

der Brennstoffaufwand für die Pferdekraftstunde auf $\frac{2,0}{0,7} =$ ungefähr 3 Pfennig. Nun mögen für Löhne der Kesselheizer, Maschinenwärter und für Gehälter der anderen Angestellten 2 Pfennig dazukommen, ferner für Ausbesserungen, Schmierstoffe und dergleichen 1 Pfennig. Damit belaufen sich die Betriebsausgaben allein schon auf $3 + 2 + 1 = 6$ Pfennig. Rechnen wir jetzt noch für die Abschreibung und Verzinsung der Maschinenanlage und Gebäude $3\frac{1}{2}$ Pfennig für die tatsächlich abgegebene Pferdekraftstunde, so berechnen sich die Selbstkosten auf $9\frac{1}{2}$ Pfennig, während die Brennstoffkosten 3 Pfennig, also nicht einmal ganz $\frac{1}{3}$ der Gesamtausgaben waren. Diese Aufstellung zeigt recht deutlich, wie untechnisch es ist, einzig und allein in der Verminderung der Kalorienverluste das Heil zu suchen, und andererseits, wie viele Einflüsse der Ingenieur zu berücksichtigen und wie sorgfältig er zu rechnen hat, um zu dem besten Ergebnis, d. h. zu den niedrigsten Selbstkosten für die erzeugte Pferdekraftstunde zu gelangen, die unter den gegebenen Verhältnissen erreichbar sind.

Vor gar zu einseitiger Betonung des Kostenstandpunktes muß allerdings auch hier gewarnt werden. Wir müssen uns davor hüten, Raubbau zu treiben, also Naturschätze, wie die Brennstoffe, die wir nur in beschränkter Menge besitzen, zu verschwenden, um einen günstigeren Kassenabschluß zu erzielen.

8. Andere Verfahren der Brennstoffausnutzung in Kraftmaschinen. Gasmachine; Sauggasanlage; Dieselmotor.

Was für Dampfanlagen ausgeführt wurde, gilt auch für alle anderen Verfahren, nach denen die Brennstoffenergie ausgenutzt wird. Verfolgt man den umständlichen Weg, den die Wärme bei der Dampfanlage durchmacht, ehe sie zur Arbeitsleistung gelangt, und sieht man, wie viel auf diesem Wege verloren geht, so drängt sich eigentlich von selbst der Gedanke auf, ob es denn nicht möglich ist, die Brennstoffwärme der Kohle, statt auf dem Umweg über den Dampfkessel, unmittelbar in den Zylinder zu führen. Man hat diesen Gedanken oft erörtert. Es erscheint an sich gar nicht unmöglich, jedesmal, wenn der Kolben vorgeht, eine kleine Menge Kohlenstaub in den Zylinder zu bringen und zu verbrennen. Die hochoverhitzten Verbrennungsgase werden sich ausdehnen und den Kolben vor sich her treiben, also Arbeit leisten. In der Tat wird ernsthaft an dem Bau eines solchen Motors gearbeitet. Die Hauptschwierigkeit macht die bei der Verbrennung zurückbleibende Asche, die zu rascher Abnutzung von Kolben und Zylinder führen wird. Es muß also eine besonders geeig-

nete Kohle verwendet werden, deren Asche möglichst unschädlich ist oder die künstlich entascht ist.

Nun gibt es aber andere Stoffe, die leichter und vollständiger verbrennen als Kohle. Dazu gehören Stadtgas (Leuchtgas), wie es von den Gasanstalten geliefert wird, und andere brennbare Gase, sodann eine ganze Reihe von flüssigen Brennstoffen, wie Petroleum und andere Ölsorten, Benzin, Benzol, Spiritus bzw. die bei der Erhitzung aus ihnen entstehenden Dämpfe.

Man kann z. B. eine kleine Menge Gas mit Luft mischen, das Gemenge in den Zylinder der Maschine einführen und es in dem Augenblick, wo der Kolben vorangehen will, durch einen elektrischen Funken entzünden. Aus der Erfahrung ist uns bekannt, daß bei der Entzündung eines Gemenges von Gas und Luft eine Explosion auftritt. Dies bedeutet aber nichts

anderes, als daß die Gase sich infolge der plötzlich erzeugten Verbrennungswärme heftig ausdehnen. Sind sie in dem engen Raume des Zylinders eingeschlossen, so üben sie dabei einen starken Druck auf den Kolben aus. Während der Kolben weiter vorangeht, dehnen sich die Gase aus und ihre Spannung

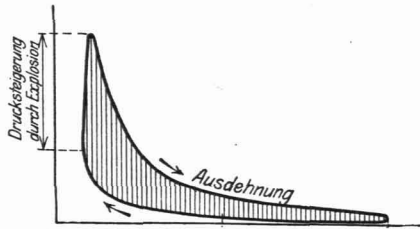


Abb. 111. Diagramm einer Zweitakt-Gasmaschine.

nimmt ab, genau wie bei der Arbeitsleistung des Dampfes im Zylinder der Dampfmaschine. Am Schluß des Kolbenweges, unmittelbar ehe der Kolben umkehrt, wird der Auslaß für die Gase geöffnet, und der Kolben schiebt nun beim Rückgang das Gasgemisch aus dem Zylinder heraus ins Freie. Das Diagramm kann z. B. die in Abb. 111 wiedergegebene Form haben. Die schraffierte Diagrammfläche gibt wieder ein Maß für die Arbeit, die auf den Kolben übertragen ist.

Verschiedene Vorteile werden bei diesem Verfahren erreicht. Zunächst fallen die Verluste fort, die sich bei der Dampfanlage schon infolge der Dampferzeugung in den Kesseln ergeben und die im praktischen Betrieb wenigstens etwa 20 bis 30% der zugeführten Wärme betragen. Sodann erhält man im Zylinder viel höhere Anfangstemperaturen. Wenn nun auch die Temperatur, mit der die Gase entweichen, nachdem sie ihre Arbeit getan haben, höher ist als bei der Dampfmaschine, so ist doch der Temperaturunterschied, das Temperaturgefälle, auf das es vor allen Dingen ankommt, ganz bedeutend größer, so daß auch aus diesem Grunde die Wärme besser ausgenutzt wird. Die beiden Einflüsse haben zur Folge, daß bei Gasmaschinen ungefähr 25% der Brennstoffenergie in mecha-

nische Arbeit umgesetzt werden können, gegenüber etwa 10 bis 20% bei einer normalen Dampfmaschine!

Eine Wärmebilanz läßt sich hier ebenso wie bei den Dampfmaschinen aufstellen, indessen ist sie weit einfacher. Nehmen wir wieder an, daß durch die Verbrennung 100 Kalorien zugeführt werden. Da die Temperatur, die bei der Verbrennung entsteht, so groß ist, daß die Maschine auf die Dauer nicht dabei arbeiten könnte, sondern sich sehr schnell abnützen würde, so muß ein großer Teil der Wärme so rasch als möglich abgeführt werden, und zwar geschieht das in der Weise, daß man den Zylinder mit einem Mantel umgibt, durch den beständig Kühlwasser hindurchgepumpt wird. Sodann entweicht ein großer Teil der Wärme mit den immer noch heißen Gasen, die der Kolben beim Rückgang aus der Maschine herausschiebt. Die Wärmebilanz ist je nach Ausführung und Betrieb der Maschine verschieden, doch kann wenigstens als Beispiel folgendes gelten:

Zugeführte Wärme **100** Kalorien, davon

mit dem Kühlwasser abgeführt	45	Kalorien
mit den Abgasen ausgestoßen	30	„
in mechanische Arbeit umgesetzt	25	„

Die geringen Verluste, die dadurch entstehen, daß die Maschine Wärme ausstrahlt, sind dabei nicht besonders berücksichtigt.

Wärmetechnisch genommen ist hiernach der Gasmotor der Dampfmaschine um das Doppelte überlegen. Während eine ziemlich große gut ausgeführte Dampfmaschine unter günstigen Umständen vielleicht 5000 Brennstoffkalorien für 1 PS-Stunde verbraucht, kommt die Gasmaschine unter den gleichen Verhältnissen mit 2500 Kalorien aus. Noch viel günstiger stellt sich der Vergleich für die Gasmaschine, wenn es sich um geringe Arbeitsleistungen handelt, weil bei einer kleinen Gasmaschine die Brennstoffausnutzung nicht sehr viel schlechter ist als bei einer großen, während kleine Dampfmaschinen sehr ungünstige Wirkungsgrade haben.

Diese Zahlen entscheiden indessen den Wettstreit zwischen Dampf- und Gasmaschine noch keineswegs; sie haben zunächst nur wissenschaftlichen Wert, solange man nicht weiß, wieviel die im Brennstoff zugeführte Kalorie in dem einen und in dem anderen Falle kostet!

Stellt man die Frage in dieser Weise, so kommt allerdings etwas ganz anderes heraus. Da der Geldbetrag für 1 Kalorie zu klein ist, so wollen wir mit 10000 Kalorien rechnen. Diese kosten in Kohle, mittlere Entfernung vom Verwendungsort vorausgesetzt, ungefähr $2\frac{1}{2}$ bis 3 Pfennig, in Stadtgas dagegen 20 bis 30 Pfennig, also das 8- bis 10 fache! Wenn die Ausnutzung bei der Gasmaschine nur 2- bis

3 mal so gut ist, so steht hiernach, was die reinen Brennstoffkosten anlangt, die Dampfmaschine viel günstiger da!

Wenn also nicht andere Vorteile zugunsten der Gasmaschine sprechen, so würde sie sich trotz ihrer weit besseren Wärmeausnutzung nie eingeführt haben. Nun sehen wir aber schon aus dem Beispiel der Dampfanlage auf S. 112, daß die reinen Brennstoffkosten noch längst nicht gleichbedeutend sind mit den Kosten für die wirklich erzeugte Arbeitsmenge, also für die während einer Stunde abgegebene Pferdekraft. Dort betrug sie nur $\frac{1}{3}$ der Gesamtausgaben!

Wie steht es also in dieser Beziehung mit Gasmaschine und Dampfmaschine? Die Dampfmaschine braucht einen besonderen Raum für die Kesselanlage und außerdem Platz für die Lagerung von Kohle. Beides fällt bei der mit Stadtgas betriebenen Maschine fort; sie kann im Arbeitsraum aufgestellt werden und entnimmt das Gas einfach aus der Leitung des Gaswerkes. Der Kaufpreis für die Maschine selbst wird meist etwas niedriger sein als für die vollständige Dampfanlage, indessen muß man damit rechnen, daß sie sich rascher abnutzt und mehr Ausbesserungen erfordert. Auch verbraucht die Gasmaschine etwas mehr Schmieröl. Während aber die Dampfmaschinenanlage einen Mann zur ständigen Bedienung und Überwachung nötig hat, arbeitet die Gasmaschine, nachdem sie in Gang gesetzt ist, weiter, ohne daß sich, außer gelegentlichem Nachsehen, jemand um sie zu kümmern braucht.

Der Wettbewerb zwischen den verschiedenen Arten von Wärmekraftmaschinen war namentlich bei Kleinanlagen lebhaft, und er ist auch heute noch nicht entschieden, weil ein auf einer Seite erreichter Vorsprung immer wieder bei den Vertretern der anderen Richtung das erfinderische Denken wachruft und zu Verbesserungen führt. In der Gegenwart geht, namentlich infolge des Bedarfes des Kraftwagens an kleineren Maschinen, die Entwicklung so lebhaft vor sich, daß es kaum möglich ist, gültige Zahlen für einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit zu nennen. Deshalb sind in dem folgenden Vergleich die Zahlen aus einem früheren Zeitpunkt der Entwicklung beibehalten. Auch wenn manche davon in ihrer absoluten Höhe heute nicht mehr zutreffen, so sind sie doch kennzeichnend für den Wettkampf, wie er sich abgespielt hat, und lassen klar erkennen, warum heute, nach Überwindung der technischen Schwierigkeiten, der Dieselmotor auch als Kleinmaschine nur schwer von anderen Maschinenarten zu erreichen oder zu schlagen ist. Neuerdings hat zwar die Notwendigkeit einer nationalen Brennstoffbewirtschaftung auch dem Gasmotor und der Kleindampfmaschine wieder einen Auftrieb gegeben. Wo elektrischer Strom zu mäßigen Tarifen zur Verfügung steht, beherrscht natürlich der Elektromotor mit seiner unübertrefflichen Bequemlichkeit im Betriebe und seiner Anpassungs-

fähigkeit das Feld, soweit es sich nicht um den Antrieb von Fahrzeugen handelt.

Man wird z. B. für eine Dampfmaschine und eine Gasmaschine von 20 Pferdestärken etwa zu folgenden Ergebnissen kommen. Vorausgesetzt ist dabei, daß 1 kg Kohle 2 Pfennig, 1 m³ Gas 12 Pfennig kostet, und daß die Maschine 10 Stunden täglich voll arbeitet, bei 300 Arbeitstagen im Jahr.

Kosten für eine abgegebene Pferdekraftstunde bei 20 PS

	Dampfmaschine	Gasmaschine
Brennstoffverbrauch	4 Pfennig	7 Pfennig
Verzinsung und Abschreibung der Anlagekosten	2 „	1 ¹ / ₂ „
Bedienung	2 ¹ / ₂ „	1 „
Schmierung usw.	1 ¹ / ₂ „	3 ³ / ₄ „
Zusammen für die PS-Stunde	9 Pfennig ¹⁾	10 ¹ / ₄ Pfennig

Die Dampfmaschine gibt demnach die Pferdekraftstunde um 1¹/₄ Pfennig billiger her, indessen ist dieser Unterschied so gering, daß das Bild sich bei Zugrundelegung etwas geänderter Verhältnisse sehr leicht zugunsten der Gasmaschine verschieben kann. Wenn z. B. der Gaspreis nicht 12 Pfennig, sondern 10 Pfennig für 1 m³ betrüge, so würden die Brennstoffkosten für eine Pferdekraftstunde 6 Pfennig statt 7 Pfennig sein, und die Gesamtkosten wären bei der Gasmaschine nur noch 9¹/₄ Pfennig gegenüber 9 Pfennig bei der Dampfmaschine.

Auch hier zeigt sich wieder, wie grundverkehrt es ist, wenn man in der Technik aus einseitigen Rechnungsergebnissen praktische Folgerungen ziehen will. Bei dem Vergleich von Gasmotor und Dampfmaschine sind wir in unseren Ansichten mehrmals hin und her ge-

¹⁾ Dieses Ergebnis darf nicht mit den Zahlen verglichen werden, die auf S. 112 für die Kraftanlage eines Elektrizitätswerkes gegeben wurden, denn hier ist angenommen, daß die Maschine dauernd vollbelastet arbeitet, während dort die Anlage schlecht ausgenutzt ist. Außerdem beziehen sich die 9¹/₂ Pfennig, die dort ausgerechnet wurden, nicht auf die von der Dampfmaschine, sondern auf die vom Generator abgegebene Pferdekraftstunde, die infolge des im Generator auftretenden Verlustes und der Anschaffungs-, Ausbesserungs- und Bedienungskosten der elektrischen Anlage selbstverständlich teurer ist. Würde man für eine 1000 pferdige Dampfanlage die Kosten unter denselben Annahmen berechnen, wie hier für die 20 pferdige Maschine geschehen, so käme man vielleicht auf 3¹/₂ bis 4 Pfennig für die Pferdekraftstunde. Eine solche größere, vollkommene Anlage arbeitet also ungleich billiger als eine kleine. Wegen der Zahlenangaben vergl. im übrigen die Fußnote auf S. 111.

worfen worden. Die rein wissenschaftliche Untersuchung über die Ausnutzung der Brennstoffwärme führte zunächst dazu, die Gasmaschine als weitaus überlegen zu betrachten. Brachten wir aber die Brennstoffpreise in Ansatz, so senkte sich die Wage umgekehrt zugunsten der Dampfmaschine. Erst eine Rechnung, die alle Einflüsse, vor allem die Anlagekosten und die Bedienung einbezog, konnte die richtigen Aufschlüsse geben, indem sie zeigte, daß es vor allen Dingen von der Größe der abgegebenen Leistung abhängt, welche von beiden Maschinenarten billiger arbeitet.

Nun hat sich aber die Technik mit diesen Ergebnissen keineswegs beruhigt. Daß die Kalorie im Stadtgas so teuer ist, rührt daher, daß die Gewinnung des Gases im Gaswerk und die Fortleitung zur Verbrauchsstelle hohe

Kosten verursachen. Außerdem muß das Gas solche Zusammensetzung haben, daß es sich für die Verwendung im Haushalt eignet; Gas, das nur für den Antrieb von Maschinen bestimmt wäre, könnte man billiger herstellen. Es ist also wirtschaftlich eigentlich falsch, wenn man das

Stadtgas in der Maschine verbrennt. Diese Überlegung führt von selbst zu der Frage, ob es nicht möglich ist, daß sich der Besitzer einer Gasmaschine ein Gas, wie er es gebraucht, auf billigere Weise selbst herstellt. Die Gaserzeugungsverfahren der Gasanstalten lassen sich allerdings nur im großen anwenden; aber man ist auf einen anderen, sehr einfachen Weg gekommen, um Gas zum Maschinenbetrieb für den Kleinbedarf zu erzeugen.

Dies kann geschehen mit den sogenannten Sauggasanlagen, Abb. 112, deren Hauptbestandteil eine Art von Füllofen ist, der als Gaserzeuger dient. Die Kohle wird in den Fülltrichter hineingeschüttet, nachdem die Klappe aufgehoben ist, und rutscht von hier aus in dem Maße, wie unten durch die Verbrennung Raum frei wird, langsam in den eigentlichen Verbrennungsraum nach, der, wie bei jedem Ofen, mit feuerfesten Steinen ausgemauert ist. Unten liegt die Kohle auf einem Rost auf, oben befindet sich in einem besonderen abgeschlossenen Raum Wasser, das erhitzt wird und daher rasch verdunstet. Nun tritt aber die Luft nicht, wie bei gewöhnlichen Öfen, einfach durch den Rost in die Feuerung ein, um nachher durch den Schorn-

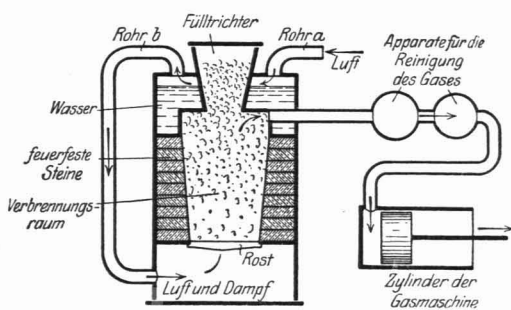


Abb. 112. Schema einer Sauggasanlage (TWL 10790).

stein abzuziehen, sondern der Raum unter dem Rost ist abgeschlossen, und die Luft kann daher nur durch das Rohr *b* unter den Rost gelangen. Ehe sie in das Rohr *b* kommt, muß die Luft, die durch das Rohr *a* eintritt, infolgedessen über den Wasserspiegel der Verdunstungsschale streichen. Dabei nimmt sie ziemlich viel Wasserdampf auf, so daß ein Gemisch von Luft und Dampf unter den Rost und in die Feuerung gelangt.

Hier vollzieht sich nun ein eigentümlicher chemischer Vorgang. Zunächst zersetzt sich bei der Hitze, die in der Feuerung herrscht, der Wasserdampf in seine zwei Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff. Der frei werdende Sauerstoff und ebenso der Sauerstoff der zugeführten Luft verbindet sich mit der Kohle. Während man aber bei den Stubenöfen und Dampfkesselfeuerungen¹⁾ dahin strebt, daß die Kohle vollständig verbrennt und Kohlen säuregas bildet, führt man hier nur so viel Sauerstoff zu, daß jedes Atom Kohlenstoff statt 2 nur 1 Atom Sauerstoff findet und sich mit ihm zu Kohlenoxydgas verbindet.

Was bleibt also bei diesem Vorgang übrig? Zunächst Wasserstoff, der bei der Verbrennung eine sehr große Hitze entwickelt, und sodann Kohlenoxydgas, von dem jede Molekel sich noch mit einem Atom Sauerstoff verbinden, d. h. verbrennen und dabei Wärme entwickeln kann. Schließlich ist noch der Stickstoff da, der ja einen Bestandteil der Luft bildet, aber unverbrennlich ist und einfach durch den Ofen hindurch geht. Das fertige Gas enthält also, abgesehen von Unreinigkeiten und kleinen Beimischungen anderer Gase, ein Gemisch aus Stickstoff, Kohlenoxydgas und Wasserstoff, von denen die beiden letzteren hohen Heizwert besitzen. Wir jagen nun nicht, wie bei gewöhnlichen Feuerungen, diese Verbrennungsgase zum Schornstein hinaus, denn sie bilden eben das wertvolle Erzeugnis des ganzen Vorganges, das, nachdem es noch durch einige Reinigungsapparate hindurchgegangen ist, unmittelbar in den Zylinder der Gasmaschine geführt wird.

Verluste entstehen bei diesem Verfahren natürlich sowohl bei der Gaserzeugung wie bei dem Arbeiten des Gases in der Gasmaschine. Für mittlere Verhältnisse wird sich die Wärmebilanz ungefähr folgendermaßen stellen:

Im Brennstoff zugeführt	100	Kalorien
Verluste bei der Gaserzeugung	25	Kalorien
Verluste in der Maschine	60	„
in mechanische Arbeit umgesetzt	15	„

Schon bei einer Maschine mittlerer Größe wird also die Wärme mit 15% ebenso gut ausgenutzt, wie bei größeren Dampfmaschinen-

¹⁾ Vergl. S. 95.

anlagen. Vergleicht man die Einrichtung mit einer 20 pferdigen Dampfanlage, wie auf S. 116 untersucht, so darf angenommen werden, daß die Brennstoffkosten für die Pferdekraftstunde etwa die Hälfte oder den dritten Teil betragen. Die Anschaffungskosten sind höher, die Bedienung ungefähr dieselbe und die Nebenausgaben etwas größer. Die Rechnung wird sich für eine Anlage gleicher Leistung etwa folgendermaßen stellen:

Brennstoffverbrauch	1,7 Pfennig
Verzinsung und Abschreibung der Anlagekosten	2,8 „
Bedienung	2,5 „
Schmierung usw.	1,0 „
Zusammen für die PS-Stunde	<u>8,0 Pfennig</u>

Wir kommen also besser weg als bei Dampf- oder Leuchtgasbetrieb, aber der Unterschied ist keineswegs so groß, daß namentlich die Dampfmaschine sich einfach besiegt geben müßte. Änderungen der Rechnungsannahmen und Rücksichten auf bestimmte praktische Verhältnisse können das Bild schon erheblich anders gestalten. Namentlich pflegt beim Vergleich aller dieser Betriebsarten die Frage von großem Einfluß zu sein, ob Dampf für andere Zwecke, z. B. zur Heizung der Arbeitsräume, für Warmwasserbereitung, für Kochzwecke in chemischen Fabriken, zum Trocknen usw. usw. nötig ist. Nimmt man eine Gasmaschine, so muß hierfür unter Umständen ein besonderer Kessel aufgestellt werden, der auch wieder seine Bedienung fordert. Es kommt also jetzt nicht mehr darauf an, die Kosten für die Pferdekraftstunde so niedrig wie möglich zu halten, sondern man muß die Anlage so einrichten, daß die Unkosten des gesamten Fabrikbetriebes so niedrig als möglich werden. In die Rechnung kommen dadurch neue Einflüsse hinein, so daß sie unter Umständen recht verwickelt und schwierig werden kann. Immer mehr zeigt es sich, wie sehr die kaufmännischen Erwägungen in den Vordergrund treten und wie die Technik sich in den Dienst wirtschaftlicher Aufgaben stellt.

Es ist sehr merkwürdig, zu verfolgen, wie eben durch diese wirtschaftlichen Gesichtspunkte dafür gesorgt ist, daß die Bäume nicht in den Himmel wachsen. Wie oft hat man an technische Neuerungen schon die größten Hoffnungen geknüpft! Regelmäßig zeigte sich aber im Laufe der Jahre, daß das Alte sich doch nicht verdrängen läßt. Nach und nach ergab sich dann von selbst eine Abgrenzung zwischen den Anwendungsgebieten auf Grund praktischer Erfahrungen, die erst zuverlässige Unterlagen darüber liefern konnten, wo das eine und wo das andere die höhere Wirtschaftlichkeit ergab.

Ein sehr starker Wettbewerber wurde später der Dieselmotor¹⁾. Er bietet ein ungewöhnlich interessantes Beispiel dafür, welche Schwierigkeiten zu überwinden sind, bis eine in ihren Grundgedanken gesunde Neuerung weit genug entwickelt ist, um sich endgültig einzuführen, und wie ihre Beurteilung im Laufe der Jahre schwankt und schwanken muß. Der Dieselmotor ergibt eine noch erheblich bessere Wärmeausnutzung als die Gasmaschine. Während wir dort im Durchschnitt mit 25% rechneten, können hier bis zu 35% der Brennstoffenergie in mechanische Arbeit umgesetzt werden. Die Luft wird in dieser Maschine beim Rückgang des Kolbens sehr stark zusammengedrückt und erhält dabei eine so hohe Temperatur, daß brennbare Flüssigkeiten, die fein zerstäubt in den Zylinder hineingespritzt werden, sich entzünden und verbrennen. Zu der vortrefflichen Wärmeausnutzung kommt noch hinzu, daß billige Öle, die sonst gar nicht für Motorenbetrieb zu gebrauchen sind, verwertet werden können. Rechnet man, daß solche Öle für 10 Pfennig das Kilogramm zu haben sind und daß 1 kg 10000 Kalorien erzeugen kann, so würden bei der 20 pferdigen Dieselmachine, wenn wir 30% Wärmeausnutzung zugrunde legen, für 10 Pfennig 3000 Kalorien Nutzenergie oder ungefähr $4\frac{1}{2}$ Pferdekraftstunden zu haben sein. Das ergibt für die Pferdekraftstunde einen Brennstoffaufwand von 2,2 Pfennig. Die Anschaffungskosten sind höher als bei der Dampfanlage, die Bedienungskosten dagegen gering. Die Rechnung stellt sich etwa folgendermaßen:

Brennstoffverbrauch	2,2 Pfennig
Verzinsung und Abschreibung des Anlagekapitals	2,5 „
Bedienung	1,1 „
Schmierung usw.	0,7 „
Zusammen für die PS-Stunde	<u>6,5 Pfennig</u>

während die Kosten bei der Leuchtgasmaschine $10\frac{1}{4}$, bei der Dampfmaschine 9 und bei der Kraftgasanlage 8 Pfennig waren. Die Ersparnis ist also bedeutend. Dazu kommt noch, daß der Brennstoffverbrauch für die Pferdekraftstunde, wenn von dem Motor nur die halbe Leistung verlangt wird, im Verhältnis nicht so stark steigt wie bei Dampf- und Gasmaschinen.

Infolge der geringen Betriebskosten hat die Verwendung des Dieselmotors einen sehr starken Aufschwung genommen. Zu beachten ist jedoch, daß allen hier aufgestellten Vergleichsrechnungen mehr oder minder willkürliche Annahmen zugrunde liegen. Bei Dampfanlagen z. B. sinkt der Brennstoffverbrauch mit zunehmender Ma-

¹⁾ Vergl. S. 77.

schinengröße noch stärker als bei Dieselmotoren, außerdem steht die Kohle oft weit billiger zur Verfügung, als oben angenommen. Bei Leistungen bis etwa 5000 oder 10 000 PS kann daher nicht allgemein gesagt werden, daß die eine oder die andere Maschinenart vorzuziehen wäre. Über 10 000 PS hinaus beherrscht im allgemeinen die Dampfmaschine (Dampfturbine) das Feld. Aber auch hier gibt es Ausnahmen; so ist im Kraftwerk Neuhoft der Hamburgischen Elektrizitätswerke eine Dieselmotorenmaschine von 15 000 PS aufgestellt, die besonders die „Spitzenbelastungen“ aufnehmen, d. h. dann eintreten soll, wenn zeitweise der Strombedarf besonders hoch ansteigt. Die Dieselmotorenmaschine ist für diesen Zweck besonders gut geeignet, weil sie innerhalb weniger Minuten in Betrieb gesetzt werden kann. Neuerdings ist auch bei Dampfmaschinen die zur Inbetriebnahme oder Steigerung der Leistung erforderliche Zeit wesentlich verkürzt worden.

In großem Umfange haben sich Dieselmotorenmaschinen u. a. für den Schiffsbetrieb eingeführt. Nach Angabe von Goos¹⁾ haben sorgfältige Vergleiche an drei Schwesterschiffen von ungefähr 10 000 t Tragfähigkeit ergeben, daß die Gesamtkosten des Dieselmotorenantriebes — reine Betriebskosten einschließlich Kosten für Instandhaltung sowie Verzinsung und Abschreibung — sich zu den Kosten des Dampftriebes mit Kohlefeuerung wie 80:100 verhielten. Ein weiterer Vorteil dieser Antriebsart ist, daß infolge des geringeren Brennstoffverbrauches die Dieselmotorenschiffe ungleich länger mit ihrem Brennstoffvorrat auskommen; der „Aktionsradius“ beträgt bei den erwähnten Schiffen ungefähr 26 000 gegen 6 300 Seemeilen, also ungefähr das Vierfache. Das macht die Dieselschiffe besonders wertvoll für lange Reisen, auf denen die Beschaffung von Kohlen schwierig ist.

Neuerdings hat sich der Dieselmotor auch für den Antrieb von Lastkraftwagen eingeführt. Er beginnt weiter den Flugzeugantrieb zu erobern.

Mit dem guten Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschinen haben sich übrigens die Konstrukteure noch nicht zufrieden gegeben, sondern sie haben sich bemüht, auch noch die Abfallwärme, die mit den Abgasen ins Freie geht, auszunutzen. Da die Gase mit hoher Temperatur (etwa 400 bis 600°) aus dem Zylinder austreten, so kann man sie benutzen, um heißes Wasser, z. B. für Heizungszwecke, oder Dampf zum Antrieb von Dampfmaschinen zu erzeugen. Auch das ablaufende Kühlwasser, das eine Temperatur von etwa 40 bis 50° hat, kann noch weiter ausgenutzt werden, so daß man bis zu einer Gesamtwärmeausnutzung von 50 bis 60%, ja sogar 80% kommt²⁾. Eine

¹⁾ Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 1924, S. 435.

²⁾ Vergl. Barth, Wahl, Projektierung und Betrieb von Kraftanlagen, 4. Auflage 1925. Berlin: Julius Springer.

englische Schiffsmaschinenbauart arbeitet auf der einen Kolbenseite als Dieselmotor, auf der anderen als Dampfmaschine, wobei der Dampf durch die Abgase des Dieselmotors erzeugt wird.

Andere Motoren, die flüssige Brennstoffe verbrauchen, arbeiten meistens in der Weise, daß der Brennstoff zunächst in einem „Vergaser“ zur Verdunstung gebracht wird. Er bildet dann ein Gas, das genau wie beim Stadtgasmotor mit Luft gemischt und in den Zylinder der Maschine eingeführt wird. In Frage kommen hauptsächlich Benzin und Benzol, daneben Spiritus. Ganz besonders eignen sich diese Stoffe für den Betrieb von Kraftfahrzeugen, Motorbooten und Flugzeugen, die ihren Brennstoffvorrat mitführen müssen, aber so wenig wie möglich dadurch belastet werden sollen. Vor allem Benzinmotoren haben für diesen Zweck weiteste Verbreitung gefunden. Der Brennstoff für diese Motoren ist jedoch ungefähr viermal so teuer wie der für Dieselmotoren, so daß sie bei ortsfester Aufstellung, z. B. für Werkstättenbetrieb, diesen durchweg unterlegen sind.

Der Zwang zur Einschränkung der Einfuhr hat in den letzten Jahren namentlich bezüglich des Antriebes von Kraftwagen wieder ganz neuen Gesichtspunkten Geltung verschafft. Es ist zwar gelungen, im Leuna-Werk Benzin in großem Maßstabe aus Kohle zu erzeugen, und auch auf andere Weise ist eine starke Vermehrung der heimischen Benzinerzeugung zu erwarten. Bei der fortschreitenden Motorisierung genügt das aber nicht; man hat deshalb eine ganze Reihe Versuche gemacht, um heimische Brennstoffe für Kraftwagen zu verwenden. Dazu gehört die Erzeugung von Generatorgas aus Holz oder Koks auf dem Kraftwagen selbst, weiter die Mitnahme von Stadtgas, das auf 200 at verdichtet ist, in Stahlflaschen. Auch die Einführung elektrisch betriebener Akkumulatorenwagen kommt für kleinere Fahrbereiche (Stadtbetrieb) wieder in Frage. Endlich versucht man, zum Dampfbetrieb zurückzukehren, mit einem auf dem Kraftwagen stehenden, selbsttätig beheizten Hochdruck-Kleinkessel. Alle diese Wege können zu Erfolgen führen. Das Ganze ist nicht mehr allein eine Frage der Billigkeit, sondern den Ausschlag geben große volkswirtschaftliche Gesichtspunkte.

Nach und nach sind die meisten brennbaren Stoffe, die als rohe Naturprodukte oder als verfeinerte Erzeugnisse vorkommen, für den Motorbetrieb herangezogen worden. Aber die Technik, die unermüdlich bestrebt ist, alle Verluste zu vermeiden, hat sich damit nicht begnügt. Es war ein genialer Gedanke, die Gase, die aus den Hochöfen unserer Hüttenwerke entweichen, in Gasmaschinen zu verwerten. Diese Hochofengase oder Gichtgase enthalten sehr viel unvollständig verbrannten Kohlenstoff; 1 m³ besitzt einen Heizwert von etwa 900 Kalorien, nicht viel weniger als das auf S. 118 besprochene Generatorgas. Gereinigt ist dieser Stoff infolgedessen ein

sehr brauchbares Treibmittel. Daher haben fast alle großen Hüttenwerke riesige Gasmaschinenanlagen von vielen Tausenden von Pferdekraften gebaut und erzeugen damit die Kraft zum Antrieb ihrer Gebläse und Walzwerke ziemlich billig. Die Fortschritte in der Dampftechnik, vor allem der Übergang zu hohem Druck, haben indessen neuerdings dazu geführt, daß Dampfanlagen mit Dampfkesseln, die mit Hochofengas gefeuert werden, mit den Großgasmaschinen in erfolgreichen Wettbewerb treten.

9. Dampfturbinen.

Wir waren dermaßen daran gewöhnt, bei der Ausnutzung zu Kraftzwecken an Maschinen zu denken, bei denen ein Kolben durch den Druck des Gases in einem Zylinder vorwärtsgeschoben wird, daß es höchst überraschend kam, als der Schwede De Laval den Gedanken aufbrachte, den im Kessel erzeugten Dampf ebenso auszunutzen wie das Wasser in einer Turbine, d. h. also, ihn frei ausströmen und gegen Flächen drücken zu lassen, die an einem Rad befestigt waren. Dies war der Grundgedanke der „Dampfturbine“. Vor der wissenschaftlichen Feststellung, daß Arbeit und Wärme einander gleichwertig sind, wäre man schwerlich ernsthaft einem solchen Gedanken näher getreten, denn wenn man sich auch recht wohl vorzustellen vermag, daß das Wasser vermöge seiner „Schwere“ einen ganz beträchtlichen Druck ausüben kann, so erscheint es doch im ersten Augenblick ganz ungläubhaft, daß ein so „leichter“ Stoff, wie Dampf, imstande sein sollte, rein dadurch, daß er beim freien Ausströmen gegen eine gekrümmte Fläche stößt, große Kräfte hervorzubringen und dasselbe zu leisten, wie wenn er in einem geschlossenen Raum auf den beweglichen Kolben drückt. Die Vorstellung liegt nahe, daß Dampf, der aus seinem Behälter ins Freie entweicht, verpufft ist und jedenfalls keine Arbeit mehr verrichten kann.

Die wissenschaftliche Überlegung belehrt uns anders. Der ausströmende Dampf hat eine gewisse Geschwindigkeit und daher auch eine bestimmte Energie, ein genau berechenbares Arbeitsvermögen. Solange keine Verluste eintreten, ändert sich dieses Arbeitsvermögen nicht, sondern steht immer zur Verwendung bereit; es gehören nur geeignete Maschinen dazu, um die Arbeit nutzbar zu machen. Strömt der Dampf verlustlos aus, so entspricht seine Bewegungsenergie, seine lebendige Kraft, genau der Wärmemenge, die er beim Ausströmen verloren hat. Allerdings ist die Kraft, die ein Dampfteilchen, verglichen mit einem Wasserteilchen vom gleichen Rauminhalt, ausüben kann, außerordentlich gering, entsprechend seinem niedrigen Gewicht. Aber wir müssen uns vergegenwärtigen, daß bei Wasserturbinen eine Wassergeschwindigkeit von 20 m in der Sekunde schon