Der Maschinenbau

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1863

Abmessung der Räder

urn:nbn:de:bsz:31-270981

Abmessungen der Räder.

Das Verfahren zur Bestimmung der Abmessungen der Räder. Durch die vorgetragene Berechnung der Effektverluste, welche bei den verschiedenen Wasserrädern vorkommen, kann man mit einer für praktische Zwecke hinreichend genügenden Genauigkeit die partiellen Effektverluste und den totalen Nutzeffekt jedes Rades berechnen, wenn das Rad verzeichnet und nebst den Abmessungen auch die Geschwindigkeit des Rades und die in jeder Sekunde zufliessende Wassermenge gegeben sind. Durch eine solche Berechnung wird zunächst eine scharfe Kritik geübt, denn man erfährt, ob und welche Verluste gross oder klein sind, und kann auch erkennen, woran es liegt, dass einer der Partialverluste gross oder klein ausfällt. Dadurch kann man auch eine Verbesserung an einem nach was immer für Regeln entworfenen Rade herbeiführen, denn wenn man in Folge der Rechnung erkannt hat, dass einer der Partialeffekte vermöge einer oder der anderen Abmessung ungünstig ausfällt, ist zugleich angedeutet, wie jene Abmessung zu ändern ist um einen besseren Effekt zu erzielen. Allein die Hauptaufgabe der Theorie besteht nicht in der Kritik über bestehende oder entworfene Konstruktionen, sondern sie besteht in der Auffindung wo möglich der besten, oder wenn sich diese nicht auffinden lassen, von guten Konstruktions-Verhältnissen für neu zu erbauende Räder. Diese Hauptaufgabe wird durch die im Vorigen vorgetragene Theorie noch nicht gelöst. Will man diese Hauptaufgabe mit möglichster Strenge und rationell zur Lösung bringen, so muss man den Weg betreten, der im zweiten und dritten Abschnitt meines grösseren Werkes über die Wasserräder eingeschlagen worden ist. Dieser Weg besteht darin, dass man zuerst die sämmtlichen Partial-Effektverluste analytisch berechnet, dann den totalen Nutzeffekt ausdrückt, indem man vom absoluten Effekt des Motors die Summe aller Effektverluste abzieht, endlich die einzelnen Grössen, welche in dem Ausdruck für den Nutzeffekt vorkommen, nach der Lehre vom Maximum und Minimum der Funktionen so zu bestimmen sucht, dass der Ausdruck für den Nutzeffekt ein Maximum wird. Die Grössen, welche dieses Maximum hervorbringen, sind dann die hinsichtlich des Effekts relativ oder absolut besten Konstruktionselemente. Allein dieser Weg ist für unsere Vorträge zu weitläufig, erfordert einen zu grossen Aufwand an Zeit und überdies sind diese hinsichtlich des Nutzeffekts besten Räderkonstruktionen für die Ausführung doch nicht zu empfehlen, indem dieselben zu sehr kostspieligen Anordnungen führen. Wir wollen daher auf diese besten Konstruktionen verzichten, und lieber dahin trachten, solche Konstruktionen ausfindig zu machen, die befriedigende Effekte zu liefern vermögen, aber doch nicht kostspieliger sind als die Räder, welche bisher ausgeführt wurden. Dies Ziel wird dadurch erreicht, indem man diejenigen Dimensionen, von welchen die Kosten des Baues wesentlich abhängen, die aber auf den Effekt nur wenig Einfluss haben, nämlich die Halbmesser und Breiten der Räder so gross macht, als sie seither gemacht wurden, dagegen alle übrigen Konstruktionsverhältnisse, welche auf die Herstellungskosten wenig Einfluss haben, so vortheilhaft als möglich ausmittelt. Auf diese Weise erhält man Räder, deren Effekt um ungefähr 10 bis 15 Prozent kleiner ausfällt, als jener der absolut besten Konstruktionen, die aber um 40 bis 50 Prozent billiger zu stehen kommen, als diese besten Anordnungen. Mit solchen Maschinen kann man zufrieden sein. Die Regeln, welche zu diesen praktisch guten Anordnungen führen, ergeben sich, wenn man nebst den Lehren, welche das Studium über die einzelnen Effektverluste geliefert hat, auch noch einige Erfahrungen berücksichtiget. Wir beginnen nunmehr mit der Herleitung der Regeln.

Berechnung der Wassermenge. Wenn ein Wasserrad erbaut werden soll, ist entweder das Gefälle H oder die Wassermenge Q gegeben, oder es ist das Gefälle und der Nutzeffekt bekannt, welchen das Rad entwickeln soll. Im ersteren Falle ist also die Wassermenge, für welche das Rad eingerichtet werden soll, bekannt; im letzteren Falle muss sie aber erst gesucht werden. Nach der Wassermenge richtet sich vorzugsweise die Breite und Tiefe des Rades; diese Dimensionen können aber ohne merklichen Nachtheil für den Effekt innerhalb gewisser Grenzen variiren; es ist daher zu ihrer Bestimmung nicht nothwendig, die Wassermenge so ganz genau zu kennen, denn nehmen wir an, dass die Wassermenge um $\frac{1}{5}$ ihres wahren Werthes su gross oder zu klein angenommen wird, so hat dies zur Folge, dass im ersteren Falle Breite und Tiefe etwas grösser, und im letzteren Falle etwas kleiner ausfallen werden, als wenn man die richtige Wassermenge der Bestimmung der Breite und Tiefe zu Grunde gelegt hätte; dadurch entsteht aber noch kein merklicher Nachtheil, weil die Füllung des Rades ohne Nachtheil für den Effekt um $\frac{1}{5}$ ihres Normalwerthes variiren darf. Es ist daher für die Bestimmung der Dimensionen eines Rades hinreichend, wenn man die Wassermenge dadurch bestimmt, indem man den Nutzeffekt des Rades in Prozenten des absoluten Effektes der Wasserkraft ausdrückt. Da es aber immer besser ist, wenn man ein Rad etwas zu gross, als wenn man es etwas zu klein bestimmt, so ist es zweckmässig, die Prozente nicht zu günstig anzunehmen.

Nach den früheren Effektberechnungen dürfen wir das Verhältniss zwischen dem Nutzeffekt und dem absoluten Effekt der Wasserkraft annehmen für

das unterschlächtige Rad . . .	0·30	bis 0·35
„ Kropfrad	0·40	— 0·50
„ Poncelet'sche Rad	0·60	— 0·65
„ Ueberfall-Rad	0·60	— 0·65
„ Coulissenrad	0·65	— 0·70
„ rückschlächtige Rad . . .	0·60	— 0·70
„ oberschlächtige Rad . . .	0·60	— 0·70

Die Wassermenge, welche bei einem Rade in 1 Sekunde nothwendig ist, um einen Nutzeffekt von N_n Pferdekraft zu 75 Kil. M. zu erhalten, ist demnach

für das unterschlächtige Rad . .	$Q = 0{\cdot}210 \frac{N_n}{H}$	bis $0{\cdot}250 \frac{N_n}{H}$
„ „ Kropfrad	$Q = 0{\cdot}175 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}187 \frac{N_n}{H}$
„ „ Poncelet-Rad	$Q = 0{\cdot}115 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}125 \frac{N_n}{H}$
„ „ Ueberfall-Rad	$Q = 0{\cdot}115 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}125 \frac{N_n}{H}$
„ „ Coulissen-Rad	$Q = 0{\cdot}107 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}115 \frac{N_n}{H}$
„ „ rückschlächtige Rad . .	$Q = 0{\cdot}107 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}125 \frac{N_n}{H}$
„ „ oberschlächtige Rad . .	$Q = 0{\cdot}107 \frac{N_n}{H}$	„ $0{\cdot}125 \frac{N_n}{H}$

Wahl des Rades. Die Wahl der Mittel zur Erreichung eines Zweckes ist für jedes Unternehmen von der grössten Wichtigkeit. Wenn eine Einrichtung zur Benutzung einer Wasserkraft getroffen werden soll, bietet sich daher zunächst die Frage dar, ob eine Turbine oder ob ein Wasserrad genommen werden soll. Diese Frage kann aber erst dann gründlich beantwortet werden, wenn man sowohl die Wasserräder, als auch die Turbinen in jeder Hinsicht genau kennt und dadurch im Stande ist, die Vortheile und Nachtheile dieser beiden Anordnungen zuverlässig abzuwägen.

Wir müssen daher die Entscheidung dieser wichtigen Frage bis zum Schluss dieser Abhandlung über die Wasserräder verschieben, und wollen deshalb bis dahin von der Turbine ganz abstrahiren, wollen uns also so benehmen, als gäbe es gar keine Turbinen.

Bei dieser Einschränkung haben wir also gegenwärtig nur die Frage zu entscheiden, welche von allen Anordnungen von Wasserrädern in jedem gegebenen Falle die zweckmässigste sei. Es ist klar, dass es theils von der Wassermenge, vorzugsweise aber von der Grösse des Gefälles abhängt, ob man das eine oder das andere Rad wählen soll, und es kommt nur darauf an, diese Abhängigkeit genau zu bestimmen, d. h. die Grenzen anzugeben, innerhalb welcher sowohl das Gefälle als auch die Wassermenge liegen muss, wenn das eine oder das andere von den Rädern mit Vortheil soll angewendet werden können. Diese Grenzen lassen sich nur mit vieler Mühe befriedigend ermitteln, wenn man verschiedene Gefälle und für jedes Gefälle verschiedene Wasserquantitäten annimmt, sodann für jede dieser Wasserkräfte diejenigen Arten von Rädern konstruirt und berechnet, von welchen man vermuthen kann, dass sie zweckmässig ausfallen dürften. Durch Vergleichung der Gefälle und Wassermengen von den sich ergebenden guten Konstruktionen der gleichen Art lassen sich dann die Grenzen der zweckmässigsten Anwendbarkeit der verschiedenen Räder bestimmen. Dass man bei diesem Geschäfte auch die ausgeführten Räder berücksichtigen muss, bedarf kaum einer Erwähnung. Die Resultate, welche ich auf dem so eben bezeichneten Wege gefunden habe, können für die Uebersicht und für den praktischen Gebrauch am einfachsten graphisch dargestellt werden, was auf Tafel VI., Fig. 10 geschehen ist. Die horizontale Zahlenreihe bedeutet die in Metern ausgedrückten Gefälle, die vertikale Zahlenreihe die in Kubik-Metern ausgedrückten Wassermengen.

Die verschiedenen geraden und krummen Linien innerhalb der Grenzen der ganzen Figur sind die Grenzen der Anwendbarkeit der verschiedenen Arten von Rädern. Die krumme Linie A B bestimmt die grössten Wasserkräfte, welche noch durch ein einziges Rad nutzbar gemacht werden können.

Die Richtigkeit der Grenzbestimmung vorausgesetzt, ist es vermittelst dieser Karte ein Leichtes, in jedem speziellen Falle zu bestimmen, was für ein Rad gebaut werden soll. Man sucht nämlich vermittelst der horizontalen Zahlenreihe die Vertikallinie auf, welche dem gegebenen Gefälle entspricht und vermittelst der vertikalen Zahlenreihe die Horizontallinie, welche mit der gegebenen Wassermenge übereinstimmt; der Punkt, in welchem sich diese zwei Linien durchschneiden, liegt dann in dem Wasserkraftgebiet des zu wählenden Rades. Ist z. B. das gegebene Gefälle 3 Meter und die Wassermenge 1·5 Kubikmeter, so führen diese Daten auf einen Punkt in dem Gebiete des Coulissenrades. Ist das Gefälle 4·5 Meter und die Wassermenge 0·8 Kubikmeter, so wird man auf ein rückschlächtiges Rad geführt. Der Gebrauch dieser Karte unterliegt also durchaus keiner Schwierigkeit.

Zur Rechtfertigung dieser Grenzbestimmungen werden folgende Erklärungen dienen können.

Die Anwendbarkeit des unterschlächtigen Rades ist bis zu einem Meter Gefälle festgesetzt, weil erst von diesem Gefälle an eine Krümmung des Gerinnes von merklichem Vortheil sein kann.

Das Gebiet des Kropfrades hat hinsichtlich des Gefälles ziemlich enge Grenzen erhalten, weil für Gefälle, die grösser als 1·5 Meter sind und für Wassermengen unter 2 Kubikmetern das Ueberfallrad vortheilhafter ist. Das Kropfrad kann übrigens nur dann angewendet werden, wenn der Wasserstand im Zuflusskanale nicht sehr veränderlich ist.

Das Gebiet des Poncelet-Rades erstreckt sich über die Gebiete des unterschlächtigen und über einen Theil des Kropfrades. Das grösste Gefälle ist auf 1·7 Meter festgesetzt. *Poncelet* hat zwar der Gefällgrenze eine grössere Ausdehnung gegeben, allein es sind mehrere Gründe vorhanden, die darauf hinweisen, dass dieses Rad bei Gefällen über 1·7 Meter keine vortheilhafte Anordnung sein kann, denn 1) wird bei grossen Gefällen der Effektverlust von Bedeutung, welcher durch das Entweichen des Wassers durch den Spielraum zwischen dem Rade und dem Gerinne entsteht; 2) wird das Verhältniss zwischen der Breite des Rades und der Höhe der Radkrone unzweckmässig; 3) wird schon bei einem Gefälle von 1·7 Meter der Halbmesser des Rades wenigstens 3 Meter, bei noch grösserem Gefälle müsste also das Rad sehr gross und dadurch kostspieliger ausfallen, als andere Räder; 4) wenn einmal das Gefälle über 1·7 Meter ist, geben das Ueberfallrad und das Coulissenrad einen eben so guten, wo nicht besseren Effekt als das Poncelet'sche Rad.

Da das Poncelet'sche Rad zwar einen besseren Effekt gibt, als das unterschlächtige und das Kropfrad, aber kostspieliger ausfällt, als diese letzteren, so ist es statt diesen dann vorzuziehen, wenn die vorhandene absolute Wasserkraft nur bei sehr guter Verwendung zum Betriebe eines Werkes hinreichend werden kann. Ist aber der Wasserzufluss mehr als hinreichend, so kann man sich der hinsichtlich ihrer Konstruktion einfacheren Anordnungen des unter schlächtigen und Kropfrades bedienen.

Das Kraftgebiet des Ueberfallrades hat zwar keine grosse Ausdehnung, dessenungeachtet wird man doch sehr oft veranlasst sein, dieses Rad zu wählen, weil in seinem Kraftgebiete diejenigen Wasserkräfte liegen, welche am häufigsten in der Praxis zu benutzen sind.

Nach der Karte hört die Anwendbarkeit des Ueberfallrades auf bei Wassermengen über 2·5 Kub. M. Der Grund hiervon liegt in dem Umstande, dass bei Wassermengen über 2·5 Kub. M. ein Coulisseneinlauf eine bessere Leitung des Wassers bewirkt, als ein freier Ueberfall.

Aus der Karte sieht man ferner, dass für das Ueberfallrad das grösste Gefälle auf 2·5 Meter bestimmt worden ist, dies ist aus dem Grunde geschehen, weil für grössere Gefälle entweder das oberschlächtige Rad oder das Rad mit Coulisseneinlauf zweckmässiger ist. Ist nämlich das Gefälle grösser, als 2·5 Meter und die Wassermenge kleiner als ungefähr 0·3 Kub. M., so ist das oberschlächtige Rad die am wenigsten kostspielige Anordnung. Ist das Gefälle grösser als 2·5 Meter und die Wassermenge grösser als 0·3 Meter, so muss man das Rad mit Coulisseneinlauf jenem mit freiem Ueberfall vorziehen, weil dann bei diesem letzteren der Halbmesser des Rades sehr gross gemacht werden müsste, wo hingegen bei Anwendung von Coulissen das Rad viel kleiner gehalten werden kann.

Die Grenzen für das Gebiet des Schaufelrades mit Coulisseneinlauf sind für das Gefälle 2·5 Meter bis 4·5 Meter, für die Wassermenge 0·3 bis 2·4 Kub. M. Dem Mittelpunkt des Gebietes entspricht ein Gefälle von ungefähr 3·5 Meter und eine Wassermenge von 1·2 Kub. M.

Die unterste Grenze für die Wassermenge ist durch den Umstand bestimmt worden, dass für Wassermengen unter 0·3 Kub. M. bei Gefällen über 2·5 Meter bereits das sehr wohlfeile oberschlächtige Rad angewendet werden kann. Die äusserste Gefällsgrenze ist nicht über 4·5 Meter angenommen worden, weil von da an das rückschlächtige Zellenrad vortheilhafter zu werden beginnt, als das Schaufelrad.

Das Gebiet des rückschlächtigen Rades liegt zwischem dem Gebiete des vorhergehenden Rades und jenem des oberschlächtigen. Die Gefällgrenzen sind ungefähr 2·5 und 8 Meter, die Grenzen der Wassermenge 0·4 bis 1·3 Kub. M. Dem Mittelpunkte des Gebiets entspricht ein Gefälle von 5·5 Meter und eine Wassermenge von 0·8 Kub. M. Für Wasserkräfte, welche in dieses Gebiet fallen, ist das Schaufelrad mit Coulisseneinlauf nicht anwendbar, weil bei demselben der Wasserverlust durch den Spielraum zwischen den Schaufelkanten und dem Gerinne zu gross ausfällt und das oberschlächtige Wasserrad ist hier nicht zu empfehlen, 1) weil es nicht ventilirt werden kann, was bei grösseren Wasserquantitäten ein bedeutender Uebelstand ist, 2) weil gewöhnlich bei grösserem Wasserzufluss der Wasserstand im oberen Kanale veränderlich ist, was sich mit der Anwendung eines oberschlächtigen Rades nicht verträgt.

Das Gebiet des oberschlächtigen Rades hat hinsichtlich des Gefälles eine sehr grosse Ausdehnung erhalten. Diese Anordnung ist im Allgemeinen wohlfeiler, als jede andere und gibt, wenn das Gefälle nur nicht zu klein ist, immer einen guten Effekt; es ist daher in jeder Hinsicht Grund vorhanden, das Gebiet seiner Anwendbarkeit möglichst auszudehnen. Die Gefällsgrenze beginnt schon bei 2·5 Meter und erstrekt sich bis zu 12 Meter. Die Grenzen der Wassermenge sind 0·3 und 0·8 Kub. M. Es ist schon oben gesagt worden, weshalb das oberschlächtige Rad im Allgemeinen für grosse Wassermengen nicht zu empfehlen ist.

Die Linie A B für die grösste absolute Wasserkraft, welche noch mit einem Rade nutzbringend gemacht werden kann, bezieht sich auf 80 absolute Pferdekräfte. Für Wasserkräfte über 80 Pferdekraft fallen die Dimensionen der Räder immer so kolossal aus, dass es in diesem übrigens nur ausnahmsweise vorkommenden Falle immer zweckmässiger ist, zwei Räder anzuwenden. Uebrigens versteht es sich von selbst, dass man auch in dem Falle zwei oder mehrere Räder statt einem bauen wird, wenn ein System von Arbeitsmaschinen zu betreiben ist, die nicht gut miteinander arbeiten können, wie dies z. B. in Eisenwerken der Fall ist.

Für die Wasserkräfte, welche den Grenzlinien der Kraftgebiete entsprechen, hat man unter 2 oder 3 Rädern zu wählen. Für die Wasserkraft der Grenzlinie zwischen dem Gebiete des oberschlächtigen Rades und den Gebieten des Ueberfall- und Kübelrades mit Coulisseneinlauf ist das erstere dieser Räder eine wohlfeilere Anordnung, die beiden letzteren sind aber hinsichtlich des Nutzeffekts besser. Für die Wasserkräfte, welche den übrigen Grenzlinien entsprechen, ist es dagegen in jeder Hinsicht ziemlich gleichgültig, welches von den diesen Grenzen zugehörigen Rädern man auswählt.

Sowohl die sehr kleinen, als auch die sehr grossen Gefälle sind in der Regel für die Einrichtung eines Wassertriebwerkes nicht so vortheilhaft, als die mittleren Gefälle. Bei kleinen Gefällen bis zu 2 Meter sind gewöhnlich die Wasserquantitäten sehr gross, der ganze Bau und insbesondere die Kanalleitung wird daher voluminös und kostspielig und die Nutzeffekte sind in diesem Falle nicht sehr günstig. Bei grossem Gefälle über 6 Meter wird das Rad sehr gross, erhält einen langsamen Gang, wodurch oft mehrere kostspielige und krafterschöpfende Räderübersetzungen nothwendig werden und die Herstellung eines hohen Zuleitungskanals ist auch in der Regel mit mancherlei Kosten und Schwierigkeiten verbunden. Mittlere Gefälle von 2 bis 4 Meter geben gewöhnlich für kleinere Triebkräfte bis zu 16 Pferden und Gefälle von 3 bis 6 Meter für grössere Triebkraft über 16 Pferde die zweckmässigste Einrichtung. Die Wasserleitungen werden bei diesen Gefällen weder sehr lang noch sehr hoch, noch sehr weit, fallen daher in jeder Hinsicht günstig aus, und die Wasserräder erhalten eine mässige Grösse, ziemlich schnellen Gang und geben einen guten Effekt. Wenn man also zwischen mehreren Wasserkräften auswählen kann, wird man in der Regel den mittleren Gefällen von 3 bis 6 Meter den Vorzug geben müssen.

Umfangsgeschwindigkeit der Räder. Bei dem unterschlächtigen und Poncelet'schen Rade wird die vortheilhafteste Umfangsgeschwindigkeit durch das Gefälle bestimmt; bei den übrigen Rädern ist sie dagegen unabhängig vom Gefälle, und kann ohne Nachtheil ziemlich constant angenommen werden.

Wenn bei dem unterschlächtigen Rade keine Wasserverluste vorkämen, wäre die vortheilhafteste Umfangsgeschwindigkeit halb so gross, als die Geschwindigkeit des ankommenden Wassers, wegen dieser Wasserverluste fällt sie aber kleiner aus und beträgt nur 0·35 bis 0·4 von der Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser ankommt.

Bei den Schaufelrädern mit Kreisgerinnen richtet sich streng genommen die vortheilhafteste Geschwindigkeit nach der Genauigkeit ihrer Ausführung. Wenn der Spielraum zwischen den Schaufelkanten und dem Gerinne sehr klein ist, ist es vortheilhaft, das Rad sehr langsam gehen zu lassen, ist dieser Spielraum gross, so ist ein schneller Gang des Rades besser. Wenn die Räder und die Gerinne immer vollkommen rund und concentrisch bleiben würden, könnte man diesen Spielraum sehr klein halten, z. B. 0·01 bis 0·015 Meter, weil aber dies nicht der Fall ist, so muss man schon von vornherein daran denken, dass durch die mit der Zeit unvermeidlich eintretenden Formveränderungen kein Anstreifen der Schaufelkanten an das Gerinne eintritt; man muss daher jenen Spielraum 0·02 Meter annehmen, wodurch wegen des Entweichens von Wasser ein Effektverlust von 10 bis 14 Prozent entsteht. Die vortheilhafteste Umfangsgeschwindigkeit ist für diesen Spielraum ungefähr 1·2 Meter, es entsteht aber für den Effekt gar kein merklicher Nachtheil, wenn man sie, um einen etwas schnelleren Gang des Rades zu erhalten, etwas grösser annimmt; insbesondere gilt dies für Räder mit Coulisseneinlauf, weil bei diesen das Schlagen der Schaufeln gegen das Wasser bei ihrem Eintritt in den Strahl durch die Stellung der Coulissen beseitigt werden kann. Wir können daher nehmen:

für das Kropfrad . . . . $v = 2{\cdot}0^m$
„ „ Ueberfallrad . . . . . $v = 1{\cdot}4^m$
„ „ Coulissenrad . . . . . . $v = 1{\cdot}6^m$

Bei dem rückschlächtigen Zellenrad mit Coulisseneinlauf ist der durch das Entweichen des Wassers entstehende Effektverlust bedeutend kleiner als bei den Schaufelrädern, in dieser Hinsicht könnte allerdings bei jenem Rade die Umfangsgeschwindigkeit kleiner angenommen werden, als bei diesen Rädern. Allein der Vortheil, der dadurch hinsichtlich des Effektes erreicht werden kann, ist von keiner Bedeutung, und wird durch den Nachtheil aufgehoben, dass unter sonst gleichen Umständen durch eine kleine Geschwindigkeit Breite und Tiefe des Rades grösser ausfallen, wodurch die Kosten des Baues vermehrt werden. Wir dürfen daher auch für das rückschlächtige Zellenrad mit Coulisseneinlauf $v = 1{\cdot}5$ Meter annehmen.

Für das oberschlächtige Rad ist die für den Nutzeffekt vortheilhafteste Umfangsgeschwindigkeit äusserst klein; aber gleichwohl ist es auch hier wiederum zweckmässiger, sie grösser anzunehmen, weil dadurch der Effekt nicht merklich, die Kosten des Rades aber bedeutend vermindert werden; denn wenn das Rad sehr langsam geht, muss es breit und tief gemacht werden, um die Wassermenge fassen zu können.

Die numerischen Berechnungen zeigen, dass die Nutzeffekte oberschlächtiger Räder immer noch ganz günstig ausfallen, wenn man nimmt:

bei oberschlächtigen Rädern für kleinere Gefälle $v = 1{\cdot}3$ bis $1{\cdot}5$ Meter
„ „ „ „ grössere „ $v = 1{\cdot}5$. „

Halbmesser der Räder Bei dem oberschlächtigen Rade wird der Halbmesser durch das Gefälle bestimmt, bei den übrigen Rädern sollte der Halbmesser hinsichtlich des Effektes möglichst gross genommen werden.

Ein grosser Halbmesser ist vortheilhaft:

a) bei dem unterschlächtigen Rade, weil dann die Schaufeln vom Eintritt an bis zum Austritt fast eine vertikale Stellung haben können.

b) Bei dem Kropfrade, Ueberfallrade und bei den zwei Coulissenrädern, weil, wenn der Halbmesser gross ist, das Wasser immer nur wenig aus der Richtung seiner Bewegung im Zuleitungskanal abgelenkt zu werden braucht, um unter einem ziemlich kleinen Winkel gegen den Umfang des Rades anzukommen.

Obgleich es aber einerseits keinem Zweifel unterliegt, dass mit der Grösse des Halbmessers der Nutzeffekt fortwährend wächst, so ist anderseits auch leicht einzusehen, und die genauen theoretischen Untersuchungen haben es auch gezeigt, dass die Zunahme des Effektes mit der Vergrösserung des Halbmessers nur höchst unbedeutend ist, so wie einmal der Halbmesser eine gewisse Grösse erreicht hat. Da überdies die Kosten eines Rades mit dem Halbmesser ungefähr proportional zunehmen, so muss man, um eine, sowohl hinsichtlich des Effektes, als auch hinsichtlich der Kosten vortheilhafte Konstruktion zu erhalten, die kleinsten Halbmesser wählen, mit welchen bereits eine gute Wirkung hervorgebracht werden kann.

Die Halbmesser, welche bei den besser ausgeführten Rädern angetroffen werden, erfüllen diese Bedingung, was durch numerische Berechnungen derjenigen Glieder in den Ausdrücken für den Effekt, welche von dem Halbmesser der Räder abhängen, bewiesen werden kann; wir können uns daher zur Aufstellung von Regeln für den Halbmesser der Räder an die Erfahrung halten.

Die unterschlächtigen Räder haben je nach der Grösse des Effektes, welchen sie entwickeln, und je nachdem die Lokalitätsverhältnisse sind, Halbmesser von 2 Meter, 3 Meter bis 4 Meter.

Für den Halbmesser aller übrigen Räder kann man den allgemeinen Ausdruck aufstellen:

$$R = \frac{H + t - \frac{V^2}{2\,g}}{1 - \cos\gamma}$$

wobei t die Tauchung der Schaufeln im Unterwasser bedeutet.

Wenn aber diese Formel praktisch brauchbare Werthe von R liefern soll, muss man für $t - \frac{V^2}{2\,g}$ und insbesonder für γ solche Annahmen machen, dass die Werthe von R ungefähr so gross ausfallen, wie man es für die Ausführung wünschen muss; diese Formel ist daher zur Bestimmung von R von keinem praktischen Werthe, und es ist zweckmässiger, sie gar nicht zu gebrauchen, und lieber gleich die Halbmesser R so anzunehmen, wie man sie haben will. Folgende empirische Regeln, welche aus der Vergleichung der ausgeführten Räder entstanden sind, führen am einfachsten zum Ziele.

Für das Kropfrad nehmen wir:

$$R = 1{\cdot}5\ H \text{ bis } 2{\cdot}5\ H$$

Für das Ueberfallrad

$$R = 1{\cdot}25\ H \text{ bis } 1{\cdot}5\ H$$

Für das Schaufelrad mit Coulisseneinlauf

$$R \text{ ungefähr } = H$$

Für das rückschlächtige Rad

$$R = \frac{2}{3}\ H$$

Nach dieser letzten Regel ist der Punkt, in welchem die Verlängerung des Wasserspiegels im Zuflusskanal dem Umfang des Rades begegnet, um 60° vom Scheitel des Rades entfernt. Man findet zwar auch rückschlächtige Räder, bei welchen diese Entfernung kleiner als 60° ist, allein wenn dieser Winkel so klein genommen wird, ist es rein unmöglich, den Coulisseneinlauf gut zu konstruiren, weil dann das Wasser zu stark von der Richtung, die es im Zuflusskanal verfolgt, abgelenkt werden muss, um in die Zellen zu gelangen, ohne von den äusseren Wänden derselben geschlagen zu werden.

Für das oberschlächtige Rad hat man, wenn dasselbe die Oberfläche des Wassers im Abflusskanal im tiefsten Punkt berührt:

$$R = \frac{1}{2}\left(H - \frac{V^2}{2\ g}\right)$$

Weil das oberschlächtige Rad nicht ventilirt werden kann, so muss man dafür sorgen, dass die Luft, welche in den Zellen vor ihrer Füllung enthalten ist, während der Füllung durch den Schluck der Zellen entweichen kann, was nur dann möglich ist, wenn die Dicke des eintretenden Strahls kleiner ist als die Schluckweite. Wenn man die Geschwindigkeit $V = 2\ v$, demnach doppelt so gross annimmt, als die Umfangsgeschwindigkeit, und wenn man für die Breite des Rades und für den Zellenbau die später folgenden Regeln befolgt, so fällt die Dicke des Strahles nahe halb so gross aus, als die Schluckweite; es bleibt also dann für das Entweichen der Luft hinreichend freier Raum übrig. Für diese Geschwindigkeit

$V = 2v$ fällt allerdings das Stossgefälle ziemlich gross aus, allein der Nachtheil, welcher dadurch entsteht, ist doch nicht so gross, als wenn das Wasser verhindert wird, in das Rad einzutreten. Wir nehmen also $V = 2v$ und erhalten dann:

$$R = \frac{1}{2}\left(H - 4\frac{v^2}{2g}\right)$$

Breite und Tiefe der Räder. Diese beiden Dimensionen sind von besonderer Wichtigkeit, weil von denselben sowohl der Nutzeffekt als auch die Baukosten des Rades sammt Gerinne abhängeu. Es ist zunächst klar, dass das Rad hinreichend geräumig sein muss, um die Wassermenge fassen zu können, welche auf dasselbe in 1 Sekunde zu wirken hat. Nun ist die Wassermenge, welche ein Schaufel- oder Zellenraum aufzunehmen hat, $Q\frac{e}{v}$ und das Volumen eines solchen Raumes ist $a\,b\,e$, wenn also das Rad die Wassermenge Q soll fassen können, muss sein: $a\,b\,e > Q\frac{e}{v}$ oder:

$$a\,b\,v > Q$$ Siehe: pag. 73

d. h. der Raum, welchen eine Schaufel oder Zelle in 1 Sekunde beschreibt, muss grösser sein, als das Wasservolumen, welches in 1 Sekunde auf das Rad wirken soll. Setzen wir:

$$\frac{Q}{a\,b\,v} = m$$

so bedeutet m den Füllungscoeffizienten.

Was die Werthe von m anbelangt, so sind diese für jedes Rad besonders zu bestimmen. Bei allen Schaufelrädern der älteren Art darf man in der Regel $m = \frac{1}{2}$ nehmen, so dass die Schaufelräume zur Hälfte mit Wasser gefüllt werden. Eine schwächere Füllung anzunehmen, ist bei diesen Rädern nicht gut, weil sie dann breiter ausfallen und dadurch einen grösseren Wasserverlust durch den Spielraum zwischen den Schaufelkanten und dem Gerinne verursachen. Eine stärkere Füllung ist auch nicht gut, weil dann leicht durch die Luftspalten eine beträchtliche Wassermenge entweicht.

Bei den Kübelrädern kann man dagegen eine schwache Füllung annehmen, weil sie dann das Wasser erst tief unten entleeren, was natürlich für den Effekt vortheilhaft ist. Wir nehmen daher für diese Räder $m = \frac{1}{3}$ bis $m = \frac{1}{4}$, so dass also die Zellen nur bis auf $^1/_3$ oder $^1/_4$ ihres Raumes mit Wasser erfüllt werden.

Nun müssen wir noch eine neue Beziehung zwischen den in obiger Gleichung enthaltenen Grössen ausfindig zu machen suchen, um a und b bestimmen zu können.

Die Vergleichung der Dimensionen der ausgeführten Räder mit den Wassermengen zeigt, dass bei den Schaufelrädern die Breite für jeden Kubikmeter Wasserzufluss, im Mittel genommen, 2 Meter bis 2·5 und bei Kübelrädern 5 bis 5·5 Meter beträgt. Dies sind aber nur mittlere Werthe, welche nicht gut gebraucht werden können, um darnach die Dimensionen von grossen und kleinen Rädern zu bestimmen; indem nach dieser Regel die Tiefe a bei allen Schaufelrädern, so wie auch bei allen Kübelrädern gleich gross ausfiele, was offenbar unzulässig ist.

Eine andere Vergleichung zwischen jenen Rädern hat mich auf die Vermuthung gebracht, dass das Verhältniss $\frac{b}{a}$ in einer gewissen Beziehung stehen dürfte zu dem in Pferdekräften ausgedrückten absoluten Effekt der Wasserkraft N_a.

Um diese Vermuthung zu prüfen, und wenn sie sich bestätigen sollte, die Abhängigkeit zwischen $\frac{b}{a}$ und N_a ausfindig zu machen, habe ich die Werthe von N_a als Abscissen und die correspondirenden Werthe von $\frac{b}{a}$ als Ordinaten aufgetragen. Die auf diese Weise bestimmten Punkte stellten sich als zwei Reihenfolgen dar, die eine den Schaufelrädern, die andere den Kübelrädern angehörig, und die mittleren durch diese Reihenfolgen gezogenen krummen Linien stimmten sehr nahe mit zwei kubischen Parabeln überein.

Für die Parabel, welche den Schaufelrädern angehört, ist:

$$\frac{b}{a} = 1·75 \sqrt[3]{N_a}$$

Für die Parabel, welche den Kübelrädern angehört:

$$\frac{b}{a} = 2·25 \sqrt[3]{N_a}$$

Diese empirischen Formeln in Verbindung mit dem früher aufgefundenen Resultate, geben uns nun zur Bestimmung von a und b für die älteren Räder folgende Regeln.

Um für ein Schaufelrad b und a zu finden, berechne man zuerst das Verhältniss:

$$\frac{b}{a} = 1·75 \sqrt[3]{N_a}$$

dann findet man:

$$b = \sqrt{\frac{Q}{m\,v}\left(\frac{b}{a}\right)}$$

wobei in der Regel $m = \frac{1}{2}$ und v so zu nehmen ist, wie früher erklärt wurde. Dividirt man dann diesen Werth von b durch den berechneten Werth von $\frac{b}{a}$, so erhält man auch a.

Zur Bestimmung von a und b für ein Kübelrad berechne man

$$\frac{b}{a} = 2{\cdot}25\ \sqrt[3]{N_a}$$

und dann findet man:

$$b = \sqrt{\frac{Q}{m\,v}\left(\frac{b}{a}\right)}$$

wobei $m = \frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ zu setzen ist, und dann findet man auch a wie bei den Schaufelrädern.

Anzahl und Form der Schaufeln und Zellen. Eine grosse Anzahl von Schaufeln oder Zellen ist für alle Räder vortheilhaft.

Bei dem unterschlächtigen Rade hängt von der Anzahl der Schaufeln die Wassermenge ab, welche zwischen den Schaufeln entweicht, ohne irgend eine Wirkung hervorzubringen. Auch die Wassermenge, welche unter dem Rade durch den Spielraum zwischen den Schaufelkanten und dem Gerinne entweicht, richtet sich zum Theil nach der Schaufeltheilung. Diese Wasserverluste vermindern aber bei etwas grosser Schaufeltheilung den Nutzeffekt so bedeutend, dass es sehr wichtig ist, die Theilung nicht zu gross anzunehmen. Man kann zwar diesen Verlusten durch eine gewisse Konstruktion des Gerinnes theilweise begegnen, eine enge Schaufelung ist aber doch immer das beste Mittel gegen diesen Uebelstand.

Bei dem Kropfrad, Ueberfallrad, Coulissenrad und rückschlächtigen Rade sind zwei wichtige Gründe vorhanden, welche für eine enge Theilung sprechen: 1) wird durch eine enge Schaufeltheilung der Wasserverlust vermindert, welcher durch den Spielraum zwischen den Schaufeln und dem Gerinne stattfindet und 2) wird dadurch das Stossgefälle vermindert. Die Effektverluste, welche aus diesen zwei Gründen entstehen, werden bei einer grossen Schaufeltheilung sehr bedeutend, es unterliegt also keinem Zweifel, dass bei diesen Rädern eine enge Theilung gut ist.

Bei dem oberschlächtigen Rade hat zwar die Schaufeltheilung nur einen sehr geringen Einfluss auf den Effektverlust, welcher bei dem Eintritt des Wassers in das Rad entsteht (es ist sogar in dieser Hinsicht eine grössere Theilung gut, weil dann der Schluck weit wird, so dass die Luft leicht entweichen kann), allein wenn die Theilung gross ist, beginnt die Entleerung der Zellen viel früher, als wenn sie klein ist, es ist also auch bei diesem Rade eine enge Theilung für einen guten Effekt nothwendig.

Es gilt also für alle Räder ohne Ausnahme der Grundsatz, dass die Schaufeltheilung möglichst klein sein soll. Der Verwirklichung desselben stehen aber praktische Schwierigkeiten im Wege. Räder mit Blechschaufeln werden dann theils wegen des grossen Materialaufwandes, theils wegen der vielen Verbindungen kostspielig. Bei hölzernen Schaufelrädern werden die Radkränze, wenn eine grosse Anzahl Schaufeln genommen wird, durch die vielen Schaufelarme, welche in die Kränze eingesetzt sein müssen, zu sehr geschwächt. Bei den Kübelrädern, sie mögen nun von Holz oder von Eisen konstruirt sein, wird gewöhnlich, selbst wenn man eine ziemlich grosse Theilung annimmt, die Anzahl der Schaufeln so gross, dass ihre Ausführung ungemein viele Arbeit verursacht, und überdies kann man bei diesen Rädern durch hinreichende Breite und geringe Füllung den Zweck, um den es sich hier handelt, besser erreichen, als durch eine übermässig grosse Schaufelzahl, weil durch diese die Schluckweite zu eng ausfällt. Nur bei den eisernen Schaufelrädern ist keine wesentliche Schwierigkeit für die Anwendung einer grossen Anzahl Schaufeln vorhanden, weil da die Schaufelarme an die Kränze angegossen und die Schaufeln selbst von Holz gemacht werden.

In Erwägung dieser Umstände muss man den früher ausgesprochenen Grundsatz dahin modifiziren, dass die Anzahl der Schaufeln so gross genommen werden soll, als es die Konstruktionsverhältnisse einerseits, und die ökonomischen Rücksichten anderseits gestatten.

Durch eine Vergleichung der ausgeführten Räder hinsichtlich der Schaufeltheilung habe ich für diese Grösse folgende praktische Formel gefunden:

$$e = 0{\cdot}2 + 0{\cdot}7\ a$$

Nimmt man diese Regel an, so ergibt sich die für die Ausführung geeignete Anzahl der Schaufeln, indem man den Quotienten

$$\frac{2\ R\ \pi}{0{\cdot}2 + 0{\cdot}7\ a}$$

berechnet und die demselben nächst ganze durch die Anzahl der

Radarme eines Armsystems theilbare Zahl annimmt. Diese Anzahl der Radarme ist aber, wie später gezeigt werden wird,

$$2 (1 + R)$$

Form und Stellung der Schaufeln bei dem unterschlächtigen Rade. Gewöhnlich werden bei diesem Rade ebene, radial gestellte Schaufeln angewendet, wodurch insbesondere bei hölzernen Rädern die Ausführung sehr vereinfacht wird. Diese Anordnung der Schaufeln ist aber aus zwei Ursachen für den Nutzeffekt nicht vortheilhaft, denn 1) wirkt dann das Wasser rein nur durch Stoss, indem es senkrecht gegen die Schaufeln hinschlägt, und 2) werfen radial gestellte Schaufeln bei ihrem Austritt Wasser in die Höhe. Diese beiden Uebelstände können wenigstens theilweise beseitigt werden, wenn ebene aber gegen den Radius in der Art geneigte Schaufeln angewendet werden, dass sie beim Austritt oder erst nach demselben eine vertikale Stellung haben. Bei solchen Schaufeln wirkt das Wasser beim Eintritt in das Rad nur theilweise durch Stoss, nämlich mit der gegen die Schaufel senkrechten relativen Geschwindigkeit; dagegen gleitet es mit der zur Schaufel parallel relativen Geschwindigkeit an derselben hinauf, bis es diese Geschwindigkeit verloren hat, gleitet dann wiederum nieder und erreicht das untere Ende mit einer absoluten Geschwindigkeit, welche die Resultirende ist 1) aus der relativen Geschwindigkeit, mit welcher es nach dem Herabgleiten das äussere Ende der Schaufel erreicht, 2) aus der Umfangsgeschwindigkeit des Rades. Während des Auf- und Abgleitens wirkt das Wasser rein nur durch Druck, wie bei dem Poncelet-Rade, und es ist bei der strengen Theorie dieses Rades nachgewiesen worden, dass die Summe der Wirkungen, die das Wasser durch den partiellen Stoss und durch den darauf folgenden, während des Auf- und Niedergleitens anhaltenden Druck hervorbringt, grösser ist, als diejenige, welche durch einen totalen Stoss gegen radial gestellte Schaufeln hervorgebracht wird. Dass diese ebenen, schief gestellten Schaufeln bei ihrem Austritt kein Wasser in die Höhe werfen, ist für sich klar.

Man könnte vielleicht meinen, dass man durch solche ebene Schaufeln, wenn man sie so schief stellte, dass das Wasser ohne Stoss in dieselben eintreten würde, ganz die gleiche Wirkung hervorbringen könnte, wie bei dem Poncelet'schen Rade durch die cylindrisch gekrümmten Schaufeln. Bei genauer Betrachtung zeigt sich aber, dass zwei Gründe vorhanden sind, weshalb schiefgestellte ebene Schaufeln nicht eine eben so gute Wirkung hervorbringen können, als zweckmässig gekrümmte Schaufeln. Der eine Grund liegt in dem Umstande, dass die Schaufelräume bei stark gegen den Radius geneigten Schaufeln nach innen zu keilförmig verengt werden, also eine Form erhalten, die gerade das Gegentheil ist von derjenigen Form, welche die in einen Schaufelraum eintretende Wassermenge anzunehmen sucht; denn diese letztere ist ebenfalls ein Keil, aber mit einer nach unten gerichteten Spitze. Das Wasser würde also beim Aufwärtsgleiten zuletzt gegen die beiden Schaufeln, welche einen Schaufelraum bilden, anschlagen und dabei an Geschwindigkeit verlieren, ohne dass eine nützliche Wirkung entstünde, indem die der Richtung nach einander sehr nahe entgegengesetzten und ihrer Intensität nach gleich starken Schläge gegen die beiden Schaufeln sich aufheben. Der zweite Grund liegt in dem Umstande, dass bei ebenen, stark gegen den Radius geneigten Schaufeln die Zeit einer vollständigen Auf- und Niederoscillation eines Wassertheilchens grösser ausfallen würde, als die Zeit von dem Eintritt einer Schaufel bis zu ihrem Austritt; die Wassertheilchen würden also das äussere Ende der Schaufel erst dann erreichen, nachdem dieselbe bereits aus dem Wasser getreten wäre, was einen Gefällsverlust zur Folge hätte.

Diese beiden so eben angedeuteten Uebelstände würden allerdings durch einen sehr grossen Halbmesser des Rades grösstentheils beseitigt werden können, allein dieses Mittel ist nicht zulässig, indem es zu einer kostspieligen Konstruktion führt, man kann also mit einem Rade, das einen mässig grossen Halbmesser und schiefgestellte ebene Schaufeln hat, nicht einen eben so günstigen Effekt hervorbringen, als mit einem Poncelet-Rade, allein desshalb ist kein Grund vorhanden, die erstere Anordnung ganz zu verwerfen, denn wenn man den ebenen Schaufeln gegen den Radius des Rades eine mittlere Neigung von ungefähr 45° gibt, tritt das Wasser nur mit schwachem Stosse ein, die Schaufelräume werden nun nicht zu eng, und die Oscillationszeit fällt nicht zu gross aus; man darf also bei dieser Stellung der Schaufeln gewiss einen merklich bessern Effekt erwarten, als bei dem unterschlächtigen Rade mit radial gestellten Schaufeln.

Form und Stellung der Schaufeln bei den mittelschlächtigen Rädern. Bei diesen Rädern haben die Schaufeln die Bestimmung, das in sie hereinstürzende Wasser aufzufangen und ihm seine relative Geschwindigkeit gegen die Schaufeln zu entziehen. Für den Eintritt des Wassers in das Rad ist es siso ziemlich gleichgültig, wie die Schaufeln geformt sind, nur dürfen sie dem Eintritt nicht hinderlich und nicht sackförmig sein, weil sonst das Wasser zu tief hinabstösst, was zur Folge hat, dass der Theil des Gefälles, durch welchen das Wasser durch sein Gewicht wirkt, vermindert wird. Hinsichtlich des Eintritts würden also ebene, radial gestellte Schaufeln ganz dem Zweck entsprechend sein. Weil aber die Schaufeln im Unterwasser so tief tauchen sollen, dass der Wasserspiegel in dem untersten Schaufelraume und im Abzugskanal gleich hoch stehen, so ist es gut, wenn der äussere Theil der Schaufeln nicht radial, sondern in der Art schief gestellt wird, dass derselbe bei dem Austritt eine vertikale Stellung hat.

Hiernach ergibt sich nun für die Verzeichnung solcher Schaufeln folgende Regel:

Man mache, Tafel VI., Fig. 11, $AC = \frac{1}{4} AB = \frac{1}{4} a$, $AD = \frac{1}{2} AB = \frac{1}{2} a$, ziehe durch D eine Horizontallinie DE und durch C den mit dem äusseren Umfang des Rades concentrischen Kreisbogen CE, sodann ziehe man durch E die Vertikallinie EF und die radiale Linie EG, so ist FEG die Form und Stellung einer Schaufel. Zur Verzeichnung aller übrigen Schaufeln ist es bequem, wenn man sich des Kreises K bedient, an welchen die Verlängerungen der äusseren Theile aller Schaufeln tangiren müssen. Die Verzeichnung der übrigen Schaufeln bedarf sonst keiner weiteren Erklärung.

Damit das Wasser ungehindert in den Schaufelraum eintreten kann, ist es aber noch nothwendig, dass im Boden des Rades für jeden Schaufelraum eine Spalte angebracht wird, durch welche die Luft entweichen kann, während das Wasser eintritt. So wie nämlich die nachfolgende von den beiden Schaufeln, welche einen Schaufelraum bilden, in den Wasserstrahl eingetreten ist, kann aus diesem Schaufelraum am äussern Umfang des Rades keine Luft mehr entweichen; ist also im Radboden keine Luftspalte vorhanden, so wird die eingesperrte Luft comprimirt, wodurch sie, so wie die Füllung allmälig zunimmt, das Einströmen des Wassers immer mehr und mehr verhindert und sogar, wenn der Wasserstrahl eine bedeutende Dicke hat, ganz aufhebt; denn wenn die Luft nur um $^1/_{10}$ comprimirt wird, kann sie bereits einer Wassersäule von 1 Meter Höhe das Gleichgewicht halten; das Einströmen hört also dann schon auf. Eine Ventilation der Schaufelräume ist um so nothwendiger, je kleiner die Schaufeltheilung ist im Vergleich mit der auf dem Umfange des Rades gemessenen Dicke des Strahls, denn wenn die Schaufeltheilung sehr gross ist im Vergleich zur Dicke des Strahls, dauert die Absperrung des Schaufelraums durch den Strahl nur sehr kurze Zeit, findet aber das Gegentheil statt, so dauert diese

Absperrung verhältnissmässig sehr lange. Man sieht also, dass eine enge Schaufeltheilung nur dann die Vortheile gewährt, von welchen früher die Rede war, wenn die Schaufelräume ventilirt, d. h. mit Luftspalten versehen werden. Uebrigens muss die Ventilation noch so angeordnet werden, dass durch dieselbe kein Wasser entweichen kann.

Form und Stellung der Zellen bei dem rückschlächtigen Rade. Bei den Zellen der rückschlächtigen Räder darf der Winkel, unter welchem die äussere Zellenwand den äusseren Umfang des Rades durchschneidet, nicht zu klein sein, weil sonst die Winkel, unter welchen die Coulissen dem Umfang des Rades begegnen müssen, damit das Wasser, ohne gegen die Wände zu schlagen, in die Zellen eintreten kann, gar zu klein ausfallen, wodurch die zwei Nachtheile entstehen, dass 1) das Wasser sehr stark aus der horizontalen Richtung seiner Bewegung im Zuflusskanal abgelenkt werden muss, um die Richtung der Coulissen anzunehmen, und dass 2) die auf dem Umfang gemessene Dicke des eintretenden Wasserstrahles, folglich auch das Stossgefälle, sehr gross ausfällt.

Wird der Winkel β etwas gross angenommen, so beginnt zwar die Entleerung der Zellen etwas früher, als wenn der Winkel β klein ist, allein der Nachtheil, welcher hierdurch entstehen würde, kann durch eine schwache Füllung der Zellen und insbesondere durch Anwendung eines Kreisgerinnes ganz beseitigt werden. In der Voraussetzung, dass man das Rad nicht mehr als auf $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ füllt, und dass ein Kreisgerinne angewendet wird, kann man bei einem grösseren Rade mit hölzernen Zellen die Konstruktion, Tafel VI., Fig. 12, bei einem kleinen Rade mit hölzernen Zellen die Konstruktion Fig. 13, endlich bei einem Rade mit Blechschaufeln die Konstruktion Fig. 14 mit Vortheil anwenden.

In diesen drei Figuren ist $A\,B$ der äussere, $A_1\,B_1$ der innere Umfang des Rades, $\mathfrak{A}\,\mathfrak{B}$ ist ein Hilfskreis, welcher von den beiden andern Kreisen gleich weit absteht, $c\,c_1$ ist die Schaufeltheilung. Sind diese drei Kreise verzeichnet, und ist auf dem äusseren die Schaufeltheilung gemacht, so verbindet man die Theilungspunkte $c\,c_1$ mit dem Mittelpunkte des Rades, sodann die Punkte $b\,b_1$, in welchen der mittlere Kreis geschnitten wird mit den Theilungspunkten $c\,c_1$.

Soll das Rad hölzerne Zellenwände erhalten, und sind die Linien $b\,c$ und $b_1\,c_1$ nicht auffallend convergirend, so dass die äussere und innere Weite des Schluckes nahe gleich gross sind, so ist die Anordnung Fig. 12 mit ebenen Zellenwänden zu nehmen.

Wenn dagegen die Linien $b\,c$ und $b_1\,c_1$ merklich convergiren, so muss man, damit die Weite des Zellenschlucks überall nahe gleich gross ausfällt, statt der geradlinigen äusseren Wände gekrümmte Wände machen, wie Fig. 13 zeigt.

Wenn endlich die Wände aus Blech gemacht werden sollen, nimmt man statt der geradlinig gebrochenen Linie $b\,c\,a$, $b_1\,c_1\,a_1$ die stetig gekrümmte Linie, welche durch die Punkte $a\,b\,c$ geht, wie Fig. 14 zeigt. Auch bei diesem Rade müssen die Zellen ventilirt werden, aus den gleichen Gründen, welche früher angegeben worden sind.

Form der Zellen bei dem oberschlächtigen Rade. Bei diesem Rade kann das Wasser ohne Schwierigkeit fast tangirend in das Rad geleitet werden, es ist daher hier möglich, den Winkel β, unter welchem die Zellenwände dem äusseren Umfang des Rades begegnen, kleiner zu machen, als bei dem rückschlächtigen Rade, und desshalb kann bei dem oberschlächtigen Rade das kostspielige Kreisgerinne weggelassen werden. Denn wenn die Zellen nicht mehr als $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{3}$ gefüllt, wenn ferner die Zellen hinreichend tief gemacht werden, und wenn endlich der Winkel β hinreichend klein angenommen wird, beginnt die Entleerung des Rades erst sehr tief unten, so dass durch die Anwendung eines Kreisgerinnes kein merklicher Vortheil hinsichtlich des Nutzeffektes erzielt werden kann.

Um nun für oberschlächtige Räder zweckmässig geformte Zellen zu erhalten, haben wir nur die früher für das rückschlächtige Rad angenommenen Konstruktionen dahin zu modifiziren, dass der Winkel β klein ausfällt, was dadurch geschieht, indem man nicht die Theilungspunkte $c\,c_1$ des äusseren Radumfanges, sondern die Punkte $d\,d_1$, Tafel VI., Fig. 15, 16, 17, welche von $c\,c_1$ um $\frac{1}{4}$ der Schaufeltheilung abstehen, mit den Punkten $b\,b_1$ durch gerade oder krumme Linien verbindet. Eine nähere Erklärung der Verzeichnung dieser Zellen ist wohl nicht nöthig.

Eine Ventilation der Zellen ist bei dem oberschlächtigen Rade nicht möglich, aber auch nicht nothwendig, weil durch die Regeln, welche für die Breite des Rades und für die Schaufeltheilungen aufgestellt wurden, die Dicke des Wasserstrahles immer nur ungefähr halb so gross ausfällt, als die Schluckweite, so dass also neben dem in die Zellen eintretenden Wasserstrahl jederzeit freier Raum für das Entweichen der Luft vorhanden ist.

Einlauf und Gerinne bei dem unterschlächtigen Rade. Die Bedingungen, welche zu erfüllen sind, um eine gute Konstruktion des

Gerinnes und des Einlaufes zu erhalten, sind für dieses Rad folgende: 1) soll das Wasser so viel als möglich ohne Geschwindigkeitsverlust bis an den Umfang des Rades geleitet werden; 2) soll kein Wasser zwischen den Schaufeln entweichen können, ohne auf dieselben zu wirken; 3) soll das Gerinne dazu beitragen, dass das Wasser weder zu früh noch zu spät aus dem Rade tritt; 4) soll der Wasserverlust durch den Spielraum zwischen den Schaufeln und dem Gerinne möglichst vermieden werden. Man wird der zweckmässigsten Konstruktion ziemlich nahe kommen, wenn man auf folgende Weise verfährt:

Man verzeichne, Tafel VII., Fig. 1, den äusseren Umfang des Rades, trage von dem tiefsten Punkt C aus eine Schaufeltheilung C D nach rechts und eine Schaufeltheilung C B nach links auf und verzeichne einen mit dem äusseren Umkreis des Rades concentrischen Kreisbogen B C D, welcher von dem Umfangskreis um den Spielraum von 0·015 bis 0·02 Meter absteht. Sodann ziehe man von B aus eine gegen den Horizont um $^1/_{20}$ geneigte Linie B A und berechne die Dicke der Wasserschichte unmittelbar vor dem Rade. Da wir annehmen, dass der Punkt F in der Höhe des Wasserspiegels vom Abzugskanal liegt, so befindet er sich in einer Tiefe gleich der Gefällshöhe H unter der Oberfläche des Wassers im Zuleitungskanal; wenn wir also die Dicke jener Wasserschichte mit x und die Breite der Schützenöffnung (welche wir jedesmal um 0·1 Meter kleiner annehmen, als die Breite des Rades) mit b_1 bezeichnen, so hat man die Gleichung:

⊥0·57″ ⊥0·76″ ⊤3·8″

$$Q = b_1 \, x \sqrt{2 g \left(H + \frac{x}{2}\right)}$$

aus welcher x durch Annäherung bestimmt werden muss. Es ist übrigens auch hinreichend genau, wenn man $\frac{x}{2}$ gegen H vernachlässigt, wodurch sich ergibt:

$$x = \frac{Q}{b_1 \sqrt{2 g H}}$$

Zieht man nun in dem Abstande x zu A B eine Parallele F E, so hat man die Oberfläche des Wassers unmittelbar vor dem Rade. Zieht man ferner in einer Höhe H über dem Punkt F, so wie auch durch den Punkt F selbst Horizontallinien, so bestimmen dieselben die Wasserspiegel im Zufluss- und im Abflusskanal. Zieht man endlich in der Nähe des Rades eine gegen den Horizont um 60°

geneigte Linie E J, so bestimmt diese die Stellung des Schützens, welcher auf der dem Zuflusskanale zugekehrten Seite eine für die Leitung des Wassers nach der Ausflussöffnung geeignete Abrundung erhalten soll. Dass durch diese Konstruktion die früher angegebenen Bedingungen erfüllt werden, ist wohl leicht einzusehen. Der schiefgestellte auf seiner inneren Seite gekrümmte und insbesondere an der unteren Kante abgerundete Schützen leitet das Wasser in die Ausflussöffnung, ohne dass daselbst eine Contraktion des Strahles, noch ein Anprallen des anströmenden Wassers an die Fläche A B eintreten kann, und da überdies die Entfernung E F ganz klein ist, so gelangt das Wasser ohne einen merklichen Verlust an Geschwindigkeit bei F an. Die schiefe Ebene A B, welche den bogenförmigen Theil B D unter einem stumpfen Winkel schneidet, leitet das Wasser über den Spielraum zwischen den Schaufeln und dem Gerinne in die Schaufelräume hinein; es kann also durch diesen Spielraum kein bedeutender Wasserverlust entstehen, was allerdings der Fall wäre, wenn die schiefe Ebene A B den bogenförmigen Theil des Gerinnes tangiren würde. Der über zwei Schaufeltheilungen sich erstreckende bogenförmige Theil des Gerinnes bewirkt nämlich, dass kein Wassertheilchen zwischen den Schaufeln in den Abflusskanal gelangen kann, ohne auf eine Schaufel gewirkt zu haben; auch verhindert dieser Theil des Gerinnes das zu frühzeitige Austreten des Wassers.

Ist der Wasserstand in den beiden Kanälen bedeutend veränderlich und soll der Nutzeffekt bei jedem Wasserstand möglichst günstig ausfallen, so muss das Rad und Gerinne mit einem Hebzeug versehen werden, durch welches die ganze Anordnung nach dem Wasserstande gestellt werden kann. Die Einrichtung eines solchen Hebzeuges besteht in Folgendem. Man denke sich die Punkte B und D durch Stangen mit dem Lager verbunden, in welchem die Zapfen der Wasserradswelle liegen und denke sich ferner, dass die schiefe Ebene A B bei A mit dem Boden des Zuleitungsgerinnes und bei B mit dem Bogen B D vermittelst einer Gliederung verbunden werde, so ist klar, dass wenn beide Lager der Wasserradswelle nach O_1 gehoben oder nach O_2 gesenkt werden, so kommt das gegliederte Gerinne im ersteren Falle in die Lage $A B_1 D_1$ und im letzteren Falle in die Lage $A B_2 D_2$, dabei bleibt der bogenförmige Theil immer concentrisch mit dem Radumfange und nur die schiefe Ebene ändert ihre Stellung gegen den Horizont; im Allgemeinen befindet sich aber das Rad in jeder Stellung annähernd unter den gleichen Umständen, der Nutzeffekt fällt also immer nahe gleich günstig aus.

Einlauf und Gerinne bei dem Kropfrad. Die Anordnung eines Gerinnes für ein Kropfrad richtet sich nach der Beschaffenheit der Wasserstände im Zufluss- und im Abflusskanal und nach den Anforderungen, welche an das Rad gestellt werden.

Jene Wasserstände können unveränderlich oder sie können veränderlich sein, und von dem Rade kann entweder ein möglichst günstiger Effekt oder mit Verzichtung auf denselben ein schneller Gang, mithin eine gewisse Umfangsgeschwindigkeit gefordert werden. Die Konstruktionen des Gerinnes unterscheiden sich in den vier verschiedenen Fällen nur in der Bestimmung der Lage einfacher Punkte; es ist daher zunächst nur nothwendig, einen speziellen Fall im Detail zu behandeln, indem sich die übrigen Fälle leicht auf diesen einen Fall zurückführen lassen.

Betrachten wir zuerst den Fall, wenn die Wasserstände in den beiden Kanälen unveränderlich sind, und wenn ein möglichst günstiger Nutzeffekt verlangt wird. Das Verfahren ist dann folgendes:

Man verzeichne, Tafel VII., Fig. 2, mit dem Halbmesser R und R + 0·015ᵐ den äusseren Umkreis des Rades und die innere Krümmung B C des Gerinnes, ziehe den vertikalen Halbmesser O C, mache $CF = \frac{1}{2}a$, $FK = H$ und ziehe die Horizontallinien p F q und m n K, so sind diese die Wasserstände in den beiden Kanälen. Damit der Wasserstand über dem Scheitel A des Einlaufs nicht zu klein wird, nehme man den Punkt B, in welchem der Einlauf der Krümmung des Gerinnes begegnet, in einer Tiefe von 0·46 Meter unter der Oberfläche m n an, so dass das Wasser bei B mit einer Geschwindigkeit von 3 Meter ankommt, ziehe den Radius B O und messe den Winkel $\widehat{BOC} = \gamma$. Der Einlauf A B richtet sich nun nach dem Werthe von γ. Ist γ gleich oder kleiner als 45°, so konstruire man die Parabel A B so, dass sie das Gerinne in dem Punkte B berührt, in welchem Falle der Winkel δ gleich 0 und der Winkel $\gamma - \delta$ gleich γ wird. Ist hingegen γ grösser als 45°, so nehme man den Winkel $\gamma - \delta$, den die zum Punkte B der Parabel gehörige Tangente mit dem Horizont bildet, gleich 45° an. Zur Bestimmung der Position des Scheitels A der Parabel hat man allgemein:

$$\overline{BD} = \overline{MB} \sin 2 (\gamma - \delta)$$

$$\overline{AD} = \overline{MB} \sin^2 (\gamma - \delta)$$

Wenn die Parabel bei B tangiren soll, ist $\delta = 0$ und dann wird

$$\overline{BD} = \overline{MB} \sin 2\gamma$$

$$\overline{AD} = \overline{MB} \sin^2 \gamma$$

Wenn $\gamma > 45^0$ ist, wird wegen $\gamma - \delta = 45^0$

$$\overline{BD} = \overline{MB} = 0{\cdot}46^m$$

$$\overline{AD} = \frac{1}{2}\ \overline{MB} = 0{\cdot}23^m$$

Die Position des Scheitels der Parabel und die vollständige Konstruktion derselben kann auch auf folgende Art graphisch bewerkstelligt werden.

Man verzeichne, Tafel VII., Fig. 3, den Winkel gBD, welchen die zu dem Punkte B der Parabel gehörige Tangente mit dem Horizont bilden soll; mache $gB = BM = \frac{V^2}{2g}$, messe den Abstand gi und trage ihn von B nach k auf, so ist $kl = DA$. Hierauf konstruire man den Winkel $gBh = DBg$, mache $Bh = BM$, so ist $hr = BD$. Trägt man also hr von B nach D auf, und kl von D nach A, so hat man den Scheitel der Parabel. Um einzelne Punkte der Parabel zu finden, verzeichne man das Rechteck A D B o, theile o A in mehrere, z. B. in vier, und o B in eben so viele gleiche Theile, verbinde die Punkte 1, 2, 3 mit A und ziehe durch I, II, III Parallellinien mit A D, so sind m_1 m_2 m_3 die gesuchten Punkte. Um die diesen Punkten entsprechenden Krümmungshalbmesser und Mittelpunkte zu finden, mache man die Entfernung

$$1'\,1'' = 2'\,2'' = 3'\,3'' = D\,4'' = 2\,\overline{An}$$

verbinde m_1 mit 1'', m_2 mit 2'', m_3 mit 2''', B mit 4'', so schneiden sich diese Linien in den Punkten IV', III', II', I'', aus welchen die Kreisbögen Bm_3, m_3m_2, m_2m_1, m_1A beschrieben werden müssen.

Ist die Parabel A B verzeichnet, so setze man sie noch etwas über A fort, und ziehe an diese Fortsetzung unter einem Winkel von ungefähr 20° eine Tangente, bis an den Boden des Zuleitungskanales.

Dem Schützen gebe man gegen den Horizont eine Neigung von 60°, und nehme seine Entfernung von dem Rade so an, dass derselbe, wenn er niedergelassen wird, den Einlauf im Scheitel A oder etwas unterhalb berührt.

Der dem Zuleitungskanal zugewendeten Fläche des Schützens gebe man eine für die Leitung des Wassers zweckmässige Krümmung, insbesondere in der Nähe der untern Kante.

Sind die Wasserstände in den beiden Kanälen unveränderlich, und soll das Rad einen schnelleren Gang erhalten, so nehme man den Punkt B in einer Tiefe $4 \frac{v^2}{2g}$ unter der Oberfläche m n an, und verfahre übrigens bei der Konstruktion des Gerinnes wie im vorhergehenden Falle.

Sind die Wasserstände veränderlich, so nehme man den Punkt C, Tafel VII., Fig. 2, in einer Tiefe $\frac{1}{2}$ a unter dem mittleren Wasserstand im unteren Kanale, und den Punkt B in einer Tiefe $4 \frac{v^2}{2g}$ unter dem niedrigsten Wasserstand des oberen Kanales an, und verfahre im Uebrigen bei der Konstruktion des Gerinnes wie im ersten Falle.

Einlauf und Gerinne bei dem Ueberfallrade. Tafel VII., Fig. 4. Zur Bestimmung der Breite b des Rades ist schon früher, Seite 101, eine Regel angegeben worden. Die Breite b_1 des Einlaufes nimmt man immer etwas schmäler an, als die des Rades, und zwar um $0 \cdot 1^m$, es ist daher:

$$b_1 = b - 0 \cdot 1^m$$

Aus der Breite des Einlaufes und aus der Wassermenge Q, welche in 1 Sekunde dem Rade zufliessen soll, ergibt sich nun zunächst die Dicke t der Wasserschichte über dem Scheitel des Ueberfalles. Es ist nämlich nach der bekannten Formel für die Wassermenge bei Ueberfällen:

$$t = \left(\frac{Q}{0 \cdot 443\, b_1 \sqrt{2g}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Diesen Werth von t kann man auch aus der Tabelle 142, Seite 120 der Resultate entnehmen, wenn man die Wassermenge $\frac{Q}{b_1}$ berechnet, welche über jeden Meter Breite des Ueberfalles abfliessen soll, und für diese Wassermenge die entsprechende Dicke der Schichte aufsucht.

Zur Leitung des Wassers ist es gut, wenn man die obere Kante des beweglichen Schützens mit einer Leitfläche versieht, und diese nach der Parabel A B, Tafel VII., Fig. 4, krümmt, welche die bei A mit der Geschwindigkeit $\sqrt{2gt}$ nach horizontaler Richtung austretenden Wassertheilchen beschreiben. Um diese Parabel zu konstruiren, muss zunächst die Frage beantwortet werden, in welcher Entfernung von dem Umfangskreis des Rades der Scheitel A angenommen werden soll. Wird dieser Punkt dem Rade genähert, und z. B. nach A_1 verlegt, so fällt der Punkt B_1, in welchem die Parabel dem Umfang des Rades begegnet, höher hinauf, das Stossgefälle wird dadurch kleiner, aber der Winkel, unter welchem der Strahl dem Umfang des Rades begegnet, wird grösser.

Nimmt man die Parabel in einer grösseren Entfernung, z. B. $A_2 B_2$ an, so fällt jener Punkt tiefer, nämlich nach B_2 herab, dagegen wird jener Winkel kleiner; man sieht hieraus, dass es eine gewisse Entfernung geben muss, bei welcher die Effektverluste, welche bei dem Eintritt des Wassers entstehen können, am kleinsten ausfallen, und es ist bei der strengen Theorie in dem grösseren Werke über Wasserräder nachgewiesen worden, dass dies dann der Fall ist, wenn bei einer Umfangsgeschwindigkeit des Rades von $v = 1{\cdot}5^m$ das Wasser im Punkt B mit einer Geschwindigkeit von $V = 3^m$, ankommt; dieser Punkt B muss also in einer Tiefe $M\,B = \frac{V^2}{2\,g} = \frac{3^2}{2\,g} = 0{\cdot}46^m$ unter dem oberen Wasserspiegel angenommen werden; und zur Bestimmung von B D folgt aus den Formeln Seite 110

$$B\,D = 2\sqrt{t\left(\frac{V^2}{2\,g} - t\right)}$$

oder weil $V = 3^m$ gesetzt werden soll

$$B\,D = 2\sqrt{t\,(0{\cdot}46 - t)}$$

Die Verzeichnung des Gerinnes geschieht nun auf ganz ähnliche Weise wie bei dem Kropfrade gezeigt wurde. Man verzeichnet nämlich zuerst den Umfangskreis des Rades und die Krümmung des Gerinnes, nimmt den untern Wasserspiegel in einer Höhe $\frac{1}{2}\,a$ über dem tiefsten Punkt des Rades an, trägt von diesem aus das Gefälle auf, nimmt den Punkt B in einer Tiefe $\frac{V^2}{2\,g} = 0{\cdot}46^m$ unter dem oberen Wasserspiegel an, berechnet hierauf vermittelst der obigen Formeln den Werth von t und von B D, trägt dieses letztere Maass von B aus nach horizontaler Richtung auf, zieht durch D eine Vertikallinie, und durchschneidet dieselbe durch eine in einer Tiefe t unter dem oberen Wasserspiegel gezogene Horizontallinie, so ergibt sich der Punkt A, d. h. der Scheitel der Parabel, deren vollständige Konstruktion nun auf die gleiche Weise ausgeführt wird, wie früher bei dem Kropfrade gezeigt wurde. Ist der Wasserstand im untern Kanale veränderlich, so muss der untere Stand in einer Höhe $\frac{1}{2}\,a$ über dem tiefsten Punkt des Rades genommen werden.

Einlauf und Gerinne bei dem Coulissenrad. Hier handelt es sich vorzugsweise um die Bestimmung des Winkels δ, unter welchem die Coulissen dem Umfang des Rades begegnen sollen, ist dieser Winkel bestimmt, so ergibt sich dann die Konstruktion des Gerinnes und Einlaufes auf ähnliche Weise, wie bei den zwei vorhergehenden Anordnungen. Wird der Winkel δ zu klein angenommen, so fällt die auf dem Umfang des Rades gemessene Dicke der Wasserschichte, und mithin auch das Stossgefälle gross aus, was nachtheilig ist. Wird hingegen jener Winkel gross angenommen, so schlagen die Schaufeln gegen das eintretende Wasser, drängen es zurück, und es entsteht ein schädlicher Rückstoss auf die Schaufeln. Man sieht also, dass es einen gewissen Werth von δ geben müsse, bei welchem diese Nachtheile am kleinsten ausfallen. Die in meinem grösseren Werke enthaltene genauere Theorie des Coulissenrades zeigt, dass der vortheilhafteste Werth des Winkels δ bei einer Umfangsgeschwindigkeit des Rades von $v = 1 \cdot 5^m$, 32° bis 38° und im Mittel nahe 36° betrage.

Bei einer grösseren Umfangsgeschwindigkeit des Rades fällt natürlich δ kleiner aus, da man aber in der Regel $v = 1 \cdot 5$ bis $v = 1 \cdot 8^m$ annehmen wird, so wird man immer den vortheilhaftesten Anordnungen sehr nahe kommen, wenn man $\delta = 36^\circ$ nimmt.

Die Verzeichnung des Gerinnes geschieht nun wiederum auf folgende Weise. Man verzeichnet den äusseren Umkreis des Rades und die Krümmung des Gerinnes, indem man den Spielraum der Schaufeln gleich 0·015 bis 0·02 Meter annimmt. Sind die Wasserstände unveränderlich, so nehme man den unteren in einer Höhe $\frac{a}{2}$ über dem tiefsten Punkt des Rades an, und trage das Gefälle auf, so erhält man den oberen Wasserspiegel $m\,n$, Tafel VII., Fig. 5, Nun nehme man den Punkt 1 in einer Tiefe von 0·3 Meter unter dem oberen Spiegel an, mache $1,2 = 2,3 = 3,4 \ldots = \frac{1}{3}\,a$, ziehe den Radius $O\,1$, verzeichne den Winkel $\widehat{p\,1\,1} = \delta = 36^\circ$, beschreibe aus O einen Kreis K, welcher den Schenkel $1\,p$ des Winkels $\widehat{p\,1\,O}$ berührt, ziehe von den übrigen Theilungspunkten 2, 3, 4 Tangenten nach diesem Kreise K, mache $1\,I = 2\,II = 3\,III \ldots = 0 \cdot 8\,a$, und beschreibe aus I, II, $III \ldots$ mit dem Halbmesser $1\,I = 2\,II = 3\,III \ldots = 0 \cdot 8\,a$ die Kreisbögen $1\,1_1$, $2\,2_1$, $3\,3_1 \ldots$ so sind dies die Coulissen.

Um die erforderliche Anzahl derselben zu bestimmen, berechne man die Wasserquantitäten, welche zwischen je zwei dieser Coulissen ausströmen, addire die erste und zweite, dann die erste, zweite und dritte u. s. w., dann ist die erforderliche Anzahl von Coulissen diejenige, für welche die Summe der Wasserquantitäten gleich oder grösser als Q ausfällt. Es ist aber immer zu empfehlen, eine oder zwei Coulissen mehr anzunehmen.

Sollte der obere Wasserspiegel veränderlich sein, so mache man die so eben angegebene Konstruktion für den niedrigsten Stand, und füge noch aufwärts so viele Coulissen hinzu, dass die oberste derselben den Umkreis des Gerinnes in einem Punkt schneidet, dessen Tiefe unter dem höchsten Wasserstand gleich oder kleiner als 0·3 Meter ist.

Um die Wassermenge zu berechnen, welche zwischen zwei Coulissen ausströmt, nehme man das Produkt aus folgenden Grössen: 1) aus einem Coeffizienten, der gleich 0·4 gesetzt werden kann; 2) aus der äusseren Weite des Coulissenkanals, welche gleich ist der Länge des von dem Endpunkte, z. B. 2 einer Coulisse auf die nächste Coulisse 3 3, gefällten Perpendikels; 3) aus der Breite des Einlaufs, welche um $0{\cdot}1^m$ kleiner als die Breite des Rades angenommen werden darf; 4) aus der Geschwindigkeit, welche der Tiefe des Mittelpunktes der Oeffnung unter dem oberen Wasserspiegel entspricht.

Einlauf und Gerinne bei dem rückschlächtigen Rade. Bei diesem Rade muss wiederum der Fall, wenn die Wasserstände unveränderlich sind, von demjenigen unterschieden werden, wenn sie veränderlich sind.

Wenn die Wasserstände unveränderlich sind, verfahre man bei der Verzeichnung des Gerinnes und des Einlaufes auf folgende Art:

Man verzeichne, Tafel VII., Fig. 6, den äusseren und inneren Umkreis des Rades, so wie auch die in einem Abstande $0{\cdot}015^m$ bis $0{\cdot}02^m$ mit den ersteren concentrische Krümmung des Gerinnes; nehme den unteren Wasserspiegel entweder tangirend an den tiefsten Punkt des Rades an oder in einer Höhe $\frac{a}{2}$ über diesem tiefsten Punkt. Wenn einmal das Gefälle so gross ist, dass man ein rückschlächtiges Rad anwenden kann, ist es nicht mehr von Wichtigkeit, das Rad im Unterwasser tauchen zu lassen, indem das Gefälle, welches dadurch gewonnen werden kann, von keinem Belang ist gegen das totale Gefälle.

Hierauf trage man das Gefälle auf und ziehe die Linie m n, welche den Wasserstand im oberen Kanale angibt. Nun nehme man im Umkreis des Gerinnes den Punkt 1 in einer Tiefe von $0{\cdot}3^m$ unter dem Wasserspiegel m n an, mache

$$1,2 = 2,3 = 3,4 \ldots\ldots = 0{\cdot}4\ a$$

verzeichne die Zelle 1 a b in der Stellung, dass ihre äussere Kante durch den Punkt 1 geht, verlängere die Richtung a 1 nach e, ziehe durch 1 an den Umkreis des Gerinnes eine Tangente 1 c, mache 1 d gleich der Geschwindigkeit, welche der Tiefe des Punktes 1 unter der Oberfläche des Spiegels m n entspricht und 1 c gleich der Umfangsgeschwindigkeit des Rades und vollende das Parallelogramm 1 e d c, so ist die Diagonale 1 d die Richtung, nach welcher das Wasser bei 1 eintreten muss, damit es weder an die Wand 1 a anschlägt, noch von derselben geschlagen wird. Denn wenn das Wasser nach der Richtung 1 d und mit der Geschwindigkeit 1 d bei 1 eintritt, und man denkt sich diese letztere in die zwei Geschwindigkeiten 1 c und 1 e zerlegt, so folgt es mit 1 c dem Umfange des Rades, tritt also mit 1 e nach der Richtung von 1 d in die Zelle ein, d. h. der Eintritt erfolgt gerade so, als wenn das Rad ruhte, und als wenn das Wasser mit einer Geschwindigkeit 1 e nach der Richtung e 1 a ankäme. Wollte man das Wasser so eintreten lassen, dass es schon bei 1 gegen die obere Fläche der Wand schlüge; so würde der Winkel $\widehat{d\,1\,c}$ gar zu klein ausfallen, das Wasser müsste also sehr stark aus der horizontalen Richtung seiner Bewegung im Kanale abgelenkt werden, und die Coulissenkanäle würden sehr eng ausfallen, es ist daher besser, das Wasser bei 1 ohne Stoss gegen die Fläche 1 a eintreten zu lassen. Nun errichte man in 1 auf 1 d eine Senkrechte, nehme einen passenden Krümmungshalbmesser 1 I (gewöhnlich = a) für die Coulisse an, und beschreibe mit demselben die obere Coulisse $1\ 1_{,}$. Die den Theilungspunkten 2, 3, 4 entsprechenden Coulissen ergeben sich dann, indem man durch 2, 3, 4 Linien 2 II, 3 III, 4 IV zieht, die gegen den Umfangskreis des Gerinnes eben so stark geneigt sind, wie die Linie 1 I, was dadurch geschehen kann, indem man aus dem Mittelpunkte des Rades einen (in der Figur nicht vorhandenen) Kreis zieht, welcher von der verlängerten Richtung I 1 berührt wird und nach diesem Kreis von den Punkten 2, 3, 4 aus Tangenten zieht und hierauf mit dem Halbmesser 1 I = 2 II = 3 III = a aus I, II, III, Kreisbögen beschreibt.

Die so konstruirten Coulissen haben die Eigenschaft, dass das Wasser mit stetig zunehmender Intensität auf die obere Seite der Wand 1 a anschlägt, während dieselbe durch den Wasserstrahl niedergeht. Die erforderliche Anzahl Coulissen wird wiederum auf ähnliche Art bestimmt, wie bei dem vorhergehenden Rade gezeigt wurde, nur hat man hier den Coeffizienten 0·75 in Rechnung zu bringen. Ist diese Anzahl ausgemittelt, so ergibt sich die schiefe Fläche $1_{,}\ 4_{,}$, auf welcher der Schützen zu gleiten hat, indem man die Punkte $1_{,}$ und $4_{,}$ so bestimmt, dass sie von dem Umkreis des

Gerinnes gleich weit und zwar um ungefähr 0·3m abstehen, und sie hierauf durch eine gerade Linie verbindet.

Wenn die Wasserstände in den beiden Kanälen veränderlich sind, nehme man den höchsten Stand im untersten Kanale in einer Höhe $\frac{1}{2}$ a über dem tiefsten Punkt des Rades an, verzeichne nach dem so eben angegebenen Verfahren den Einlauf für den niedrigsten Wasserstand im oberen Kanale und füge nach aufwärts so viele Coulissen hinzu, dass der Theilungspunkt für die oberste derselben ungefähr 0·3m unter den höchsten Wasserspiegel zu liegen kommt.

Einlauf bei dem oberschlächtigen Rade. Bei dem oberschlächtigen Rade müssen wir den Fall, wenn ein möglichst günstiger Nutzeffekt verlangt wird, von demjenigen unterscheiden, wenn der Wasserzufluss mehr als hinreichend ist, dafür aber eine gewisse Umfangsgeschwindigkeit des Rades oder eine gewisse Anzahl Umdrehungen desselben gefordert wird.

Soll der Effekt möglichst günstig ausfallen, so nehme man die Umfangsgeschwindigkeit des Rades nicht grösser als 1·5m und die Geschwindigkeit des am Scheitel eintretenden Wassers nicht grösser als 3m an, berechne nach den bereits früher aufgestellten Regeln die Dimensionen des Rades, verzeichne den Durchschnitt desselben tangirend an den unteren Wasserspiegel, und eine im Scheitel stehende Zelle a f g, Tafel VII., Fig. 7. Sodann ziehe man durch den Punkt a eine Tangente a d an das Rad und eine Tangente a c an den Punkt a der Krümmung a f, mache a d = v, ziehe durch d eine Parallele zu a c, durchschneide diese von a aus mit einer Zirkelöffnung $\overline{a\,b} = 2\,\overline{a\,d} = 2\,v = V$ und ziehe die Diagonale des Parallelogramms a b c d, so ist a b die Richtung, nach welcher das Wasser bei a ankommen muss, um ohne Stoss gegen a f in die Zelle a f g einzutreten. Den Einlauf a e kann man nach der Parabel krümmen, welche ein Wassertheilchen beschreibt, welches in a nach der Richtung a b und mit der Geschwindigkeit V ankommt. Der Scheitel e dieser äusserst schwach gekrümmten Parabel wird auf die gleiche Weise gefunden, wie bei dem Kropfrad. Es ist nämlich der Horizontalabstand der Punkte a und e gleich $\overline{a\,l}\,\sin 2\,\widehat{(b\,a\,d)}$ und der Vertikalabstand derselben $\overline{a\,l}\,\sin 2\,\widehat{(b\,a\,d)}$. Von e an ziehe man den horizontalen oder sehr schwach geneigten Boden e k des Zuleitungskanals, und den Schützen stelle man über den Scheitel der Parabel, wenn der Punkt e so weit von dem Umfange des Rades entfernt ist, dass daselbst zum Tragen des Kanals ein Querbalken angebracht werden kann, widrigenfalls stelle man den Schützen so weit gegen k zurück, dass unter demselben für einen Tragbalken hinreichender Raum vorhanden ist.

Wenn gefordert wird, dass das Rad in 1 Minute eine gewisse Anzahl Umdrehungen machen soll, bleibt die Konstruktion ungeändert, es muss aber R, v und V durch Rechnung bestimmt werden. Nun ist allgemein:

$$2\,R = H - \frac{V^2}{2\,g}$$

$$n = 9{\cdot}548\,\frac{v}{R}$$

Wenn wir aber annehmen, dass das Wasser mit einer Geschwindigkeit V ankommen soll, die doppelt so gross ist als die Umfangsgeschwindigkeit des Rades (eine Annahme, die desshalb zweckmässig ist, weil dann die Dicke des Strahles ungefähr halb so gross ausfällt, als die Schluckweite), so haben wir noch:

$$V = 2\,v$$

Aus diesen drei Gleichungen folgt:

$$R = \frac{2\,g\,(4{\cdot}774)^2}{n^2}\left[-1 + \sqrt{1 + \frac{1}{2}\,\frac{H\,n^2}{(4{\cdot}774)^2\,g}}\right]$$

oder

$$R = \frac{447}{n^2}\left[-1 + \sqrt{1 + \frac{H\,n^2}{447}}\right]$$

und dann hat man ferner:

$$v = \frac{n\,R}{9{\cdot}548}$$

$$V = 2\,v$$

Die Bedingung, dass das Rad in 1 Minute n Umdrehungen machen soll, ist jedoch nur dann realisirbar, wenn der Werth von R, welchen die Formel gibt, nicht zu sehr von $\frac{1}{2}$ H verschieden ist.