

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

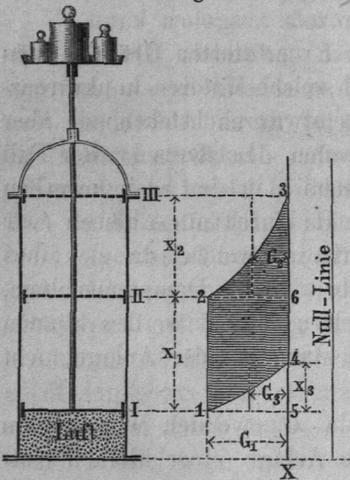
sein, Wasserläufe mit sehr hohem Gefälle (Gebirgsbäche) für Bauzwecke nutzbar zu machen, als wenig fallende Gewässer der Ebene mit großen Wassermassen.

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 Zeiteinheiten 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.

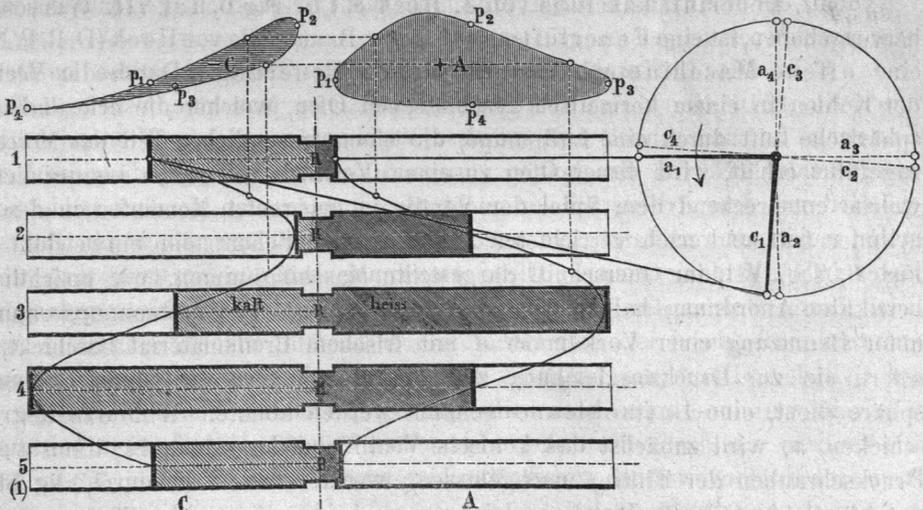
Neuerdings hat Rennes auf eine ganz andere Maschine ein Patent erhalten (D. R. P. No. 7732 vom 26. April 1879), welche sich am zutreffendsten als eine Lehmann'sche Zwillingmaschine mit vertikalen Cylindern charakterisieren läßt. Diese vielleicht recht zweckmäßige Konstruktion lehrt nur, daß Rennes von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

b. Gasmaschinen.

§ 9. Die Arbeitsprinzipien der Gasmaschinen. Die Gasmaschinen unterscheiden sich von den offenen Luftmaschinen mit geschlossener Feuerung prinzipiell nur durch die Form, in welcher das Brennmaterial zugeführt, und die Art, in welcher die Verbrennung bewirkt wird. Auch bei ihnen findet die Verbrennung des Brennstoffes (Leuchtgas) in einem luftdicht geschlossenen Raume statt, und die Feuergase kommen behufs Arbeitsverrichtung direkt mit dem Arbeitskolben in Berührung. Man könnte geneigt sein, auch eine mit Leuchtgas geheizte geschlossene Luftmaschine Gasmaschine zu nennen. Bis jetzt ist dies jedoch nicht üblich. Die Grenze zwischen beiden Wortgebieten ist indessen unbestimmt.

Die Verbrennung des Leuchtgas erfolgt besonders vollkommen, wenn es vor der Entzündung mit dem erforderlichen 9 bis 12fachen Volumen atmosphärischer Luft vermengt wird. Deshalb ist diese Art der Verbrennung bei allen mehr oder weniger bekannt gewordenen Gasmaschinen zur Anwendung gekommen, obgleich eine plötzliche, explosionsartige Verbrennung untrennbar damit verknüpft ist. Der hierbei spontan auftretende Druck ist nun möglichst schnell in mechanische Arbeit umzusetzen, um dadurch die sonst eintretende Wärmeausstrahlung zu verhüten. Diese schwierige Aufgabe bildet den eigentlichen Hauptzielpunkt für alle Gasmaschinenkonstruktoren und giebt eine natürliche Erklärung für die komplizierten Konstruktionen der meisten Gasmaschinen.

Bei der ältesten, einer gewöhnlichen Kolbendampfmaschine ähnlichen Gasmaschine von Lenoir, in welcher das bei Beginn des Kolbenhubes angesaugte Gas- und Luftgemenge nach Abschluß der Zuströmungskanäle durch einen elektrischen Funken entzündet wird, erfolgte wegen zu geringer Kolbengeschwindigkeit die Umsetzung der Wärme in Arbeit so langsam, daß der Cylinder nur durch einen kräftigen Strom fließenden Kühlwassers vor zu großer Erhitzung geschützt werden konnte. Ein großer Teil der Wärme ging daher, statt Arbeit zu verrichten, in das zwecklos erwärmte Kühlwasser über, dessen Verbrauch, 2—4 cbm pro Stunde und Pferd, die ohnehin schon beträchtlichen Kosten von 4 cbm Leuchtgas pro Stunde und Pferd noch erheblich steigerte.

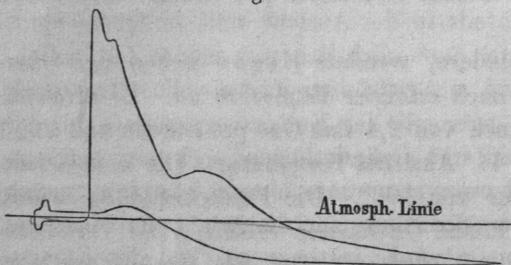
Um den Wasserverbrauch zu vermindern, wendete Hugon neben der Oberflächenkühlung, Einspritzung von Wasser nach erfolgter Explosion an. Er erreichte nach Versuchen von Tresca einen Verbrauch von 2,4 cbm Gas pro Stunde und Pferd und 0,6 cbm Wasser bei 19° Eintritts- und 44° Austritts-Temperatur. Die entweichenden Gase hatten eine mittlere Temperatur von 186°. Die Funkenzündung wurde durch eine mit Hochdruck eingetriebene kleine Gasflamme ersetzt. Die Verminderung des Gasverbrauchs erklärt sich dadurch, daß ein Teil der Explosionswärme zur Bildung von Wasserdampf verwendet und im weiteren Verlauf der Kolbenbewegung in Arbeit umgesetzt wird.

Ganz anders haben Otto und Langen durch ihre epochemachende „atmosphärische Gaskraftmaschine“ der hervorgehobenen Hauptschwierigkeit zu begegnen gesucht.

Indem sie der Ausdehnung der durch die Explosion entwickelten Gase als Widerstand nur das Eigenwicht des vertikal frei beweglichen Kolbens plus dem darauf lastenden Druck der Atmosphäre entgegensetzten, ermöglichen sie eine so rasche Expansion, daß eine erhebliche Temperatursteigerung nicht eintritt, sondern die Verbrennungswärme sofort nach ihrem Entstehen in mechanische Arbeit umgesetzt wird,

Die Maschine besteht aus einem oben offenen, senkrecht stehenden Cylinder, in welchem sich ein einziger Kolben bewegt. Dieser saugt bei Beginn jeder Arbeitsperiode, von dem laufenden Werk der Maschine getrieben, das explosive Gemenge von Leuchtgas und Luft an, dessen Eintritt durch den in der Nähe des Cylinderbodens befindlichen Steuerungsschieber geregelt wird. Hierauf wird das Gasgemenge durch eine kontinuierlich brennende Gasflamme entzündet. Es explodiert und schleudert, da die Einlaßkanäle am Cylinderboden vorher geschlossen werden, den Kolben in die Höhe. Dieser, durch den Mechanismus in keiner Weise am Aufwärtsgehen behindert, wird durch den Überdruck der Verbrennungsgase über Atmosphärendruck und Kolbengewicht so lange beschleunigt, bis infolge der Verdünnung unter dem Kolben dieser Überdruck Null wird. Die nutzbare Arbeit der Explosion ist jetzt größtenteils in lebendige Kraft des Kolbens umgesetzt, welche, indem der Kolben noch weiter fliegt, trotz des unter demselben entstehenden teilweisen Vacuums den Atmosphärendruck überwindet, bis die Geschwindigkeit aufgezehrt ist. Von diesem Augenblicke an würde der Kolben, durch den Atmosphärendruck und sein Eigengewicht getrieben, wieder herabfallen, wenn er sich auch nach unten völlig frei bewegen könnte. Daran wird er jedoch durch ein Klemmschaltwerk behindert, welches ein in die verzahnte Kolbenstange eingreifendes Zahnrad während des Kolbenniedergangs mit der Schwungradwelle verkuppelt und so dem niedergehenden Kolben den ganzen Widerstand der zu betreibenden Arbeitsmaschinen entgegengesetzt. Beim Niedergange wird mithin die Explosionsarbeit erst nutzbar gemacht. Es hat nun den Anschein, als müßten während des Kolbenniedergangs durch Kompression dieselben Spannungen unter dem Kolben hervorgerufen werden, welche beim Aufgang herrschten. Wie aus beistehendem Diagramm, Figur 3, hervorgeht, ist dies jedoch nicht der Fall. Das Vacuum unter dem Kolben hält sich vielmehr ziemlich lange konstant, und erst in der untersten Hälfte des Kolbenweges steigt der Druck bis auf eine Atmosphäre, worauf wegen der beginnenden Ausströmung der Verbrennungsrückstände eine wesentliche Drucksteigerung nicht mehr möglich ist. Dafs die Kompressionslinie so wesent-

Fig. 3.



Indikator-
diagramm einer atmosphärischen Gaskraft-
maschine von Otto u. Langen.

lich unter der Expansionslinie bleibt und daher die durch die Diagrammfläche gemessene Arbeit disponibel wird, hat seinen Grund in der Abkühlung der Gase durch die Cylinderwände, resp. den Wassermantel, welcher den untersten Teil des Cylinders umgiebt. In demselben braucht jedoch nicht fließendes Wasser zu circulieren, sondern durch Verbindung mit einem Kühlgefäß von mäfsigen Dimensionen kann die Wassertemperatur auf

30 bis 35° erhalten werden, so dafs ein Ersatz des Kühlwassers nicht erforderlich ist. Hieraus geht schon hervor, dafs während der Explosion kein grofser Wärmeverlust stattfinden kann. Wärmeausstrahlung während des Aufgangs ist Arbeitsverlust, deshalb ist es vorteilhaft, wenn der Aufgang möglichst schnell erfolgt. Beim Niedergang hingegen soll möglichst niedere Temperatur herrschen, da hierdurch das Vacuum vollkommener, also die Arbeitsleistung erhöht wird; in dieser Periode ist daher langsame Bewegung zweckmäfsig.

Die Regulierung der Maschine ist in verschiedener Weise bewirkt worden,

anfänglich dadurch, daß dem sinkenden Kolben auf dem letzten Teile seines Weges durch Drosselung der abziehenden Gase ein vom Regulator zu beeinflussender Widerstand entgegengesetzt und damit die Zeit zwischen zwei Kolbenflügen verändert wurde; später wurde jedoch am Ende jedes Kolbenniederganges eine wirkliche Hubpause eingeschaltet, welche so lange dauerte, bis durch Senken des Regulators infolge der Verzögerung der Schwungradbewegung der nächste Kolbenflug eingeleitet wurde.

Der Gasverbrauch dieser Maschine beträgt pro Stunde und effektive (gebremste) Pferdestärke 0,75 bis 1 cbm Leuchtgas, läßt also an Billigkeit des Betriebes kaum etwas zu wünschen übrig. Der einzige Übelstand des Systems ist ein höchst störendes Geräusch, von welchem jeder Kolbenflug begleitet ist. Dasselbe hat jedoch nicht verhindert, daß die Maschine innerhalb eines Zeitraumes von 10 Jahren in mehr als 4000 Exemplaren zur Ausführung gekommen ist.⁸⁾

Durch die Gasmaschine von Gilles (s. Musil a. a. O. 1878), welche auf demselben Arbeitsprinzip beruht, ist das Geräusch fast vollständig vermieden worden, indem zwei Kolben, nämlich ein Flugkolben und ein Arbeitskolben zur Verwendung kommen, von denen der erstere infolge der zwischen beiden stattfindenden Explosion emporgeworfen und durch ein Gesperre am Niedergang verhindert wird, während der letztere, welcher mittelst Pleuelstangen auf eine unter demselben liegende Kurbel wirkt, beim Niedergang einen Teil der Explosionsarbeit, beim Rückgang aber die durch das Vacuum erzeugte Arbeit auf die Welle überträgt.

Diese Maschine wurde bald nach ihrem Bekanntwerden durch den von der Deutzer Gasmotorenfabrik gebauten neuen Otto'schen Gasmotor überflügelt, welcher sich in kürzester Zeit sehr verbreitet hat und der früheren Otto'- und Langen'schen Konstruktion, wenn auch nicht hinsichtlich des Gasverbrauches, so doch durch ruhigen Gang bedeutend überlegen ist.

§ 10. Der Otto'sche Gasmotor, Fig. 1 u. 2, Taf. VII. Obgleich die Erfindearbeit auf dem Gebiete der Gasmaschinen eine sehr rege ist, so muß doch zur Zeit der Otto'sche Gasmotor (D. R. P. No. 532 u. 2735) als der eigentlich herrschende bezeichnet werden.

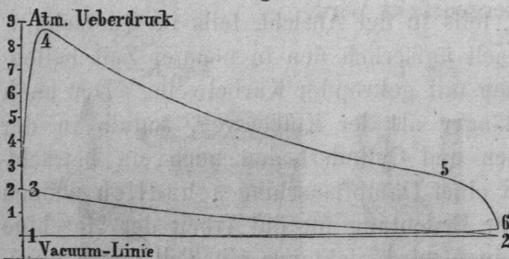
Die Maschine ist in Fig. 1, Taf. VII, teils in der Ansicht, teils im Querschnitt, in Fig. 2 im Grundriß dargestellt und ähnelt äußerlich den in neuerer Zeit beliebten kleinen schnellgehenden Dampfmaschinen mit gekröpfter Kurbelwelle. Der nach der Kurbel zu offene Cylinder ist etwas länger als der Kolbenweg, sodaß in der gezeichneten Kurbelstellung zwischen Kolben und Cylinderboden noch ein beträchtlicher Raum übrig bleibt, welchen man bei einer Dampfmaschine schädlich nennen würde, welcher jedoch hier von prinzipieller Bedeutung für die Arbeit der Maschine ist. Im Unterschied zu anderen Gasmaschinen wird nicht nur ein Teil des Kolbensusaugens zum Ansaugen des Gasgemisches verwendet, sondern es dient hierzu ein voller Kolbenausgang. Die Entzündung erfolgt, nachdem durch den Kolbenrückgang das Gasgemisch auf etwa 2 Atmosphären komprimiert worden ist, sodaß erst der folgende Kolbenausgang zur Arbeitsentwicklung verwendet wird. Diese Maschine ist daher, sofern sie nur bei dem zweiten Kolbenausgang Arbeit leistet, treffend als halbwirkend bezeichnet worden. Der Kolbenrückgang nach dem Arbeitshub dient zum Ausstoßen der Verbrennungsprodukte, sodaß zu dem vollen Arbeitsprozeß der Maschine 2 Kurbelumdrehungen erforderlich sind. Der in der gezeichneten Stellung

⁸⁾ Abbildungen und Beschreibung aller Details enthält ein Vortrag Reuleaux's in den Verh. d. Ver. zur Bef. d. Gewöbl. in Preußen 1867, S. 198—209.

verbleibende Raum ist bei Beginn eines neuen Arbeitsprozesses noch vom vorhergehenden mit gasförmigen Verbrennungsprodukten von atmosphärischer Spannung gefüllt. Die Gas- und Luftzuströmung wird durch einen an dem Cylinderboden befindlichen Schieber in der Weise reguliert, daß während der ersten Hälfte des Kolbenhubes Luft allein in den Cylinder tritt, während bei dem zweiten Teil des Hubes eine Mischung von Gas und Luft eingesogen werden kann. Die so entstehende Schichtung, zufolge deren dicht an dem Kolben Verbrennungsrückstände, dann Luft und endlich ein Gemisch aus Luft und Gas sich befindet, bleibt auch während der Kompression noch insoweit erhalten, als das Gemisch in unmittelbarer Nähe des Cylinderbodens, wo die Zündung erfolgen soll, am meisten mit Gas gesättigt ist. Die Zündung selbst erfolgt, indem durch den Schieber eine Verbindung zwischen einer kleinen von außen herein transportierten Vermittlungsflamme und dem Innern des Cylinders hergestellt wird, unmittelbar nach Überschreitung des Todpunktes, verbreitet sich aber infolge der eigentümlichen Schichtung nicht mit derselben Schnelligkeit wie bei gleichmäßiger Füllung des Raumes durch die ganze Masse. Infolge dessen hat die Verbrennung nicht in gleichem Maße wie bei anderen Gasmaschinen den Charakter der Explosion, sondern sie erfolgt ruhiger und ohne so bedeutende Erhitzung als sonst, wozu der Umstand noch wesentlich mitwirkt, daß die Verbrennungsprodukte, selbst von der Kolbenbewegung abgesehen, sofort Gelegenheit finden, sich etwas auszudehnen, indem sie die in demselben Raume befindlichen Verbrennungsrückstände noch weiter komprimieren. Hierdurch wird natürlich die Spannungs- und somit auch die Temperaturzunahme der Gase bedeutend eingeschränkt, also die Wärmeausstrahlung reduziert.

In welcher Weise die Spannungen sich nach der Zündung und während des ganzen Kolbenweges verändern, läßt sich aus dem beistehenden Indikatordiagramm Fig. 4 leicht erkennen. Es entspricht die Linie 1 2 dem Ansaugen des Gasgemisches, 2 3 der Kompression, 3 4 der Zündung und Verbrennung, 4 5 der Expansion, 5 6 der Vorausströmung und 6 1 der Ausströmung beim Kolbenrückgang.

Fig. 4.

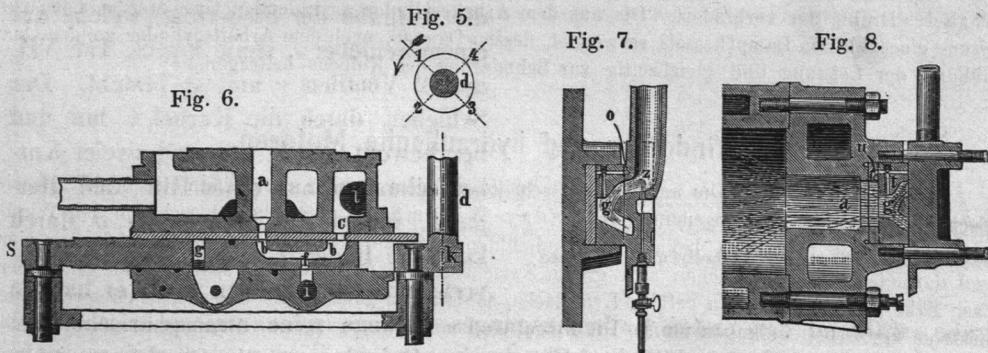


Indikatordiagramm eines 2-pferdigen Otto'schen Gasmotors.

Die richtige Ausführung dieser nacheinanderfolgenden Vorgänge ist die Aufgabe der Steuerung, welche aus einem Schieber *s*, siehe Fig. 2, Taf. VII, und 2 Ventilen *v* und *w* besteht. Der Schieber, durch die Kurbel *k* hin und her bewegt, macht während zweier Kurbeldrehungen nur einen Hin- und Hergang, indem die Steuerwelle *d* durch konische Räder *e e*, vom Übersetzungsverhältnis 1/2 getrieben wird; er hat die

Aufgabe, während des ersten Kolbenausganges anfangs reine atmosphärische Luft und dann ein Gemisch von Luft und Gas in den Cylinder eintreten zu lassen, während des Kolbenrückganges den Cylinder geschlossen zu halten, eine Vermittlungsflamme in einem seiner Kanäle an der kontinuierlich brennenden Entzündungsflamme zu entzünden und diese bei Beginn des zweiten Kolbenausganges nach vorheriger Druckausgleichung in das Innere des Cylinders zu übertragen. Das Ventil *v* dient zur Zulassung des Gases und gleichzeitig zur Regulierung der Maschine, während das Ventil *w* die Ausströmung der Gase aus dem Cylinder gestattet.

Während der Saugperiode durchläuft die Schieberkurbel den Quadranten 1—2, siehe Holzschn. 5, sodafs während dieser ganzen Zeit der innere Cyllinderraum durch die Kanäle *a*, *b*, *c*, siehe Holzschn. 6, mit dem Zuführungsrohre *l* atmosphärischer Luft kommuniziert. Gleichzeitig gestattet der nach dem Schieberdeckel führende Kanal *f* den Eintritt von Gas aus dem Gaszuführungsrohre *i*, wenn dieses selbst durch die Öffnung des Ventils *v* mit der Gasleitung in Verbindung gebracht ist, was, vergl. Fig. 1, Taf. VII, durch einen auf der Steuerwelle sitzenden Hebadaumen und den Winkelhebel *n n*, jedoch nur dann geschieht, wenn die Maschine so langsam geht, dafs eine neue Explosion erforderlich ist. Geht die Maschine infolge der Arbeitsleistung der vorhergehenden Explosion noch hinreichend schnell, so wird die Daumenmuffe durch den Regulator *r* so weit seitwärts verschoben, dafs sie den Hebel *n n* nicht trifft, mithin auch kein Gas in die Maschine einströmt. Die Maschine wird also durch das Ausbleiben einzelner Explosionen reguliert. Während der Compressionsperiode durchläuft die Schieberkurbel den Bogen 2—3 und der Kanal *g* des Schiebers tritt, wie aus dem Querschnitt, Holzschn. 7, ersichtlich ist, mit einer in der Schubrichtung laufenden Nut *o* in Verbindung, welche mit einem senkrecht durch den Schieberdeckel geführten Gasrohr kommuniziert. Gleichzeitig ist aber die Verbindung mit atmosphärischer Luft und einer Entzündungsflamme *z* hergestellt, sodafs sich in dem Kanale *g* eine Gasflamme bilden wird, welche im nächsten Moment, nach dem die Verbindung mit den Öffnungen des Schieberdeckels wieder unterbrochen ist, die Zündung bewirkt, indem die Kammer *g* mit dem Kanal *a*, Holzschn. 8, in Verbindung tritt. Zwischen beiden Momenten war es jedoch notwendig, den Druck in dem Kanal auf die Höhe des im Cylinder komprimierten Gemisches zu bringen; deshalb wird noch vor dem Zusammentreffen der Kanäle *g* und *a* die Kanalverbindung *g u* hergestellt, vermöge deren aus dem Cylinder Gas in den Kanal *g* eintritt und dort dieselbe Kompression hervorruft, welche im Cylinder herrscht, sodafs bei Herstellung der gröfseren Kommunikation zwischen Vermittelungsflamme und Cylinder durch die Kanäle *g* und *a*, die Gefahr des Verlöschens ausgeschlossen ist. Das Austrittsventil wird durch einen Hebel *p* geöffnet, welcher durch einen Hebadaumen regelmäßig nach je zwei Kurbeldrehungen niedergedrückt wird.



Der Cylinder ist mit einem Wassermantel umgeben, durch welchen jedoch nicht, wie bei Lenoir, ein konstanter Strom kalten Wassers zu fließen braucht. Es genügt vielmehr, denselben, wie bei der atmosphärischen Gaskraftmaschine, mit Zu- und Abfluss von und nach einem geschlossenen Reservoir von mäßiger Gröfse zu versehen, um die Temperatur auf richtiger Höhe zu erhalten. Die Schmierung des

Cylinders wird durch ein kleines Schöpfwerk automatisch vollzogen. Der Ölverbrauch ist jedoch beträchtlich. Der Gasverbrauch beträgt nach vielen Versuchen 1 cbm pro Stunde und effektive (gebremste) Pferdestärke, ist jedoch von der Qualität des Gases nicht ganz unabhängig.

Der Otto'sche Motor ist anfänglich nur in kleinen Dimensionen, namentlich von 1 bis 6 Pferdestärken, ausgeführt worden; neuerdings hat indessen die Deutzer Gasmotorenfabrik schon Maschinen von 60 Pferdestärken gebaut.

Für Bauten ist der Otto'sche Motor namentlich deshalb ganz besonders zu empfehlen, weil er sehr schnell zu montieren ist und in jedem Augenblick in Betrieb gesetzt werden kann. Da er nicht länger Gas konsumiert, als er wirklich arbeitet, so sind namentlich in Fällen häufig unterbrochenen Betriebes die täglichen Kosten gering im Vergleich zu Maschinen, welche erst längerer Zeit zum Anheizen bedürfen und dann während des vorübergehenden Nichtgebrauchs unter Feuer gehalten werden müssen.

Unter den zahlreichen patentierten Gasmotoren verdienen noch zwei Konstruktionen kurzer Erwähnung. Es sind dies die Maschinen von Bisschop und von Simon.

Die erstere, im Deutschen Reich in verbesserter Form unter No. 7925 patentiert, ist nur für sehr kleine Kräfte, in der Regel weniger als 1 Pferdestärke, bestimmt und hat sich trotz ihres beträchtlichen Gasverbrauchs wegen ihrer großen Einfachheit in der Kleinindustrie eingebürgert. Sie arbeitet mit vertikalem Cylinder und braucht überhaupt kein Kühlwasser, da die erforderliche Kühlung des Cylinders vermöge der großen Ausstrahlungsfläche eines den Cylinder umgebenden Systems von gußeisernen Rippen in ausreichendem Maße durch die Luft erfolgt.

Einige Abänderungen dieses Systems enthält der Gasmotor von Buß, Sombart und Co., D. R. P. No. 7896 und 8245.

Der Gasmotor von Simon, D. R. P. 2404, verdient wegen seines originellen Wirkungsprinzips besonderes Interesse. Bei dieser Maschine wird ein Gemisch aus Luft und Gas durch eine Kompressionspumpe auf ca. 5 Atmosphären verdichtet und so dem Arbeitscylinder zugeführt, in welchem es sich an einer unter Druck konstant brennenden kleinen Flamme allmählich entzündet und zunächst unter Volldruck, dann, nach Abschluß des Einströmungsschiebers, unter Expansion seinen Druck auf den Arbeitskolben überträgt.

Der Rückschlag der Entzündungsflamme in das Gaszuführungsrohr wird durch ein zwischen geschaltetes Drahtgitter verhindert. Die aus dem Arbeitscylinder austretenden Gase werden noch zur Speisung eines kleinen Dampfkessels verwendet, dessen Dämpfe, nach dem Arbeitscylinder geführt, zur Erhöhung der Leistung und gleichzeitig zur Schmierung des Kolbens beitragen.

c. Windräder und hydraulische Motoren.

§ 11. Windräder. Die neueren Fortschritte auf dem Gebiete der Windmotoren sind amerikanischen Ursprungs. Die sogenannte Halladay-Windmühle unterscheidet sich von den Windrädern der seither in Europa bekannten Windmühlen dadurch, daß sie dem Winde nicht nur vier Flügel darbieten, welche zwischen sich große Zwischenräume übrig lassen, sondern eine mit einer großen Zahl leichter Schaufeln gefüllte Kreisfläche, so daß der ganze dieser Kreisfläche entsprechende Windstrom zur Arbeit gelangen muß. Die Flügel sind mit Regulierungseinrichtungen versehen, durch welche sie automatisch aus dem Wind gestellt werden, wenn der Wind zu stark wird, so daß die Räder selbst bei starkem Sturm keinen Schaden leiden können. Das Halladay-Windrad hat sich auch in Europa in wenigen Jahren eingebürgert, vorzugsweise jedoch für dauernde Betriebe. Sein Auftauchen hat zahlreiche Abänderungen hervorgerufen, welche sich zumeist in Kl. 88 der deutschen Patente vorfinden.

§ 12. Hydraulische Motoren. Die hydraulischen Motoren für hohe Gefälle, welche für den vorübergehenden Betrieb von Baumaschinen hauptsächlich in Frage kommen, sind Turbinen und Wassersäulenmaschinen.

Unter den ersteren sind für hohe Gefälle besonders Partialturbinen, z. B. nach Zuppinger⁹⁾ oder Girard¹⁰⁾, zu empfehlen, welche sich leicht regulieren lassen und in allen Teilen bequem zugänglich sind. Man kann von ihnen bei guter Ausführung einen Wirkungsgrad von 70 bis 75% bestimmt erwarten. Beträgt der Wasserzufluß q Liter pro Sekunde und das Gefälle h Meter, so ist demnach die Leistung

$$N = \frac{q \cdot h}{75} \cdot 0,75 = 0,01 \cdot q \cdot h \text{ Pferdestärken.}$$

Diese Turbinen sind immer so anzuordnen, daß sie in freie Luft angeföhren, und zwar um den Gefällverlust thunlichst zu beschränken, möglichst dicht über dem Unterwasserspiegel. Die Wasserzuführung kann in eisernen Röhren erfolgen, in denen eine um so größere Geschwindigkeit und mithin ein um so größerer Gefällverlust durch Reibungswiderstände noch statthaft ist, je weniger man Ursache hat, mit der Wasserkraft zu sparen. Durchschnittlich ist 0,75 bis 1 m als Zuleitungsgeschwindigkeit pro Sekunde anzunehmen und hiernach der Rohrdurchmesser zu berechnen.

Unter den Wassersäulenmaschinen kleineren Kalibers sind neuerdings diejenigen von Schmid in Zürich, sowie die von Haag in Augsburg besonders bekannt und vielfach angewendet worden. Sie sind im Mechanismus prinzipiell nicht verschieden von den oscillierenden Dampfmaschinen, bei denen die Oscillationszapfen des Cylinders als Steuerungshähne dienen.

In Fig 16 u. 17, Tafel VII, ist der Wassermotor von Haag in Vertikalschnitt und Grundrifs dargestellt, während Fig. 18 u. 19, Taf. VII, Schnitte durch einen der Zapfenschieber in verschiedenen Drehlagen darstellen. In Fig. 18 sind alle Kanäle geschlossen; die Kurbel befindet sich im Todpunkt z. B. links. Dreht sich nun das Schwungrad im Sinne des Pfeiles Fig. 16, so oscilliert der Cylinder zunächst in entgegengesetztem Sinne, wobei, wie Fig. 19 zeigt, der mit e bezeichnete mittlere Zuleitungskanal mit der linken Abteilung des hohlen Zapfens in Verbindung kommt, so daß das Druckwasser auf die linke Kolbenfläche zu wirken beginnt, während das auf der rechten in Wirkung gewesene Wasser durch den Kanal a_2 zum Austritt kommt. Diese Verbindungen bleiben so lange erhalten, bis der Kolben in den anderen Todpunkt, rechts, gelangt. In diesem Moment tritt wieder die Stellung Fig. 18 ein, als Übergang nach der zu Fig. 19 symmetrischen, in welcher die rechte Cylinderhälfte Druckwasser bekommt, während links durch den Kanal a_1 Auströmung stattfindet.

Die Wassersäulenmaschinen haben einen sehr hohen Wirkungsgrad (80–90%) und sind hinsichtlich der Wartung außerordentlich bequem; namentlich eignen sie sich im Anschluß an städtische Wasserleitungen für den Betrieb kleinerer Arbeitsmaschinen. Bei den gewöhnlichen Wasserpreisen werden jedoch die Betriebskosten ziemlich hoch.

⁹⁾ Vergl. Rühlmann, Allgemeine Maschinenlehre, Bd. 1, S. 328. Braunschweig 1862.

¹⁰⁾ Vergl. Girard, Utilisation de la force vive de l'eau, Paris, sowie die meisten Lehrbücher über Turbinen.

Litteratur.

a. Selbständige Schriften.

- F. Redtenbacher. Die Luftexpansionsmaschine. Mannheim 1853.
 H. Boëtius. Die Ericsson'sche kalorische Maschine und Lenoir's Gasmaschine. Hamburg 1861.
 A. Musil. Die Motoren für Kleingewerbe. Vortrag. Klagenfurt 1875.
 G. Kosak. Katechismus der Einrichtung und des Betriebes der Motoren für Kleinindustrie. Wien 1877.
 A. Musil. Die Motoren für das Kleingewerbe. Braunschweig 1878.
 P. Heil. Die wichtigsten Kleinkraftmaschinen. Braunschweig 1878.
 E. Brauer und A. Slaby. Versuche über Leistung und Brennmaterialverbrauch von Kleinmotoren. Heft I. Berlin 1879.
 F. W. Bork. Die Kraftmaschine für das Kleingewerbe und ihre Prüfung auf Leistungsfähigkeit und Betriebskosten auf der Fachausstellung von Kraft- und Arbeitsmaschinen zu Erfurt. Berlin 1880.

b. Abhandlungen in Zeitschriften.

- Die Luftmaschine von Shaw. *Mechan. magazin*. Vol. 61. S. 98. 1854.
- Tresca. Expériences sur une machine à air chaud d'Ericsson. *Annales du Conservatoire des arts et métiers*. Vol. 1. S. 832. 1861.
- Theorie der Lenoir'schen Gasmaschine von G. Schmidt. Vortrag. *Zeitschr. des österr. Ing.- u. Arch.-Ver.* Heft IV u. V. S. 85. 1861.
- Cazin. Théorie élémentaire des machines à air chaud. *Annales du Conservatoire des arts et métiers* Vol. V. S. 651. 1864.
- Roper's Heißluftmaschine von G. Delabar. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 178. S. 249. 1865.
- Tresca. Expériences sur une machine à air chaud de Belou. *Bull. de la soc. d'encourag.* S. 9. 1867.
- Ziembinski. Zur Theorie der Gasmaschinen. *Civiling.* S. 147. 1868.
- Delabar. Mitteilungen über die neuesten Fortschritte bezüglich der Dampf-, Gas- und Heißluftmaschinen. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 194. S. 1—14, 169—188, 257—284 u. 361—388. 1869.
- Leclert. Théorie élémentaire de la machine à air. *Ann. du génie civil.* S. 769. 1871.
- G. Schmidt. Theorie der Lehmann'schen Heißluftmaschine. *Zeitschr. des Ver. Deutsch. Ing.* S. 1 u. 97. 1871.
- Air engines. *Engng.* Vol. 19. S. 200, 241, 287, 355, 417 u. 504. 1875.
- Wüst. Neuere Luftmaschinen. *Zeitschr. des Ver. Deutsch. Ing.* S. 407. 1877.
- Hock's Heißluftmaschine. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 225. S. 227. 1877.
- Machine à air chaud de Rider. *Ann. du génie civil.* S. 113. 1877.
- A. Slaby. Der geräuschlose Otto'sche Gasmotor. Vortrag. *Verh. d. Ver. zur Bef. d. Gewbfl. in Preussen.* Sitzungsbericht. S. 46. 1878.
- A. Slaby. Zur Theorie der geschlossenen Luftmaschinen. *Verh. d. Ver. zur Bef. d. Gewbfl. in Preussen.* S. 375. 1878.
- A. Slaby. Die Kleinmotoren auf der Pariser Weltausstellung 1868. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 230. S. 289 u. 373. 1878.
- Die Gasmaschine von Bisschop. *Revue ind.* S. 351. 1878.
- Stenberg's Heißluftmaschine. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 228. S. 391. 1878.
- A. Slaby. Theorie der Heißluftmaschine von Rennes. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 231. S. 119. 1879.
- A. Slaby. Neuere Gasmaschinen (Simon u Bisschop). Vortrag. *Verh. d. Ver. zur Beförderung d. Gewbfl. in Preussen.* Sitzungsbericht. S. 38. 1879.
- A. Slaby. Neuerungen an Luft- und Gasmaschinen. *Dingl. polyt. Journ.* Bd. 236. S. 1. 1880.
- A. Slaby. Die Kleinmotorenfrage und ihr augenblicklicher Standpunkt. Vortrag gehalten auf der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Ingenieure in Köln am 25. August 1880. *Zeitschr. d. Ver. Deutsch. Ing.* S. 497. 1880.
- R. Schöttler. Über die Heißluftmaschine von Rider. *Zeitschr. d. Ver. Deutsch. Ing.* S. 633. 1881.
-