\lambda+s} + \text{log. nat.}\frac{l+s}{\lambda+s} - \frac{l}{\lambda+s}\cdot\frac{\frac{n}{m}+p+f+\frac{A-a}{a}\Delta}{\frac{n}{m}+P}\right].$$

b) Für die Bewegung der Kolben aufwärts:

$$\text{XVIII.}\quad Q' = \frac{1}{1+\delta}\left[\frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\log.\text{nat.}\frac{Al+(A+a)s}{al+(A+a)s} - \frac{A-a}{a}\cdot\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)-f\right].$$

$$\text{XIX.}\quad E' = Q'ac' = \frac{ac'}{1+\delta}\left[\frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - \frac{A-a}{a}\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)-f\right].$$

Multiplicirt man das Product der beiden Gleichungen XV und XVIII auf beiden Seiten mit a, so erhält man für den Effect den nachstehenden Ausdruck:

$$\text{XIX}'.\quad E' = Q'ac' = \frac{2N}{m(1+\delta)}\left[\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - \frac{l}{\lambda+\gamma}\cdot\frac{\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)\frac{A-a}{a}+f}{\frac{n}{m}+P}\right].$$

Die Verbindung der Gleichungen XVII und XIX oder XVII′ und XIX′ giebt zur Bestimmung des erforderlichen Gegengewichts Δ folgende Formel:

$$\text{XX.}\quad \Delta = \frac{1}{A-a}\left[\frac{a(\lambda+s)}{2l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}-\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}\right)+\left(\frac{n}{m}+p\right)\left(\frac{A}{2}-a\right)\right].$$

Zur Bestimmung der Kolbenfläche A für den Fall, daß kein Gegengewicht angewendet wird, dient nachstehende Gleichung:

$$\text{XXI.}\quad \log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)} - \frac{l\left(\frac{n}{m}+p\right)A}{a(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P\right)} = \frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s} - \frac{2l\left(\frac{n}{m}+p\right)}{(\lambda+s)\left(\frac{n}{m}+P\right)}.$$

Die durch die Gleichung XV bestimmte Kolbengeschwindigkeit c′ ist bei übrigens constanter Dampfspannung und Verdampfung die absolut kleinste, und bei ihr findet, wie vorhin nachgewiesen wurde, das Maximum des Nutzeffects bei einer gegebenen Expansion statt. Denn wäre die Geschwindigkeit noch geringer, so consumirten die Cylinder weniger Dampf als der Kessel in derselben Zeit erzeugte, und mithin müßte eine Anhäufung der Dämpfe und eine gleichzeitige Vermehrung der Spannung statt finden, was aber beides gegen die Voraussetzung ist.

Läßt man die Geschwindigkeit c′ der Kolben sich successive vergrößern, so muß nach dem Vorigen bei constanter Verdampfung die zu bewegende Nutzlast Q immer kleiner werden; ist endlich Q = 0 geworden, so ist auch der Nutzeffect gleich Null, weil dann die Maschine leer geht. Setzt man demnach in den Gleichungen IV und VI die Größe E gleich Null, und bezeichnet die zu Q = 0 gehörige Geschwindigkeit mit c″, so erhält man nach gehöriger Reduction folgende Ausdrücke:

$$\text{XXII.}\quad c'' = \frac{2N}{m}\cdot\frac{\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}}{a\left(\frac{n}{m}+p+f\right)+(A-a)\Delta}.$$

$$\text{XXIII.}\quad c'' = \frac{2N}{m}\cdot\frac{\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}}{\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right)(A-a)+af}.$$

Bei constanter Verdampfung ist also die Geschwindigkeit c″ der Kolben die absolut größte, c′ die absolut kleinste, und die beliebigen Geschwindigkeiten c liegen also stets innerhalb der Gränzen c′ und c″. Da aber Δ eine Function von c ist, so daß, wenn die Geschwindigkeit c sich ändert, auch nothwendig der Werth von Δ sich ändern muß, so sind für die Bedingung der gleichförmigen Bewegung obige Gleichungen XXII und XXIII nur dann gültig, wenn zugleich folgende Gleichung statt findet:

$$\text{XXIV.}\quad \Delta = \frac{\left[(A-a)\left(\frac{n}{m}+p\right)+af\right]\left(\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right)-a\left(\frac{n}{m}+p+f\right)\cdot\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}}{(A-a)\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]+\log.\text{nat.}\frac{Al+s(A+a)}{al+s(A+a)}}.$$

Bestimmung der Constanten in den vorhin entwickelten Gleichungen.

Was zuerst die Zahlenwerthe der Größen n und m betrifft, so sind solche nach dem ersten Kapitel (Gleichung I) beziehlich gleich 0,00004227 und 0,0000002511.

Der Werth von s ist mit unbedeutenden Abweichungen bei allen, mit einem Schwungrade und Krummzapfen versehenen, Dampfmaschinen $= \frac{1}{20}$ des Kolbenhubes; es wird also $s = 0{,}05.l$ gesetzt.

Der Reibungszuwachs in Folge der eigentlichen Belastung der Maschine kann, wie früher, zu $\frac{1}{7}$ der Belastung näherungsweise angenommen werden; es ist also $\delta = \frac{1}{7}$.

Der Druck der unvollkommen condensirten Dämpfe im Condensator oder der Zahlenwerth von p ist von der Construction des Condensators und von der Menge und Temperatur des Condensationswassers abhängig. Bei Watt'schen Maschinen beträgt der Druck im Condensator durchschnittlich 222 Pfund pro □Fuß, wenn das Condensationswasser eine Temperatur von circa 15° Celsius hat. Der mittlere Druck gegen den Kolben ist aber um ungefähr 370 Pfund größer, weil das Ueberströmen der Dämpfe aus dem Cylinder in den Condensator nicht plötzlich, sondern erst nach und nach statt finden kann, so daß der ganze Druck nicht 222, sondern 592 Pfund pro □Fuß beträgt. Hierbei ist aber zu bemerken, daß bei den in Rede stehenden Maschinen, wo bloß beim Niedergange der Kolben Dämpfe zu condensiren sind, jener Widerstand p mehr oder weniger kleiner sein muß.

Der Reibungswiderstand f der unbelasteten Maschine kann bei kleinen Watt'schen Maschinen bis zu etwa 10 Pferdekräften zu 222 Pfund pro □Fuß Kolbenfläche berechnet werden; da aber bei den Sims'schen Maschinen zwei Kolben zu bewegen sind, so muß nothwendig auch jener Widerstand größer sein.

Es ist nicht schwer, bei einer in Betrieb stehenden Dampfmaschine die Größen δ, p und f durch Versuche direct zu bestimmen. Der mittlere Werth der Größe p oder des Druckes der Dämpfe im Condensator kann nemlich in bekannter Art unmittelbar gemessen werden.

Um den Werth der Größe f zu finden, lasse man die Maschine mit einem so niedrigen Dampfdrucke leer gehen, daß die geringste Verminderung desselben solche zum Stillstehen bringt. In diesem Falle sind bei der geringen Geschwindigkeit die Dampfspannungen im Kessel und im Cylinder einander gleich, und die Größe der Reibung der unbelasteten Maschine oder der Werth von f ist dann unmittelbar aus der Gleichung XVI oder XVIII zu berechnen, wenn darin $Q = 0$ gesetzt wird; nemlich:

$$\text{XXV.}\quad f = \frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\left(\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right)-\left(\frac{n}{m}+p\right)-\frac{A-a}{a}\cdot\Delta,$$

oder

$$\text{XXVI.}\quad f = \frac{\lambda+s}{l}\left(\frac{n}{m}+P\right)\log.\text{nat.}\frac{a+21A}{A+21a}-\frac{A-a}{a}\cdot\left(\frac{n}{m}+p-\Delta\right).$$

Wird darauf die Dampfspannung erhöht und die Maschine so stark belastet, daß eine weitere Vermehrung der Last solche zum Stillstehen bringen würde, so sind ebenfalls bei der geringen Geschwindigkeit die Dampfspannnngen im Kessel und Cylinder einander gleich, und da bei dieser Spannung die Last ein Maximum ist, so giebt die Gleichung XVI oder XVIII unmittelbar den Werth des Reibungszuwachses, wenn darin jene Last statt Q substituirt wird; nemlich:

$$\text{XXVII.}\quad (1+\delta) = \frac{1}{Q}\Big[\frac{\lambda+s}{l}\Big(\frac{n}{m}+P\Big)\Big(\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat}.\frac{l+s}{\lambda+s}\Big)-\Big(\frac{n}{m}+p+f\Big)-\frac{A-a}{a}\Delta\Big],$$

oder:

$$\text{XXVIII.}\quad (1+\delta) = \frac{1}{Q}\Big[\frac{\lambda+s}{l}\Big(\frac{n}{m}+P\Big)\log.\text{nat}.\frac{Al+(A+a)s}{al+(A+a)s}-f-\frac{A-a}{a}\cdot\Big(\frac{n}{m}+p-\Delta\Big)\Big].$$

Sind auf diese Weise die Werthe der Größen δ, p und f für eine Maschine bestimmt, so sind solche für alle ebenso construirte Maschinen desselben Systemes gültig, und man kann dann überzeugt sein, daß die darnach berechnete Maschine wirklich den Effect hat, den man von ihr erwartete.

Setzt man die Zahlenwerthe der Constanten n, m und s in die früher entwickelten Gleichungen, so erhält man zur Berechnung der Sims'schen Maschinen folgende Formeln, worin k den Ausdruck $\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat}.\frac{l+s}{\lambda+s}$ bedeutet:

A. Für eine gegebene Expansion im kleinen Cylinder, und eine beliebige zwischen c′ und c″ liegende Kolbengeschwindigkeit c.

$$1)\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953\frac{N}{ac}k-\Big(168{,}3+p+f+\Delta\frac{A-a}{a}\Big)\Big].$$

oder:

$$2)\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953\frac{N}{ac}\cdot\log.\text{nat}.\frac{a+21A}{A+21a}-\frac{A-a}{a}(168{,}3+p-\Delta)-f\Big].$$

$$3)\quad E = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953\,Nk-ac(168{,}3+p+f)-c(A-a)\Delta\Big].$$

oder:

$$4)\quad E = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953N\cdot\log.\text{nat}.\frac{a+21A}{A+21a}-c(A-a)(168{,}3+p-\Delta)-acf\Big].$$

$$5)\quad \Delta = \frac{1}{c(A-a)}\Big[3982476\,N\Big(k-\log.\text{nat}.\frac{a+21A}{A+21a}\Big)+c(168{,}3+p)\Big(\frac{A}{2}-a\Big)\Big].$$

Zur Bestimmung von A, für den Fall, daß kein Gegengewicht erforderlich ist:

$$6)\quad \log.\text{nat}.\frac{a+21A}{A+21a}-\frac{c(168{,}3+p)A}{7964953N} = k-\frac{ac(168{,}3+p)}{3982476N}.$$

B. Für eine beliebige, zwischen c′ und c″ liegende Geschwindigkeit c, und ohne Anwendung der Expansion im kleinen Cylinder, also für $\lambda = l$.

$$1)\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[7585671\frac{N}{ac}-(168{,}3+p+f)-\frac{A-a}{a}\Delta\Big].$$

oder:

$$2)\quad Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953\frac{N}{ac}\cdot\log.\text{nat}.\frac{a+21A}{A+21a}-\frac{A-a}{a}(168{,}3+p-\Delta)-f\Big].$$

3) $E = \frac{1}{1+\delta}\Big[7585671\,N - ac(168{,}3 + p + f) - (A - a)\,c\Delta\Big].$

oder:

4) $E = \frac{1}{1+\delta}\Big[7964953\,N \cdot \text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - c(A - a)(168{,}3 + p - \Delta) - acf\Big].$

5) $\Delta = \frac{1}{c(A-a)}\Big[\frac{N}{2}(7585671 - 7964953 \cdot \text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} + c(168{,}3 + p)\frac{A}{2} - a\Big].$

Zur Bestimmung von A, wenn kein Gegengewicht erforderlich ist:

6) $\text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - \frac{c(168{,}3 + p)A}{7964953\,N} = 0{,}9523808 - \frac{ac(168{,}3 + p)}{3982476\,N}.$

C. Für eine gegebene Expansion im kleinen Cylinder und den größten Nutzeffect.

1) $c' = 7964953\frac{Nl}{a(\lambda + s)(168{,}3 + P)}.$

2) $Q' = \frac{1}{1+\delta}\Big[\frac{\lambda + s}{l}(168{,}3 + P)k - (168{,}3 + p + f) - \frac{A - a}{a}\Delta\Big].$

oder:

3) $Q' = \frac{1}{1+\delta}\Big[\frac{\lambda + s}{l}(168{,}3 + P) \cdot \text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - \frac{A - a}{a}(168{,}3 + p - \Delta) - f\Big].$

4) $E = 7964953\frac{N}{1+\delta}\left[k - \frac{l}{\lambda + s} \cdot \frac{168{,}3 + p + f + \frac{A - a}{a}\Delta}{168{,}3 + P}\right].$

oder:

5) $E = 7964953\frac{N}{1+\delta}\left[\text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - \frac{l}{\lambda + s}\,\frac{(168{,}3 + p - \Delta)\frac{A - a}{a} + f}{168{,}3 + P}\right].$

6) $\Delta = \frac{1}{A - a}\Big[\frac{\lambda + s}{2l}a(168{,}3 + P)k - \text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} + (168{,}3 + p)\left(\frac{A}{2} - a\right)\Big].$

Zur Bestimmung von A, wenn kein Gegengewicht erforderlich ist:

7) $\text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - \frac{l(168{,}3 + p)A}{(\lambda + s)a(168{,}3 + P)} = k - \frac{2l(168{,}3\,p)}{(\lambda + s)(168{,}3 + P)}.$

D. Für den größten Nutzeffect ohne Anwendung der Expansion im kleinen Cylinder, also für $\lambda = l$.

1) $c' = 7585671\frac{N}{a(168{,}3 + P)}.$

2) $Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[P - f - p - \frac{A - a}{a}\Delta\Big].$

oder:

3) $Q = \frac{1}{1+\delta}\Big[\frac{21}{20}(168{,}3 + P) \cdot \text{log.nat.}\frac{a + 21A}{A + 21a} - \frac{A - a}{a}(168{,}3 + p - \Delta) - f\Big].$

4) $E = 7585671\frac{N}{1+\delta}\,\frac{P - p - f - \frac{A - a}{a}\Delta}{168{,}3 + P}.$

oder:

$$5)\quad E = 7964953\frac{N}{1+\delta}\left[\text{log. nat.}\frac{a+21A}{A+21a} - \frac{20}{21}\cdot\frac{(168{,}3+p-\Delta)\frac{A-a}{a}+f}{168{,}3+P}\right].$$

$$6)\quad \Delta = \frac{1}{A-a}\left[\frac{21a}{40}(168{,}3+P)\left(\frac{20}{21}-\text{log. nat.}\frac{a+21A}{A+21a}\right)+(168{,}3+p)\left(\frac{A}{2}-a\right)\right].$$

Gleichung zur Bestimmung von A, wenn kein Gegengewicht erforderlich ist:

$$7)\quad \text{log. nat.}\frac{a+21A}{A+21a} - \frac{20(168{,}3+p)}{21a(168{,}3+P)}A = \frac{20}{21}\cdot\frac{P-2p-168{,}3}{168{,}3+P}.$$

Wenn man gerade keine Tafeln der natürlichen Logarithmen zur Hand hat, so kann man statt der in den vorigen Gleichungen vorkommenden natürlichen Logarithmen die briggischen oder gemeinen suchen und diese mit dem hyperbolischen Logarithmen der Zahl $10 = 2{,}302585\ldots$ multipliciren, wodurch diese bekanntlich in natürliche verwandelt werden.

Anwendung der vorigen Formel.

Es soll eine Dampfmaschine nach dem Sims'schen Prinzipe construirt werden, die bei einer Dampfspannung im Kessel von 50 Pfund pro □ Zoll, oder von 7200 Pfund pro □ Fuß, und bei einer Kolbengeschwindigkeit von 150 Fuß in der Minute, ohne Anwendung der Expansion im oberen Cylinder eine Kraft von 6 Pferden hat.

Für diesen Fall soll der mittlere Druck der Dämpfe im Condensator pro □ Fuß, oder $p = 500$ Pfund, die Reibung der unbelasteten Maschine pro □ Fuß Fläche des kleinen Kolbens oder $f = 225$ Pfund, und der Zuwachs an Reibung für die Einheit der Belastung oder $\delta = \frac{1}{7}$ derselben angenommen werden.

Da der Effect einer Maschine unter übrigens gleichen Umständen von der Spannung des Dampfes und der Menge des in der Zeiteinheit verdampften Wassers abhängt, so kommt es zunächst darauf an, letztere oder den Werth von N zu finden. Zu dem Ende nehme man vorläufig an, die Maschine arbeite mit der zu ihrem größten Nutzeffecte gehörigen Geschwindigkeit ohne irgend ein Gegengewicht, und setze also in Gleichung 4, litr. D, die Größe $\Delta = 0$, so erhält man nach einer kleinen Umformung:

$$N = \frac{E(1+\delta)(168{,}3+P)}{7585671(P-p-f)},$$

und wenn die vorhin angegebenen Werthe substituirt werden:

$$N = \frac{\frac{8}{8}\cdot 6\cdot 30600\,(168{,}3+7200)}{7585671\,(7200-500-225)} = 0{,}0\,347\ldots \text{ Kubikfuß.}$$

Da dieser Werth von N aber nach einer Gleichung berechnet ist, welche die vortheilhafteste Geschwindigkeit voraussetzt, so muß zu Erreichung desselben Effects bei einer größern Geschwindigkeit eine größere Quantität Wasser verdampfen. Man setze demnach N vorläufig $= 6{,}036$, und führe in Gleichung 3, litr. B, diesen Werth ein, nachdem darin $\Delta = 0$ angenommen und die bekannten Werthe der übrigen Größen substituirt sind, so erhält man:

$$a = \frac{7585671\cdot 0{,}036 - \frac{8}{7}\cdot 6\cdot 30600}{150\,(168{,}3+500+225)} = 0{,}47\,\square'.$$

Da es augenblicklich noch nicht beurtheilt werden kann, ob ein Gegengewicht, welches den Effect nothwendig verringern muß, erforderlich ist oder nicht, es auch ferner zweckmäßig ist, die Maschine stärker zu bauen als die gewöhnlich von ihr zu verrichtende Arbeit erheischt, damit solche noch zufällig eintretende Hindernisse überwinden kann, so wird hier N zu 0,04 Kubikfuß und a zu 0,5 □′ anzunehmen sein. Was endlich die Hublänge betrifft, so ist solche, theoretisch betrachtet, ohne allen Einfluß auf den Effect der Maschine, und man bestimmt solche am richtigsten nach dem Durchmesser des Cylinders, nach der Constructions-Art und nach dem besondern Gebrauche der Maschine.

Zunächst wäre nun zu untersuchen, ob ein Gegengewicht erforderlich ist oder nicht. Man setze zu dem Ende in Gleichung 6, litr. B, die entsprechenden Werthe, so erhält solche nach gehöriger Reduction folgende Form:

$$\log.\text{nat.}\ \frac{0{,}5 + 21\,A}{A + 10{,}5} - 0{,}314644 \cdot A = 0{,}637736.$$

Sucht man von diesem Ausdrucke in Bezug auf die veränderliche Größe A das Maximum, so findet man, daß dies für A = 2,5311.. eintritt. Hievon kann man sich leicht überzeugen, wenn für verschiedene Werthe von A die Zahlenwerthe der Größen auf der linken Seite des Gleichheitszeichens berechnet werden. Man erhält auf diese Weise

für A = 1	□Fuß den	Werth	des obigen	Ausdruckes	=	0,311061
» A = 1,5	»	»	»	»		0,508863
» A = 2	»	»	»	»		0,594487
» A = 2,52	»	»	»	»		0,612498
» A = 2,3	»	»	»	»		0,614604
» A = 2,5	»	»	»	»		0,618732
» A = 2,5311	»	»	»	»		0,618805
» A = 2,55	»	»	»	»		0,618783
» A = 2,6	»	»	»	»		0,618463
» A = 2,75	»	»	»	»		0,615475
» A = 3	»	»	»	»		0,604418 u. s. w.

Bei den in dem vorliegenden Beispiel gewählten Dimensionen und Verhältnissen giebt es also für A keinen Werth, der der obigen Gleichung Genüge leistet. Es ist demnach unmöglich, daß die in dem obern Cylinder wirksam gewesenen Dämpfe ohne Hülfe eines Gegengewichts die Kolben wieder in die Höhe treiben können, wie es die obige Gleichung voraussetzt. Ist dagegen in besonderen Fällen die Erreichung desselben Effectes beim Aufsteigen der Kolben ohne ein Gegengewicht, und bloß vermittelst des vergrößerten untern Cylinders möglich, so bekommt letzterer gewöhnlich eine so bedeutende Größe, daß die damit verknüpften Nachtheile und Unbequemlichkeiten jene Effect-Vortheile wieder aufheben.

Es erscheint daher in jeder Beziehung natürlicher, die Größe des untern Cylinders in einem zur Größe des obern Cylinders zweckmäßigen Verhältnisse von vorn herein ohne alle Rechnung festzusetzen, und zwar soll für den vorliegenden Fall das Verhältniß von 1 zu 3 angenommen werden. Setzt man also $A = 3a = 3 \cdot 0{,}5 = 1{,}5$ □Fuß und substituirt diesen Werth in Gleichung 5, litr. B, so erhält man folgende Gleichung zur Bestimmung des erforderlichen Gegengewichts:

$$\Delta = \frac{0{,}02}{150}(7585671 - 7964953 \cdot 0{,}98092925) + 668{,}3 \cdot 0{,}25,$$

also $\Delta = 136{,}8623..$ Pfund pro □Fuß Differenz der beiden Kolbenflächen A und a.

Setzt man demnächst diesen Werth in die Gleichung 3 oder 4, litr. B, so erhält man daraus den Effect E, nemlich 188912,3 Pfund in der Minute 1 Fuß gehoben, oder 6,1736 Pferdekräfte.

Nachdem man sich auf diese Weise überzeugt hat, daß die Maschine bei den gewählten Dimensionen und Verhältnissen den gewünschten Nutzeffect haben wird, setze man die Zahlenwerthe aller nun bekannten Größen successive in die Gleichungen litr. A, B, C und D, und berechne sowohl für die vorgeschriebene, als auch für die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Geschwindigkeit und eben so für eine beliebig angenommene Expansion die entsprechenden Effecte, wodurch man eine klare Uebersicht von den möglichen Leistungen der Maschine erhält.

	Für 150 Fuß Geschwindigkeit und eine beliebig angenommene Expansion im kleinen Cylinder	Für die vorgeschriebene Kolbengeschwindigkeit von 150 Fuß und ohne Expansion im kleinen Cylinder	Für den größten Nutzeffect und eine gegebene Expansion im kleinen Cylinder	Für den größten Nutzeffect ohne Anwendung von Expansion im kleinen Cylinder
	nach den Gleichungen			
	A.	B.	C.	D.
Die Geschwindigkeit der Kolben in Fußen in der Minute	150	150	93,99	82,36
Expansion im kleinen Cylinder, oder Werth des Bruches $\frac{\lambda}{1}$	0,87	1	0,87	1
Druck der Nutzlast auf den kleinen Kolben in Pfunden	1375,98	1259,41	2515,91	2734,76
Nutzeffect, oder Zahl der Pfunde in der Minute 1 Fuß gehoben	206397	188912	236471	225235
Nutzeffect in Pferdekräften	6,74	6,17	7,72	7,36
Verdampfte Wassermenge in der Minute in Kubikfußen	0,04	0,04	0,04	0,04
Effect von einem Kubikfuß verdampften Wassers in Pferdekräften	168,5	154,2	193,0	184,0
Das zum gleichförmigen Gange der Maschine erforderliche Gewicht in Pfunden	270,08...	136,86...	331,45...	112,05...

Berechnet man nach der Gleichung XXIV das für den gleichförmigen Gang der Maschine erforderliche Gegengewicht, wenn solche leer geht, also ihr Nutzeffect gleich Null ist, so ergiebt sich dieses für die angenommene Expansion von 0,87 im kleinen Cylinder zu 195,99 Pfund und die dazu gehörige größtmögliche Geschwindigkeit der Kolben in der Minute nach Gleichung XXII oder XXIII zu 534,34..

Fuß, während die kleinste Geschwindigkeit nach Spalte 3 der obigen Tabelle = 93,99 Fuß, und das dazu gehörige Gegengewicht = 331,45 Pfund beträgt. Wird dagegen von der Expansion im kleinen Cylinder kein Gebrauch gemacht, so ist für obige Annahme das Gegengewicht 158,04 Pfund, und die dazu gehörige größte Kolbengeschwindigkeit = 501,78 Fuß, während die correspondirende kleinste Geschwindigkeit nach Spalte 4 der obigen Tabelle 82,36 Fuß, und das dazu gehörige Gegengewicht 112,05 Pfund beträgt.

Sowohl die allgemeinen Gleichungen, als auch die vorigen numerischen Berechnungen zeigen, daß für die gleichförmige Kolbenbewegung, selbst bei constanter Verdampfung im Kessel, die Größe des Gegengewichts von der Geschwindigkeit und dem Grade der angewendeten Expansion abhängt. Soll also während des Betriebes, wo sich in Folge der nachlässigen Unterhaltung des Feuers, oder der verschiedenen Güte des Brennmaterials die Verdampfungskraft des Kessels oder die zu bewegende Last selbst momentan bedeutend ändert — wie es z. B. bei Pumpwerken der Fall ist — die Bewegung gleichförmig bleiben, so muß die Wirkung des Gegengewichts demgemäß stets geregelt werden, und es ist mithin zweckmäßig, dasselbe so mit dem Balancier zu verbinden, daß es während des Ganges bequem der Balancier-Achse mehr genähert oder davon entfernt werden kann.

Theorie
der
einfach wirkenden Dampfmaschinen mit Gegengewichten, aber ohne Schwungrad.

In den einfach wirkenden, sogenannten Wasserhebungsmaschinen ohne Schwungrad wird bloß der Niedergang des Kolbens durch die Kraft des Dampfes bewirkt, so daß während seines Aufsteigens keine Verbindung zwischen dem Dampfkessel und Cylinder statt findet. Die Wirkungsart des Dampfes in diesen Maschinen ist nun folgende:

Angenommen, der Kolben habe seinen höchsten Stand erreicht und sei im Heruntergehen begriffen, so steht der Cylinderraum oberhalb des Kolbens mit dem Dampfkessel, und der Raum unterhalb desselben mit dem Condensator in Verbindung. Nachdem der Kolben einen Theil seines Weges zurückgelegt hat, wird die Verbindung zwischen dem Kessel und Cylinder aufgehoben, so daß von hier an der Kolben bloß vermöge der Expansion des Dampfes bis zu seinem tiefsten Stande getrieben wird.

Kurz vorher, ehe dieser tiefste Stand erreicht wird, wird die Verbindung zwischen dem untern Theile des Cylinders und dem Condensator aufgehoben, dagegen durch Oeffnen des Gleichgewichtsventils die Communikation zwischen den Cylinderräumen ober- und unterhalb des Kolbens herstellt, so daß beide Flächen desselben nunmehr gleichen Druck erleiden, und mithin die Wirkungen sich gegenseitig aufheben. Die Bewegung des Kolbens, welche schon durch die Anwendung der Expansion eine verzögerte geworden ist, wird alsdann durch den bis zum tiefsten Kolbenstande thätigen Belastungswiderstand gänzlich vernichtet. Der Kolben ist also in seinem tiefsten Stande vollständig in Ruhe gekommen, und da kein neuer Dampf gegen die untere Fläche desselben wirkt, auch kein Schwungrad da ist, welches vermöge seiner Trägheit die Bewegung fortsetzen könnte, so müßte die Maschine in Ruhe bleiben, wenn nicht der Kolben durch ein am andern Ende des Balanciers angebrachtes Gegengewicht, welches beim Niedergehen desselben gehoben wird, wieder in die Höhe gezogen würde.

Während der aufsteigenden Bewegung des Kolbens, wo außer der eigentlichen Reibung der Maschine kein Widerstand zu überwinden ist, bleibt die Stellung der Ventile dieselbe, wie sie bei seinem tiefsten Stande war, so daß die Räume ober- und unterhalb des Kolbens stets mit einander communiciren. Hat der Kolben beinahe den höchsten Stand erreicht, so schließt sich das Gleichgewichtsventil, und in Folge dessen wird der Dampf oberhalb des Kolbens zusammengepreßt, und seine Expansivkraft vergrößert; dagegen findet bei dem Dampfe unterhalb desselben das Entgegengesetzte statt. Endlich im höchsten Stande des Kolbens, wenn die Expansivkraft des zusammengepreßten Dampfes, die dem Kolben durch das Gegengewicht mitgetheilte aufsteigende Bewegung ganz vernichtet hat, tritt der untere Theil des Cylinders wieder mit dem Condensator und der obere Theil desselben mit dem Kessel in Verbindung, worauf dasselbe Spiel der Maschine abermals beginnt. Die Bewegung der Maschine ist also weder stetig noch gleichförmig.

Durch die vorhin beschriebene Art der Steuerung, nemlich durch das Verschließen des Gleichgewichtsventils, bevor der Kolben den höchsten, und durch das Oeffnen desselben, noch ehe derselbe den tiefsten Stand erreicht hat, wird bewirkt, daß der Kolben zu Ende eines jeden Hubes nach und nach, und ohne einen Stoß gegen den Boden oder Deckel auszuüben, in Ruhe kommt, wodurch zugleich jeder Kraftverlust und jede Beschädigung der Maschine vermieden wird.

Die Wirksamkeit des Gegengewichts ist, allgemein genommen, dieselbe, wie die eines Schwungrades; beim Niedergehen des Kolbens, wobei nur der Nutzeffekt hervorgebracht wird, absorbirt dasselbe nemlich einen Theil der Kraft der Maschine, um bei der aufsteigenden Bewegung, wo kein Dampf wirksam ist, diese Kraft der Maschine wieder mitzutheilen. Die Geschwindigkeit, welche dem Kolben durch dieses Gegengewicht ertheilt wird, ist aber offenbar von der Schwere desselben und der Größe der Reibung, welche es überwinden muß, abhängig, während die Geschwindigkeit beim Kolbenniedergange durch andere Umstände bedingt wird, und von der vorigen ganz verschieden sein kann. Da jedoch die Anzahl der Doppelhübe in der Minute unter übrigens gleichen Umständen stets dieselbe bleibt, und während eines Doppelhubes die zu bewegende Last um eine Hubhöhe gehoben wird, so braucht die Geschwindigkeit dieser beiden, abwechselnd nach entgegengesetzter Richtung statt findenden Kolbenbewegungen nicht besonders bestimmt zu werden, sondern es bedarf zur Effekts-Berechnung nur der daraus resultirenden mittleren Geschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit des Kolbens bei seiner aufsteigenden Bewegung ist, wie oben bereits erwähnt wurde, für ein und dieselbe Maschine und für ein bestimmtes Gegengewicht constant, und da aus dieser Geschwindigkeit und der des niedergehenden Kolbens die mittlere Geschwindigkeit resultirt, so muß letztere genau durch die Geschwindigkeit des niedergehenden Kolbens, und diese hinwieder durch die Verdampfungskraft des Kessels bestimmt werden.

Kann demnach der Kessel den Cylinder in der Minute x mal mit Dampf füllen, so finden auch in der Minute x Doppelhübe statt. Wird das Gegengewicht kleiner angenommen, und ist in Folge dessen die aufsteigende Bewegung des Kolbens langsamer, so erfolgt das Ueberströmen des Dampfes in den Cylinder, welches nur beim Niedergehen des Kolbens statt findet, nach längeren Zeitintervallen. Da aber der Kessel in der Minute dieselbe Menge Wasser verdampft, so muß sich der Dampf im Kessel anhäufen und dann also den Kolben um so schneller herabdrücken. Wird dagegen das Gegengewicht größer angenommen, so ist natürlich die dadurch bewirkte aufsteigende Bewegung des Kolbens schneller; und da alsdann die Dampfabflüsse in den Cylinder rascher aufeinander folgen, so kann kein so bedeutendes Anhäufen des Dampfes im Kessel mehr statt finden, und der Kolben wird also mit geringerer Geschwindigkeit abwärts getrieben. Die Geschwindigkeiten beim Auf- und Niedergange des Kolbens stehen also zu einander im umgekehrten Verhältnisse, wobei jedoch vorausgesetzt wird, daß während der aufsteigenden Kolbenbewegung kein Dampf durch das Sicherheitsventil entweichen kann.

Zur Berechnung der in Rede stehenden Maschinen ist es nöthig, die Kraft und den nach entgegengesetzter Richtung wirkenden Widerstand, sowohl für die aufsteigende als niedergehende Bewegung des Kolbens, durch besondere Gleichungen festzustellen, und alsdann giebt die Bedingung, daß das erzeugte Dampfquantum dem consumirten gleich sein muß, eine dritte Gleichung, woraus sich die mittlere Geschwindigkeit der Maschine berechnen läßt.

Bei den doppelt wirkenden, mit einem Schwungrade versehenen Dampfmaschinen, welche früher untersucht worden sind, trat zu Anfang der Kolbenbewegung der Dampf in den Cylinder mit derselben Spannkraft, welche er im Kessel hatte. Da aber die bei jedem Hube dem Kolben ertheilten Impulse, vermöge der Trägheit des Schwungrades und der übrigen bewegten Massen, auf den folgenden Hub übertragen wurden, so nahm die Geschwindigkeit des Kolbens allmälig zu, die Spannung des in den Cylinder strömenden Dampfes dagegen so lange ab, bis diese dem gegen die andere Seite des Kolbens wirkenden Widerstande gleich, und demnach die Bewegung der Maschine eine gleichförmige wurde.

Bei den in Rede stehenden, einfach wirkenden Dampfmaschinen ohne Schwungrad sind aber die Verhältnisse ganz anderer Art. Denn da der Kolben am Ende eines jeden Hubes vollständig zur Ruhe kommt, so kann von einer Uebertragung der Kraft von einem Hube auf den folgenden nicht mehr die Rede sein. Der in den Cylinder strömende Dampf findet vielmehr den Kolben stets in Ruhe, und mithin kann zwischen der Dampfspannung im Cylinder und der im Kessel kein Unterschied mehr statt finden, wenn man den wegen Ueberwindung der Reibung in den Leitungsröhren verursachten Kraftverlust unberücksichtigt läßt.

Entwickelung der allgemeinen Gleichungen.

Es sei P der Dampfdruck im Kessel auf den Quadratfuß in Pfunden; l die Länge des Hubes in Fußen; λ der von dem Kolben bis zur Dampfabsperrung durchlaufene Weg in Fußen; a die Kolbenfläche in Quadratfußen; s der freie Raum des Cylinders, der bei jedem Hube nutzlos mit Dampf angefüllt wird; n und m seien Constanten, deren Bedeutungen und Werthe im ersten Kapitel angegeben sind.

A. Wirkung beim Niedergange des Kolbens.

Nach der Gleichung 1 im vierten Kapitel ist die Wirkung beim Niedergange des Kolbens:

$$\mathrm{Ral} = a(\lambda + s)\left(\frac{n}{m} + P\right)\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right] - \frac{n}{m}al,$$

wenn der Totalwiderstand pro Quadratfuß Kolbenfläche mit R bezeichnet wird.

Dieser Widerstand R besteht aus folgenden Theilen:

1) aus dem eigentlichen Belastungswiderstande . . . . $= Q$.
2) » » Reibungswiderstande der unbelasteten Maschine . . . . $= f$.
3) » » Zuwachs an Reibung für die Einheit der Belastung. . . . . . . $= \delta$.
4) » » Gegendrucke der unvollkommen condensirten Dämpfe . . . . $= p$.
und 5) » » von dem Gegengewichte herrührenden Widerstande, ebenfalls auf den Quadratfuß Kolbenfläche bezogen . . . . $= \Delta$.

Die vorige Gleichung erhält also jetzt folgende Gestalt:

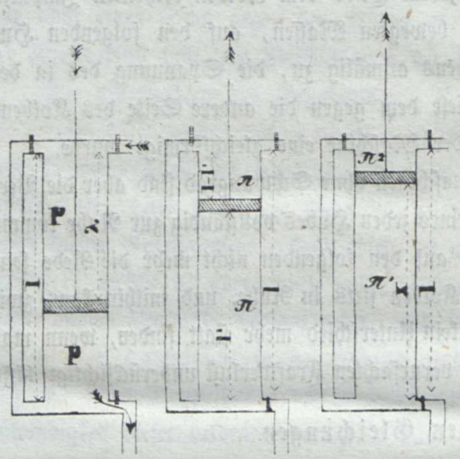
$$\text{I.}\quad \frac{\lambda + s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right] = \frac{\frac{n}{m} + Q(1 + \delta) + p + f + \Delta}{\frac{n}{m} + P}.$$

B. Wirkung beim Aufsteigen des Kolbens.

Der Dampf von der Spannung P, welcher beim Niedergehen des Kolbens den Cylinderraum von der Länge $(\lambda + s)$ füllte, hat beim Aufsteigen desselben den ganzen Cylinderraum mit Einschluß der beiden freien Räume, also überhaupt den Raum $a(l + 2s)$ eingenommen, und ist bei dieser Ausdehnung von der Spannung P zu der von π übergegangen, welche letztere nach der Gleichung IV im IV Kapitel durch:

$$\pi = \frac{\lambda + s}{l + 2s}\left[\frac{n}{m} + P\right] - \frac{n}{m}$$

ausgedrückt werden kann.



Die Dampfspannungen π oberhalb und unterhalb des Kolbens bleiben bei der aufsteigenden Bewegung so lange einander gleich, bis nach Durchlaufung des Weges l' das Verbindungsventil verschlossen, und also der Dampf oberhalb des Kolbens zusammengepreßt, der unterhalb desselben dagegen mehr und mehr ausgedehnt wird.

In irgend einem Punkte zwischen l und l', dessen Entfernung vom tiefsten Kolbenstande mit x bezeichnet werden soll, sei die Dampfspannung oberhalb des Kolbens $= \pi_2$ und unterhalb $= \pi_1$, dann ist der Druck auf die obere Kolbenfläche $= \pi_2 - \pi_1$, und wenn sich der Kolben dann noch um eine unendlich kleine Länge dx weiter bewegt, so ist die Wirkung während derselben $= (\pi_2 - \pi_1)\,adx$.

Da sich aber die Spannungen aus den dazu gehörigen Volumen nach Gleichung IV. im vierten Kapitel bestimmen lassen, und im Punkte l' die Spannungen zu beiden Seiten des Kolbens einander gleich, nämlich $= \pi$ waren, so hat man:

$$\pi_2 = \left(\frac{n}{m} + \pi\right) \cdot \frac{l - l' + s}{l - x + s} - \frac{n}{m}, \text{ und}$$

$$\pi_1 = \left(\frac{n}{m} + \pi\right) \cdot \frac{l' + s}{x + s} - \frac{n}{m}; \text{ also:}$$

$$(\pi_2 - \pi_1)\,adx = \left(\frac{n}{m} + \pi\right)\left[\frac{l - l' + s}{l - x + s} - \frac{l' + s}{x + s}\right]adx.$$

Der nachstehende Ausdruck:

$$a\left(\frac{n}{m} + \pi\right)\left[(l - l' + s)\int\frac{dx}{l + s - x} - (l' + s)\int\frac{dx}{x + s}\right]$$

giebt also, zwischen den Grenzen $x = l'$ und $x = l$ integrirt, den durch die Zusammendrückung des Dampfes oberhalb des Kolbens verursachten Widerstand. Führt man diese Integration wirklich aus, so entsteht:

$$a\left(\frac{n}{m} + \pi\right)\left[(l - l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l + s - l'}{s} - (l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l + s}{l' + s}\right];$$

oder wenn man für π den früher entwickelten Werth setzt:

$$a\,\frac{\lambda + s}{l + 2s}\left(\frac{n}{m} + P\right)\left[(l - l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l - l' + s}{s} - (l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l + s}{l' + s}\right].$$

Beim Aufsteigen des Kolbens ist das Gegengewicht Δ die bewegende Kraft, also die Wirkung davon während eines Kolbenhubes $= al\Delta$.

Die Reibung der unbelasteten Maschine beim Aufsteigen des Kolbens, die von der beim Niedergange desselben verschieden sein mag, betrage pro Quadratfuß Kolbenfläche f′ Pfund; also die Wirkung davon während eines Hubes = alf′.

Zwischen Kraft und Widerstand muß demnach folgende Gleichung bestehen:

$$\Delta l = f'l + \frac{\lambda + s}{l + 2s}\left(\frac{n}{m} + P\right)\left[(l - l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l - l' + s}{s} - (l' + s)\,\text{log. nat.}\,\frac{l + s}{l' + s}\right].$$

Oder auch:

$$\text{II.}\quad \frac{l - l' + s}{l}\,\text{log. nat.}\,\frac{l - l' + s}{s} - \frac{l' + s}{l}\,\text{log. nat.}\,\frac{l + s}{l' + s} = \frac{l + 2s}{\lambda + s} \cdot \frac{\Delta - f'}{\frac{n}{m} + P}.$$

C. Ausdruck der Gleichheit zwischen dem erzeugten und consumirten Dampfquantum.

Hat der Kolben bei seiner aufsteigenden Bewegung den Weg l' zurückgelegt, so wird bekanntlich das Gleichgewichtsventil geschlossen, und demnächst der unterhalb des Kolbens befindliche Dampf condensirt, der also auch nur als wirklich verbraucht in Rechnung gebracht werden darf, während der Dampf oberhalb des Kolbens bei dem folgenden Hube wieder benutzt wird. Das Volumen des bei jedem Hube verbrauchten Dampfes ist also $= a(l' + s)$, und seine Spannung, wie bereits bestimmt worden,

$$\pi = \frac{\lambda + s}{l + 2s}\left[\frac{n}{m} + P\right] - \frac{n}{m}.$$

Erfolgen in der Minute z Kolbenniedergänge, so ist die mittlere Geschwindigkeit 2zl. Da aber nur während des Niedergangs ein Nutzeffekt ausgeübt wird, so muß auch nur die mittlere Geschwindigkeit in Rechnung gebracht werden, und wenn diese mit c bezeichnet wird, so ist demnach $c = zl$; also $z = \frac{c}{l}$.

Das verbrauchte Dampfvolumen pro Minute ist also $= \frac{ac}{l}(l' + s)$.

Werden in der Minute N Kubikfuß Wasser verdampft, so entstehen daraus unter dem Drucke P, (nach dem ersten Kapitel) $\frac{N}{n + mP}$ Kubikfuß Dampf. Geht aber dieser Druck P zu dem von π über, so ist das Dampfvolumen nach derselben Formel $= \frac{N}{n + m\pi}$ Kubikfuß. Es muß also die Gleichung bestehen:

$$\frac{ac}{l}(l' + s) = \frac{N}{n + m\pi},$$

und daraus folgt

$$c = \frac{lN}{a(l' + s)(n + m\pi)};$$

oder, wenn für π der vorige Werth gesetzt und die Gleichung gehörig reducirt wird,

$$\text{III.}\quad c = \frac{Nl(l + 2s)}{a(l' + s)(\lambda + s)(n + mP)}.$$

Wird die vorige Gleichung (I) in Bezug auf die Größe Q aufgelöst, und demnächst auf beiden Seiten mit a multiplicirt, so erhält man

$$\text{IV.}\quad aQ = \frac{a}{1 + \delta}\left[\frac{\lambda + s}{l}\left(\frac{\lambda}{\lambda + s} + \text{log. nat.}\,\frac{l + s}{\lambda + s}\right)\left(\frac{n}{m} + P\right) - \left(\frac{n}{m} + p + f + \Delta\right)\right].$$

Entwickelt man aus der Gleichung III. die Größe N, so entsteht:

$$\text{V.}\quad N = \frac{ca(l' + s)(\lambda + s)(n + mP)}{l(l + 2s)}.$$

Durch Multiplikation der beiden Gleichungen III. und IV. erhält man den Ausdruck für den Nutzeffekt E:

$$\text{VI.}\quad E = acQ.$$

Verbände man die Gleichungen I, II und III mit einander, so würde man eine directe Relation zwischen der Geschwindigkeit und Belastung erhalten. Da aber in den beiden ersten Gleichungen die Größen auf der linken Seite des Gleichheitszeichens eine directe Elimination nicht gestatten, so muß für den praktischen Gebrauch folgende Rechnungsmethode angewendet werden.

Ist z. B. für eine, übrigens bekannte, Maschine die Belastung Q pro □Fuß Kolbenfläche gegeben, und man soll die correspondirende Geschwindigkeit bestimmen, so berechne man zuerst in Gleichung I den Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$, nehme dann aus der folgenden Tafel I den dazu gehörigen Werth von $\frac{\lambda}{l}$, setze diesen in Gleichung II, und berechne danach den Werth von

$$\frac{l-l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s}-\frac{l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l'+s}{l}.$$

Der dazu gehörige Werth von $\frac{l'}{l}$ ist unmittelbar aus der Tafel II zu entnehmen, und wenn man dann endlich die beiden Werthe von $\frac{\lambda}{l}$ und $\frac{l'}{l}$ in Gleichung III einführt, so ergiebt sich daraus die gesuchte Geschwindigkeit c.

Ist dagegen die Geschwindigkeit c gegeben und die Belastung aQ soll daraus bestimmt werden, so eliminire man zuerst aus Gleichung II den Werth von $\frac{l+2s}{\lambda+s}$, nemlich:

$$\frac{l+2s}{\lambda+s}=\left[\frac{l-l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s}-\frac{l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}\right]\cdot\frac{\frac{n}{m}+P}{\Delta-f'},$$

und setze diesen in Gleichung III, so entsteht nach gehöriger Reduktion:

$$\frac{mac(\Delta-f')}{N}=\left[\frac{l-l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s}-\frac{l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}\right]\frac{l}{l'+s}.$$

Werden nun für m, a, c, Δ, f' und N die Werthe gesetzt, so erhält man den Zahlenwerth des Ausdruckes auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens, und man kann dann sofort aus der Tafel II den dazu gehörigen Werth des Bruches $\frac{l'}{l}$ unmittelbar entnehmen.

Ferner folgt aus Gleichung II:

$$\frac{\lambda+s}{l}=\frac{(l+2s)(\Delta-f')}{l\left(\frac{n}{m}+P\right)\left[\frac{l-l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s}-\frac{l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}\right]}.$$

Da nun hierin auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens alle Größen bekannt sind, weil $\frac{l'}{l}$ vorhin gefunden ist, so läßt sich daraus der Werth von $\frac{\lambda+s}{l}$, also auch von $\frac{\lambda}{l}$ berechnen. Sucht man darauf in Tafel I den dazu gehörigen Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$, und setzt diesen in Gleichung IV, so erhält man daraus die Belastung aQ.

Soll dagegen die Verdampfungskraft einer Maschine bestimmt werden, wenn Belastung und Geschwindigkeit gegeben sind, so berechne man zuerst nach der Gleichung I den Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{ nat. }\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$, und die Tafel I giebt dann unmittelbar den dazu gehörigen Werth von $\frac{\lambda}{l}$.

Darauf berechne man nach Gleichung II den Werth von $\frac{l-l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s}-\frac{l'+s}{l}\cdot\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}$, und entnehme den dazu gehörigen Werth von $\frac{l'}{l}$ aus Tafel II. Endlich setze man diese Werthe von $\frac{\lambda}{l}$ und $\frac{l'}{l}$ in Gleichung V, so ist daraus unmittelbar N zu bestimmen.

Wäre für eine gegebene Belastung aQ der Nutzeffekt zu bestimmen, so sucht man zuerst nach der vorhin angegebenen Methode die dazu gehörige Geschwindigkeit c; ist aber nur die Geschwindigkeit c bekannt, so wird zuerst die dazu gehörige Belastung aQ berechnet. In beiden Fällen giebt endlich das Product acQ den gesuchten Effect.

In den meisten Fällen ist die Expansion, womit die Maschine arbeiten soll, vorher bestimmt, also auch der Bruch $\frac{\lambda}{l}$ gegeben; alsdann läßt sich aus der Gleichung I unmittelbar die Belastung pro Quadratfuß Kolbenfläche, oder der Werth von Q bestimmen, und daraus, wie vorhin schon gezeigt wurde, die Geschwindigkeit c ableiten.

Maximum des Nutzeffectes.

In dem Vorhergehenden wurde das Gegengewicht als gegeben angenommen, und danach für beliebige Geschwindigkeiten oder Belastungen die Effecte bestimmt. Läßt man nun bei einer und derselben Maschine das Gegengewicht unverändert, und dagegen die Belastung variiren, so wird sowohl die Geschwindigkeit, als auch der Effect andere Werthe erhalten, und es muß nothwendig eine Belastung existiren, welche den Nutzeffect zu einem Maximum macht. Multiplicirt man die Gleichung III für c mit der Belastung aQ, so erhält man bekanntlich den Effect:

$$E = acQ = \frac{Nl(l+2s)Q}{(l'+s)(\lambda+s)(n+mP)}.$$

In dieser Gleichung müßten nun für λ und l′ die Werthe aus den Gleichungen I und II substituirt werden, um den Effect unmittelbar als Function der Belastung auszudrücken, und alsdann wäre in bekannter Art für Q derjenige Werth zu suchen, welcher den Nutzeffect zu einem Maximum macht. Da aber diese Gleichungen von der Art sind, daß sich die Größen λ und l′ nicht direct daraus ableiten lassen, so ist in dem vorliegenden Fall dieses Verfahren nicht anwendbar, und es bleibt nur übrig, durch Versuchs-Rechnungen das Maximum zu bestimmen.

Auf dieselben Schwierigkeiten stößt man, wenn unter allen Gegengewichten dasjenige gesucht werden soll, welches den größten, also den absolutgrößten Nutzeffect gewährt, und man muß auch hierbei zu Proberechnungen seine Zuflucht nehmen.

In den folgenden Tafeln ist der Spielraum s im Cylinder mit Einschluß der angränzenden Durchgänge zu $\frac{1}{10}$ des Kolbenhubes angenommen, indem dieses Verhältniß in der That bei allen einfach wirkenden Wasserhebungs-Maschinen ohne Schwungrad in Anwendung gebracht wird.

Tafel I.

welche sich auf den Niedergang des Kolbens bezieht.

Werth des Bruches $\frac{\lambda}{l}$	Zugehöriger Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$	Werth des Bruches $\frac{\lambda}{l}$	Zugehöriger Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$	Werth des Bruches $\frac{\lambda}{l}$	Zugehöriger Werth von $\frac{\lambda+s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda+s}+\log.\text{nat.}\frac{l+s}{\lambda+s}\right]$
0,01	0,263	0,33	0,734	0,65	0,937
0,02	0,286	0,34	0,743	0,66	0,941
0,03	0,308	0,35	0,752	0,67	0,945
0,04	0,329	0,36	0,761	0,68	0,949
0,05	0,349	0,37	0,770	0,69	0,952
0,06	0,368	0,38	0,778	0,70	0,955
0,07	0,387	0,39	0,786	0,71	0,958
0,08	0,406	0,40	0,794	0,72	0,961
0,09	0,424	0,41	0,802	0,73	0,964
0,10	0,441	0,42	0,810	0,74	0,967
0,11	0,458	0,43	0,817	0,75	0,970
0,12	0,474	0,44	0,824	0,76	0,973
0,13	0,490	0,45	0,831	0,77	0,975
0,14	0,505	0,46	0,838	0,78	0,977
0,15	0,520	0,47	0,845	0,79	0,979
0,16	0,535	0,48	0,851	0,80	0,981
0,17	0,549	0,49	0,857	0,81	0,983
0,18	0,563	0,50	0,863	0,82	0,985
0,19	0,577	0,51	0,869	0,83	0,987
0,20	0,590	0,52	0,875	0,84	0,989
0,21	0,603	0,53	0,881	0,85	0,990
0,22	0,615	0,54	0,887	0,86	0,991
0,23	0,627	0,55	0,892	0,87	0,992
0,24	0,639	0,56	0,897	0,88	0,993
0,25	0,651	0,57	0,902	0,89	0,994
0,26	0,662	0,58	0,907	0,90	0,995
0,27	0,673	0,59	0,912	0,91	0,996
0,28	0,684	0,60	0,917	0,92	0,997
0,29	0,694	0,61	0,921	0,93	0,998
0,30	0,704	0,62	0,925	0,94	0,999
0,31	0,714	0,63	0,929	0,95	0,999
0,32	0,724	0,64	0,933		

Tafel II.

für die aufsteigende Bewegung des Kolbens.

Werth von $\frac{l'}{l}$	Zugehöriger Werth von $\frac{l-l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s} - \frac{l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}$	Zugehöriger Werth von $\left[\frac{l-l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s} - \frac{l'+s}{l}\log.\text{n.}\frac{l+s}{l'+s}\right]\frac{1}{l'+s}$	Werth von $\frac{l'}{l}$	Zugehöriger Werth von $\frac{l-l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s} - \frac{l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l+s}{l'+s}$	Zugehöriger Werth von $\left[\frac{l-l'+s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l-l'+s}{s} - \frac{l'+s}{l}\log.\text{n.}\frac{l+s}{l'+s}\right]\frac{1}{l'+s}$
0,50	0,711	1,186	0,73	0,250	0,301
0,51	0,687	1,127	0,74	0,234	0,279
0,52	0,664	1,072	0,75	0,219	0,258
0,53	0,641	1,017	0,76	0,205	0,238
0,54	0,618	0,966	0,77	0,190	0,218
0,55	0,595	0,916	0,78	0,176	0,200
0,56	0,573	0,869	0,79	0,162	0,182
0,57	0,551	0,823	0,80	0,149	0,165
0,58	0,530	0,780	0,81	0,136	0,149
0,59	0,509	0,738	0,82	0,123	0,134
0,60	0,488	0,698	0,83	0,112	0,120
0,61	0,468	0,659	0,84	0,101	0,107
0,62	0,448	0,622	0,85	0,089	0,094
0,63	0,428	0,586	0,86	0,079	0,083
0,64	0,409	0,552	0,87	0,069	0,072
0,65	0,390	0,519	0,88	0,060	0,061
0,66	0,371	0,488	0,89	0,052	0,052
0,67	0,352	0,458	0,90	0,044	0,044
0,68	0,334	0,429	0,91	0,036	0,036
0,69	0,317	0,401	0,92	0,029	0,029
0,70	0,300	0,375	0,93	0,023	0,023
0,71	0,283	0,349	0,94	0,017	0,017
0,72	0,266	0,325	0,95	0,012	0,012

Anwendung der allgemeinen Formeln auf einfach wirkende Maschinen ohne Schwungrad.

A. Einfach wirkende Watt'sche Dampfmaschinen.

In diesen Maschinen beträgt der Dampfdruck im Kessel auf den Quadratfuß gewöhnlich 2400 bis 2600 Pfd., d. h. die Spannung ist ungefähr dieselbe, wie in den doppelt wirkenden Watt'schen Maschinen.

Der Gegendruck der unvollkommen condensirten Dämpfe oder der Werth von p kann ebenfalls, wie in den doppeltwirkenden Watt'schen Maschinen zu 592 Pfund auf den Quadratfuß Kolbenfläche angenommen werden.

Die Reibung der unbelasteten Maschine betrug bei den doppeltwirkenden Maschinen von Watt = 74 Pfund pro □Fuß Kolbenfläche für Cylinder von circa 47 Zoll Durchmesser. Da nun in den einfachwirkenden Maschinen behufs Anwendung einer zweckmäßigen Expansion solche Cylinder nur zu denen von mittlerer Größe gehören, so kann der Werth der Reibung eben so groß angenommen werden, und es wird also $f = f' = 74$ Pfund gesetzt. — Die Zunahme der Reibung für die Belastung wird ebenfalls wie früher zu $\frac{1}{7}$ der letztern, also $\delta = 0{,}14$ angenommen.

Diese Werthe von f, f' und δ müssen aber jedesmal durch directe Versuche bestimmt werden, indem die vorhin angegebenen nur beispielsweise angenommen sind.

Endlich haben die Größen n und m nach dem ersten Kapitel bezüglich die Werthe $0{,}00004227$ und $0{,}0000002511$.

Führt man demnach bloß die Werthe von n und m in die vorigen Formeln ein, und bestimmt die Größen p, f, f' und δ für jeden vorkommenden Fall besonders, so erhält man folgende praktische Formeln:

a) Für den Kolbenniedergang:

$$\frac{\lambda + s}{l}\left[\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right] = \frac{168{,}3 + (1 + \delta)Q + p + f + \Delta}{168{,}3 + P}.$$

b) Für die aufsteigende Bewegung des Kolbens:

$$\frac{l - l' + s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l - l' + s}{s} - \frac{l' + s}{l}\log.\text{nat.}\frac{l + s}{l' + s} = \frac{l + 2s}{\lambda + s}\cdot\frac{\Delta - f'}{168{,}3 + P}.$$

c) Belastung des Kolbens in Pfunden:

$$aQ = \frac{a}{1 + \delta}\left[\frac{\lambda + s}{l}\left(\frac{\lambda}{\lambda + s} + \log.\text{nat.}\frac{l + s}{\lambda + s}\right)(168{,}3 + P) - (168{,}3 + p + f + \Delta)\right].$$

d) Geschwindigkeit des Kolbens in Fußen in der Minute:

$$c = \frac{N}{a}\cdot\frac{l}{\lambda + s}\cdot\frac{l + 2s}{l' + s}\cdot\frac{10000}{0{,}423 + 0{,}0025\,P}.$$

e) Verdampfte Wassermenge in Kubikfußen in der Minute:

$$N = \frac{(l' + s)(\lambda + s)\,ca}{10000\,l(l + 2s)}\cdot(0{,}423 + 0{,}0025\,P).$$

f) Nutzeffect, ausgedrückt in Pfunden in der Minute ein Fuß gehoben:

$$E = acQ.$$

B. Einfach wirkende Cornwall'sche Maschinen.

Die einfach wirkenden Cornwall'schen Maschinen unterscheiden sich nur dadurch von den vorhin berechneten Watt'schen Maschinen, daß bei jenen hochgespannte Dämpfe von circa 7000 bis 9000 Pfund pro Quadratfuß, und gewöhnlich die zum Maximum des Nutzeffectes gehörige Expansion in Anwendung gebracht wird. Die vorigen allgemeinen Formeln bleiben also ganz ungeändert, wenn darin für λ und P die entsprechenden Werthe substituirt werden.