

Dritter Teil.

Sonstige Kraftmaschinen.

Bearbeitet von **E. Brauer,**

Ingenieur und Dozent an der k. technischen Hochschule in Berlin.

(Hierzu Tafel VII und 8 Holzschnitte.)

§ 1. Übersicht. Bei Bauten sind aus den S. 15 erörterten Gründen den ökonomisch arbeitenden Dampfmaschinen gegenüber auch solche Motoren konkurrenzfähig, welche denselben zwar an Billigkeit des Betriebes etwas nachstehen, sie aber an Bequemlichkeit in Aufstellung und Bedienung übertreffen. Letzteres ist der Fall bei den neuerdings auch auf anderen Gebieten, hauptsächlich in den Kleingewerben vorteilhaft eingeführten kalorischen Maschinen oder Heißluftmaschinen (wir nennen sie kurz Luftmaschinen) und den Gasmaschinen, welche, da sie eines Dampfkessels nicht bedürfen, im Betriebe viel gefahrloser sind als Dampfmaschinen, übrigens auch von weniger vollkommen geschulten Wärtern bedient werden können und, was besonders wichtig ist, einer Konzessionsverpflichtung bei der Anlage nicht unterliegen.

Die Gasmaschinen werden vorübergehend nur da angewendet, wo ohnehin schon Gasleitung vorhanden ist, denn die provisorische Anlage einer kleinen Gasanstalt oder einer längeren Leitung würde unrentabel sein. Die Heißluftmaschinen sind in dieser Hinsicht unabhängiger, bedürfen jedoch der Mehrzahl nach geringer Mengen fließenden Kühlwassers.

Windräder, welche zum Wasserheben neuerdings in sehr vollendeten Formen in der Landwirtschaft zur Anwendung gelangen, würden zur Entwässerung von Baugruben bei größeren Bauten recht gut empfohlen werden können, wenn ihre Wirksamkeit etwas zuverlässiger und regelmäßiger wäre. Man ist jetzt eifrig bestrebt, sie zu verbreiten, z. B. auch Windräder mit fahrbaren Gerüsten zu konstruieren.

Die Ausnutzung von größeren Wasserkraften ist in der Regel mit ziemlich bedeutenden Anlagekosten für Gerinnebauten verbunden, auch sind hydraulische Motoren, da sie meist für jeden Fall besonders zu konstruieren sind, nicht in ähnlicher Weise Marktwaren wie die verschiedenen Wärmemotoren; deshalb sind diejenigen Fälle, in denen die Anlage hydraulischer Motoren für Bauten vorteilhaft ist, ziemlich selten, ja sie dürften vorläufig auf einige große Tunnelbauten beschränkt sein, bei denen die Kraft von Turbinen oder Wasserrädern an einem Orte für mehrere Jahre gebraucht wird. Die disponible Arbeitsstärke (Intensität) einer Wasserkraft wird durch das Produkt aus Wassermenge pro Sekunde und Gefällhöhe gemessen. Da nun die Anlagekosten eines Wassermotors samt Gerinne im allgemeinen vorwiegend mit dem sekundlichen Zufluss steigen, so wird es noch eher rentabel

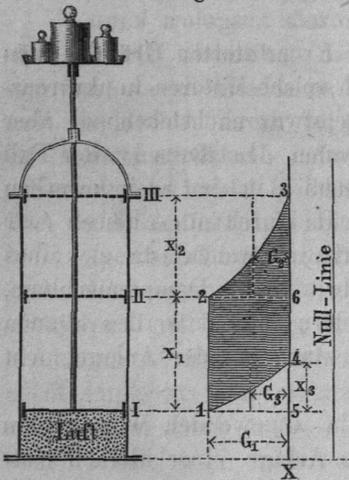
sein, Wasserläufe mit sehr hohem Gefälle (Gebirgsbäche) für Bauzwecke nutzbar zu machen, als wenig fallende Gewässer der Ebene mit großen Wassermassen.

Die Benutzung der elektrischen Motoren zum Betrieb von Baumaschinen befindet sich zur Zeit in dem Stadium intensiver Versuche, welche nicht aussichtslos zu sein scheinen; vergl. das Kapitel: „Verwendung der Elektrizität im Bauwesen“ in der zweiten Abteilung dieses Bandes.

a. Luftmaschinen.

§ 2. Die Arbeitsprinzipien der Luftmaschinen. Wird eine Quantität irgend eines permanenten Gases, z. B. atmosphärischer Luft, in einem luftdicht geschlossenen Gefäß erwärmt, so nimmt mit zunehmender Temperatur der innere Druck ebenfalls zu und äußert das Bestreben, das Gefäß zu erweitern. Die Erweiterung kann erfolgen, wenn das Gefäß elastische oder bewegliche Wände hat, z. B. wenn es, wie

Fig. 1.



Figur 1 zeigt, die Gestalt eines Cylinders hat, dessen oberer Boden durch einen auf und ab beweglichen, luftdicht schließenden Kolben gebildet wird. Ist dieser Kolben durch Gewichte G_1 belastet, so muß schon in kaltem Zustande die Luft so stark komprimiert sein, daß ihr Druck auf den Kolben den Gewichten gleich kommt, eine Bewegung desselben kann jedoch erst dann eintreten, wenn infolge von Erwärmung der innere Druck größer ist als die Summe aus dem äußeren Druck auf den Kolben und aus dessen Belastung. Jede infolge des Drucküberschusses stattfindende Bewegung des Kolbens bedingt aber sofort eine Vergrößerung des Gasvolums, mit welcher eine Spannungsverminderung verbunden ist, sodafs schon nach einer ganz geringen Hebung wieder Gleichgewicht eintreten würde,

wenn dasselbe nicht durch weitergeführte Erwärmung abermals gestört würde. Stellt man sich nun vor, daß infolge fortgesetzter Wärmezuführung diese Druckvermehrungen und Ausgleichungen in unendlich kleinen Zeiteilen sich wiederholen, so ist der Erfolg ein allmähliches Heben des Gewichtes G_1 und Vergrößerung des Luftvolumens unter dem konstanten Druck, welcher bereits vor der Erwärmung in dem Gas vorhanden war. Nehmen wir an, daß auf diese Weise der Kolben aus der Stellung I in die punktierte Stellung II gelangt sei, so ist das Gewicht G_1 um ein gewisses Stück x_1 gehoben worden, was eine durch Wärme geleistete Arbeit $G_1 x_1$ darstellt. Hört jetzt die Wärmezuführung (Heizung des Cylinders) auf, so kann eine weitere Hebung des Gewichtes nicht stattfinden, und der Kolben bleibt in dieser Höhe, wenn keine Wärme verloren geht. Vermindert man hierauf die Kolbenbelastung durch Wegnahme eines Gewichtsstückes, so wird der Kolben etwas gehoben und mit ihm das noch gebliebene Gewicht. Durch Ausdehnung der Luft folgt aber wieder Druckverminderung, also sofortige Wiederherstellung eines Gleichgewichtszustandes, bis durch abermalige Verminderung des Gewichtes derselbe von neuem gestört wird. Man wird also durch allmähliche Verminderung der Kolbenbelastung im stande sein, einen Teil des Gewichtes G_1 noch höher zu heben als bis in die Stellung II. Die hierdurch geleistete Arbeit wird unter allmählicher Druckverminderung (Expansion) der Luft ausgeübt; wir können dieselbe somit der ersten Volldruck-

arbeit $G_1 x_1$ gegenüber als Expansionsarbeit $G_2 x_2$ bezeichnen, wenn unter G_2 ein mittlerer Wert der Belastung bei der Expansion, unter x_2 die vertikale Erhebung des Gewichtes in dieser Periode verstanden wird. Eine Hebung des Kolbens wird nur so lange möglich sein, als noch ein den Atmosphärendruck übersteigender Druck unter dem Kolben wirkt. Es tritt indessen ein Moment ein, in welchem trotz der höheren Temperatur die Luft sich so stark ausgedehnt hat, daß ihre Spannung der atmosphärischen gleicht und damit ist die natürliche Grenze für die Expansion angezeigt. Das Gewicht ist dann Null geworden und kann mithin keine nutzbare Arbeit mehr aufnehmen. Von der der Luftmenge in dem Cylinder mitgeteilten Wärme ist jetzt alle Arbeit, welche dieselbe unter atmosphärischem Gegendruck zu leisten imstande ist, wirklich geleistet worden, und damit ist der einmalige Arbeitsprozeß der Maschine beendet. Bei den Luftmaschinen soll nun aber dieser Prozeß nicht nur einmal, sondern, so lange die Maschine geht, in fortwährenden Wiederholungen geleistet werden. Hierzu ist erforderlich, daß der Prozeß auf den Anfangszustand zurückführt, damit von diesem Punkte ein neuer Arbeitsprozeß ausgehen kann.

Dieser Rückgang kann nun in verschiedener Weise stattfinden. Da die Luftmenge in dem Cylinder die anfängliche geblieben ist, so scheint es am naturgemäßeften, sie auch in dem Cylinder zu lassen, zunächst durch Abkühlung ihre Temperatur bis auf den Anfangswert zu verringern, wobei der Kolben ohne Arbeitsleistung niedersinkt, da über und unter demselben stets gleicher Druck herrscht, und hierauf die anfangs vorhanden gewesene Kompression durch allmähliches Aufsetzen von Gewichtsstücken zu erzeugen, wobei, wenn G_3 die mittlere Belastung, x_3 den Kolbenweg während der Kompression bezeichnet, die Arbeit $G_3 x_3$ aufgewendet werden muß, welche um so kleiner sein wird, je besser es gelingt, die Temperaturerhöhung, welche im allgemeinen bei einer Kompression eintreten würde, durch Abkühlung zu vermeiden. Während dieses auf seinen Anfangszustand zurückgekehrten Prozesses (Kreisprozesses) wurden die Arbeiten $G_1 x_1 + G_2 x_2$ durch Hebung von Gewichten verrichtet, hingegen die durch Sinken des Gewichtes G_3 geleistete Arbeit $G_3 x_3$ verbraucht. Die während eines vollen Kolbenspieles wirklich gewonnene Arbeit ist daher $G_1 x_1 + G_2 x_2 - G_3 x_3$. Durch Wiederherstellung des Anfangszustandes geht also ein Teil der geleisteten Arbeit wieder verloren. Auf der Linie X, siehe Fig. 1, sind die einzelnen Kolbenwege als Abscissen und die zugehörigen Kolbentberdrücke als Ordinaten aufgetragen. So bedeutet das Rechteck 1 2 6 5 die Volldruckarbeit, d. h. das Produkt $G_1 x_1$, die Fläche 2 3 6 die Expansionsarbeit, sowie die Fläche 1 4 5 die Kompressionsarbeit. Die Fläche 1 2 3 4 stellt mithin die überhaupt produzierte nutzbare Arbeit, d. h. das ideelle Indikatordiagramm dar. Die Gewichte G_2 und G_3 , welche wir oben Mittelwerte nannten, erscheinen hier als Höhen von Rechtecken, welche mit den kurvenförmig begrenzten Flächen 2 3 6 resp. 1 4 5 den Inhalt, sowie die Grundlinien 3 6 resp. 4 5 gemein haben.

Bei dem geschilderten Prozeß bleibt dieselbe Luftmenge in dem Cylinder eingeschlossen. Man nennt daher Maschinen, welche nach diesem Prozeß arbeiten, geschlossene Luftmaschinen.

Ihnen stehen die offenen Luftmaschinen gegenüber, welche in der Wirkungsweise beim Vorgang des Kolbens zwar mit den geschlossenen übereinstimmen, beim Rückgang hingegen sich insofern unterscheiden, als nach Beendigung der in der Regel nicht sehr weit getriebenen Expansion die erhitzte Luft den Cylinder durch ein Ventil verläßt. Unmittelbar darauf wird von der in Bewegung bleibenden Maschine

frische Luft angesaugt und in kaltem Zustande auf die erforderliche Anfangsspannung komprimiert, um dann durch Erwärmung Arbeit zu verrichten.

Bei diesen Maschinen kommt also mit jedem Kolbenhub ein neues Luftquantum zur Wirkung; sie werden von der arbeitenden Luft durchströmt und können daher mit Recht offene Luftmaschinen genannt werden.

In diese Klasse gehören auch die sogenannten Feuerluftmaschinen oder offenen Luftmaschinen mit geschlossener Feuerung, bei denen nicht atmosphärische Luft, sondern die Verbrennungsgase der Feuerung in dem Cylinder zur Wirkung gelangen, in welchen sie von dem Feuerraum aus mit einer beträchtlichen Spannung eintreten, wie der Dampf aus dem Dampfkessel in den Cylinder der Dampfmaschine. Die zur Verbrennung erforderliche atmosphärische Luft wird durch eine besondere Luftpumpe in den luftdicht schließenden Feuerraum gepresst, in welchem die Verbrennung unter 2 bis 3 Atmosphären Druck stattfindet.

Ogleich die offene Luftmaschine mit offener Feuerung durch die Konstruktion des 1803 in Schweden geborenen Kapitäns John Ericsson für die Heißluftmaschinen Bahn gebrochen hat, konnte sich dieses System auf die Dauer nicht halten und hat jetzt mit sämtlichen späteren Versuchen (Redtenbacher, Wilcox u. a.) derselben Richtung nur noch historisches Interesse. Zur Zeit ist die geschlossene Luftmaschine als die herrschende zu betrachten. Dieser Gattung gehören unter anderen an die hier näher zu besprechenden Maschinen von Lehmann, Stenberg, Rider, Rennes.

§ 3. Die Lehmann'sche Luftmaschine, Fig. 3, 4 und 9, T. VII. Die Wirkungsweise der Lehmann'schen Luftmaschine (D. R. P. No. 3058 und 6403) unterscheidet sich von dem soeben geschilderten theoretischen Prozeß der geschlossenen Luftmaschine nur insofern, als die einzelnen Prozesse nicht so scharf von einander getrennt sind, sondern wie aus dem in Fig. 9, Taf. VII, dargestellten Indikator-diagramm einer 1 pferdigen Lehmann'schen Luftmaschine hervorgeht, allmählich in einander übergehen. Der Punkt *a* entspricht dem kleinsten Luftvolum, d. h. dem einen Todpunkt des Kolbens; während derselbe sich in Bewegung setzt, findet etwa bis zum Punkte *b* Erwärmung statt, hierauf Expansion der nicht mehr oder nur noch wenig erwärmten Luft bis zum zweiten Todpunkt *c*; von hier an wird die Luft soweit abgekühlt, daß trotz des Kolbenrückganges eine Kompression nicht stattfindet bis zum Punkte *e*, in welchem die Luft die Temperatur des Kühlwassers nahezu erreicht hat und deshalb bei weiterer Volumenverminderung, sofern sie sich nicht weiter abkühlen kann, eine Kompression bis auf die anfängliche Spannung im Punkte *a* erfährt.

Die abwechselnde Erwärmung und Abkühlung erfolgt in der Weise, daß die Luft durch einen leicht konstruierten luftdicht geschlossenen Blechcylinder *VV*, siehe Fig. 3, Taf. VII, genannt Verdränger, welcher sich mit etwas Spielraum in dem Cylinder hin und her bewegen kann, abwechselnd in einen durch den Ofen *O* geheizten, heißen Raum *H* und in einen durch Wassermantel gekühlten kalten Raum *K* gedrängt wird, um die jedesmal daselbst herrschende Temperatur anzunehmen. Dieser Temperatureaustausch wird dadurch sehr erleichtert, daß die Luft bei ihrer Bewegung, während sie den engen ringförmigen Spalt zwischen dem Verdränger und den Cylinderwänden passiert, als dünne Schicht mit letzteren in Berührung kommt. Trotzdem wird der Wechsel zwischen höchster und niedrigster Temperatur kein plötzlicher sein, da die Bewegung des Verdrängers schon an und für sich einer gewissen Zeit bedarf; die genaue theoretische Verfolgung des Arbeitsprozesses erheischt daher ein-

gehende Berücksichtigung des Bewegungsgesetzes der Maschine¹⁾. Während sich die Luftspannungen zu beiden Seiten des Verdrängers infolge des zwischen ihm und den Cylinderwandungen enthaltenen Spielraumes jederzeit ausgleichen können, erfährt der zur Übertragung der Arbeit auf die Schwungradwelle bestimmte, sogenannte Arbeitskolben *A* nur von einer Seite den veränderlichen Druck der erhitzten Luft, während er von der andern Seite dem konstanten Druck der Atmosphäre ausgesetzt ist. Verdränger *V* und Arbeitskolben *A* haben eine solche Relativbewegung, als wären sie die Kolben einer Zwillingsdampfmaschine mit um 65 bis 75° versetzten Kurbeln. Dies wird durch den in Fig. 3, Taf. VII, ersichtlichen Hebelmechanismus bewirkt, welcher den Arbeitskolben mit dem Kurbelzapfen *a*, den Verdränger mit dem Zapfen *v* einer Gegenkurbel in Verbindung bringt, welche letztere der Hauptkurbel um circa $32\frac{1}{2}^\circ$ vorausleitet. Bei der Konstruktion der relativen Bewegung würde hierzu noch der Winkel zwischen den beiden Hebeln *c* und *d* zu addieren sein, welche auf gemeinsamer Welle sitzen und daher als ein Winkelhebel wirkend, dem Verdränger die Kurbelbewegung vermittelt der centralen Stange mitteilen. Der Winkel *cd* beträgt circa $32\frac{1}{2}^\circ$ und die relative Kolbenbewegung entspricht daher einer ideellen Kurbelversetzung um $32\frac{1}{2} + 32\frac{1}{2} = 65^\circ$. Der Arbeitskolben hat zwei kurze Kuppelstangen *h h*, durch welche er auf die in Fig. 4 sichtbaren Hebel *g g* und durch diese auf den Hebel *f* wirkt, während durch seine mittlere Stopfbüchse die Kolbenstange des Verdrängers hindurch geht. Der Arbeitskolben kommt vorteilhafter Weise nie mit heißer Luft in Berührung, seine Liderung gegen inneren Druck kann daher durch einen Lederstulp *i i* bewirkt werden, welcher gleichzeitig den Zweck hat, bei event. Verminderung des Druckes unter den atmosphärischen Druck den Eintritt frischer Luft zu gestatten und so einen Ersatz für die durch Undichtigkeiten des Kolbens oder des glühenden Heiztopfes entwichene Luft zu gewähren. Der Verdränger bewegt sich zur Vermeidung gleitender Reibung auf der Rolle *k*. Die Regulierung der Maschine wird von dem Centrifugalregulator *l* eingeleitet und erfolgt durch Bremsung am Schwungrad, also durch Vernichtung überschüssiger Kraft.²⁾ Obgleich sehr unökonomisch, genügt diese Regulierung in den meisten Anwendungsfällen der Maschine bei nicht sehr veränderlichem Kraftbedarf vollkommen und wird auch bei diesem System schwerlich durch einen anderen Regulierungsmodus ersetzt werden können. Der Kohlenverbrauch schwankt nach Versuchen des Verfassers³⁾ zwischen 4 u. 5 kg Steinkohlen mittlerer Qualität pro Stunde und effektive Pferdestärke, während zum Anheizen bei der 1 pferdigen Maschine 20 kg, bei der 2 pferdigen $32,6$ kg Steinkohlen erforderlich waren. Der Kühlwasserverbrauch beträgt noch nicht 200 kg pro Stunde und Pferd.

Der gusseiserne Heiztopf der Lehmann'schen Luftmaschine hat eine Dauer von 3 bis 5 Jahren; bei unverständiger Feuerung kann er jedoch viel schneller zerstört werden. Neuerdings werden daher die Feuertöpfe seitens der Berlin-Anhaltischen Maschinenbau-Aktiengesellschaft dauerhafter in Gußstahl ausgeführt.

Zum Vergleich der Wirkungsweise der Maschine mit dem in § 2 geschilderten theoretischen Vorgang, bei welchem auf vorhandene Schwungmassen nicht Rücksicht genommen wurde, um die ganze Arbeit der Maschine unmittelbar in der Hebung und

¹⁾ Dr. Slaby macht diese Untersuchungen auf graphischem Wege selbst für komplizierte Bewegungsgesetze leicht durchführbar, s. Verh. d. Ver. zur Bef. d. Gewöbl. in Preußen 1878, S. 375—409 mit Abb.

²⁾ Siehe Einleitung, S. 6: „Die Regulierung der Geschwindigkeit der Maschinen.“

³⁾ Vergl. Versuche über Leistung und Brennmaterialverbrauch von Kleinmotoren von E. Brauer und Dr. A. Slaby, Heft I. Berlin, Julius Springer.

Senkung eines Gewichtes darstellen zu können, bedarf es noch der Bemerkung, daß durch das thatsächlich vorhandene Schwungrad m , welches während der Volldruckperiode überschüssige Arbeit aufnimmt und während der Expansion und des Kolbenrückganges wieder an die Arbeitsmaschine abgibt, sowie die Kompression der Luft zu Ende des Rückganges bewirkt, die Ausgleichung zwischen der variablen Arbeitsleistung und dem gleichförmigen Widerstand der Maschine während eines Umganges vollzogen wird.

Die Lehmann'sche Maschine erhält im Verhältnis zur geleisteten Arbeit ziemlich beträchtliche Dimensionen, da der nutzbare mittlere Überdruck, wie er sich aus dem Indikatordiagramm ergibt, kaum über 0,8 kg pro qem beträgt.

§ 4. Die Stenberg'sche Luftmaschine, Fig. 7, 8 u. 10, Taf. VII. Stenberg hoffte durch schnelleren Rückgang des Verdrängers, durch welchen das Einströmen der heißen Luft in den kalten Raum beschleunigt werden sollte, sowie durch Einschaltung einer Ruhepause am Ende dieser Bewegung, den anfänglichen Druck und damit auch die nutzbare Mittelspannung erhöhen zu können. Der Erfolg der in der Maschinenfabrik der Gebrüder Sachsenberg nach diesem Prinzip erbauten Maschinen (D. R. P. No. 2489) zeigte aber, daß mit Erhöhung des Anfangsdruckes bei der Vorwärtsbewegung des Arbeitskolbens auch die Kompression beim Rückgang desselben gesteigert und eine nennenswerte Vergrößerung der Nutzspannung nicht erzielt wurde. Den Beweis hierfür liefert das Indikatordiagramm, Fig. 10, Taf. VII, einer 1- bis $1\frac{1}{2}$ pferdigen Stenberg'schen Maschine, welches trotz der Anfangsspannung von 1,75 Atm. Überdruck, doch nur 0,549 Atm. nutzbare Mittelspannung ergibt. Fig. 7, Taf. VII, zeigt einen Längsschnitt der Stenberg'schen Maschine, aus welchem ersichtlich ist, daß die Verdrängerbewegung hier durch eine Bogenschleife a mit größerer Geschwindigkeit nach links erfolgt, als nach rechts, wenn die Schwungradwelle sich in der Richtung des Pfeiles dreht, und daß in der Position links der Verdränger eine Ruhepause erhält. Der Heiztopf t hat eine Einstülpung und wird hierdurch für gleiche Heizfläche kürzer als bei Lehmann. Der Kohlenverbrauch ist von dem der Lehmann'schen Maschine nicht wesentlich verschieden, der Kühlwasserverbrauch ist jedoch größer.

§ 5. Die Luftmaschine von D. W. van Rennes. Diese in Deutschland unter No. 4116 Herrn Fredenhagen patentierte Maschine, welche holländischen Ursprungs ist und schnell eine gewisse Verbreitung in ihrer Heimat erfahren hat, unterscheidet sich von den beiden vorigen Maschinen dadurch, daß der Verdrängercylinder mit dem Arbeitcylinder nicht verschmolzen ist, sondern beide neben einander meist mit vertikaler Axe angeordnet sind und nur durch ein Rohr mit einander in Verbindung stehen. Diese Anordnung hat den Nachteil, daß der schädliche Raum, welcher für das nicht zur Erwärmung und Abkühlung gelangende Luftquantum maßgebend ist, hier etwas größer ausfällt, als bei coaxialer Anordnung der Cylinder. Durch die vertikale Bewegung der Kolben wird deren Reibung jedenfalls sehr vermindert und man sollte auf einen ziemlich hohen Wirkungsgrad rechnen können, was durch die bisher angestellten Versuche jedoch nicht bestätigt wurde. Auch der Kohlenverbrauch dieser Maschine war ein relativ hoher, 7,3 kg Steinkohle pro Stunde und Pferdestärke.

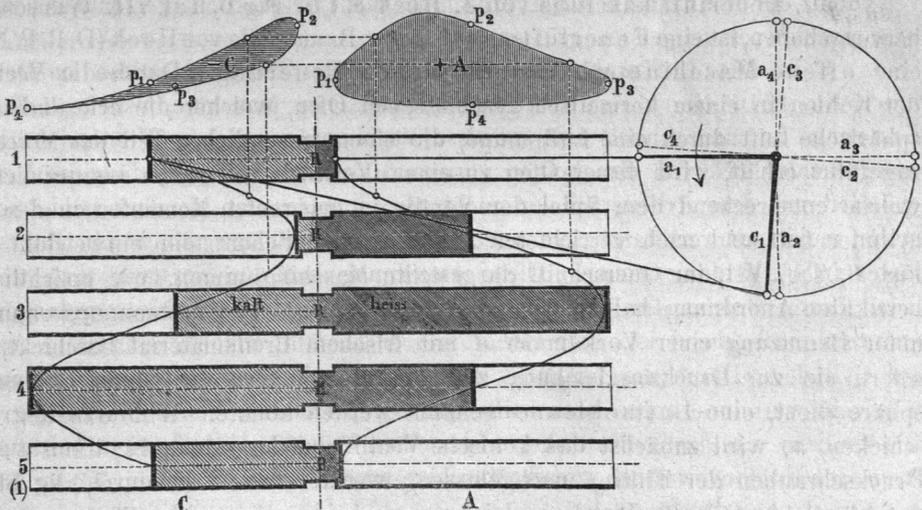
Neuerdings hat Rennes auf eine ganz andere Maschine ein Patent erhalten (D. R. P. No. 7732 vom 26. April 1879), welche sich am zutreffendsten als eine Lehmann'sche Zwillingmaschine mit vertikalen Cylindern charakterisieren läßt. Diese vielleicht recht zweckmäßige Konstruktion lehrt nur, daß Rennes von der

Trennung des Arbeitscyinders vom Verdrängercylinder zurückgekommen ist, da er das Lehmann'sche Prinzip der conaxialen Anordnung angenommen hat.

§. 6. Die Rider'sche Luftmaschine, Fig. 5, Taf. VII. Diese zweicylindrige Maschine unterscheidet sich von den bisher besprochenen geschlossenen Luftmaschinen dadurch, daß die Bewegung der Luft aus dem heißen in den kalten Raum und zurück nicht durch einen Verdränger, welcher von beiden Seiten gleichen Druck erfährt, sondern durch zwei Kolben bewirkt wird, welche, da sie von einer Seite dem Druck der eingeschlossenen Luft, von der anderen Seite dem Druck der Atmosphäre ausgesetzt sind, beide für Arbeitskolben gehalten werden könnten. In der That ist ihre Wirkung nur eine quantitativ verschiedene, indem durch beide Kolben Arbeit auf die Kurbel übertragen wird, mit dem Unterschied jedoch, daß die Arbeit des einen Kolbens positiv, die des anderen hingegen negativ ist.

Der Kolben *A*, welcher positive Arbeit verrichtet, heißt Arbeitskolben, der andere *C* Kompressionskolben. Beide haben gleichen Durchmesser, aber ungleichen Hub und sind als Taucherkolben mittelst Ledermanschetten nach außen abgedichtet. Am oberen Ende sind sie nur soweit abgedreht, als der Hub es erfordert, während der untere Teil etwas geringeren Durchmesser hat und unbearbeitet ist. Zwischen diesem Teil und den Cylindern bleibt ein schmaler ringförmiger Raum, durch welchen beim Kompressionscylinder die Luft hindurch streichen muß und dabei Gelegenheit findet, sich schnell an den von einem Wassermantel umgebenen Wänden abzukühlen. Der Arbeitscylinder ragt mit einer Verlängerung *B* in den Feuertopf *D*, ebenfalls einen schmalen ringförmigen Spalt bildend, durch welchen die Luft hindurch gedrängt und so an den glühenden Wandungen des Feuertopfes schnell erwärmt wird. Der Wärmewechsel wird noch durch einen Wärmeaustauschapparat, Regenerator genannt, erleichtert, welcher in dem Verbindungsrohre *E* angebracht ist und aus einem System von Gußeisenplatten besteht. Während die Luft dieselben beim Übergange aus einem Cylinder in den andern durchstreicht, soll sie, je nach ihrer Bewegungsrichtung, vorgewärmt oder vorgekühlt werden.

Fig. 2.



Nach vorstehendem Holzschnitt Fig. 2 läßt sich das Verhalten beider Kolben leicht übersehen. Die Cylinder sind hier conaxial statt parallel gezeichnet und der Kompressionscylinder *C* erscheint gegen den Arbeitscylinder *A* um 180° verdreht,

sodafs die Gröfse des Raumes zwischen beiden Kolben leicht beurteilt werden kann. Infolge dessen muß auch die Kurbel des Kompressionskolbens um 180° gedreht dargestellt werden, sodafs sie dem Arbeitskolben um 90° vor- statt nacheilt, wie es in Wirklichkeit geschieht; R sei der Regenerator, welcher den kalten vom heifsen Raum trennt.

Die Figur zeigt nun die 4 um je 90° von einander verschiedenen Stellungen der beiden Kurbeln und diejenigen der zugehörigen Kolben, deren Hub hier gleich grofs angenommen ist. Die Kurven (Sinuslinien), welche die 4 Stellungen jedes der beiden Kolben verbinden, lassen auch die Zwischenstellungen leicht verfolgen. In Stellung 1 beginnt der Arbeitskolben seinen Hub, während die Luft zwar vollständig im kalten Raum, in diesem jedoch mit dem Druck p_1 (s. Indikatordiagramm) stark komprimiert ist. In Stellung 2 ist das Luftvolum noch dasselbe, es befindet sich jedoch vollständig im heifsen Raum; somit wird der Druck bedeutend stärker geworden sein. Bis zur Stellung 3 verrichten nun beide Kolben nutzbare Arbeit; die Spannung verringert sich jedoch infolge der Luftexpansion und des teilweisen Überganges in den kalten Raum, sodafs der Kolben A seinen Rückgang bei nahezu atmosphärischem Druck auf beiden Seiten desselben beginnt. In Stellung 4 kehrt auch der Kompressionskolben um, hört also auf zu arbeiten und muß nun ebenso wie der Arbeitskolben behufs Kompression der Luft im kalten Raum Arbeit von der Schwungradwelle entnehmen und zwar mehr als er vorher geleistet hatte. Bei Stellung 5 oder 1 angelangt, wiederholt sich der beschriebene Vorgang von neuem. Die Diagramme $+A$ und $-C$ entsprechen den geleisteten und konsumierten Arbeiten, mithin ist die Differenz ihrer Flächen ein Maßstab für die an die Schwungradwelle wirklich abgegebene Arbeit.

Die Rider'sche Maschine nimmt im Grundrifs wenig Platz ein und soll, obgleich das Arbeitsprinzip theoretisch weniger vollkommen ist, als das der Verdrängermaschinen, z. B. der Lehmann'schen Maschine, ebenfalls ziemlich sparsam, d. h. mit 4–5 kg Steinkohle pro Stunde und Pferdestärke arbeiten.

§ 7. Feuerluftmaschine von J. Hock & Co. Fig. 6, Taf. VII. Wie schon in § 2 hervorgehoben, ist eine Feuerluftmaschine, z. B. auch die von Hock (D. R. P. No. 2047), eine offene Maschine mit geschlossener Feuerung. Durch die Verbrennung der Kohlen in einem hermetisch geschlossenen Ofen, welcher die erforderliche atmosphärische Luft durch eine Luftpumpe, die einen wesentlichen Teil des Motors bildet, zugeführt erhält, wird dieser Ofen zu einem Vorratsbehälter von komprimierter Luft, welche entsprechend dem Spiel der Ventile in geeigneten Momenten in den Arbeitscylinder tritt und nach verrichteter Arbeit in den Schornstein entweicht. Diese in Fig. 6, Taf. VII, im Querschnitt dargestellte Maschine nimmt, wie ersichtlich, ihrer vertikalen Anordnung halber wenig Grundfläche ein. Der Verbrennungsraum a wird unter Benutzung einer Vorkammer d mit frischem Brennmaterial beschickt, welche, sofern sie zur Druckausgleichung zwischen dem Innern des Ofens und der Atmosphäre dient, eine Luftschleuse genannt werden könnte. Will man den Rost beschicken, so wird zunächst das konische Ventil e niedergeschraubt; dann werden die Druckschrauben der Thür f nachgelassen, worauf etwas Luft durch die Thürspalte ausströmt, bis sich die Druckausgleichung zu beiden Seiten der Thür vollzogen hat. Nachdem ein in Scharnieren hängender Druckbügel sodann herunter geschlagen ist, läfst sich die Thür vollständig öffnen und das nötige Brennmaterial einwerfen, welches, nachdem die Thür wieder hermetisch geschlossen und das Ventil e geöffnet ist, auf den Rost hernieder fällt.

Der Arbeitscylinder *A* steht über dem Ofengehäuse und trägt die Lager für die Kurbelwelle, sowie den in seiner Verlängerung liegenden Luftpumpencylinder *L*, dessen Kolben *l* mit dem Arbeitskolben *a* in direkter Verbindung steht und daher denselben Hub hat wie letzterer. Der Durchmesser der Luftpumpe ist indessen kleiner als der des Arbeitscylinders. Da die Pleuelstange *g* zur Verbindung der Kolben mit der Kurbel ziemlich am tiefsten Punkte des Arbeitskolbens angreift, so wurde zum Schutze des betreffenden Zapfens ein leichter Blechmantel *b* mit dem Kolben verbunden, welcher sich mit wenig Spielraum in dem Cylinder bewegt und gleichzeitig die in der Figur nicht sichtbare Lederstüpliderung der direkten Hitze entzieht. Die durch die Luftpumpe angesaugte atmosphärische Luft wird durch ein ebenfalls nicht gezeichnetes Rohr in eine Regulierkammer gedrückt, von wo aus sie je nach der Stellung eines durch den Regulator beeinflussten Doppelventils entweder ganz oder teilweise unter den Rost geführt wird und so eine energische Verbrennung erzeugt oder, wenn die Verbrennung behufs geringerer Arbeitsleistung gemäßiget werden soll, zum größeren Teil unter Passierung eines Vorwärmers mit unvermindertem Druck in den Feuerraum gelangt, sodafs sie zwar die zu ihrer Kompression aufgewendete Arbeit wieder nutzbar macht, jedoch zur Wärmeentwicklung nicht beigetragen hat. Nur bei sehr plötzlicher Widerstandsveränderung genügt diese Art der Regulierung nicht, und es ist daher für diesen Fall noch ein Luftventil vorhanden, welches, bei zu grofser Geschwindigkeit vom Regulator geöffnet, das Ausströmen einer Quantität komprimierter Luft gestattet. Das Spiel der Ventile, welche die Ein- und Ausströmung der heifsen Luft aus dem Ofen in den Arbeitscylinder regeln, erfolgt durch eine kurze, von der Kurbelwelle mittelst Zahnrädern betriebene Welle *s*, welche gleichzeitig den Regulator durch konische Räder in Bewegung setzt. Durch Anwendung von Expansion kann der Kohlenverbrauch der Maschine sehr vermindert werden.

Der Hock'sche Motor mufs mit Coaks geheizt werden, da andere Brennmaterialien den Cylinder zu sehr verunreinigen würden. Nach Versuchen auf der Pariser Weltausstellung 1878⁴⁾ betrug der Coaksverbrauch 4,2 kg pro Stunde und Pferdestärke, so lange die Maschine ohne Expansion arbeitete, während nach Einrichtung der Expansion der Verbrauch auf 2 kg pro Stunde und Pferdestärke gesunken sein soll, eine Zahl, welche jedoch mit allem Vorbehalt hier wiedergegeben wird. 4,2 kg Coaksverbrauch fand auch Prof. Jenny in Wien als Mittel aus 13 Versuchen, ebenso Prof. Teichmann in Stuttgart 4,25 kg.⁵⁾

Der grösste Vorzug der Hock'schen Maschine, welcher namentlich für vorübergehende oder mit häufigen Ortsveränderungen verknüpfte Verwendungen wichtig ist, besteht in der Entbehrlichkeit des Kühlwassers. Die Ledermanschetten und die Ventile sollen sich bei nicht sehr vorzüglicher Wartung nicht dauerhaft erwiesen haben. Neuerdings werden statt der ersteren Metallringe zur Kolbenliderung angewendet.

⁴⁾ Vergl. Annuaire publié par le Comité de la Société des anciens Elèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers 1879, Tome premier p. 58. Ob die dort angegebenen Resultate wirklich auf der Ausstellung gewonnen sind, ist nach dem Wortlaut nicht ganz sicher.

⁵⁾ Dr. G. Seelhorst und L. Kröllner haben bei einem Versuch im bairischen Gewerbemuseum für einen auf 1,4 Pferdestärken gebremsten Hock'schen Motor einen stündlichen Coaksverbrauch von 1,5 kg ermittelt, haben dabei jedoch die Maschine 5 $\frac{1}{2}$ Stunden leerlaufen lassen und nur 1 $\frac{1}{2}$ Stunden auf 1,4 PS gebremst, trotzdem aber den gesamten Coaksverbrauch von 10,75 kg auf 7 Stunden gleichmäfsig verteilt ($\frac{10,75}{7} = 1,53$), was offenbar von dem wirklichen Brennstoffverbrauch pro Stunde und Pferdestärke ein ganz verzerrtes und zu Irrtümern geeignetes Bild ergibt. Leider hat dieses Resultat grofse Verbreitung gewonnen.

§ 8. Feuerluftmaschine von A. & F. Brown, Fig. 11 bis 15, Taf. VII. Die „Caloric engine“ von A. und F. Brown in New-York (D. R. P. No. 3928) wird in Amerika und England seit einiger Zeit für die Nebelhörner der Küstenstationen verwendet und ist auch für Bauzwecke, namentlich zur Entwässerung von Baugruben mehrfach, u. a. von Siemens und Halske in Berlin, in Anwendung gebracht worden.

Die Maschine unterscheidet sich, wie Fig. 11, Taf. VII, zeigt, prinzipiell von dem Hock'schen Motor nur insofern, als Luftpumpencylinder *L* und Arbeitscylinder *A* nicht coaxial angeordnet sind, sondern mit vertikalen Axen neben einander stehen, während die Kolben durch einen Balancier *b* mit einander verbunden sind. Auch der Ofen *o* steht neben dem Arbeitscylinder, sodafs sich die Maschine ziemlich breit baut, jedoch ihrer geringen Höhe wegen wieder in allen Teilen recht bequem zugänglich ist. Es ist eine sehr verbreitete Annahme, dafs bei diesen Feuerluftmaschinen, in welchen die Heizgase direkt Arbeit verrichten, die Wärme weit vollkommener ausgenutzt werde, als bei den geschlossenen und überhaupt solchen Maschinen, bei denen die Wärme durch Leitung auf die Arbeitsluft übertragen wird. Dr. A. Slaby⁶⁾ unterwarf nun die Brown'sche Maschine auf Grund von Brems- und Indikatorversuchen, welche er am 14. November 1878 in der Fabrik von Siemens und Halske in Berlin gemeinschaftlich mit dem Verfasser vornahm, einer wärmetheoretischen Untersuchung, welche das überraschende Resultat lieferte, dafs die in dem zugeführten Brennmaterial disponible Wärmemenge in der Feuerluftmaschine von Brown durchaus nicht besser ausgenutzt wird, als in den geschlossenen Maschinen. Namentlich unerwartet dürfte die Erscheinung sein, dafs der Wirkungsgrad des Ofens der Brown'schen Maschine nur 0,26 beträgt, während für die Feuerungen der Lehmann'schen und Stenberg'schen Maschine dieser Wirkungsgrad zu 0,5 berechnet wurde.⁷⁾ Nur dem Umstande, dafs zumeist infolge der vertikalen Anordnung der Maschine der sog. indizierte Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis zwischen indizierter und gebremster Arbeit, gröfser ist als bei den besprochenen geschlossenen Maschinen, ist es zu danken, dafs der Brennmaterialverbrauch pro effektive Pferdestärke nicht mehr beträgt als bei letzteren. Derselbe ergab sich bei den erwähnten Versuchen zu 7,4 kg Holzkohlen zum Anheizen, und zu 4,43 kg Coaks pro Stunde und effektive Pferdestärke. In den Figuren 13, 14 u. 15, Taf. VII, sind einige Indikatordiagramme dargestellt, welche während des Versuches entnommen wurden, und zwar zeigt Fig. 13 das Diagramm des Arbeitscylinders für 2fache Expansion, Fig. 14 dasjenige der Luftpumpe, während Fig. 15 das Ofendiagramm giebt, bei dessen Entnahme der Papiercylinder dem Pumpenkolben entsprechend bewegt wurde. Die Spannung im Ofen ist während der Saugperiode ziemlich konstant, da während derselben der Arbeitskolben leer zurückgeht. Während der Druckperiode der Luftpumpe findet zunächst eine Druckverminderung im Ofen statt, weil jetzt das Ventil zum Arbeitscylinder geöffnet ist, von der Luftpumpe aber noch keine Verbrennungsluft zugeführt werden kann, da dieselbe sich erst auf $\frac{1}{3}$ des anfänglichen Volumens komprimieren läfst, ehe sich das Druckventil öffnet. Im letzten Drittel steigt jedoch die Spannung, weil das Einlaßventil des Arbeitscylinders sich schließt, das Druckventil der Pumpe aber geöffnet ist. Das Regulierungsprinzip ist dasselbe wie bei dem Hock'schen Motor.

⁶⁾ Vergl. Dingler, polyt. Journ. 1879, Bd. 232, S. 200 u. ff.

⁷⁾ Vergl. Beiträge zur Theorie der geschlossenen Luftmaschinen von Dr. A. Slaby, Verh. d. Ver. zur Bef. d. Gewbfl. in Preußen 1878, S. 375 bis 409.