

Gefälle.

Im Anschluß an die Ausführungen über Wassermessungen sei noch einiges über die Messung der Gefällshöhe gesagt. Hierzu können feste, mit Centimeteereinteilung versehene Pegel verwendet werden. Es wird alsdann der Stand des Wasserspiegels mit dem Pegel beobachtet. Im Oberwasserkanal und im Unterwasserkanal wird je ein solcher Pegel in möglichster Nähe der Turbine aufgestellt. Da jedoch die Beobachtung der Wasserstände direkt am Spiegel infolge der Entfernung der Beobachtungsstelle vom Auge des Beobachters erschwert ist, so ist es zweckmäßiger, Schwimmerpegel anzuwenden, welche den Beobachtungspunkt in Augenhöhe treffen. Eine Anwendung von Schwimmerpegeln zeigt Fig. 15 auf S. 19.

Die Schwimmer o und u tragen vertikale Stäbe s_o und s_u mit Maßeinteilung, welche an den Marken m_o und m_u abgelesen werden. Bezeichnet a den Abstand der Marken voneinander, c die Ablesung am Oberwasserschwimmer, b die Ablesung am Unterwasserschwimmer, jeweils vom Spiegel an gerechnet, so gilt für das Gefälle Z :

$$(17) \quad \dots \dots \dots Z = a + b - c.$$

Die Anordnungen für Gefällsmessung lassen sich noch in anderer Weise mit mehr oder weniger primitiven Mitteln ausführen, welche hier jedoch nicht weiter Erwähnung finden sollen.

Wasserräder.

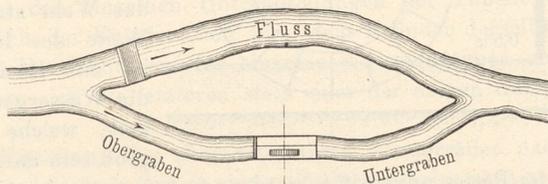
Betrachtung über die zweckmäßige Ausnutzung von Wasserkraften.

Bevor auf die Besprechung der einfachsten und ältesten Wassermotoren, der Wasserräder, eingegangen wird, möge einiges über den Bau von Wasserkraftanlagen im allgemeinen und die Mittel zur zweckmäßigen Ausnutzung der Wasserkraften ausgeführt werden.

Die Arbeitsfähigkeit eines Wasserlaufes ist durch sein natürliches Gefälle, welches dem Wasser eine gewisse Geschwindigkeit erteilt, bedingt. Zur Ausnutzung der Wasserkraft wird fast in allen Fällen ein besonderer Kanal (Mühlgraben) (s. Fig. 16) angelegt und zu diesem Zwecke quer in den Fluß ein Wehr eingebaut, welches durch Stauung des Wassers die Ablenkung eines mehr oder weniger großen Wasser-

quantums in den Kanal bewirkt. Diese Anordnung ist aus verschiedenen Gründen bedeutend vorteilhafter als die Einbauung der Wassermotoren unmittelbar in den Flußlauf. Zunächst hat man durch Teilung des Wasserlaufes in zwei Bette das Wasser mehr in der Gewalt, indem die Möglichkeit besteht, zeitweise durch Absperren des Mühlgrabens den Zufluß zum Wassermotor zu verhindern (z. B. behufs Reparatur), wie überhaupt die Wassermenge, welche den Kanal durchfließen soll, bequem mittels einer Schütze zu regulieren. Ferner eignet sich das Flußbett meist nicht so gut zum Anbringen eines „Grundwerkes“¹⁾, d. h. eines künstlichen Einbaues, welcher die Aufgabe hat, dem Motor das Wasser auf möglichst vorteilhafte Weise zuzuführen, wie der engere Kanal von geometrisch einfachem (meist rechteckigem) Querschnitte. Der Hauptvorteil der Anwendung eines Wehres und Mühlkanales beruht darauf, daß das oft kleine Gefälle eines Wasserlaufes durch Hebung des Wasserspiegels vergrößert und das Gesamtgefälle auf einer längeren Strecke des Flusses auf einen Punkt konzentriert wird.

Fig. 16.



Um diese Verhältnisse zu veranschaulichen, soll ein Zahlenbeispiel durchgerechnet werden.

Ein natürlicher Flußlauf führe eine Wassermenge von $V = 20$ cbm pro Sekunde bei einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 0,3$ m/sec. Die Leistung in PS, welche die Wassermasse ohne Anwendung künstlicher Wasserbauten darstellt, ist daher, wenn γ das spezifische Gewicht des Wassers (im allgemeinen = 1 zu setzen) und g die Beschleunigung der Schwere bedeuten:

$$N_a = \frac{1000 \cdot V \cdot \gamma \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot 75} = \frac{1000 \cdot 20 \cdot 0,3^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 75} = \text{rund } 1,2 \text{ PS.}$$

Staut man jedoch durch ein Wehr den natürlichen Wasserspiegel, wie durch die Fig. 17 und 18 dargestellt, so daß vor dem Durchlaßschützen im Kanal ein Höhenunterschied von 0,5 m gegenüber dem Unterwasserspiegel entsteht, so durchfließt das Wasser die Schützenöffnung — entsprechend der Druckhöhe $h = 0,5$ m — mit der Geschwindigkeit

$$v' = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} = \text{rund } 1,0 \text{ m/sec.}$$

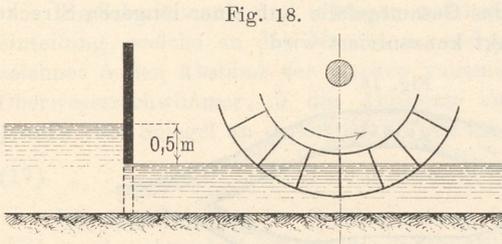
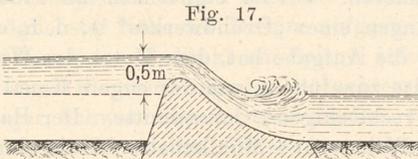
¹⁾ Dieser Betrachtung ist die einfachste Wasserradtype, das unterschlächtige Rad, zugrunde gelegt.

Daraus folgt eine Leistung der Wassermasse von

$$N_a = \frac{1000 \cdot V \cdot \gamma \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot 75} = \left[\frac{1000 \cdot V \cdot \gamma \cdot h}{75} = \right] \frac{1000 \cdot 20 \cdot 1^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 75} = 13,6 \text{ PS.}$$

Die Leistung ist also durch eine Stauung von einem halben Meter auf mehr als das 10fache gesteigert worden¹⁾.

Hierbei wurde vorausgesetzt, daß die gesamte Wassermenge von



20 cbm für die Kraftäußerung am Motor zur Geltung kommt. Das trifft allerdings in den meisten Fällen nicht zu, weil, schon mit Rücksicht auf die schwankenden Wasserverhältnisse, häufig ein beträchtlicher Teil des Wassers über das Wehr strömt. Die Weite des Kanalbettes ist mit Rücksicht auf die Wassergeschwindigkeit, welche nicht zu groß sein darf, da sonst die Wände des Bettes angegriffen werden, zu bemessen; im übrigen soll der Querschnitt der Anlagekosten wegen möglichst klein sein. In den meisten Fällen beträgt die Wassergeschwindigkeit im Kanal 0,3 bis 0,6 m/sec.

Einteilung der Wasserräder.

Die Wasserräder, im Gegensatz zu den Turbinen auch „vertikale Wasserräder“ genannt, werden je nach der Lage der Eintrittsstelle des treibenden Wassers in verschiedene Klassen eingeteilt, und man kann im wesentlichen drei Gruppen von Rädern, deren Benennungen schon obigen Einteilungsgrund erkennen lassen, unterscheiden. Es sind das die „unterschlächtigen Räder“, zugleich die ältesten und die einfachsten in konstruktiver Hinsicht, die „oberschlächtigen“ Räder und die zwischen diesen Grenzen liegenden halb-, mittel- und rückenschlächtigen Räder.

Es möge hier eine von Rühlmann aufgestellte übersichtliche Tabelle, welche die Wasserräder nach dem erwähnten Grundsatz, sowie nach weiteren Unterscheidungsmerkmalen ordnet, gegeben werden.

¹⁾ Siehe hierzu auch Rühlmann, Allgemeine Masch.-Lehre, I. Band.

I. Unterschlächtige Wasserräder		II. Halb-, mittel- und rückenschlächtige Räder	III. Oberschlächtige Wasserräder
A. In Gerinnen	B. In freiem Strome		
a) Räder in geradem Gerinne mit ebenen Schaufeln.	a) Räder, bei denen die Drehachse rechtwinkelig zur Wasserbewegung gerichtet ist.	a) Räder mit Durchlaßschützen. b) Räder mit Überfallinlauf. c) Räder m. Coulisseninlauf.	a) Räder mit geringer Umdrehungsgeschwindigkeit. b) Räder mit großer Umdrehungsgeschwindigkeit.
b) Räder mit gebogenem Gerinne, ebenen oder krummen Schaufeln.	b) Räder, bei denen die Drehachse parallel zur Wasserbewegung liegt.		

Bei den Rädern der zweiten Gattung ist ein zylindrischer Mantel von der Einlaufstelle bis zur Auslaufstelle des Wassers, dicht an das Rad anschließend, in das Gerinne eingebaut. Dieser Mantel wird Kropfräder genannt, und daher führen die erwähnten Räder auch den Namen Kropfräder. Zu den einzelnen Unterabteilungen der Tabelle sei bemerkt, daß je nach der Konstruktion bzw. dem Erfinder derselben noch eine Reihe von Bezeichnungen für einzelne Wasserradtypen eingeführt ist, doch lassen sich die letzteren stets einer der obigen Gattungen unterordnen.

Die Einteilung der obereschlächtigen Wasserräder nach der Größe der Umfangsgeschwindigkeit mag auffällig erscheinen, sie ist jedoch durch die Unterschiede sowohl in der Theorie als auch in der Konstruktion der Räder, je nachdem der Boden des Gerinnes mehr oder weniger hoch über dem Radscheitel liegt, gerechtfertigt.

Die Wirkungsweise des Wassers bei Wasserrädern.

Die verschiedenen Wasserradgattungen sind bezüglich des Nutzeffektes ungleichwertig, was vor allem durch die abweichende Wirkungsweise des Wassers auf die Schaufeln des Rades zu erklären ist. Man kann in dieser Hinsicht zwischen drei Wirkungen unterscheiden: der Stoß-, der Gewichts- oder Druck- und der Geschwindigkeitswirkung des Wassers, welche je nach dem Bau der Wasserradanlage einzeln, meist aber vereinigt zur Geltung kommen.

Zur näheren Erläuterung der soeben gekennzeichneten Wirkungen des Wassers mögen nachstehende Betrachtungen dienen.

Es werde eine ebene Schaufel, s. Fig. 19, von einem Wasserstrahl an Punkt 1 in einem beliebigen Winkel getroffen. Die Schaufel möge die Geschwindigkeit c_1 nach Größe und Richtung, das Wasser selbst die absolute Geschwindigkeit und die Richtung c haben. Die absolute Geschwindigkeit c des Wassers stellt die Resultante aus der relativen Geschwindigkeit c_2 und der Geschwindigkeit c_1 der Schaufel dar.

Umgekehrt läßt sich aus den bekannten Geschwindigkeiten c_1 und c die Relativgeschwindigkeit c_2 finden. Dieselbe kann man in eine zur Schaufelfläche normale v_1 und in eine tangential Komponente v_2 zerlegen.

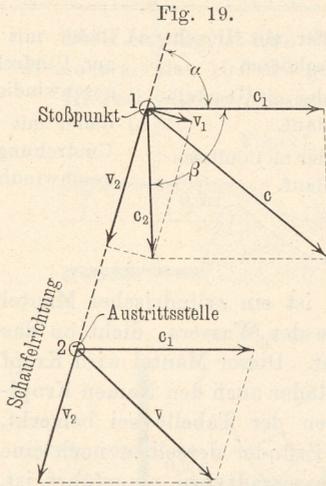


Fig. 19.

Die Komponente v_1 wird durch Stoß vernichtet, so daß das Wasser mit der Geschwindigkeit v_2 längs der Schaufel hinfließt. An der Austrittsstelle 2 setzt sich die absolute Geschwindigkeit v des Wassers aus v_2 und c_1 zusammen.

Dem bei 1 auftreffenden Wasser wohnt pro Kilogramm ein Arbeitsvermögen von $\frac{c^2}{2g}$ inne. Abgesehen von Reibungsverlusten gehen zwei Teile dieses Arbeitsvermögens verloren: ein Teil im Betrage $\frac{v_1^2}{2g}$ infolge der Vernichtung der Geschwindigkeitskomponente v_1 und ein Teil $\frac{v_2^2}{2g}$, welcher

dadurch bedingt ist, daß das Wasser noch mit einer beträchtlichen Geschwindigkeit v abfließt. Zu nützlicher Arbeitsleistung kommt somit nur

$$(1) \dots \dots \dots L = \frac{c^2 - v_1^2 - v_2^2}{2g}.$$

Ist der Winkel, welchen die Schaufelgeschwindigkeit c_1 mit der Schaufelrichtung bildet, α und der Winkel der Relativgeschwindigkeit c_2 mit c_1 β , so läßt sich die nützliche Leistung auch ausdrücken als:

$$(2) \dots \dots \dots L = \frac{2 \cdot c_1 \cdot v_1 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot g} \quad 1).$$

Danach ist die Leistung L eine Funktion von v_1 . Konstruiert man bei einer bestimmten Radgeschwindigkeit c_1 und bei einer be-

1) Die Formel (2) kann aus der Formel (1) unter Zuhilfenahme nachstehender Beziehungen abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} c^2 &= c_1^2 + c_2^2 + 2 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \cos \beta, \\ v^2 &= c_1^2 + v_2^2 - 2 \cdot c_1 \cdot v_2 \cdot \cos \alpha, \\ v_1^2 &= c_2^2 - v_2^2. \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$c^2 - v^2 - v_1^2 = 2 \cdot c_1 \cdot (v_2 \cdot \cos \alpha + c_2 \cdot \cos \beta).$$

Da nun weiter:

$$v_2 \cdot \cos \alpha + c_2 \cdot \cos \beta = v_1 \cdot \sin \alpha,$$

so ergibt sich:

$$c^2 - v^2 - v_1^2 = 2 \cdot c_1 \cdot v_1 \cdot \sin \alpha$$

und

$$L = \frac{2 \cdot c_1 \cdot v_1 \cdot \sin \alpha}{2 \cdot g}.$$

stimmten Schaufelneigung α die Geschwindigkeitskomponente v_1 für verschiedene Richtungen der absoluten Wassergeschwindigkeit c , so wird man finden, daß v_1 den größten Wert hat, wenn c mit v_1 zusammenfällt, d. h. wenn die Richtung des Wasserstrahles zur Schaufel senkrecht ist. In diesem Falle tritt das Maximum von L ein, wenn zwischen der Wassergeschwindigkeit c und der Laufradgeschwindigkeit c_1 die Beziehung:

$$c_1 \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} c$$

besteht; da alsdann v_1 ebenfalls gleich $\frac{1}{2} c$ wird, so nimmt der Ausdruck für die Leistung die Form:

$$(3) \dots \dots \dots L = \frac{1}{2} \frac{c^2}{2g} \text{ an.}$$

Diese Beziehung sagt, daß auch im günstigsten Falle bei der Wirkung eines Wasserstromes gegen ebene Schaufeln, d. h. bei Stoßwirkung, nur die Hälfte der lebendigen Kraft des Wassers ausgenutzt wird.

Die Stoßwirkung ist demnach zur Arbeitsleistung wenig geeignet und muß möglichst beschränkt werden.

Fig. 20.

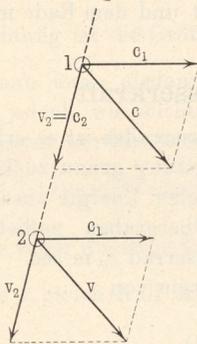
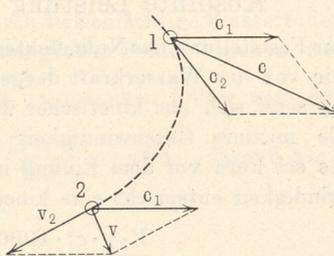


Fig. 21.



Es drängt sich nun die Frage auf, was bei der gleichen Schaufelkonstruktion eintreten würde, wenn man den Stoß vermeiden wollte. Die Bedingung hierfür wäre, daß beim Auftreffen des Wassers auf die Schaufel eine plötzliche Geschwindigkeitsvernichtung nicht eintritt, d. h. daß $v_1 = 0$ ist. Alsdann würde c_2 mit v_2 zusammenfallen (s. Fig. 20); an der Austrittsstelle 2 würde jedoch die absolute Geschwindigkeit v gleich der absoluten Eintrittsgeschwindigkeit c bei 1 sein. In diesem Falle hat das Wasser keine Arbeit verrichtet, L ist gleich 0.

Bei ebenen Schaufeln kann somit die Geschwindigkeit des Wassers nur durch Stoß, also unvorteilhaft, ausgenutzt werden.

Verwendet man dagegen gekrümmte Schaufeln, so kann das Wasser stoßfrei auf die Schaufel treffen und trotzdem die absolute Geschwindigkeit desselben auf dem Wege längs der Schaufel bedeutend vermindert, d. h. vorteilhaft zur Arbeitsleistung nutzbar gemacht werden.

Der Wasserstrahl wird durch die gekrümmte Schaufel allmählich aus seiner Richtung abgelenkt, wobei die relative Geschwindigkeit des

Wassers c_2 [= v_2] der Größe nach im wesentlichen erhalten bleibt. Die Richtung des Wasserstrahles dagegen wird so abgeändert, daß sie an der Austrittsstelle in der Zusammensetzung mit der Schaufelgeschwindigkeit c_1 eine kleine Resultante v ergibt, wie Fig. 21 zeigt.

Die auf dem eben beschriebenen Vorgange beruhende Wirkung des Wassers kann als Geschwindigkeitswirkung — im engeren Sinne — bezeichnet werden, im Gegensatze zur Stoßwirkung, welche, wie wir oben sahen, ebenfalls eine Ausnutzung der Geschwindigkeit darstellt.

Die nutzbare Arbeitsleistung des Wassers bei Geschwindigkeitswirkung ist

$$(4) \quad \dots \dots \dots L = \frac{c^2 - v^2}{2g}.$$

Die Gewichts- oder Druckwirkung des Wassers, welche bei den Wasserrädern in erster Linie zur Ausnutzung gelangt, beruht darauf, daß das den Schaufelraum erfüllende Wasser, indem es sich von der Einfluß- nach der Abflußstelle hin — zugleich mit dem Schaufelkranze — senkt, seine potentielle Energie selbst verliert und dem Rade mitteilt.

Absolute Leistung der Wasserkraft.

Zur Feststellung des Nutzeffektes eines Wasserrades ist es erforderlich, die von der Wasserkraft dargebotene Leistung genau zu kennen. Dieselbe setzt sich aus kinetischer und potentieller Energie zusammen.

Die mittlere Geschwindigkeit des im Obergraben zufließenden Wassers sei kurz vor dem Einfluß in das Wasserrad c_0 m/sec. Dieser Geschwindigkeit entspricht eine kinetische Energie von

$$\frac{V \cdot \gamma \cdot c_0^2 \cdot 1000}{2g} \text{ kgm/sec } ^1).$$

Hierin bedeutet V die pro Sekunde durch den Kanal fließende Wassermenge in Cubikmetern, γ das spezifische Gewicht des Wassers und g die Beschleunigung der Schwere.

Ist ferner der Spiegelunterschied des Ober- und Unterwassers z in Metern, so wohnt dem Wasser eine potentielle Energie von

$$V \cdot z \cdot \gamma \cdot 1000 \text{ kgm/sec}$$

inne. Da das im Untergraben fortfließende Wasser noch eine Geschwindigkeit c_u besitzt, so nimmt das Wasser ein Arbeitsvermögen (kinetische Energie) im Betrage von

$$\frac{V \cdot \gamma \cdot c_u^2 \cdot 1000}{2g} \text{ kgm/sec}$$

mit fort. Die von der Wasserkraft dargebotene Leistung ist somit

¹⁾ Vgl. hierzu S. 21 u. 22.

$$\left(V \cdot z \cdot \gamma \cdot 1000 + \frac{V \cdot \gamma \cdot c_o^2 \cdot 1000}{2g} - \frac{V \cdot \gamma \cdot c_u^2 \cdot 1000}{2g} \right) \text{kgm/sec}$$

oder

$$(5) \quad \dots \quad N_a = \frac{V \cdot \gamma \cdot 1000}{75} \cdot \left(z + \frac{c_o^2 - c_u^2}{2g} \right) \text{Pferdestärken.}$$

Die Größe $\left(z + \frac{c_o^2 - c_u^2}{2g} \right)$ wird Nutzgefälle genannt und sei kurz mit z' bezeichnet; man hat somit für das Nutzgefälle und das Arbeitsvermögen der Wasserkraft, auch absolute Leistung genannt, die Beziehungen

$$(6) \quad \dots \quad z' = z + \frac{c_o^2 - c_u^2}{2g},$$

$$(7) \quad \dots \quad N_a = \frac{V \cdot z' \cdot \gamma \cdot 1000}{75}.$$

Häufig ist die Größe $\frac{c_o^2 - c_u^2}{2g}$ gegenüber dem Gefälle z unbedeutend, und man kann alsdann ohne Fehler $z' = z$ setzen. Bei kleinen Gefällen jedoch, wie solche gerade durch tiefschlächtige Wasserräder häufig ausgenutzt werden, würde man einen großen Fehler begehen, wenn man $\frac{c_o^2 - c_u^2}{2g}$ vernachlässigen wollte; ja in manchen Fällen wird das Nutzgefälle sogar ausschließlich durch $\frac{c_o^2 - c_u^2}{2g}$ gebildet, während das Spiegelgefälle z gleich Null zu setzen ist.

Kurze Besprechung der verschiedenen Wasserradtypen.

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten eine Einteilung der Wasserräder und die verschiedene Wirkungsweise des Wassers behandelt worden ist, soll im folgenden ein kurzer Überblick über die verschiedenen Klassen von Wasserrädern unter dem Gesichtspunkte der Verwendbarkeit und des Nutzeffektes derselben gegeben werden. Eine eingehendere Beschreibung und Würdigung der verschiedenen Typen, insbesondere bezüglich Theorie und Konstruktion, ist nicht der Zweck der folgenden Ausführungen, vielmehr sei in dieser Hinsicht auf ausführlichere Abhandlungen über Wasserräder verwiesen ¹⁾.

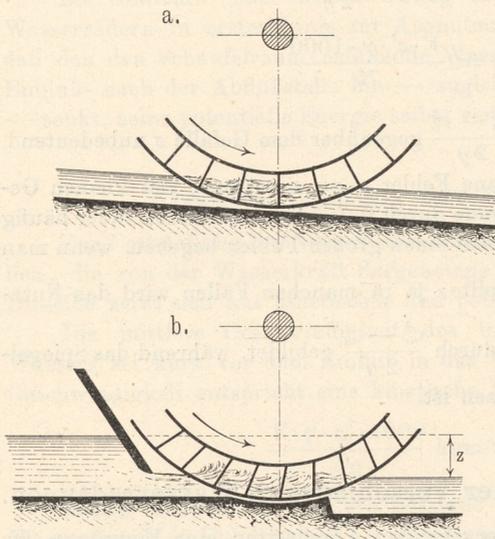
¹⁾ Bach, Wasserräder; Grashof, Theoretische Maschinenlehre; Henne, Wasserräder und Turbinen; Redtenbacher, Theorie und Bau der Wasserräder; Rühlmann, Allgemeine Maschinenlehre, I. Band; Weisbach-Herrmanns Handbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik.

I. Unterschlächtige Wasserräder.

Bei den gewöhnlichen unterschlächtigen Wasserrädern tritt das Wasser nahe am tiefsten Punkte des Rades ein. Die Schaufeln sind gerade und radial oder etwas geneigt (s. Fig. 22 u. 23) angeordnet. Die Wirkung des Wassers ist fast ausschließlich die des Stoßes. Das Wasser trifft mit größerer Geschwindigkeit als derjenigen der rotierenden Schaufeln auf, so daß eine plötzliche Geschwindigkeitsverminderung des Wassers eintritt (Stoßwirkung).

Die Räder werden mit geraden, sogenannten Schnurgerinnen, welche meist etwas geneigt sind (s. Fig. 22 a), oder besser noch mit

Fig. 22.



gekrümmten Gerinnen (s. Fig. 22 b) ausgeführt, da in dem letzteren Falle die Wasserverluste zwischen Rad und Gerinne kleiner sind. Gleichzeitig wird hierbei das Wasser im Schaufelraum etwas über dem Unterwasserspiegel angestaut, so daß es auf die in schiefer Stellung befindlichen Schaufeln zum kleinen Teil auch durch Druck wirkt, wodurch der Wirkungsgrad gegenüber dem Rade in Fig. 22 a ein wenig verbessert wird. Die Tourenzahl der im allgemeinen langsam laufenden, unter-

schlächtigen Räder wird bei Anbringung einer Durchlaßschütze (Fig. 22 b) erhöht, da das Wasser unter der Wirkung der Druckhöhe z den Schaufeln mit größerer Geschwindigkeit zufließt, als bei einem Überfalle.

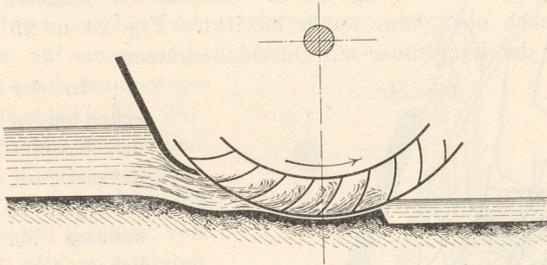
Der Nutzeffekt der gewöhnlichen unterschlächtigen Räder beträgt bei der ungünstigen Wirkung des Wassers höchstens 35 Proz.

Einen bedeutenden Fortschritt im Bau der unterschlächtigen Wasserräder stellt das von Poncelet eingeführte Rad mit gekrümmten Schaufeln dar (s. Fig. 23). Dasselbe wird für Gefälle von $\frac{1}{2}$ bis $1\frac{1}{2}$ m angewandt. Beim Poncelet-Rad trifft das Wasser auf die Schaufeln beim Eintritt nahezu stoßfrei und wirkt alsdann, indem es allmählich durch die Schaufeln aus seiner Richtung abgelenkt wird und so seine lebendige Kraft verliert, in der Hauptsache durch die letztere; es ist dies die auf S. 26 besprochene „Geschwindigkeitswirkung“. Durch

eine geeignete Krümmung des Gerinnes wie auch der Durchlaßschütze vor der Eintrittsstelle wird dem Rade das Wasser möglichst vorteilhaft zugeführt.

Der Nutzeffekt dieses Rades erreicht schon den Betrag von 60 bis 65 Proz.

Fig. 23.



Auf die Wasserräder in freiem Strome, wie solche als Schiffsmühlräder in Anwendung sind, näher einzugehen, liegt hier kein Grund vor, um so mehr, als dieselben einen äußerst geringen Nutzeffekt besitzen.

II. Halb-, mittel- und tiefschlächlige Wasserräder.

Die Konstruktion der Kropfräder schließt sich derjenigen der unterschlächtigen Räder mit gebogenem Gerinne an. Sie kommen bei mittleren Gefällen zur Verwendung. Der Mantel oder Kropf beginnt an einer mehr oder weniger hohen Stelle des Umfanges unterhalb der Radmitte und reicht bis ungefähr zum tiefsten Punkte des Rades. Bezüglich der Wirkungsweise des Wassers haben die Kropfräder die Eigenschaft, daß schon ein beträchtlicher Teil der Kraftäußerung des Wassers auf der Gewichtswirkung beruht, indem das Wasser, je nach der Höhe der Einlaufstelle, bald mehr, bald weniger im Schaufelraum zur Ruhe kommt und alsdann infolge seines Gewichtes ein Drehmoment auf die Radachse ausübt. Diese Wirkung wird durch geeignete Konstruktion der Schaufeln unterstützt; man gibt den im großen und ganzen ebenen Schaufeln am äußeren Umfange eine kleine Neigung nach oben.

Hinsichtlich des Wasserzufflusses kommen Überfallschützen, Durchlaßschützen und Coulisseneinlauf in Anwendung.

Die erstere Anordnung, mit Überfallschützen, ist dann angebracht, wenn das Wasser möglichst langsam und vorteilhaft in das Rad eintreten soll.

Das Wasser wirkt hierbei fast ausschließlich durch sein Gewicht auf die Schaufeln. Dementsprechend werden mit diesem Rade auch Wirkungsgrade zwischen 60 und 70 Proz. erreicht.

Zur Erzielung größerer Geschwindigkeiten ist die Anwendung einer Durchlaßschütze geeigneter. Allerdings ist die große Zuflußgeschwindigkeit für den Nutzeffekt wieder weniger von Vorteil.

Die erstere Bauart wird für Gefälle bis zu 2,5 m und Wassermengen bis zu 2,5 cbm, die zweite Bauart für Gefälle bis zu 1,5 m und Wassermengen bis zu 2 cbm gewählt. In beiden Fällen wird die Regulierung der Zuflußmenge durch Verstellen der Schützen in schiefer Richtung nach oben bzw. unten bewirkt. Fig. 24 u. 25 zeigen die Anordnung der Kropfräder mit Durchlaßschützen.

Fig. 24.

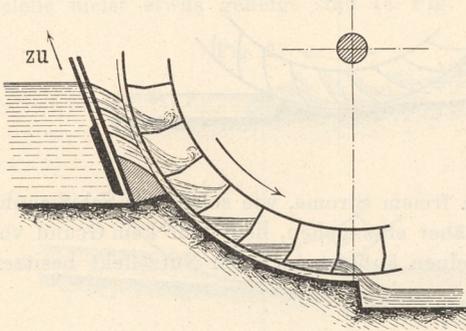
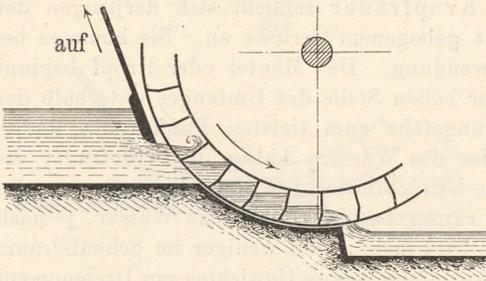


Fig. 25.



In der Mitte zwischen beiden Typen steht das Kropfrad mit Coullisseneinlauf (Fig. 24). Es eignet sich ganz besonders bei veränderlichem Aufschlagwasser, da die Regulierung des Wasserzuflusses durch Abschluß einzelner Schaufeln in sehr zweckmäßiger Weise erfolgen kann. Auch bei dieser Art des Zuflusses erfolgt im Augenblicke des Wassereintritts ein Stoß infolge der beträchtlichen Wassergeschwindigkeit.

Als eine besondere Art der tiefschlächtigen Kropfräder seien die Zuppinger-Räder und verwandte Konstruktionen, welche sich durch

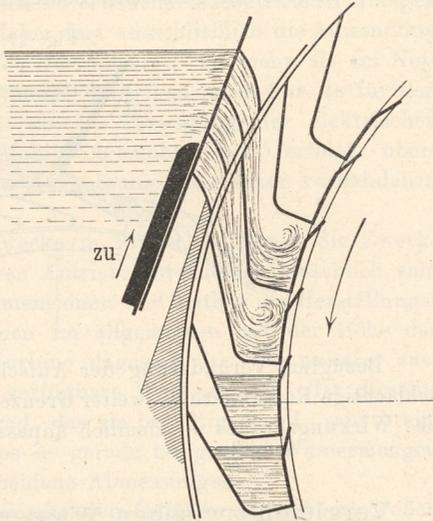
besonders große Schaufeltiefen in radialer Richtung auszeichnen, kurz erwähnt. Dieselben tauchen tief in das Unterwasser; sie eignen sich besonders für stark wechselnde Unterwasserstände, kleine Gefälle und große Wassermengen.

Bei Gefällen von 3 bis 4 m an und bei großen Wassermengen ist das Kropfrad mit im wesentlichen geraden Schaufeln nicht mehr gut verwendbar, da der Wasserverlust zwischen Rad und Kropf zu bedeutend wird. Es kommen alsdann rücken- oder Oberschlächtige Wasserräder in Betracht. Die ersteren sind bei sehr variablem Wasserstande vorteilhaft zu verwenden.

Das rückenschlächtige Rad wird im allgemeinen freihängend ausgeführt, kann aber auch — im Gegensatz zum Oberschlächtigen Rade —

im Unterwasser waten, da die Drehrichtung des Rades mit der Richtung des abfließenden Wassers übereinstimmt. Es ist wie das eigentliche Kropfrad auf seinem Umfange von der Wassereintritts- bis zur Austrittsstelle von einem Mantel umgeben; die Radschaufeln sind als sackartige Zellen ausgebildet, um das Wasser, welches bei dieser Radgattung sehr vorteilhaft durch sein Gewicht wirken kann, auf einem möglichst weiten Umdrehungswege fassen zu können (s. Fig. 26). Das Wasser wird den Zellen durch einen Coulissenapparat zugeführt. Meistens besteht derselbe aus drei Kanälen, von denen die beiden obersten unter normalen Verhältnissen genügen, während bei größerem Wasserbedarf der dritte Kanal ebenfalls eingeschaltet wird. Durch Ventilations-schlitzte am inneren Umfange des Rades ist das Entweichen der Luft aus den Zellen ermöglicht.

Fig. 26.



Der Nutzeffekt gut konstruierter rückenschlächtiger Räder kann 75 Proz. und mehr erreichen.

III. Das überschlächtige Wasserrad.

Das überschlächtige Rad kommt besonders bei kleinen Wassermengen und großem Gefälle von 3 bis 12 m und mehr zur Anwendung.

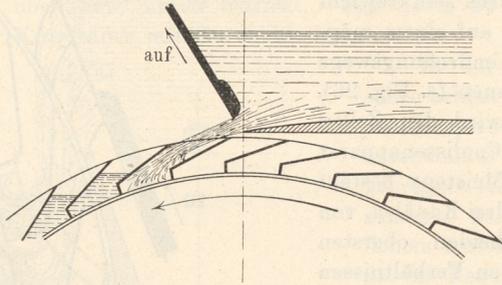
Der Einlauf erfolgt am Scheitel des Rades aus einer Öffnung des Gerinnebodens in Verbindung mit einer Spansschütze (s. Fig. 27).

Wie beim rückenschlächtigen wirkt das Wasser beim überschlächtigen Rade hauptsächlich durch sein Gewicht, indem es zwar mit einem gewissen Stoße eintritt, jedoch bei guter Konstruktion bald im Schaufelraum zur Ruhe gelangt und langsam mit der Drehung des Rades niedersinkt. Die Schaufelform ist daher ähnlich derjenigen der vorigen Radgattung. Das Rad muß stets völlig frei hängen, weil die Bewegungsrichtung desselben entgegengesetzt der Richtung des abfließenden Wassers ist. Mit Rücksicht darauf, daß durch die mit der rotierenden Bewegung verbundene Zentrifugalkraft die relative Ruhe des Wassers in den Zellen gestört und das Wasser zum Teil wieder aus denselben geschleudert werden kann, ist bei derartigen Rädern eine geringe Umfangsgeschwindigkeit geboten.

Je nach der Höhe des Obergerinnespiegels über dem Radscheitel treten beim Eintritt des Wassers beträchtliche Stoßwirkungen auf.

Der Nutzeffekt eines oberflächlichen Rades ist um so größer, je größer das Gefälle ist; er gestaltet sich ferner um so günstiger, je kleiner die Umfangsgeschwindigkeit gewählt werden kann. Der Nutzeffekt beträgt unter günstigen Bedingungen 75 bis 80 Proz.

Fig. 27.



Bezüglich Veränderung der Aufschlagwassermenge ist das oberflächliche Rad innerhalb weiter Grenzen — ohne wesentliche Änderung des Wirkungsgrades — ziemlich anpassungsfähig.

Vergleich zwischen Wasserrädern und Turbinen hinsichtlich der Verwendbarkeit, speziell auch für den Antrieb elektrischer Maschinen.

Aus den vorstehenden Betrachtungen geht hervor, daß im großen und ganzen der Wirkungsgrad von Wasserrädern demjenigen von anderen Betriebsmotoren, insbesondere der Turbinen, ziemlich nahe kommt. Auch ist als vorteilhafte Eigenschaft der Wasserräder hervorzuheben, daß bei den meisten derselben die Veränderung der Aufschlagwassermenge auf den Nutzeffekt einen verhältnismäßig geringen Einfluß besitzt.

Diesen Vorzügen steht als großer Nachteil die geringe Umdrehungszahl der Wasserräder gegenüber. Soweit es sich nicht um besonders langsam zu betreibende Anlagen handelt, ist eine große Übersetzung, bei bedeutenden Umdrehungszahlen der zu betreibenden Welle meist eine mehrfache Übersetzung erforderlich. Solche Übersetzungen, welche in der Regel durch große Zahnradgetriebe bewirkt werden, werden allein schon in konstruktiver, betriebstechnischer Hinsicht als ein Übelstand empfunden, vor allem aber bedingen sie eine wesentliche Herabsetzung des Gesamtwirkungsgrades der Wasserkraftanlage, welche letzteren man bei einem Vergleich mit anderen Betriebsmaschinen, ohne oder mit nur einer Übersetzung ins Langsame, z. B. den Turbinen, naturgemäß in Betracht ziehen muß. Berücksichtigt

man weiter, daß durch einen rasch laufenden Motor an und für sich eine größere Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit als durch einen langsam laufenden Motor gesichert ist, so erkennt man, daß für einen empfindlichen Betrieb, der zugleich große Umdrehungszahlen erfordert, wie dies bei elektrischen Kraftstationen der Fall ist, der Wasserradbetrieb sich wenig eignet. Bei neu zu erbauenden elektrischen Anlagen mit Wasserkraftbetrieb kommt daher fast ausschließlich die Anwendung von Turbinen in Frage. Der Wasserradbetrieb ist mehr als ein Nothelf zu betrachten, und man findet denselben meist nur da für den elektrischen Betrieb verwandt, wo die Erzeugung der elektrischen Energie im Nebenbetriebe (bei Mahl-, Sägemühlen usw.) erfolgt, überhaupt eine elektrische Anlage zur Ausnutzung einer schon vorhandenen Wasseranlage errichtet wird.

Kommen andere Betriebszwecke in Frage, so hängt die Zweckmäßigkeit des einen oder anderen Antriebssystemes hauptsächlich vom vorhandenen Gefälle ab. Die Dimensionen und mithin die Herstellungskosten eines Wasserrades nehmen im allgemeinen mit der Höhe des Gefälles zu, diejenigen einer Turbine dagegen ab. Ein weiterer ausschlaggebender Faktor ist die verfügbare Wassermenge. Ist dieselbe bedeutend, so wird ein Wasserrad, das sie bewältigen soll, sehr breit; eine Turbine erhält, weil dieselbe — gerade bei großen Wassermengen — voll beaufschlagt wird, bescheidene Abmessungen.

Das Wasserrad tritt also bei mittlerem Gefälle und nicht zu großen Wassermengen mit der Turbine in Wettbewerb. Bei kleinen Gefällen, bei welchen die Anordnung einer Turbine Schwierigkeiten bietet, ist den Wasserrädern in vielen Fällen mit Rücksicht auf die einfache Anordnung derselben der Vorzug zu geben.

Regulierung der Wasserräder.

Die Regulierung eines Wasserrades, wie überhaupt eines hydraulischen Motors, ist eine zweifache. Ihre Aufgabe ist erstens die Anpassung der Aufschlagwassermenge an den momentanen Arbeitsbedarf oder das Zuflußquantum, zweitens die Einhaltung einer bestimmten Umdrehungszahl, wenigstens innerhalb enger Grenzen, bei Schwankungen im Arbeitsverbrauch. Das Mittel zur Regulierung ist stets: Änderung der Aufschlagwassermenge, d. h. der absoluten Leistung der Wasserkraft.

Die Regulierorgane sind hier wenig mannigfaltig. Wir haben dieselben schon bei dem oben gegebenen Überblick über die verschiedenen Typen von Wasserrädern kennen gelernt; es sind das die Überfall- und Durchlaß- bzw. Spansschützen, sowie die Kulissenapparate.

Die Überfallschützen haben den Vorteil, daß bei geringer Wassermenge, wobei die Schütze behufs Verengung des eintretenden Wasserstrahles gehoben wird, das Wasser an möglichst hoher Stelle auftritt,

d. h. das Gefälle gut ausgenutzt wird. Anders verhalten sich die Durchlaßschützen: bei geringem Wasserzufluß wird die Schütze tiefer gestellt; die Folge davon ist, daß das Wasser an tieferer Stelle in das Rad eintritt und dadurch eine weitere Verringerung der Leistung bedingt ist. Bei Kulissenapparaten ist naturgemäß immer die oberste Kulisse frei zu lassen und muß die Regulierung an der unteren Kulissenpartie erfolgen, damit das Gefälle möglichst ausgenutzt wird.

Hinsichtlich der automatischen Regulierung sei auf das entsprechende Kapitel unter Wasserturbinen verwiesen, da sowohl die Aufgabe der Regulierung als auch die Methoden derselben für beide Arten von Wassermotoren prinzipiell die gleichen sind.

Nutzeffekt eines Wasserrades.

Um den Nutzeffekt eines Wasserrades experimentell zu ermitteln, ist die Feststellung der absoluten Leistung N_a der Wasserkraft (siehe S. 27, Formel 5) und eine Bremsung des Rades erforderlich. Auf beide Versuche soll jetzt nicht näher eingegangen werden, da dieselben Untersuchungen auch bei Turbinen auszuführen sind und im Kapitel Wasserturbinen ausführlich besprochen werden. Außerdem sei bezüglich Bestimmung von N_a auf den Abschnitt Wassermessung und betreffend Bremsung auf das kürzlich erschienene Buch des Verfassers „Prüfungen in elektrischen Zentralstationen mit Dampf- und Gasbetrieb“ verwiesen.

Bezüglich der Bremsleistung N_b sei noch bemerkt, daß dieselbe meist kleiner ausfallen wird als die Nutzleistung N_e des Wasserrades. Kann die Bremsung an der Wasserradwelle selbst vorgenommen werden, so wird zweckmäßig das zur Tourenumsetzung dienende Triebwerk abgeschaltet, anderenfalls müssen die Leerlaufverluste desselben berücksichtigt werden. Findet die Bremsung auf einer Vorgelegewelle statt, so sind die Lager- und Zahnreibungsverluste des Vorgeleges, sowie alle anderen eventuell auftretenden Verluste in ähnlicher Weise, wie im Abschnitt „Wasserturbinen“ ausgeführt, zu berechnen und zur Bremsleistung zu addieren.

Der Nutzeffekt ergibt sich als das Verhältnis der Nutzleistung N_e des Wasserrades zur absoluten Leistung N_a der Wasserkraft:

$$(8) \quad \eta = \frac{N_e}{N_a}.$$

Bezüglich der rechnerischen Ermittlung der Wirkungsgrade der Wasserräder aus den Arbeitsverlusten verweise ich auf das Buch „Henne, Die Wasserräder und Turbinen“. Zur generellen Kontrolle des experimentell gefundenen Wirkungsgrades für das überschlächtige Wasserrad möge die von Grashof, „Theoret. Maschinenlehre“, Bd. III, aufgestellte Formel

$$(9) \quad \eta = 0,8 + \frac{z}{80} = 0,018 c_1^2 - \frac{0,094 c_1^2 + 0,48}{z}$$

diene; in dieser Formel bezeichnet c_1 die Umfangsgeschwindigkeit des Wasserrades am äußeren Umfang bzw. die der Schaufeln und z das ganze verfügbare Gefälle vom Oberwasser- bis Unterwasserspiegel.

Wasserturbinen.

Kurze Besprechung der verschiedenen Wasserturbinentypen, hinsichtlich Wirkungsweise, Verwendbarkeit und Einteilung.

Die Wasserturbinen, im folgenden kurzweg Turbinen genannt, haben wie die Wasserräder die Aufgabe, das in einem natürlichen Wasserlauf vermöge seines Gefälles enthaltene Arbeitsvermögen durch Wirkung des Wassers auf geeignet geformte Schaufeln für mechanische Zwecke nutzbar zu machen. Hierbei wird immer eine rotierende Bewegung erzeugt. Eine scharfe Trennung von Turbine und Wasserrad durch allgemein gültige Begriffsfestlegung ist nicht gut möglich, da beide sehr viele Merkmale gemeinsam haben. Will man trotzdem die beiden Typen von Wassermotoren vergleichsweise charakterisieren, so muß man sich darauf beschränken, einige wesentliche Eigenschaften, in denen sich Turbine und Wasserrad unterscheiden, hervorzuheben. Man könnte dieselben dahin zusammenfassen:

Die Turbine hat meist einen voll ausgebildeten Leitapparat, durch welchen das Wasser den rotierenden Schaufeln, dem Laufrade, zugeführt wird; das Wasserrad besitzt einen solchen im allgemeinen nicht.

Die Bewegung des Wassers in der Turbine ist derart, daß dasselbe an einer anderen Stelle des Laufrades austritt, als es eingetreten ist, also den Schaufelraum durchströmt; beim Wasserrad dagegen erfolgt Ein- und Austritt des Wassers an der gleichen Stelle des Rades.

Ein dritter Unterschied besteht darin, daß das Wasser bei der Turbine im wesentlichen nicht durch die potentielle Energie (Gewicht) oder durch Stoß wie bei den Wasserrädern, sondern durch seine kinetische Energie (lebendige Kraft, Geschwindigkeit) — deren Abgabe allmählich erfolgt — Arbeit leistet. Die Wirkungsweise einer Turbine ist derart, daß das zuströmende Wasser nach Durchfallen eines gewissen Teiles vom Gesamtgefälle in den feststehenden Leitapparat gelangt, in welchem es die geeignete Richtung und eine Geschwindigkeit annimmt,