

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Theorie und Bau der Wasserräder

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1846

Effektverlust durch Wasserverluste

[urn:nbn:de:bsz:31-282850](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-282850)

untersten Radpunktes über den Spiegel des Unterwassers verloren. Im zweiten Falle werden die Zellen, nachdem sie sich beim Niedergange allmählig entleert haben, während des Durchganges durch das Unterwasser wiederum theilweise gefüllt, und ziehen, wie man sich auszudrücken pflegt, Wasser mit in die Höhe, was mit Kraftverlust verbunden ist.

Bei dem *Poncelet*-Rade ist der Austritt des Wassers mit Effektverlust verbunden, wenn derselbe über dem Spiegel des Unterwassers und mit Geschwindigkeit erfolgt. Das erstere tritt ein, wenn der Halbmesser des Rads zu klein und die Krümmung der Schaufeln zu schwach ist, das letztere, wenn die Umfangsgeschwindigkeit des Rades merklich grösser oder kleiner ist als die Hälfte der Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser das Rad erreicht.

Effektverlust durch Wasserverluste.

Um diese Verluste genauer kennen zu lernen, ist es nothwendig, das unterschlächtige Rad, die Räder mit Kreisgerinnen und das ober-schlächtige Rad besonders zu betrachten.

Die unterschlächtigen Räder haben gewöhnlich ein geradlinig fortlaufendes Gerinne (Schnurgerinne), in welchem die Schaufeln $0,03^m$, $0,04^m$ oder noch mehr Spielraum haben. Indem nun das Wasser auf der Bahn des Gerinnes hinläuft, kommen die untern Schichten desselben schnurgerade in den Spielraum und entweichen in den Abflusskanal, ohne auf das Rad eine Wirkung hervorzubringen. Der Effektverlust, welcher dadurch entsteht, ist offenbar der entweichenden Wassermenge und dem totalen Gefälle proportional, und das Verhältniss zwischen diesem Effektverlust und dem absoluten Effekte der Wasserkraft ist gleich dem Verhältniss zwischen der entweichenden und der dem Rad zufließenden Wassermenge, oder auch gleich dem Verhältniss zwischen der Weite des Spielraums und der Dicke der Wasserschicht vor dem Rade; beträgt dieser Spielraum $\frac{1}{10}$ oder $\frac{1}{5}$ von der Dicke der Wasserschicht, so gehen 10 bis 20 % von der absoluten Kraft verloren. Dieser Verlust kann fast ganz beseitigt werden, wenn man das Gerinne unter dem Rade aushöhlt, Fig. 29, und das Rad in diese Aushöhlung herabsenkt, denn dann werden die untern Schichten des dem Rade zufließenden Wassers nicht mehr direkt in den Spielraum, sondern in das Innere des Rades geleitet.

Bei dem unterschlächtigen Rade verursacht auch die Schaufeltheilung einen Wasserverlust, indem jederzeit eine gewisse Wassermenge zwischen den Schaufeln nach dem Abzugskanal gelangt, welche nur theilweise oder gar keine Geschwindigkeitsänderung erleidet. Dieser Wasserverlust wächst mit der Schaufeltheilung und mit der Geschwindigkeit des Rades, nimmt aber mit dem Halbmesser des Rades ab. Auch findet man, wenn man die Sache genau verfolgt, dass dieser Verlust bei

radial stehenden Schaufeln kleiner ist als bei schief stehenden. Unterschlächtige Räder mit geradlinig fortlaufendem Gerinne sollen also wegen des Wasserverlustes, der durch die Schaufeltheilung verursacht wird, 1) einen grossen Halbmesser, 2) eine enge Schaufeltheilung, 3) radial gestellte Schaufeln, 4) einen langsamen Gang erhalten. Dieser Verlust kann aber wiederum fast ganz beseitigt werden, wenn man das Gerinne unter dem Rade aushöhlt, und in diese Aushöhlung das Rad einsenkt. Diese ausgehöhlten Gerinne schützen also gegen jeden Wasserverlust und gewähren den Vortheil, dass der Halbmesser des Rades klein und die Schaufeltheilung grösser genommen werden kann, als bei einem geradlinigen Schnurgerinne. Was so eben von den unterschlächtigen Rädern gesagt wurde, findet auch seine Anwendung auf das Poncelet-Rad. Auch bei diesem können die Wasserverluste vermieden werden, wenn das Gerinne ausgehöhlt wird.

Bei den Rädern mit Kreisgerinnen haben die Schaufeln oder Zellen ebenfalls einen Spielraum, durch welchen aus allen denjenigen Zellen, wo der Wasserspiegel über der äusseren Zellenkante steht, Wasser entweicht und in die vorausgehende Zelle hineinfliesst, ohne während dieser Zeit auf das Rad wirken zu können. Bei den Schaufelrädern entweicht in der Regel das Wasser schon von da an, wo die Füllung geschieht. Bei den Kübelrädern dagegen beginnt das Entweichen gewöhnlich erst in bedeutender Tiefe unter dem Orte, wo die Füllung statt findet. Die Wassermengen, welche aus den verschiedenen Zellen in einem bestimmten Zeittheilchen entweichen, sind nicht gleich gross. Diese Wassermenge ist gewöhnlich in einiger Tiefe unter dem Punkte, in welchem das Entweichen beginnt, am grössten, und nimmt immer mehr und mehr ab, je mehr eine Zelle nach aufwärts oder nach abwärts von diesem Punkte entfernt ist. Der Unterschied dieser Wassermengen ist aber nicht sehr bedeutend, so dass wir sie für eine ungefähre Schätzung des Effektverlustes als gleich gross annehmen dürfen. Unter dieser Voraussetzung ist aber klar, dass sich die Wassermenge in den einzelnen Zellen gar nicht ändert, während dieselben nieder gehen, denn jede Zelle empfängt in jedem Augenblicke so viel Wasser, als sie verliert. Es ist also dann gerade so, als ob auf das Rad um so viel weniger Wasser wirkte, als durch den Spielraum einer Schaufel entweicht; der daraus entstehende Effektverlust ist daher gleich dem Produkte aus dem Gewicht, der aus einer Zelle $p 1''$ entweichenden Wassermenge in die Höhe des Punktes, in dem das Entweichen beginnt, über dem Spiegel des Unterwassers. Nennen wir zur Abkürzung der Sprache die so eben genannte Wassermenge q und die Höhe h , so ist $1000 qh$ der Effektverlust. Nennen wir ferner die $p 1''$ auf das Rad wirkende Wassermenge Q und das totale Gefälle H , so ist

$$\frac{qh}{QH}$$

das Verhältniss zwischen dem Effektverlust und dem absoluten Effekt der Wasserkraft.

Bei den Schaufelrädern ist gewöhnlich h nicht viel kleiner als H , daher $\frac{h}{H}$ nahe gleich der Einheit, und das obige Verhältniss wird dann $\frac{q}{Q}$.

Bei den Kübelrädern ist jederzeit h bedeutend kleiner als H , daher hier $\frac{h}{H}$ bedeutend kleiner als eins ausfällt. Schaufelräder sind also hinsichtlich des Wasserverlusts nachtheiliger als Kübelräder. Die Wassermenge q ist gleich dem Produkte aus dem Flächeninhalt des Spielraumes in die mittlere Geschwindigkeit, mit welcher das Wasser entweicht. Nennen wir b die Breite des Rades, ε den Spielraum der Schaufel im Gerinne und z die Höhe, welche der Geschwindigkeit entspricht, mit welcher das Wasser entweicht, so ist

$$q = \varepsilon b \sqrt{2gz}$$

und der Werth von $\frac{qh}{QH}$ wird dann

$$\varepsilon \cdot b \cdot \frac{h \sqrt{2gz}}{H \cdot Q}$$

Wenn die Schaufelkante, an welcher das Entweichen Statt findet, über dem Wasserspiegel der Zelle steht, nach welcher das Wasser entweicht, so ist z gleich der Höhe des Wasserspiegels in der Zelle, aus welcher das Wasser entweicht über der Kante, an welcher dies geschieht. Wenn dagegen die Kante, an welcher das Entweichen Statt findet, in das Wasser der voraus gehenden Zellen eintaucht, ist der Werth von z gleich dem Vertikalabstand der Wasserspiegel in den beiden Zellen. Annäherungsweise dürfen wir annehmen, dass in dem einen wie in dem andern Fall die Höhe z um so grösser ist, je mehr Wasser eine Zelle enthält.

Diess Alles vorausgesetzt, sind wir nun im Stande, uns eine ungefähre Vorstellung zu verschaffen, wie das Verhältniss zwischen dem Effektverlust, der durch das Entweichen des Wassers entsteht und dem absoluten Effekt der Wasserkraft unter verschiedenen Umständen beschaffen ist. Dieses Verhältniss ist:

- 1) bei Schaufelrädern grösser als bei Kübelrädern.
- 2) Es ist dem Spielraum proportional, daher bedeutend oder unbedeutend, je nachdem das Rad ungenau oder genau in das Gerinne eingepasst ist.
- 3) Es ist unter sonst gleichen Umständen bei einem eng geschaukelten Rade kleiner als bei einem weit geschaukelten, denn wenn bei zwei

Rädern alles übereinstimmt bis auf die Schaufeltheilung, d. h. wenn zwei Räder bis auf die Schaufeltheilung ganz übereinstimmen, wenn ferner beide gleiche Umfangsgeschwindigkeiten haben, endlich auf beide gleich grosse Wassermassen einwirken, so wird bei dem weitgeschaufelten Rade der Wasserstand z grösser sein als bei dem eng geschaufelten. Der Wasserverlust ist also bei dem ersteren grösser als bei dem letzteren. Eine enge Schaufelung ist also hinsichtlich des Wasserverlustes vortheilhaft.

4) Jenes Verhältniss ist unter sonst gleichen Umständen bei einem breiteren Rade grösser als bei einem schmäleren, denn nehmen wir z. B. zwei Räder an, von denen das eine vier mal so breit ist als das andere, so wird bei dem vier mal so breiten Rade die Ausflussöffnung vier mal so gross, der Wasserstand z vier mal so klein, die Ausflussgeschwindigkeit $\sqrt{2gz}$ aber nur zwei mal so klein, die entweichende Wassermenge also zwei mal so gross sein als bei dem schmäleren Rade. Für Räder, die nicht genau ausgeführt sind, ist demnach eine grosse Breite hinsichtlich des Wasserverlustes nachtheilig.

5) Jenes Verhältniss nimmt ab, wenn die radiale Tiefe des Rades zunimmt; denn offenbar ist der Wasserstand z und folglich auch die entweichende Wassermenge bei einem tieferen Rade kleiner als bei einem seichten. Ungenau gebaute Räder sollen daher hinsichtlich des Wasserverlustes tief gemacht werden, genau gebaute können jedoch seicht gemacht werden, weil dies für den Wassereintritt vortheilhaft ist.

6) Jenes Verhältniss ist unter sonst gleichen Umständen bei einem schnell gehenden Rade kleiner als bei einem langsam gehenden, denn so wie die Geschwindigkeit eines Rades wächst, nimmt der Wasserstand z , die Ausflussgeschwindigkeit $\sqrt{2gz}$ und die Wassermenge q ab. Ungenau gebaute Räder sollen also hinsichtlich des Wasserverlustes schnell, genau gebaute Räder aber können langsamer gehen.

7) Endlich nimmt jenes Verhältniss ab, wenn der Wasserzufluss wächst. Wird der Wasserzufluss vier mal so gross, so wird es auch der absolute Effekt der Wasserkraft, die entweichende Wassermenge wird aber dann nur zwei mal so gross, weil bei vierfachem Wasserzufluss zwar die Höhe z auch vier mal, die Ausflussgeschwindigkeit aber nur zwei mal so gross ausfällt. Hinsichtlich des Wasserzuflusses ist es insbesondere bei ungenau gebauten Rädern gut, wenn eine grosse Wassermenge auf dieselben geleitet wird, oder mit anderen Worten, ungenaue Räder geben mit starkem Wasserzufluss einen günstigeren Effekt als mit schwachem.

Betrachten wir nun noch das überschlächtige Rad hinsichtlich des Wasserverlustes, der durch das allmälige Entleeren der Zellen entsteht. Weil diese Räder keine Gerinne haben, entleert sich jede Zelle, bevor sie den tiefsten Punkt des Rades erreicht. Diese Entleerung beginnt, wenn eine Zelle diejenige Stellung erreicht hat, in der der Spiegel des

in ihr befindlichen Wassers mit der äusseren Kante zusammentrifft, und dauert so lange fort, bis die Tangente an dem äussersten Punkt der Zelle eine horizontale Stellung erreicht. Halbirt man die Entfernung der Punkte des Radumfangs, die dem Beginne und dem Ende der Entleerung entsprechen, und misst die Höhe dieses Punktes über dem Spiegel des Unterwassers, so hat man annähernd den Gefällsverlust, der durch die allmähliche Entleerung entsteht, und das Verhältniss zwischen dieser Höhe und dem totalen Gefälle ist gleich dem Verhältniss zwischen dem Effektverlust und dem absoluten Effekt der Wasserkraft.

Dieses Verhältniss wird klein:

1) Wenn die Zellen, nach dem Umfang des Rades gemessen, tief gebaut sind, und wenn die äussere Wand, welche die Bestimmung hat, das Wasser in dem Rade zu erhalten, den Umfang des Rades unter einem kleinen Winkel schneidet. Dies ist für sich klar, und bedarf keiner Erläuterung.

2) Wenn die Zellen des Rades nur wenig gefüllt werden; die Füllung ist aber um so schwächer, je kleiner die Wassermenge ist, welche $p 1''$ auf das Rad wirkt und je grösser Breite, Tiefe und Geschwindigkeit des Rades ist.

3) Wenn die Schaufeltheilung klein ist. Um dies einzusehen, denke man sich zwei Räder, auf welche gleiche Wassermengen wirken, die gleiche Geschwindigkeiten haben, und die in ihrem Bau ganz congruent sind bis auf die Zahl der Zellen, und nehmen wir an, das eine dieser Räder habe zwei mal so viel Zellen als das andere, so ist klar, dass in einer Zelle von dem Rade mit zwei mal so viel Zellen nur halb so viel Wasser enthalten sein wird, als in einer Zelle des anderen Rades, dass also bei dem ersteren die Entleerung viel später beginnen wird, als bei dem letzteren, woraus der Vortheil einer engen Zellentheilung erhellet.

Bei den Oberschlächtigen Rädern kommt auch die Centrifugalkraft in Betracht. Diese strebt fortwährend, die Theilchen des in den Zellen enthaltenen Wassers nach radialer Richtung hinaus zu treiben. Die Oberfläche des Wassers in den Zellen erhält dadurch eine concave, gegen die äussere Kante ansteigende, cylindrische Fläche, die Entleerung muss deshalb früher beginnen, als wenn diese Oberfläche eine horizontale Ebene ist. Der Einfluss der Centrifugalkraft ist daher nachtheilig, jedoch nur bei kleinen Rädern mit grosser Umfangsgeschwindigkeit, denn die Kraft, mit welcher jedes Theilchen nach radialer Richtung durch die Centrifugalkraft getrieben wird, ist dem Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit direkt und dem Halbmesser des Rades verkehrt proportional. Der Einfluss der Centrifugalkraft ist daher bei grossen und langsamer

gehenden Rädern ganz unmerklich, bei kleinen schnell gehenden dagegen beträchtlich.

Bewegungszustand des Wassers im Rade.

Die früher angegebene Berechnung des Effektverlustes, welcher durch den stossweisen Eintritt des Wassers und durch den Austritt entsteht, ist streng genommen nur dann richtig, wenn das Wasser durch den Stoss seine ganze relative Geschwindigkeit verliert; also nach dem Stosse ruhig den Schaufeln oder Zellen folgt, ohne gegen dieselben eine relative Bewegung zu haben, daher zuletzt mit einer Geschwindigkeit austritt, die mit der Umfangsgeschwindigkeit des Rades übereinstimmt. Diese Voraussetzung ist nicht ganz richtig, denn das Wasser besitzt nach dem Stosse immer noch eine gewisse relative, entweder regelmässig schwingende oder unregelmässig durch einander wirbelnde Bewegung gegen die Schaufel. Wie gross die Summe der Effektverluste ausfällt, welche beim Ein- und Austritt entstehen, wenn das Wasser, während es im Rade verweilt, einen regelmässig oscillirenden Bewegungszustand hat, hängt von sehr zusammengesetzten Verhältnissen ab und kann nicht im Allgemeinen angegeben werden. Nur so viel kann man sagen, dass jene Verluste nicht grösser ausfallen können als sie es dann sind, wenn das Wasser beim Eintritt die ganze relative Geschwindigkeit verliert, daher ruhig den Schaufeln oder Zellen folgt. Eine regelmässig oscillirende Bewegung des Wassers in den Zellen kann daher den Nutzeffekt nicht schwächen. Wohl aber ist es möglich, dass ein solcher Bewegungszustand der Gleichförmigkeit der Bewegung des Rades nachtheilig wird; wenn es sich z. B. trifft, dass gleichzeitig in einer Mehrzahl von Zellen die Richtungen, nach welchen die Wassermassen schwingen, übereinstimmen, so ist zwar der mittlere Druck, mit welchem das im Rade befindliche Wasser auf dasselbe einwirkt, eben so gross, als er ist, wenn das Wasser ruhig den Zellen folgt, allein dieser mittlere Druck ist dann nicht in jedem Augenblicke vorhanden, sondern der wirklich Statt findende Druck ist bald grösser, bald kleiner als der mittlere. Das erstere ist der Fall, während die Wassermassen nieder, das letztere während sie aufwärts schwingen. Man sieht also, dass in Folge dieser Schwingungen eine sehr ungleichförmige Einwirkung des Wassers auf das Rad, und folglich eine sehr ungleichförmige Bewegung desselben entstehen kann, was in der Regel für den Betrieb der Maschinen sehr nachtheilig ist. Bei den überschlächtigen Rädern fällt in Folge der schwingenden Bewegungen sehr viel Wasser frühzeitig aus dem Rade, was für den Nutzeffekt nachtheilig ist, und Unregelmässigkeiten in der Bewegung können auch hier eintreten. Wenn die Wassertheilchen nach dem Stosse unregelmässig durch

einander wirbeln, vernichten sie bald wechselseitig ihre Geschwindigkeiten, die Bewegung wird daher nach und nach ruhiger und verschwindet nach einiger Zeit, so dass dann das Wasser im Momente seines Austritts aus dem Rade nur mehr noch die Geschwindigkeit des Radumfangs besitzt. Es ist klar, dass in diesem Falle der Effektverlust nicht ungünstiger ausfällt, als in jenem, wenn das Wasser gleich beim Stosse seine ganze relative Geschwindigkeit verliert.

Das Endresultat dieser Betrachtungen ist also folgendes:

1) Ein unregelmässiges Durcheinanderwirbeln des Wassers hat auf den Effekt keinen merklichen, weder günstigen noch schädlichen Einfluss.

2) Bei Rädern mit Gerinnen hat zwar ein regelmässiges Oscilliren des Wassers in den Zellen keinen nachtheiligen Einfluss auf den Effekt, wohl aber auf den Gang des Rades, denn dieser wird dadurch ungleichförmig.

3) Bei den überschlächtigen Rädern, die kein Gerinne haben, verursacht ein regelmässiges Oscilliren des Wassers sowohl einen Effektverlust, als auch eine ungleichförmige Bewegung des Rades. Hieraus geht hervor, dass es besser ist, wenn man Alles zu vermeiden sucht, was eine regelmässig oscillirnde Bewegung des Wassers veranlassen kann. Regelmässig gekrümmte Schaufeln oder Zellen soll man daher nicht anwenden, insbesondere soll der tiefere Theil der Zellen, gegen welchen das Wasser am stärksten hinschlägt, nicht abgerundet, sondern eckig gemacht werden, damit sich das Wasser gleich beim Eintritt zerschlägt.

Betrachten wir nun noch das Poncelet-Rad hinsichtlich des Zustandes, in welchem sich das Wasser befindet, während es im Rade verweilt.

Die auf und nieder oscillirende Bewegung des Wassers erfolgt in dem Falle, wenn das Volumen der Wassermenge, die in einen Schaufelraum gelangt, bedeutend kleiner ist als das Volumen des Schaufelraumes, ganz anders als wenn jene Volumina nur wenig von einander verschieden sind, wir müssen daher jeden dieser zwei Fälle besonders betrachten.

Wenn das in einen Schaufelraum gelangende Wasservolumen bedeutend kleiner ist, als das Volumen des Schaufelraumes, kann die Füllung und Entleerung eines Schaufelraumes in drei Perioden getheilt werden. In der ersten Periode, die dann anfängt, wenn die Wassertheilchen einzutreten beginnen, und so lange fort dauert, bis das zuerst eingetretene Theilchen die Höhe erreicht hat, welche seiner relativen Eintrittsgeschwindigkeit entspricht, ist nur ein aufsteigender Strom von Wassertheilchen vorhanden. Während der zweiten Periode, die mit dem Schlusse der ersten beginnt und in dem Augenblicke endigt, wenn das zuletzt in den Schaufelraum eingetretene Theilchen seine grösste Erhebung er-

reicht hat: sind zwei Ströme, ein aufsteigender und ein niedergehender, vorhanden. In der dritten Periode, welche sich an die zweite anschliesst, und mit dem Austritt des letzten Wassertheilchens endiget, ist nur ein niedergehender Strom von Wassertheilchen vorhanden. In der ersten Periode ist es allerdings möglich, dass die Wassertheilchen ihre aufsteigende Bewegung ohne wechselseitige Störung vollbringen. In der zweiten Periode ist dies nicht möglich, denn die gleichzeitig vorhandenen, nach entgegengesetzter Richtung gehenden Strömungen verursachen wechselseitig Störungen. In der dritten Periode könnte allerdings wiederum eine regelmässige Bewegung vorhanden sein, wenn nicht schon vorher die Unordnung begonnen hätte.

Wenn das in einen Schaufelraum eingetretene Wasservolumen nicht viel kleiner ist, als das Volumen des Schaufelrades, füllt der zunächst aufsteigende Strom den Schaufelraum der ganzen Weite nach aus, es kann sich daher kein Doppelstrom bilden, weil es dazu an freiem Raum fehlt. Die ganze Zeit der Füllung und Entleerung zerfällt daher hier in zwei Perioden. In der ersten findet ein aufsteigender, in der zweiten ein niedergehender Strom statt, und in diesen Strömen haben die Theilchen fast keine relative Bewegung gegen einander, sondern die ganze Wassermasse schwingt als ein Körper an der Schaufel hinauf, bis der Schwerpunkt desselben die Höhe erreicht hat, welche der relativen Eintrittsgeschwindigkeit entspricht, schwingt dann wiederum herab und fällt aus dem Rade heraus. Die Höhe, welche dabei die einzelnen Wassertheilchen erreichen, ist also ungleich, die zuerst eingetretenen werden von dem Augenblick an, wenn sie die ihrer relativen Eintrittsgeschwindigkeit entsprechende Höhe erreicht haben, von dem nachfolgenden Wasser noch höher hinaufgehoben, die zuletzt eintretenden Theilchen dagegen erreichen nur eine geringe Höhe, weil sie durch das voraus befindliche Wasser daran verhindert werden.

Vergleicht man nun, wie die schwingende Bewegung des Wassers in dem einen, und wie sie in dem andern Falle erfolgt, so wird man sich wohl überzeugen, dass vorzugsweise das Vorhandensein eines Doppelstromes Unregelmässigkeiten und Störungen in der Bewegung des Wassers verursacht; dass demnach bei dem Poncelet-Rade durch den Bewegungszustand des Wassers, während es im Rade verweilet, beträchtliche Verluste an lebendiger Kraft eintreten müssen, wenn das Rad nur wenig gefüllt ist. Dieses Rad soll also nur so geräumig angeordnet werden, als durchaus nöthig ist, um die Wassermasse fassen zu können, welche auf das Rad wirken soll.