

Dampfmaschine ist dies der Fall. Das Lager kühlt sich infolge der Berührung mit der umgebenden Luft ab, auch nimmt das hindurchtretende Schmieröl Wärme mit; sonst würde seine Temperatur, da fortdauernd Wärme zugeführt wird, beständig zunehmen. Große, schwerbelastete Lager müssen häufig durch Wasser gekühlt werden, das beständig durch den Lagerkörper hindurchgepumpt wird und die erzeugte Wärme mit sich fortnimmt.

Wird das Lager zu heiß, so wird das Öl so dünn, daß es zwischen Zapfen und Lagerschale weggepreßt wird und die Teile einander rein metallisch berühren. Die Reibung wird dadurch viel größer, und das Lagermetall erhitzt sich jetzt rasch weiter, bis die aufeinander reibenden Flächen ihre Widerstandsfähigkeit verlieren und anfangen zu „fressen“, d. h. sich gegenseitig rasch abzunutzen und zu zerstören. Äußerlich macht sich die Erscheinung dadurch bemerkbar, daß das Lager anfängt zu rauchen; in der Nähe befindliche Holzteile können in Brand geraten, ein Fall, der bei den Achslagern von Eisenbahnwagen zuweilen eintritt. Leicht schmelzende Lagermetalle (Weißmetalle) werden flüssig und laufen aus dem Lagerkörper aus.

Daß mechanische Energie sich überhaupt in Wärme „verwandeln“ kann, ist zunächst sehr überraschend. Verständlicher wird diese Erscheinung, wenn man die Erklärung der Physiker für Wärme kennt. Danach befinden sich bei einem Körper die kleinsten Teilchen, die Moleküle, in beständigen Schwingungen, d. h. sie bewegen sich sehr rasch hin und her, ohne im übrigen ihren Ort zu verlassen, und zwar sind diese Schwingungsbewegungen um so rascher und häufiger, je höher die Temperatur des Körpers steigt. Wärme ist also nichts anderes, als eine andere Form von Bewegungsenergie, von lebendiger Kraft oder „Wucht“. Die lebendige Kraft, die die Bleikörner haben, wenn sie auf den Boden der Pappröhre aufschlagen, verwandelt sich unmittelbar in lebendige Kraft ihrer Moleküle. Die Schwingungen sind bei niedrigen Temperaturen so klein, daß sie z. B. bei den meisten Metallen den Zusammenhang des Werkstoffes, seine Festigkeit, nicht beeinflussen. Erst bei stärkerer Erhitzung wird das Material weniger widerstandsfähig und beginnt endlich zu glühen oder zu schmelzen.

8. Grundlagen für die technische Verwertung des im Wasser enthaltenen Arbeitsvermögens.

Was über Arbeit, lebendige Kraft, Erhitzung durch Reibung oder Stoß usw. gesagt wurde, gilt alles nicht nur für feste Körper, sondern auch für Flüssigkeiten. Daher kann das bequeme Verfahren,

das wir bei der Winde, der Dampfmaschine und in anderen Fällen anwandten, nicht nach der Arbeitsleistung der einzelnen Teile zu fragen, sondern nur nach der erzeugten Gesamtarbeit und den im Getriebe auftretenden Verlusten, auch hier Anwendung finden. Für Flüssigkeiten, ebenso für Gase, hat das Verfahren seine besonderen Vorzüge. Denn es würde in den meisten Fällen außerordentlich schwierig sein, den Weg des einzelnen Teilchens zu verfolgen und festzustellen, wie es auf die anderen Teilchen wirkt, die es umgeben. Nach dem Verfahren der Verlustbestimmung überlassen wir das Wasserteilchen sich selbst und fragen nur: Wie groß war die Energie zu Anfang, welche Energie nimmt das Arbeitsmittel — Wasser oder Dampf — unausgenutzt mit sich fort, und welches waren die Verluste durch Reibung und Stoß? Der Rest ist die nutzbar gemachte Arbeit.

Ein Beispiel wird dies veranschaulichen. In den Schaufelkranz eines Turbinenlaufrades, Abb. 80, strömt Wasser mit der Geschwindigkeit 10 m/s ein und verläßt das Rad wieder mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s. Es sind nun zwei verschiedene Formen von Schaufeln, I und II, gezeichnet. In

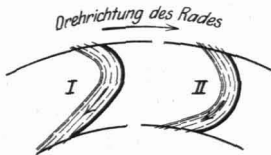


Abb. 80. Verschiedene Schaufelformen bei Turbinenlaufrädern.

beiden Fällen wird das Wasser durch die Schaufel von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt und übt dabei, wie ohne weiteres verständlich, einen Druck auf die Schaufel aus, der den Radkranz nach rechts zu verschieben sucht. Offenbar findet die Abgabe der Arbeit an das Rad in ganz verschiedener Weise statt. Im ersten Falle wird die Hauptarbeit zu Anfang des Durch-

strömens geleistet, weil hier die Ablenkung des Wasserstrahles am stärksten ist, im zweiten Falle findet die Arbeitsabgabe gleichmäßiger statt. Sie während des ganzen Verlaufes genau zu berechnen, würde schwierig sein, und außerdem müßte die Berechnung wiederholt werden, wenn man die zuerst entworfene Schaufelform auch nur im geringsten ändern würde. Deshalb gehen wir folgendermaßen vor. Die lebendige Kraft, also das Arbeitsvermögen des Wassers beim Eintritt in die Schaufel, war für 1 kg nach der auf Seite 46 gegebenen Regel: $\frac{1}{20} \times 10 \times 10 = 5$ mkg. Bei seinem Austritt nimmt das Wasser mit fort: $\frac{1}{20} \times 2 \times 2 = 0,2$ mkg, also $\frac{1}{25}$ oder 4% der ursprünglich vorhandenen Energie. Der Verlust infolge des Stoßes beim Eintritt des Wassers und der Verlust infolge Reibung an der Schaufelwand und im Innern des Wasserstrahles, die

bei der starken Ablenkung auftritt, können erfahrungsgemäß auf 8% geschätzt werden, also ist der gesamte Verlust im Laufrad 12% und die an das Laufrad abgegebene Arbeit 88% der zugeführten Energiemenge. Wie das einzelne Wasserteilchen es fertig gebracht hat, seine lebendige Kraft loszuwerden, überlassen wir ihm selbst und nehmen nur Rücksicht darauf, den Schaufeln solche Gestalt zu geben, daß sie den Wasserstrahl gut führen, nicht unnötig scharf ablenken, und daß sie sich möglichst bequem herstellen lassen.

Die Dinge liegen also ganz entsprechend wie bei der Dampfmaschine. Wie wir dort darauf verzichtet hatten, für die Berechnung der Arbeit und der Reibungsverluste die Übertragung der Kraft durch die einzelnen Getriebeteile zu verfolgen, so kümmern wir uns hier nicht um die Druckabgabe an jeder Stelle des Laufrades, sondern verlassen uns darauf, daß nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie nichts verloren gehen kann außer den in Wärme umgesetzten Arbeitsbeträgen für Reibung und Stoß und dem Arbeitsvermögen, welches das Wasser beim Austritt mitnimmt.

Das Verfahren der Verlustbestimmung ist, wie sich überall gezeigt hat, einfach und übersichtlich, weil wir uns um die Konstruktionseinzelheiten nicht zu kümmern brauchen; es ist außerordentlich bequem anzuwenden, weil aus den zahlreichen ausgeführten Versuchen Zahlenwerte, welche die einzelnen oder die gesamten Verluste in Hundertteilen der geleisteten Arbeit geben, für alle normalen Maschinengattungen vorliegen. Es ist ferner verhältnismäßig genau, weil die Verluste meistens kleiner sind als die Nutzarbeit, so daß Ungenauigkeiten, wie sie bei technischen Berechnungen unvermeidlich sind, im Verhältnis weniger ins Gewicht fallen.

Das hier ausführlich behandelte Verfahren, die Dinge zu betrachten, kann übrigens auch auf anderen Gebieten zu klarerer Erkenntnis führen, namentlich auf dem der Ausnutzung der menschlichen Arbeit. Häufig wird z. B. geltend gemacht, daß es unnötig sei, einem Bürobeamten, der wichtige Arbeiten zu erledigen hat, ein eigenes Zimmer zu geben, in dem er ungestört ist; denn er tut ja auch jetzt seine Arbeit, und andere Beamte in ähnlicher Stellung kommen ebenfalls ihren Pflichten nach. Es ist nun allerdings sehr schwer, gegen eine solche Beweisführung vorzugehen, da es ganz ausgeschlossen ist, den Beamten bei jeder Arbeit, die er ausführt, im einzelnen zu überwachen und festzustellen, wieviel Energie er an einem ruhigen und wieviel er an einem unruhigen Platze nutzbar aufwendet. Darum muß die Frage von der umgekehrten Seite beleuchtet werden. Es kann nicht zweifelhaft sein, daß der betreffende Mann durch die Störungen beeinträchtigt wird, daß also Verluste entstehen. Selbst wenn er sich so in der Gewalt hätte, daß er sich von seiner Arbeit nicht ablen-

ken ließe, so müßte doch diese fortgesetzte Anstrengung, sich zu konzentrieren, mit der Zeit auf seine Nerven wirken und dazu führen, daß seine Arbeitstüchtigkeit abnimmt, daß er mehr Erholung nötig hat und vielleicht früher verbraucht wird, zum Schaden nicht nur für ihn selbst, sondern auch für seinen Arbeitgeber. Man muß also, wie es beim toten Material schon lange geschieht, so auch beim Menschen die Verlustquellen aufstöbern und sich auf diese Weise Rechenschaft geben, wie mit der vorhandenen Arbeitsenergie am besten hauszuhalten ist.

Liegt die Aufgabe vor, festzustellen, wieviel Pferdekkräfte eine bestimmte Wasserkraft hergibt, so brauchen wir uns zunächst auch nicht um

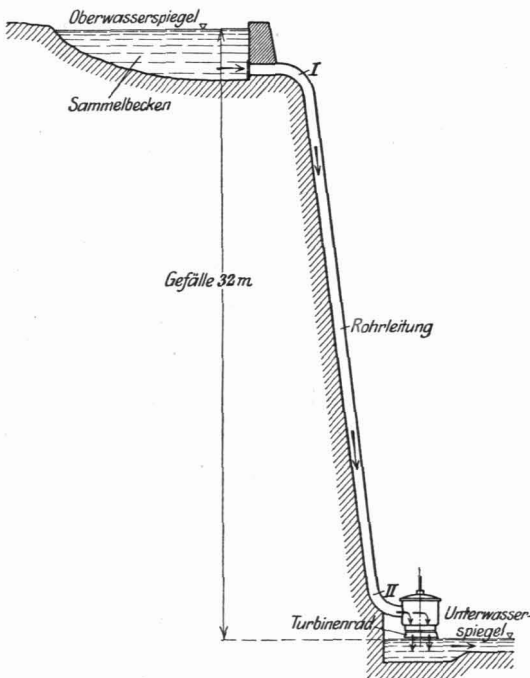


Abb. 81. Wasserkraftanlage.

das Laufrad der Turbine und die Ein- und

Austrittsgeschwindigkeit zu kümmern, sondern das Ziel läßt sich viel einfacher und rascher erreichen, wenn wir davon ausgehen, daß nach den vorliegenden Erfahrungen in der Wasserkraftanlage ungefähr der und der Hundertsatz der Arbeitsmenge verloren gehen wird.

In Abb. 81 ist angenommen, daß das Wasser eines Gebirgsflüßchens ausgenutzt werden soll, das bisher 32 m hoch frei herabstürzte. Um ausrechnen zu können, welche Arbeit das Wasser zu lei-

sten vermag, müssen wir zunächst wissen, wieviel Wasser das Flüßchen in jeder Stunde liefert. Messungen, die vorgenommen werden, mögen nun ergeben, daß man auch zur trockenen Jahreszeit immer auf 5000 m³ oder 5000000 Liter stündlich rechnen darf, also in der Sekunde auf $\frac{5000000}{3600} = 1400$ Liter. Das Wasser soll in der Weise ausgenutzt werden, daß man, wie in Abb. 81 skizziert, oben ein

kleines Sammelbecken anlegt und von hier eine Rohrleitung nach unten führt. Unmittelbar über dem Unterwasser wird die Turbine aufgestellt. Wie diese Turbine aussieht und wie das Wasser darin wirkt, brauchen wir vorläufig nicht zu wissen.

Bekannt ist von ähnlichen Anlagen her, daß die Verluste, die an der Maschine insgesamt auftreten, ungefähr 20% betragen werden. Nun entsteht weiter noch dadurch ein Verlust, daß das Wasser beim Durchströmen der Rohrleitung eine gewisse Reibung überwinden muß. Man darf nicht annehmen, daß das Wasser, wenn es ein einfaches glattes Rohr durchströmt, ohne jeden Widerstand dahinflösse; die Verluste können sogar sehr beträchtlich sein, besonders wenn man, um die Anschaffungskosten so niedrig wie möglich zu machen, ein zu enges Rohr nimmt. Besonders ist darauf zu achten, daß die Krümmungen des Rohres nicht zu scharf gemacht werden, vielmehr sollen die Übergänge, an denen der Wasserstrom aus seiner Richtung abgelenkt wird — in Abb. 81 die Stellen *I* und *II* —, so sanft als möglich gekrümmt sein. Der Widerstand wird bei Wasserkräften der einfachen Rechnung halber immer in der Weise angegeben, daß man sagt, es geht durch die Reibung so und so viel Gefälle verloren. Unter den hier vorliegenden Verhältnissen wird dieser Gefälleverlust für das lange glatte Rohr ungefähr 0,1 m und für die beiden Krümmer *I* und *II* zusammen ungefähr 0,15 m betragen, im ganzen also 0,25 m, d. i. nahezu 1% der gesamten Gefällehöhe von 32 m.

Wie groß ist nun die verfügbare Energiemenge? Oben war festgestellt, daß in der Sekunde 1400 Liter Wasser durch den Fluß zugeführt werden. Da 1 Liter Wasser 1 kg wiegt, so steht also in jeder Sekunde ein Gewicht von 1400 kg bereit, um die Höhe von 32 m herunter zu sinken und die Arbeit, die dabei erzeugt wird, auf die Maschine zu übertragen. Diese Arbeit ist $1400 \times 32 = 44800$ mkg in der Sekunde oder $\frac{44800}{75} = 600$ Pferdestärken.

Von dieser Arbeit gehen in der Maschine 20%, in der Rohrleitung 1% verloren, so daß 79% als Nutzarbeit übrig bleiben. 79% von 600 sind aber 470 PS, und diese Zahl stellt die Arbeitsleistung dar, die wir tatsächlich aus der Wasserkraft herausziehen können.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, was diese Zahl bedeutet, wollen wir annehmen, daß die Turbine einen Generator treibt, der den Strom für die elektrische Beleuchtung einer in der Nähe gelegenen Stadt liefert. Es ist uns bekannt, daß eine Glühlampe von 500 Hefnerkerzen etwa $\frac{4}{10}$ PS und eine Glühlampe von

25 Kerzenstärken ungefähr $\frac{1}{30}$ PS verbraucht. Nehmen wir jetzt an, daß bei der Erzeugung des elektrischen Stromes im Generator von den oben errechneten 470 PS noch 13% und bei der Verteilung nach den Verbrauchsstellen weitere 4%, zusammen also 17% verloren gehen — oder, genauer ausgedrückt, nutzlos in Wärme umgesetzt werden —, so stehen für die Lampen 83% von 470, d. h. 390 PS zur Verfügung. Werden nun z. B. für die Beleuchtung von Straßen, Bahnhöfen und Fabriken 200 große Lampen zu 0,4 PS, also zusammen 80 PS gebraucht, so bleiben 310 PS für die Kleinbeleuchtung mit Glühlampen. Mit $\frac{1}{30}$ PS für die Lampe würden 9300 Lampen von 25 Kerzen an das Leitungsnetz anzuschließen sein. Brauchen wir nicht so viel, vielleicht nur 4500 Glühlampen, so wären dazu nur 150 PS erforderlich, und wir behielten noch 160 PS übrig, die z. B. an kleine Gewerbetreibende, an Tischlereien oder Schlossereien, zum Antrieb von Motoren abgegeben werden können. Während der Tagesstunden steht sogar noch viel mehr elektrischer Strom für Kraftzwecke zur Verfügung, weil dann nur wenige Lampen brennen.

Um noch einmal kurz den Gedankengang zu wiederholen: Wir wissen nach den Messungen von Wassermenge und Gefälle, welche Arbeitsmenge in der Sekunde uns zur Verfügung steht. Schätzungsweise war nach den Erfahrungen bei anderen Maschinenanlagen angenommen, daß bei der Ausnutzung durch die Wasserkraftmaschine 21% und von dem Rest bei der Erzeugung und Nutzbarmachung der Elektrizität noch einmal 17% verloren gehen. Somit bleibt eine ganz bestimmte Energiemenge übrig, die in den Lampen oder Motoren verbraucht wird. Wollen wir überschläglich berechnen, ob eine bestimmte Wasserkraft für die Versorgung einer Stadt oder eines Landkreises mit Elektrizität ausreicht, so brauchen wir uns also zunächst gar nicht um die Maschinen zu kümmern, sondern können uns auf Grund einer einfachen Leistungsrechnung mit einigen wenigen Zahlen ein Bild von der Sachlage machen. Wir kommen also wieder zum Überspringen der Zwischenglieder auf Grund des Gesetzes von der Erhaltung der Energie.

9. Grundlagen der Elektrotechnik.

Die letzte Rechnung hat auf ein neues Gebiet geführt, zu der Elektrizität, die für den Laien — und, um es ruhig zu gestehen, auch für den Physiker — noch mit einem gewissen Schleier des Geheimnisses umwoben ist. Der Techniker ist aber nicht Natur-