

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

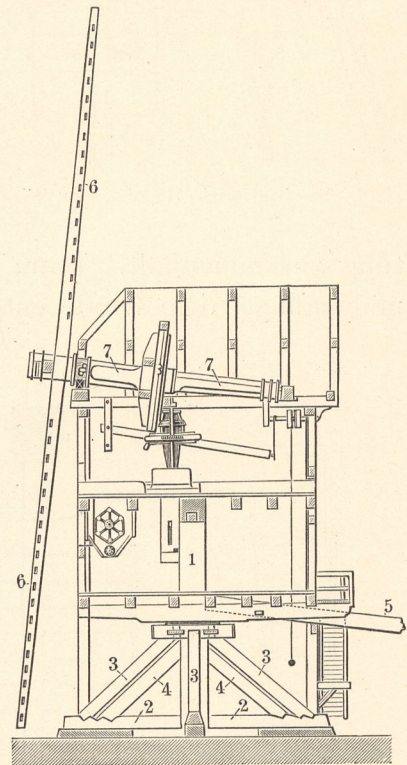


Fig. 1. Bockwindmühle.



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

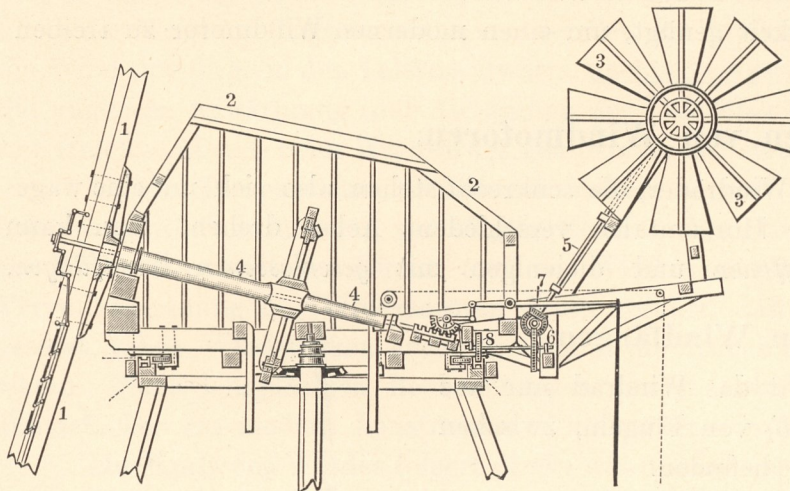


Fig. 2. Dach einer holländischen Windmühle mit selbsttätiger Einstellung.

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 Reguliervorrichtungen 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 Reguliervorrichtung, 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  $90^\circ$  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.

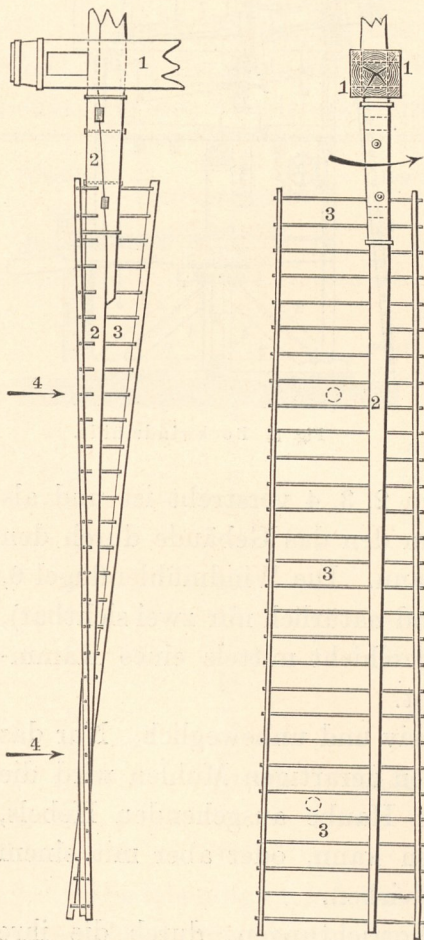


Fig. 3 und 4. Windmühlenflügel (Fig. 3 Seitenansicht, Fig. 4 Vorderansicht).

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

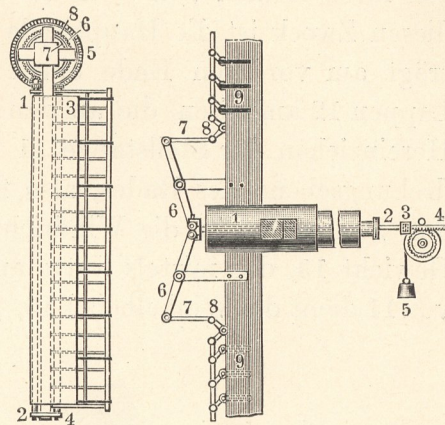


Fig. 5. Veränderung der Flügelbedeckung.  
Fig. 6. Regulierung mit Windtüren.

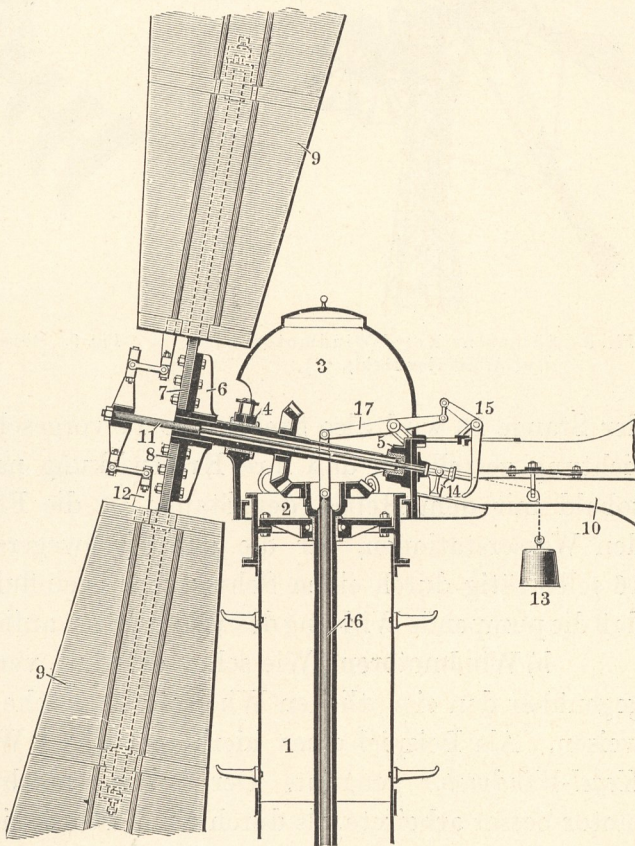


Fig. 7. Kirchwegersches Windrad.

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

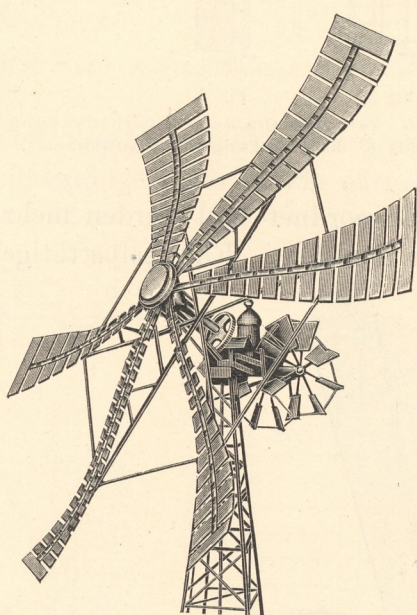


Fig. 8. Sörensens Kegel-Windmotor  
(zur Arbeit eingerückt).

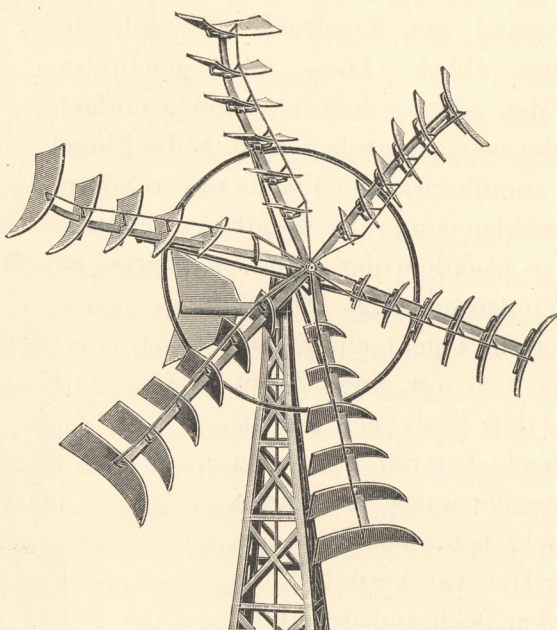


Fig. 9. Sörensens Kegel-Windmotor  
(ausgerückt).

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.

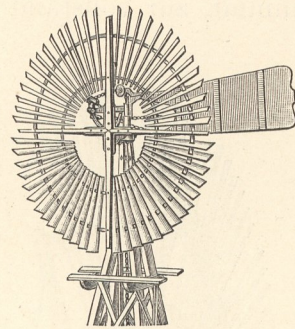


Fig. 10. Windrad mit festen Flächen.

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 auffangen, direkt in der Richtung

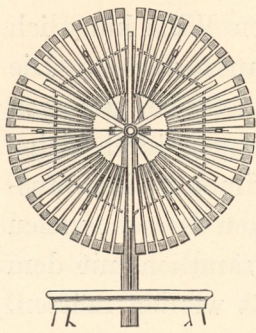


Fig. 11.

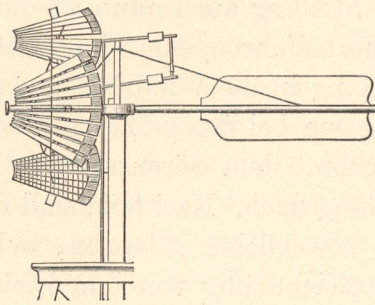


Fig. 12.

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.

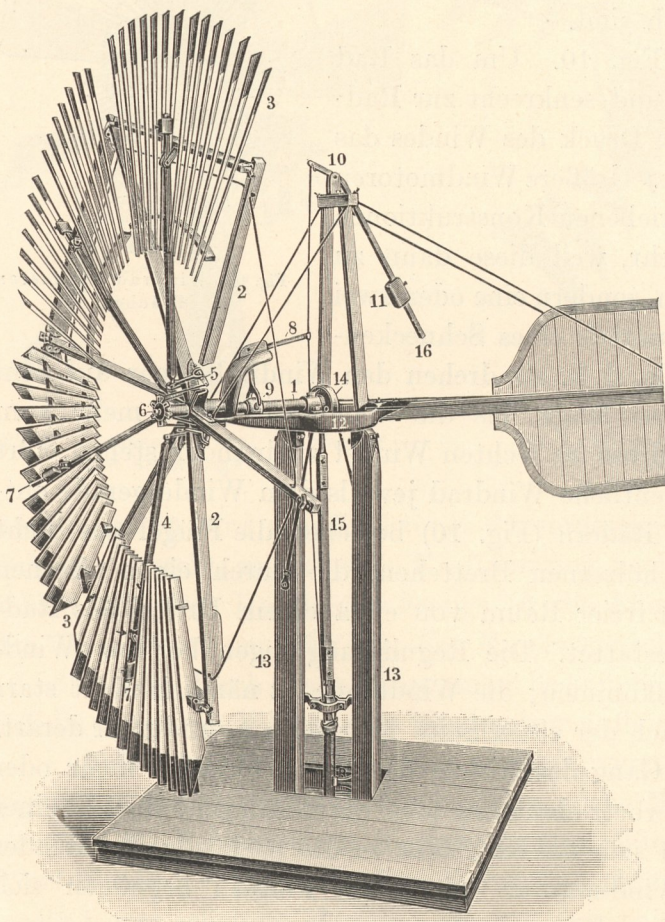


Fig. 13. Halladayrad von Adolf Pieper, Mörs a. Rh.

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

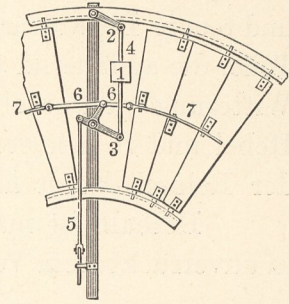


Fig. 14. Flügelbewegung der Reinsch-Windräder.

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).

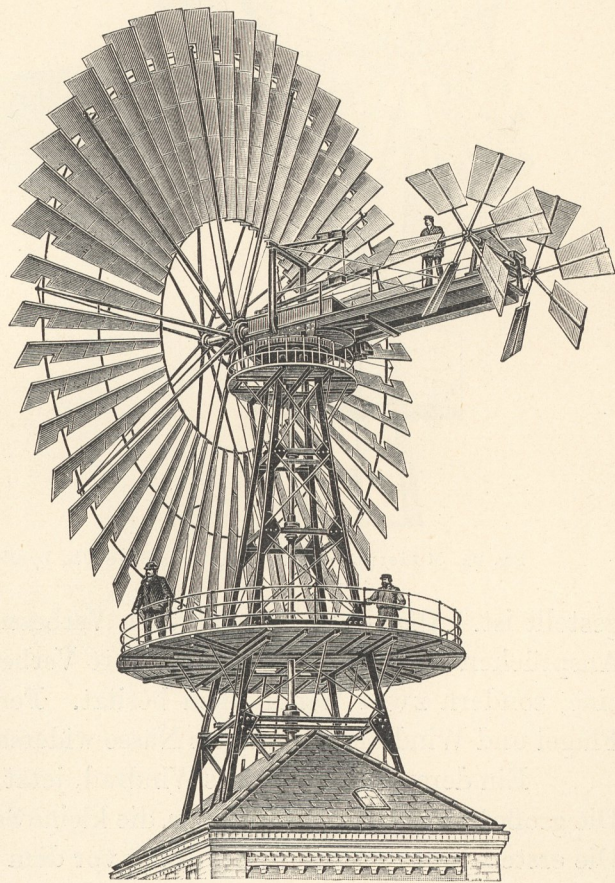


Fig. 15. Windrad mit beweglichen Flügeln von Reinsch.

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



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-

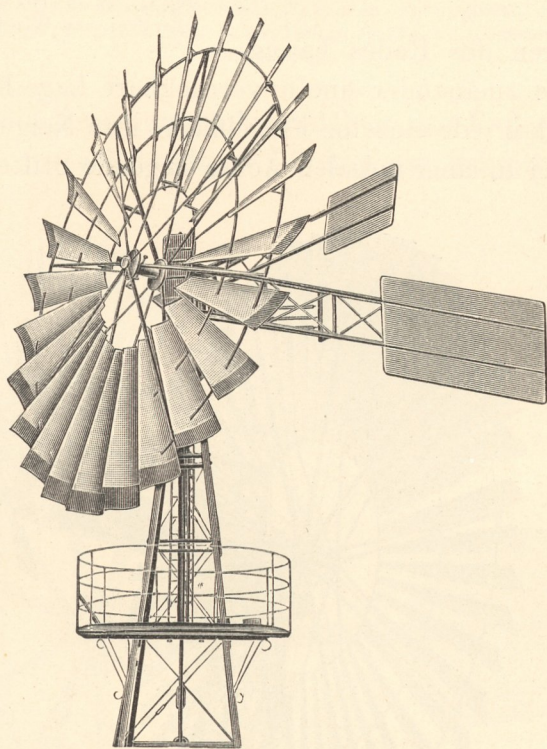


Fig. 16. Moderne Windturbine von Reinsch, Dresden.

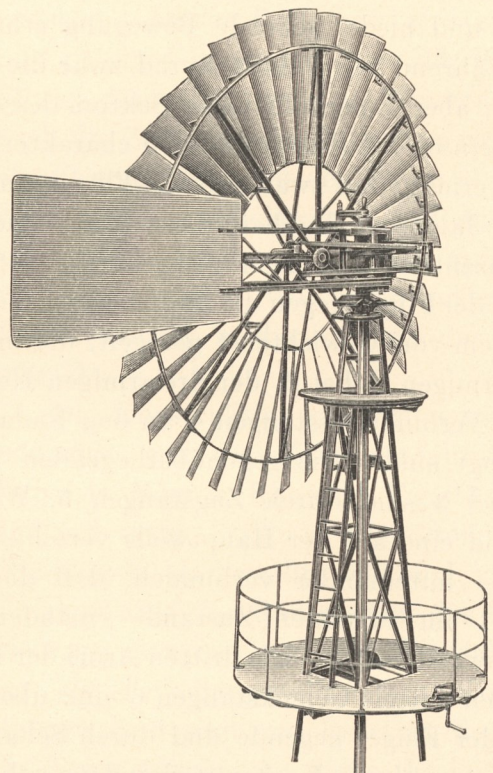


Fig. 17. Windturbine, ausgerückt.

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

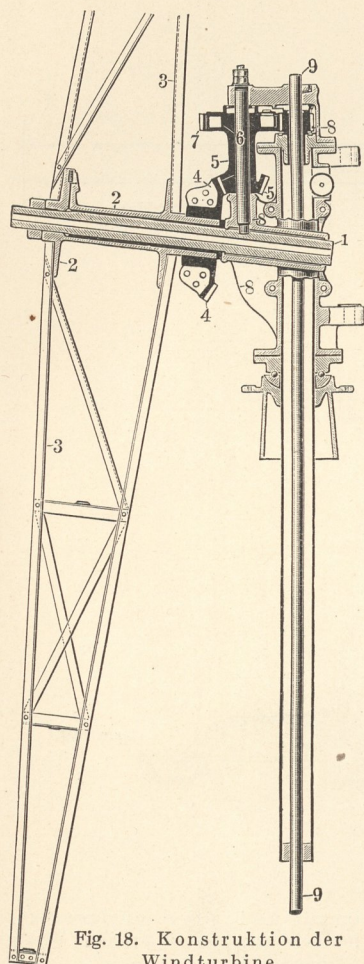


Fig. 18. Konstruktion der Windturbine.



Fig. 19. Motorkörper der Windturbine.

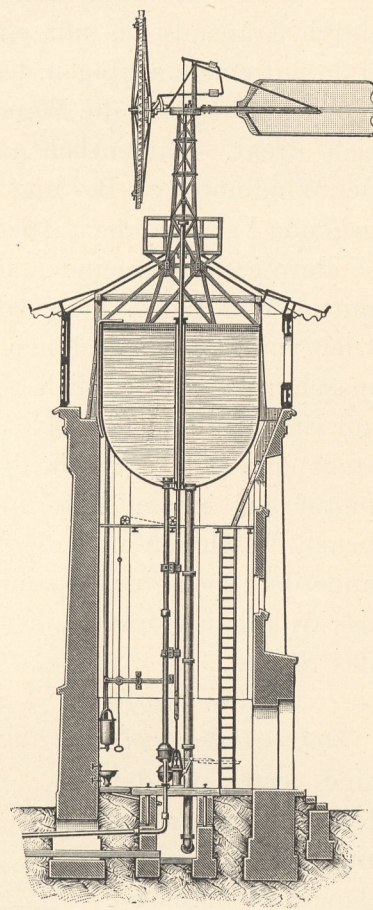


Fig. 19a. Bahnhofsreservoir mit Wasserförderung durch Windrad.

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 antreibt<sup>1</sup>. 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

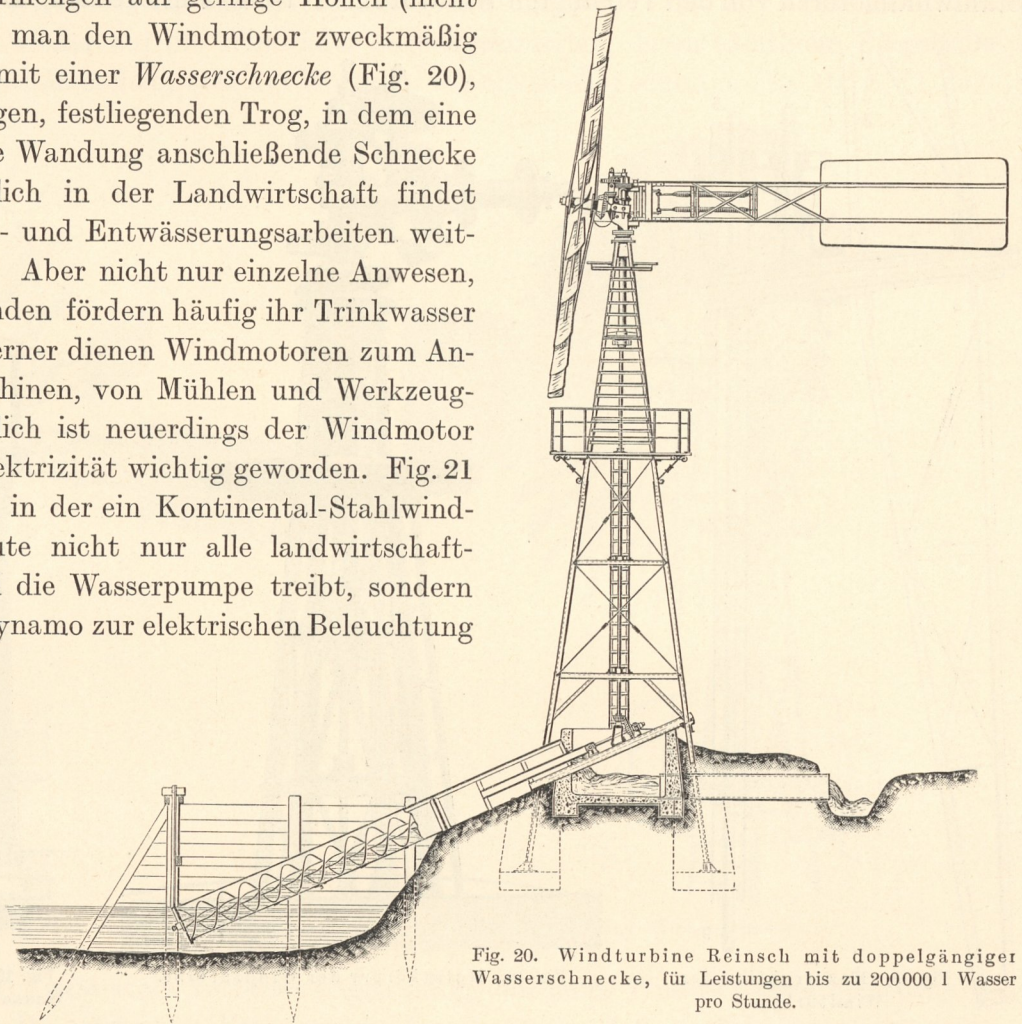


Fig. 20. Windturbine Reinsch mit doppelgängiger Wasserschnecke, für Leistungen bis zu 200000 l Wasser pro Stunde.

<sup>1</sup> 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).

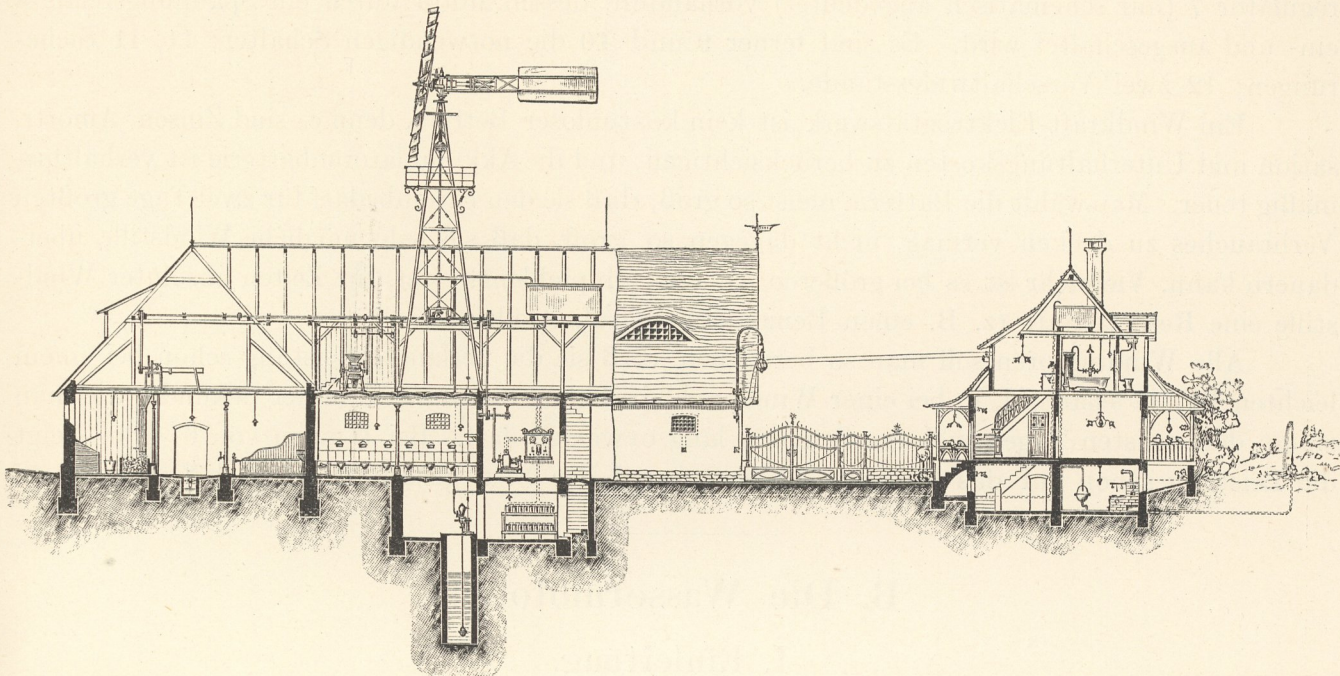


Fig. 21. Ausnutzung der Windkraft auf einem Gutshofe.

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

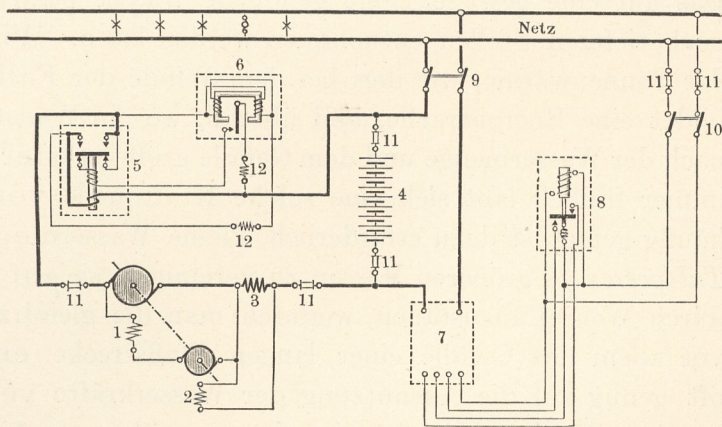


Fig. 22. Schaltung eines Windkraft-Elektrizitätswerkes.

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