

daß die Verdichtung, wie gestrichelt angedeutet, erst bei g statt bei d beginnt und auf 7 at Spannung endigt. Die Fläche des Diagramms wird dadurch ganz bedeutend, der gestrichelten Linie entsprechend, vergrößert und die vom Kolben geleistete Arbeit vermehrt.

Wir können also mit dem Indikator in die Dampfmaschine hineinblicken und uns über das Arbeiten ihrer inneren Organe Klarheit verschaffen. Über die meisten Krankheiten, an denen eine Maschine leiden kann, läßt sich auf diese Weise rasch und sicher eine Diagnose stellen.

7. Energiebilanz und wirtschaftliche Bilanz einer Dampfkraftanlage.

Selbstverständlich werden auch an allen anderen Stellen die Vorgänge so genau wie möglich verfolgt und die Verluste bestimmt. So wird bei jedem Versuch das niedergeschlagene Wasser abgefangen und gemessen. Z. B. kühlt sich der Dampf, der in den Heizmantel eines Zylinders geschickt wird, fortdauernd ab, schlägt sich nieder und wird durch neuen ersetzt. Die Bestimmung der niedergeschlagenen Menge ergibt den Wärmeverlust an diesem Punkte.

Bestimmt man endlich den Wärmehalt, den der Dampf noch hat, wenn er an den Kondensator abgeführt wird, so muß die Rechnung aufgehen. Die an den Kolben abgegebene und durch den Indikator gemessene Arbeit ist gleich der im Dampf zugeführten Energie (70 cal) abzüglich der in den Kondensator gehenden Wärme (51 cal) und der Verluste bei der Ausführung des Arbeitsprozesses seitens des Dampfes ($5\frac{1}{2}$ cal). Bei den hier gemachten Annahmen (vergl. Abb. 102, S. 96) bleibt ein Rest: $70 - 5\frac{1}{2} - 51 = 13\frac{1}{2}$ Kalorien als durch den Indikator gemessene, vom Dampf tatsächlich geleistete Maschinenarbeit.

Da im vorliegenden Falle die Dampfmaschine einen Generator antreibt und elektrischen Strom erzeugt, so sind die weiteren Verluste ziemlich leicht zu bestimmen. Elektrische Arbeit kann nämlich sehr bequem gemessen werden; in Privathäusern, wo elektrisches Licht verbraucht wird, haben wir ja auch sogenannte Wattstundenzähler, die angeben, wieviel elektrische Energie in einer bestimmten Zeit verbraucht ist. Ähnliche Instrumente geben im großen die vom Generator erzeugte Arbeit an. Wie groß die Verluste im Generator selbst sind, läßt sich erfahrungsgemäß ziemlich sicher sagen — in dem Beispiel ist angenommen 1,1 Kalorien. Wenn der Generator nach den Angaben der Meßinstrumente 10,9 Kalorien in Form von elektrischer Arbeit abgibt, so muß er also 12 Kalorien empfangen

haben. Daraus folgt, daß von den $13\frac{1}{2}$ Kalorien, die der Dampf als mechanische Arbeit an den Kolben abgegeben hat, $1\frac{1}{2}$ Kalorien zur Überwindung der Reibung in der Dampfmaschine verbraucht worden sind.

In der elektrischen Leitung mögen jetzt noch 0,5 Kalorien verloren gehen. Von dem Rest von 10,4 Kalorien werden 4 für Beleuchtungszwecke verwandt und 6,4 für den Antrieb von Motoren. Da bei der Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Arbeit nochmals ein Verlust von 0,9 Kalorien eintritt, so werden von den Motoren $5\frac{1}{2}$ Kalorien nutzbar gemacht.

Nun läßt sich endlich die Bilanz für den ganzen Verlauf der Energieumsetzung aufstellen.

Energiebilanz der Dampfanlage nach Abb. 102, S. 96.

Im Brennmaterial sind aufgewandt: **100** Kalorien. Verloren gingen:

durch Verbrennungsrückstände	3	Kalorien
durch Schornsteinverluste	20	„
durch Ausstrahlung usw. des Kessels	6	„
durch die Leitung zur Maschine	1	„
durch Abführung an den Kondensator	51	„
beim Arbeiten des Dampfes in der Maschine . . .	5,5	„
durch Reibung im Getriebe der Dampfmaschine .	1,5	„
bei der Umsetzung in elektrische Energie . . .	1,1	„
bei der Fortleitung der Elektrizität	0,5	„
durch die Energieumwandlung in den Elektromotoren	0,9	„

Gesamtverlust 90,5 Kalorien.

Nutzbar gemacht wurden 4 Kalorien in der Beleuchtung

und 5,5 Kalorien durch die Motoren, zusammen . . **9,5** „

100 Kalorien.

Von 100 Kalorien sind also nur 9,5, nicht einmal der zehnte Teil, nutzbar gemacht worden! Das ist eigentlich kein glänzendes Ergebnis, und es könnte dazu verleiten, den Stand des technischen Könnens niedrig einzuschätzen, wenn man die Sachlage nur oberflächlich betrachtet. Der Nichtfachmann wird vor allen Dingen geneigt sein, den gewaltigen Kondensatorverlust von 51 Kalorien zu bemängeln, und er wird es für notwendig halten, Mittel und Wege zu finden, um diesen Verlust zu verringern. Technisch richtiges Durchdenken der Verhältnisse führt aber bald dazu, diese Versuche als fruchtlos aufzugeben. Bei dem Wärmegefälle, das zur Verfügung steht, läßt sich nun einmal, sogar mit einer vollkommenen und ganz verlustfreien Dampfmaschine, nichts anderes erreichen, als

daß etwa $\frac{1}{4}$ der im Dampf zugeführten Wärme — in unserem Falle $\frac{1}{4} \times 70 = 17\frac{1}{2}$ Kalorien — nutzbar gemacht werden. Etwas anderes zu versuchen, käme auf dasselbe heraus, wie wenn man das Gefälle einer Wasserkraft dadurch künstlich erhöhen wollte, daß man einen Kanal unmittelbar bis zum Meere grübe, damit das Wasser auf dem Wege von seiner natürlichen Abflußstelle bis zum Meer kein Gefälle mehr einbüßte (vergl. S. 76). Das Mittel stände in gar keinem Verhältnis zu dem Erfolge, der zu erzielen wäre! Wohl kann durch einen kurzen, nicht zu tiefen Graben das Gefälle etwas vergrößert werden — bei der Dampfmaschine entspricht dem der Kondensator, der den Zweck hat, den Dampf statt mit 100° mit 50° aus dem Zylinder zu entlassen. Eine weitere erhebliche Verringerung des Temperaturgefälles wäre nur möglich, wenn man die Kühlwassermenge ganz ungeheuer vermehrte oder gar statt des gewöhnlich zur Verfügung stehenden Wassers, bei dem man mit einer Temperatur von durchschnittlich 20° Celsius rechnen muß, künstlich gekühlte Flüssigkeiten zum Niederschlagen des Dampfes anwenden wollte, was vom wirtschaftlichen Standpunkt natürlich gar nicht in Frage kommt. Den Dampf sich so weit ausdehnen zu lassen, würde außerdem, wie wir gesehen haben, doch nicht möglich sein, weil dabei die Spannungen und somit die ausgeübten Kräfte so niedrig wären, daß sie nicht einmal die eigene Reibung der Maschine überwinden könnten¹⁾.

Es ist demnach richtig, wenn die Hauptarbeit darauf verwandt wird, die Energieverluste, die durch Mängel des eigentlichen Arbeitsvorganges entstehen — in unserem Falle $5\frac{1}{2}$ Kalorien —, so niedrig wie möglich zu halten. Allerdings müssen wir heute die Dampfmaschine als ziemlich vollkommen betrachten und dürfen von weiteren Verbesserungsversuchen keine übertriebenen Erfolge erhoffen.

Leicht kann übrigens bei solchen und ähnlichen Versuchen der Ingenieur mit dem Kaufmann — oder das wissenschaftliche Streben mit dem wirtschaftlichen Denken — durchgehen, so daß sich vielleicht ein scheinbarer Erfolg ergibt, der in Wahrheit nicht im Sinne der Ziele der Technik liegt. Die guten Ergebnisse von Probeversuchen lassen sich nämlich meist nicht im praktischen Betrieb erreichen, auf den es allein ankommt. Ein Elektrizitätswerk z. B. ist immer nur während verschwindend kurzer Zeit an jedem Tage „voll belastet“, d. h. es hat die größte Strommenge, die es ab-

¹⁾ Etwas günstiger liegen die Verhältnisse bei der Dampfturbine, weil sie große Mengen niedrig gespannten Dampfes leichter verarbeiten kann. Hier lohnt es sich also eher, das Gefälle weiter zu erhöhen, d. h. die Temperatur und damit die Dampfspannung im Kondensator niedriger zu halten (vgl. die Ausführungen auf S. 127).

geben kann, vielleicht nur während einer Viertelstunde in die Leitung zu schicken. Im Winter tritt dies etwa um 5 Uhr ein, wenn in Geschäften und Privathäusern bereits überall Licht gebrannt wird, während gleichzeitig in Fabriken oder Werkstätten, die ihre Kraft von dem Elektrizitätswerk beziehen, noch gearbeitet wird. Die Inanspruchnahme des Werkes nimmt dann sehr rasch ab und beträgt zwischen 2 und 4 Uhr nachts vielleicht nur $\frac{1}{10}$ oder $\frac{1}{20}$ der größten Leistung. Die Kesselanlage muß zum Teil unter Dampf bleiben, so daß die Abkühlungsverluste der Dampfkessel im Verhältnis zur Leistung sehr hoch sind. Die Dampfmaschinen müssen beim Nachlassen des Stromverbrauches nacheinander stillgesetzt, beim Anwachsen der Leistung wieder eingeschaltet werden, was jedesmal einen Verlust verursacht, da die Maschine kalt geworden ist und ziemlich viel Dampf dazu gehört, um sie zunächst einmal zu erwärmen. Dazu kommt, daß die Maschinen, wenn sie nicht ihre volle Leistung hergeben, im Verhältnis mehr Dampf verbrauchen. Schließlich ist zu berücksichtigen, daß die Bedienung der Anlage, vor allem der Kessel, nicht immer so sorgfältig ist wie bei Probeversuchen. Alle diese Umstände haben zur Folge, daß die im wirklichen Betrieb erreichbare Wärmeausnutzung zu derjenigen, die bei Versuchen mit voller Leistung festgestellt wird, sich u. U. nur etwa wie 6:10 verhält. Oder mit anderen Worten, wir würden im Jahresdurchschnitt bei unserem kleinen und nicht besonders modernen Elektrizitätswerk von den 100 Brennstoffkalorien statt $9\frac{1}{2}$ nur etwa $5\frac{1}{2}$ bis 6 ausnutzen!

Entwirft man eine Dampfanlage also nach richtigen technischen Gesichtspunkten, so muß in allererster Linie dahin gestrebt werden, daß dieser große Jahresverlust heruntergedrückt wird, daß also der Betrieb im Ganzen sich zweckmäßig einrichten läßt und sicher und leicht überwacht werden kann. Ob die beim Versuch zu erzielende Ausnutzung der Wärme 9,5 oder 9,9% beträgt, spielt demgegenüber eine geringere Rolle.

Hinzu kommt, daß die Brennstoffkosten überhaupt nur einen Teil der Gesamtausgaben ausmachen. Wir hatten oben gesehen, daß 1 kg Kohle von 7000 Kalorien Heizwert, wenn keine Verluste entstanden, eine Stunde lang eine Leistung von 11 PS oder, wie man zu sagen pflegt, 11 Pferdekraftstunden erzeugen könnte. Wenn nun aber die vom Generator im Jahresdurchschnitt abgegebene Leistung $6\frac{1}{2}$ % der Brennstoffenergie beträgt, so würde das Kilogramm Kohle nur etwa 0,7 Pferdekraftstunden erzeugen. Kostet, wie oben angenommen, 1 kg Kohle 2 Pfennig,¹⁾ so beläuft sich also

¹⁾ Die Zahlenangaben dürfen nur als Beispiele angesehen werden, da die Kosten außerordentlich verschieden sind. Dies gilt auch für die Angaben im Unterabschnitt 8.

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-