

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Theoretische Maschinenlehre

in 4 Bänden

Theorie der Kraftmaschinen

Grashof, Franz

Leipzig, 1890

[Einleitung]

[urn:nbn:de:bsz:31-282943](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-282943)

Dagegen ist es fraglich, ob auch bei Hochwasser die Stauhöhe am oberen Ende der benutzten Flussstrecke bei A der Bedingung gemäss noch kleiner, als 0,06 Mtr., folglich ob die Flussstelle, wo bei Hochwasser die Stauhöhe $h^1 = 0,06$ Mtr. stattfinden wird, um weniger als 500 Mtr. vom Wehr bei C entfernt ist? Zur Prüfung dienen wieder die Gleichungen (4)–(10), in welchen aber jetzt

$$a = a^1 = 0,58 \text{ und } u_0 = \frac{6,5}{0,58 \cdot 10} = 1,121$$

zu setzen ist, während es nur einen kleinen Fehler verursachen kann, wenn der frühere Werth des Coefficienten

$$c = \left(\frac{k_0}{k}\right)^{\frac{2}{3}} = 0,92$$

hier beibehalten wird. So findet man nach (4):

$$s = 420 + 191 (i^1 - i)$$

und weiter mit Rücksicht auf (10) und die betreffende Tabelle in Bd. I, §. 133, nämlich mit

$$\begin{array}{l|l} \frac{1}{x} = \frac{0,58 \cdot 0,92}{0,58 + 0,9} = 0,361 & i = 0,0664 \\ \frac{1}{x^1} = \frac{0,58 \cdot 0,92}{0,58 + 0,06} = 0,834 & i^1 = 0,4811 \\ \hline s = 420 + 79 = 499 \text{ Mtr.} \end{array}$$

Die Wehrdammhöhe = 1,13 Mtr., entsprechend der Stauhöhe $h = 0,9$ Mtr. an der Flussstelle C , ist also in der That eben noch zulässig.

II. Wasserräder.*

§. 12. Einleitende Erklärungen.

Die wesentlichsten und besonders für die Theorie vorzugsweise in Betracht kommenden Theile eines Wasserrades sind seine Schaufeln (von Holz oder Eisenblech), welche zur unmittelbaren Aufnahme des Wasserdrucks dienen und welche, abgesehen von ihrer Dicke, als con-

* Es versteht sich von selbst, dass hier wie in den folgenden Abschnitten die bezügliche Litteratur vielfach benutzt worden ist, wenn es auch an den betreffenden Stellen nicht immer ausdrücklich gesagt wurde. Was insbesondere diesen von den Wasserrädern handelnden Abschnitt betrifft, so bezieht sich jene Bemerkung besonders auf die Schriften von Redtenbacher und auf G. Herrmann's Bearbeitung der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik von Weisbach.

gruente materielle Flächen bezeichnet werden können, die in gleichen Entfernungen von einander und in gleichen Lagen gegen das Rad an dessen Umfange so angeordnet sind, dass sie bei der Umdrehung des Rades alle denselben ringförmig cylindrischen Raum durchlaufen. Dieser Raum heisse im Folgenden der Radkranz, jeder der gleichen Theile, in die er durch die Schaufeln getheilt wird, ein Schaufelraum.

An seiner äusseren Cylinderfläche ist der Radkranz offen, indem hier das Wasser ein- und austritt. (Nur ausnahmsweise ist wohl auch das Wasser an der Innenfläche des Kranzes eingeführt worden.) Gewöhnlich ist der Radkranz an seiner inneren Cylinderfläche durch einen sogenannten Boden materiell abgeschlossen. Je nach Form und Stellung der Schaufeln, deren Oberflächen übrigens stets cylindrische (ebene, gebrochene oder krumme) Flächen mit Erzeugungslinien parallel der Radaxe sind, unterscheidet man gewöhnlich Schaufelräder im engeren Sinne und Zellenräder; bei ersteren haben die Schaufeln eine vorwiegend radiale, bei letzteren wenigstens nach aussen hin eine mehr tangential Richtung. An den beiden ebenen ringförmigen Seitenflächen ist der Radkranz bei Zellenrädern materiell abgeschlossen, bei den Schaufelrädern nicht immer, vielmehr sind Schaufelräder mit seitlich geschlossenem Radkranz (sogenannte Staberäder) und solche mit seitlich offenem Radkranz (sogenannte Strauberäder) zu unterscheiden.*

Man unterscheidet ferner freihängende und Kropfräder. Erstere sind entweder freihängend im engeren Sinne, nämlich so, dass die tiefste Stelle des Rades sich noch etwas, um den sogenannten Betrag des Freihängens, über dem Unterwasserspiegel befindet, oder sie tauchen in das Wasser ein, entweder als Schiffmühlenräder in das verhältnissmässig unbegrenzte Wasser eines Flusses, oder in das in einem geraden sogenannten Schnurgerinne fließende Wasser mit möglichst kleinem Spielraume zwischen dem Radumfang und dem Gerinneboden. Bei den Kropfrädern wird der wasserhaltende Bogen des Kranzes von einem

* Dem sonstigen Sprachgebrauche würde es besser entsprechen, die Schaufelräume, abgesehen von der Schaufelform, immer dann als Zellen, die betreffenden Räder als Zellenräder zu bezeichnen, wenn der Radkranz seitlich materiell abgeschlossen ist, also die Schaufelräume nur nach aussen offen sind; doch mögen in dieser Hinsicht die eingebürgerten Benennungen beibehalten werden, die aus einer Zeit stammen, in welcher der Bau der Wasserräder kaum Sache des wissenschaftlichen Maschinenbaues, vielmehr lediglich des empirischen Handwerks war. Nur der oben festgestellte Begriff des Radkranzes weicht von dem hier üblichen Sprachgebrauche ab, gemäss welchem vielmehr die ringförmigen Seitenwände des hier so genannten Radkranzes als Radkränze bezeichnet zu werden pflegen.

sogenannten Kropf (Mantel) mit möglichst kleinem Spielraume zwischen der cylindrischen Oberfläche desselben und den äusseren Schaufelkanten umschlossen. Dieser aus Holz oder Stein hergestellte Kropf ist gewöhnlich zu einem Kropfgerinne ausgebildet durch ebene vertikale Seitenwände, die den Radkranz auch seitlich mit möglichst kleinem Spielraume umschliessen und (wenigstens im Falle hölzerner Kropfgerinne) als Wasserbänke bezeichnet zu werden pflegen. Nothwendig zum Zweck des Kropfes, den Ausfluss des Wassers aus den Schaufelräumen vor deren tiefster Lage thunlichst zu erschweren, sind dergl. Seitenwände des Kropfes natürlich bei Schaufelrädern mit seitlich offenem Radkranz.

In Bezug auf die Art der Wasserzuführung unterscheidet man Räder mit Spannschütze, Ueberfallschütze oder Leitschaufelschütze (Coulissenschütze), jenachdem das Aufschlagwasser aus einer rechteckigen Mündung mit oder ohne Ansatzgerinne dem Rade zufliesst, oder als Ueberfall über einer horizontalen Schwelle mit oder ohne angesetzte Leitschaukel, oder endlich aus einer kurzen Ansatzröhre bzw. aus einem System von solchen mit rechteckigen Querschnitten. Bei der Spannschütze geschieht die Regulirung durch ein von oben her stellbares Schutzblech, wodurch die Entfernung des oberen vom festliegenden unteren Rande der Ausflussöffnung, also die Höhe der letzteren verändert werden kann; die Regulirung betrifft unter diesen Umständen nur die Menge, nicht aber die Geschwindigkeit des ausfliessenden und dem Rade zufließenden Wassers, welche vielmehr mit dem Oberwasserstande sich entsprechend ändert und selbst (als mittlere Geschwindigkeit) bei unverändertem Oberwasserspiegel in bestimmtem Masse etwas grösser wird bei der Senkung, etwas kleiner bei der Hebung des Schutzbleches, somit etwas grösser bei der Verkleinerung, etwas kleiner bei der Vergrösserung der Wassermenge. Bei der Ueberfallschütze sind durch Verstellung der Ueberfallschwelle, also durch Aenderung der Höhe des Ueberfalles stets nur die Menge und die Geschwindigkeit des überfallenden Wassers in gleichem Sinne regulirbar; aber es ist wenigstens möglich, bei beliebig veränderlichem Oberwasserstande beide constant zu erhalten oder in beliebigem Masse, nur nicht unabhängig von einander zu ändern. Bei der Leitschaufelschütze endlich, wenigstens bei ihrer vollkommensten Ausführungsart, wobei das Wasser zwischen den einander zugekehrten horizontalen Rändern von zwei einzeln und unabhängig von einander stellbaren Schutzblechern und längs einem System von Leitschaukeln, welche zwischen der Gleitbahn jener Schutzblecher und dem Rade festliegend angeordnet sind, dem letzteren zufliesst, können die Menge und die

Geschwindigkeit des zufließenden Wassers unabhängig von einander regulirt werden, und es ist insofern diese Art der Wasserzuführung, wo sie constructiv am Platze ist, besonders bei sehr veränderlichem Oberwasserstande die vollkommenste, um so mehr, als man dabei auch die Sicherstellung der vortheilhaftesten Richtung des Wassereinflusses in das Rad am besten in der Gewalt hat. Freilich ist sie mit etwas grösseren hydraulischen Widerständen verbunden.

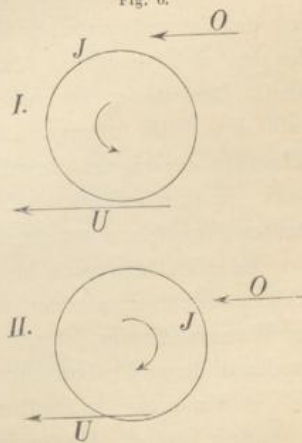
Mehr von constructiver Wichtigkeit, als von Bedeutung für die hier zu besprechende Theorie der Wasserräder, ist die Art und Weise, wie die gewonnene Arbeit vom Rade fortgepflanzt wird, ob insbesondere dazu 1) ein in einiger Entfernung von ihm auf der Wasserradwelle sitzendes Zahnrad dient, oder 2) ein mit dem Radkranze auf einer Seite verbundener Zahnkranz, oder 3) zwei solche Zahnkränze, die auf beiden Seiten mit dem Radkranze verbunden sind und in zwei Getriebe der Transmissionswelle eingreifen. Wenn man bei Voraussetzung von zwei Armsystemen zur Verbindung des Radkranzes mit der Welle dasjenige, welches im Falle 1) dem auf der Welle sitzenden Zahnrade zunächst liegt, als das erste, das andere als das zweite Armsystem bezeichnet, so wird das Wellenstück zwischen dem Zahnrade und dem ersten Armsystem durch das Kraftmoment M , das Wellenstück zwischen beiden Armsystemen durch das Kraftmoment $\frac{1}{2}M$ auf Torsion, sowie jedes Armsystem durch das Kraftmoment $\frac{1}{2}M$ auf Biegung in Anspruch genommen, wo $M = E \cdot \omega$ ist, unter E (§. 8) den Nutzeffect und unter ω die Winkelgeschwindigkeit des Rades verstanden. Im Falle 2) geht die Hälfte des Moments M unmittelbar in den Zahnkranz über, die andere Hälfte wird durch das zweite, nämlich durch das auf der anderen Seite des Radkranzes befindliche Armsystem, durch die Welle und durch das erste Armsystem auf den Zahnkranz übertragen. Vom Kraftmoment $\frac{1}{2}M$ werden somit beide Armsysteme und zwar in entgegengesetztem Sinne auf Biegung, das zwischen ihnen liegende Wellenstück auf Torsion in Anspruch genommen, es sei denn, dass durch schräg eingefügte Umfangszugstangen beide Seiten des Radkranzes unmittelbar so mit einander verbunden werden, dass sie keiner nennenswerthen relativen Verdrehung fähig sind. Vollkommen wird im Falle 3) die Welle vor Torsion, und werden die Radarme vor Biegung (abgesehen von der Wirkung des Radgewichtes) bewahrt, indem letztere dann nur zum Tragen des Rades dienen. Weitere, übrigens leicht zu

übersiehende Complicationen dieser Verhältnisse, welche für die Construction des Rades natürlich von erheblicher Bedeutung sind, treten dann ein, wenn bei sehr breiten Rädern noch ein drittes mittleres Armsystem angeordnet oder wenn ein Zahnkranz, anstatt unmittelbar mit dem Radkranze, an mittleren Stellen mit den Armen eines Armsystems verbunden wird.

Das hauptsächlichste Kriterium für die Unterscheidung verschiedener Arten von Wasserrädern ist der Ort, wo das Wasser in das Rad eingeführt wird. Jenachdem dieser nahe der obersten, mittleren (in der Höhe der Radaxe gelegenen) oder untersten Stelle des Rades sich befindet, unterscheidet man ober-schläch-tige, mittelschläch-tige und unter-schläch-tige Räder, auch zwischen den ober- und mittelschläch-tigen noch rückenschläch-tige (hochschläch-tige), zwischen mittel- und unter-schläch-tigen noch tief-schläch-tige Räder.

Ober- und rückenschläch-tige Räder sind freihängende Zellenräder, bei welchen das Wasser vorwiegend unmittelbar durch seine Schwere wirkt, indem es in den Zellen der einen Radhälfte niedersinkt; die Stoss-wirkung vermöge der lebendigen Kraft, womit das Wasser einfließt, ist von untergeordneter Bedeutung, indem das zur Erzeugung dieser lebendigen Kraft verwendete Gefälle einen verhältnissmässig kleinen Theil des ganzen Gefälles ausmacht. Den ober-schläch-tigen Rädern pflegt das Wasser durch eine Spanschütze, den rückenschläch-tigen durch eine Leitschaufel-schütze zugeführt zu werden, ein Vorzug der letzteren besonders bei veränderlicher Höhenlage des Oberwasser-spiegels. Auch besteht der Unterschied, dass den ober-schläch-tigen Rädern das Wasser im Zuflussgerinne in demselben Sinne zufließt, in welchem die Eintrittsstelle des Wassers in das Rad infolge der Drehung des letzteren ausweicht, den rückenschläch-tigen Rädern aber im umgekehrten Sinne, wie ein Blick auf Fig. 6 erkennen lässt, in welcher die Pfeile *O* und *U* bezw. den Ober- und Unter-wasser-spiegel und zugleich die Bewegungs-richtungen des Wassers daselbst andeuten, *J* die mittlere Einflussstelle des Wassers in das ober-schläch-tige Rad gemäss der durch I., in das rückenschläch-tige Rad gemäss der durch II. angedeuteten Disposition. Unter diesen Umständen ist unten die Abflussrichtung *U* des Wassers

Fig. 6.



der Bewegungsrichtung des oberflächigen Rades daselbst entgegengesetzt, mit derjenigen des rückenschlächtigen dagegen übereinstimmend, weshalb ersteres zur Vermeidung eines erheblichen Widerstandes im Unterwasser vor dem Eintauchen in dasselbe (dem sogenannten Waten) bewahrt werden muss, zuweilen (bei sehr veränderlicher Höhenlage des Unterwasserspiegels) ihm sogar unter mittleren Umständen ein gewisser Betrag des Freihängens gegeben wird, der einen für den Effect des Rades verlorenen Theil des Gefälles darstellt. Das Waten rückenschlächtiger Räder ist dagegen nicht von so erheblichem Nachtheil, was als Vorzug derselben auch mit Rücksicht auf die Veränderlichkeit des Unterwasserstandes zu betrachten ist. Um in solehen Fällen, in welchen thunlichst sparsame Wasserverwendung geboten ist, den Wirkungsgrad der rückenschlächtigen Räder noch mehr zu steigern, wird der wasserhaltende Bogen des Radkranzes zuweilen schon mit einem Mantel umgeben, bei welchem dann aber Wasserbänke (Seitenwände, die den Radkranz zwischen sich fassen) entbehrlich sind.

Mittel- und tiefschlächtige Räder sind gewöhnlich Schaufelräder mit Kropf, bei denen alle Arten der Wasserzuführung vorkommen. Bei den mittelschlächtigen Rädern wirkt das Wasser noch vorwiegend unmittelbar durch seine Schwere, indem es auf den im Kropf laufenden Schaufeln relativ ruhend niedersinkt, jedoch auch schon grossentheils, bei tiefschlächtigen Rädern mitunter sogar vorwiegend durch Stoss infolge des Geschwindigkeitsüberschusses des die Schaufeln treffenden Wassers.

Unterschlächtige Räder sind Schaufelräder, welchen abgesehen von den im unbegrenzten Wasser hängenden Schiffmühlenrädern, die einer Schütze nicht bedürfen, das Wasser durch eine Spannschütze zugeführt wird. Dasselbe wirkt ausschliesslich mittelbar durch seine schon ausserhalb des Rades erlangte lebendige Kraft, und zwar bei den mit ebenen Schaufeln versehenen Schiffmühlenrädern und Rädern im Schnurgerinne durch Stoss, bei dem mit gekrümmten und entsprechend gestellten Schaufeln ausgerüsteten Poncelet-Rade durch stetigen Druck. —

Es seien hier noch im Voraus einige Buchstabenbezeichnungen erklärt, welche ausser den schon im §. 8 erklärten bezüglich der Theorie der Wasserräder im Folgenden stets in denselben Bedeutungen gebraucht werden sollen. Es bezeichne

R den äusseren Halbmesser des Rades,

a die radiale Dimension des Radkranzes, die sogenannte Kranzbreite oder Radtiefe, bei vorhandenem Boden bis zu dessen Aussenfläche gerechnet,

b die axiale Dimension des Radkranzes oder die Radbreite, bei vorhandenen Seitenwänden des Radkranzes auch Radweite genannt, wodurch ausgesprochen ist, dass dann diese Dimension im Lichten zwischen den Seitenwänden gemessen werden soll (entsprechend der Bedeutung des Products ab als der Querschnittsgrösse des von den wirksamen Schaufelflächen durchlaufenen ringförmigen Raumes, der oben als Radkranz bezeichnet wurde),

z die Anzahl der Schaufeln,

e die Theilung des Rades, d. i. die in der äusseren Peripherie gemessene Entfernung zweier benachbarter Schaufeln,

ω die Winkelgeschwindigkeit des Rades,

n seine Umdrehungszahl pro Minute,

u die absolute Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers an der äusseren Peripherie, und zwar bezogen auf den Mittelpunkt J des Einlaufbogens, d. h. des Bogens der Radperipherie, längs welchem das Wasser einfliesst,

h den Theil des disponiblen Gefälles H , welcher zur Erzeugung der Eintrittsgeschwindigkeit verwendet wird, also die Tiefe des Punktes J unter dem Oberwasserspiegel,

v die äussere Peripheriegeschwindigkeit des Rades,

α den Winkel zwischen den Richtungen von u und v , falls u auf den festliegenden Punkt J und v auf den augenblicklich damit zusammenfallenden Punkt der Peripherie des rotirenden Rades bezogen wird,

w die ebenso verstandene relative Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers gegen das Rad, also die Resultante von u und der entgegengesetzt genommenen, auf denselben Punkt bezogenen Peripheriegeschwindigkeit v ,

β den spitzen Winkel, unter welchem der Umfang des Rades vom Querprofil der Schaufelfläche, nämlich von ihrem Durchschnitt mit einer zur Radaxe senkrechten Ebene geschnitten wird,

ε das Verhältniss $\frac{Q}{abv}$, den sogenannten Füllungscoefficienten, nämlich das Verhältniss des zufließenden Wasservolumens zu demjenigen Volumen, welches gleichzeitig ein Querschnitt ab des Radkranzes mit der Annäherung beschreibt, mit welcher die Geschwindigkeit seines Mittelpunktes $= v$ gesetzt werden kann, und also auch zu demjenigen Volumen, welches vom Wasser höchstens ausgefüllt werden könnte, falls die Schaufeln materielle Flächen ohne Dicke wären,

F den Querschnitt, also Fb das cylindrische Volumen der von einem Schaufelraume thatsächlich aufgenommenen Wassermenge.

Endlich sei stets mit M der Mittelpunkt, mit O der oberste, mit U der unterste Punkt der Radperipherie bezeichnet, mit E der Mittelpunkt eines Theilbogens e , mit J der schon erwähnte Mittelpunkt des Einlaufbogens. Letzterer ist von fester Lage, während jeder Punkt E mit dem Rade umläuft, also nur periodisch und augenblicklich mit J zusammenfällt.

Zwischen den erklärten Buchstabengrößen finden folgende allgemeine Beziehungen statt:

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{60 \omega}{2\pi} = \frac{30}{\pi} \omega = 9,55 \omega \\ \omega &= \frac{\pi}{30} n = 0,1047 n \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1),$$

$$2\pi R = ze \dots \dots \dots (2),$$

ferner, da u, v, w die Seiten eines Dreiecks sind, in welchem der Seite w der Winkel α gegenüberliegt,

$$w^2 = u^2 + v^2 - 2uv \cos \alpha \dots \dots \dots (3),$$

endlich, da $\frac{Q}{v}$ das pro Längeneinheit der Radperipherie zufließende Wasservolumen, also

$$Fb = \frac{Q}{v} e$$

ist, mit Rücksicht auf die Bedeutung von ε :

$$F = \frac{Qe}{bv} = \varepsilon ae \dots \dots \dots (4).$$

Die Theorie der Wasserräder hat hauptsächlich das Ziel, den Wirkungsgrad η eines gegebenen oder eines zu entwerfenden Rades als Function seiner Elemente mit angemessener Näherung auszudrücken, um danach auch diejenigen Werthe bezw. Verhältnisse der besprochenen und anderer Radelemente zu finden, welche einen möglichst grossen Wirkungsgrad unter sonst gegebenen Umständen zur Folge haben. Dazu ist die Kenntniss der Abhängigkeitsgesetze der einzelnen Effectverluste nöthig, welche bei einem Wasserrade vorkommen. Es mögen zunächst allgemein, abgesehen von den einzelnen Arten von Wasserrädern, die wesentlichsten dieser Effectverluste näher besprochen und thunlichst zur Ableitung von Berechnungs- und Constructionsregeln verwerthet werden. Die wichtigsten derselben können als Gefällverluste, andere als Wasserverluste oder unmittelbar als aliquote Theile des absoluten Effects in Rechnung gebracht werden.