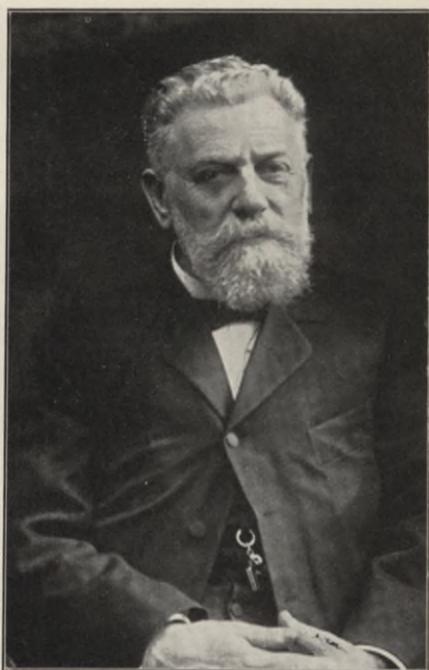


Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299726

x
2,195



Geo. W. Lieb Behrend.

Die
Abwärme-Kraftmaschine

(System Behrend-Zimmermann.)

Verfahren, mechanische Arbeit durch Abwärme
zu erzeugen, sowie eine wesentliche Erhöhung des thermischen
Wirkungsgrades der Dampfmaschine.

Vier Vorträge

von

Gottlieb Behrend,

Ingenieur in Hamburg.

9/12
No 24966.



Halle a. S.

Verlag von Wilhelm Knapp.

1902.

Handwritten signatures and numbers at the bottom of the page, including "210" on the right.



II 32256

Akc. Nr. 5092/51

Inhalt.

	Seite
Vortrag des Herrn G. Behrend in der Sitzung vom 17. Mai 1892 in dem Hamburger Bezirksverein deutscher Ingenieure über Verwendung von in der Dampfmaschine unbenutzter Wärme zur Arbeits- leistung	1
Hamburger Bezirksverein Deutscher Ingenieure. Sitzung vom 21. November 1899	11
Schleswig - Holsteinscher Bezirksverein Deutscher In- genieure. Sitzung vom 16. März 1900	14
Vortrag vom 18. März 1902 im Hamburger Bezirks- verein Deutscher Ingenieure	21

Vortrag

des

**Herrn G. Behrend in der Sitzung vom 17. Mai 1892 in dem
Hamburger Bezirksverein Deutscher Ingenieure
über Verwendung von in der Dampfmaschine unbenutzter
Wärme zur Arbeitsleistung.*)**

M. H. Ich beschäftige mich mit meinem Freunde Herrn Dr. Zimmermann in Ludwigshafen a. Rh. seit einigen Jahren mit der Frage, mittels Kaltdämpfen die im Wasser und der Luft vorhandene Wärme zur Arbeitsleistung zu verwenden. Wir glauben dieses Problem gelöst zu haben; indessen soll das nicht den Gegenstand meiner heutigen Mitteilungen bilden, vielmehr ist es nur der Ausgangspunkt, aus welchem das Ihnen heute Vorzutragende entstanden ist. Das Verfahren ist in allen Ländern patentiert.

Als Spezialist in Eis- und Kälteerzeugungsmaschinen habe ich mich viel mit Kaltdämpfen beschäftigt. Als Kaltdämpfe bezeichnen wir bekanntlich solche Dämpfe, die sich aus dem flüssigen Zustande bei sehr niedrigen Temperaturen bilden. Während der Siedepunkt des Wassers bei 100° C liegt, siedet z. B. Alkohol bei 78° , Äther bei 35° , schweflige Säure bei -10° , Methyläther bei -21° , Ammoniak bei -39° , Kohlensäure bei -78° C. Die Dämpfe dieser letzteren Flüssigkeiten, die zur Kälteerzeugung benutzt werden, nennen wir Kaltdämpfe. Sie haben bei 0° zum Teil schon erhebliche Spannungen; bei 15° hat z. B. schweflige Säure 2,7 Atm. absol., Methyläther 4,0 Atm., Ammoniak 7,2 und Kohlensäure 52 Atm. absol. Schon daraus geht hervor, dafs es bei gewöhnlichen Temperaturen möglich ist, diese hochgespannten Dämpfe zur Arbeitsleistung zu verwenden. Es würde ohne weiteres angehen, wenn wir nicht wegen des kostbaren Stoffes gezwungen wären, mit geschlossenen Maschinen zu arbeiten, d. h. den Stoff immer wieder

*) Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Band XXXVI, Seite 1135.

zu verwenden und ihn in seinen Anfangszustand zurückzuführen. So allerdings bietet dies einige Schwierigkeiten.

Die Maschine an sich ist eine umgekehrte Kompressions-Eismaschine. Wir verdichten in der Eismaschine den Kaltdampf unter Aufwendung von Arbeit und gleichzeitiger Abkühlung zur Flüssigkeit. Bei der darauf folgenden Verdampfung nehmen die Dämpfe ihre latente Wärme aus der Umgebung auf und erzeugen dadurch Kälte. Hier ist es also die Kompressionsarbeit, welche in Wärme verwandelt wird, d. h. es findet der umgekehrte Vorgang wie bei einer Dampfmaschine statt, und zwar ist es gleichgültig, ob mit Kalt- oder Warmdampf gearbeitet wird; im Prinzip bilden immer Dampfmaschine und Eismaschine eine Umkehrung ihres Prozesses. Bei Benutzung von Kaltdämpfen ist der Motor ebenso eine geschlossene Maschine wie die Eismaschine. Die Kaltdampf-Flüssigkeit wird dabei erwärmt und verdampft, expandiert im Dampfzylinder unter Arbeitsleistung, wird im Oberflächenkondensator kondensiert und mittels einer Speisepumpe in den Verdampfer zurückbefördert. Das ist nichts Besonderes, wie Sie sehen, und wird in Schiffsdampfmaschinen ebenso gemacht.

Es ist nun heute nicht mein Zweck, Ihnen über diese Maschinen allein zu berichten, sondern in deren Verbindung mit der Wasserdampfmaschine, und ich will zur Unterscheidung stets von Wasserdampfmaschinen und Kaltdampfmotor sprechen. (Kaltdampfmaschine darf ich nicht sagen, weil es sich in der Wissenschaft eingeführt hat, die Kompressions-Eismaschine so zu nennen.)

Sie wissen, daß alle Dämpfe eine sehr große Menge latenter Wärme besitzen, die zur Arbeitsleistung nicht nutzbar gemacht werden kann, eine Thatsache, mit der die Wissenschaft sich nun abgefunden hat, so daß der Begriff der theoretisch vollkommenen Dampfmaschine auf dieser Thatsache fußt, und danach der Nutzeffekt der Maschine festgestellt wird, nicht mehr nach dem Gesamtwärmeverbrauch. Andererseits wird bei der Expansion der Dämpfe ein geringer Teil der latenten Wärme in Arbeit umgesetzt, und zwar je weiter expandiert wird, desto mehr. Es folgt daher die Arbeitsleistung einer Dampfmaschine aus der Anfangs- und Endtemperatur der Dämpfe. Würden wir im Stande sein, die Expansion bis zu dem absoluten Temperatur-Nullpunkt, bis -273° , zu treiben, so würden wir auch die ganze latente Wärme zur Arbeitsleistung nutzbar machen können. Das drückt sich auch in der bekannten Leistungsformel der mechanischen Wärmelehre aus,

wie ich Ihnen noch zeigen werde. Jedenfalls hängt die Arbeitsleistung ab von der Anfangs- und Endtemperatur des arbeitenden Dampfes. Übrigens steht es auch fest, daß es vom theoretischen Standpunkt aus thermisch wie dynamisch ganz einerlei ist, welcher Dampf zur Arbeitsleistung verwendet wird. Wenn wir also eine andere Dampfart in den Arbeitsprozess der Dampfmaschine eingreifen lassen, wo der einen durch ihre Eigenschaften Grenzen zu weiterer Expansion gesteckt sind, so kann sehr wohl ein wesentlicher praktischer Nutzen entstehen.

Wasserdampfmaschinen arbeiten nach oben bis zu 190°C mit 13 Atm. absoluter Spannung. Nach unten ist ihnen eine baldige Grenze gesteckt, im allgemeinen 60° . Die untere Grenze liegt nicht bei der Temperatur der ablaufenden Kondensationswassermenge, sondern bei der Temperatur, die dem Vakuum der Luftpumpe entspricht. Diese liegt aber bei mit voller Kraft arbeitenden Maschinen etwa bei 60°C , entsprechend 61 cm Vakuum. Ein Vakuum von 67 cm entspricht 50°C . Die vorhin erwähnten Kaltdämpfe sind nun das Mittel, um die Endtemperatur weiter nach unten zu verlegen, weil bei diesen noch immer Spannungen über der Atmosphäre vorhanden sind, wo Wasserdampf ein so erhebliches Vakuum besitzt, daß es durch die Luftpumpe nicht mehr erzeugt werden kann. Wird der Arbeitsprozess der Wasserdampfmaschine bei 60° als beendet gedacht (ich spreche natürlich von einer Kondensationswasser-Dampfmaschine), und tritt alsdann die Arbeitsleistung durch den Kaltdampf ein, so kann die Expansion bequem bis 20° getrieben werden. Die für diesen Zweck sich besonders gut eignenden Kaltdämpfe sind Ammoniak und schweflige Säure, die beide in Eismaschinen Verwendung finden, und zwar beträgt bei den Temperaturen 60° und 20° die Spannung des Ammoniaks $25_{,8}$ bzw. $8_{,5}$ Atm. absol., die Spannung der schwefligen Säure $10_{,7}$ bzw. $3_{,2}$ Atm. absol. Die schweflige Säure arbeitet also mit Spannungen, die auch in Wasserdampfmaschinen nicht ungewöhnlich sind. Während man in Deutschland größtenteils in Eismaschinen Ammoniak benutzt, wird z. B. in Frankreich fast ausschließlich schweflige Säure verwendet. Die Expansion in der Eismaschine muß bis möglichst tief unter den Gefrierpunkt gehen, wobei die schweflige Säure eine unter der atmosphärischen liegende Spannung hat, z. B. bei -15° hat sie $0_{,8}$ Atm. Es kommt dann wohl vor, daß durch die Stopfbüchsen etwas Luft in die Maschine tritt, welche Ursache werden kann zur Bildung von Schwefelsäure

durch Sauerstoffaufnahme aus der Luft. Obwohl dieser Übelstand nicht sehr scharf hervortritt und Zerstörungen an Schwefligsäure-Eismaschinen doch selten vorkommen, so sind doch die Schwefligsäure-Eismaschinen in Deutschland nicht gerade sehr beliebt, während sie in Frankreich, wie gesagt, allgemein angewendet werden. In meinem Falle nun findet die Expansion nur bis $+ 20^{\circ}$, d. h. bis $3,2$ Atm. absol. statt, so daß in den Stopfbüchsen ein Überdruck gegen die Atmosphäre vorhanden ist, der das Eindringen von Luft unmöglich macht. Es eignet sich daher für diesen Zweck die schweflige Säure ganz besonders gut.

Wird nun also die Arbeitsmaschine kombiniert aus einer Wasserdampfmaschine und einem Kaltdampfmotor, so gewinnen wir zur Arbeitsleistung in ersterer das Temperaturgefälle von 190° bis 60° , in letzterer von 60° bis 20° , und man gewinnt theoretisch an Arbeit nach dem Wirkungsgrad $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ statt $\frac{463 - 333}{463} = 0,28$

dann im ganzen $\frac{463 - 293}{463} = 0,37$ oder etwa mehr: 32% von der

Leistung der Wasserdampfmaschine. Das bezieht sich auf Wasserdampfmaschinen, die mit 12 Atm. Überdruck arbeiten. Rechnen wir mit solchen, die mit nur 6 Atm. Überdruck arbeiten, so stellt sich das Ergebnis noch vorteilhafter, weil die Anfangstemperatur dann nur $165^{\circ} \text{ C} = 438^{\circ}$ absolut ist. Der Wirkungsgrad der ersteren ist dann nur $\frac{438 - 333}{438} = 0,24$, während mit dem Kalt-

dampf $\frac{438 - 293}{438} = 0,33$, d. h. $37\frac{1}{2}\%$ mehr der Arbeitsleistung der Wasserdampfmaschine gewonnen werden.

Diese 32 bzw. $37\frac{1}{2}\%$ stellen den Gewinn an Arbeit durch die Verbindung der Wasserdampfmaschine mit dem Kaltdampfmotor dar.

Nun liegt die Sache aber in der Praxis noch ganz anders. Das Vorgetragene fußt auf der Annahme, daß wir es mit einer theoretisch vollkommenen Dampfmaschine zu thun haben. Die Arbeitsleistung einer solchen wird aus der Anfangs- und Endtemperatur unter der Annahme berechnet, daß keinerlei Dampf in der Wasserdampfmaschine verloren geht, keine Abkühlungen vorkommen, und daß alle überhaupt durch die Expansion nutzbar zu machende Wärme auch in der That in Arbeit verwandelt werden kann.

Nach der bekannten Leistungsformel der Thermodynamik würde eine solche theoretisch vollkommene Wasserdampfmaschine bei 13 Atm. absol. Anfangsspannung pro PS₁-Std. 4,8 kg Wasserdampf gebrauchen, oder bei 7 absol. Atm. Anfangsspannung 5,8 kg. Dabei ist 60° entsprechend 0,2 Atm. Endspannung vorausgesetzt.

Dieser geringe Dampfverbrauch wird ja bekanntlich überhaupt bei weitem nicht in der Praxis erreicht. Es geht außerordentlich viel Wärme und Dampf verloren durch die schädlichen Räume, durch Druckverluste wegen nicht vollkommen erreichbarer Expansion in jedem Cylinder mehrcylindriger Wasserdampfmaschinen, und endlich durch die erheblichen Abkühlungen des Wasserdampfes. Letztere betragen bekanntlich je nach der Güte der Maschine 10—30 % der im Wasserdampf benutzten Wärme. Es würde also eine allerbeste Wasserdampfmaschine von nur 5,5 kg Wasserdampfverbrauch pro PS₁-Std. mit $\frac{4,8}{5,5} = 87\%$ Nutzeffekt arbeiten; die bekannten Schnelldampfmaschinen des „Fürst Bismarck“ mit 6,6 kg Wasserdampfverbrauch arbeiten mit $\frac{4,8}{6,6} = 73\%$ Nutzeffekt.

Gute Kondensationsmaschinen von 10 kg Wasserdampfverbrauch haben $\frac{4,8}{10} = 48\%$ Nutzeffekt, Hochdruckmaschinen mit 25 kg Wasserdampfverbrauch, zum Vergleich unter gleichen Annahmen gerechnet, nur $\frac{4,8}{25} = 19\%$ Nutzeffekt. Es geht also in diesen Maschinen von 13—81 % Dampf und dessen Wärme ganz verloren. Da es möglich ist, einen Teil dieser verloren gehenden Dampfwärme mit Hilfe des Kaltdampfmotors ebenfalls zur Arbeitsleistung nutzbar zu machen, so addiert sich dieser Gewinn zu den oben berechneten 32 bzw. 37½ %.

Der Gesamtgewinn läßt sich für jeden einzelnen Fall nach der bekannten Leistungsformel der Thermodynamik

$$AL = q_1 - q_2 + r_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1} - T_2 (\tau_1 - \tau_2) \text{ W. - E.}$$

berechnen, worin q die Flüssigkeitswärme, r die gebundene Wärme, T die absolute Temperatur und τ das Wärmegewicht des Dampfes darstellt. Das letzte ganz unerhebliche Glied: $A [\sigma \cdot (p_1 - p_2)]$, mit

dem Vorzeichen +, das mir also bei meinen Berechnungen zu gute kommen würde, lasse ich der Einfachheit der Rechnungen wegen fort.

Aus der Formel ergibt sich übrigens, dafs, wenn $T_2 = 0$ wird, d. h. wenn die Expansion bis -273°C fortgesetzt werden kann, die Leistung $L = q + r =$ der Gesamtwärme des Dampfes ist. Es könnte also in diesem Falle die ganze dem Dampfe zugeführte Wärme in Arbeit verwandelt werden. Wenn wir also den Kondensator der Dampfmaschinen in den Weltenäther versetzen könnten, so würden unsere Maschinen sehr wenig Dampf verbrauchen, und die gesamte aus den Kohlen bei der Verbrennung zugeführte Wärme würde in Arbeit verwandelt. Was nicht vollständig zu erreichen ist, wollen wir hier wenigstens so weit ausnutzen, als bei unseren irdischen Verhältnissen möglich ist.

Die Einrichtung ist derart getroffen, dafs der Kaltdampfmotor ganz in der Konstruktion einer gewöhnlichen Dampfmaschine derart mit der Wasserdampfmaschine verbunden ist, dafs in einem Oberflächenkondensator der Wasserdampfmaschine die Stelle des Kondensationswassers durch die Kaltdampfflüssigkeit ersetzt wird, an welche die gesamte Wärme des Wasserdampfes abgegeben werden mufs, indem der Wasserdampf den Kondensator nur als Kondensat verläfst. Die Kaltdampfflüssigkeit läuft dagegen in dem geschlossenen Kaltdampfmotor um, und zwar in folgender Weise.

In dem Oberflächenkondensator verdampft die Kaltdampfflüssigkeit, die durch den kondensierenden Wasserdampf bis 60° erwärmt ist, bei dieser Temperatur; die Kaltdämpfe treten in den Kaltdampfzylinder, expandieren dort unter Arbeitsleistung und werden dann in einem Oberflächenkondensator durch Abkühlung mittels Kühlwassers kondensiert und endlich durch eine Speisepumpe als Flüssigkeit in den Verdampfer zurückgepumpt. Die Abkühlung bis 20° oder mindestens 25° ist sehr leicht ausführbar, weil wir es hier nicht mit zu erzeugendem Vakuum zu thun haben, welches die Ursache ist, weshalb bei Wasserdampf im Kondensator keine niedrigen Temperaturen erreicht werden können.

Ich will nun am Ammoniak Ihnen vorrechnen, wie viel Nutzen durch die beschriebene Kombination erreicht werden kann, und zwar nicht allein theoretisch, sondern auch durch Benutzung des nutzlos durch die Wasserdampfmaschine gehenden Wasserdampfes und dessen Wärme.

1. Beste Wasserdampfmaschine mit 12 Atm. Überdruck und 5,5 kg Wasserdampfverbrauch für 1 PS₁-Std.

1 kg Wasserdampf enthält 664,6 W.-E. Gesamtwärme,

5,5 kg also 3655 W.-E.

davon ist in Arbeit umgewandelt 1 PS = $\frac{75 \cdot 3600}{424} = 636$ „

bleibt 3019 W.-E.;

ferner ist abzuziehen die Wärme, welche mit dem kon-

densierten Wasserdampf abgeführt wird, $5,5 \times 60 = 330$ „

Rest 2689 W.-E.,

die zur Verdampfung des Ammoniaks verwendbar bleiben.

Die Gesamtwärme des Ammoniaks bei 60° C ist . . 335 W.-E.

abzüglich Flüssigkeitswärme nach der Expansion bei 20° 22 „

bleibt Verdampfungswärme für 1 kg NH₃ 313 W.-E.

Es werden also mit 2689 W.-E. verdampft $\frac{2689}{313} = 8,6$ kg NH₃

von 60° C. Die Leistung dieser NH₃-Dämpfe in dem Kaltdampfmotor ist nun nach der obigen Leistungsformel

$$8,6 \left[75,38 - 22 + 259,33 \left(\frac{333 - 293}{333} \right) - 293 (0,2494 - 0,0774) \right] \\ = 8,6 \times 34,5 = 296,77 \text{ W.-E.},$$

oder, da 1 W.-E. 424 mkg leisten kann = $296,77 \times 424 = 125800$ mkg

i. d. Std. = $\frac{125800}{75 \times 3600} = 0,466$ PS.

Da die Kaltdämpfe bei Temperaturen arbeiten, die der Lufttemperatur nahe liegen, so ist die Abkühlung unbedeutend, und es wird ein Nutzeffekt von 80 % gegenüber dem vorhin bei Wasserdampfmaschinen festgestellten von 87 bzw 73 % wohl angemessen sein. Es wird also effektiv geleistet von dem Kaltdampfmotor $0,466 \times 0,8 = 0,373$ PS. Im ganzen wird also durch die Kombination geleistet 1,373 PS mit 5,5 kg Wasserdampf, oder für 1 PS-Std. sind erforderlich $\frac{5,5}{1,373} = 4,0$ kg Wasserdampf. Die Regenerativmaschine gewährt also 37 % Nutzen.

Sie sehen, daß es möglich ist, durch diese Kombination, wir nennen sie Regenerativ-Dampfmaschine, wegen der Wiederbenutzung des Dampfes, einen besseren Erfolg zu erzielen, als es theoretisch mit der Wasserdampfmaschine in den dieser angewiesenen Temperaturgrenzen möglich ist. Die theoretisch vollkommene Dampf-

maschine würde in diesen Temperaturgrenzen 190° bis 20° allerdings nur 3,68 kg Wasserdampf gebrauchen. Durch die Kombination arbeiten wir also mit $\frac{3,68}{4} = 92\%$ Nutzeffekt. Dieser ist deshalb so hoch, weil der in der Wasserdampfmaschine nutzlos durchgehende Dampf: $5,5 - 3,68 = 1,82$ kg, zur Verdampfung des NH_3 noch aufser jenen 3,68 kg verwandt wird.

Nun will ich die Rechnung an einigen anderen Dampfmaschinen machen, wie solche in der Praxis vorkommen. Es wird auf die Dauer kaum möglich sein, Wasserdampfmaschinen mit nur 5,5 kg Wasserdampfverbrauch arbeiten zu lassen. Ich will deshalb als zweites Beispiel die Rechnung an der Maschine des Schnelldampfers „Fürst Bismarck“ machen, der mit 6,6 kg Dampfverbrauch für 1 PS_i-Std. arbeitet.

2. Gesamtwärme 1 kg. = 664,6 W.-E., für 6,6 kg also . 4386 W.-E.
 ab in Arbeit umgewandelt 1 PS = $\frac{75 \cdot 3600}{424} = \dots 636$ „

bleibt 3750 W.-E.,

ferner ab die nicht nutzbar gemachte Endtemperatur

$60 \times 6,6 \dots \dots \dots 396$ „

Rest 3354 W.-E.

Damit werden verdampft $\frac{3354}{313} = 10,7$ kg NH_3 von 60° C.

Die Leistung ist also nach obiger Berechnung $10,7 \times 34,5$
 = 369 W.-E. oder = $369 \times 424 = 156456$ mkg i. d. Std. = $\frac{156456}{75 \cdot 3600}$
 = 0,58 PS oder bei 80% Nutzeffekt $0,58 \times 0,8 = 0,464$ PS.

Das ergibt an Wasserdampfverbrauch für 1 PS-Std. $\frac{6,6}{1,464}$
 = 4,5 kg Wasserdampf. Die Regenerativmaschine gewährt also 46% Nutzen.

3. Eine Kondensations-Wasserdampfmaschine mit 10 kg Dampfverbrauch arbeite mit 7 Atm. absol., also mit 165° Anfangstemperatur. Gesamtwärme von 1 kg Wasserdampf = 656,5 W.-E.,

10 kg haben also 6565 W.-E.

ab 1 PS, in Wärme umgewandelt 636 „

bleibt 5929 W.-E.;

ab die nicht nutzbar gemachte Endtemperatur $60 \times 10 \dots \dots \dots 600$ „

Rest 5329 W.-E.

Damit werden verdampft $\frac{5329}{313} = 17,0$ kg NH_3 .

Leistung nach obiger Formel $17 \times 34_{,5} = 586_{,5}$ W.-E. oder $586_{,5} \times 424 = 248676$ mkg i. d. Std. $= \frac{248676}{75 \cdot 3600} = 0_{,92}$ PS, oder bei 80 % Nutzeffekt $= 0_{,736}$ PS; das ergibt an Wasserdampfverbrauch für 1 PS-Std. $\frac{10}{1_{,736}} = 5_{,7}$ kg Wasserdampf. Die Regenerativmaschine ergibt 73 % Nutzen.

4. Nehmen wir eine Hochdruckmaschine von 25 kg Wasserdampfverbrauch für 1 PS-Std., so ist zu bemerken, daß deren Verbesserung mittels Regenerativmaschine auf zweierlei Art gemacht werden kann. Falls nämlich keine Kondensation des Wasserdampfes vorgenommen werden soll, arbeitet die erstere zwischen 165° C und 102° C, die letztere zwischen 60° und 20°. Es geht also das Temperaturgefälle von 102° bis 60° verloren. Da aber ohne weiteres der gemeinschaftlich als Kondensator der Wasserdampfmaschine und als Verdampfer der Regenerativmaschine dienende Röhrenapparat eingeschaltet werden kann, so wird thatsächlich die Wasserdampfmaschine ebenfalls wie in den früheren Beispielen zwischen den Temperaturen 165° und 60° und der Kaltdampfmotor zwischen 60° und 20° arbeiten. Bei ersterer stellt sich daher der Gewinn an Kraft durch die Kondensation nach dem Wirkungsgrad $\frac{438-375}{438} : \frac{438-333}{438}$, d. h. wie 63:105, oder der Gewinn durch die Kondensation ist für 1 PS der ursprünglichen Leistung $0_{,66}$ PS. Dagegen stellt sich der Nutzen der Regenerativmaschine bedeutend höher, wie die Rechnung ergibt.

Gesamtwärme von 25 kg Wasserdampf $656_{,5} \times 25 = 16412$ W.-E.
 ab Wärme für 1 PS 636 „
bleibt 15776 W.-E.,

ab die nicht nutzbar gemachte Endwärme $60 \times 25 = 1500$ „
Rest 14276 W.-E.

Damit werden verdampft $\frac{14276}{313} = 45_{,6}$ kg NH₃ von 60° C. Die Arbeitsleistung ist dann $45_{,6} \times 34_{,5}$ W.-E. = 1573 W.-E. oder $1573 \times 424 = 666952$ mkg i. d. Std. $= \frac{666952}{75 \cdot 3600} = 2_{,47}$ PS, d. h. bei 80 % Nutzeffekt $2_{,47} \times 0_{,8} = 1_{,98}$ PS.

Es wird also im ganzen gewonnen durch die Kondensation nur 0,366 PS
 durch den Kaltdampfmotor aber 1,98 „
 zusammen Gewinn 2,364 PS

oder 264 % Gewinn.

An Dampf wird nun gebraucht gegenüber obigen 25 kg für 1 PS-Std. $\frac{25}{3,64} = 6,9$ kg Wasserdampf. Sie sehen, daß aus einer schlechten Dampfmaschine auf diese Weise eine vorzüglich ökonomisch arbeitende gemacht werden kann.

Während also bei den vier Beispielen der Wasserdampfverbrauch ansteigt von

5,5	6,6	10	25 kg,
wird er mit dem Kaltdampfmotor			
4,0	4,5	5,7	6,9 „

Entsprechend vermindert sich natürlich auch der Kohlenverbrauch, und zwar bei neunfacher Verdampfung

von 0,361	0,73	1,11	2,78	} kg Kohle für 1 PS-Std.
auf 0,44	0,50	0,63	0,77	

Der so außerordentlich steigende Nutzen stammt hauptsächlich aus der Wiederverwendung des nutzlos durch die Maschinen gehenden Wasserdampfes, und daraus erklärt sich der sich steigernde Gewinn bei größerem Dampfverbrauch. Der Nutzen der Wasserdampfkondensation ist im Vergleich dazu gering. Die Maschinen werden übrigens durchaus nicht kompliziert. Es geht aus den Zahlen deutlich hervor, daß ohne Verlust die Endtemperatur des Wasserdampfes, die ja gleichzeitig Anfangstemperatur des Kaltdampfes ist, etwas verschoben werden kann, ohne wesentlichen Einfluß auf den Wirkungsgrad auszuüben. Der Nutzen durch Vergrößerung der Temperaturdifferenz ist ja auch nicht so groß wie derjenige durch Beheizung der Kaltdämpfe mittelst des überflüssigen Dampfes, wie oben mit Zahlen festgestellt. Wenn man daher eine dreicylindrige Wasserdampfmaschine zu Grunde legt, so kann die Einrichtung so getroffen werden, daß der dritte Cylinder für Kaltdämpfe dient, während die ersten beiden Cylinder mit Wasserdampf arbeiten. Es wird dann der Röhrenapparat nur eingeschaltet, der gleichzeitig zur Kondensation der Wasserdämpfe und Verdampfung der Kaltdämpfe dient. Im übrigen werden keine wesentlich neuen Apparate oder Maschinenteile gebraucht, dagegen können die Dampfkessel bei gleicher Arbeitsleistung sehr viel kleiner werden und

daher auch in Dampfschiffen die Kohlenräume kleiner und die mitzuschleppende Kohlenlast geringer sein. Die Stopfbüchsen sind bei Eismaschinen schon so eingerichtet, daß keine Dämpfe entweichen. Wenn man aber darin vorsichtig sein will, um die Belästigung in Schiffsräumen zu vermeiden, so legt man die Stopfbüchsen in Behälter, die mit Absorptionsflüssigkeit gefüllt sind, um die entweichenden Dämpfe aufzunehmen. Das ist leicht und ohne Umstände zu machen.

Zum Schluß will ich noch die Menge Kondensationswasser feststellen, die gebraucht wird, und zwar an dem zweiten Beispiel mit 6,6 kg Wasserdampfverbrauch. Es werden dabei zur Verdampfung des Kaltdampfes benutzt 3354 W.-E. Davon werden zur Arbeitsleistung in dem Kaltdampfmotor noch 369 W.-E. verwendet, so daß abgeführt werden 2985 W.-E. Wird das Kühlwasser nur um 5° erwärmt, so werden $\frac{2985}{5} = 597$ l Wasser gebraucht, oder für eine geleistete PS, $\frac{597}{1,464} = 408$ l. Bei Erwärmung um 10° nur 204 l, also höchstens so viel wie bei gewöhnlichen Dampfmaschinen; denn z. B. eine Maschine mit 10 kg Wasserdampfverbrauch gebraucht für 1 PS-Std. bei 25fachem Kondensationswasseraufwand 250 l. Daraus wird klar, daß eine untere Temperaturgrenze von 20° bis höchstens 25° sehr wohl zulässig ist.

Es soll mir eine Genugthuung sein, wenn die künftige Verbesserung der Dampfmaschinen diesen vorgezeichneten Weg gehen wird, wovon ich überzeugt bin. Abgesehen von dem Vorteil an besten Wasserdampfmaschinen, wird der ungeheure Nutzen an bestehenden Maschinen klar, deren Arbeitsleistung ohne Steigerung des Kohlenverbrauches und ohne Vergrößerung der Dampfkessel ganz bedeutend gesteigert werden kann.“

Hamburger Bezirksverein Deutscher Ingenieure.

Sitzung vom 21. November 1899. *)

Herr Gottlieb Behrend berichtet über die Erfolge der Maschinen zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades der Dampfmaschinen nach den Patenten Behrend-Zimmermann. Bereits am 17. Mai

*) Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Band XXXXIV, S. 318.

1892 hatte er über diesen Gegenstand im Bezirksverein gesprochen und die wahrscheinlich zu erwartenden bedeutenden Erfolge rechnerisch bestimmt. Inzwischen haben sich die Patentinhaber eifrig bemüht, die Maschine zur Ausführung zu bringen. Sie sind dabei ganz außerordentlich vielen Schwierigkeiten und Widerwärtigkeiten begegnet und haben viele Vorurteile zu bekämpfen gehabt. Endlich hat Herr Prof. Josse, der Leiter des Maschinenlaboratoriums der Technischen Hochschule in Charlottenburg, die Wichtigkeit der Erfindung erkannt und sich bereit erklärt, Versuche damit vorzunehmen. Die für die Verhältnisse passende Maschine ist von ihm konstruiert und in der Berliner A.-G. für Eisengießerei und Maschinenfabrikation ausgeführt worden, und die gründlichsten Versuche sind von ihm während mehrerer Monate angestellt worden. Die Ergebnisse entsprechen fast genau den Rechnungen, welche vom Vortragenden angestellt sind, der seine höchste Befriedigung darüber ausspricht, daß er den Wert der Maschine vorher so genau bestimmt habe, ohne sich in Erfinderphantasien zu bewegen.

Josse sagt in seinen „Mitteilungen aus dem Maschinenlaboratorium der Kgl. Technischen Hochschule zu Berlin“, daß die Maschine einen wesentlichen Fortschritt der Dampfmaschine darstelle. Es seien an einer Wasserdampf-Verbundmaschine vom „Vulkan“ in Stettin mit 8,6 kg PS₁-Std. Dampfverbrauch noch 56 % der indizierten Leistung der Wasserdampfmaschine mit demselben Wärmehinzuverbrauche hinzugewonnen, so daß der Dampfverbrauch auf 5,5 kg heruntergegangen sei.

Je größer der Dampfverbrauch der Wasserdampfmaschine sei, desto größer werde der Nutzen (vergl. Zeitschrift 1892, S. 1135). Durch die Versuche sei festgestellt worden, daß auf je 15 kg Wasserdampf, die durch die Wasserdampfmaschine hindurchgehen, 1 PS₁ zusätzlich gewonnen werden könne. Wenn man z. B. eine Wasserdampfmaschine von 3000 PS mit 7,5 kg PS₁-Std. Dampfverbrauch habe, so könnten durch die Behrend-Zimmermann'sche Maschine mit demselben Aufwande von Kohlen noch 1500 PS erzeugt werden. Eine Maschine von 3000 PS mit 5 kg Dampfverbrauch gewinne noch 1000 PS, so daß sich der Dampfverbrauch auf 3,75 kg verringere.

Die Maschine ist ein Kaltdampfmotor. Die Erfinder haben früher bei ihren Versuchen mit Ammoniak gearbeitet, während im Maschinenlaboratorium schweflige Säure benutzt worden ist, welche den großen Vorteil niedriger Spannungen (10—12 Atm.) hat und

die Möglichkeit bietet, ohne Schmieröl zu arbeiten. Genaue Versuche haben dies vollkommen klar gestellt. Der Kaltdampf arbeitet geschlossen in der Maschine, ähnlich wie bei den bekannten Eismaschinen. An die Wasserdampfmaschine ist ein Oberflächenkondensator angehängt, in dem sich die Kaltdampf-Flüssigkeit befindet. Der aus der Wasserdampfmaschine austretende Dampf dient zu ihrer Verdampfung und kondensiert dabei ganz wie sonst. Der Kaltdampf wird dann in einen Arbeitscyliner geführt, in dem er expandiert und Arbeit leistet; darauf wird er in einem Oberflächenkondensator mittels Kühlwassers gekühlt und durch eine Speisepumpe in den Verdampfer (ersten Kondensator) zurückgeführt. Die Maschine ist einfach und erfordert wegen der großen Dichte der Kaltdämpfe nur geringe Abmessungen.

Der große Erfolg der Maschine liegt weniger in der Vergrößerung des Temperaturgefälles nach unten, die mit der Wasserdampfmaschine nicht erreicht werden kann, als vielmehr darin, daß diejenige Menge Dampf- und Wärme, welche durch die Wasserdampfmaschine hindurchgeht, ohne Arbeit zu leisten, noch zur Verdampfung der Kaltdampf-Flüssigkeit Verwendung findet. Der Redner hat das in seinem früheren Vortrage klar erläutert und will es hier nur in den Umrissen andeuten. Die Wärme, welche nach den Gesetzen der Thermodynamik einer Pferdestärkenstunde entspricht (636 W.-E.), ist etwa gleich der Gesamtwärme von 1 kg Wasserdampf. Was also pro PS.-Std. mehr von der Wasserdampfmaschine verbraucht wird, kann, soweit es nicht durch Oberflächenkühlung (Wandungen u. s. w.) verloren geht, zur Erzeugung der Kaltdämpfe benutzt werden. Daraus wird ohne weiteres klar, daß Maschinen mit größerem Wasserdampfverbrauch durch Anhängung des Kaltdampf- und Motors auch zunehmenden Vorteil erlangen.

Der Redner hat schon hervorgehoben, daß die Erfinder vielerlei Schwierigkeiten begegnet sind. Um so mehr sei zu betonen, welcher große Verdienst Prof. Josse zuzusprechen ist. Der Bau und Vertrieb der Maschinen werde in nächster Zeit von großen Industriegesellschaften unter technischem Beirat des Herrn Josse und der Erfinder durchgeführt werden.

Schleswig-Holsteinscher Bezirksverein Deutscher Ingenieure.
Sitzung vom 16. März 1900.

Herr Geh.-Rat Veith erteilt Herrn Ingenieur Gottl. Behrend das Wort zu seinem Vortrag über „Abwärme-Kraftmaschinen“ und führt derselbe folgendes aus:

Seit vielen Jahren habe ich mich mit der maschinellen Kältebranche beschäftigt, und bin ein auch in der betreffenden Litteratur bekannter Spezialist. Die Branche hat mancherlei Wandlungen durchgemacht, ist aber schliesslich zu dem Resultate gelangt, mit Dämpfen, deren Siedepunkt unter dem Gefrierpunkt des Wassers liegt, zu arbeiten, und zwar in geschlossenen Maschinen. Die Dämpfe unterliegen sämtlich ähnlichen Bedingungen, wie Wasserdämpfe, freilich aber bei anderen Temperaturen. Sie unterliegen alle einem bestimmten Gesetz, jeder Dampf bei anderer Temperatur.

Wir Kältemaschinen-Ingenieure sind gezwungen, uns lebhaft mit der Thermodynamik zu beschäftigen, die bisher noch nicht in so

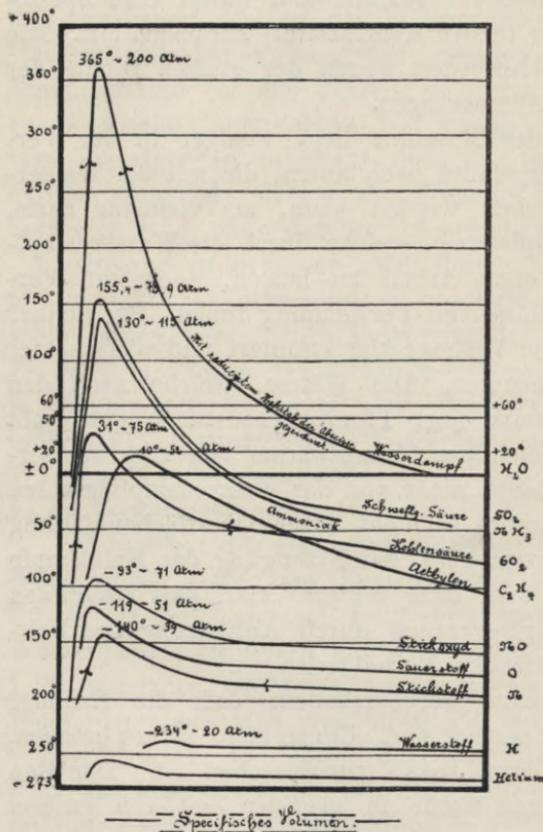


Fig. 1.

großem Maße von den Dampfmaschinen-Ingenieuren betrieben worden ist.

Die Art der Verwendung von Kaltdämpfen zur Kälteerzeugung ist entgegengesetzt derjenigen für Arbeitsleistung; die eine besteht in Kompression, die andere in Expansion der Dämpfe.

Die Fig. 1 zeigt eine Anzahl von Kurven verschiedener Dämpfe, aus denen die Übereinstimmung gewisser Bedingungen hervorgeht. — Die Abscisse stellt das spezifische Volumen der Dämpfe dar, die Ordinate die Temperaturen. Die linke ansteigende Kurve zeigt die Volumenzunahme der Flüssigkeit bei steigender Temperatur, die rechte Kurve die Abnahme des Dampfolumens der gesättigten Dämpfe bei steigender Temperatur unter gleichzeitiger Spannungszunahme. Wo sich beide Kurven schneiden, d. h. wo sich Flüssigkeit und gesättigter Dampf in gleichem Volumen begegnen, da ist der kritische Punkt, der für jeden Dampf in der Thermodynamik angegeben wird als kritische Temperatur mit zugehöriger kritischer Spannung. — Sie erkennen daraus ohne weiteres die Ähnlichkeit der Bedingungen aller der verschiedenen Dämpfe mit denen des Wasserdampfes, und finden die kritischen Temperaturen und Spannungen bei jedem Dampfe bezeichnet. Unten auf der Tafel finden Sie die bisher als permanente Gase bezeichneten Dämpfe. Außerhalb der Kompressionslinie befinden sich die Dämpfe im Zustande der Überhitzung, oberhalb des kritischen Punktes im Gaszustande. Zwischen beiden Linien ist der gesättigte Dampf mit Flüssigkeit gemischt.

Aus der Darstellung dürfte leicht klar werden, daß Gase erst durch Kompression flüssig gemacht werden können, wenn sie gleichzeitig bis unter die kritische Temperatur abgekühlt werden. Oberhalb derselben gelingt die Verflüssigung durch keinen noch so großen Druck. Daher die Schwierigkeit der Verflüssigung permanenter Gase, bei denen bedeutende Kälteleistungen erforderlich sind, um die Verflüssigung zu erreichen. Doch das würde heute zu weit führen.

Zur Kälteerzeugung werden Dämpfe komprimiert, die alsdann nach der rechten Kurve einer Spannungs- und Temperaturzunahme unterliegen. Sie werden alsdann durch Kühlwasser in einem Oberflächenkondensator abgekühlt, bis sie zur Flüssigkeit kondensieren, und expandieren dann bis auf die Anfangstemperatur. Die latente Wärme, die bei der Verflüssigung gleichfalls durch das Kühlwasser abgeführt worden ist, wird bei der Verdampfung aus dem abzukühlenden Körper (Salzwasser oder Luft u. s. w.) wieder aufgenommen. Das ist die eigentliche Kälteerzeugung.

Während der Expansion der Dämpfe kann in gleicher Weise Arbeit geleistet werden, wie es in Wasserdampfmaschinen mit dem Wasserdampf geschieht. Die Expansion vollzieht sich aber bei niedrigerer Temperatur als die Expansion des Wasserdampfes. Während die Expansion des Wasserdampfes im allgemeinen schon

Tabelle I.

		Kritischer Druck Atm.	Kritische Temperatur °C	Siedepunkt b. Atm.-Druck °C	Erstarrungs- punkt bei Atm.-Druck °C
Wasser . . .	H ₂ O	200	+365	+100	0
Schweflg. Säure	SO ₂	78 _{,9}	+155 _{,4}	— 10	
Ammoniak . .	NH ₃	115	+130	— 33	— 77
Stickst.-Oxydul	N ₂ O	75	+ 35	— 89	
Kohlensäure .	CO ₂	75	+ 31	— 80	— 56
Aethylen . .	C ₂ H ₄	52	+ 10	—102	—169
Stickoxyd . .	NO	71	— 93	—154	—167
Sauerstoff . .	O	51	—119	—182	
Atmosph. Luft	N + O	39	—140	—191	
Stickstoff . .	N	35	—146	—194	—214
Wasserstoff .	H	20	—234	—243	

Tabelle II.

Gesättigte Dämpfe von Schwefliger Säure.

Tempe- ratur °C	Dampfspannung		Flüssig- keits- wärme	Latente Wärme			Spezifisches	
	abs. Atm.	kg p. qm		Äußere	Innere	Gesamte	Volum.	Gewicht
+10	2 _{,263}	23379	+ 4 _{,066}	8 _{,349}	79 _{,938}	88 _{,287}	0 _{,1521}	6 _{,575}
15	2 _{,717}	28074	6 _{,338}	8 _{,374}	78 _{,204}	86 _{,578}	0 _{,1272}	7 _{,862}
20	3 _{,239}	33474	8 _{,771}	8 _{,376}	76 _{,324}	84 _{,700}	0 _{,1068}	9 _{,363}
25	3 _{,837}	39644	11 _{,363}	8 _{,365}	74 _{,288}	82 _{,653}	0 _{,0902}	11 _{,086}
30	4 _{,515}	46655	14 _{,115}	8 _{,311}	72 _{,126}	80 _{,437}	0 _{,0762}	13 _{,123}
35	5 _{,283}	54579	17 _{,027}	8 _{,244}	69 _{,809}	78 _{,953}	0 _{,0647}	15 _{,456}
40	6 _{,145}	63487	20 _{,099}	8 _{,154}	67 _{,346}	75 _{,500}	0 _{,0552}	18 _{,116}
45	7 _{,103}	73395	23 _{,331}	8 _{,041}	64 _{,737}	72 _{,776}	0 _{,0468}	21 _{,368}
50	8 _{,182}	84549	26 _{,723}	7 _{,905}	61 _{,983}	69 _{,888}	0 _{,0401}	24 _{,938}
55	9 _{,372}	96841	30 _{,274}	7 _{,746}	59 _{,082}	66 _{,828}	0 _{,0341}	29 _{,326}
+60	10 _{,709}	110656	33 _{,985}	7 _{,564}	56 _{,036}	63 _{,600}	0 _{,0291}	34 _{,364}

Tabelle III.

Gesättigte Dämpfe von Ammoniak.

Temperatur ° C.	Dampfspannung		Flüssigkeits- wärme	Latente Wärme			Spezifisches	
	abs. Atm.	Kg p. qm		äußere	innere	gesamte	Volum.	Gewicht
+ 10	6,069	62710	+ 10,542	30,918	277,904	307,996	0,2106	4,748
15	7,211	74507	16,128	31,236	272,992	304,116	0,1794	5,574
20	8,509	87923	21,923	31,542	268,358	300,112	0,1537	6,506
25	9,976	103078	27,927	31,836	264,300	295,984	0,1325	7,547
30	11,622	120089	34,141	32,118	259,221	291,333	0,1150	8,696
35	13,458	139064	40,564	32,388	254,119	286,358	0,1003	9,970
40	15,495	160107	47,196	32,647	248,395	281,360	0,0881	11,351
45	17,740	183307	54,038	32,894	243,189	276,383	0,0774	12,919
50	20,203	208758	61,090	33,129	237,799	270,938	0,0685	14,599
55	22,889	236512	68,351	33,353	231,885	265,328	0,0610	16,393
+ 60	25,806	266653	75,821	33,565	225,767	259,332	0,0552	18,116

bei 60° C. aufhören muß, so kann man bei dieser Temperatur mit Hilfe des expandierten Wasserdampfes noch Kaltdämpfe unter höheren Spannungen verdampfen, wie sie Tabelle II und III deutlich angeben. Aus Figur 1 und Tabelle I ist aber zu erkennen, daß man in der Auswahl der Dämpfe immerhin etwas beschränkt ist. Die hauptsächlichste Aufmerksamkeit ist darauf zu richten, daß die Spannung der Dämpfe bei 60° nicht zu groß ist, und daß bei der Kondensationstemperatur (16—20° C.) die Spannung nicht unter der Atmosphäre liegt, damit man nicht Gefahr läuft, daß durch Stopfbüchsen u. s. w. Luft in die Maschine eingesaugt werde. Die Maschinen werden geschlossen in derselben Weise, wie Kompressions-Kältemaschinen, d. h. es zirkulieren in der Dampfmaschine (Kaltdampfmotor) stets dieselben Dämpfe. Sie werden unter Spannung verdampft mittels des aus der Wasserdampfmaschine entweichenden, dort bis ca. 60° expandierten Wasserdampfes. Die Kaltdämpfe leisten dann Arbeit im Arbeitszylinder, werden im Oberflächenkondensator zur Flüssigkeit verdichtet, als welche sie mittels Speisepumpe nach dem Verdampfer zurückgepumpt werden.

Die Versuche des Prof. Josse sind an einer Verbunddampfmaschine von dem Vulkan in Stettin mit 8,6 kg Wasserdampfver-

brauch pro Pferdekraft und Stunde gemacht. Dabei werden durch die angehängte SO₂-Maschine noch 56% der Arbeitsleistung kostenlos hinzugewonnen. Er veröffentlicht in seinem Bericht die Diagramme beider Maschinen. Figur 2 zeigt die Querschnitte der beiden Wasserdampfzylinder und des SO₂-Zylinders nebst Angaben ihrer Arbeitsleistung.

Es eignen sich für diese Maschinen z. B. Ammoniak, Methyläther oder Methylchlorid, besonders aber schweflige Säure, weil ihre Spannungen sehr mäfsig sind, und die Flüssigkeit selbst so schlüpfrig ist, dafs kein Schmiermaterial nötig wird. Das ist aber bei geschlossenen Maschinen angenehm, obwohl das Ausdestillieren des Öles keine Schwierigkeiten macht, das ja bei Kältemaschinen allgemein in Gebrauch ist.

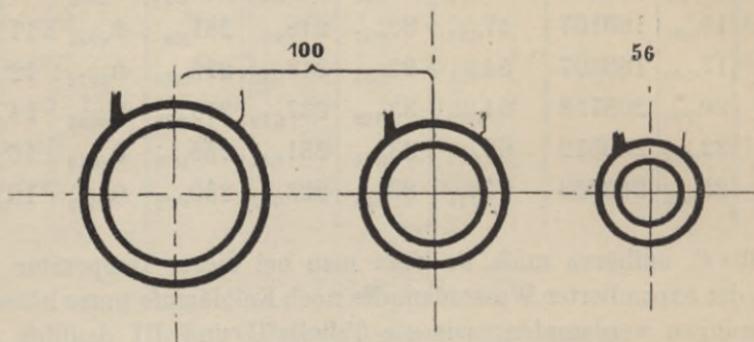


Fig. 2.

Es wird Ihnen ja allen bekannt sein, dafs die Grösse der Arbeitsleistung von Expansionsmotoren sich nach der Grösse des Temperaturgefälles richtet nach der Formel $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Wenn also eine Dampfmaschine von 8₅ absoluten Atmosphären = 172°—60° expandiert, so ist ihr thermischer Wirkungsgrad

$$\frac{172 - 60}{172 + 273} = \frac{112}{445} = 0,25.$$

Falls durch Anhängung eines Kaltdampfmotors die untere Temperaturgrenze 20° wird, so steigt der thermische Wirkungsgrad auf

$$\frac{172 - 20}{445} = \frac{152}{445} = 0,34.$$

Allen meinen Bemühungen gegenüber war bisher nur diese Rechnung verstanden worden, obwohl ich schon im Jahre 1892 im Hamburger Bezirksverein einen Vortrag gehalten habe, der in der Zeitschrift d. V. D. J. 1892, Seite 1135 abgedruckt worden ist, in

welchem durch wissenschaftliche Rechnung der weit größere Nutzen der Kombination einer Wasserdampfmaschine mit dem Kaltdampfmotor klar von mir auseinandergesetzt wurde. Erst nachdem es gelungen war, in dem Maschinenlaboratorium der „Technischen Hochschule“ in Charlottenburg durch den Chef desselben, Herrn Prof. Josse, eine solche Maschine in Betrieb zu nehmen, und sich durch die zweifellosesten Versuche herausgestellt hatte, daß in der That der Nutzen der Kombination ein außerordentlich großer sei, wesentlich größer, als durch die Vergrößerung des Temperaturgefälles sich erklären lasse, und daß die Resultate mit meinen Berechnungen vom Jahre 1892 fast genau übereinstimmen, ist der Sache volle Würdigung zu teil geworden.

Die Resultate des Professor Josse sind in der Zeitschrift d. V. D. J. 1900, Seite 318, veröffentlicht in meinem Hamburger Vortrage vom 7. November 1899.

In der Wasserdampfmaschine wird zur Leistung einer Pferdekraft stündlich eine Anzahl Kilogramm Wasserdampf gebraucht, und zwar bei den allerbesten Maschinen 5 kg, meistens mehr, bis 20 und 30 kg. Die Arbeit einer Pferdekraft während einer Stunde entspricht, wie bekannt, 636₈ Wärmeeinheiten, nämlich

$$\frac{75 \cdot 60 \cdot 60 \text{ mkg}}{424 \text{ mkg}} = 636_{8} \text{ WE. pro Stunde.}$$

Ein Kilogramm Dampf von 172° (8₅ Atm.) enthält 659 WE. Davon bleibt in der Dampfmaschine, wenn die Kondensation zu 22° angenommen wird, ebensoviel Wärme, wie zur Leistung einer Pferdekraft gehört. Alle übrige Wärme der überschießenden Mengen Wasserdampf, die nicht durch Abkühlung verloren geht, passiert nutzlos die Dampfmaschine. Diese Wärme ist übrig zur Verdampfung des Kaltdampfes, der zur Vergrößerung der Arbeit dienen soll. Ich denke, daß auf diese Weise verstanden werden wird, daß durch Anhängung eines Kaltdampfmotors der prozentuale Nutzen desto größer wird, je mehr Dampf die Wasserdampfmaschine gebraucht.

In meinem Vortrage vom Jahre 1892 habe ich die Leistungen der Kaltdampfmaschinen genau berechnet nach der Zeunerschen thermodynamischen Formel

$$L = q_1 - q_2 + r_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1} - T_2 (\tau_1 - \tau_2) \text{ WE}$$

worin

- q die Flüssigkeitswärme,
- r die latente Wärme und
- τ das Wärmegewicht darstellt,

und daraus bei 80% Nutzeffekt die Leistung derselben aus den übrigen Wärmemengen festgestellt. Das Resultat stimmt überein mit den Josseschen Resultaten, nämlich bei Maschinen von

Dampfverbrauch kg	25	-- 10	— 6 ₅₆	— 5 ₅₅	— 5
wird hinzugewonnen auf					
jede Pferdestärke . . PS	2 ₆₄	— 0 ₇₃	— 0 ₄₆	— 0 ₃₇	— 0 ₃₃
d. h. es wird geleistet 1 PS					
mit Wasserdampf . . . kg	6 ₉	— 5 ₇	— 4 ₅	— 4	— 3 ₇₅

Josse sagt: „Stellt man sich daher eine große Kraftzentrale vor mit ca. 3000 PS und nimmt man den Dampfverbrauch dieser Maschinen zu 7₅ kg pro indizierte Pferdestärke an, so wird durch Hinzufügung der Kaltdampfmaschine mit demselben Aufwand an Kohlen pro 7₅ kg Dampf 0₅ PS, das sind 1500 PS insgesamt gewonnen. Setzt man selbst beste große Dampfmaschinen voraus, deren Dampfverbrauch heutzutage pro PS_i-Stunde 5 kg immer noch überschreitet, so würden doch noch 1000 PS ohne Mehraufwand an Kohlen gewonnen werden. In Berg- und Hütten-districten giebt es eine ganze Menge von Dampfmaschinen, welche teils mit Auspuff, teils mit Kondensation arbeiten, die mehr als 10 kg Dampf verbrauchen. In diesem Falle würden durch die Kaltdampfmaschine bei einer 3000 pferdigen Anlage 2000 PS gewonnen werden.

Was die Verbindung dieser Kaltdampfmaschine mit der Wasserdampfmaschine anbelangt, so lassen sich dabei zwei Lösungen denken:

Die erste Lösung besteht darin, daß die Kaltdampfmaschine als Centalkondensation an vorhandene Dampfmaschinen angeschlossen wird. Diese Lösung hat den großen Vorteil, daß an der vorhandenen Dampfmaschine absolut nichts geändert zu werden braucht, sondern, daß nach Aufstellung eines Verdampfers und Kondensators mit Kaltdampfmaschine je nach dem Dampfverbrauch der Wasserdampfmaschine mit demselben Wärmeaufwand $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der vorhandenen Kraft hinzugewonnen werden kann.

Die zweite Lösung besteht darin, Dampfmaschinen, kombiniert mit dem Kaltdampfzylinder, einheitlich als Ganzes zu bauen. Nimmt man für eine solche Maschine von etwa 3000 indizierten Pferdestärken einen Wasserdampfverbrauch von 5 kg an, so läßt sich heute schon mit Sicherheit voraussetzen, daß dieser Dampfverbrauch durch Hinzufügung des Kaltdampfzylinders auf 3₇₅ kg pro PS_i und Stunde reduziert werden wird. Ich bemerke hierzu, daß dieser geringe Dampfverbrauch sich rechnerisch auf Grund der Versuche

mit der vorhandenen kleinen, immerhin noch verbesserungsfähigen Maschine ergeben hat, und dafs derselbe späterhin noch unterschritten werden dürfte.“

Die Maschinen sind sehr einfach. Es wird deutlich, wie man Motoren mit Dämpfen von niedriger Temperatur, aber günstig liegenden Spannungen, benutzen kann für irgend ein Wärmemittel von mäfsiger Temperatur, als Abwässer, Abgase, Abdämpfe u. s. w. Man hat bisher für Arbeitsleistungen in Motoren Stoffe benutzt, welche nach jedem Hube die Maschine verlassen, wie Wasser, Luft, Gas u. s. w. Es dürfte für die Folge die Anwendung geschlossener Motoren mit Dämpfen von geringerer Temperatur mehr um sich greifen, bei denen auch die Abkühlung und Wärmeverluste der Wandungen nicht solche Rolle spielt, wie dies bei Wasserdampfmaschinen der Fall ist.

Vortrag vom 18. März 1902 im Hamburger Bezirksverein Deutscher Ingenieure.

M. H.! Ich habe schon früher einigemale über die Abwärmekraftmaschine gesprochen; um so angenehmer ist mir Ihre Aufforderung gewesen zu einem Bericht über den jetzigen Stand der Angelegenheit, und so benutze ich diese Gelegenheit gern, wieder zu Ihnen sprechen zu dürfen.

Die Maschinen arbeiten jetzt mit schwefliger Säure; früher haben wir mit Ammoniak gearbeitet. Im ersten Falle wird der Cylinder der Abwärm-Dampfmaschine etwas grösser als bei Ammoniak, aber immer noch sehr erheblich kleiner als der Niederdruckcylinder der Wasserdampfmaschine. — Die bei den Versuchen in der Kgl. Technischen Hochschule benutzte Wasserdampfmaschine war vom Vulkan in Stettin, eine mit trocken gesättigtem Dampfe arbeitende Verbundmaschine, die 8,6 kg Wasserdampf pro indizierte Pferdekraft und Stunde gebrauchte.

Der Erfolg der angehängten Abwärmemaschine (von uns damals Regenerativmaschine genannt) ist der gewesen, dafs der Dampfverbrauch der Maschine auf 5,5 kg Wasserdampf pro indizierte Pferdekraft und Stunde reduziert worden ist.

Verdampfer, Kondensator und Speisepumpe dieser Maschine waren entnommen von einer früheren Versuchsmaschine, welche

mit Ammoniak gearbeitet hatte. Wir waren daher bei den Versuchen im Laboratorium der Technischen Hochschule abhängig von der Gröfse dieser Apparate, und danach mußte die Gröfse der Abwärmemaschine konstruiert werden. Aus diesem Grunde mußte die Wasserdampfmaschine langsamer laufen, als ihre normale Tourenzahl war. Sie leistete 40 indizierte Pferdekräfte, während die Abwärmemaschine noch 22,5 Pferdekräfte dazu leistete.

Es wurde dann, nachdem diese Erfolge zweifellos konstatiert waren, eine andere dreifache Expansionsmaschine der Görlitzer Maschinenfabrik benutzt, um unsere Abwärme-Dampfmaschine anzuhängen.

Diese Görlitzer Maschine arbeitet mit etwa 150 Pferdekräften und ca. 150 Touren und ist für Überhitzung eingerichtet.

Von Professor Josse sind in der Zeit vom 25. Oktober 1900 bis 21. Februar 1901 eine große Anzahl von eingehenden Versuchen gemacht, teils unter Verwendung von überhitztem Dampf, teils mit trocken gesättigtem Dampf und schließlicly nur mit zweifachen Expansionen durch Ausschaltung des mittleren Cylinders. Man hat unter anderem hierbei erkannt, daß man mit zweifacher Expansion und Abwärmemaschine weiter kommt, als bisher mit dreifacher Expansionsmaschine allein.

Die Überhitzung wurde bis auf 280°—310° getrieben, und die Leistung schwankte bei 9,6—11,7 Atm. Druck von 103—165 indizierten Pferdekräften bei einem Dampfverbrauch von 5—7,3 kg Wasserdampf pro Pferdekraft und Stunde. Durch die Kombination mit der Abwärmemaschine wurde ein Gewinn von 30,5% bis 40% erzielt, d. h. es wurde der Dampfverbrauch bis auf 3,74 kg pro Pferdekraft und Stunde heruntergedrückt; man erzielte also bereits mit einer 150pferdigen Maschine ein besseres Resultat, als mit den besten Maschinen von mehreren tausend Pferdekräften erreichbar ist.

Der Kühlwasserbedarf betrug bei gesättigtem Dampf ca. 268 l Wasser und bei überhitztem Dampf ca. 310 l Wasser, d. h. das 36- bzw. 60fache desjenigen Dampfes, der für die Wasserdampfmaschine gebraucht ist. Das ist also nicht so abnorm, denn man pflegt bei Maschinen mit trocken gesättigtem Dampf und Einspritzkondensation das 25fache des Dampfverbrauchs anzunehmen.

Die Dampfmaschine hat mit gesättigtem Dampf 7,3 kg und bei überhitztem Dampf 5 kg gebraucht, woraus man den Nutzen der Überhitzung des Wasserdampfes erkennt. Es wurde aber durch die Abwärmemaschine der Dampfverbrauch der mit Überhitzung arbeiten-

den Maschinen erniedrigt auf 3,74 kg, während man bei gesättigtem Dampf auf einen Dampfverbrauch von 5,13 kg kommt.

Der Erfolg der Gesamtmaschine wächst bei geringerem Vakuum, z. B. ersieht man aus der Josseschen Tabelle IV (Seite 24), daß bei einem anderen Versuche ein Vakuum von 85% einen Dampfverbrauch pro Pferdekraft und Stunde von 4,92 kg ergeben hat, während dieselbe Maschine mit 70% Vakuum 3,98 kg Wasserdampf, also fast ein ganzes Kilogramm weniger Wasserdampf gebraucht hat. Die Maschine, die mit zweifacher Expansion unter Ausschaltung des mittleren Cylinders gearbeitet hat, verbrauchte 4,28 — 4,73 kg Dampf, also fast dasselbe Resultat, als mit dreifacher Expansion. Es ist dann in Berlin eine Abwärmemaschine gebaut für die Berliner Elektrizitätswerke, wo vier Wasserdampfmaschinen von Van de Kerkhove-Gent mit je 360 PS-Leistung stehen. Bei zweien dieser Maschinen, die zusammen 720 PS leisten, haben wir bei einem Dampfverbrauch von 7,2 kg pro Pferdekraftstunde einen Gewinn von über 200 PS, wie Sie sehen, fast 30%, erzielt. Diese Abwärmemaschine ist von uns versuchsweise mit Rundschieber-Steuerung versehen worden, während alle anderen Maschinen mit Präzisions-Ventilsteuerung ausgestattet sind. Hierbei stellte sich heraus, daß der Gewinn sich um ca. 12% verminderte, so daß man doch wohl recht thut, von der Schiebersteuerung abzusehen und bei Ventilsteuerung zu bleiben. In dem Berliner Elektrizitätswerk läuft die Abwärmemaschine Tag und Nacht, um hauptsächlich nachzuweisen, daß sie dauernd ununterbrochen ohne jede Ölschmierung arbeiten kann.

Wir haben ursprünglich bei unseren Ammoniakmaschinen mit Ölschmierung gearbeitet, haben aber dann, als wir im Jahre 1899 unsere Versuche mit der Hilfe des Professor Josse begannen, uns von vornherein gesagt, daß wir bei dem bekannten schlüpfrigen Zustande der schwefligen Säure die Schmierung los werden können, und es einen Versuch damit lohne; das Resultat ist glänzend; selbst wenn wir mit Überhitzung gearbeitet haben, sind die Cylinder immer blank gewesen.

Natürlich haben wir allerhand Änderungen und Verbesserungen machen müssen, bis wir zu einem tadellosen Erfolge gelangt sind.

Für eine Görlitzer dreifache Expansionsmaschine von 1800 PS, die mit überhitztem Dampf arbeitet und einen Dampfverbrauch von 5,2 kg pro PS₁-Std. hat, wurde durch die Anhängung einer Abwärmemaschine ein Gewinn von ca. 600 indizierten Pferdekraften fest-

Tabelle IV.

Versuche a. d. Dampf-Abwärmekraftmaschine d. Hochschule (Mittelwerte).

Nr. des Versuchs			b.	3.	8.	10.
Datum des Versuchs			21.11.00	12.2.01	16.2.01	20.2.01
Zustand der Maschine			Dampfmaschine arbeitet mit 3 facher Expansion		2 facher Expansion	
			Wasser aus den Kondenstüpfen in den Verdampfer geleitet			
			Frischdampf überhitzt	trocken gesättigt	Frisch- dampf überhitzt	
				mit hohem Vakuum		
Tourenzahl pro Minute			136 ₃	137 ₄	149	148
Volt } der Dynamo.			189 ₅	191	230	235 ₈
Ampère }			529	414 ₅	609 ₅	531
Wasserdampfmaschine	Temp.	Frischdampfeintritt	309 ⁰	306 ⁰	189 ₅ ⁰	326 ⁰
	Dampf- drucke {	Eintrittsspann. Hdr.-Cyl. kg/qcm				
		Überdr.	11 ₀	11	11	11 ₅
		Vakuum des Kondensators in %	80 ₅	85	68 ₂	69 ₁
	Indizierte Leistung PS.	Hochdruckzylinder	56	41 ₅	60 ₁	88
		Mitteldruckzylinder	36 ₃	31 ₈	48	—
		Niederdruckzylinder	34 ₈	29 ₈	50 ₆	54 ₆
		Ganze Maschine	127 ₁	103 ₁	158 ₇	142 ₆
Dampfver- brauch in kg pro Std.	Kondensat aus dem Verdampfer	637 ₁	664 ₅	1162	855	
	Kondensat a. Mänteln u. Receivern	—	—	—	—	
	Insgesamt	637	664 ₅	1162	855	
und PS_i			5,0	6,45	7,3	5,98
Abwärmemaschine	Tempera- turen {	SO ₂ Dampf-Cylindereintritt	56 ₅ ⁰	50 ₄ ⁰	67 ₅ ⁰	68 ₆ ⁰
		SO ₂ Flüssigkeit-Kondensatoraustr.	18 ₈ ⁰	18 ⁰	21 ₀ ⁰	19 ₄ ⁰
		Kühlwassereintritt	9 ₀ ⁰	10 ₁ ⁰	10 ₁ ⁰	10 ₁ ⁰
		Kühlwasseraustritt	15 ₇ ⁰	15 ₇ ⁰	18 ₄₄ ⁰	17 ₄ ⁰
	SO ₂ -Überdr. kg/qcm {	im Verdampfer	9 ₀	7 ₈	12 ₇	12 ₉
		im Kondensator	2 ₃₅	2 ₂₈	2 ₇₁	2 ₄₄
	Leistung PS.	Indizierte	43 ₅	31 ₅	67	56 ₅
in % der H ₂ O-Maschine			34,2	30,5	42,1	39,5
Abdampfver- brauch pro PS _i u. Std. kg	Kondenswasser der Mäntel und Receiver	i. d. Verd. geleitet	14,6	21	17,14	15,1
		i. d. Abfl. geleitet	—	—	—	—
Kombinierte Maschine	Leistung PS.	Indizierte	170 ₆	134 ₅	225 ₇	199 ₁
		Effektive	146	116	204	183
		Elektrische	136	108	190	170
	Gesamtdampfverbrauch pro Stunde		637	664 ₅	1162	855
Dampfverbrauch pro PS_i und Stunde kg			3,74	4,92	5,15	4,28
Kühlwasser- menge in l	Mechan. Wirkungs- grad {	pro Stunde insgesamt	53000	—	60500	54800
		pro Std. u. PS _i der komb. Maschine	310	—	268	275
		Elektrische Leistung	80 ₁	80 ₄	84 ₂	85 ₅
	PS _e *)	PS _i	86 ₂	87 ₅	90 ₅	92
PS _i %						

*) Wirkungsgrad der Dynamo: 93% angenommen.

gestellt, und diese hohe Zahl ist von der Abwärmekraftmaschinen-Gesellschaft garantiert worden, die vorsichtig mit ihren Garantien ist. Der Dampfverbrauch reduziert sich dann auf etwa $3\frac{3}{4}$ Kilogramm. Der wirkliche Erfolg wird noch besser werden, denn dies sind alles garantierte Zahlen.

Das Gewicht der Abwärmemaschinen-Anlage stellt sich auf 120—160 kg pro PS_i einschliesslich des Verdampfers. Wenn Sie diese Zahlen mit der Wasserdampfmaschine vergleichen wollen, so bedenken Sie, dass hier das Gewicht des Dampferzeugers und Kondensators eingeschlossen ist.

Bei einer Schiffsmaschine kommt man wohl mit kleineren Kondensatoren aus, weil auf dem Schiff ein Überflus an Kühlwasser zur Verfügung steht.

Die Temperaturen, die wir gehabt haben beim Oberflächen-Kondensator sind folgende:

Kühlwasser-Eintritt	9,8 — 10°
Kühlwasser-Austritt	15,5 — 17,5°
schweflige Säure-Austritt	19 — 20°

Bei Kühlwasser von 15° Temperatur sinkt die Leistung auf 90% und bei 20° Temperatur auf etwa 80%. Die Menge des vorhandenen Wassers spielt natürlich auch eine grosse Rolle. Bei dem zufließenden Wasser und der den Kondensator verlassenden schwefligen Säure sehen Sie, dass es sich um Temperaturzunahmen von 9—10° handelt. Zwischen dem Kühlwasser-Austritt und dem schweflige Säure-Austritt beträgt die Temperaturdifferenz 3—3,5°.

Wo aber wenig Kühlwasser vorhanden ist, wird man den Kondensator wohl gröfser machen müssen.

Bei einer kombinierten Maschine von 400 effektiven PS mit 6 Atm. Druck arbeitend, wird ein Wasserdampfverbrauch von 5,9 kg pro effektive Pferdekraft und Stunde garantiert; während die Wasserdampfmaschine 265 PS_{eff} leistet, wird die Schwefligsäuremaschine ca. 135 PS_{eff} leisten.

Nun möchte ich Sie auf etwas aufmerksam machen, meine Herren, was mich persönlich angeht.

Ich habe im Mai 1892 hier einen Vortrag gehalten über diese Regenerativmaschine, habe darin nach der bekannten Zeunerschen Formel für trocken gesättigten Dampf vorgerechnet, wieviel bei Wasserdampfmaschinen noch an Wärmemengen übrig bleibt, nachdem sie ihre Arbeit geleistet haben, und habe dann das rechnerische Resultat erhalten, dass der Dampfverbrauch von 5,5 kg auf 4 kg

reduziert werden kann, wenn sie mit der Abwärmemaschine zusammen arbeitet. Das galt für etwas ganz Besonderes, Abnormes. Heute zeigen die inzwischen angestellten Versuche das Resultat, daß thatsächlich der Dampfverbrauch von 5 kg auf 3,75 kg reduziert wird. Ich habe damals die Maschine bei dem Schnelldampfer „Fürst Bismarck“ mit 6,6 kg Dampfverbrauch einer entsprechenden Rechnung unterzogen; das Resultat war eine Verminderung desselben auf 4,5 kg pro PS_i-Std.; bei

10 kg Dampfverbrauch war das Resultat 5,7 kg,

25 „ „ „ „ „ 6,9 „

Da kann man wohl einen gewissen Stolz haben, daß die Resultate sich nunmehr ebenso gestellt haben, trotzdem die Sache von Theoretikern angegriffen und einfach als Unsinn erklärt worden ist. Es wurde gesagt, daß niemals mehr zu erreichen sei, als die Berechnung der theoretisch vollkommenen Dampfmaschine bei dem entsprechenden Temperaturgefälle ergibt.

Ich habe mir damals vergebens die größte Mühe gegeben, klar zu machen, welchen Einfluß für eine zweite Maschine (Abwärme) diejenige Dampfwärme hat, die nicht in Arbeit verwandelt ist, sofern sie nicht durch Abkühlung usw. verloren gegangen ist.

Jetzt will ich es mit Hilfe einer graphischen Darstellung versuchen, welche wenigstens einen Begriff davon giebt.

Diese graphische Darstellung zeigt die Fig. 3 in Form eines Diagramms, deren Ordinate die Temperaturgrenzen angiebt, zwischen denen die Expansion gedacht ist.

Es ist nun die Arbeitsmenge, welche 1 PS_i entspricht, als Rechteck dargestellt, dessen Höhe die Größe ab hat, deren Größe dem Inhalt des Rechteckes $abcd$ entspricht. Da alle Größen der bekannten Zeunerschen Leistungsformel Temperaturfunktionen sind, so ist die Darstellung in einheitlichem Maßstabe ohne weiteres möglich.

In dem Diagramm giebt also das Rechteck $abcd$ ein Bild der Arbeitsleistung — 1 PS_i —, für welche die zu dieser Leistung erforderliche Dampfmenge der bekannten, von Zeuner berechneten Gleichung für die theoretisch vollkommene Dampfmaschine leicht zu berechnen ist.

Dieser Dampfverbrauch beträgt 4,8 kg pro PS_i bei einem Temperaturgefälle von 180 bis auf 45,58°, entsprechend einem Vakuum von 90%. Die unterste, praktisch mögliche Temperaturgrenze der obigen, theoretisch vollkommenen Dampfmaschine, die etwa 45°

beträgt, wird nun heruntergezogen durch Anhängung unserer Abwärmemaschine bis auf 20° , so daß bei gleichem Wasserdampfverbrauch die Leistung sich entsprechend vergrößert. Ein Bild des Hinzugewinns giebt das Rechteck $b c f e$ und ein Bild der Gesamtleistung der kombinierten Maschine giebt nunmehr das ganze Rechteck $a d f e$. Es soll hier ausdrücklich hervorgehoben werden, daß der Zweck der hier gebrachten Darstellung nur dazu dienen soll, die Sache im Prinzip zu veranschaulichen. Die genauen Zahlen können natürlich nur durch Rechnung gefunden werden.

In der Praxis stellt sich aber der Gewinn noch größer heraus, weil eine theoretisch vollkommene Wasserdampfmaschine in der

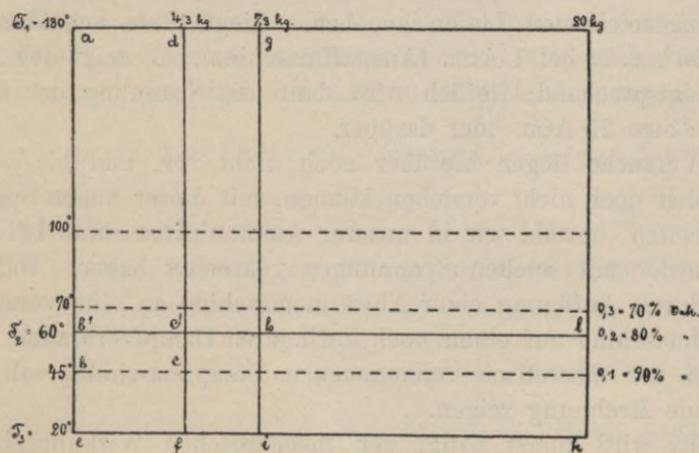


Fig. 3.

Praxis gar nicht existiert und der Dampfverbrauch stets größer ist als es die Thermodynamik ausrechnet.

Dieser Mehrverbrauch an Dampfwärme ist natürlich je nach Ausführung der Maschine ein verschiedener.

Nimmt man nun einen Dampfverbrauch von $7,3 \text{ kg}$ pro PS_i an, wie bei dem Josseschen Versuch mit trocken gesättigtem Dampf, so wird der Dampfverbrauch pro Pferdekraft größer, während die Arbeitsleistung — 1 PS_i — diejenige der theoretisch vollkommenen Dampfmaschine nicht überschreitet. Während wir also eine größere Gesamtwärmemenge haben, bleibt die Arbeit nur gleich dem Rechteck $a b^1 c^1 d$ — 1 PS_i . Da jedoch bei Erniedrigung des Temperaturgefälles durch die Abwärmemaschine die gesamte Dampfärmemenge zur Arbeitsleistung benutzt wird, so entspricht der Hinzugewinn

durch die Abwärmemaschine dem Rechteck $b^1 e i h$. Weicht die Wasserdampfmaschine noch mehr von der theoretisch vollkommenen ab —, nehmen wir also einen Dampfverbrauch von 20 kg pro PS_i an —, so bleibt die Arbeitsleistung der Wasserdampfmaschine immer nur entsprechend dem Rechteck $a b^1 c^1 d$ (1 PS_i), während der Hinzugewinn durch die Abwärmemaschine dem Rechteck $b^1 e k l$ entspricht.

Dadurch wird die vorstehende Rechnung von 1892 bestätigt, daß nämlich der durch Anhängung der Abwärmemaschine entstehende prozentuale Nutzen bei Maschinen mit größerem Dampfverbrauch steigt.

Es ist aus dem Diagramm ohne weiteres zu sehen, daß bei schlechterem Vakuum die Leistung der Abwärmemaschine steigt, wie die eingezeichneten Linien angeben. Liegt diese Scheidungslinie bei 100°, d. h. bei 1 Atm. (Auspuffmaschine), so steigt der Nutzen auch entsprechend; freilich wird dann die Spannung der schwefligen Säure 25 Atm. oder darüber.

Versuche liegen hierüber noch nicht vor, und bis jetzt hat man sich noch nicht verstehen können, mit dieser hohen Spannung zu arbeiten, obwohl wir in unserer Ammoniakmaschine bei 60° C. anstandslos mit solchen Spannungen gearbeitet haben. Daß man aber durch Anfügung einer Abwärmemaschine an eine vorzügliche Dampfmaschine auf einen noch geringeren Dampfverbrauch kommt als bei der theoretisch vollkommenen Dampfmaschine, soll nachstehende Rechnung zeigen.

Es wird zuerst nötig, den mechanischen Wirkungsgrad der Maschine festzustellen, die zu den Josseschen Versuchen benutzt worden ist, beispielsweise zum Versuch b (Tabelle IV). Es diene dazu die Zeunersche Formel für Dampfmaschinen mit überhitztem Dampf.

Die Rechnung der theoretischen Leistung ergibt bei erwähnter Maschine und den Temperaturen, mit denen dieselbe bei diesem Versuch gearbeitet hat, nämlich

309°, Druck 11 Atm. und 56,5° Endtemperatur.

$$\begin{aligned}
 AL_n &= q_1 - q_2 - T_2(\tau_1 - \tau_2) + \frac{r^1}{T_1}(T_1 - T_2) + c_p(T - T_1) - c_p T_2 \log \text{nat} \frac{T}{T_1} \\
 &= 189_{,594} - 59_{,89} - 332_{,755} \times 0_{,32982} + 1_{,0304} \times 127_{,23} + 0_{,4805} \times 122_{,015} \\
 &\quad - 37_{,61} = 172_{,0685} \text{ Kalorien pro Kilogramm Dampf.}
 \end{aligned}$$

Der Dampfverbrauch von 637 kg würde also einer Leistung entsprechen von

$$637 \times 172_{,0685} = 109607_{,332} \text{ Kal.} \times \frac{424}{75 \cdot 60 \cdot 60} = 172_{,123} \text{ PS}_i \text{ theoretisch.}$$

Da aber die wirkliche Arbeitsleistung bei der Indizierung sich bei diesem Versuch zu 127_{,1} PS_i herausstellte, so arbeitet diese Wasserdampfmaschine mit einem Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{127_{,1}}{172_{,123}} = 73_{,8} \% \text{ der theoretischen Leistung.}$$

Unter Zuhilfenahme dieses mechanischen Wirkungsgrades werde ich nun feststellen, welches die äußerst erreichbare Leistung dieser mit überhitztem Dampf arbeitenden Wasserdampfmaschine sein würde, wenn sie allein arbeitete.

Es soll zu diesem Zweck in die hierfür gültige thermodynamische Formel eine Endtemperatur des Dampfes von 45_{,58}⁰ entsprechend einem Vakuum im Kondensator von 90% gesetzt werden.

Es ergibt sich dann die äußerst mögliche Leistung zu:

$$\begin{aligned} AL_n &= q_1 - q_2 - T_2(\tau_1 - \tau_2) + \frac{r^1}{T_1}(T_1 - T_2) + c_p(T - T_1) - c_p T_2 \log \text{nat} \frac{T}{T_1} \\ &= 189_{,594} - 45_{,58} - 318_{,58} \cdot 0_{,3736} + \frac{476_{,768}}{459_{,985}} \cdot 141_{,4} + 0_{,4805} \cdot 122_{,015} - 35_{,606} \\ &= 194_{,53} \text{ Kalorien pro Kilogramm Wasserdampf} \end{aligned}$$

und bei einem Dampfverbrauch, wie oben, von 637 kg pro Stunde

$$637 \times 194_{,53} = 123915_{,36} \cdot \frac{424}{270000} = 194_{,62} \text{ PS}_i \text{ theoretisch.}$$

Die aber wirklich mögliche Arbeitsleistung beträgt alsdann bei $\eta = 73_{,8}$

$$194_{,62} \times 0_{,738} = 143_{,62} \text{ PS.}$$

Der Versuch b hat aber ergeben, daß mit überhitztem Dampf von der kombinierten Maschine 170_{,6} PS_i thatsächlich geleistet wurden, also bedeutend mehr, als bei der Wasserdampfmaschine allein beim größtmöglichen Temperaturgefälle zu erreichen sein würde.

Was das Temperaturgefälle im allgemeinen anbetrifft, so ist dieses bei der kombinierten Maschine Behrend-Zimmermann bis auf 20⁰ nachweislich zu erreichen; dagegen kann man im Kondensator der Wasserdampfmaschine höchstens bis auf ein Vakuum von 90—92%, d. h. bis auf eine Temperatur, wie früher gerechnet, von 45_{,58}⁰ herunterkommen. Selbst aber wenn man auch bei einer Wasserdampfmaschine die unterste Temperatur des expandierten Dampfes bis zu 20⁰ annehmen dürfte, so würde ein Nutzen hier-

aus nicht entstehen können, weil wegen der geringen Dichte des Wasserdampfes bei 20° ganz außerordentliche Cylinderdimensionen nötig werden würden, die derartig große Arbeitsverluste bedingen, daß von einem Gewinn durch das imaginär vergrößerte Temperaturgefälle nicht mehr geredet werden könnte. Beispielsweise würde bei 20° Temperatur das Cylindervolumen einer Wasserdampfmaschine das ca. 70fache einer Schwefligsäuremaschine betragen.

Nicht unerwähnt will ich lassen, daß bei der kombinierten Maschine das Kondenswasser der Wasserdampfmaschine beträchtlich wärmer in den Wasserdampfkessel geleitet werden kann, als es sonst möglich ist bei Verwendung der Wasserdampfmaschine allein. Hierdurch wird noch ein nicht unbedeutender Nutzen erzielt, der von

Professor Josse auf ca. 7% geschätzt wird, bei allen Berechnungen aber unberücksichtigt blieb.

An der Hand der (bei dem Vortrage) ausgehängten Photographien will ich nunmehr die Entwicklung der Sache schildern.

Im Jahre 1887—1888 haben wir die erste Maschine bei C. Aug. Schmidt Söhne in Hamburg in Betrieb ge-

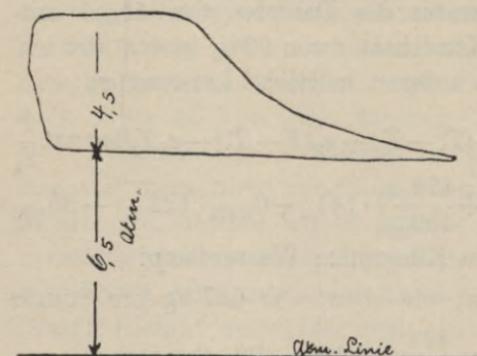


Fig. 4.

habt, die mit Ammoniak gearbeitet hat. Wir haben dazu eine kleine Wasserdampfmaschine verwendet und Fig. 4 zeigt das Diagramm dieser kleinen Maschine. Es galt uns vorerst nur, zu versuchen, ob die Kaltdämpfe in Wirklichkeit sich in Motoren verhalten wie Wasserdampf. Die Speisung mit der gewöhnlichen Speisepumpe machte erklärlicherweise Schwierigkeiten, weil die bei der gewöhnlichen Tagestemperatur arbeitenden Kaltdämpfe stets in siedendem Zustande sind, indem ihr Siedepunkt unter dem Gefrierpunkte des Wassers liegt. Ohne besondere Maßnahmen können also alle Kaltdampfmaschinen nur so lange dauernd arbeiten, als gespannte Dämpfe im Verdampfer vorhanden sind. Alle Versuche, die anderweitig gemacht worden sind, mußten am Fehlen einer geeigneten Speisepumpe scheitern.

Die zweite Maschine, die wir in einer rheinischen Fabrik bauten, und von der eine Photographie aus dem Jahre 1894 hier

(beim Vortrage) ausgehängt ist, arbeitet ebenfalls mit Ammoniak und einer geeigneten Speisepumpe. Sie war vorerst mit Schiebersteuerung versehen und in Verbindung mit einer Wasserdampfmaschine hergestellt. In dieser Verbindung der Abwärmemaschine mit einer Wasserdampfmaschine liegt das Ziel unserer Arbeit. Darin bestehen unsere hauptsächlichsten Patente. Wir haben uns von vornherein zur Aufgabe gemacht, die Wasserdampfmaschine zu verbessern und haben es darin als die ersten und einzigen zu einem glänzenden Erfolge gebracht. Darauf bezog sich mein Vortrag vom Jahre 1892, der schon wiederholt erwähnt ist.

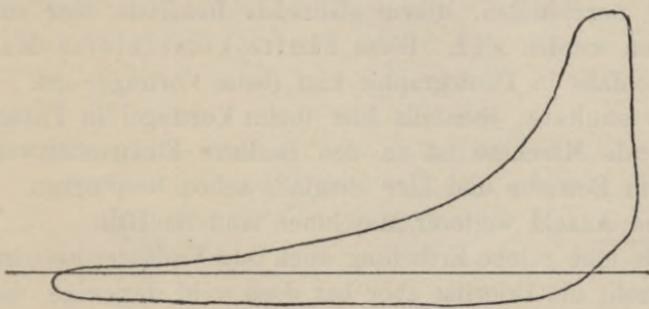


Fig. 5 a.

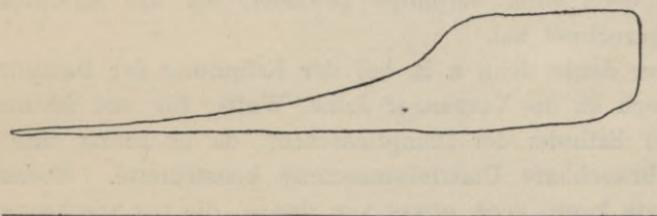


Fig. 5 b.

Die dritte Maschine, die wir gebaut haben, bestand in der Änderung der Maschine Nr. 2 in eine mit Präzisions-Ventilsteuerung, geeigneter Speisepumpe usw.

An dieser Maschine haben wir durch Diagramme (Fig. 5) den Erfolg nachgewiesen, und zwar zeigt Fig. 5 a das Diagramm der Wasserdampfmaschine und Fig. 5 b das der Ammoniakmaschine. Die Form desselben zeigt, wie die Expansionskurve durch Wärmeaufnahme durch die Wandungen über der adiabatischen Kurve liegt. Schon hier arbeiteten wir ohne Ablafsvorrichtungen, ohne dafs irgend welche Flüssigkeitsbildungen im Cylinder stattfanden. Bis hierhin wurde uns jeder Erfolg von den Gelehrten, wie mehrfach

erwähnt, bestritten, und nun erst konnten wir mit Hilfe des Herrn Professor Josse, der die Richtigkeit voll anerkannte, mit der Maschine Nr. 4, deren Photographie hier (beim Vortrage) ebenfalls ausgehängt ist, in der Königl. Technischen Hochschule in Charlottenburg im Jahre 1899 den vollen Erfolg beweisen.

Wir benutzten damals aus den schon oben erwähnten Gründen schweflige Säure.

Nunmehr bildete sich die Abwärme-Kraftmaschinen-Gesellschaft, welche den Professor Josse beauftragte, eine Abwärmemaschine in Verbindung mit einer Görlitzer Dreifach-Expansionsmaschine herzustellen, deren glänzende Resultate hier eingehend besprochen worden sind. Diese fünfte kombinierte Maschine hängt ebenfalls in Photographie hier (beim Vortrage) aus.

Die sechste, ebenfalls hier (beim Vortrage) in Photographie aushängende Maschine ist an den Berliner Elektrizitätswerken in dauerndem Betriebe und hier ebenfalls schon besprochen.

Eine Anzahl weiterer Maschinen sind im Bau.

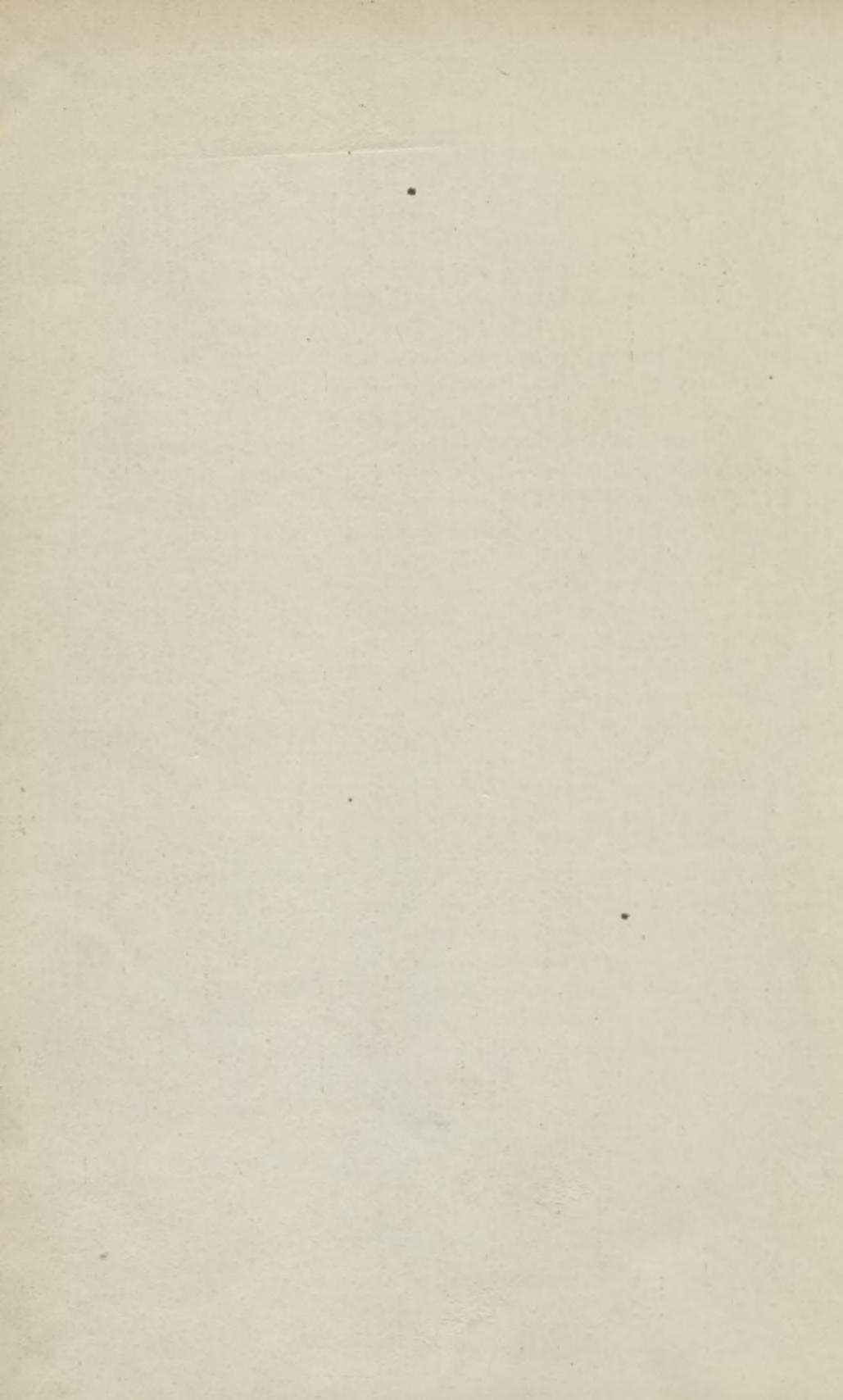
Dafs eine solche Erfindung auch ihre Vorläufer hat, ist selbstverständlich; die Priorität aber hat doch wohl derjenige, der zuerst eine dauernd betriebsfähige Maschine zustande gebracht hat. Ebenso bin ich doch auch derjenige gewesen, der die Maschine zuerst richtig berechnet hat.

Wer denkt denn z. B. bei der Erfindung der Dampfmaschine heute noch an die Vorgänger James Watts; für uns ist und bleibt Watt der Erfinder der Dampfmaschine, da er zuerst eine für die Praxis brauchbare Umtriebsmaschine konstruierte. Ebenso weifs man heute kaum noch etwas von denen, die vor Stephenson schon Versuche gemacht haben, Lokomotiven zu bauen.

Zum Schlufs möchte ich noch folgendes sagen: Wenn Sie die Abwärmemaschine in Betrieb setzen wollen, so brauchen Sie nicht erst anzuwärmen, wie bei Wasserdampfmaschinen, Sie haben auch keine Flüssigkeit abzulassen, sondern in dem Augenblick, wo Sie das Anlaßventil öffnen, läuft die Maschine ganz lautlos. Das ist noch ein wesentlicher Vorteil.



Buchdruckerei des Waisenhauses in Halle a. S.



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II
L. inw. 32256

Kdn., Czapskich 4 — 678. 1. XII. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299726