

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

hoch ist, während bei den ersten Dampfturbinen mit Dampfgeschwindigkeiten von 1000 m in der Sekunde und mehr gearbeitet werden mußte; d. h. man ließ die Dampfteilchen so ins Freie treten, daß, wenn sie ihren Weg eine volle Sekunde lang verfolgt hätten, sie in dieser Zeit eine Strecke von 1 km durchflogen haben würden, mehr als eine Kanonenkugel, die beim Verlassen des Laufes ungefähr 500 bis 800 m sekundliche Geschwindigkeit hat. Infolge dieser gewaltigen Geschwindigkeit kommen in einer einzigen Sekunde ungeheuer viele Dampfteilchen mit dem Turbinenrad in Berührung und geben ihr Arbeitsvermögen ab, so daß die von dem einen Dampfteilchen geleistete Arbeit sich entsprechend vervielfacht. Abb. 113 gibt eine

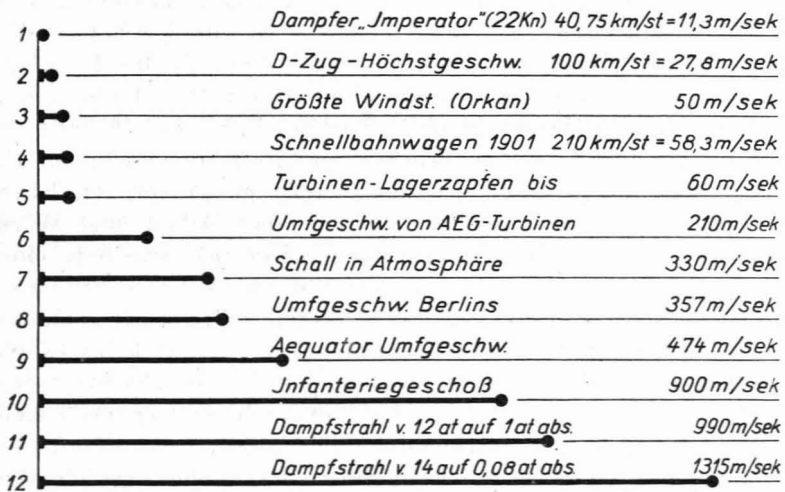


Abb. 113. Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten (TWL 42).

von der AEG stammende sehr anschauliche Zusammenstellung verschiedener Geschwindigkeiten, die erkennen läßt, daß die Austrittsgeschwindigkeit eines Dampfstrahls noch über der Umfangsgeschwindigkeit des Äquators und der Geschwindigkeit eines Geschosses liegt, daß aber die Umfangsgeschwindigkeit der Dampfturbine auf 210 m/s herabgesetzt werden konnte.

Allerdings lassen sich die mit solchen Geschwindigkeiten dahinstürmenden leichten Dampfteilchen viel schwerer als die Teile der strömenden Wassermasse bändigen und in die richtigen Bahnen lenken, auf denen sie ihre Arbeit verrichten sollen. Sie sind immer geneigt, von dem vorgeschriebenen Wege abzuweichen und ihre Energie in unnützem Durcheinanderwirbeln zu verschwenden. Die Folge ist, daß an eine so hohe Energieausbeute, wie bei Wasserturbinen,

gar nicht gedacht werden kann. Dort lassen sich die Verluste, wie wir gesehen haben, bei guten Anlagen auf 10 bis 20% beschränken, so daß die Energieausbeute 80 bis 90% beträgt. Vergleichen wir dagegen die Wärmeausnutzung der Dampfturbine mit dem, was von einer verlustfreien Maschine geleistet werden könnte, die innerhalb eines bestimmten Temperaturgefälles arbeitet, so zeigt es sich, daß die Verluste bei Maschinen bis zu 1000 Pferdestärken etwa 40% betragen, noch mehr als bei Kolbendampfmaschinen, wo sie bei dieser Größe auf 30% der theoretisch möglichen Leistung beschränkt werden können.

Doch ehe wir hierauf näher eingehen, sei die Wirkungsweise der Dampfturbine, wie sie De Laval geschaffen hat, an Hand von Abb. 114¹⁾ kurz erläutert. Die vier Rohrstücke oder Düsen, wie man sie mit dem technischen Ausdruck zu bezeichnen pflegt, denke man sich an ein gemeinsames Rohr angeschlossen, das zum Kessel führt, so daß der Dampf mit vollem Druck in die Düsen eintritt. In der Düse kann er sich frei

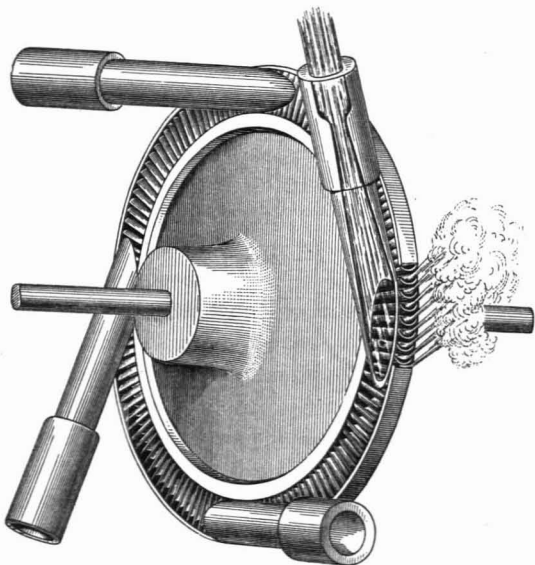


Abb. 114. Wirkungsweise einer Dampfturbine.

ausdehnen, und seine Teilchen nehmen dabei eine sehr hohe Geschwindigkeit an. Sie strömen in die Schaufeln des Turbinenrades und suchen dieses Rad — in der Abbildung rechts herum — zu drehen. Durch die Schaufeln wird der Dampf aus seiner Richtung abgelenkt; er strömt auf der anderen Seite wieder aus dem Rade heraus, und zwar in die freie Luft oder in den Kondensator.

Ein richtiges Bild davon, wie die Turbine arbeitet, gibt Abb. 114 übrigens noch nicht. Denn es hat dort den Anschein, als ob der Dampf in der Richtung, welche die Schaufelenden ihm geben, mit großer Geschwindigkeit ins Freie entwiche. Das ist aber nur richtig, wenn das Turbinenrad festgehalten wird. Der Dampf übt dann wohl

¹⁾ Das Bild ist entnommen aus Perry-Meuth, Die Dampfmaschine, einem Buch, das wegen seiner einfachen, leicht faßlichen Darstellung der Dampfmaschinentheorie namentlich Anfängern zu empfehlen ist.

einen Druck auf die Schaufeln aus, da aber die Schaufeln still stehen, so leistet dieser Druck keine mechanische Arbeit. Stellen wir uns den Kolben einer Dampfmaschine vor. Hält man den Kolben fest, so ist die Kraft, die der Dampf darauf ausübt, sozusagen tot, es wird keine Arbeit geleistet und natürlich auch kein Dampf verbraucht. Hier, bei der Turbine, strömt nun allerdings Dampf durch die Schaufeln hindurch, aber es liegt, von Reibungsverlusten abgesehen, kein Grund vor, warum er bei diesem Durchströmen seine Geschwindigkeit ändern sollte. Da er also seine Geschwindigkeit behält, so ändert sich sein Arbeitsvermögen nicht. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie bleibt demnach auch hier in Geltung.

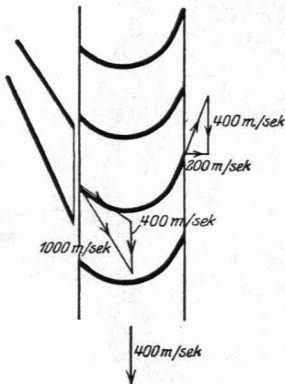


Abb. 115. Geschwindigkeitsverhältnisse bei einer Dampfturbine.

Den wirklichen Vorgang beim Arbeiten der Turbine zeigt Abb. 115. Er deckt sich so vollständig mit dem bei der Wasserturbine¹⁾, daß es sich erübrigt, eine Erläuterung hinzuzufügen; nur sind die Geschwindigkeiten ganz andere als dort. Die Eintrittsgeschwindigkeit beträgt in dem Beispiel 1000 m, die Geschwindigkeit, mit welcher der Laufkranz sich bewegt, 400 m und die Austrittsgeschwindigkeit des Dampfes 200 m in der Sekunde. Verfolgen wir 1 kg Dampf — denn den Dampf oder irgendein anderes Gas können wir genau so gut nach Kilogramm messen wie das Wasser —, so hat dasselbe beim Eintritt ein Arbeitsvermögen von

$$\frac{1}{20} \times 1000 \times 1000 = 50000 \text{ mkg, beim Aus-}$$

tritt $\frac{1}{20} \times 200 \times 200 = 2000 \text{ mkg}$. Der Verlust, der daraus entsteht, daß der Dampf eine gewisse Bewegungsenergie mitnimmt, beläuft sich also hier auf $\frac{1}{25}$ oder 4% des beim Eintritt vorhandenen Arbeitsvermögens.

Noch etwas anderes können wir unmittelbar aus Abb. 115 entnehmen. Die Schaufel legt in der Sekunde einen Weg von 400 m zurück, indem sie sich beständig um die Welle des Turbinenrades dreht. Hat nun die in Abb. 115 angenommene Turbine einen Durchmesser von 0,4 m, so ist der Weg einer Schaufel bei jeder Umdrehung des Rades ungefähr $1\frac{1}{4}$ m, und die Turbine muß sich also $\frac{400}{1\frac{1}{4}} = 320$ mal in der Sekunde drehen, wenn sie die Dampfenergie vollständig aus-

¹⁾ Vergl. S. 86, Abb. 97.

nutzen will. Das ist eine Umlaufzahl, wie sie sonst im Maschinenbau kaum vorkommt. Ist der Werkstoff, aus dem das Rad hergestellt ist, nur ein wenig ungleichmäßig, so muß das Rad zerspringen, und auch auf die Welle würden ungeheure Kräfte wirken, sobald das Rad nicht nach allen Seiten hin im vollkommensten Gleichgewicht ist. De Laval setzte das Rad deshalb auf eine ganz dünne Welle, damit die auftretenden Schleuderkräfte die Welle ohne Schaden etwas verbiegen und das Rad richtig einstellen könnten. Anderen Konstrukteuren ist es gelungen, die Umlaufzahlen ganz erheblich zu vermindern, indem man den Dampf nacheinander durch mehrere Räder hindurchtreten läßt und in jedem Rade nur einen Teil der Dampfenergie ausnutzt.

Was für Verluste treten nun, abgesehen von dem Austrittsverluste, auf? Nehmen wir wieder einmal an, daß, wie bei der schematischen Darstellung der Dampfmaschinenanlage in Abb. 102, von 100 Brennstoffkalorien 30 bei der Erzeugung und Fortleitung des Dampfes verloren gehen und 70 bis zur Maschine gelangen. Nun war dort angenommen, daß 51 Kalorien von den 70 durch den aus dem Zylinder ausströmenden Dampf in den Kondensator mitgenommen werden. Der Austrittsverlust würde nicht ganz so hoch sein, wenn es möglich wäre, den Dampf bis auf die Spannung im Kondensator herunter sich ausdehnen zu lassen; dabei würde der Dampf aber zuviel Raum einnehmen und geradezu ungeheuerlich große Zylinder erfordern. Bei der Dampfturbine liegt die Sache anders. Da der Dampf sehr rasch durch die Schaufeln hindurchströmt, so macht es keine Schwierigkeit, auch mit einer Dampfmenge von großem Rauminhalt fertig zu werden und das vorhandene Temperaturgefälle wirklich auszunutzen. Unter den Umständen lohnt es sich auch, die Spannung im Kondensator recht niedrig, auf etwa $\frac{1}{25}$ at, zu halten.

Infolge dieser besseren Ausnutzung des Gefälles stehen für die Ausnutzung in der Dampfturbine etwa 10% mehr Kalorien zur Verfügung als bei der Kolbenmaschine. Wenn also dort $70 - 51 = 19$ Kalorien in der Maschine auszunutzen waren, so dürfen wir hier unter gleichen Verhältnissen mit etwa 21 Kalorien rechnen.

Oben war gesagt, daß bei einer Dampfturbine von 500 bis 1000 PS ungefähr 40% dieser Wärmemenge beim Arbeiten des Dampfes in der Maschine verloren gehen. Das wären also $8\frac{1}{2}$ Kalorien, gegen $5\frac{1}{2}$ bei der Kolbenmaschine. Die Verluste sind aber hier ganz anderer Art. Während dort die Hauptschuld dem Umstände zuzuschreiben war, daß dieselben Flächen einmal von abgekühltem, das andere Mal von heißem, frischem Dampf berührt werden, wodurch diesem Wärme entzogen wird, tritt bei der Dampfturbine

etwas Ähnliches nicht ein, denn der Dampf strömt gleichmäßig durch die Schaufeln. Dieselben Flächen werden immer nur von Dampf im gleichen Zustande berührt. Die Verluste sind hier, worauf schon oben hingewiesen war, hauptsächlich der Abweichung der strömenden Dampfteilchen von ihrem richtigen Lauf, den Wirbelungen im Dampfstrom, zuzuschreiben. Die Laufräder finden beim Umlaufen Reibung am Dampf; sie erfahren dadurch selbst einen Bewegungswiderstand und reißen gleichzeitig Dampfteilchen mit, so daß sie die richtige Strömung stören. Dazu kommen der Reibungsverlust in den Düsen, die den Dampfstrahl auf die Laufräder leiten, die Reibung beim Durchströmen der Laufräder selbst und endlich die beim Austreten noch im Dampf enthaltene lebendige Kraft.

Sehr viel geringer als bei Dampfmaschinen ist dagegen die Reibung der mechanischen Teile aneinander, denn es kommt hier nur der Reibungswiderstand der Welle an den Lagern und Dichtungen in Betracht.

Stellen wir nun die Energie-Bilanzen der Dampfturbine und der Kolbenmaschine von etwa 500 bis 1000 PS einander gegenüber, so ergibt sich Folgendes:

	Kolbenmaschine	Dampfturbine
Zugeführt	70 cal	70 cal
Abgeführt	51 „	49 „
In der Maschine verfügbar	19 cal	21 cal
Verluste beim Arbeiten des Dampfes	$5\frac{1}{2}$ cal	$8\frac{1}{2}$ cal
Verlust infolge Reibung	$1\frac{1}{2}$ „	$\frac{1}{4}$ „
Zusammen	7 cal	$8\frac{3}{4}$ cal
In mechanische Arbeit verwandelt	$19 - 7 = 12$ cal	$21 - 8\frac{3}{4} = 12\frac{1}{4}$ cal

Es ist höchst überraschend, daß in diesem Beispiel die Wärmeausnutzung bei den beiden Arten von Maschinen sich kaum merklich unterscheidet. Obwohl die Verluste auf ganz andere Weise zustande kommen, haben sich doch praktisch die gleichen Endziffern ergeben. Wir haben also wieder ein Beispiel dafür, daß nach einer Art von natürlichem Gesetz eine an sich gute Neuerung doch selten das Alte ganz darniederwirft, sondern sich mit ihm in eine Art von Gleichgewicht einstellt.

Abb. 116 läßt erkennen, daß der Wärmeverbrauch, auf die Pferdekraftstunde bezogen, bei kleineren Maschinen unter etwa 500 PS für die Kolbenmaschine geringer ist als für die Dampfturbine. Gewisse Bauarten von Kolbenmaschinen arbeiten sogar noch günstiger

als dort angegeben. Über etwa 1000 PS hat aber die Dampfturbine unbestritten den Vorrang, so daß sie hier das Feld im wesentlichen beherrscht. In elektrischen Kraftwerken sind bereits Maschinen über 100000 PS Leistung im Betrieb.

Bei mittleren Leistungen streiten sich Kolbenmaschinen und Dampfturbinen nicht selten um den Vorrang. Unter Umständen kann ausschlaggebend sein, daß die Dampfturbine weniger Platz beansprucht. Abb. 117 zeigt in sehr anschaulicher Weise, welchen Einfluß die Erhöhung der Umlaufzahl von $n = 1000$ bis auf $n = 3000$ in der Minute auf die Abmessungen der Maschine hat, wie das Kon-

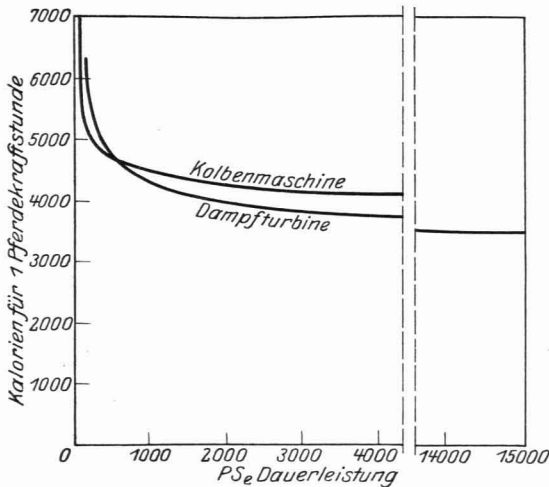


Abb. 116. Wärmeverbrauch von ortsfesten Kolbenmaschinen (12 at, 300°) und Dampfturbinen (12 at, 300°, 94% Luftleere am Kondensator), bezogen auf die abgegebene Leistung.

struktionsgewicht, d. h. das Gewicht des in die Maschine hineingebauten Materials, von 17,5 auf 5,9 kg für 1 Kilowatt Leistung ($1\text{ kW} = 1,36\text{ PS}$) heruntergegangen ist. Dies gilt für Turbogeneratoren, d. h. für Dampfturbinen, die mit Generatoren (Stromerzeugern) zusammengebaut sind, von 16000 Kilowatt Leistung. Die größten Kolbenmaschinen sind bis etwa 4000 Kilowatt gebaut worden, bei 83 Umdrehungen in der Minute. Hier betrug das Konstruktionsgewicht für die Dampfmaschine mit Stromerzeuger nicht weniger als 177 kg für 1 Kilowatt. Die erhöhten Umlaufgeschwindigkeiten der Turbogeneratoren fordern aber eine sehr sorgfältige Konstruktion aller Teile unter Verwendung besten Werkstoffs, so daß nicht etwa angenommen werden darf, daß die Kosten im gleichen Verhältnis heruntergehen. Im Gegenteil, eine Dampfturbine pflegt in der Anschaffung teurer zu sein als eine Kolbenmaschine von gleicher Leistung.

Der Techniker ist an sich geneigt, der Dampfturbine für die Zukunft die größeren Aussichten zu geben. Auf allen anderen Gebieten des Maschinenbaues kämpfen die Maschinen, die gleichmäßig umlaufend arbeiten, erfolgreich gegen die Maschinenbauarten mit hin- und hergehender Bewegung. Auch für den Nichtfachmann ist es leicht zu verstehen, daß es eigentlich ein Unding ist, wenn man, wie bei einer Kolbendampfmaschine, große Gewichtsmassen abwechselnd in der einen und in der anderen Richtung bewegt und dazwischen immer wieder zum Stillstand bringt, statt sie fortdauernd laufen und arbeiten zu lassen.

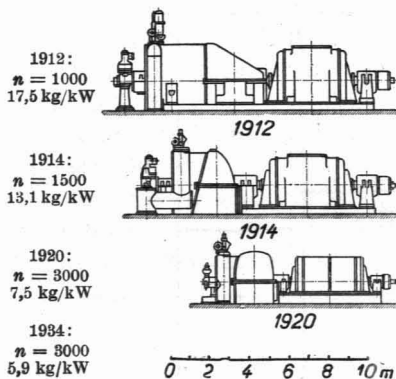


Abb. 117. Vergleich von Gewicht und Abmessungen von Turbodynamos verschiedener Umlaufzahlen bei 16 000 Kilowatt Leistung (TWL 44).

Man möchte deshalb auch Turbinen für Gasbetrieb an Stelle der heutigen Kolbengasmaschinen bauen, wie sie oben ausführlich besprochen wurden. Die Verwirklichung dieses Gedankens in großem Maßstabe begegnet indessen noch Schwierigkeiten.

Die Regelung aller Arten von Wärmekraftmaschinen wird, wie bei Turbinen beschrieben, von der Maschine selbst besorgt und dadurch die Umlaufzahl angenähert unverändert gehalten. Der Regler, vgl. Abb. 99, kann in ganz verschiedener Weise wirken. Bei den Dampfmaschinen verringert oder vermehrt er die Menge Dampf, die

jedesmal in den Zylinder strömt, bei Diesel- und Gasmaschinen die Menge Brennstoff, die zugeführt wird. Kleine Gasmaschinen werden auch in der Weise geregelt, daß die Brennstoffzufuhr, z. B. bei jedem vierten Hub, ganz ausfällt; dann leistet die Maschine vorübergehend um $\frac{1}{4}$ weniger. Auch dies führt der Regler selbsttätig aus. Dampfturbinen kann man durch Absperrung der Düsen regeln.

Wie schon früher erwähnt, ist es bei allen Arten von Kraftmaschinen wichtig, nicht nur festzustellen, wie hoch die Energieausnutzung bei der vollen Leistung der Maschine ist, sondern auch, wie sie sich bei geringerer Leistung stellt. Die meisten Maschinen werden ja nicht beständig voll in Anspruch genommen und arbeiten oft sogar fast durchweg mit geringerer als der höchsten Leistung. Zwei Maschinen, die bei voller Belastung ungefähr den gleichen Wärmeverbrauch haben, können aber unter Umständen ganz verschieden arbeiten, wenn sie nur mit $\frac{1}{3}$ oder $\frac{1}{4}$ der Normalleistung betrieben werden. Dadurch kann der wirtschaftliche Vergleich ganz wesentlich beeinflußt werden.