

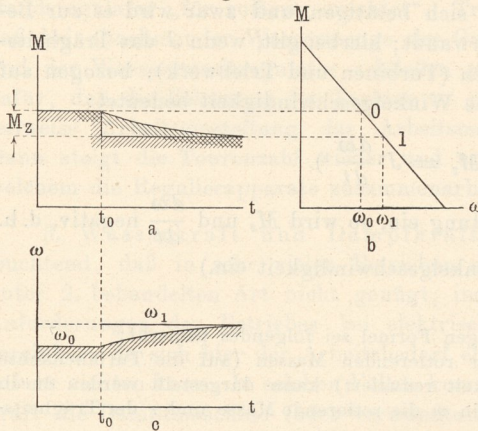
Entsprechend der zunehmenden Geschwindigkeit nimmt das Moment M ab, wie aus Fig. 36 (S. 48) und Fig. 43 b hervorgeht, somit auch das überschüssige Moment M_z .

ω erreicht ein Maximum bei $M_z = 0$ und es tritt wieder ein Beharrungszustand ein. Der Vorgang kann durch folgende drei Kurven veranschaulicht werden.

Die Kurve c stellt die Geschwindigkeit als Funktion der Zeit, die Kurve a das hydraulische Moment als Funktion der Zeit, die Kurve b dasselbe als Funktion von ω dar (s. Fig. 43 a, b, c).

Diese letztere Kurve ist aus der graphischen Darstellung Fig. 36, S. 48 bekannt. Sie ist charakteristisch für die natürliche Regulierung, als

Fig. 43.



welcher der eben beschriebene Vorgang anzusehen ist. Die Kurve (M, ω) weist zwar eine Haupteigenschaft der Geschwindigkeitsregulierung auf, nämlich die, daß M als Funktion von ω dargestellt werden kann, sie zeigt aber deutlich den Mangel der natürlichen Regulierung, welcher darin besteht, daß die Geschwindigkeitsänderung bei variablem M viel größer ist, als den Anforderungen des praktischen Betriebes entspricht.

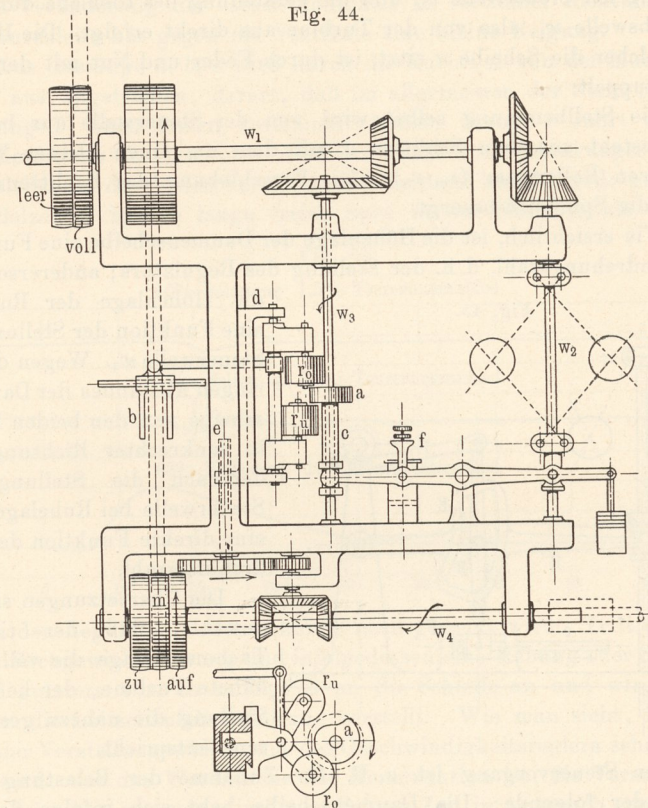
Es ist somit Aufgabe der künstlichen Regulierung, den Verlauf der Kurve (M, ω) so zu gestalten, daß in weiten Grenzen von M die Geschwindigkeit sich nur wenig ändert. In bezug auf den Verlauf der Kurven (ω, t) und (M, t) ist die natürliche Regulierung so vollkommen, wie es durch die künstliche Regulierung kaum besser erreicht werden kann, indem der Übergang des einen Geschwindigkeits- und Belastungszustandes in den anderen allmählich und stetig erfolgt.

Künstliche Regulierung der Geschwindigkeit.

Auf die indirekt wirkenden, künstlichen Regulatoren soll im Anschluß an das auf S. 60 Gesagte hier näher eingegangen werden. Wie schon erwähnt, übernimmt bei indirekten Regulatoren das durch den Regulator jeweils einzurückende Stellzeug die Arbeit der Verstellung. Auf diese Weise wird es möglich, den Regulator sehr empfindlich zu machen, d. h. für die geringsten Schwankungen in der Tourenzahl schon ein Ingangsetzen der Regulierorgane zu erreichen. Für ein gutes Wirken des Apparates ist es ein Hauptfordernis, daß die Wieder-

ausrückung des Stellzeuges nicht zu spät erfolgt, d. h. nicht über das nötige Maß hinaus reguliert wird; mit anderen Worten, jeder Stellung des Geschwindigkeitsreglers soll eine bestimmte Stellung der Abschlußorgane entsprechen. Fehlt hierfür eine geeignete Vorrichtung, so treten Geschwindigkeitsschwankungen durch ständiges Überregulieren ein und hört das Regulieren auch bei konstantem Kraftbedarfe nie auf.

Fig. 44.



Um auch obige Forderung zu erfüllen, führte Pfarr die sogenannte Stellhemmung ein. Ein vollständiger Regulierapparat mit Stellhemmung nach Pfarr wird durch die schematische Skizze Fig. 44 dargestellt.

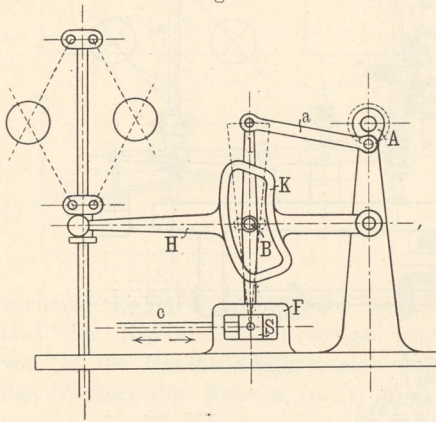
Von der Welle w_1 aus werden sämtliche Teile des Regulierapparates in Gang gesetzt: der Geschwindigkeitsregler mit der Welle w_2 , die rotierende Daumenscheibe a auf der Welle w_3 und die nach dem Turbinenrade führende Steuerwelle w_4 . Das Öffnen und Schließen der Leitradzellen wird mittels eines Riemenwendegetriebes bewirkt. Die mittlere Scheibe m des Wendegetriebes ist eine Leerscheibe, auf welcher der Riemen im Beharrungszustande der Turbine läuft. Kommt der Riemen auf die rechte Scheibe zu liegen, so wird geöffnet, während die linke

Scheibe zur Schließung der Schaufeln dient. Die Richtungspfeile sind in der Figur für den Fall des Öffnens, d. h. für Zunahme des Belastungsmomentes, eingezeichnet. Das Wendegetriebe wird vom Regulator vermittelt der Daumenscheibe a , der Rollen r_o , r_u und der Riemengabel b bedient. Der Regulator selbst hat nur die Verstellung der Daumenscheibe in senkrechter Richtung zu bewirken, während die Drehung der Steuerwelle w_4 und die Verstellung des Riemens durch die Antriebswelle w_1 , also von der Turbine aus direkt erfolgt. Die Hülse c , auf welcher die Scheibe a sitzt, ist durch Feder und Nut mit der Welle w_3 gekuppelt.

Die Stellhemmung selbst wird von der Steuerwelle aus betätigt und besteht aus dem Schlitten d mit dem um einen kleinen Winkel drehbaren Rollenpaar (r_o , r_u). Die Verschiebung des Schlittens wird durch die Spindel e besorgt.

Wie ersichtlich, ist die Höhenlage der Daumenscheibe eine Funktion der Umdrehungszahl, d. h. der Stellung des Regulators; andererseits ist

Fig. 45.



die Höhenlage der Rollen r eine Funktion der Stellung der Steuerwelle w_4 . Wegen des geringen Abstandes der Daumenscheibe von den beiden Rollen in senkrechter Richtung, ist demnach die Stellung der Steuerwelle bei Ruhelage auch eine direkte Funktion der Umdrehungszahl.

Die Übersetzungen sind so gewählt, daß der tiefsten Tachometerlage die völlig geöffnete Turbine, der höchsten Stellung die nahezu geschlossene entspricht.

Der Steuervorgang ist z. B. für Zunahme der Belastung kurz gefaßt der folgende: Die Daumenscheibe hebt sich infolge der abnehmenden Geschwindigkeit, drückt die Rolle r_o nach vorne und rückt so den Riemen auf die rechte Scheibe. Die Steuerwelle öffnet und veranlaßt eine entsprechende Hebung des Schlittens. Die Daumenscheibe gleitet von der Rolle r_o in dem Augenblicke ab, in welchem die Lage der Steuerwelle und der Abschlußorgane der momentanen Geschwindigkeit entspricht; hierauf kehrt die Riemengabel in ihre Mittellage zurück. Um zu rasches und zu häufiges Eingreifen des Regulators zu verhindern, dient eine von Hand regulierbare Ölbremse.

Die gleiche Idee der „indirekten Regulierung“ mit Stellhemmung läßt sich durch verschiedene andere Konstruktionen verwirklichen,

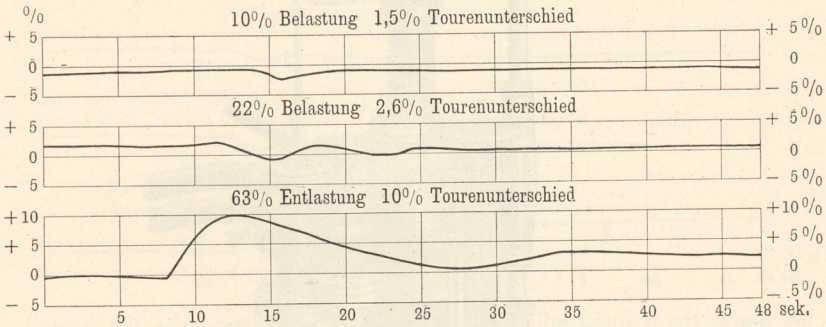
z. B. durch Verwendung von Druckwasser an Stelle des Riemenwendegetriebes (s. hierzu „Brauer, Turbinentheorie“). Ebenda findet sich auch ein Beispiel für periodische Einwirkung des Regulators.

Der Grundgedanke desselben wird durch die Skizze Fig. 45 veranschaulicht:

Der Regulator verstellt die im Hebel *H* befindliche Kurvenschleife *K* bei Veränderung der Geschwindigkeit in vertikaler Richtung. Die Kurvenschleife hat gegen die Vertikale eine kleine Neigung.

Das Gestänge *a, b, c* wird durch die Kurbel *A* von der Maschinenwelle aus angetrieben, derart, daß im allgemeinen der Stein *S* in der Führung *F* einen festen Drehpunkt bildet; Stange *c* führt zu dem Regulierorgane des Leitrades. Daß der Punkt *S* im Beharrungszustande fest bleibt, ist durch den Verstellungswiderstand am Leitrade gesichert. Der Bolzen *B* hat so lange freies Spiel in der Schleife, als dieselbe

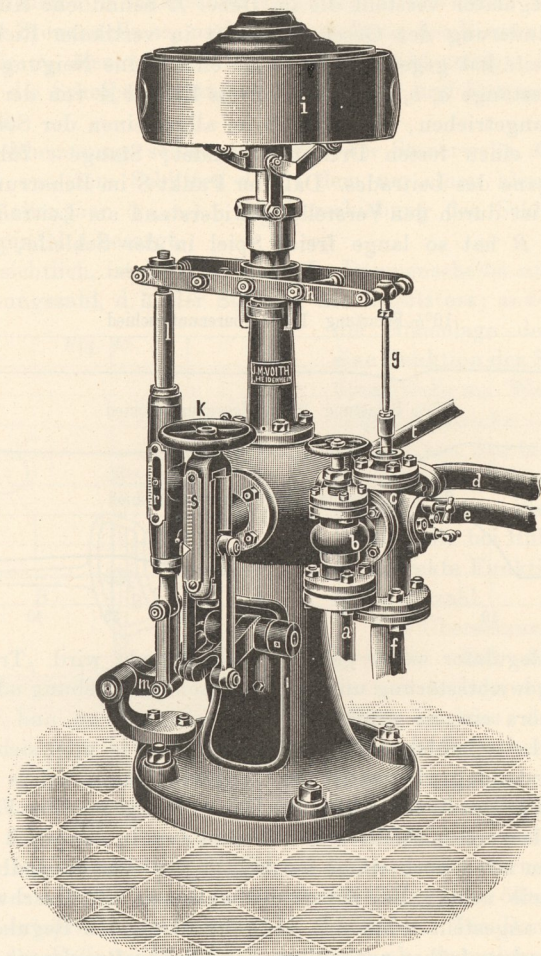
Fig. 46.



durch den Regulator weder gehoben noch gesenkt wird. Tritt dagegen eine Gleichgewichtsstörung und infolgedessen eine Hebung oder Senkung des Regulators ein, so schlägt *B* an die Schleife an und wird *S* und mithin die Leitschaufelregulierung verstellt. Wie man sieht, ist auch hier der Verstellungswiderstand des Geschwindigkeitsreglers sehr gering und wird, was das Wesentliche der Konstruktion ist, die Verstellungskraft desselben nur periodisch von Zeit zu Zeit in Anspruch genommen. Im folgenden seien noch einige Betrachtungen über die indirekte Regulierung, sowie neuere Regulatorkonstruktionen und Geschwindigkeitsdiagramme angestellt. Bei den indirekt wirkenden Regulatoren muß, wie bereits schon früher ausgeführt, der Fliehkraftregler eine Hilfskraft zur Überwindung der bedeutenden Regulierwiderstände ein- und ausschalten. Je nach der Art der Hilfskräfte kommen, wie bereits bekannt, Regulatoren mit mechanischem oder hydraulischem Servomotor in Frage. Ein schnelles Funktionieren und ein präzises Beginnen und Abstellen der Bewegung des Servomotors durch den Fliehkraftregler ist Bedingung für einen guten Regulator. Die Brauchbarkeit eines Regulators ergibt sich aus der Schlußzeit, d. h. derjenigen Zeit, welche der Regulator be-

nötigt, um die geöffnete Turbine ganz zu schließen. Von der Schlußzeit des Regulators hängen die Geschwindigkeitsschwankungen und die nötigen Schwungmassen ab; um dieselben auf ein geringes Maß zu beschränken, muß die Schlußzeit klein sein. Für die mechanischen

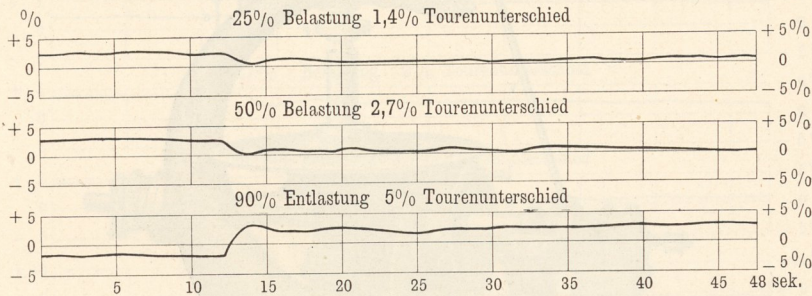
Fig. 47.



Regulatoren sind lange Schlußzeiten charakteristisch; bei diesen Regulatoren sind große Schwungmassen erforderlich. Fig. 46 zeigt das mit einem empfindlichen Tachographen aufgenommene Geschwindigkeitsdiagramm eines Voithschen Regulators einer 250 pferdigen Zwillingsturbine des Elektrizitätswerkes „Amstetten“. Durch momentane Veränderung eines Wasserwiderstandes ergaben sich die Belastungsschwankungen, wodurch die im Diagramme gegebenen Geschwindigkeits-

schwankungen entstanden. Die graphische Darstellung läßt erkennen, daß der Beharrungszustand immer rasch erfolgt und die Regulierung eine genügende ist. Bei großen Turbinen mit noch bedeutenderen Regulierwiderständen sind hydraulische Regulatoren zu verwenden. Das Prinzip derselben besteht in der Beeinflussung eines Verteilventiles durch einen Fliehkraftregler, durch welches die Druckflüssigkeit auf die eine oder die andere Seite des Servomotorkolbens geführt wird. Hydraulische Regulatoren der Firma Voith wurden bei dem Elektrizitätswerke in Glommen für die Erreger- als auch für die Generatorturbinen verwandt. Nebenstehende Fig. 47 gibt ein Bild der Konstruktion des Voithschen Regulators. Das Verteilventil *c* ist so ausgeführt, daß es sogar bei etwa 20 und mehr Atmosphären-Flüssigkeitsdruck dem Tachometerstellzeug nur einen praktisch zu vernachlässigenden nicht meßbaren Widerstand leistet. Das Tachometer besteht aus einem Hartung-

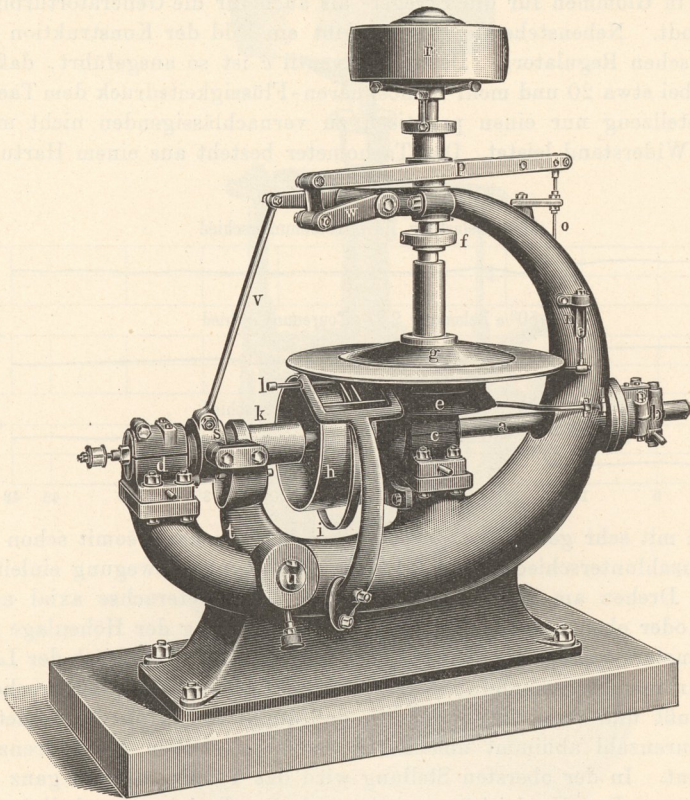
Fig. 48.



Pendel mit sehr geringer Eigenreibung; dasselbe kann somit schon bei Tourenzahlunterschieden von 0,1 Proz. die Regulierbewegung einleiten. Durch Drehen am Handrade *k* wird die Tachometerachse axial nach unten oder oben bewegt. Durch diese Veränderung der Höhenlage des Tachometers werden die Schwungmassen des Pendels bezüglich der Lage der Turbinendreh-schaufeln verschoben und die Tourenzahl entsprechend beeinflußt und zwar in der Weise, daß durch Heben des Tachometers die Tourenzahl abnimmt und durch Senken desselben die Tourenzahl zunimmt. In der obersten Stellung wird das Turbinenleitrad ganz geschlossen. Der Ungleichförmigkeitsgrad des Tachometers belief sich auf 4 Proz. Die Parallelschaltung der Generatoren wurde in etwa 2 Sekunden bewerkstelligt. Bei obiger Vorrichtung ist keine Reibung, welche die Empfindlichkeit des Apparates beeinträchtigen könnte, vorhanden, da Gewichts- und Federbelastung gar nicht in Frage kommen. Die von Oberingenieur Schmitthenner angestellten Versuche an einem hydraulischen Regulator (von Voith) des Elektrizitätswerkes in Untertürkheim zeigt das Geschwindigkeitsdiagramm Fig. 48. Aus der graphischen Darstellung geht hervor, daß der Regulator den neuen Gleichgewichtszustand unmittelbar erreicht und die Geschwindigkeits-

schwankung nur von dem Ungleichförmigkeitsgrade (etwa 4,5 Proz.) des Fliehkraftreglers abhängt. Die in der graphischen Darstellung zu erkennenden leichten wellenförmigen Linien sind bedingt durch die Wasserspiegelschwingungen in der Turbinenkammer, welche durch plötzliche Beaufschlagungsänderung entstehen. Zwischen den mechanischen und hydraulischen Regulatoren besteht nicht allein der oben schon erwähnte Unterschied der Schlußzeit, sondern noch hauptsächlich

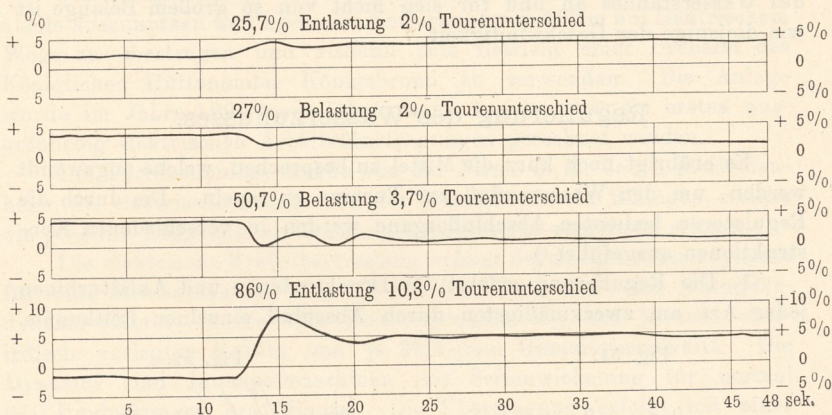
Fig. 49.



derjenige der Regulierung; ersterer regelt stoßweise — d. h. das Getriebe wird bei jeder Regulierung auf die höchste Geschwindigkeit gebracht und muß sodann wieder verzögert werden —, während letzterer stetig — d. h. mit kleiner oder großer Geschwindigkeit, wie es der Fliehkraftregler angibt — regelt. Aus obigem resultiert, daß bei den mechanischen Regulatoren kurze Schlußzeiten ausgeschlossen sind. Oberingenieur Schmitthenner hat sich die Aufgabe gestellt, einen neuen mechanischen Regulator mit stetiger Regulierung, veränderlicher Schlußgeschwindigkeit und kurzer Schlußzeit (3 Sekunden) zu konstruieren. Fig. 49

zeigt diesen neuen Regulator. Die von der Turbine angetriebene Regulatorwelle *a* ruht in den Ringschmierlagern *b*, *c* und dem Ringspur-lager *d*; letzteres dient zur Aufnahme axialer Kräfte. Die Tachometerwelle *f* wird durch ein Kegelräderpaar bei *e* angetrieben. Der Reibteller *g* läuft mit der Tachometerwelle und die zylindrische Scheibe *h* sitzt lose drehbar auf der Welle *a*. Zwischen *h* und *g* ist ein Riemenring *i* eingeklemmt. Die Übersetzung ist derart vorgesehen, daß Scheibe *h* und Welle *a* bei der Mittellage des Riemenringes in gleichem Drehsinn und mit gleicher Geschwindigkeit rotieren. Die Welle *a* trägt ein Gewinde mit Mutter *k*, welche letztere durch Feder und Nut mit der Nabe der Scheibe *h* verbunden ist, so daß sie sich mit der Scheibe dreht, jedoch axial frei beweglich ist. Der Riemenführer *l* trägt den Riemenring *i*; letzterer ist durch ein Gestänge mit dem Regulatorhebel *p* und

Fig. 50.



dem Fliehkraftregler *r* verbunden. Bei Geschwindigkeitsänderung verschiebt sich der Ring nach links oder rechts; es tritt somit eine Beschleunigung der Scheibe *h* und der Mutter *k* gegenüber der Welle *a* ein und die Mutter schraubt sich mit kleinerer oder größerer Geschwindigkeit — je nach der Verschiebung des Riemenringes — auf der Welle nach links oder rechts. Die Bewegung der Mutter wird vermittelt Kugelringspurlager *s* und Hebel *t* auf die zur Turbine geleitete Regulierwelle fortgepflanzt. Durch die Rückführungen *v*, *w* wird der Riemenring nach erfolgter Regulierbewegung wieder in die Mittelstellung geführt, wodurch ein Überregulieren vermieden wird. Wie aus obigem resultiert, handelt es sich bei diesem Regulator um einen Servomotor mit veränderlicher Schlußzeit und stetig verlaufendem Reguliereingriff. Als normale Schlußzeit hat der Konstrukteur 3 Sekunden angenommen; jedoch kann dieselbe noch verkürzt werden. Alle Getriebeteile stehen beständig in zwangläufiger Vereinigung mit dem Regler; hierdurch wird ein schädlicher Einfluß der Wasserwirkung vollständig aufgehoben.

Da zur Bewegung des Riemenringes nur eine sehr kleine Kraftwirkung erforderlich ist und das Riemenführergestänge leicht konstruiert ist, so ist eine große Empfindlichkeit dieses Regulators möglich. Die Regulierfähigkeit des Regulators ist aus dem vom Konstrukteur aufgestellten Diagramme Fig. 50 zu ersehen.

Die Regulierung des Wasserstandes wird durch ähnliche Apparate erreicht wie diejenige der Geschwindigkeit; nur tritt an Stelle des Zentrifugalregulators ein Schwimmer zur Einleitung der Regulierbewegung. Die Konstruktion eines Wasserstandsregulators bietet daher nichts prinzipiell Neues. Eine Vereinfachung in der Lösung der Aufgabe der Wasserstandsregulierung liegt darin, daß durch entsprechend große Bemessung des Schwimmers verhältnismäßig leicht die erforderliche Verstellkraft desselben erzielt werden kann, und daß die Konstanz des Wasserstandes an und für sich nicht von so großem Belange ist wie diejenige der Geschwindigkeit.

Regulierung des Wasserzufflusses.

Es erübrigt noch kurz die Mittel zu besprechen, welche angewandt werden, um den Wasserzufluß zur Turbine zu regeln. Die durch die Regulatoren bedienten Abschlußorgane werden in verschiedenen Konstruktionen ausgeführt ¹⁾.

1. Die Regulierung erfolgt für Druckturbinen und Axialturbinen jeder Art am zweckmäßigsten durch Abschluß einzelner Leitkanäle,

Fig. 51.

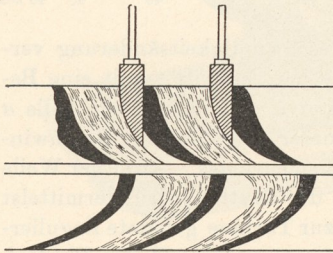
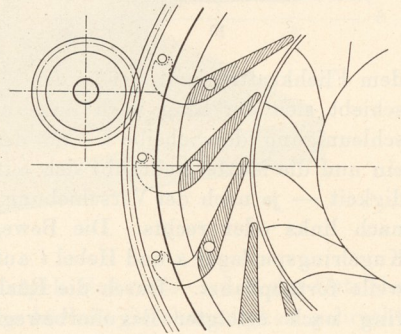


Fig. 52.



d. h. durch partielle Beaufschlagung. Die häufigste Art der Ausführung ist hierbei ein ringförmiger Schieber und Rollschützenregulierung; ferner geschieht die Abdeckung der Leitkanäle durch Deckel und drehbare Klappen.

¹⁾ Ausführliches hierüber findet sich in „Henne, Wasserräder und Turbinen“.