

Die Wind- und Wassermotoren.

Von Ingenieur H. Blücher, Leipzig.

A. Die Windmotoren.

I. Einleitung.

Als Windmotoren bezeichnet man Vorrichtungen zur Ausnutzung der Windenergie, d. h. der wagerecht über die Erdoberfläche hinwegstreichenden Luftströmungen.

Der Wind ist eine Kraftquelle, die kostenlos ausnutzbar ist, aber den Nachteil hat, weder ununterbrochen noch in gleicher Stärke ständig zur Verfügung zu stehen. Deshalb wird die Windenergie — mindestens seit Erfindung der Dampfmaschine — bei weitem nicht so hoch geschätzt, wie sie es verdient. Erst in den letzten Jahrzehnten beginnt man wieder mehr Nachdruck auf die motorische Ausnutzung des Windes zu legen: man erforscht immer genauer die Zahl der durchschnittlichen Windtage; man macht genaue Aufzeichnungen über die Häufigkeit verschiedener Windstärken, und man hat endlich den Bau der Windmotoren wesentlich gefördert.

Die als *Wind* bezeichnete Luftbewegung wird durch ungleiche Erwärmung verschiedener Teile der Atmosphäre hervorgerufen. Wo die Luft sich erwärmt — also vor allem um den Äquator — wird sie spezifisch leichter und steigt auf, während sich zum Ausgleich des Luftdrucks dafür kältere Luftströme von den Polen aus dicht über der Erdoberfläche nach dem Äquator hin bewegen. Hoch über der Erdoberfläche muß zum Ausgleich dafür natürlich eine umgekehrte Strömung entstehen, die warme Luft zu den Polen hinführt, wo sie sich wieder abkühlt, zu Boden sinkt und aufs neue nach wärmeren Gegenden strömt. Diese Winde strömen nun aber in Wirklichkeit nicht andauernd von den Polen zum Äquator, sondern werden durch die west-östliche Achsendrehung der Erde aus ihrer Richtung abgelenkt. Die Luft nimmt an der Erddrehung teil, aber da diese an den Polen viel geringer ist als am Äquator, so muß der vom Pol kommende, mit geringer Umdrehungsgeschwindigkeit ausgestattete Wind bei seinem Vordringen zum Äquator immer mehr gegen die Erde zurückbleiben, also den Äquator erst an einem weiter westlich gelegenen Punkte erreichen. Umgekehrt werden die vom Äquator mit großer Umdrehungsgeschwindigkeit kommenden Winde gegen die Pole hin der Erde gegenüber voreilen, also von Südwest nach Nordost strömen. So erklärt es sich, daß die als *Passate* bekannten regelmäßigen Hauptwinde in der Richtung Nordost und Südwest von den Polen zum Äquator strömen und von ihm ausgehen. Auf der nördlichen Halbkugel bringt der vom Pol kommende Nordostwind schwere, kalte und trockene Luft, die auch während seiner weiteren Drehung nach Osten anhält. Beim Zusammentreffen mit dem von Süden kommenden Luftstrom entsteht eine südöstliche Richtung, die gewöhnlich feuchtes Wetter bringt. Allmählich dreht sich der Wind immer mehr nach Süden, bis endlich der vom Äquator kommende Südwest- und Westwind wieder warmes, nasses Wetter verursacht. Wird der vom Nordpol kommende Strom wieder stärker, so drückt er die Windrichtung nach Süden: es entsteht Nordwestwind, der dann in Nordwind übergeht und durch die Erddrehung zum Nordostwind wird. Diese Drehung des Windes wiederholt

sich in ständigem Wechsel. In Deutschland ist die Windrichtung vorherrschend westlich, wird aber im Frühjahr und Sommer mehr nach Norden, im Herbst mehr nach Süden abgelenkt.

Außer den genannten Hauptwinden gibt es noch lokale Winde. So weht an der Meeresküste der Wind am Tage meistens von der See, des Nachts vom Lande her. Im Gebirge strömen die Winde am Tage in den Tälern aufwärts, nachts dagegen abwärts. Alles dies wird bedingt durch die ungleiche Erwärmung und Abkühlung der Luft über Wasser, Land, Gebirge. Daher erhebt sich früh und abends beim Wechsel der Temperatur fast stets ein mehr oder weniger starker Luftzug.

Da die Temperaturen täglich schwanken, so sind auch ganz windstille Tage eine Seltenheit, namentlich in unseren gemäßigten Zonen. Aber trotzdem läßt sich nicht an jedem Tage ein Windmotor treiben. Hierzu muß der Wind eben eine gewisse Stärke haben, doch hat die Vervollkommnung der Windmotoren dahin geführt, daß man jetzt, moderne Motoren vorausgesetzt, schon Windstärken ausnutzen kann, die früher hierfür bei weitem zu gering gewesen wären. Nach langjährigen Beobachtungen genügt etwa an 270—300 Tagen jedes Jahres die Windstärke, um modern konstruierte Windmotoren in Betrieb zu setzen.

Die Kraft des Windes folgert direkt aus der zu messenden Windgeschwindigkeit. Man bezeichnet die Windgeschwindigkeit in Sekundenmetern, so daß ein Wind von 4 Sekundenmetern ein solcher ist, der in 1 Sekunde 4 m zurücklegt. Die Kraft des Windes zeigt sich in dem *Winddruck*, d. h. in dem Druck, mit dem der Wind gegen einen feststehenden Körper stößt. Der Winddruck (N) wächst im Quadrat zur Windgeschwindigkeit (v), und es gilt die Gleichung $N = v^2 \cdot 0,12248$ kg pro Quadratmeter.

Für die Schätzung des Windes bedient man sich noch immer meistens der *Beaufort-Skala*. Ihre Beziehungen zur Windgeschwindigkeit, zum Winddruck und zu den eine ungefähre Schätzung der Windstärke ermöglichenden Begleiterscheinungen enthält folgende Tabelle.

Windskala nach Beaufort	Windgeschwindigkeit pro Sekunde in Metern	Bezeichnung der Stärke	Wirkung	Winddruck in Kilogramm pro Quadratmeter $v^2 \cdot 0,12248$	Vergleich der Schnelligkeit
0	0—1	still	Kaum merkbar	—	Fussgänger
—	2	sehr schwach	Blätter flattern	0,49	
1	3	schwach	Zweige biegen	1,10	Reiter im Trab
—		4		„	
2	5	mittel	Äste biegen	3,06	Reiter im Galopp
—	6	lebhaft		4,40	
3	7	kräftig	Bäume schwanken	6,00	Rennpferd
—	8	„		7,84	
4	10	stark	Laub reisst ab	12,25	Personenzug
5	13	sehr stark		20,70	
6	15	Sturmwind	Zweige brechen	27,50	Eilzug
7	18	„	Äste splintern	40	
8	21	Sturm	„	54	Schnellzug
9	25	„	Bäume brechen	76	
10	29	starker Sturm	Häuser stürzen	103	Brieftaube
11	34	Orkan	Verheerend	141	
12	40	„		196	—

Die lebendige Kraft des Windes (N), ausgeübt auf die sich drehende Flügelfläche (F), wächst, entsprechend dem Gesetze der Beschleunigung, in der dritten Potenz zur Windgeschwindigkeit (v), so daß die Gleichung besteht: $N = F \cdot v^3 \cdot k$, worin k ein Erfahrungskoeffizient ist.

Nach der Statistik ergibt sich, daß ein Wind

von mindestens	3—4	Sekundenmetern	an ca.	250—300	Tagen
„	5	„	„	170—180	„
„	6	„	„	110—120	„
„	7	„	„	60—70	„

jährlich im Binnenlande weht, und zwar je nach der örtlichen Lage durchschnittlich 6—10 Stunden täglich. An den Küsten und auf Höhen kann man mit etwas mehr Tagen für stärkeren Wind rechnen. Als mittlere Jahresgeschwindigkeit des Windes kann mindestens 4,6 m angesetzt werden, und diese Geschwindigkeit genügt, um einen modernen Windmotor zu treiben.

II. Arten von Windmotoren.

Fast ausschließlich benutzt man Windräder, die senkrecht stehen, also sich um eine waagrechte oder doch nur wenig von der Horizontalen verschiedene Achse drehen. Man kann unterscheiden die Windräder mit *offenen* und diejenigen mit *geschlossenen Windfängen*.

1. Windmotoren mit offenen Windfängen.

Bei diesen Windmotoren besteht das Windrad nur aus einer beschränkten Anzahl (meist 4—6) von Flügeln, zwischen denen sich weite freie Zwischenräume befinden.

a) **Windmühlen.** Die gewöhnlichen Windmühlen, wie sie meistens zum Mahlen von Getreide Verwendung finden, werden wegen ihrer Billigkeit noch auf lange hinaus einen typischen Faktor der Flachlandschaft bilden, obwohl die Windmühle einen ziemlich unvollkommenen Motor darstellt.

Man unterscheidet die *deutsche Windmühle* oder *Bockwindmühle* von der *holländischen Windmühle* oder *Turmwindmühle*. Diese Unterschiede beziehen sich auf die Art und Weise, wie die Flügel des Windrades gegen den Wind gestellt werden. Denn diese Einstellung der Flügel, derart, daß der Wind von vorn rechtwinklig zur Flügelfläche auf sie trifft, ist notwendig, um den Winddruck richtig auszunutzen.

Bei der *deutschen Windmühle* (Fig. 1) ruht das ganze, kastenförmige Mühlengebäude drehbar auf einem Balkenbock. Nach hinten ragt aus dem Gebäude ein langer Balken, der *Stert*, heraus, der von Hand oder (seltener) mit Zugtieren als Hebel bewegt wird und so die Drehung des Mühlengebäudes ermöglicht: Der Eichenholzständer 1 (*Hausbaum*), der durch Balken 2, 3, 4 verstrebt ist und als Tragkörper des ganzen Gebäudes dient, endet in einem Zapfen, um den das Gebäude durch den Stert 5 (in der Figur abgebrochen gezeichnet) gedreht werden kann. Die Windmühlenflügel 6, von denen meist vier vorhanden sind (in dem Schnitt der Figur sind natürlich nur zwei sichtbar), wirken auf die Windradwelle 7; die weitere Energieübertragung geschieht mittels eines Kammrades auf die senkrechte Welle, die den Mühlstein direkt antreibt.

Bei der *holländischen Windmühle* ist der Bau turmartig, massiv und unbeweglich. Nur das Dach, die sogenannte *Haube*, läßt sich drehen. Bei den einfachen derartigen Mühlen wird die Drehung ebenfalls von Hand ausgeführt, mittels eines von der Haube ausgehenden Hebels, der entweder so weit nach unten reicht, daß er dort erfaßt werden kann, oder aber mit einem Strick verbunden ist, an dem man zieht, um die Drehung zu bewirken.

Vielfach trägt die holländische Windmühle aber auch Vorrichtungen, durch die ihre Flügel *selbsttätig* gegen den Wind gedreht werden. Die Haube einer holländischen Windmühle mit selbsttätiger Einstellung des Windrades zeigt Fig. 2: Die Windmühlenflügel 1 sind der Platzersparnis halber nur zum Teil dargestellt. Auf der entgegengesetzten Seite der drehbaren Haube 2 ist ein kleines Windrad 3 angeordnet, dessen Windflächen zu denen der großen Mühlenflügel senkrecht gerichtet sind. Windrad 3 ist lediglich dazu da, die drehbare Haube bzw. die großen Mühlenflügel selbsttätig in die richtige Stellung zu bringen. Nimmt nämlich der Wind

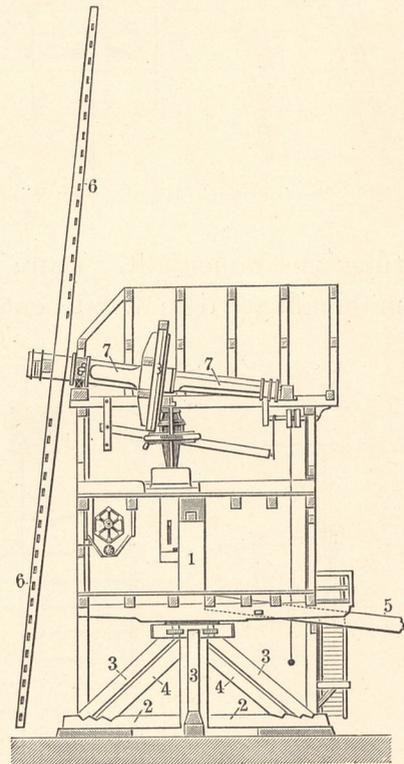


Fig. 1. Bockwindmühle.

eine Richtung an, die nicht mit der Achse 4 des Windmühlenrades 1 zusammenfällt, so muß das kleine Windrad 3 in Drehung kommen. Durch Vermittelung von Kegelrädern dreht

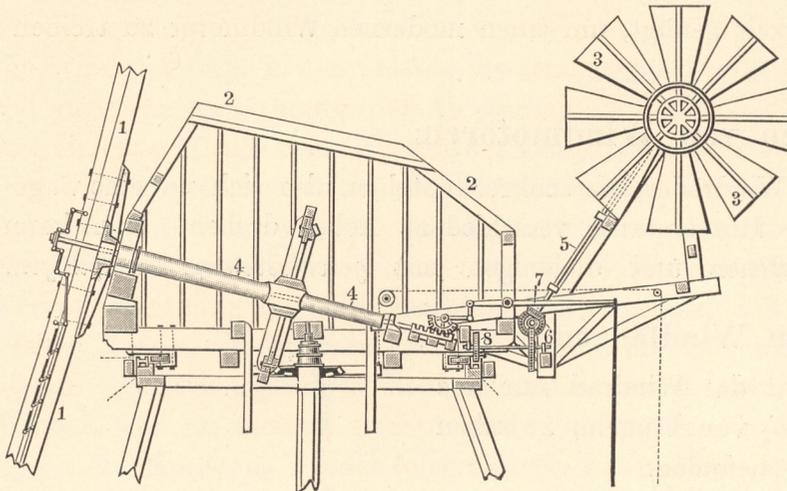


Fig. 2. Dach einer holländischen Windmühle mit selbsttätiger Einstellung.

sich hierdurch wieder Welle 5 und setzt mittels der Räder 6 und 7 eine endlose Schraube in Bewegung, die Zahnrad 8 antreibt. Zahnrad 8 greift in einen Zahnkranz ein, der auf der Oberkante des massiven Mühlengebäudes unterhalb der beweglichen Haube liegt. Hierdurch muß bei eintretender Richtungsänderung des Windes Haube 2 durch Windrad 3 selbsttätig gedreht werden, und zwar so lange, bis der Wind das kleine Windrad 3 nicht mehr zu drehen vermag, d. h. bis die Richtung der Achse 4 mit der Windrichtung zusammenfällt. Dann sind aber auch die senkrecht auf der Achse 4 sitzenden Windmühlenflügel dem Winde entgegengerichtet.

Damit, daß man die Flügel der Windmühle immer möglichst genau dem Winde entgegengerichtet, um die Windenergie möglichst auszunutzen, ist keineswegs alles getan, was beim Betriebe der Windmühle zu beachten ist. Ja die selbsttätige Einstellung hier ist, wenn nicht noch andere Regulier Vorrichtungen hinzukommen, bei starkem Winde sogar unzweckmäßig, weil eine übermäßige Umdrehungsgeschwindigkeit der Windmühle dann nur durch Bremsen verhindert werden kann, was starke Abnutzung und Erhitzung, bei Holzkonstruktionen sogar Feuersgefahr zur Folge hat.

Die weitere Regulier Vorrichtung, die unbedingt hinzukommen muß, besteht darin, daß die vom Winde getroffene Fläche des Windflügelrades in der Größe verändert wird.

Die Konstruktion der Windflügel ist aus den Figuren 3 und 4 ersichtlich. An der Flügelwelle 1, die in der Wand bzw. der Haube des Mühlengebäudes drehbar gelagert ist, sind die Flügel befestigt, und zwar, wie schon gesagt, meist vier, die also dann je 90° Abstand haben. Jeder Flügel besteht aus der Rute 2, die sich von der Welle zum Ende hin verjüngt; die Länge jeder Rute beträgt bis zu 25 m. Durch die Rute 2 sind die Sprossen 3 hindurchgesteckt, welche mit Segeltuch überspannt werden; die Segeltuchfläche nimmt dann den Winddruck auf, infolgedessen sich Welle 1 dreht. Wie Fig. 3 zeigt, sind die Sprossen 3 alle in verschiedenen Richtungen zu der Rute 2 angeordnet, so daß die Fläche des Segeltuchs nicht genau rechtwinklig von dem in der Richtung der Pfeile 4 wirkenden Winde getroffen wird.

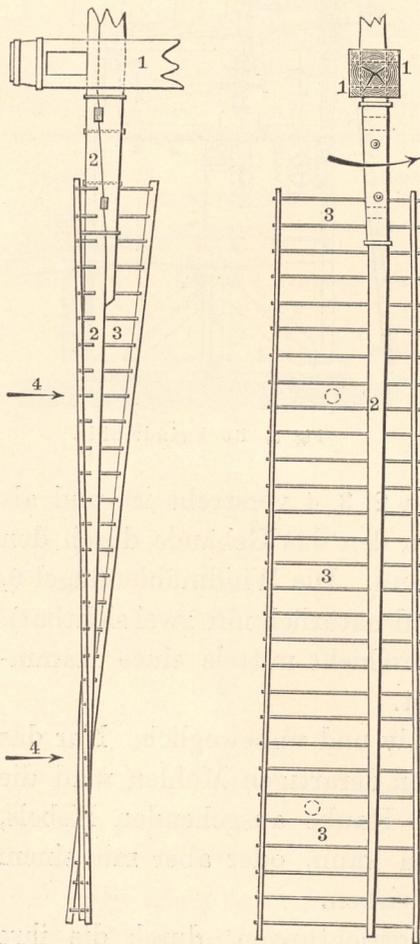


Fig. 3 und 4. Windmühlenflügel (Fig. 3 Seitenansicht, Fig. 4 Vorderansicht).

Um die Flügelbedeckung der Windstärke anzupassen, kann man die Segeltuchfläche verändern, und zwar nach Fig. 5 durch Aufwickeln des Segeltuchs auf eine Walze 1, 2, die über den kurzen Enden der Sprossen vor dem Flügel gelagert ist. Der gegenüberliegende Saum des Segeltuchs wird durch Schnüre gehalten, die über die Saumlatte nach einer hinter dem Flügel gelagerten

Walze 3, 4 laufen, woran sie befestigt sind. Beide Walzen tragen an ihren der Hauptwelle zugekehrten Enden konische Getriebe; von diesen greift das der Welle 3, 4 in einen konischen Zahnkranz 5, der sich um einen an der Hauptwelle befestigten Ring 6 drehen läßt. Die Arme dieses Ringes tragen einen zweiten, kleineren Ring 7, um den ein Stirnradkranz 8 drehbar ist. In diesen greift ein Getriebe ein, das mittels seiner zur Hauptwelle parallelen Achse und eines darauf sitzenden konischen Getriebes die Walze 1, 2 umdreht. Während des regelmäßigen Ganges rotiert dieser ganze Mechanismus mit der Hauptwelle; wird aber 5 angehalten, so dreht sich Walze 3, 4 in ihren Lagern, wickelt die Schnüre auf und zieht das Segeltuch mehr über die Flügel, so daß sich die wirksame Fläche vergrößert. Wird anderseits 8 angehalten, so dreht sich Walze 1, 2 und wickelt mehr Segeltuch auf, so daß die wirksame Fläche verkleinert wird.

Außer der Bedeckung mit Segeltuch ist auch die Bedeckung mit Holzplatten üblich. Diese, die sogenannten *Windtüren*, werden bei den älteren Konstruktionen einfach nach Bedarf in mehr oder weniger großer Zahl in die Flügel eingesetzt oder entfernt, um die wirksame Fläche zu verändern.

Bei den neueren Windmühlen sind die Windtüren jalousieartig angeordnet und werden mehr oder weniger geöffnet, je nachdem der Wind an Stärke zu- oder abnimmt. Eine selbsttätige Kraftregulierung mit Windtüren zeigt Fig. 6.

Durch die hohle Hauptwelle 1 geht ein Eisenstab 2 hindurch, der bei 3 so mit einer Zahnstange 4 verkuppelt ist, daß beide sich gleichzeitig der Länge nach verschieben müssen, wobei aber die Drehung von 2 nicht auf 4 übertragen wird. Das Gewicht 5 sucht beide nach links zu schieben und mittels der Hebelwerke 6, 7, 8 die Windtüren 9 zu schließen, während der Wind sie naturgemäß aufzudrücken strebt. Wächst die Windgeschwindigkeit über das Normale hinaus, so öffnen sich die Windtüren je nach dem Übermaß des Windes mehr oder weniger, so daß die Wirkung des Windes auf das Rad nahezu gleich bleibt; der vom Rade zu überwindende Widerstand bestimmt die Geschwindigkeit der Drehbewegung.

Einen Übergang von den alten Windmühlen zu den vielflügeligen modernen Windrädern bildet das *Kirchwegersche Windrad*, das ganz aus Eisen konstruiert ist und neuerdings vielfach zur Wasserförderung benutzt wird. Die Konstruktion zeigt Fig. 7. Turm 1, auf den der Windmotor aufgesetzt ist, besteht aus Eisenblech; er endet in dem gußeisernen Kopf 2, auf den sich Haube 3 mittels konischer Rollen stützt. Damit die Haube nicht von Windstößen abgehoben werden kann, übergreift sie den Rand des Kopfes 2. Haube 3 trägt die Lager 4 und 5 für die Windradwelle. Auf dem Kopf der Welle sitzt eine Rosette 6 zur Aufnahme von fünf Armen 7, 8; um diese als Achsen sind die *fünf* ebenen Windflügel 9 drehbar gelagert. Auf dem entgegengesetzten Ende ist an der Haube der

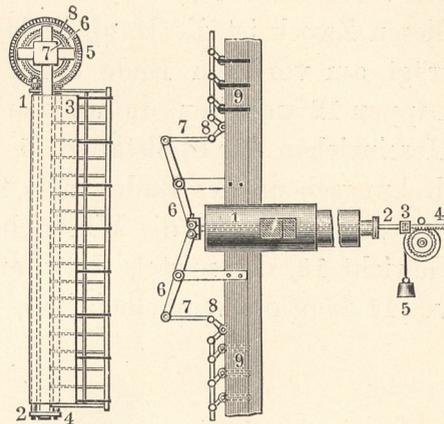


Fig. 5. Veränderung der Flügelbedeckung.
Fig. 6. Regulierung mit Windtüren.

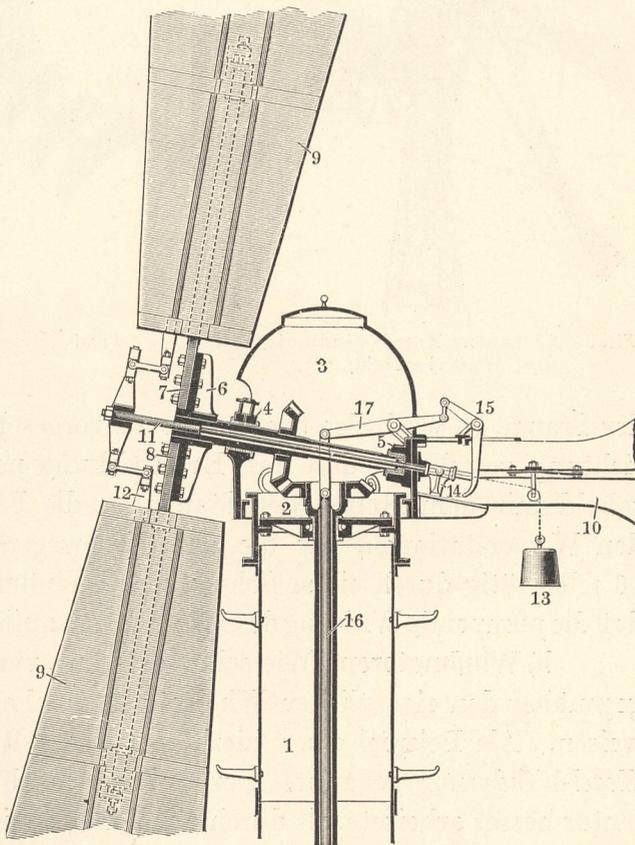


Fig. 7. Kirchwegersches Windrad.

an der Haube der

Steuerflügel 10 angeordnet (in der Figur ebenso wie die Mühlenflügel abgebrochen gezeichnet), durch den die wie eine Drehscheibe mit Rollen auf Kopf 2 umlaufende Haube 3 so gedreht wird, daß die Hauptwelle des Windrades sich stets selbsttätig in die Windrichtung einstellt. Damit der Gang des Rades sich dem Kraftbedarf anpaßt, kann die Fläche der Flügel 9 durch Drehung auf ihren Armen 7, 8 in mehr oder weniger schräge Lage gegen den Wind gestellt werden. Für diesen Zweck ist die Hauptwelle hohl und eine Stellstange 11 durch sie hindurchgeführt. Diese trägt am vorderen Ende einen fünfarmigen Stern, dessen Arme mittels kurzer Gelenke an Lappen 12 angreifen, die an den Flügeln 9 seitlich von ihrer Drehachse angebracht sind. Beim Hereinziehen der Stellstange 11 in die hohle Hauptwelle stellen sich die Windflügel in die Umdrehungsebene des Rades, also flach; dagegen werden die Flügelflächen durch Hinausschieben der Stellstange in die Windrichtung eingestellt. Das Hereinziehen der Stellstange unterstützt Gewicht 13, das mittels Kette an der Hülse 14 eingehängt ist. Zur Begrenzung der Bewegung von 11 dient der Winkelhebel 15, gegen dessen längeren Arm Hülse 14 anstößt, sobald die Flügel

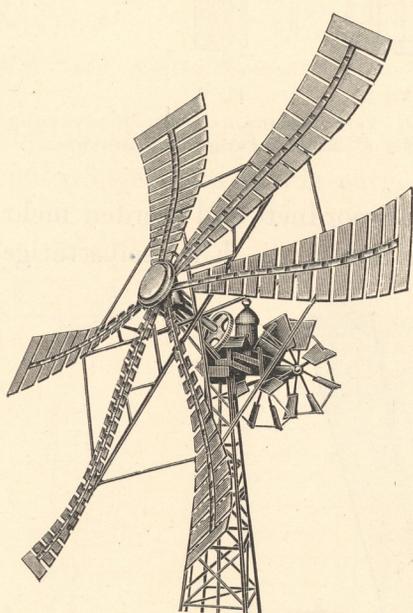


Fig. 8. Sörensens Kegel-Windmotor
(zur Arbeit eingerückt).

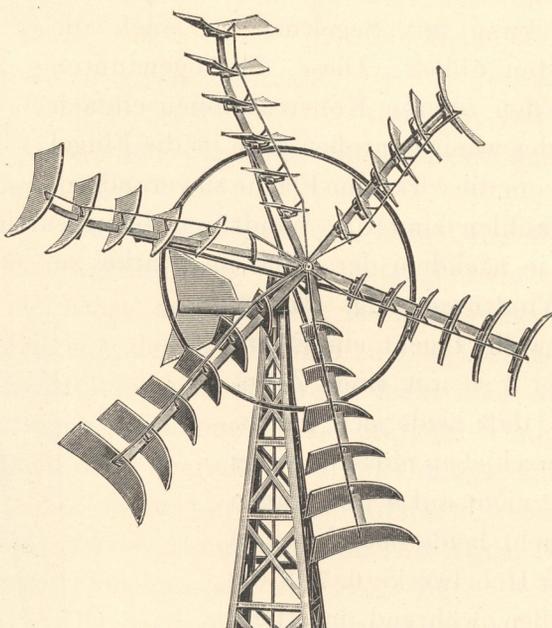


Fig. 9. Sörensens Kegel-Windmotor
(ausgerückt).

in die zur besten Windausnutzung geeignete schräge Stellung gelangt sind. Es ist mithin nur nötig, den Winkelhebel 15 vom Arbeitsraum aus einstellbar zu machen, und dazu dient die mitten durch den Turm geführte Stange 16, die am einen Ende eines zweiarmigen Hebels 17 angreift, an dessen anderem Ende der Winkelhebel 15 gelenkig angehängt ist. Beim Niederziehen

der Stange 16 wird also Stellstange 11 vorgeschoben, und die Flügel werden mehr in die Windrichtung gestellt, so daß ihre Kraftwirkung nachläßt. Umgekehrt wird ihre Wirkung verstärkt, sobald mit dem Heben der Stange 16 die Flügelfläche in die Radebene gebracht wird. Bei den Wasserstationen, für die der Kirchwegersche Windmotor gebaut wird, wird die Zugstange 16 selbsttätig durch einen Schwimmer beeinflusst, der in dem Wasserreservoir so angeordnet ist, daß die pumpende Wirkung des Windmotors aufhört, wenn der Wasserbehälter vollständig gefüllt ist.

b) Windmotoren. Wie schon erwähnt, versteht man unter „Windmotoren“ im engeren Sinne gegenüber den eigentlichen Windmühlen solche Motoren, die eine größere Reihe von Flügeln aufweisen. Als Beispiel eines hierhergehörigen Windmotors mit offenen Windfängen sei *Sörensens Kegel-Windmotor* genannt. Der Erfinder machte die Beobachtung, daß ein zehinflügeliger Windmotor besser arbeitete, als durch einen Sturm einige Flügel davon abgebrochen wurden. Daraufhin konstruierte er seinen sechsflügeligen Motor (Fig. 8), der auch durch die Form der Flügel und ihre Stellung eigenartig ist. Die sechs Flügel laufen gewissermaßen wie ein Kegel nach der Spitze der Welle zusammen, sind dann nach rückwärts geneigt, um sich an ihren Enden wieder schwach nach vorn zu biegen. Diese Form soll es dem Winde ermöglichen, von der Mitte aus über die Flügel hinwegzugleiten und an den schaufelartigen Enden besser anzugreifen. Die großen Zwischenräume zwischen den Flügeln lassen den Wind ungehemmt hindurchstreichen, wodurch die Luft hinter den Flügeln mit fortgerissen, also verdünnt wird; dies unterstützt die direkte

Windwirkung auf die Oberfläche der Flügel. Um die wirksame Fläche der jeweiligen Windstärke anzupassen, bestehen die Flügel aus jalousieartigen Klappen, die für gewöhnlich, also bei mangelndem oder bei schwachem Winde, durch ein Gegengewicht geschlossen gehalten werden, sich aber bei stärkerem Winde mehr oder weniger öffnen. Fig. 9 zeigt einen solchen Windmotor mit vollständig geöffneten Klappen; man kann diese Stellung auch ohne überstarken Wind künstlich durch eine Stellvorrichtung von unten aus herbeiführen, um den Motor auszurücken. Die Steuerung des Windmotors, also seine Einstellung in die Windrichtung, geschieht bei geringen Größen selbsttätig durch eine Windfahne, dagegen bei den größeren Ausführungen durch kleine Windräder (Windrosen), wie in Fig. 8. Man rühmt dem Sörensenschen Windmotor einen ausgezeichneten Wirkungsgrad und sehr leichten Gang nach. Nachteile sind dagegen die sehr vielen Drehpunkte am Rade durch die zahlreichen beweglichen Klappen, welche sämtlich mit dem Gegengewicht in Verbindung stehen und ganz gleichmäßig von ihm beeinflußt werden müssen.

2. Windmotoren mit geschlossenen Windfängen.

Bei den Windrädern mit geschlossenen Windfängen besteht die wirksame Fläche aus einer großen Zahl von Flügeln, die sich jalousieartig überdecken oder aber nur ganz geringe freie Räume zwischen sich lassen. Diese Windmotoren bezeichnete man früher allgemein als *amerikanische Windräder*. Man kann diese Windräder wieder einteilen in solche mit festen (unbeweglichen) Flächen und in solche, bei denen die einzelnen Flügel beweglich sind.

Ein Windrad mit festen Flächen zeigt Fig. 10. Um das Rad gegen den Wind zu stellen, hat man dahinter und senkrecht zur Radfläche eine Windfahne angeordnet, die unter dem Druck des Windes das Rad immer wieder gegen die Windrichtung dreht. Größere Windmotoren dieser Art erhalten, wie schon bei den vorbeschriebenen Konstruktionen gesagt ist, zur Steuerung keine Windfahne mehr, weil diese dann zu groß werden müßte, um ihren Zweck zu erfüllen, sondern eine oder zwei Windrosen (vgl. Fig. 15, S. 13). Diese wirken mittels eines Schneckengetriebes auf die drehbar gelagerte Windradwelle, d. h. sie drehen den Windradkörper auf dem Turmgestell, und zwar dauert diese Drehung so lange, bis die Windrosen nicht mehr vom Winde getroffen werden. Da Windrad und Windrose im rechten Winkel zueinander stehen, hört also die Drehung immer dann auf, wenn das eigentliche Windrad jeweils dem Winde gerade entgegengerichtet ist. Bei den älteren derartigen Rädern (Fig. 10) bestehen die Flügel aus dicht nebeneinander in schräger Richtung gestellten hölzernen Brettchen, die durch einen eisernen Ring versteift sind. In der Mitte verbleibt ein freier Raum von etwa einem Drittel des Raddurchmessers, der dem Winde freien Abzug gestattet. Die Regulierung gegenüber der Windstärke ist sehr einfach, aber auch sehr unvollkommen; die Windfahne ist nämlich nicht starr mit der Radwelle verbunden, vielmehr selbst nach der einen Seite hin drehbar, und zwar derart, daß sie bei zu starkem Winde und zu raschem Gang des Motors das ganze Windrad mehr oder weniger aus der Windrichtung dreht. Zur Außerbetriebsetzung wird die Windfahne mittels einer Kette von unten so weit seitlich umgelegt, daß sich die Radfläche in die Richtung des Windes einstellt. Die jetzigen Konstruktionen der Windmotoren mit festen Flügeln begnügen sich nicht mehr mit einer Fahne, wie dies später zu besprechen sein wird.

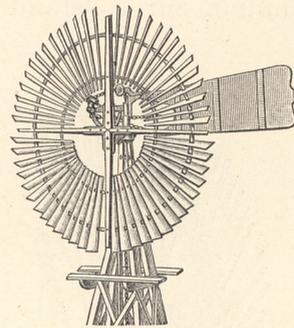


Fig. 10. Windrad mit festen Flächen.

Von den Windmotoren mit geschlossenen Windfängen, die bewegliche Flächen haben, ist das amerikanische Windrad von Halladay vorbildlich gewesen. Das *Halladayrad* (Fig. 11 und 12) besteht aus einer Reihe rahmenartiger Sektoren, und auf jedem dieser Rahmen sind zwölf Jalousiebrettchen fächerartig befestigt; die Sektoren können aus der Ebene des Windrades nach hinten umgelegt werden, wenn die Windstärke zunimmt. Bei diesem Rade bleibt also durch die Wirkung der starr mit der Radwelle verbundenen Windfahne die ursprüngliche Radfläche immer dem Winde entgegengerichtet. Die bei stärkerem Winde notwendige Verkleinerung der wirksamen

Fläche erfolgt durch Drehung der Sektoren; die Drehachse jedes Sektors liegt in der Radebene und ist in dem Radgerippe gelagert. Sind die Sektoren ganz geöffnet, wie in Fig. 12, so stehen die Brettchen, die in ihrer ursprünglichen Stellung den Wind auffingen, direkt in der Richtung

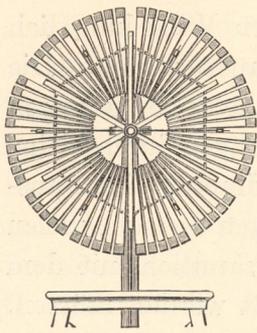


Fig. 11.

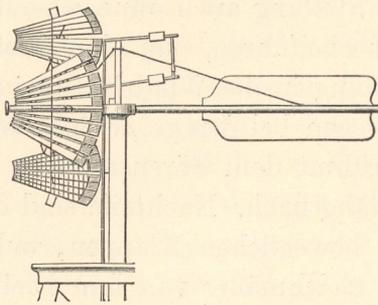


Fig. 12.

Fig. 11. Windrad mit beweglichen Sektoren, Vorderansicht, im Betrieb. Fig. 12. Windrad mit beweglichen Sektoren, Seitenansicht, in Ruhestellung.

des Windes, so daß keine Drehung des Rades erfolgen kann. Beide Figuren zeigen in der Mitte eines jeden Sektors eine kleine eiserne, radial zum Rad angeordnete Stange, auf der sich je ein kleines, also in radialer Richtung verstellbares Gewicht befindet. Dreht sich das Rad, so üben diese Gewichte infolge der Zentrifugalkraft eine Pressung aus, und die Sektoren erhalten das Bestreben, in die Stellung der Fig. 12 überzugehen. Dieses Bestreben wird zunächst nur zu einer geneigten Lage der Sektoren führen, dann aber, wenn die Windstärke und damit die Drehungsgeschwindigkeit des Rades (also auch die Zentrifugalkraft) immer weiter zunimmt, zur vollständigen Öffnung der Sektoren und damit zum Stillstand des Rades — bis der

Wind wieder schwächer wird. Soll das Windrad unbeschadet der Windstärke ausgerückt werden, so wird es von unten mittels einer Zugvorrichtung in die Stellung der Fig. 12 gebracht.

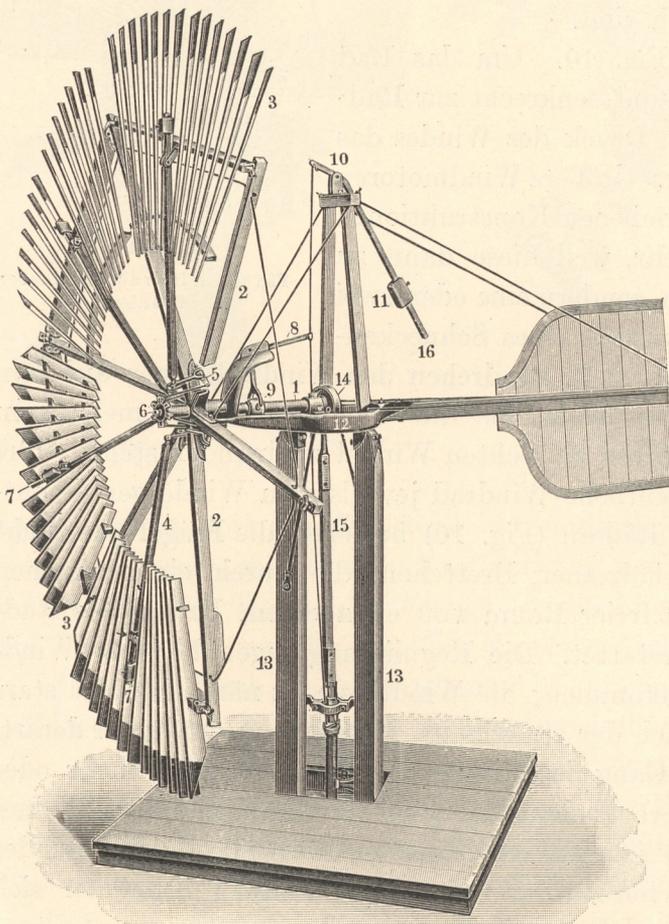


Fig. 13. Halladayrad von Adolf Pieper, Mörs a. Rh.

Die Konstruktion eines modernen *Halladayrades* von der Maschinenfabrik Adolf Pieper in Mörs a. Rh. zeigt Fig. 13. Darin sind nur einige Sektoren mit aufmontierten Windflügeln dargestellt, während von den übrigen Teilen des Rades allein das Gerippe wiedergegeben ist; von der Windfahne ist nur ein Teil dargestellt. Am Kopf der Hauptwelle 1 sitzt eine Rosette; diese trägt die Rutenstangen 2, deren Enden durch Spannstangen verbunden sind. Je vierzehn jalousieartige Brettchen bilden einen Fächer 3; sie sind unter bestimmtem Winkel an einer Holzachse befestigt, und alle diese Achsen lagern, in Zapfen schwingend, an den Enden der Rutenstangen 2. Je sieben Brettchen eines Fächers sind durch Querleisten abgesteift, und so zerfällt jeder Fächer nach der Mitte hin in zwei Gruppen, zwischen denen eine Lenkerstange 4 angreift. Diese Lenkerstangen dienen dazu, die Fächer bei stärkerem Winde nach rückwärts umzulegen.

Hierzu ist jede Lenkerstange durch Vermittelung eines Winkelhebels 5 und einer Zugstange an der verschiebbaren Hülse 6 angehängt, an der also sämtliche Lenkerstangen gemeinsam angreifen. Wird Hülse 6 nach vorn geschoben, so macht Winkelhebel 5 einen Ausschlag, hebt die Lenkerstangen 4, und diese kippen die Fächer nach hinten. Ein Gegengewicht 7 am oberen Ende jeder Lenkerstange vermittelt die Einstellung der Sektoren entsprechend der jeweiligen Windstärke,

indem bei schnellerem Gange des Windrades die Gewichte 7 durch Zentrifugalkraft nach außen gedrängt werden und die Lenkerstangen mitnehmen, die ihrerseits die Sektoren umlegen. Hülse 6, welche die Verstellung der Lenkerstangen besorgt, sitzt auf dem Ende einer Hohlachse; diese wird vom Winkelhebel 8 regiert, dessen gabelförmiges Ende 9 die Achse umgreift. Ein nach unten führender Ausrückerdraht verbindet das Ende des Winkelhebels 8 mit dem Gewichtshebel 16, dessen Drehpunkt bei 10 liegt. Das Gegengewicht 11 des Gewichtshebels 16 hält die Stellvorrichtung für gewöhnlich in der Ruhelage; durch Anziehen des Ausrückerdrahtes von unten her läßt sich jedoch die Stellvorrichtung betätigen, d. h. das Windrad durch Umlegen der Sektoren ausrücken. Die Hauptwelle ist auf einem Drehtisch gelagert, auf dem der Ring 12 sich dreht, der an dem Gerüst 13 wagerecht angeordnet ist. Die Kraftübertragung vom Windrade erfolgt mittels der Kurbelscheibe 14 auf die Antriebsstange 15, die so bei rotierendem Rade eine auf und nieder gehende Bewegung erhält

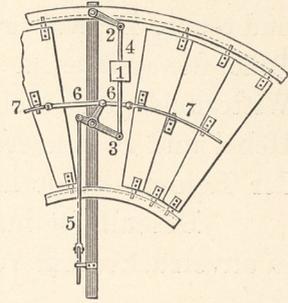


Fig. 14. Flügelbewegung der Reinsch-Windräder.

Während beim Halladayrad zwar die Sektoren des Rades beweglich sind, aber innerhalb jedes Sektors dessen Teile zueinander eine unverrückbare Lage haben, ist der *Reinsch-Windmotor* dadurch charakterisiert, daß jede einzelne Flügelfläche ihre Neigung zu ändern vermag, und zwar sind die Flügel um je zwei in einer radialen Achse liegende Stifte nach Art von Jalousien drehbar; diese Stifte sind auf zwei konzentrischen Ringen gelagert (Fig. 14). Die Stellung der Flügel gegen die Radfläche wird durch ein System von Gewichten 1 geregelt, die mittels der einarmigen Hebel 2, der dreiarmigen Hebel 3 und der Verbindungsstangen 4 an den Radarmen aufgehängt sind. Die gegenüberliegenden Arme der Hebel 3 sind durch Zugstangen 5, Winkelhebel und eine auf der Hauptwelle verschiebbare Muffe so miteinander verbunden, daß die Gewichte 1 im ruhenden Zustande einander das Gleichgewicht halten. Die dritten Arme der Hebel 3 bewegen mittels Gelenkstangen 6 eine über den Mitten der Flügel liegende und durch Scharniere mit deren vorderen Kanten verbundene gebogene Stange 7. Hält sich die Umdrehungszahl des Windrades in normalen Verhältnissen, so bleibt die auf der Hauptwelle verschiebbare Muffe unter der Wirkung eines mittels Winkelhebels an sie angreifenden Gegengewichtes in solcher Stellung, daß die mit ihr verbundenen Flügel die zur Aufnahme des Winddruckes vorteilhafteste Neigung zur Radfläche haben. Steigt jedoch die Umdrehungszahl des Windrades infolge stärkeren Windes oder aber geringeren Widerstandes (verminderter Beanspruchung), so überwindet die Zentrifugalkraft der Gewichte 1 das Gegengewicht; erstere bewegen sich nach dem Radumfang hin, und mit ihr die Hebel 2 und 3, wodurch die Windflügel mehr in die Windrichtung gestellt, d. h. die Jalousieklappen mehr geöffnet werden. Ein vollständiges *Reinsch-Windrad* mit beweglichen Flügeln ist in Fig. 15 dargestellt. Bei der bedeutenden Größe dieses Rades dient zur Steuerung, d. h. zur Einstellung gegen den Wind, keine Windfahne, sondern statt ihrer zwei Windrosen (vgl. S. 11).

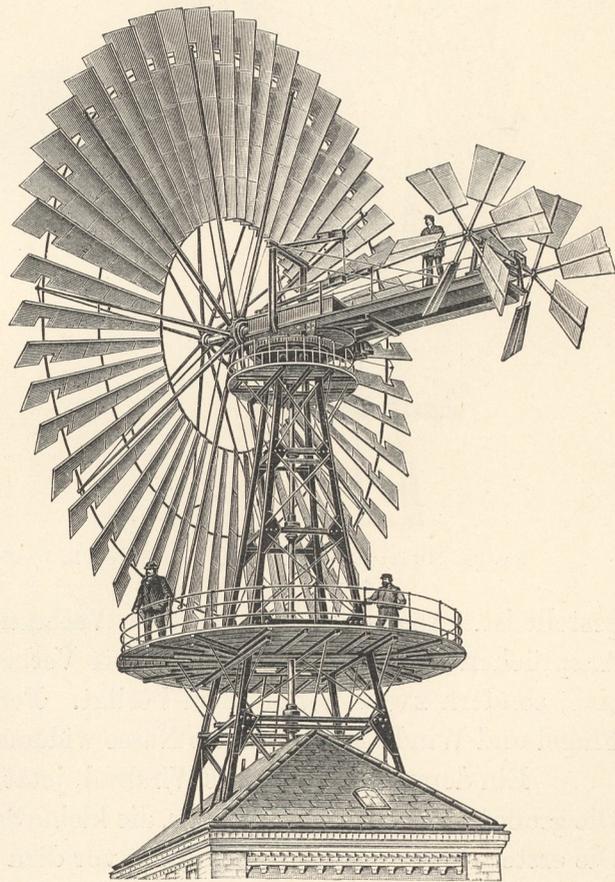


Fig. 15. Windrad mit beweglichen Flügeln von Reinsch.

Derartige Reinsch-Motoren werden bis zu sehr bedeutenden Größen gebaut. Die ganz

Derartige Reinsch-Motoren werden bis zu sehr bedeutenden Größen gebaut. Die ganz

großen Typen von 10 m Raddurchmesser und darüber erhalten ein doppeltes Flügelrad, d. h. die Flügel sind in ihrer Länge einmal geteilt. Räder von 17—20 m Durchmesser erhalten sogar zweimal geteilte Flügel, d. h. das Windrad ist dann ein dreifaches.

Haben sich die Windmotoren mit beweglichen Flügeln oder Flügelteilen auch leidlich bewährt, so wird doch, falls einmal solch ein Motor in Unordnung gerät, meistens eine umfangreiche und teure Reparatur nötig. Denn diese Motoren enthalten eine bedeutende Anzahl beweglicher Teile, die andauernd tadellos funktionieren müssen, obwohl die ganze Anlage allen Einflüssen der Witterung preisgegeben ist. Der Halladaymotor enthält bereits 72 Drehpunkte, zahlreiche Hebel und Scharniere am Rade; Sörensens Motor weist mindestens 120 Drehpunkte auf, und der Reinsch-Motor hat sogar bis zu 240 Drehpunkte und darüber.

Deshalb ist man wieder auf die Windräder zurückgekommen, deren sämtliche Flügelteile in unverrückbarem Verbands stehen, also auf Motoren, wie ein solcher schon in Fig. 10, S. 11 dar-

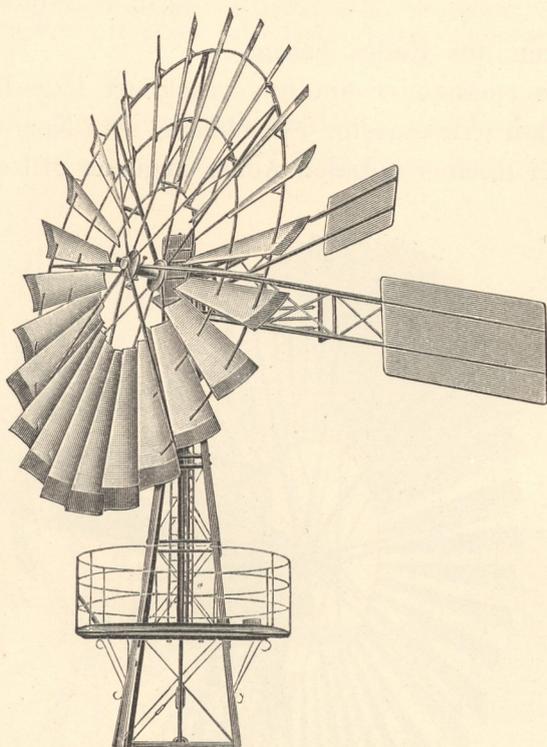


Fig. 16. Moderne Windturbine von Reinsch, Dresden.

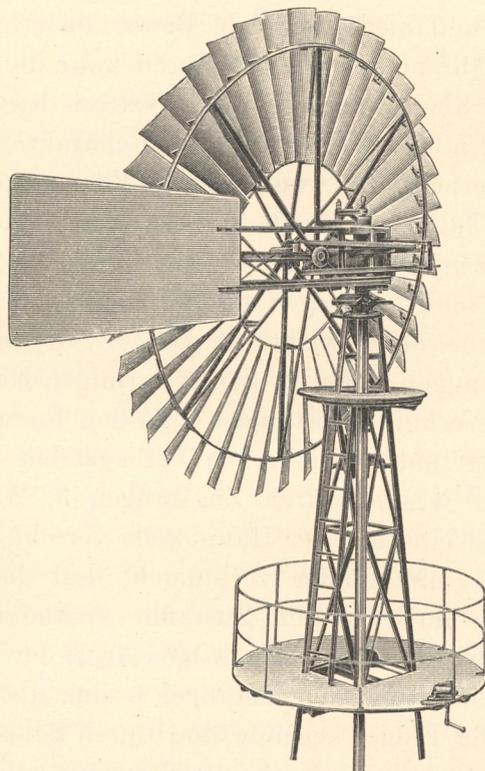


Fig. 17. Windturbine, ausgerückt.

gestellt ist. Aber es waren erst viele Verbesserungen nötig, um jenes Windrad allen berechtigten Ansprüchen anzupassen. Die wichtigste Verbesserung besteht darin, daß das Windrad nicht mehr eine, sondern zwei Windfahnen besitzt. Ferner bestehen sämtliche Teile aus Stahl und Eisen; Flügel und Windfahnen, um der Nässe widerstehen zu können, aus verzinktem Stahlblech.

Ein derartiges modernes Windrad, jetzt vielfach als *Windturbine* bezeichnet, stellt Fig. 16 dar. Die große Steuerfahne ist drehbar, die kleine Seitenfahne fest mit dem Körper des Rades verbunden. Die erstere hält das Windrad ständig vor dem Winde; in dieser Lage bietet die für gewöhnlich einen rechten Winkel mit der Steuerfahne bildende Seitenfahne dem Winde eine seitliche Angriffsfläche, durch die ein Überdruck bewirkt wird, zumal da die Hauptwelle etwas außer Mitte liegt. Bei stärker werdendem Winde dreht dieser Überdruck das Windrad je nach der Windstärke mehr oder weniger vom Winde ab, so daß die Flügelfläche dem Winde zum Teil entzogen wird. Die hierdurch in bezug auf den Wind gewissermaßen verkleinerte Flügelfläche sichert bei dem stärkeren Winde ungefähr dieselbe Umdrehungszahl, wie sie bei normalem Winde das zur Windrichtung genau einen rechten Winkel bildende Windrad zeigte. Bei starkem Winde verkleinert sich durch den Winddruck auf die Seitenfläche der Seitenfahne der Winkel zwischen dieser und der großen Steuerfahne, indem letztere, die mit dem Radkörper ja nicht fest, sondern drehbar verbunden ist, dem Seitendruck

des Windes (von der anderen Seite her) ausgesetzt wird und ihm nachgibt. Damit sich für gewöhnlich die Steuerfahne rechtwinklig zum Radkörper hält, ist ein Gegengewicht vorhanden, das bei seitlichem Außerwinddrehen des Flügelrades gehoben wird und so bei abnehmender Windstärke die Steuerfahne wieder rechtwinklig zum Flügelrad und die Fläche des letzteren dadurch wieder gegen den Wind richtet. Um Stöße abzuschwächen, sind zwischen Fahne und Motorkörper zwei bis drei starke Spiralfedern angeordnet. Vom Erdboden aus läßt sich die Steuerfahne vollständig umlegen (also mit der Radfläche in Berührung bringen); in diesem Falle wird die Fläche des Rades nicht vom Winde getroffen, d. h. der Windmotor ist ausgerückt (Fig. 17).

Solche Windturbinen werden von verschiedenen Firmen gebaut, so z. B. die Kontinental-Stahlwindmotoren von den Vereinigten Windturbinen-Werken in Dresden. Bei dieser Konstruktion

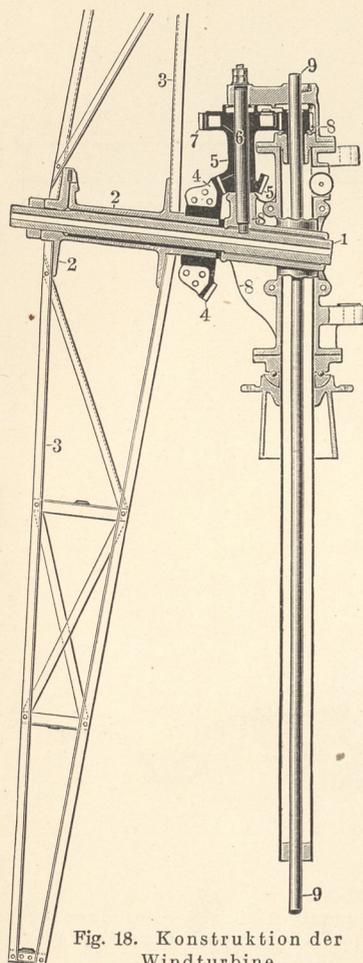


Fig. 18. Konstruktion der Windturbine.



Fig. 19. Motorkörper der Windturbine.

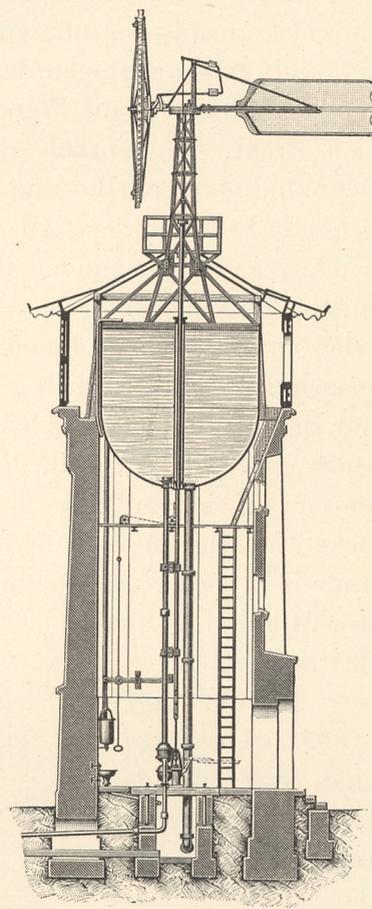


Fig. 19a. Bahnhofsreservoir mit Wasserförderung durch Windrad.

besteht das Flügelrad aus 6—8 Flügelsegmenten die zu einem starren Körper zusammengeschraubt und durch ebenso viele starke Arme mit der Nabe verbunden sind. Die einzelnen Flügel aus verzinktem Stahlblech haben eine gewölbte, schraubenförmig verdrehte Form, um den Winddruck aufs beste auszunutzen. Die *Bauart des Windrades* veranschaulicht Fig. 18. Darin ist 1 die Radachse; 2 die Radnabe; 3 sind die Arme des Windrades. Vom Windrade wird die Arbeitsenergie mittels des konischen Zahnrades 4 übertragen auf das kleine Zahnrad 5 und das mit ihm durch die Standwelle 6 verbundene Zahnrad 7. Dieses kämmt mit dem Zahnrad 8 und setzt so die Transmissionswelle 9 in Drehung. Den *Motorkörper* ohne Flügel und ohne Fahnen zeigt Fig. 19. Die Einschaltung des Zwischenvorgeleges (5, 6 und 7 der Fig. 18) ist notwendig, um in der Transmissionswelle eine genügend große Umdrehungsgeschwindigkeit für Maschinenantrieb zu erreichen. Daß selbsttätige Schmiervorrichtungen vorhanden sind, bedarf keiner Erwähnung. Das Triebwerk ist gegen Verschmutzung vollständig eingekapselt.

Sollen derartige Windräder nicht zum Antriebe von Arbeitsmaschinen usw. dienen, sondern nur zur Wasserversorgung durch unmittelbaren Pumpenantrieb, so fallen die Zahnräder zur

Energieübertragung ganz weg; mittels einer Kurbel wird die drehende Bewegung des Windrades in die auf und nieder gehende Bewegung des durch das ganze Motorgerüst nach unten hindurchgeführten Pumpengestänges umgesetzt. Windmotoren mit auf und ab gehendem Gestänge werden nur für kleinere Radgrößen gebaut.

Die Windräder werden meistens auf Gittertürmen montiert, wobei Höhen bis zu 30 m vorkommen. Sie können natürlich auch auf massive Gebäude (Dächer oder Türme) aufgesetzt werden, wenn die Baukonstruktion genügende Widerstandsfähigkeit in der fraglichen Höhe bietet. Windmotoren dienen vor allem zur Wasserversorgung (Fig. 19a), entweder direkt durch auf und ab gehendes Gestänge oder durch mittelbare Übertragung auf die Pumpe. Zwecks Förderung großer Wassermengen auf geringe Höhen (nicht über 3 m) verbindet man den Windmotor zweckmäßig durch Transmission mit einer *Wasserschnecke* (Fig. 20), d. h. mit einem schrägen, festliegenden Trog, in dem eine möglichst dicht an die Wandung anschließende Schnecke sich dreht. Namentlich in der Landwirtschaft findet der Windmotor zu Be- und Entwässerungsarbeiten weitgehende Verwendung. Aber nicht nur einzelne Anwesen, sondern ganze Gemeinden fördern häufig ihr Trinkwasser mittels Windrades. Ferner dienen Windmotoren zum Antrieb von Dreschmaschinen, von Mühlen und Werkzeugmaschinen, und endlich ist neuerdings der Windmotor zur Erzeugung von Elektrizität wichtig geworden. Fig. 21 stellt eine Anlage dar, in der ein Kontinental-Stahlwindmotor auf einem Gute nicht nur alle landwirtschaftlichen Maschinen und die Wasserpumpe treibt, sondern außerdem noch eine Dynamo zur elektrischen Beleuchtung des Wohnhauses und des Stalles.

Die *Windkraft-Elektrizitätswerke* sind erst in den letzten Jahren zu nutzbringenden und dauerhaften Anlagen ausgestaltet worden. Die Drehung der

senkrechten Welle des Windmotors überträgt sich auf ein Vorgelege, das die Dynamomaschine antreibt¹. Infolge der unregelmäßigen Windkraft kann man keineswegs durch die Dynamo direkt das Leitungsnetz (Lampen und Elektromotoren) speisen lassen. Es würden sich sonst Spannungsschwankungen ergeben, die einen Lichtbetrieb unmöglich machten und sogar Elektromotoren vorübergehend stilllegen könnten. Man muß zwischen Dynamo und Netz eine Akkumulatorenbatterie einschalten, die zeitweilig vorhandene Energieüberschüsse aufnimmt und umgekehrt als Reserve dient, sobald die augenblickliche Windleistung den gleichzeitigen Verbrauch nicht deckt. Eine selbsttätige Ausrückvorrichtung muß die Dynamo von der Akkumulatorenbatterie trennen, sobald der Wind nachläßt; erfolgte diese Trennung nicht, so würde die Dynamo Rückstrom aus der Akkumulatorenbatterie erhalten, also als Motor laufen. Die Verbindung zwischen Dynamo und Batterie muß selbsttätig wiederhergestellt werden, sobald bei wachsender Windstärke die

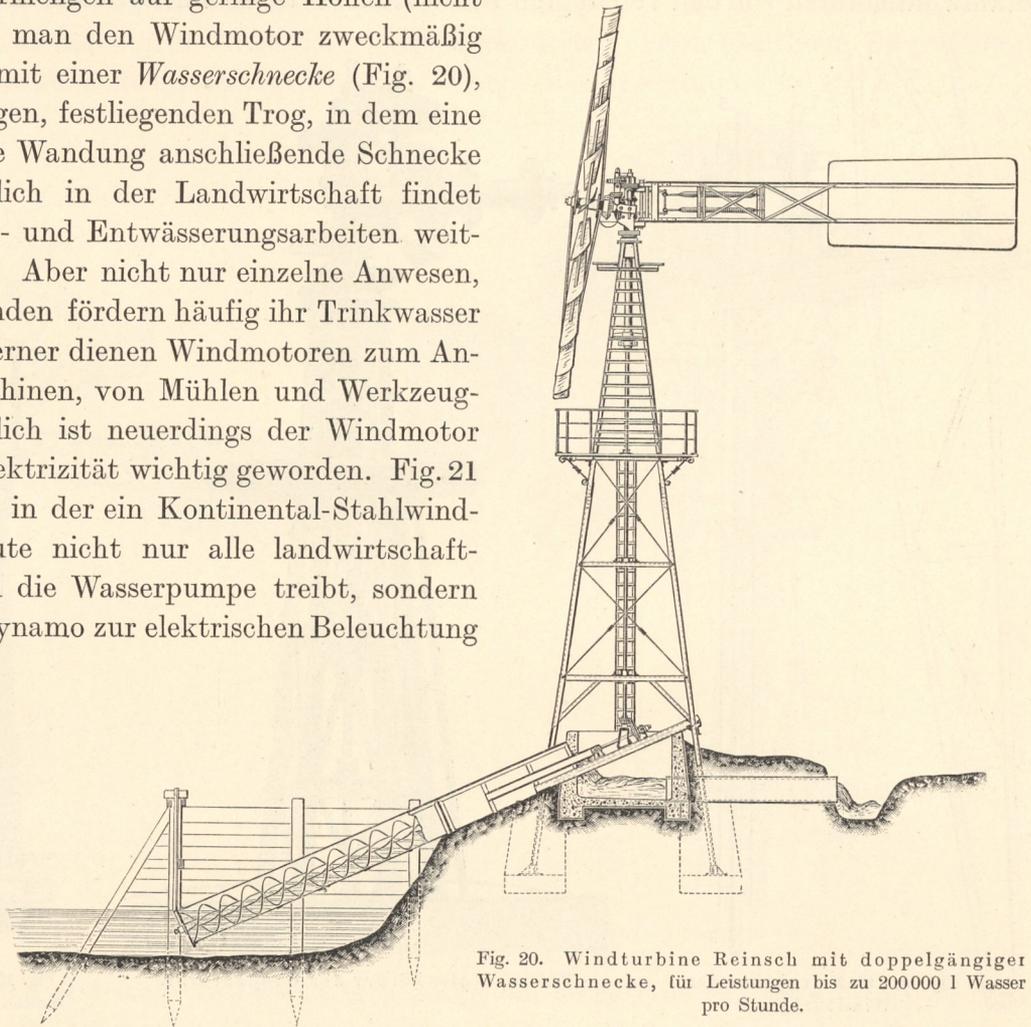


Fig. 20. Windturbine Reinsch mit doppelgängiger Wasserschnecke, für Leistungen bis zu 200000 l Wasser pro Stunde.

¹ Die in der nachfolgenden Beschreibung enthaltenen elektrotechnischen Begriffe usw. sind in Abteilung „Elektrotechnik“ des vorliegenden Werkes erläutert.

Energie der Dynamo zum Laden der Batterie wieder überwiegt. Endlich muß die Spannung der Dynamo nahezu konstant gehalten werden. Da sie aber im direkten Verhältnis zur Tourenzahl steht und diese andauernden Schwankungen unterliegt, so ist ein Ausgleich nur durch sogenannte variable Erregung möglich, d. h. die Erregung der Dynamo muß bei steigender Tourenzahl geschwächt und bei sinkender Tourenzahl verstärkt werden. Alle diese Forderungen erfüllt ein modernes Windkraft-Elektrizitätswerk selbsttätig, ohne Bedienung und Wartung (Fig. 22).

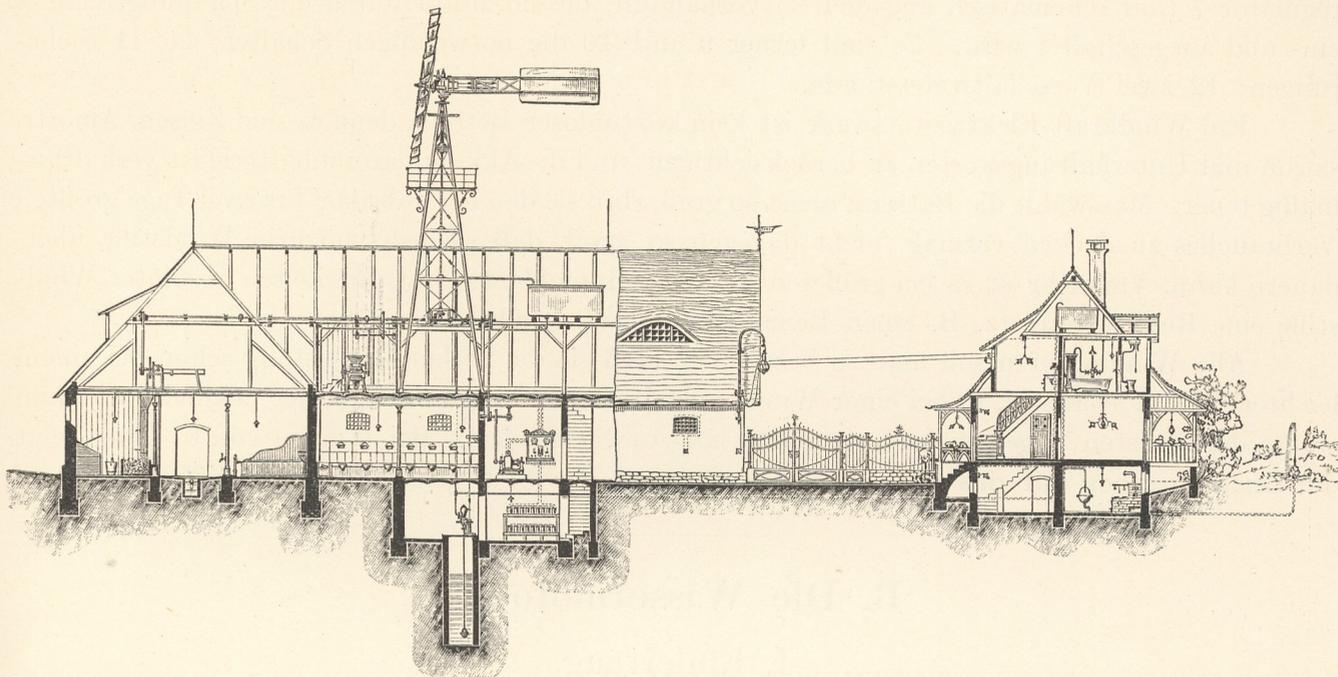


Fig. 21. Ausnutzung der Windkraft auf einem Gutshofe.

Mit der Hauptdynamo 1 ist eine kleinere Dynamo 2 direkt gekuppelt, wobei 2 so geschaltet ist, daß ihre Ankerspannung der Erregerspannung von 1 entgegenwirkt. Wächst durch Stärkerwerden des Windes die Tourenzahl, so steigt in den Anker beider Maschinen die induzierte Spannung. Da aber im Erregerstromkreis von 1 infolge der Gegenschaltung nur die Differenz der Spannungen zur Geltung kommen kann, so wird die Hauptdynamo schwächer erregt, und ihre Ankerspannung bleibt trotz erhöhter Tourenzahl konstant. Der von der Hauptdynamo erzeugte Ladestrom nimmt allmählich in dem gleichen Maße ab, wie die Spannung der Akkumulatorenbatterie wächst. Der Ladestrom durchfließt einen Widerstand 3, der den zur Erregung der Hilfsdynamo nötigen Strom abzunehmen gestattet. Bei kleiner werdendem Ladestrom wird also die Erregung von 2 schwächer werden und dementsprechend auch die Spannung der Hilfsdynamo sinken. Dadurch wieder nimmt umgekehrt die Erregung von 1 allmählich zu — kurz, die Spannung der Hauptdynamo stellt sich automatisch auf die jeweils zum Aufladen der Akkumulatorenbatterie 4 erforderliche Spannung (Ladespannung) ein. Das Maschinenpaar ist so abgeglichen, daß die Ladespannung niemals über ein der Zellenzahl entsprechendes Maß hinaus wachsen kann. Beim Anlaufen des Maschinenpaares befindet sich der automatische Schalter 5 in der unteren Stellung: der Hauptstrom ist unterbrochen. Wächst die Spannung der großen Dynamo über die Batteriespannung hinaus, so legt Relais 6 seinen Anker nach links und schließt die Nebenschlußspule des automatischen Schalters 5; dieser wird angezogen und schließt

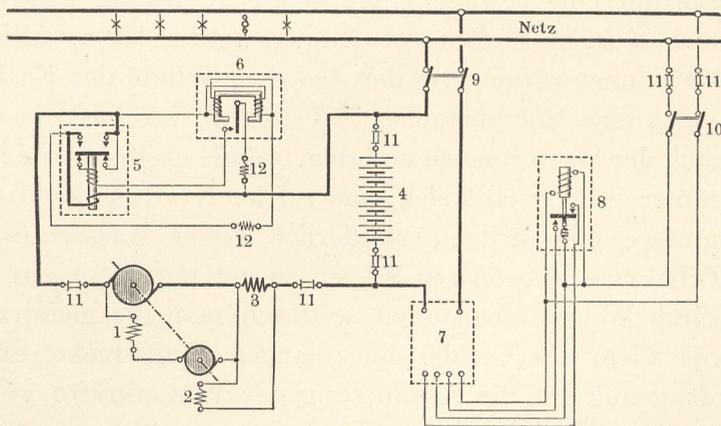


Fig. 22. Schaltung eines Windkraft-Elektrizitätswerkes.

Beim Anlaufen des Maschinenpaares befindet sich der automatische Schalter 5 in der unteren Stellung: der Hauptstrom ist unterbrochen. Wächst die Spannung der großen Dynamo über die Batteriespannung hinaus, so legt Relais 6 seinen Anker nach links und schließt die Nebenschlußspule des automatischen Schalters 5; dieser wird angezogen und schließt

den Ladestromkreis, während durch die gleichzeitige Betätigung der Hauptstromspule der Schalter in seiner Stellung festgehalten wird. Sinkt die Stromstärke bis auf fünf Prozent des normalen Stromes, so fällt der Schalter ab, so daß Rückstrom vermieden wird. Bei allmählicher Spannungsabnahme der Batterie infolge fortschreitender Entladung sucht Relais 6 die Dynamo wieder einzuschalten, doch wird dies erst möglich, sobald die Dynamospannung überwiegt. Um die Spannung auf der Verbrauchsseite konstant zu halten, ist ein selbsttätiger Hauptstromregulator 7 (nur schematisch angedeutet) vorhanden, dessen Motor durch ein Spannungsrelais 8 ein- und ausgeschaltet wird. Es sind ferner 9 und 10 die notwendigen Schalter; 11, 11 Sicherungen; 12 zwei Vorschaltwiderstände.

Ein Windkraft-Elektrizitätswerk ist kein kostenloser Betrieb, denn es sind Zinsen, Amortisation und Unterhaltungskosten zu berücksichtigen, und die Akkumulatorenbatterie ist verhältnismäßig teuer. Man wählt die Batterie meist so groß, daß sie den Strombedarf für zwei Tage größten Verbrauches zu decken vermag, nicht dagegen so groß, daß sie jede mögliche Windstille überdauern kann. Vielmehr ist es bei größeren Anlagen empfehlenswerter, für Zeiten absoluter Windstille eine Reservekraft (z. B. einen Benzinmotor) aufzustellen. —

Alle Windmotoren soll man so berechnen, daß sie die verlangte Leistung schon bei einem leichten Winde leisten, d. h. bei einer Windgeschwindigkeit von 4—5 m in der Sekunde, wie man sie an den meisten Tagen mehrere Stunden lang erwarten darf. Bei Winden von 6—7 m steigt die Leistung schon auf das Doppelte, entsprechend der S. 6 genannten Formel $N = F \cdot v^3 \cdot k$.

B. Die Wassermotoren.

I. Einleitung.

Der Sonnenwärme verdanken wir den großen „Kreislauf des Wassers“. Dieser besteht darin, daß das Wasser in die Luft verdunstet, mit dieser fortgeführt wird und in Form von Niederschlägen auf die Erdoberfläche gelangt, wo die Niederschläge sich zu Bächen, Flüssen, Strömen vereinigen und ins Meer fließen, worauf von hier die Verdunstung wieder ihren Ausgang nimmt. Das auf eine gewisse Höhe gehobene Wasser besitzt einen Energievorrat, der beim Transport nach tieferen Stellen entnommen werden kann. Wir verdanken diese Energiequelle also ebenso der Sonnenwärme, wie dies bei dem Winde der Fall ist. Jedes Rinnsal, jeder murmelnde Bach bildet eine Energiequelle, und überall, wo ein Wasserlauf ungenutzt zu Tale fließt, ist ein — je nach der Wassermenge und dem Gefälle größerer oder kleinerer — Kraftverlust zu beklagen. Nicht immer freilich läßt sich eine solche Kraftquelle vorteilhaft in der gegebenen Form ausnutzen; häufig genug ist dazu erforderlich, kleine Wassermengen hinter Staumauern in den sogenannten *Talsperren* zu größeren Massen zu vereinigen, sie auf diese Weise (oder aber in kleinerem Umfange durch Wehre) anzustauen, wodurch man die gleichzeitig nutzbare Wassermasse vergrößert und vor allem das Gefälle einer langen Flußstrecke eng zusammendrängt. Andererseits muß man oft genug auf die Ausnutzung der Wasserkräfte verzichten, weil der mit diesem Verzicht verbundene Energieverlust gering ist gegenüber sonstigen Vorteilen, so namentlich gegenüber der Schifffahrt, die ja durch die Anlage von Stauwehren verhindert oder doch sehr erschwert wird. Freilich ist gerade da, wo die Schifffahrt den größten Umfang hat, also auf den breiten Flußteilen der Niederungen, sowieso an eine Ausnutzung der Wasserkräfte wenig zu denken, denn wenn auf der einen Seite die breiten schiffbaren Ströme gewaltige Wassermengen führen, so fließen diese Ströme doch sehr langsam dahin, d. h. das Gefälle ist so gering, daß man zwecks motorischer Ausnutzung übermäßig lange Flußstrecken reservieren müßte. Es könnte die Frage aufgeworfen werden, wo denn die Energie bleibt, wenn Flußläufe ohne motorische Ausnutzung zu Tale fließen. Ein Teil dieser Energie wird bei schnellen Wasserflächen häufig sichtbar, indem das Wasser Erde von den Böschungen spült, ja selbst kleine Steine mitreißt. Im übrigen wird die ganze Energie dazu verbraucht, das Wasser am Grunde des Flußlaufes und an den Ufern (also da, wo es sich

gegen sein Bett reibt) zu erwärmen, und diese Wärme ist auch die Ursache, weshalb schnell fließende Wasserläufe im Winter kaum zufrieren.

Die Vorrichtungen zur Ausnutzung der Energie des Wassers heißen *Wassermotoren*. Sollen sie dem Wasser seine Energie entziehen, so muß man den Kraftverlust durch Reibung zwischen strömendem Wasser und Flußbett möglichst aufheben, und dazu ist es nötig, daß das Wasser seine schnelle Bewegung verliert. Man erreicht dies eben durch Stauanlagen.

Die Wassermotoren oder *Wasserkraftmaschinen* kann man einteilen in 1. *Wasserräder*, 2. *Turbinen*, 3. *Wassersäulenmaschinen* und 4. *Hydraulische Widder*. Hiervon haben 3. und 4. nur geringe Wichtigkeit und sollen daher nicht besprochen werden. Eigentlich sind die Turbinen auch nichts anderes als Wasserräder, so daß die Unterabteilungen 1. und 2. zusammenfallen müßten. Aber man hat sich doch zu der Trennung entschlossen, aus Gründen, die später zu behandeln sind.

Das fließende Wasser wird den Wassermotoren an einer gewissen Stelle zugeführt und verläßt sie an einer anderen Stelle. Das zugeführte Wasser nennt man *Aufschlagwasser*. Die Zuleitung erfolgt durch einen Kanal oder eine Röhrenleitung. Die Größe der ausnutzbaren Wasserenergie bestimmt sich nach der *Menge* des Aufschlagwassers und nach dem *Gefälle*, d. h. dem Höhenunterschied. In den Motoren kann das Wasser auf zwei Arten wirken, entweder durch seine lebendige Kraft (Geschwindigkeit) oder durch sein Gewicht. Die lebendige Kraft des fließenden Wassers wird in den Wassermotoren mit einem geringeren Nutzeffekt ausgenutzt als sein Gewicht. Bei der Ausnutzung nach dem Gewicht sind die Menge des Aufschlagwassers und das Gefälle auf den Nutzeffekt von gleichem Einfluß, jedoch ist es praktischer, Anlagen mit möglichst großer Fallhöhe und kleiner Wassermenge zu wählen. Von der Energie des Aufschlagwassers läßt sich nur ein Teil in den Motoren nutzbar machen; unvermeidbare Verluste entstehen durch den Widerstand der Maschinenteile gegenüber dem einströmenden Wasser, durch die Reibung des Wassers im Motor und durch die Reibungswiderstände der Maschinenteile gegeneinander, endlich dadurch, daß das Wasser auch noch beim Verlassen des Motors eine gewisse lebendige Kraft haben muß, daß also nicht die ganze lebendige Kraft im Wassermotor verbraucht werden darf.

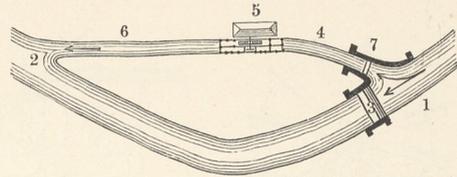


Fig. 23. Anlage einer Zuleitung aus einem Flusse.

Man kann Wasserkraftmaschinen nicht einfach in den Lauf des fließenden Wassers einbauen, denn der Wasserspiegel verändert sich, und die Leistung des Motors würde dementsprechend ganz ungleichmäßig werden. Vielmehr muß man den Wasserspiegel möglichst gleichmäßig auf derselben Höhe erhalten. Man leitet die motorisch auszunutzende Wassermenge durch einen Kanal von dem Flußlauf ab und führt sie nach der Ausnutzung ebenso durch einen Kanal an einer tieferen Stelle dem ursprünglichen Laufe wieder zu. Eine derartige Anlage zeigt Fig. 23. Der Höhenunterschied des Flußniveaus zwischen 1 und 2 ist das nutzbar gemachte Gefälle. 3 ist ein Stauwehr und 4 der Zuleitungsgraben (*Obergraben, Mühlgraben*), der die auszunutzende Wassermenge der Wasserkraftanlage 5 zuführt. Hat das Wasser den Motor passiert, so fließt es durch den *Untergraben* 6 dem Flusse wieder zu. In 4 und 6 wird das Wasser möglichst horizontal geleitet, damit bei 5 das Gefälle, also die Fallhöhe, möglichst groß wird. Bei 7 befindet sich gewöhnlich eine Einlaßschleuse, um die Wasserzufuhr verändern zu können. Die Aufstellung des Wassermotors erfolgt an der Stelle, die nach praktischen Rücksichten die günstigste ist. Demnach überwiegt in Gebirgsgegenden in der Regel die Länge des Obergrabens, weil der meist felsige Boden die Herstellung eines langen Untergrabens (der ja tiefer gegraben werden muß) wesentlich verteuern würde. Im Flachlande dagegen macht man den Untergraben recht lang, denn der Obergraben erfordert in der Anlage größere Sorgfalt, um die Reibungsverluste des Wassers in engen Grenzen zu halten. Das Stauwehr 3 wird so hoch gemacht, daß die zum Betriebe des Motors erforderliche Wassermenge nach 5 gelangt, der Überschuß aber über 3 hinwegfließen kann.

Als Wassermenge bezeichnet man das Volumen, das durch den Querschnitt der Zuleitung

dem Wassermotor in 1 Sekunde zuströmt. Die mechanische Arbeitsmenge aus einer verfügbaren Wassermenge Q in Kubikmetern pro Sekunde und einer Gefällhöhe H in Metern beträgt $\frac{1000 \cdot Q \cdot H}{75}$ Pferdestärken oder $13,3 \cdot Q \cdot H$ Pferdestärken.

Dieser *absolute Nutzeffekt des fallenden Wassers* gilt in bezug auf die motorische Ausnutzung nur theoretisch, d. h. er muß noch mit dem Wirkungsgrad des Wassermotors multipliziert werden, um dessen effektive Leistung zu finden. Je nach der Art des Wassermotors schwankt der Wirkungsgrad zwischen 0,5 und 0,85.

Wo nicht das Gewicht des fallenden, sondern die lebendige Kraft des fließenden Wassers der Berechnung zugrunde zu legen ist, geht man von folgender Formel aus: Ist v die mittlere Geschwindigkeit eines Stromes, Q das Volumen der durch den Querschnitt fließenden Wassermenge und g die Beschleunigung durch die Schwerkraft, so berechnet sich der absolute Nutzeffekt (N) des fließenden Wassers zu $N = \frac{1000 \cdot Q}{75} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{6,67 \cdot Q \cdot v^2}{g}$.

II. Wasserräder.

Ein Wasserrad besteht aus einem Radkranz, der mit Schaufeln oder Zellen besetzt ist, und zwar erstrecken sich die Schaufeln oder Zellen in gleichen Abständen über den ganzen Umfang des Rades hin. Man unterscheidet hiernach *Schaufelräder* und *Zellenräder*;

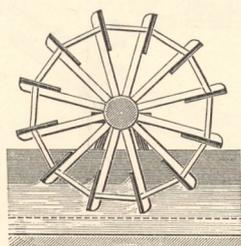


Fig. 24.
Schiffmühlenrad.

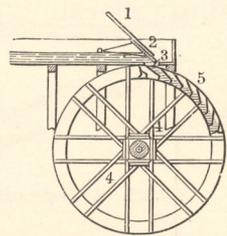


Fig. 25. Oberschlächtiges Wasserrad mit Spansschütze.

Bei den ersteren sind die Schaufeln am Radkranz befestigt, und es ist nur ein Boden vorhanden: *Wasserräder mit offenem Schaufelraum*. Bei den Zellenrädern, die auch *Kübelräder* genannt werden, sind die Schaufeln noch durch Seitenwände eingeschlossen so daß Zellen (Kübel) zur Aufnahme des Wassers entstehen: *Wasserräder mit geschlossenem Schaufelraum*. Dieser konstruktive Unterschied zeigt, daß in den Schaufelrädern das Wasser

nur durch seine lebendige Kraft wirken kann, indem es gegen die Schaufeln stößt, dagegen in den Zellenrädern durch sein Gewicht, indem es nach und nach die verschiedenen Zellen anfüllt und die so beschwerte Radseite niederdrückt.

Das einfachste Wasserrad ist die *Schiffmühle*, ein uralter Wassermotor. Die Schiffmühlenräder (Fig. 24) hängen frei im Strome, und zwar lagern sie auf zwei durch Balken verbundenen, im Flußlauf verankerten Kähnen. Da diese sich mit dem Wasserspiegel heben und senken, bedarf es einer Stauanlage nicht. Dafür hat die Schiffmühle aber auch nur einen geringen Wirkungsgrad, weil sehr viel Wasser seitlich den Schaufeln ausweicht. Deshalb werden Schiffmühlenräder nur noch wenig benutzt.

Die üblichste Einteilung der Wasserräder ist die nach der Stelle (Höhe) des Wassereintrittes in das Rad. Man erhält so *oberschlächlige*, *rückenschlächlige*, *mittelschlächlige* und *unterschlächlige Wasserräder*. Von diesen baut man die oberschlächligen und rückenschlächligen Räder als Zellenräder, dagegen die mittelschlächligen und unterschlächligen als Schaufelräder.

Die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers muß größer sein als die Umlaufgeschwindigkeit des Rades; daher läßt man es erst eine kleine Höhe, das *Stoßgefälle*, durchfallen, ehe es in das Rad eintritt. Der Einlauf des Wassers geschieht mittels einer am Ende der Zuleitung, des *Gerrinnes*, eingebauten Vorrichtung, nämlich einer Quervorlage (*Schütze*), über die das Wasser entweder hinwegfließt: *Überfallschütze*, oder unter der es hindurchfließt: *Spansschütze*, oder die es durch besondere Einlaufkanäle passiert: *Kulisseneinlauf*. Durch Hoch- oder Niederstellen der Schütze läßt sich die Wasserzufuhr regulieren.

Oberschlächtiges Wasserrad. Bei diesem (Fig. 25) tritt das Wasser unter einer Spansschütze 1, 2 hindurch in einem breiten, aber dünnen Strahle bei 3 in der unmittelbaren Nähe des Scheitels des Rades 4 ein, wobei der Strahl so weit über den Scheitel hinweg reicht, daß

die Drehungsrichtung des Rades dadurch gegeben ist. Die mit Wasser gefüllten Zellen 5 senken sich durch ihr Gewicht und steigen leer wieder auf. Je später das Wasser ausfließt, desto günstiger ist der Wirkungsgrad; daher müssen die Schaufeln entsprechend weit übereinander greifen, wie es Fig. 25 erkennen läßt. Die Vereinigung von zwei überschlächtigen Wasserrädern mit entgegengesetzt gerichteten Schaufeln auf derselben Welle nebeneinander, um eine Umkehr der Drehungsrichtung nach Belieben zuzulassen, heißt *Kehrrad*. Überschlächtige Räder dürfen auf keinen Fall ins Unterwasser eintauchen. Die Räder eignen sich für Gefälle von 4—10 m bei Wassermengen bis 0,7 cbm in der Sekunde und haben einen Wirkungsgrad von 0,7—0,8. Die Ansicht eines überschlächtigen Wasserrades zeigt Fig. 26; an der einen Seite des Rades ist um den Umfang ein Zahnkranz gelegt, in den ein kleineres Getriebe eingreift, um die Energie in Form einer schnelleren Rotation zu übertragen.

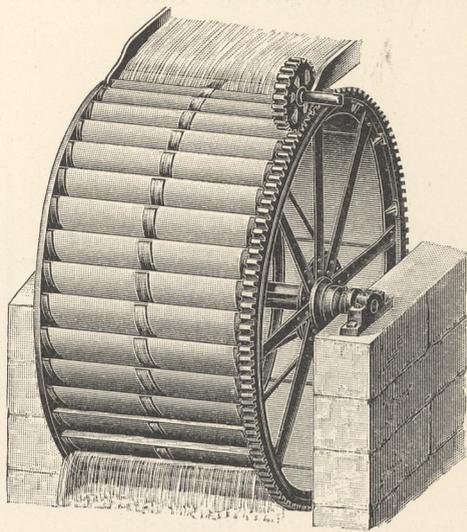


Fig. 26. Überschlächtiges Wasserrad (Ansicht).

Rückenschlächtige Wasserräder. Ein solches mit Kulisseneinlauf ist in Fig. 27 dargestellt. An die Stelle des Kulisseneinlaufs 1 tritt zuweilen eine Überfallschütze. Das Rad 2 ist stets größer als die Gefällhöhe, und der Wassereintritt geschieht unterhalb des Scheitels auf der oberen Hälfte des Radumfanges. Meist sind diese Räder als Schaufelräder gebaut, also mit Schaufeln 3 ohne seitlich geschlossene Zellen; dafür muß dann das Mauerwerk 4 des Gerinnes die Seiten und den Umfang des Rades eng umschließen. Wird ein derartiges Rad jedoch als Zellenrad gebaut, so ist eine kreisförmige Ausmauerung des Gerinnes nicht nötig. Die Wasserzufuhr durch den Kulisseneinlauf kann mittels eines Schiebers 5, 6 und des Rades geregelt werden. Die rückenschlächtigen Wasserräder eignen sich für Gefälle zwischen 3 und 5 m und für Wassermengen von 0,4—1,3 cbm in der Sekunde; sie besitzen einen Wirkungsgrad von 0,65—0,75 und finden vorzugsweise Verwendung für einen veränderlichen Wasserstand im Ober- und Untergraben.

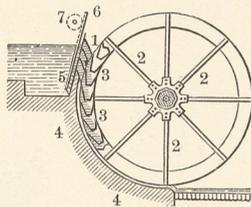


Fig. 27.

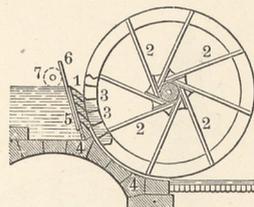


Fig. 28.

Fig. 27. Rückenschlächtiges, Fig. 28. Mittelschlächtiges Wasserrad mit Kulisseneinlauf.

Mittelschlächtige Wasserräder. Bei diesen (Fig. 28) erfolgt der Wassereintritt etwas unterhalb der Mitte des Rades 2 entweder durch einen Kulisseneinlauf 1 oder über eine Überfallschütze hinweg. Diese Räder haben Schaufeln 3 ohne Seitenwände; daher muß der untere Teil des gemauerten Gerinnes 4 an Umfang und Seiten des Rades eng anschließen. 5, 6 ist wieder der Zuflussschieber mit dem Rade 7. Die mittelschlächtigen Wasserräder eignen sich mit Kulisseneinlauf für Gefälle von 2,5—3,5 m und Wassermengen von 0,5—2 cbm in der Sekunde, bei einem Wirkungsgrade zwischen 0,65 und 0,7. Mit Überfallschütze sind sie geeignet für Gefälle von 1,5—2 m und Wassermengen von 0,5—2,5 cbm bei einem Wirkungsgrade von 0,6—0,65.

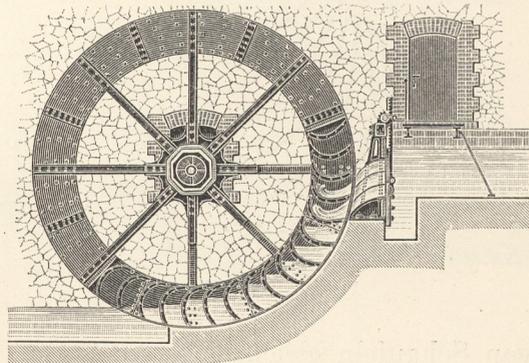


Fig. 29. Mittelschlächtiges Wasserrad der Merseburger Maschinenfabrik Herrich & Co.

In Fig. 29 ist ein mittelschlächtiges Rad der Merseburger Maschinenfabrik Herrich & Co. im Schnitt dargestellt (die Schaufeln sind nur zum Teil hineingezeichnet). Meistens besteht dieses Rad ganz aus Eisen; es wird in das Mauerwerk eingebaut. Das Wasser wird durch drei übereinanderliegende Kulissen zugeführt.

Ist das verfügbare Gefälle noch geringer als etwa 1,5 m, so läßt sich kaum noch eine

Gewichtswirkung des Wassers erzielen, und der Wirkungsgrad wird sehr klein. Das in Fig. 30 wiedergegebene *Kropfrad mit Spannschütze*, das man auch *halbmittelschlächtiges* Wasserrad nennt, ist für Gefälle von 0,5—1,5 m und Wassermengen von 0,6—4 cbm bestimmt; der Wirkungsgrad schwankt zwischen 0,5 und 0,6. Wesentlich höher ist der Wirkungsgrad bei den neueren Ausführungen derartiger Räder; so beträgt er z. B. beim *Sagebienrad* (Fig. 31) etwa 0,70—0,75. Die

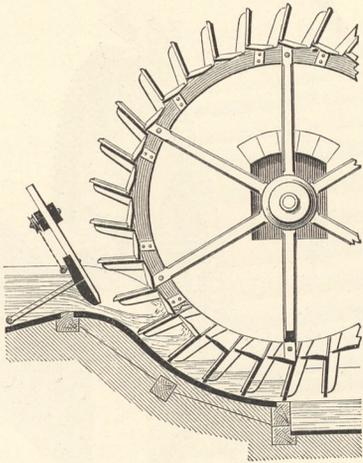


Fig. 30. Kropfrad mit Spannschütze.

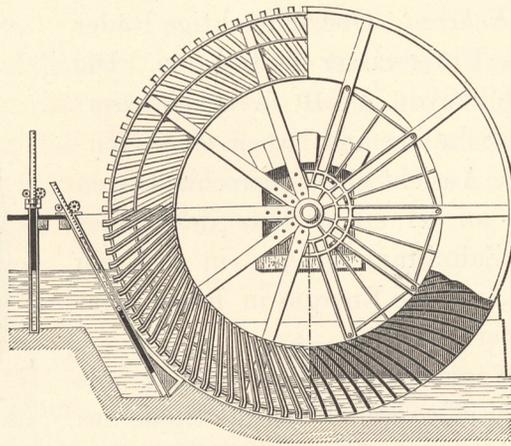


Fig. 31. Sagebienrad mit Überfallschütze.

Umfangsgeschwindigkeit dieses Rades ist sehr klein, ebenso auch die Umlaufzahl; daher erhalten diese Räder einen großen Durchmesser, eine große Kranzbreite und Schaufelzahl. Das Wasser tritt langsam in dickem Strahle ohne bedeutende Stoßwirkung ein, so daß das Gefälle als Druckgefälle günstig zur Wirkung kommt. Die Schaufeln sind entweder durchweg gekrümmt oder nur am äußeren Ende umgebogen; beide Formen sind in Fig. 31 gezeigt. Eine noch größere Kranzbreite besitzt das *Zuppingerrad* (Fig. 32), dessen Schaufeln so gekrümmt sind, daß sie senkrecht aus dem Unterwasser aufsteigen.

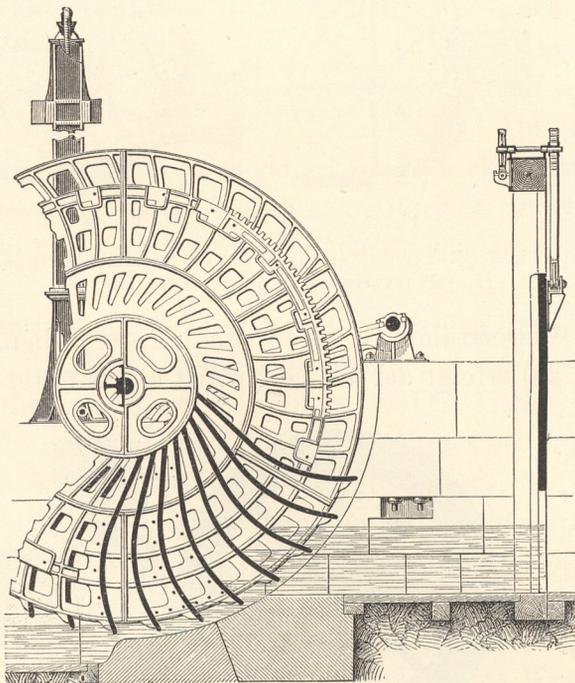


Fig. 32. Zuppingerrad.

Unterschlächlige Wasserräder. Hierher gehört bereits das alte, in Fig. 24 abgebildete Schiffmühlerrad, das einen sehr geringen Wirkungsgrad hat. Ihrer ganzen Natur nach, da das Wasser nur die jeweils untersten Schaufeln trifft, können die unterschlächtigen Räder nicht mehr das Gewicht des Wassers ausnutzen, sondern ausschließlich dessen lebendige Kraft, und dies erklärt den geringen Wirkungsgrad ohne weiteres. Etwas größer als bei den einfachen Schiffmühlen ist er immerhin bei den unterschlächtigen Rädern im sogenannten *geraden* oder *Schnurgerinne* (Fig. 33), bei denen das Wasser lediglich durch den Stoß wirkt und sehr viel Wasser unbenutzt vorbeifließt. Solche Räder eignen sich für Gefälle von 0,2—0,7 m und Wassermengen bis 5 cbm in der Sekunde und zeigen einen Wirkungsgrad bis zu 0,35. Der Wirkungsgrad steigt etwas, wenn das Gerinne kropfförmig hergestellt ist (*Kropfgerinne*), wie bei der Anordnung in Fig. 34, denn durch das Kropfgerinne befindet sich stets eine größere Zahl

von Schaufeln gleichzeitig im Wasser. Zuweilen findet sich an diesen Rädern eine Vorrichtung (*Pansterung, Pansterwerk*), um sie mit ihren Lagern heben und senken zu können, wie es der Stand des Unterwassers gerade erfordert. Eine besondere Art der unterschlächtigen Räder verkörpert das *Ponceletrad* (Fig. 34); infolge der eigenartigen Schaufelkonstruktion hat es einen verhältnismäßig hohen Wirkungsgrad (etwa 0,7). Die Schaufeln sind so gekrümmt, daß das Wasser genau in der Richtung der Schaufelkrümmung eintritt, an den Schaufeln eine gewisse Strecke in die Höhe steigt und dann wieder zurückfällt. Der Stoß beim Wassereintritt wird dadurch ganz

vermieden, und das Wasser wirkt nur durch seine lebendige Kraft. Das Ponceletrad eignet sich für Gefälle von 0,5—1,5 m.

Bauart der Wasserräder. Die gewöhnlichen Wasserräder werden mit steifen Armen ausgeführt, jedoch findet man bei modernen Konstruktionen häufig das *Suspensionsprinzip* durchgeführt, wobei der Radkranz mit der Nabe durch dünne, nur auf Zug beanspruchte Rundeisenstangen verbunden ist, eine Konstruktion, wie sie beim Fahrrad üblich ist. Für Räder von nicht über 2,5 m Breite genügen zur Anbringung der Schaufeln zwei Systeme von Armen; noch breitere Räder erhalten drei Systeme von Armen. Zur Versteifung sind außerdem Diagonalstangen angeordnet, welche die seitlichen Beanspruchungen aufnehmen.

Die Kraftübertragung von dem Wasserrade nach den angeschlossenen Maschinen geschieht durch einen Zahnkranz, der entweder als besonderes Zahnrad ausgebildet und für sich auf der Nabe befestigt ist, oder aber direkt den Radkranz umschließt, wie dies schon Fig. 26 zeigte.

Das Material der Welle ist Schmiedeeisen oder Stahl. Steife Arme werden aus Schmiedeeisen, Gußeisen oder Holz hergestellt und an der Nabe durch Rosetten befestigt.

Der Radkranz besteht aus Holz, Schmiedeeisen oder Gußeisen; die Schaufeln werden aus Holz oder Eisen fabriziert. Der Radboden (Zellenboden) besteht immer aus Holz, selbst bei eisernen Schaufeln.

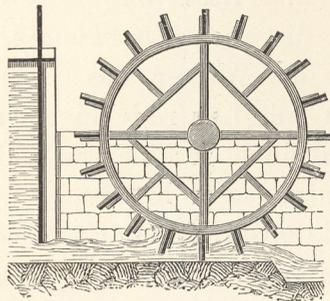


Fig. 33. Unterschlächtiges Wasserrad im Schnurgerinne.

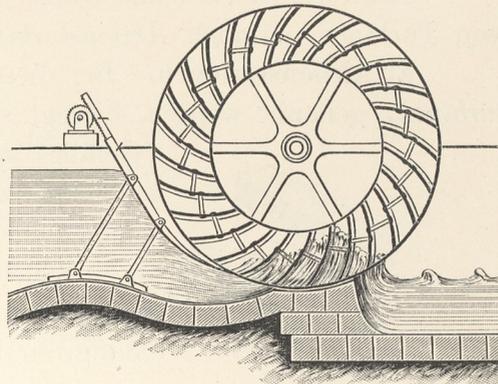


Fig. 34. Ponceletrad.

III. Turbinen.

Früher unterschied man *vertikale Wasserräder* (mit horizontaler Welle), wie sie im voranstehenden Abschnitt besprochen sind, von den *Turbinen*, die als *horizontale Wasserräder* (mit vertikaler Welle) bezeichnet wurden. Aber seitdem auch vertikale Turbinen nicht nur gebaut werden, sondern sogar sehr verbreitet sind, kann dieser Unterschied nicht mehr als bezeichnend gelten. Dagegen liegt der grundlegende Unterschied in der Art, wie das Wasser zur Wirkung gelangt.

In den Turbinen wirkt das Wasser weder durch sein Gewicht noch durch Stoß auf die Schaufeln, sondern *durch allmähliche Abgabe seines Arbeitsvermögens durch Geschwindigkeits- und Richtungsänderung*.

Ein wesentliches Merkmal ist ferner, daß das Wasser den Turbinen durch einen besonderen Leitapparat zwangläufig zugeführt wird. Auch tritt das Wasser nicht an der gleichen Stelle in die Schaufeln ein und wieder aus, wie bei den gewöhnlichen Wasserrädern, sondern durchfließt die Schaufeln in ununterbrochenem Strahl und verläßt sie derart, daß Einströmung und Ausfluß getrennt sind. Die Schaufeln des Turbinenlaufes sind eigenartig geformt, und der feststehende Leitapparat ist ebenfalls mit Schaufeln ausgestattet. Bei vielen Turbinen bildet der Leitapparat ein vollständiges Rad und verteilt das Wasser durch seine Schaufeln so, daß gleichzeitig sämtliche Schaufeln des Laufrades vom Wasser getroffen werden. Auch dies ist ein grundsätzlicher Unterschied von den Wasserrädern, bei denen ja immer nur ein kleiner Teil des Radumfangs und der Schaufeln unter den Einfluß des Wassers gelangt.

Die Grenzen zwischen den Wasserrädern und den Turbinen lassen sich nicht scharf ziehen. Rein äußerlich versteht man unter „Turbine“ die schnell laufende, in weiten Grenzen regulierbare oder aber sich automatisch regulierende Wasserkraftmaschine, während als Wasserrad das schwere, sich langsam drehende Schaufelrad bezeichnet wird.

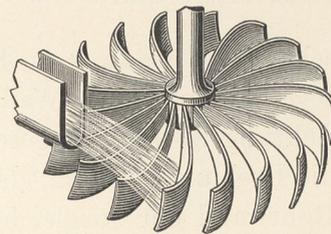


Fig. 35. Stoßrad.

Gewissermaßen den Übergang zwischen Wasserrad und Turbine bildet das sogenannte *Löffelrad* oder *Stoßrad* (Fig. 35), auch *Kufenrad* und *Bordasche Turbine* genannt. Es ist dies ein sehr schnell rotierendes Strahlrad, das man früher zur Ausnutzung großer Gefälle häufig verwendete, das aber einen sehr geringen Nutzeffekt, nämlich nur 0,30—0,35, hat.

Das Prinzip der Turbinen erfordert es, dem Wasser seine nutzbare Geschwindigkeit möglichst ohne Stoß zu entziehen. Deshalb müssen die Schaufeln so geformt werden, daß der auftreffende Wasserstrahl ganz allmählich und ohne Stoß aus seiner Richtung abgelenkt wird und trotzdem seine volle Wirkung auf die Schaufeln überträgt.

1. Einteilung der Turbinen.

Nach der Art, wie das Wasser zur Wirkung gelangt, unterscheidet man zwei große Gruppen von Turbinen, nämlich *Aktionsturbinen* und *Reaktionsturbinen*.

a) **Aktionsturbinen.** Bei diesen, die auch *Druckturbinen* und *Strahlurbinen* (*Freistrahlturbinen*) genannt werden, bewegt sich das Wasser, das dabei unter dem einfachen Druck des Gefälles steht, im Laufrade in einem freien, also die Laufradkanäle nicht ganz füllenden Strahle. Es findet somit auch ein freier Ausfluß nach dem Unterwasser hin statt.

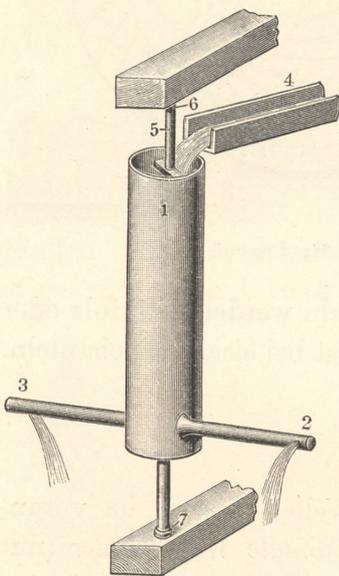


Fig. 36. Segners Reaktionsrad.

b) **Reaktionsturbinen** (*Überdruckturbinen*). Bei ihnen ist zwischen Ober- und Unterwasser eine aus Druckrohr, Leitapparat, Laufrad und Saugrohr bestehende, zusammenhängende Leitung vorhanden, so daß ein freier Fall des Wassers nicht stattfindet. Die Laufradkanäle sind also vollständig gefüllt, und weil infolge der Verengung der Laufradkanäle nach der Seite des Wasseraustrittes zu das Wasser sich nur mit einer geringeren Geschwindigkeit fortbewegen kann, steht es unter einer höheren *hydraulischen Pressung*. Dieser *Überdruck* leistet in dieser Art von Turbine die Arbeit, indem er erst innerhalb des Laufrades wieder in Bewegung umgewandelt wird. Die Wirkung ist dieselbe wie bei dem bekannten *Segnerschen Reaktionsrad* (Fig. 36). Dieses besteht aus dem senkrecht stehenden Hohlzylinder 1 mit zwei horizontalen, an den Enden geschlossenen Rohrschenkeln 2 und 3, die seitlich (und einander entgegengesetzt) mit Öffnungen versehen sind. Das aus der Rinne 4 in den Zylinder fließende Wasser strömt bei 2 und 3 aus und versetzt den mit seiner Welle 5 in 6 und 7 drehbar gelagerten Zylinder 1 in Umdrehung. Die Drehungsrichtung ist entgegengesetzt zur Richtung der ausfließenden Wasserstrahlen. Hervorgerufen wird die Drehung dadurch, daß dem Wasserdruck im Rohrrinnern an der der Öffnung entgegengesetzten Rohrwand der ausgleichende Widerstand auf der gegenüberliegenden Seite fehlt.

c) **Grenzturbinen.** Unter dieser Bezeichnung versteht man Turbinen, die auf der Grenze zwischen Aktions- und Reaktionsturbinen liegen. Sie unterscheiden sich von den Aktionsturbinen dadurch, daß der Wasserstrahl die Laufradkanäle (deren Weite an der Austrittsseite entsprechend gewählt wird) ganz ausfüllt, ohne an seiner freien Entwicklung gehemmt zu werden. Von den Reaktionsturbinen unterscheiden sich die Grenzturbinen dadurch, daß sie ohne Überdruck arbeiten. Während die Aktionsturbinen nicht im Unterwasser laufen dürfen, ohne im Nutzeffekt stark beeinträchtigt zu werden, ist dies bei den Grenzturbinen gleichgültig. —

Eine andere Einteilung der Turbinen geht von dem Weg aus, den das Wasser in der Turbine zurückzulegen hat. Hiernach unterscheidet man *Axial-*, *Radial-* und *Diagonalturbinen*.

a) **Axialturbinen.** Das Wasser tritt durch einen Ringspalt ein und durchströmt die Schaufeln in der Richtung der Turbinenachse. Es verfolgt also, ein horizontales Rad vorausgesetzt, seinen natürlichen Weg von oben nach unten, in Ausnahmefällen auch von unten nach oben.

b) **Radialturbinen.** Das Wasser wird so zugeführt, daß es die Schaufeln radial durchfließen muß. Es tritt also in einer zur Turbinenachse senkrechten Ebene schräg radial durch einen

Zylinderspalt in das Rad ein und durchströmt dieses entweder von außen nach innen oder von innen nach außen. In beiden Fällen wird das Wasser um 90° von seinem Wege abgelenkt.

c) **Diagonalturbinen (Kegelturbinen)**. Diese, bei denen der Wasserweg schräg zwischen radial und axial liegt, haben keine Bedeutung erlangt.

Weiter kann man die Turbinen nach dem *Wasseraufschlage (Beaufschlagung)* einteilen in *Voll-* und *Partialturbinen*.

a) **Vollturbinen**. Das Laufrad ist ringsherum mit Leitschaufeln besetzt, so daß sämtliche Schaufeln des Laufrades gleichzeitig „beaufschlagt“ (vom Wasser getroffen) werden.

b) **Partialturbinen**. Die Leitschaufeln nehmen nur einen Teil des Radumfangs ein, so daß die Laufradschaufeln auch nur zum Teil („partial“) beaufschlagt werden. Die partielle Beaufschlagung ist nur bei Aktionsturbinen durchführbar; sie kann bei Voll-Aktionsturbinen durch Absperrung eines Teiles der Schaufeln ebenfalls erreicht werden, jedoch besteht bei den Partialturbinen meistens der Leitapparat überhaupt nicht aus einem vollen Rade, sondern nur aus einigen Leitkanälen. Bei sehr hohen Gefällen kann die partielle Beaufschlagung bis auf einen einzigen Leitkanal hinabgehen.

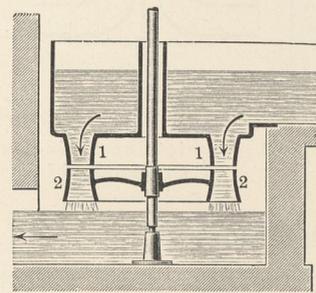


Fig. 37. Axiale Aktionsturbine (Schnitt).

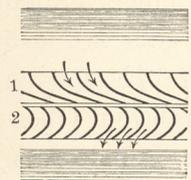


Fig. 38. Idealer Schnitt durch die Mitte der Wasserwege zur Erklärung der Schaufelkrümmungen im Leitrad und Laufrad.

Endlich ist noch eine Einteilung der Turbinen nach der Gefällhöhe möglich, und man unterscheidet

- a) **Niederdruckturbinen**, für Gefälle bis 4 m, und
- b) **Hochdruckturbinen**, für Gefälle über 4 m.

Um das Wasser sicherer zu leiten, kann man die Eintrittsbreite teilen und erhält auf diese Weise einerseits *mehrkränzige Axialturbinen* und andererseits *mehretagige Radialturbinen*.

2. Hauptteile der Turbinen.

Die wichtigsten Teile jeder Turbine sind *Leitapparat* und *Laufrad*; dazu kommen noch die *Welle*, die *Lager* und die *Reguliervorrichtungen*.

Der *Leitapparat*, durch den dem Wasser ein bestimmter Weg zum Laufrade hin vorgeschrieben wird, ist ein gußeiserner Körper, der entweder feste Schaufeln enthält oder mit beweglichen Leitschaufeln ausgestattet ist oder endlich einen oder mehrere Leitkanäle aufweist, die mittels eines Zungenschiebers oder Kniestückes geschlossen werden können.

Das *Laufrad* besteht aus Gußeisen oder Bronze und enthält entweder Schaufeln aus demselben Material oder aber eingegossene Stahlblechschaufeln.

Die *Welle* ist entweder massiv und besteht dann aus Gußstahl, oder sie ist hohl aus Gußeisen, mit *Tragstange*.

An *Lagern* bedarf das Laufrad, falls es *horizontale Lage* hat, eines *Spurlagers (Fußlagers)*, das eine Vorrichtung besitzt, um den Spielraum zwischen Leitrad und Laufrad zu regeln. Vertikale Laufräder, also mit *horizontaler Welle*, bedürfen mindestens zweier *Traglager*; bei längeren Wellen sind gegen Durchbiegungen noch *Zwischenlager* anzuordnen.

3. Turbinensysteme.

Im folgenden seien die wichtigsten Turbinensysteme besprochen, unter Hervorhebung derjenigen Konstruktionen, die augenblicklich praktische Bedeutung haben.

Aktionsturbinen. Bei diesen (Fig. 37) gelangt das Wasser durch die kreisförmig angeordneten

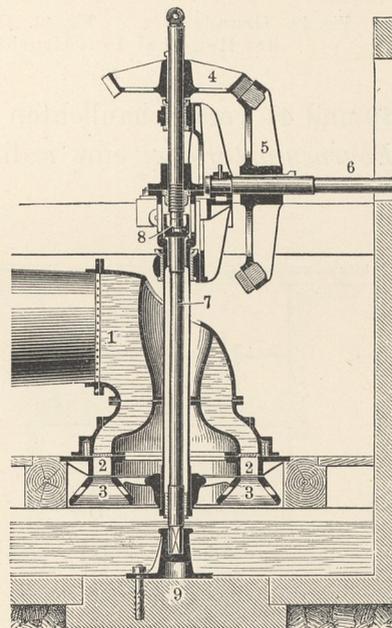


Fig. 39. Girard-Axialturbine.

Zellen des feststehenden Leitrades 1 in die entgegengesetzt gekrümmten Schaufelzellen des Laufrades 2 und versetzt dieses in Umdrehung. Fig. 38 läßt die entgegengesetzte Krümmung der Schaufelzellen im Leitrad 1 und Laufrade 2 erkennen. Aus dem Laufrade ergießt sich das

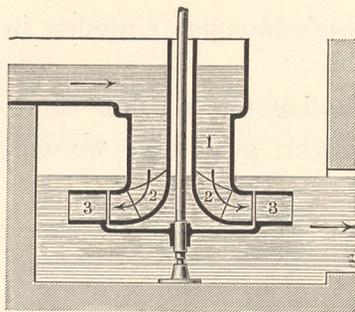


Fig. 40. Schnitt durch eine radiale Reaktionsturbine mit Innenaufschlag (Fourneyronturbine).

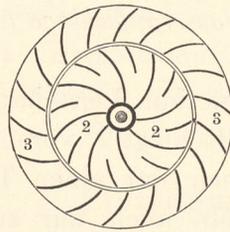


Fig. 41. Grundriß zu Fig. 40.

Wasser in freien Strahlen ins Unterwasser. Die Aktionsturbine muß so hoch aufgestellt werden, daß ihr Laufrad nicht im Unterwasser schleift, weil sonst der Nutzeffekt erheblich sinkt. Deshalb sind derartige Turbinen nicht für einen wechselnden Unterwasserstand geeignet.

Girard-Vollturbine. Diese früher verbreitete, jetzt allerdings auch schon überwundene Konstruktion (Fig. 39) ist eine axiale Aktionsturbine. Das Wasser im Rohr 1 steht unter dem Druck des Gefälles und strömt durch die Zellen des

Leitrades 2 gegen die gekrümmten Schaufeln 3 des Laufrades. Dieses sitzt auf einer hohlen Welle, die um eine freistehende Tragstange 7 rotiert und mittels der konischen Räder 4 und 5 die Welle 6 antreibt. Das Gewicht des Laufrades (mit dem darauf lastenden Wasser) sowie der Welle und des Zahnrades 4 wird in 8 durch den Oberwasserzapfen auf die Tragstange 7 übertragen, die in der gußeisernen Grundplatte 9 fest angeordnet ist. Das untere Ende der hohlen Turbinenwelle ist in einem die Tragstange umschließenden Lager geführt, während eine am oberen Ende angeordnete Schraubenspindel dazu dient, das Laufrad höher oder tiefer zu stellen, also die Weite des Spaltes zwischen Leit- und Laufrad zu regeln.

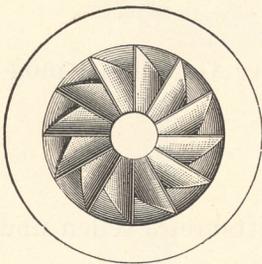


Fig. 42. Grundriß

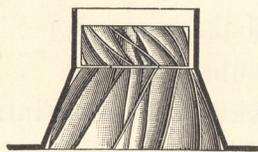


Fig. 43. Querschnitt der Henschel Jonvalturbine.

Reaktionsturbinen wirken in der durch die Figuren 40 und 41 veranschaulichten Weise, und zwar handelt es sich in dem gezeichneten Schema um die Fourneyronturbine, eine radiale Reaktionsturbine mit innerer Beaufschlagung. Zwischen Ober- und Unterwasser besteht durch das Druckrohr 1 eine geschlossene Leitung. 2 ist der Leitapparat; das Laufrad 3 rotiert im Unterwasser ohne Beeinträchtigung des Nutzeffekts, was ein besonderer Vorzug aller Reaktionsturbinen ist.

Henschel-Jonvalturbine. Bei dieser axialen Reaktionsturbine sind Leit- und Laufrad durch schraubenförmig gekrümmte Schaufeln in Zellen geteilt (Fig. 42 und 43), wobei natürlich wieder die Richtung der Schaufeln im Laufrad derjenigen im Leitrad entgegengesetzt ist. Fig. 44 zeigt einen Schnitt durch eine Henschel-Jonvalturbine für kleinere Gefälle. Das Leitrad 1 ist über dem Laufrade 2 angeordnet; letzteres sitzt auf der Turbinenwelle 3. Diese stützt sich mit ihrem Spurzapfen auf eine in das Abflußrohr 6 eingebaute Querstange 4 und hängt drehbar im Oberwasserzapfen 5. Das Wasser gelangt, nachdem es Leit- und Laufrad passiert hat, durch das Abflußrohr (Saugrohr) 6 in das Unterwasser. Das Saugrohr ist zur Abstellung und Regelung der Turbine unten

mit einer sogenannten Ringschütze 7 versehen, d. h. einem den Umfang des Saugrohres umgebenden Ring, der durch Stangen 8 und Windwerk gehoben und gesenkt werden kann, wonach sich die Abflußmöglichkeit vom Saugrohr nach dem Unterwasser richtet.

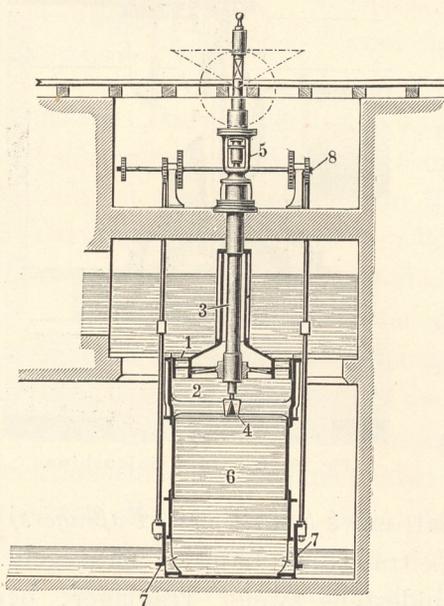


Fig. 44. Henschel-Jonvalturbine.

mit einer sogenannten Ringschütze 7 versehen, d. h. einem den Umfang des Saugrohres umgebenden Ring, der durch Stangen 8 und Windwerk gehoben und gesenkt werden kann, wonach sich die Abflußmöglichkeit vom Saugrohr nach dem Unterwasser richtet.

Jonvalturbinen können ebenso wie Fourneyronturbinen auch so ausgeführt werden, daß das Wasser von unten zugeführt wird und oben abströmt. In diesem Falle liegt natürlich das

Leitrad unten und das Laufrad oben, und zwar letzteres gewöhnlich in der Höhe des Unterwasserspiegels, während das Zuführungsrohr weiter abwärts geführt werden muß.

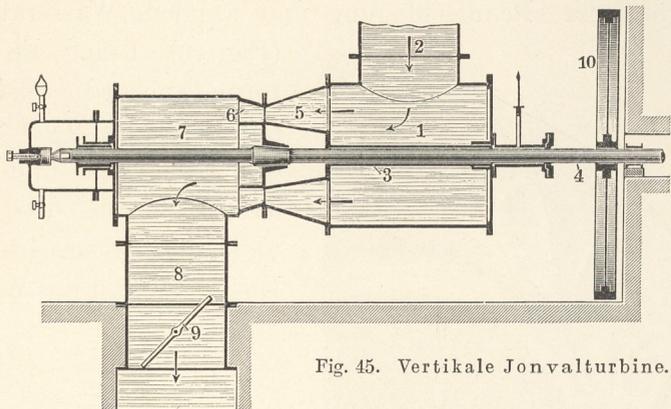


Fig. 45. Vertikale Jonvalturbine.

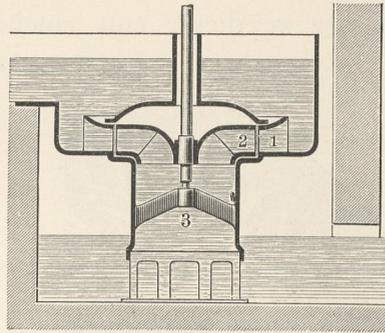


Fig. 46. Schnitt durch eine Francisturbine mit Saugrohr.

Weiter lassen sich Jonvalturbinen auch als vertikale Turbinen ausführen, also mit waagrecht gelagerter Welle (Fig. 45). Das Wasser fließt dem Turbinenkessel 1 durch Rohr 2 zu.

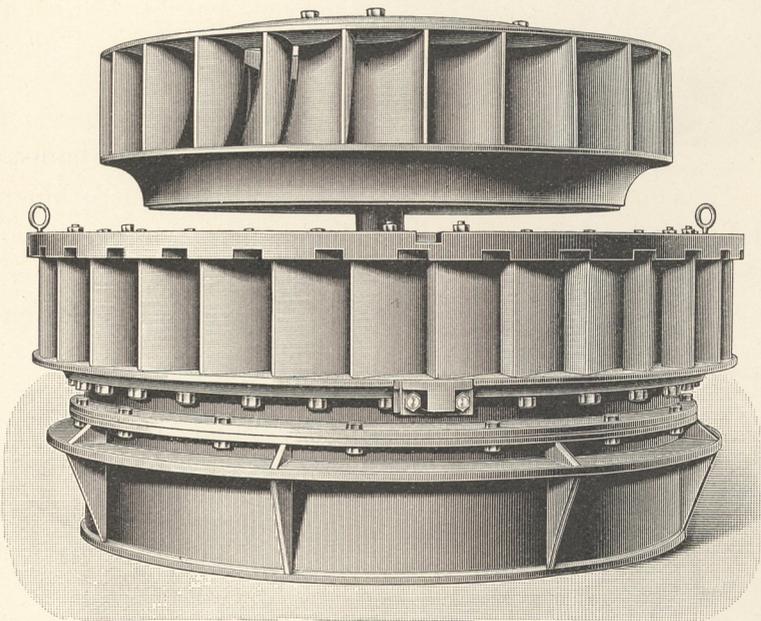


Fig. 47. Leitapparat und Laufrad einer Francisturbine von Ganz & Co., Budapest.

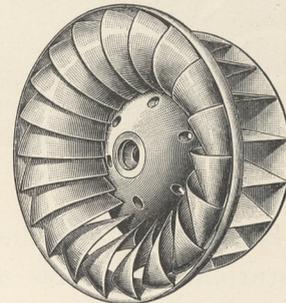


Fig. 48. Laufrad einer Francisturbine. Unterseite - Vorderansicht, Schnellläuferrad von Briegleb, Hansen & Co.

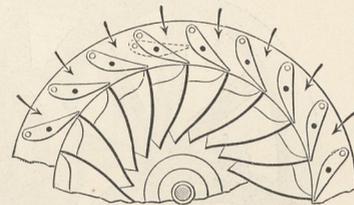


Fig. 49. Francisturbine mit Regulierung durch drehbare Leitschaufeln nach Fink.

1 ist nach außen mit einem Deckel abgeschlossen, durch dessen Stopfbüchse die Turbinenwelle 4 hindurchgeht. Das Wasser gelangt durch das Leitrad 5 in das Laufrad 6 und strömt durch den Kessel 7 und das Rohr 8 ab. Auch durch Kessel 7, der ebenfalls mittels Deckels abgeschlossen ist, reicht die Turbinenwelle 4 hindurch. Damit kein Wasser zwischen Kranz und Nabe des Leitrades 5 austreten kann, ist die Welle innerhalb des

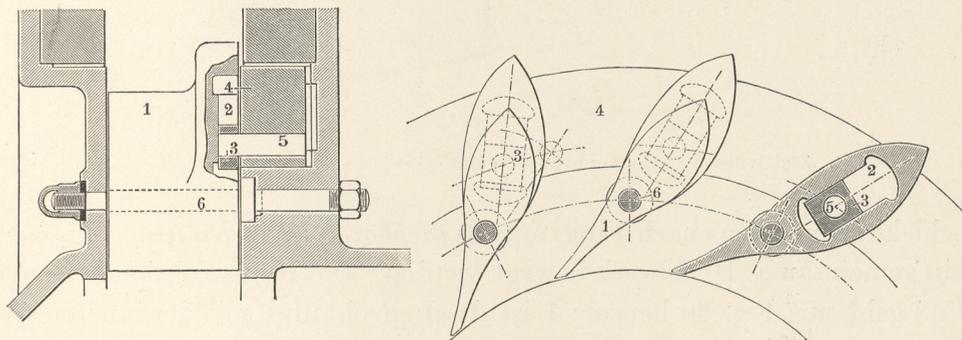


Fig. 50. Drehschaufelkonstruktion.

Kessels 1 von einer Schutzhülse 3 umgeben. Im Abflußrohr 8 ist eine Drosselklappe 9 angeordnet, durch deren Stellung der Wasserzufluß geregelt wird. Die auf die Turbinenwelle 4 aufgekeilte Riemenscheibe 10 dient zur Kraftübertragung. — Die große Einfachheit und leichte Zugänglichkeit

der Jonvalturbine hat dieser Konstruktion eine große Verbreitung verschafft; trotzdem ist sie neuerdings durch die Francisturbine zurückgedrängt worden.

Francisturbine. Diese ist, wie die Fourneyronturbine, eine radiale Reaktionsturbine, jedoch im Gegensatz zu dieser eine solche mit äußerer Beaufschlagung und axialem Wasseraustritt

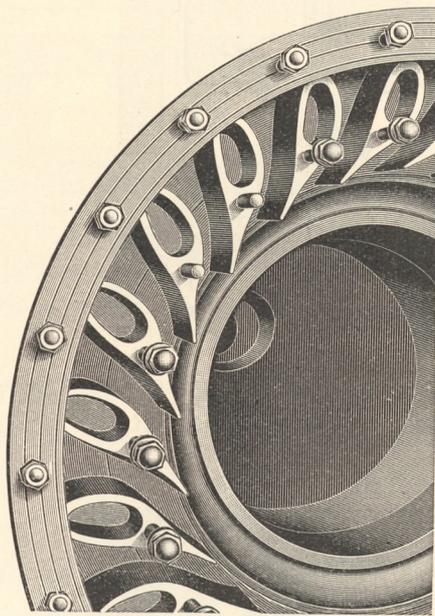


Fig. 51. Drehschaufeln, offen.

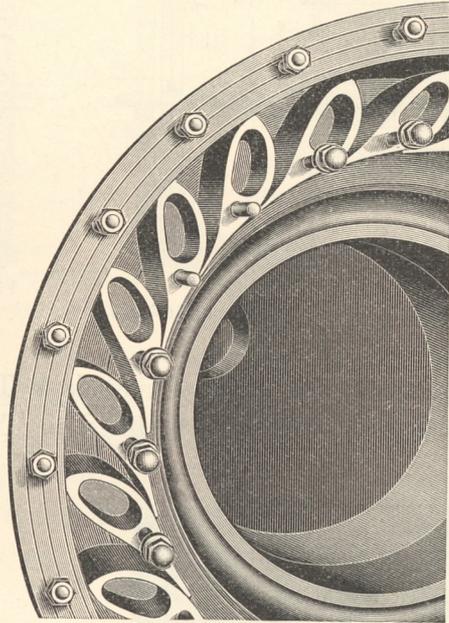


Fig. 52. Drehschaufeln, geschlossen.

(Fig. 46): 1 sind die kreisförmig angeordneten Zellen des Leitrades, 2 die Zellen des Laufrades, und 3 ist das Saugrohr, das Ober- und Unterwasser verbindet. Ein freier Fall des Wassers



Fig. 53. Francisturbine mit Regulierung durch zwischengelegten Schaufelring nach Zedel.

findet also in dieser Turbine, wie überhaupt in allen Reaktionsturbinen, an keiner Stelle statt, und die Leit- und Laufradzellen sind vollständig mit Wasser gefüllt. Die Francisturbine wurde bis zu Ende des verflossenen Jahrhunderts wenig beachtet, ist aber in-

zwischen an die erste Stelle gerückt.

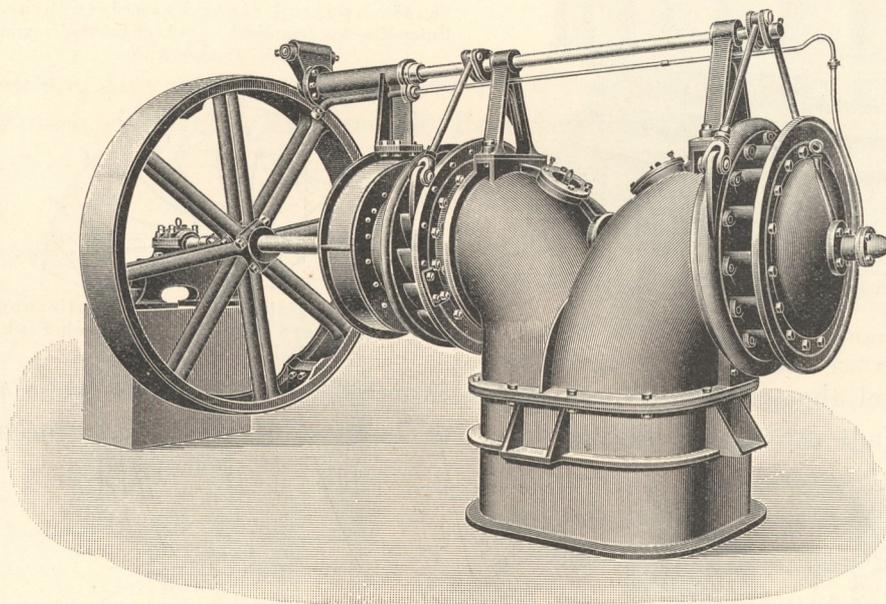


Fig. 54. Zwilling-Francisturbine von Briegleb, Hansen & Co., Gotha.

Fig. 47 zeigt oben das Laufrad und darunter den Leitapparat einer Francisturbine von 210 Pferdestärken Leistung, in der Ausführung von Ganz & Co., Budapest. Die Laufräder erhalten verschiedene Schauffelformen, je nach der gewünschten Umdrehungsgeschwindigkeit. So stellt Fig. 48 ein Schnellläuferrad (Bauart Briegleb, Hansen & Co., Gotha) dar.

Sehr wichtig ist die weitgehende Regulierbarkeit der Francisturbine, und zwar geschieht sie meistens nach Fink mittels drehbarer Leitschaufeln (Fig. 49), die alle gleichzeitig durch ein gemeinsames Hebelwerk bewegt werden. Die Konstruktion der Drehschaufeln (Bauart Ganz & Co.) geht aus Fig. 50 hervor: 1 ist die Leitschaufel mit der inneren Aushöhlung 2, in welcher der Backen 3 geführt ist. In den gemeinsamen Regulierring 4 sind Stifte 5 eingesetzt, auf denen die Leitschaufeln mit Hilfe der Backen 3 gelagert sind, während den Drehpunkt der Leitschaufeln der fixierte Bolzen 6 bildet. Durch die Bewegung des Regulierringes drehen sich sämtliche Leitschaufeln, bis sie in die Schlußstellung gelangen. Fig. 51 zeigt die Drehschaufeln des Leitrades einer Francisturbine offen, Fig. 52 geschlossen.

Eine andere Art der Regulierung bei Francisturbinen besteht in einer Anordnung von Zodel (Fig. 53): zwischen Leitrad und Laufrad ist ein mit feststehenden Schaufeln versehener Ring angeordnet, der je nach der Stellung seiner Schaufeln zu denen des Leitrades eine weitere oder engere Öffnung der Kanäle bewirkt. Zur Herstellung einer guten Wasserführung gehen dünne Stahlzungen von den Leitradschauflern aus durch die Öffnungen des Regulierendes hindurch bis dicht an die Schaufeln des Laufrades. — Außerdem benutzt man zur Regelung der Reaktions-turbinen das Mittel, eine Reihe aufeinanderfolgender Leitkanäle durch Schieber abzusperren.

Der Nutzeffekt der Francisturbine beträgt mindestens 80 Proz. und reicht bis 86 Proz. hinauf. Von diesem günstigen Wirkungsgrad geht auch bei kleinerer Beaufschlagung nicht viel verloren; so sinkt der Nutzeffekt z. B. bei halber Wassermenge auf 79 Proz., beträgt bei 0,4 Beaufschlagung noch 75 Proz. und bei 0,3 noch 70 Proz. Die Francisturbine ist unempfindlicher als alle anderen Turbinenarten gegen Höhenänderungen des Wasser-spiegels; gewöhnlich setzt man sie so hoch wie möglich über das Unterwasser, damit die Turbine jederzeit leicht nachgesehen werden kann.

Als Horizontalturbine, also mit stehender Welle, wird die Francisturbine für Gefälle von 0,75—5 m gebaut. Darüber hinaus konstruiert man sie als Vertikalturbine, und dies ist überhaupt

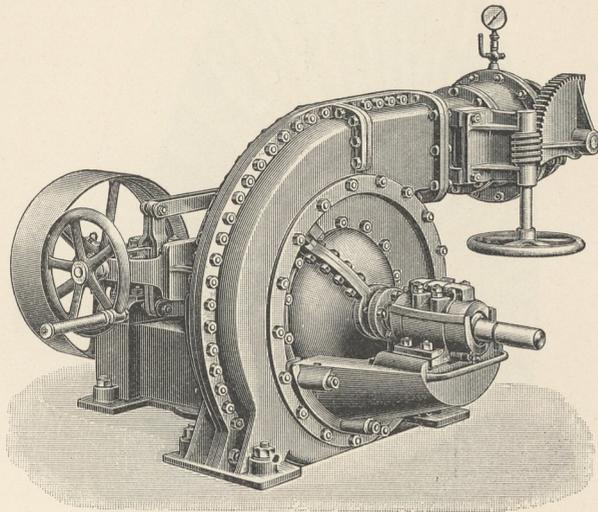


Fig. 55. Francisturbine mit Spiralgehäuse.

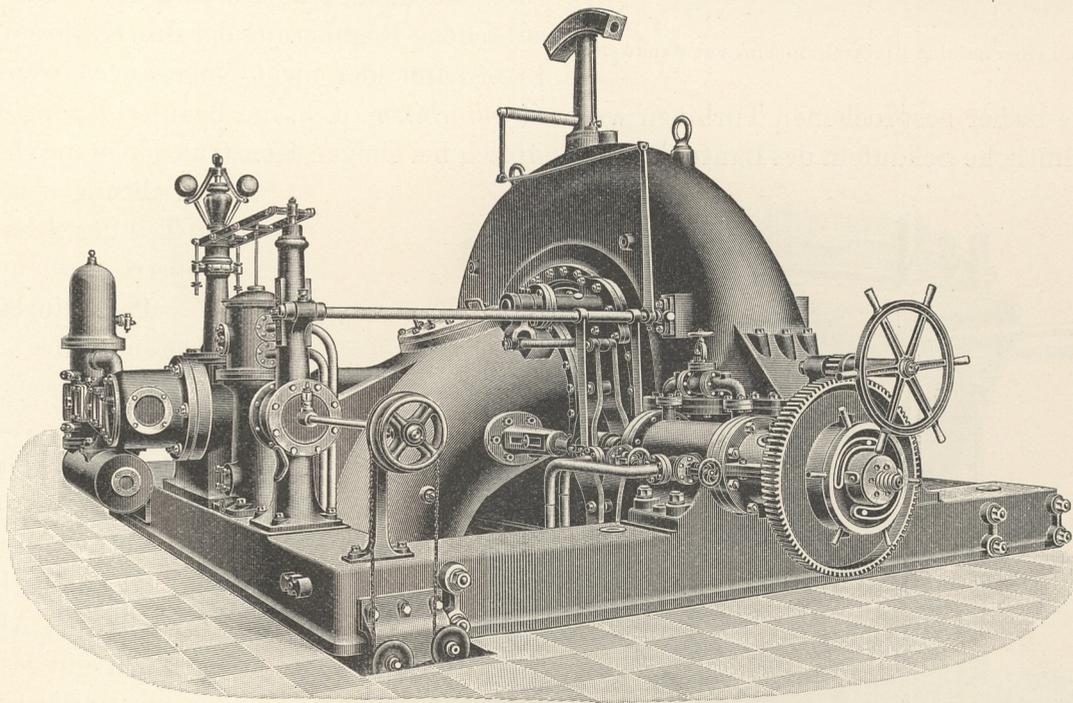


Fig. 56. 2200 PS-Spiral-Francisturbine von Ganz & Co.

die üblichste Anordnung für Francisturbinen. Fig. 54 zeigt eine Francisturbine in stehender Anordnung, wobei also das Saugrohr im rechten Winkel gekrümmt sein muß. Die dargestellte Turbine ist jedoch keine einfache, sondern eine *Zwillingsturbine*, die für den Einbau im offenen Schacht bestimmt ist; es sitzen dabei zwei Turbinen auf derselben Welle. Die sogenannten *Doppelturbinen* unterscheiden sich von den *Zwillingsturbinen* dadurch, daß sie zwar auch auf die gleiche Welle wirken, aber in zwei getrennten Schächten aufzustellen sind.

Spiralturbine. Wenn das Gefälle höher ist als 10 m und offene Turbinenschächte zu schwierig

in der Herstellung und zu teuer werden, umgibt man die Francisturbine mit einem Spiralgehäuse und macht sie dadurch zur *Spiralturbine*, die ebenfalls ein vertikales Laufrad hat. Fig. 55 zeigt

eine kleinere derartige Turbine, Fig. 56 eine große für 2200 Pferdestärken Leistung, wie sie von der Firma Ganz & Co. in Budapest für die Zentrale Morbegno gebaut worden ist. Letztere Figur zeigt auch die automatischen Reguliervorrichtungen, auf die wir noch zurückkommen.

Derartigen Hochdruck-Spiralturbinen wird das Wasser nicht mehr durch offene Kanäle, sondern durch geschlossene eiserne Rohrleitungen (vgl. Fig. 71, S. 35) zugeführt. — Alle Turbinen mit Druck- oder Saugrohr bezeichnet man als *Rohrturbinen*.

Vielfach werden *mehrkränzige* Turbinen benutzt; so zeigt Fig. 57 das Laufrad und Fig. 58 das Leitrad einer axialen Dreikranzturbine von Ganz & Co. Derartige mehrkränzige Turbinen eignen sich zur Ausnutzung großer Wassermengen bei kleinem Gefälle. So leistet die dargestellte Turbine bei 1,5 m Gefälle und 20 cbm Wasser in der Sekunde 300 Pferdestärken, und zwar bei nur 27 Umdrehungen in der Minute. Das Laufrad hat über 4 m Durchmesser. Auf die verschiedene Regulierung der drei Kränze dieser Turbine kann hier nicht eingegangen werden.

Alle bisher besprochenen Turbinen waren *Vollturbinen*, d. h. die Beaufschlagung erstreckte sich auf sämtliche Schaufeln des Laufrades, wengleich bei einigen Konstruktionen durch Regulier-

vorrichtungen nach Bedarf ein Teil der Schaufeln abgesperrt werden kann.

Partialturbinen im engeren Sinne sind horizontale oder vertikale Wasserräder, bei denen der Leitapparat überhaupt nur einen Teil des Laufrades beherrscht. Sämtliche Partialturbinen gehören zu den Aktionsturbinen, da eine geschlossene Leitung zwischen Ober- und Unterwasser nicht vorhanden ist.

Schwamkrugturbine. Diese ist eine Partialturbine (Fig. 59 und 60) mit

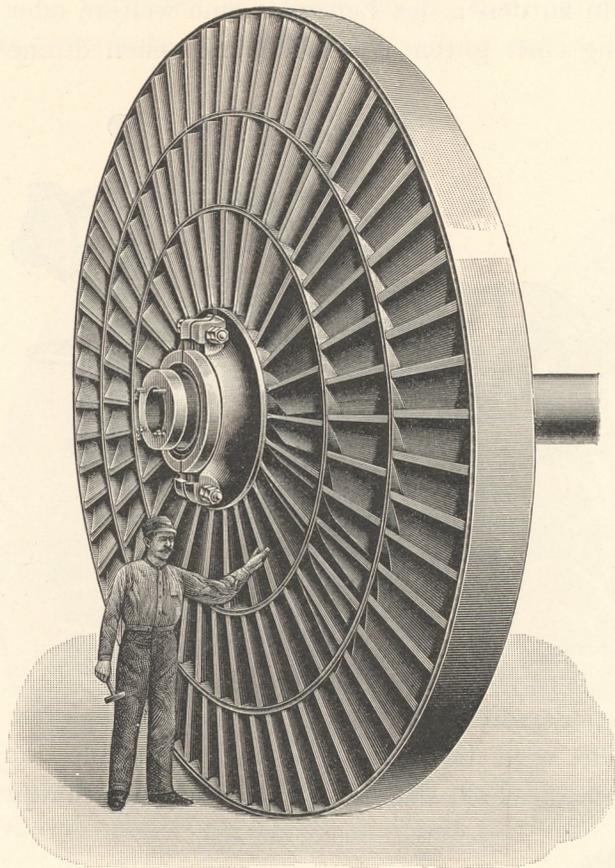


Fig. 57. Laufrad einer axialen Dreikranzturbine von Ganz & Co.

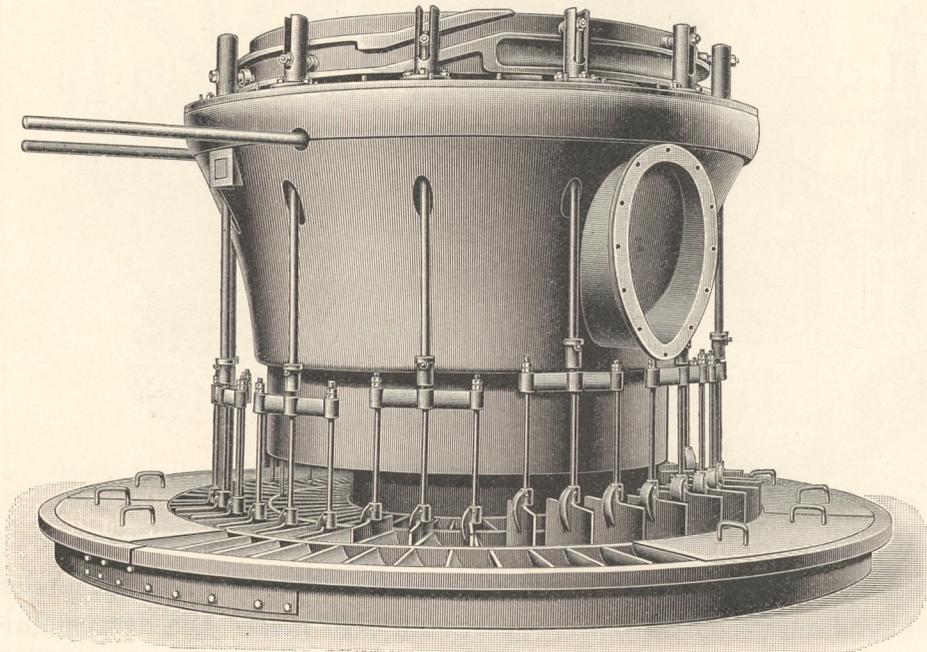


Fig. 58. Leitrad einer axialen Dreikranzturbine von Ganz & Co.

großem vertikalem Rad; der ins Laufradinnere führende Leitapparat hat fünf Einlaßkanäle, die durch einen Schieber ganz oder teilweise abgesperrt werden können. Die Richtung des Wassers ist tangential zum Laufrade. Die Schaufeln des Laufrades erweitern sich nach der Austrittsseite

hin, und um einen möglichst schnellen Austritt des Wassers herbeizuführen, sind in den Seitenwänden Luftöffnungen angeordnet. Die äußere Ansicht einer Schwamkrugturbine der Maschinenfabrik Germania in Chemnitz gibt Fig. 61 wieder.

Zuppinger-Tangentialrad (Fig. 62 und 63). Bei dieser Partialturbine erfolgt der Wassereintritt ähnlich wie bei der Francisturbine durch einen tangential gestellten Leitapparat, und zwar besteht dieser entweder aus einem weiten Leitkanal (wie gezeichnet) oder aus mehreren engeren Leitkanälen, die durch einen Schieber ganz oder teilweise verdeckt werden können.

Endlich wird auch die *Girardturbine* vielfach als Partialturbine gebaut und findet als solche für viele Verhältnisse sogar vorzugsweise Verwendung.

Freistrahlturbinen. Eine eigenartige Stellung unter den Turbinen nimmt das *Peltonrad* ein, ja es gehört strenggenommen kaum vollständig zu den Turbinen, da es keine vom Wasser durchströmten Turbinenkanäle hat, sondern nur direkt beaufschlagte Schaufeln. Jedenfalls ist das Peltonrad, auch *Becherturbine* genannt, eine der wichtigsten Konstruktionen

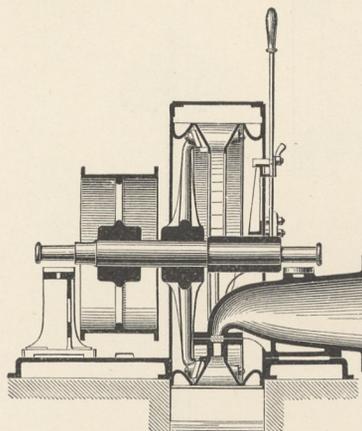


Fig. 59. Partialturbine nach Schwamkrug (Querschnitt).

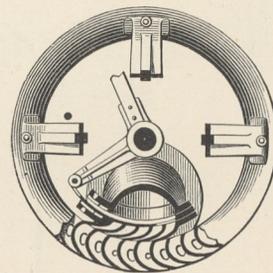


Fig. 60. Aufriß der Fig. 59.

geworden und behauptet unter der Bezeichnung *Freistrahlturbine* neben der Francisturbine siegreich das Feld. Für sehr hohe Gefälle wird es fast ausschließlich verwendet.

Das Peltonrad eignet sich namentlich für kleine Wassermengen bei hohem Gefälle, also für Verhältnisse, unter denen alle sonstigen Turbinen einen ungünstigen Wirkungsgrad haben. Man kann das Peltonrad zu den Partialturbinen zählen, d. h. es ist eine Druckturbine mit äußerer Beaufschlagung, und zwar erstreckt sich die Beaufschlagung nur auf wenige Schaufeln. Die Anordnung zeigt Fig. 64: Der Radkörper, der eine wagerechte Welle hat, ist am Umfang mit eigenartig geformten Schaufeln besetzt, gegen die an der tiefsten Stelle des Radumfangs aus einer konischen Düse ein Wasserstrahl geleitet wird. Die Stärke des Wasserstrahls ist durch eine Regulierspindel verstellbar. Die Schaufelform ist aus Fig. 65 zu erkennen, d. h. jede Schaufel wird durch eine scharfe Mittelrippe in zwei Hohlräume („Becher“) geteilt. Die Mittelrippe der Schaufeln teilt den Wasserstrahl und lenkt ihn um nahezu 180° nach beiden Schaufelseiten hin ab (Fig. 66). Hierbei versetzt der auf die Schaufelwandung ausgeübte Druck das Rad in Rotation. Man kann also jedes Peltonrad gewissermaßen als Turbine mit doppeltem Laufkranz ansehen, wenn man jede Schaufelhälfte, also jeden Becher (auch „Trog“ genannt), für sich als annähernd kreisförmig verlaufende Laufradschaufel betrachtet. Die Schaufeln bestehen aus polierter Bronze, um die Reibung möglichst gering zu halten. Fig. 67 stellt ein doppeltes Peltonrad (Zwillingturbine) der Firma Escher, Wyß & Co., Zürich, dar, und zwar geöffnet, so daß die Anordnung der Räder wie der Düsen gut erkennbar ist. Die abgebildete

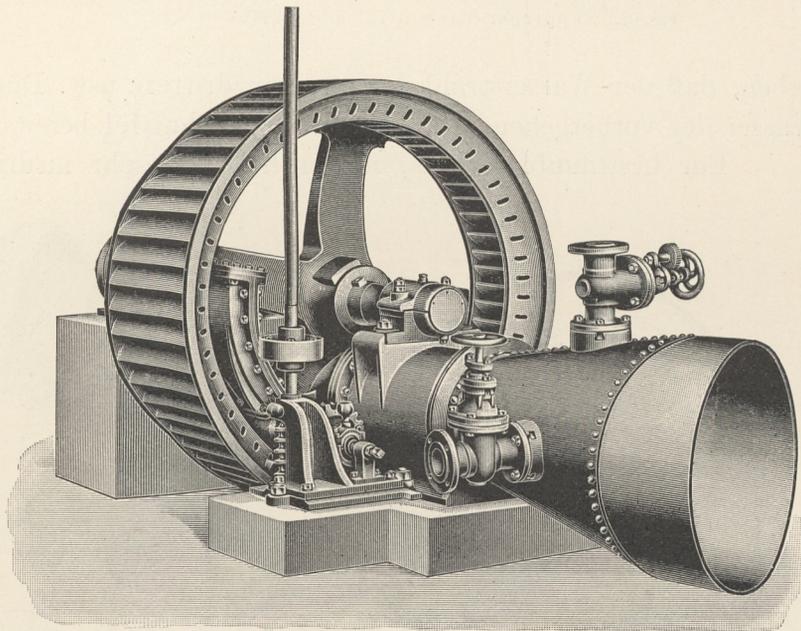


Fig. 61. Schwamkrugturbine der Maschinenfabrik Germania, Chemnitz.

abgebildete

Doppel-Freistrahlturbine leistet 4600 Pferdestärken bei 130 m Gefälle. Eine geschlossene Freistrahlturbine mit Druckregulierapparat derselben Firma ist in Fig. 68 dargestellt.

Das Peltonrad läßt sich mit mehreren Wasserstrahlen betreiben, wenn ein einziger nicht ausreicht. So zeigt Fig. 69 den Schnitt einer *Hochdruck-Freistrahlturbine* von Briegleb, Hansen & Co., die mit zwei von demselben Druckrohr ausgehenden Düsen ausgestattet ist. Auch drei oder vier Düsen läßt man bei Bedarf von einem Rohr ausgehen, nur müssen die einzelnen Düsen so viel Abstand voneinander

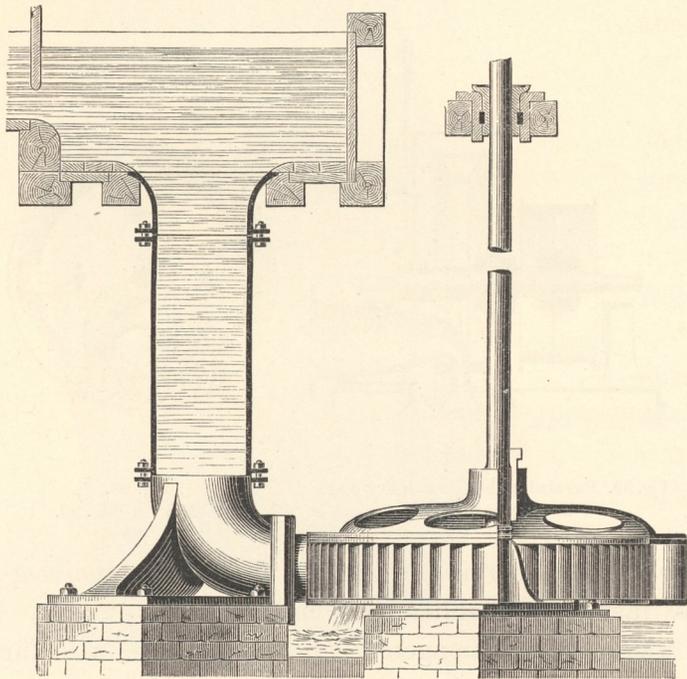


Fig. 62. Zuppinger-Tangentialrad (Aufriß).

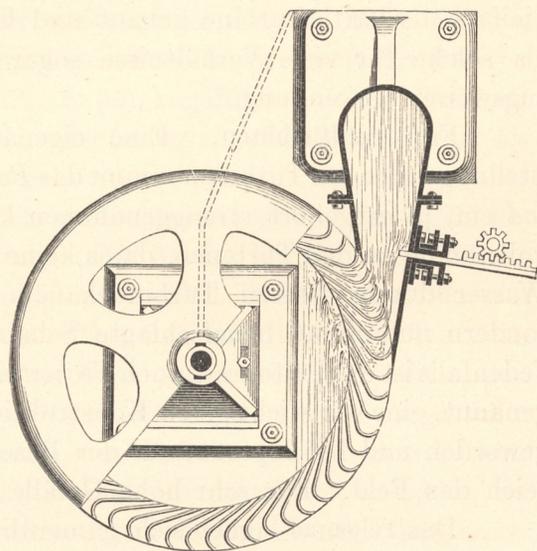


Fig. 63. Grundriß der Fig. 62.

haben, daß der Wasserstrahl der zweiten, dritten usw. Düse eine Schaufel erst trifft, wenn das Wasser der vorhergehenden Düse dieselbe Schaufel bereits wieder verlassen hat.

Für bestimmte Zwecke, namentlich für sehr niedrige Umdrehungszahlen, erhalten die

Freistrahlturbinen sehr große Durchmesser. So zeigt Fig. 70 eine Becherturbine von Ganz & Co. für 1600 Pferdestärken mit abgenommener Schutzhaube. Bei dieser für ein Walzwerk bestimmten Turbine ist, um Rädervorgelege zu vermeiden, das Schwungrad am Umfang direkt mit Bechern versehen. Das Rad hat 9 m Durchmesser und wiegt 90 000 kg; an Bechern sind 56 Stück auf dem äußeren Radkranz sattelartig befestigt. Die Rohrleitung hat 500 mm

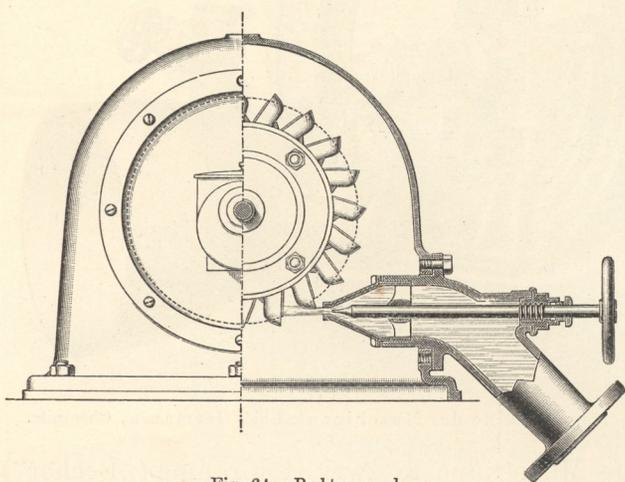


Fig. 64. Peltonrad.

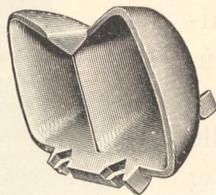


Fig. 65. Peltonbecher.

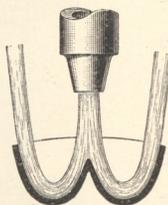


Fig. 66. Schaufel querschnitt.

Durchmesser; von ihr gehen vier Düsen von 60 mm Durchmesser aus.

Wie S. 30 erwähnt ist, muß man den Hochdruckturbinen das Wasser durch geschlossene Rohrleitungen zuführen. Derartige Rohre können oft eine gewaltige Länge erreichen. So zeigt Fig. 71 eine Ansicht der *Hochdruckleitungen*, welche Escher, Wyß & Co., Zürich, für die Kraftwerke Brusio in Campocologno (Graubünden) gebaut haben. Diese Kraftwerke entnehmen die Betriebskraft einem See und arbeiten mit 420 m Gefälle. Die Gesamtleistung beläuft sich auf 42 000 Pferdestärken, die teilweise durch Girard-Partialturbinen, teilweise durch Freistrahlräder

gewonnen werden. Die Druckrohre verbinden zwischen Hochreservoir und Maschinenhaus eine Strecke von 1086 m. Der lichte Durchmesser der flußeisernen Rohre bewegt sich zwischen 790 und 870 mm; die Wandstärke steigt, proportional zum Wasserdruck, von 6 auf 23 mm an.

Reguliorrichtungen haben den Zweck, bei geringeren abzugebenden Leistungen den

Wasserzufluß so weit herabzusetzen, daß die Umlaufzahl ungeändert bleibt. Zur Regelung der Aktionsturbinen sperrt man den Wassereintritt in die Leitkanäle mehr oder weniger ab, und zwar dienen dazu je nach dem axialen oder radialen Wassereintritt entweder flache oder zylindrische Schieber, Klappen oder Rollwände. Dagegen sind Drosselklappe, Einlauf- oder Auslaufschütze weniger vorteilhaft, namentlich für

Reaktionsturbinen, werden aber wegen ihrer Einfachheit bei reichlichem Betriebswasser dann angewendet, wenn es nicht auf äußerste Ausnutzung des Wassers ankommt. Für Reaktionsturbinen empfiehlt es sich, eine Reihe unmittelbar aufeinanderfolgender Leitkanäle durch Schieber abzusperren, die Schieberstangen dabei aus Gasrohr zu fertigen und durch dieses einen Luftzutritt zu ermöglichen.

Durch gleichmäßige Verkleinerung sämtlicher Lauf- und Leitradkanäle lassen sich Reaktionsturbinen nicht vollkommen richtig regeln. Annähernd erreicht man den Zweck durch Anwendung mehrerer Schaufelkränze (vgl. S. 30, Fig. 57 und 58), von denen dann jeweils die unbenutzten durch ringförmige Deckel geschlossen werden. Die Regelung der Francisturbinen mittels drehbarer Leitschaufeln oder mittels zwischengelegten Ringes ist S. 28 und 29 behandelt.

Sehr wichtig geworden ist neuerdings die *selbsttätige Regulierung* der Turbinen, die man durch Zentrifugalregulatoren (vgl. Abteilung „Dampfkraftmaschinen“) besorgen läßt. Da aber das Verstellen von Schützen, Leitschaufeln usw. erhebliche Kraft erfordert, kann der Zentrifugalregulator nicht unmittelbar diese Verstellung besorgen. Dies geschieht vielmehr durch einen

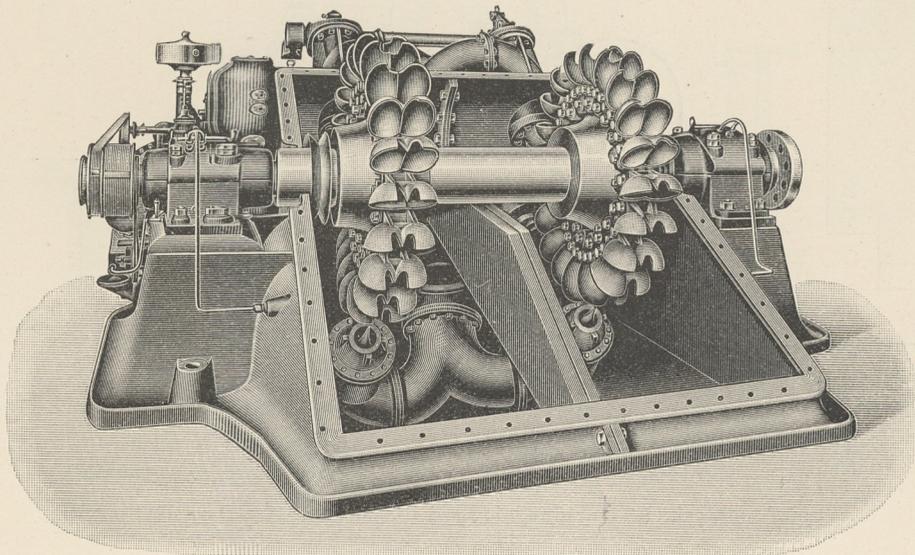


Fig. 67. Doppel-Freistrahlturbine von Escher, Wyß & Co., Zürich, geöffnet.

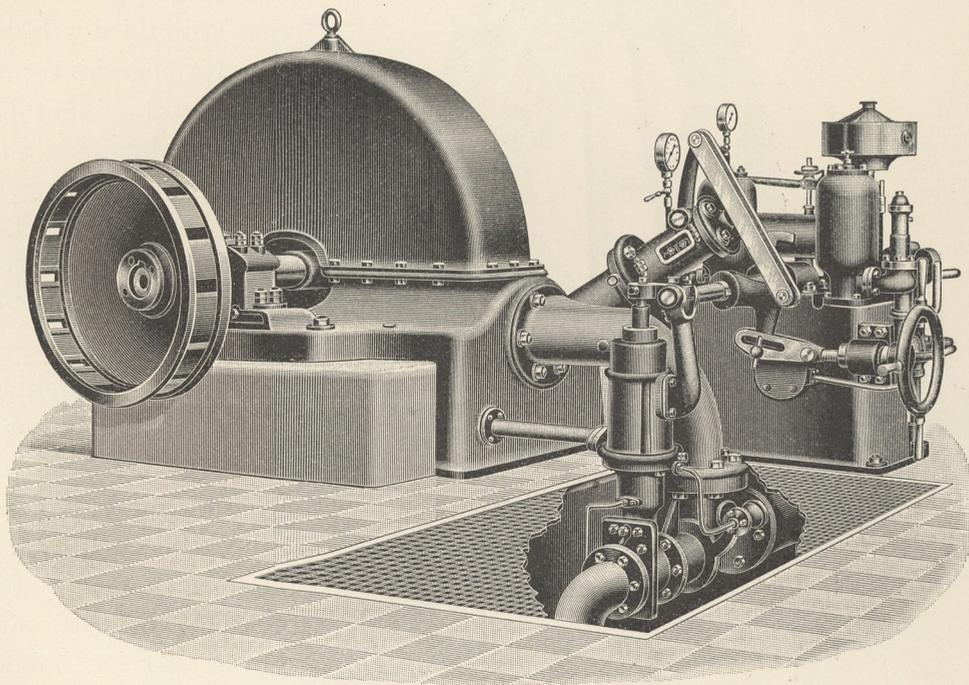


Fig. 68. Freistrahlturbine mit Druckregulierapparat von Escher, Wyß & Co., Zürich.

sogenannten *Servomotor* (Hilfsmotor), als welcher eine kleine Wassersäulenmaschine dient. Der Zentrifugalregulator hat dann nur die Aufgabe, den Servomotor zu steuern, und zwar wird der

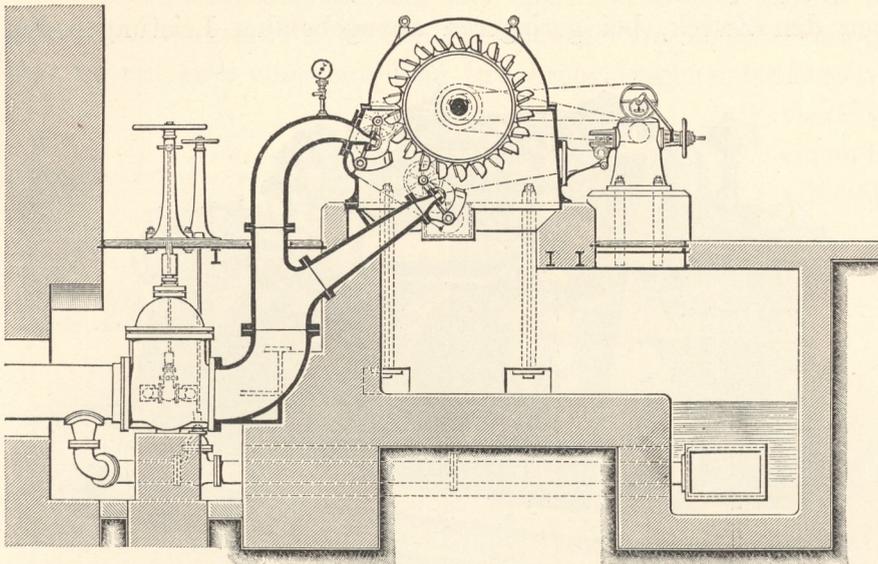


Fig. 69. Hochdruckfreistrahlturbine mit zwei Düsen von Briegleb, Hansen & Co.

durch den Regulator in Gang gesetzte Servomotor wieder abgestellt, sobald er die der Stellung des Regulators entsprechende Öffnung der Leit- zellen oder Schützen bewirkt hat. Die Wirkungsweise eines

hydraulisch-automatischen Turbinenreglers erklärt Fig. 72. Steigt die Umlaufzahl der Turbine über das ihrer Be- lastung entsprechende Maß, so hebt sich die Muffe 1 des Zentrifugalregulators 2 und dreht den Hebel 1, 3, 4 um 4. Der Hebel hebt den entlasteten Steuerkolbenschieber 5 des

Servomotors (Druckwassermotors), so daß Druckflüssigkeit in den hinteren Raum 6 seines Zylinders gelangt, dessen Kolben vorschiebt und die Regelwelle 7 so dreht, daß die Ausfluß- öffnungen des Leitrades der Turbine verengt werden. Mit der Regelwelle 7 dreht sich der

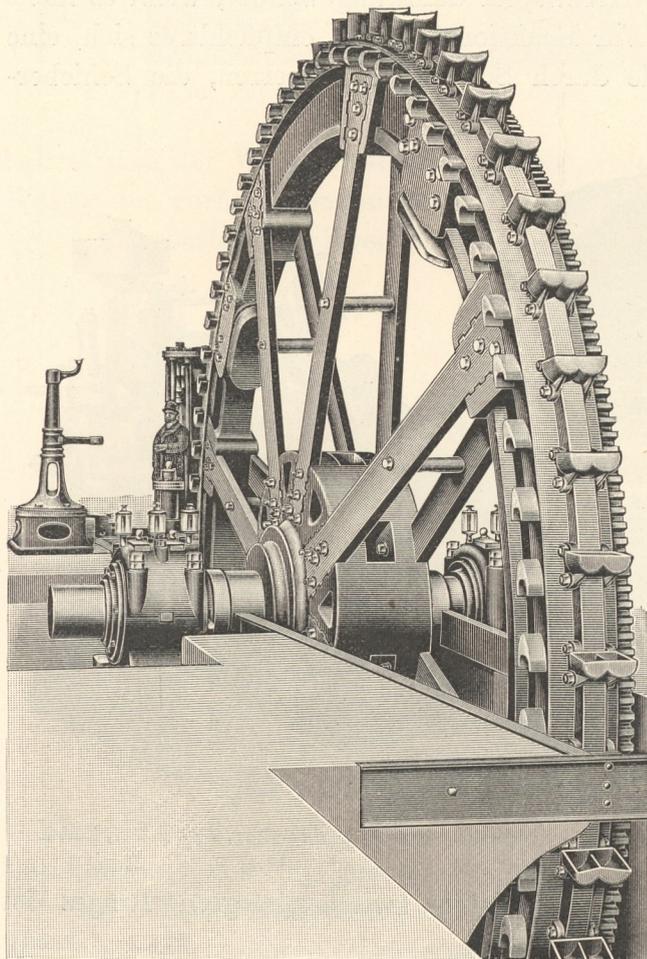


Fig. 70. 1600 PS-Becherturbine von Ganz & Co. bei abgenommener Schutzhaube.

Arm 8 und bewirkt die sogenannte Nach- oder Rückführung, indem er mittels der Stange 9 den Punkt 4 des Hebels 1, 3, 4 herabzieht, bis der Kolbenschieber 5 wieder in seine Mittel- stellung und damit der Hauptkolben zum Still- stande gekommen ist. Nun befinden sich die Gestängeteile 1, 3, 4 und 9, 8, 7 sowie die Drehschaufeln des Leitrades in derselben Stel- lung, als ob die Regelwelle 7 bei feststehendem Drehpunkte 3 direkt durch die Muffe 1 des Zentrifugalregulators 2 gedreht worden wäre. Sinkt die Umdrehungszahl der Turbine da- gegen unter das der Belastung entsprechende Maß, so geschieht die Rege- lung in gleicher Weise, aber in umgekehrtem Sinne. Das Ende 4 des Hebels 1, 3, 4 kann durch ein Handrad an der Stange 9 auf- und niedergeschraubt werden; in letzterem Falle wird der Servo- motor erst bei höherer Stellung der Muffe 1, also bei größerer Umdrehungszahl, abgestellt werden. Man kann mithin die Regelung auf bestimmte Umdrehungszahlen der Turbine ein- stellen. Ist bei größerem Durchmesser des Steuerkolbens dessen Reibung noch zu groß, um ihn direkt durch den Zentrifugalregulator

bewegen zu lassen, so wird noch eine zweite, indirekte Steuerung eingeschaltet, indem man den Steuerschieber des Hauptkolbens durch einen zweiten Arbeitskolben bewegt und nur diesen

kleinen sogenannten Zwischenkolben vom Zentrifugalregulator steuern läßt. Derartige Regulatoren werden in sehr verschiedenen Ausführungsformen gebaut, teilweise übrigens auch nach anderen Grundsätzen. Einen hydraulisch-automatischen Turbinenregler von Ganz & Co. gibt Fig. 73 wieder. —

Wie schon erwähnt ist, beherrschen Francisturbinen und Freistrahlturbinen fast allein das Feld, wobei der Nutzeffekt mindestens 80 Proz. beträgt und nicht selten bis auf 90 Proz. steigt.

Alle Turbinen, die über dem Unterwasser ausgießen, also sämtliche Aktionsturbinen, müssen, um eine möglichst große Wirkung mit der verfügbaren Wassermenge zu ergeben, am Fuße des Gefälles aufgestellt werden. Dagegen kann bei Rohrturbinen das Laufrad in beliebiger Höhe zwischen Ober- und Unterwasser liegen. Dabei macht man aus praktischen Gründen allerdings bei den Rohrturbinen die Saughöhe der unteren Rohrhälfte — vom Spalt zwischen Leit- und Laufrad aus gemessen — stets kleiner als die Druckhöhe der oberen Rohrhälfte, um das Nachsaugen sowie Wirbel- und Trichterbildung zu verhüten, die den Nutzeffekt herabsetzen.

Turbinen eignen sich für Gefälle von 0,3 bis über 500 m und werden für Tausende von Pferdestärken gebaut. Ihnen ist die Möglichkeit zu danken, die gewaltigen Wasserkräfte auszunutzen. Allein an den Niagarafällen werden heute schon mehr als 300 000 Pferdestärken durch Turbinen nutzbar gemacht, und doch ist dies noch nicht ein Zwanzigstel der ganzen in diesen gewaltigen Wasserfällen stecken-

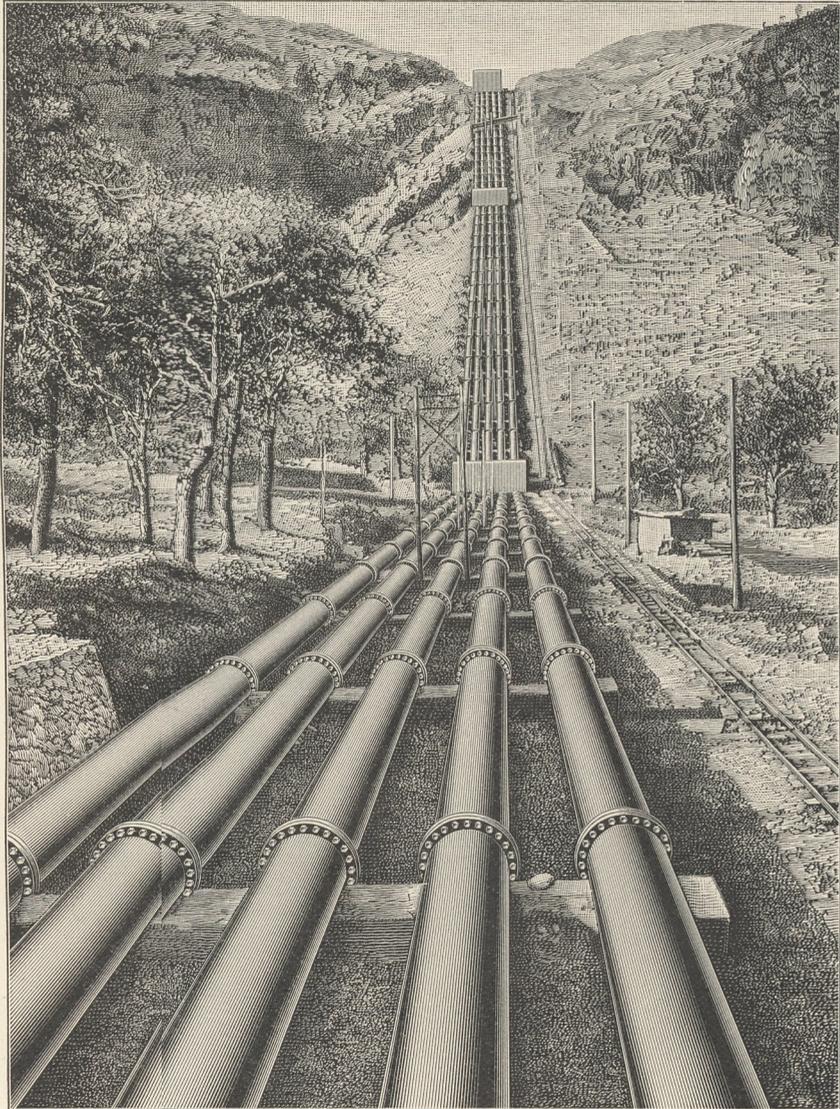


Fig. 71. Hochdruckrohrleitungen der Kraftwerke Brusio.

den Energie. Seitdem die Anlage der *Talsperren* sich mehrt, gelangt man auch zur Ausnutzung von Wasserkraften, die eine solche früher nicht ermöglichten oder doch nicht lohnten.

Eine *Talsperre*, auch *Staudamm* genannt, ist ein widerstandsfähiger Absperrdamm, der die Wassermengen eines oder mehrerer kleinerer Wasserläufe am Fortfließen hindert, also aufstaut. Man sperrt so ganze Täler ab und bildet in ihnen *Stauseen* (*Staubecken*). Nicht immer ist der Zweck dabei die motorische Ausnutzung der Wasserkraft, vielmehr ist diese Verwendungsart erst nach und nach wichtig geworden und wird es in Zukunft noch mehr werden. Man baut die meisten Talsperren zu dem Zwecke, die Wasserverhältnisse zu regulieren und Überschwemmungsgefahren seitens der Wildbäche usw. zu beseitigen. Das Niveau des angestauten Wassers ändert sich bei der großen Fläche, auf die es sich verteilt, unbeschadet des wechselnden Zuflusses nur wenig. So dienen die Staubecken vorzugsweise zur geregelten Bewässerung von

Ländereien. Zu diesen Verwendungsmöglichkeiten tritt nun, wie gesagt, die der motorischen Ausnutzung als sehr bedeutsam hinzu.

Die Staudämme können nur bei ganz kleinen Anlagen aus Erde bestehen, werden dagegen für größere Staumengen und Stauhöhen aus Steinen wasserdicht (mit Zement) gemauert.

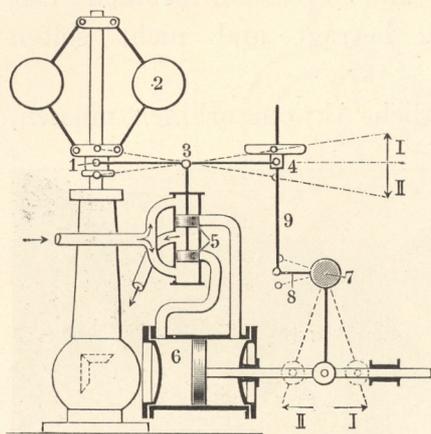


Fig. 72. Schema der hydraulischen Turbinenregulierung (I zu, II auf).

Die Stärke des Dammes muß dabei, entsprechend dem Wasserdruck, von oben nach unten zunehmen, so daß die Stärke des Dammes oben („Kronenbreite“) am geringsten, unten an der Sohle am größten ist. Unsorgfältig hergestellte Sperrwerke können unter dem ungeheuren Wasserdruck bersten und durch die plötzliche Entleerung des ganzen Staubeckens furchtbare Verwüstungen anrichten. So zerstörte der Bruch des Staudammes oberhalb Johnstown in Pennsylvanien 1889 ganze Stadtteile, wobei 4000 Menschen umkamen.

In neuester Zeit hat man, um die teuren Mauerwerksperren zu vermeiden, in Amerika Talsperren ganz aus Eisen hergestellt, und ferner solche aus Eisenbeton, jedoch bleiben die Erfahrungen abzuwarten.

In den letzten 20 Jahren sind in Deutschland etwa 25 Talsperren mit insgesamt 120 Millionen cbm Inhalt und einem Kostenaufwand von 30 Mill. Mark erbaut worden; weitere 15 Sperren mit 400 Millionen cbm Inhalt sind im Bau.

Die größte Talsperre Europas wird die *Edertalsperre* in Waldeck, deren Staubecken bei 25 km Länge und 2 km Breite 300 Millionen cbm Wasser faßt. Übrigens hat das Ausland noch erheblich größere Sperren, namentlich

Amerika sowie Afrika (Staudamm des Nils bei Assuan).

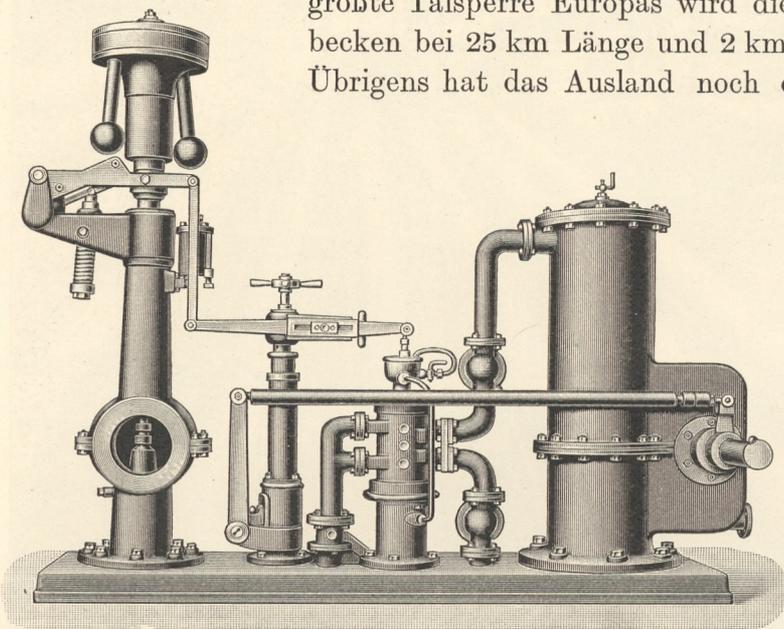


Fig. 73. Hydraulisch-automatischer Turbinenregler von Ganz & Co.

Die motorische Ausnutzung des in den Talsperren angestauten Wassers rückt gegenüber den sonstigen Verwendungszwecken immer mehr in den Vordergrund. Freilich ist die nutzbringende Verwertung der Wasserkräfte erst möglich geworden durch die Leichtigkeit der *elektrischen Kraftübertragung* (vgl. Abteilung „Elektrotechnik“). In erschreckender Weise wächst der Verbrauch an Kohle, und sorgenvoll muß man für eine nicht zu ferne Zukunft den Tag prophezeien,

wo die Kohlenschätze der Erde, soweit sie dem Abbau zugänglich sind, versiegen. Dieser schweren Sorge gegenüber muß die möglichst weitgehende Ausnutzung der Wasserkräfte eine Hauptaufgabe der modernen Technik bilden, und ihr gegenüber verdienen die Stimmen, die des Natureindrucks wegen jeden Wasserfall ungebündigt sehen möchten, keine Beachtung.