Theorie und Bau der Wasserräder

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1846

Berechnung der Wassermenge, welche zwischen den Schaufeln eines unterschlächtigen Rades durchgeht, ohne eine Wirkung hervorzubringen

Berechnung der Wassermenge, welche zwischen den Schaufeln eines unterschlächtigen Rades durchgeht, ohne eine Wirkung hervorzubringen.

Es ist schon früher bemerkt worden, dass bei unterschlächtigen Rädern, ein Theil des zufliessenden Wassers zwischen den Schaufeln durchgeht, ohne eine Geschwindigkeitsveränderung zu erleiden. Diese für die Wirkung auf das Rad verlorene Wassermenge wollen wir nun berechnen.

Es sei XY der Boden des Gerinnes, xy die Oberfläche des zufliessenden Wassers Fig. (22). Denken wir uns, dass die Schaufeln des Rades durch Rahmen ersetzt werden, deren Form und Ausdehnung mit den Schaufeln übereinstimmt, so wird ein Theil des zufliessenden Wassers diese Rahmen durchfliessen, ein anderer Theil aber nicht, und dieser letztere bestimmt offenbar die Wassermenge, welche für die Wirkung auf das Rad ganz verloren geht. Bei der folgenden Rechnung nehmen wir an:

1) eine radiale Stellung der Schaufeln,
2) ein horizontales Gerinne;
3) gleiche Geschwindigkeit aller Wassertheilchen;
4) gleichförmige Geschwindigkeit des Rades.

Es sei **B b** ein Rahmen, welcher mit seiner unteren Kante das Wasser berührt, demnach in dieses einzutreten beginnt, B_1 b_1 der nächstfolgende Rahmen. Während ein Rahmen von **B b** bis in die tiefste Position **A K** gelangt, beschreibt der Punkt **B** die Kreisbogen **B M A**, und es treffen während dieser Bewegung immer andere und andere Wassertheilchen mit dem beweglichen Punkte **B** zusammen. Alle diese Wassertheilchen befinden sich in dem Augenblicke, in welchem der Rahmen in **B b** ist, an gewissen Orten, und alle diese Orte bilden zusammen eine krumme Linie $B\,M_1\,O_1$, deren Natur leicht ausgemittelt werden kann.

Ist nämlich M_1 ein Punkt der Kurve so muss sein:

$$\overline{M_1 M} : \overset{\frown}{BM} = V : v$$

demnach

$$\overline{MM_1} = \frac{V}{v} \cdot \overset{\frown}{MB}$$

Für den untersten Punkt O_1 hat man auf gleiche Weise:

$$\overline{AO} = \frac{V}{v} \cdot \overset{\frown}{BA}$$

Man findet also irgend einen Punkt M_1 der Linie $B M_1 O_1$, wenn man die mit dem Verhältniss $\frac{V}{v}$ multiplicirte Bogenlänge $\overset{\frown}{BM}$ von M nach M_1 in horizontaler Richtung aufträgt. Diese Linie $B M_1 O_1$ lässt sich mithin leicht construiren.

Macht man $\overline{BH} = \frac{V}{v} \cdot \overset{\frown}{BB_1}$, so erhält man den Punkt H der Oberfläche des Wassers, welcher mit dem unteren Punkte B_1 des nächstfolgenden Rahmens $B_1\, b_1$ zusammentrifft, und zeichnet man, von H ausgehend, eine mit $B\, M_1\, O_1$ congruente Linie $H G$, so enthält dieselbe diejenigen Wassertheilchen, welche im Verlaufe der Bewegung der Reihe nach mit B_1 zusammentreffen. Alle innerhalb der Figur $G H B O_1$ befindlichen Wassertheilchen treten also in den Raum ein, welcher durch die zwei Schaufeln $B b$ und $B_1\, b_1$ begrenzt ist.

Verschieben wir die Figur $G H B O_1$ nach horizontaler Richtung, bis der Punkt O_1 nach A und die Figur nach $E F D A$ kommt, so ist $A K$ der correspondirende Ort für den Rahmen $B b$ und es ist klar, dass die Figur $K D A$ die Wastertheilchen enthält, welche während der Bewegung des Rahmens von $B b$ nach $A K$ durch denselben ausgetreten sind. Dass dagegen die in der Figur $A E F K$ enthaltenen Wassertheilchen bis zu diesem Augenblick noch nicht den Rahmen erreicht haben. Da der Rahmen von dem Punkte A an wiederum allmählig aus dem Wasser heraustritt, so können bei der Fortsetzung der Bewegung des Rahmens über A hinaus nicht alle zwischen $E F K A$ enthaltenen Wassertheilchen den Rahmen erreichen. Ist zum Beispiel der Rahmen nach N gekommen, so gelangt gleichzeitig der Punkt N_1 auch daselbst an, wenn $\frac{\overline{NN_1}}{V} = \frac{\overset{\frown}{AN}}{v}$ ist und alle zwischen $N_1\, Q$ befindlichen Wassertheilchen werden folglich durch den Rahmen gehen, die zwischen $N_1\, N_2$ befindlichen Theilchen dagegen gelangen in den Abflusskanal, ohne durch einen Rahmen getreten zu sein. In dem Moment, in welchem der Rahmen in **A** ist, befinden sich die Wassertheilchen, welche während seiner Bewegung über **A** hinaus mit seiner unteren Kante zusammentreffen, an gewissen Orten, welche zusammen eine krumme Linie AN_1J bilden, die vermittelst der Beziehung:

$$\overline{NN_1} = \frac{V}{v} \cdot \overset{\frown}{AN}$$

leicht construirt werden kann.

Durch die Linie AN_1J wird die Figur **ADFE** in zwei Theile $ADFJN_1$ und AN_1JN_2E getheilt. Der erstere enthält die Wassermenge, welche durch einen Rahmen geht und die letztere enthält die Wassermenge, welche in den Abflusskanal gelangt, ohne durch einen Rahmen getreten zu sein.

Denken wir uns nun wiederum die Rahmen durch Schaufeln ersetzt, so werden wir der Wahrheit ziemlich nahe kommen, wenn wir annehmen, dass das in der Figur AN_1JN_2E enthaltene Wasser mit seiner ursprünglichen Geschwindigkeit entweicht, ohne irgend eine Wirkung auf die Schaufeln auszuüben. Dass dagegen alle in Figur **ADFJ** enthaltenen Wassertheilchen einen vollkommenen Stoss gegen die Schaufeln ausüben, demnach von der Geschwindigkeit **V** auf die Geschwindigkeit **v** gebracht werden.

Unter dieser Voraussetzung, welche allerdings auch nicht streng richtig ist, durch welche wir aber doch der Wahrheit näher kommen, als wenn wir annehmen, dass alles dem Rade zuströmende Wasser auch vollkommen zum Stosse gelange, wollen wir nun die für die Wirkung auf das Rad verlorne Wassermenge berechnen.

Durch einfache Betrachtungen an der Figur findet man, wenn $\widehat{ACN} = \varphi$ und $AC = R$ gesetzt wird, für die Linie AN_1J

$$\overline{AQ} = R\ (1\ \cos.\ \varphi)\ .\ .\ .\ .\ .\ . \quad (33)$$

$$\overline{QN_1} = R.\left(\frac{V}{v}\,\varphi - \sin.\ \varphi\right)$$

oder annähernd

$$\overline{CN_1} = R\ \sin.\ \varphi\left(\frac{V}{v} - 1\right)\ .\ .\ .\ .\ . \quad (34)$$

wenn man sich erlaubt sin. φ statt φ zu setzen.

Aus diesen Werthen von $\overline{AQ}$ und $\overline{QN_1}$ ersieht man, dass die Linie AN_1J nahe eine Elypse ist, deren Mittelpunkt in **C** liegt, und von welcher die eine vertikale Hauptaxe eine Länge **2R** und die andere horizontale Hauptaxe eine Länge $2R\left(\frac{V}{v} - 1\right)$ hat.

Für die Kurve EN_2F findet man dagegen, wenn $BB_1 = e$ gesetzt wird

$$\overline{AQ} = R\,(1 - \cos.\,\varphi) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

$$\overline{QN_2} = e\,\frac{V}{v} - R\left(\varphi\,\frac{V}{v} - \sin.\,\varphi\right)$$

oder wenn man wiederum sin. φ statt φ setzt:

$$\overline{QN_2} = e\,\frac{V}{v} - R\,\sin.\varphi\left(\frac{V}{v} - 1\right) \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Aus diesen Gleichungen (35) und (36) ergibt sich durch Vergleichung mit (33) und (34), dass die Linie AN_1J mit AD vollkommen übereinstimmt, es bildet also AJ die Fortsetzung des ellyptischen Bogens DA.

Für den Punkt J, in welchem sich die Bögen EF und AL durchschneiden, sei $\varphi = \varphi_1$, dann hat man zur Bestimmung dieses Winkels die Gleichung:

$$\overline{ON_1} = \overline{ON_2} \text{ oder}$$

$$R\,\sin.\,\varphi_1\left(\frac{V}{v} - 1\right) = e\,\frac{V}{v} - R\,\sin.\,\varphi_1\left(\frac{V}{v} - 1\right)$$

woraus folgt:

$$\sin.\,\varphi_1 = \tfrac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot \frac{V}{v}}{R\left(\frac{V}{v} - 1\right)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37)$$

und nun wird, weil annähernd:

$$Aq = R\,(1 - \cos.\,\varphi_1) \qquad \doteq \tfrac{1}{2}R\,.\,\varphi_1^2$$

$$Jq = R\,\sin.\,\varphi_1 \cdot \left(\frac{V}{v} - 1\right) = R\left(\frac{V}{v} - 1\right)\varphi_1$$

ist:

$$\left.\begin{aligned} Aq &= \tfrac{1}{8}\,\frac{e^2\left(\frac{V}{v}\right)^2}{R\,.\left(\frac{V}{v} - 1\right)^2} \\ Jq &= \tfrac{1}{2}\,e\,.\,\frac{V}{v} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

Annähernd können wir die Linien AN_1J und EN_2J für Parabeln annehmen und dann ist:

$$\text{Fläche. } EN_2JN_1A = \tfrac{2}{3}\,\overline{Aq} \times \overline{qJ} = \tfrac{1}{24}\,\frac{e^3\left(\frac{V}{v}\right)^3}{R.\left(\frac{V}{v}-1\right)^2}$$

Multiplicirt man diese Fläche mit $b.\frac{V}{e}$ so erhält man die Wassermenge q_1, welche in jeder Sekunde zwischen den Schaufeln entweicht, ohne eine Wirkung auf dieselben hervorzubringen. Es ist demnach:

$$q_1 = \tfrac{1}{24}\,\frac{e^2\,b}{R}\cdot\left(\frac{\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2 V \quad \ldots\ldots \quad (39)$$

Diese Gleichung drückt aber den Wasserverlust nur dann richtig aus, wenn der Punkt J nicht oberhalb $x\,y$ fällt, d. h. nur dann, wenn $\overline{Aq} \overset{=}{<} t$, wobei t die Tiefe des zufliessenden Wassers bedeutet.

Die Gleichung (39) gilt daher nur, wenn:

$$\frac{1}{8\,R}\left(\frac{e\,\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2 \overset{=}{<} t \quad \ldots\ldots \quad (40)$$

Liegt der Punkt J oberhalb $x\,y$ so ist dieser Verlust nach der Fläche EFLA Fig. (23) zu bestimmen. Nun ist:

$$AK = t,\ \ KL = SF = R\left(\frac{V}{v}-1\right)\sqrt{\frac{2t}{R}}$$

und man findet, wenn man wiederum AKL und ESF als Parabelflächen berechnet:

$$\text{Fläche } EFLA = e\frac{V}{v}\cdot t - \tfrac{4}{3}\cdot\overline{LK} \times \overline{AK} =$$

$$\left[e\,\frac{V}{v} - \tfrac{4}{3}R + \left(\frac{V}{v}-1\right)\sqrt{\frac{2t}{R}}\right]t$$

endlich:

$$q_1 = b\,t.V - \tfrac{4}{3}\,\frac{R\,b\,t}{e}\,(V-v)\sqrt{\frac{2\,t}{R}} \;.\;.\;.\;.\quad (41)$$

Wenn im Abzugskanal Boden und Wasserspiegel tiefer liegen, als im Zuflusskanal, fliesst das Wasser, so wie die Schaufel ihre tiefste Stellung **A K** Fig. (25) passirt hat, mit grosser Geschwindigkeit in den Abzugskanal herab. Bei einer solchen Anordnung muss man annehmen, dass nur diejenige Wassermenge einen Stoss gegen die Schaufel ausüben kann, welche durch den Rahmen tritt, bis derselbe in seiner tiefsten Stellung angekommen ist. Für diesen Fall ist demnach der Wasserverlust nach dem Theile der Fläche **A E F D** zu berechnen, welcher vor der Linie **A K** liegt. Zur Berechnung dieses Flächentheils müssen wir aber den Fall, wenn **F** linker Hand von **K** liegt Fig. (24), von demjenigen unterscheiden, wenn **F** rechter Hand von **K** liegt Fig. (25). Im ersteren Fall handelt es sich um die Berechnung von **A K F E** Fig. (24), im letzteren dagegen um die Berechnung von **E W A** Fig. (25).

Der Punkt **F** liegt linker Hand von **A K**, wenn:

$$t < \frac{1}{2R}\left(\frac{e\,\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2 \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\quad (42)$$

und dann ist:

$$\text{Fläche } \mathbf{EAFR} = t\left[e\,\frac{V}{v} - \tfrac{2}{3}\left(\frac{V}{v}-1\right)\sqrt{2\,t\,R}\,\right]$$

und

$$q_1 = t\,V\,b - \tfrac{2}{3}\,\frac{b\,t}{e}(V-v)\sqrt{2\,t\,R} \;.\;.\;:\;.\quad (43)$$

Der Punkt **F** liegt rechter Hand von **A K**, wenn

$$t > \frac{1}{2R}\left(\frac{e\,\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2$$

und dann ist Fig. (25)

$$\text{Fläche } \mathbf{EWA} = \tfrac{1}{3}\,\overline{AE} \times \overline{AW} = \tfrac{1}{6}\,\frac{e^3}{R}\,\frac{\left(\frac{V}{v}\right)^3}{\left(\frac{V}{v}-1\right)^2}$$

endlich:

$$q_1 = \tfrac{1}{6}\,\frac{b\,V\,e^2}{R}\cdot\left(\frac{\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2 \quad . \;.\;.\;.\;.\quad (44)$$

Der Punkt F fällt mit K zusammen, wenn:

$$t = \frac{1}{2R}\left(\frac{e\,\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2$$

und dann kann man zur Berechnung von q_1 sowohl (43) als (44) anwenden; jede derselben gibt:

$$q_1 = \tfrac{1}{3}\,b\,t\,V \quad . \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\quad (45)$$

also den dritten Theil der p 1″ zufliessenden Wassermenge.

Die Wassermenge, welche in jeder Secunde zwischen den Schaufeln entweicht, ohne auf das Rad zu wirken, wird nun auf folgende Art bestimmt:

1. Wenn der Boden des Zuflusskanals und der Boden des Abflusskanals in einer geraden Linie liegen, berechne man zuerst den Werth von

$$\frac{e^2}{8R}\left(\frac{\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2$$

und dann findet man:

$$\left.\begin{array}{llr} q_1 = \frac{1}{24}\,\frac{e^2 b}{R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 V & \text{wenn } \frac{e^2}{8R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 & < t \\ q_1 = b\,t\,V - \frac{4}{3}\,\frac{b\,t}{e}\,(V-v)\sqrt{2\,R\,t} & \quad ,, & > t \\ q_1 = \frac{1}{3}\,b\,V\,t & \quad ,, \qquad\quad ,, & = t \end{array}\right\} \;.\;.\; (46)$$

2. Wenn im Abflusskanal Boden und Wasserspiegel tiefer liegen, als im Zuflusskanal unmittelbar vor dem Rade, berechne man zuerst den Werth von

$$\frac{e^2}{2R}\left(\frac{\frac{V}{v}}{\frac{V}{v}-1}\right)^2$$

dann findet man

$$\left.\begin{array}{ll} q_1 = btV - \frac{2}{3}\frac{bt}{e}(V-v)\sqrt{2tR} & \text{wenn } \frac{e^2}{2R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 > t \\ q_1 = \frac{1}{6}\frac{be^2}{R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 V & \quad " \qquad\qquad " \qquad < t \\ q_1 = \frac{1}{3}\,btV & \quad " \qquad\qquad " \qquad = t \end{array}\right\} (47)$$

Vergleicht man die 3 Werthe von q_1 der Gleichungen (46), so überzeugt man sich leicht, dass der erste kleiner und dass der zweite grösser ist, als der dritte, vorausgesetzt, dass in allen drei Fällen V, b und t übereinstimmen. Bei der Anordnung mit einem durchaus geradlinigen Gerinne ist also der Wasserverlust in dem ersten der drei Fälle (46) ein Minimum. Setzen wir für diesen günstigsten Fall

$$\frac{e^2}{8R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 = k \quad \ldots\ldots \quad (48)$$

so ist
$$k < t$$

und die erste der Gleichungen (46) gibt:

$$q_1 = \frac{1}{3}\,bVk = \frac{1}{3}\frac{K}{t} \times bVt \quad \ldots \quad (49)$$

Diese Wassermenge ist also kleiner als $\frac{1}{3}$ bVt, d. h. kleiner, als ein Dritttheil der p 1″ dem Rade zufliessenden Wassermenge, und aus dem Werth von k ersieht man, dass ein unterschlächtiges Rad eine enge Schauflung und einen grossen Halbmesser haben soll, damit nicht zu viel Wasser zwischen den Schaufeln durchgeht ohne gegen dieselben zu stossen. Ferner sieht man aus dieser Gleichung noch, dass in dieser Hinsicht ein langsamer Gang des Rades vortheilhaft ist.

Für ein unterschlächtiges Rad von gewöhnlicher Ausführung kann man nehmen:

$$e = 0{\cdot}5^m$$
$$R = 2$$
$$v = 0{\cdot}5\ V$$
$$t = 0{\cdot}12$$

dann finden wir: $k = \frac{1}{16}$ mithin $< t$ und der Wasserverlust wird:

$$q_1 = \frac{1}{3}\, b\, V\, t \times \frac{k}{t} = 0{\cdot}18\, b\, V\, t$$

demnach 18% von der zufliessenden Wassermenge. Wenn das gleiche Rad schneller geht, wenn z. B. $v = 0{\cdot}6\, V$ ist, findet man:

$$k = 0{\cdot}098 < t$$

und

$$q_1 = 0{\cdot}27\, b\, V\, t$$

Der Verlust beträgt also nun schon 27%.

Vergleicht man die drei Werthe von q_1 der Gleichung (47), so überzeugt man sich wiederum leicht, dass der erste grösser und der zweite kleiner ist als der dritte.

Bei der Anordnung mit dem tieferliegenden Abflusskanal ist demnach der Wasserverlust in dem zweiten der drei Fälle (47) am kleinsten. Setzen wir für diesen günstigsten Fall:

$$\frac{e^2}{2R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2 = k_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

so ist

$$k_1 < t$$

und die zweite der Gleichungen (47) wird:

$$q_1 = \frac{1}{3}\, b\, V\, k_1 = \frac{1}{3}\, \frac{k_1}{t} \times b\, V\, t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (51)$$

Diejenigen Werthe von **e, R, V, v, t,** welche der Bedingung $k_1 < t$ entsprechen, genügen um so viel mehr der Bedingung $k < t$, und können daher sowohl auf die Gleichungen (48) und (49), als auch auf (50) und (51) angewendet werden. Dann ist aber $4\, k = k_1$ und der Werth von q_1, welcher sich aus (49) ergibt, ist viermal kleiner, als jener, welchen (51) bestimmt, d. h. wenn $k_1 < t$ ist, fällt der Wasserverlust bei der Anordnung mit dem tiefer liegenden Abflusskanale viermal grösser aus, als bei jener mit dem ununterbrochen fortlaufenden Gerinne. Noch vortheilhafter erscheint die letztere Anordnung gegen die erstere, wenn zwar $k < t$, dagegen $k_1 > t$ ist.

Wenn ein unterschlächtiges Rad neu angeordnet werden soll, wird man daher ein ununterbrochenes Gerinne wählen und die Anzahl der Schaufeln so zu bestimmen suchen, dass die nutzlos entweichende Wassermenge nur gewisse Prozente von der zufliessenden Wassermenge beträgt.

Bezeichnet man diese Prozente mit p, so ist wegen (47)

$$p = \frac{q}{Vbt} = \frac{1}{3}\frac{k}{t}$$

demnach: $k = 3pt$ und wegen (48)

$$3pt = \frac{e^2}{8R}\left(\frac{V}{V-v}\right)^2$$

Hieraus folgt:

$$e = 2 \cdot \frac{V-v}{V}\sqrt{6ptR} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

Bezeichnet man die dieser Theilung entsprechende Anzahl der Schaufeln mit i, so findet man:

$$i = \pi \frac{V}{V-v}\sqrt{\frac{R}{6pt}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (53)$$

Wenn wir z. B. verlangen, dass der Wasserverlust nur 10 Prozent betragen soll, so ist zu setzen $p = 0{\cdot}1$. Ist überdies: $v = 0{\cdot}5\ V$, $R = 2$, $t = 0{\cdot}12$, so wird nach (53)

$$i = 33.$$

Die besseren unterschlächtigen Räder von ungefähr 2^m Halbmesser haben 30 bis 36 Schaufeln, was mit unserem Rechnungsresultat übereinstimmt.

Wenn das Gerinne so angeordnet wird, dass es durch einen Bogen von der Länge

$$e \cdot \frac{V}{V-v}$$

an den Umfangskreis des Rades anschliesst, kann kein Wassertheilchen zwischen den Schaufeln in den Abflusskanal entweichen, ohne auf das Rad zu wirken.

Hievon überzeugt man sich auf folgende Art. Denken wir uns das Gerinn **X A Y**, Fig. (22) von **A** an nach dem Umfang des Rades bogenförmig fortgesetzt, und die Schaufeln des Rades durch Rahmen ersetzt. Nehmen wir an, dass die Wassermasse **A D F E** mit unveränderlicher Geschwindigkeit **V** an den Bogen **A N** hinaufgleitet, während die untere Kante des Rahmens mit einer Geschwindigkeit v von **A** gegen **N** fortrückt, so wird nach einer gewissen Zeit das letzte Theilchen **E** der Wassermasse **E F A D** mit der unteren Kante des Rahmens zusammentreffen, und in diesem Augenblick ist die ganze Wassermasse durch den Rahmen getreten. Wenn also das Gerinne nach dem Umfangskreis des Rades gekrümmt, und bis an jenen Punkt fortgesetzt wird, in welchem sich der Rahmen befindet, wenn er von dem Theilchen E erreicht worden ist, so ist klar, dass alle Wassertheilchen vollständig gegen die Schaufeln stossen müssen.

Ist nun z. B. N der Punkt, in welchem der Rahmen von dem Theilchen E erreicht wird, und setzen wir $AN = x$, so hat man zur Bestimmung dieser Grösse offenbar folgende Gleichung:

$$\frac{x}{v} = \frac{\overline{AE} + x}{V} = \frac{e\frac{V}{v} + x}{V}$$

und hieraus folgt:

$$x = e \cdot \frac{V}{V - v}.$$

Es ist hiermit die Richtigkeit der oben ausgesprochenen Behauptung erwiesen.

Für die vortheilhaftere Geschwindigkeit der Räder ist v nahe $= 0{\cdot}5\,V$, und dann wird:

$$x = 2\,e.$$

Bei einem unterschlächtigen Rad muss man also das Gerinne auf eine Länge von zwei Schaufeltheilungen an den Umfangskreis des Rades anschliessend, anordnen, damit kein Wasser zwischen den Schaufeln entweichen kann. Wenn man diese Regel beachtet, kann man auch mit einer geringeren Anzahl von Schaufeln und mit einem kleineren Rade eine ebenso gute Wirkung hervorbringen, wie mit einer grösseren Anzahl und einem grösseren Rade, was für die Praxis von Werth ist.

Wassermenge, welche unter dem Rade durch den Spielraum der Schaufel am Gerinne entweicht.

Die Schaufeln des Rades können nie vollkommen in das Gerinne eingepasst werden, indem sie sonst bei der geringsten Formveränderung des Rades an dem Boden oder an die Wände des Gerinnes anstossen würden. Um die Wassermenge zu bestimmen, welche durch den Spielraum der Schaufel am Gerinne entweicht, muss die besondere Anordnung des Gerinnes mit in Betrachtung gezogen werden. Vergleicht man die Anordnungen Fig. 26, 27, 28, 29, so wird man finden, dass bei den