Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 102 (2010)
Heft: 3

Artikel: Bau und Leistung kleiner Wasserräder
Autor: Aeschbacher, Arno
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941660

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bau und Leistung kleiner Wasserräder

Maturaarbeit an der Kantonsschule Solothurn, Schuljahr 2009/2010

Arno Aeschbacher, 4aN

Zusammenfassung

In meiner Arbeit beschreibe ich den Bau eines unterläufigen Wasserrades mit einem Durchmesser von 40 Zentimetern und die Konstruktion eines oberläufigen Wasserrades mit dem Durchmesser von 72 Zentimetern. Die beiden Räder sind für eine Wassermenge von maximal 10 Litern pro Sekunde ausgelegt. Das unterläufige erreicht eine Leistung von maximal 2 Watt und einen Wirkungsgrad von 16%. Das oberläufige Wasserrad gibt eine Leistung von 60 Watt ab und hat einen maximalen Wirkungsgrad von knapp 80% bei 40% der maximalen Zuflussmenge.

Abstract

In this paper I describe the construction of two water wheels: an undershot water wheel with a diameter of 40 centimeters and an overshot water wheel with a diameter of 72 centimeters. Both wheels are designed for a flow rate of maximum 10 liters per second. The undershot achieves a maximum output of 2 watts and an efficiency degree of 16%. The overshot waterwheel delivers an output power of 60 watts and has a maximum efficiency of just fewer than 80% at 40% of the maximal flow.

1. Vorwort

1.1 Themenfindung

Schon vor einiger Zeit entstand in unserem Ferienhaus im Tessin im Eigenbau eine Sauna. Die Sauna steht in der Nähe des Bergbaches, welcher in einiger Distanz zum Haus vorbeifliesst. Eine Stromzufuhr ist nicht vorhanden, der Saunaofen wird mit Holz beheizt. Schon bald kam aber das Bedürfnis auf, die Sauna sowie ihre Umgebung mit Licht auszustatten. Denn sauniert wird meistens am Abend, wenn es schon dunkel ist und der Weg von der Sauna zum Abkühlbecken führt durch den Wald. Licht in der Sauna sowie eine Lampe, welche den Weg zum Bassin ausleuchtet, wären ein grosser Vorteil. Behelfsmässig wurde mit Kabelrollen eine über 100 m lange Leitung vom Haus zur Sauna gelegt: eine Lösung, die uns natürlich nicht befriedigt.

Mit Hilfe einer Autobatterie und Stromsparlampen könnte man für eine gewisse Zeit eine Beleuchtung einrichten, doch wie lädt man die Batterie wieder auf? Bei einem Abendessen wurde dann irgendeinmal über dieses Thema diskutiert und der Vorschlag gemacht, den vorbeifliessenden Bach zur Stromgewinnung zu nutzen, z.B. mit einem Wasserrad. Mein Vater witzelte «Maturaarbeit, Maturaarbeit!». Anfangs lachte ich noch darüber, schliesslich aber begeisterte ich mich immer mehr dafür und ich begann mich intensiver mit dem Thema Wasserräder zu befassen.

Schon bald musste ich einsehen, dass schon der Bau eines Wasserrades viel zu studieren gab: Der Typ, die Masse und die Grösse weiterer Parameter sowie kleine Finessen mussten wohl überlegt sein. Auch der Bau an sich erwies sich als sehr zeitaufwändig. Zudem mussten die Räder und die nötigen Zusatzteile jeweils verpackt und zu unserem Ferienhaus transportiert werden. Für die Messungen standen natürlich nur die Ferien zur Verfügung.

Es war von Anfang an klar, dass nur ein kleines Rad in Frage kommt, da das Gebiet in einer Grünzone liegt. Da mir aber Wirkungsweise und Wirkungsgrad der einzelnen Wasserradtypen nicht von Anfang an klar waren, beschloss ich, zwei verschiedene kleine Räder zu bauen und deren Funktionalität zu untersuchen. Unser Bach führt nur eine kleine Wassermenge. Umso wichtiger ist es, einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Im Verlauf der Arbeit zeigte sich, dass dies nur mit einem der beiden realisierten Wasserräder gelingt.

Das anfängliche Ziel, mit Hilfe der Wasserräder auch noch Elektrizität zu produzieren, hätte den Umfang meiner Arbeit gesprengt. Nach der Maturaarbeit plane ich aber, mit Hilfe eines Generators die mechanische Leistung in Elektrizität umzuwandeln und so mein ursprüngliches Ziel zu erreichen.

2. Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich unterstützt und so zu einem guten Gelingen der Maturaarbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mir immer geduldig zur Seite gestanden ist. Des weitern danke ich meinem Betreuer Herrn Siegel, insbesondere für seine theoretischen Erklärungen.

3. Einleitung

3.1 Geschichtliches

Die Geschichte des Wasserrades beginnt mehrere Tausend Jahre vor Christus. Schon die Sumerer bauten 3000 v.Chr. sogenannte Schöpfräder, mit welchen Wasser angehoben und zur Bewässerung in der Landwirtschaft verwendet werden konnte. Diese Räder waren aber noch Tretschöpfräder, das bedeutet, dass ein Mensch oder ein Tier das Rad über einen Mechanismus mit Muskelkraft antreiben musste und die

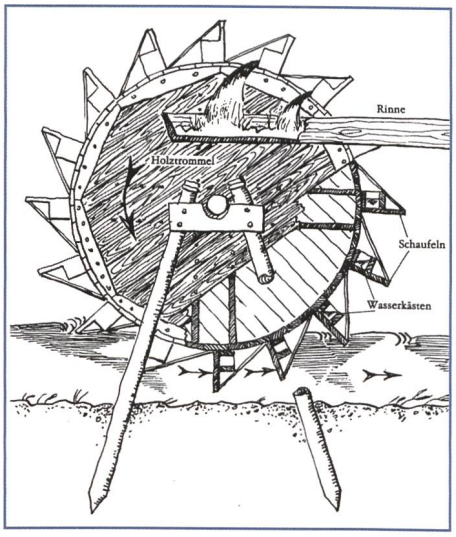


Bild 3.1. Schöpfrad nach Vitruv.

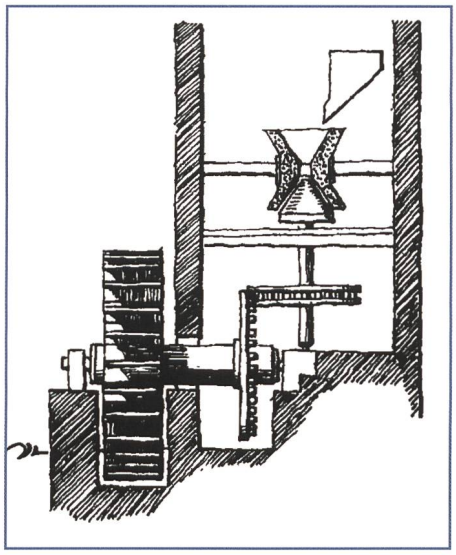


Bild 3.2. Wassermühle nach Vitruv.

Strömungskraft des Flusses nur als Unterstützung genutzt wurde. Wahrscheinlich wurde das eigentliche Wasserrad im dritten Jahrhundert v. Chr. in Mesopotamien erfunden. Man kann vermuten, dass das Hochwasser eines Flusses ein Tretschöpfrad von sich aus zum Drehen brachte und dies einen Tüftler erstaunt hat. Dieser folgerte dann vielleicht, dass die Angriffsfläche des Flusses auf das Wasserrad einen grossen Einfluss hat.

Der erste Nachweis eines selbständig drehenden Wasserrades wird vom griechischen Ingenieur Philon von Byzanz, welcher um 200 v. Chr. lebte, erbracht. Der erste Plan eines oberläufigen Wasserrades erscheint um 30 v. Chr. beim Römer Vitruv.

Die weitaus wichtigste Nutzung des Wasserrades waren über Jahrhunderte hinweg die Wassermühlen. Diese wurden im Römischen Reich erstmals verwendet. Da Brot zu dieser Zeit das Hauptnahrungsmittel war und zu dessen Herstellung hauptsächlich gemahlenes Getreide benötigt wurde, bedeutete die Verwendung von Wassermühlen einen gewaltigen Fortschritt im Ernährungswesen. Vorher mussten die meist tonnenschweren Mühlsteine von Hand oder mit Tieren angetrieben werden. Die Wassermühlen verbreiteten sich trotz ihrer Genialität nur schleppend; es gab noch genügend billige Sklaven, welche die Mühlen mit Muskelkraft antrieben. Die erste öffentliche Wassermühle entstand erst im Jahre 398 nach Christus in Rom. Sie wurde mit einem oberläufigen Wasserrad betrieben. Der Fortschritt in der Technik wurde mit dem Zusammenbruch des Römischen Reiches arg gebremst. Erst unter Karl dem Grossen im 13. Jahrhundert ist wieder ein Aufschwung auszumachen. Die Wasserkraft wurde nun

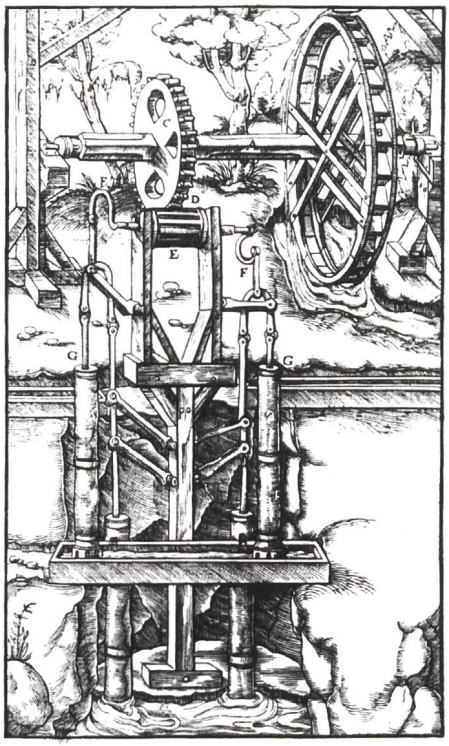


Bild 3.3. Pumpwerk.

auch für Sägewerke verwendet. Den zweiten grossen Aufschwung erlebte das Wasserrad, als 1444 der Buchdruck erfunden wurde. Es wurde zwar schon vor Gutenberg Papier hergestellt, jedoch steigerte sich jetzt der Verbrauch explosionsartig. Zur Papiererzeugung mussten Pflanzenfasern in möglichst kleine Fasern zerlegt werden. Die bislang verwendete Methode mit Handmörsern war jedoch für grössere Mengen viel zu aufwändig und wurde nun durch Wassermühlen ersetzt.

Danach entwickelte sich das Wasserrad in immer mehr Bereichen und wurde zu einer unverzichtbaren Energiequelle. Man baute Bohrmaschinen, Stampfmühlen, Hammerwerke und sogar automatische Orgelgebläse. Eine weitere wichtige Verwendung fand das Wasserrad im Bergbau. Die Arbeiter nützten es, um schweres Erz aus den Gräben zu heben oder mit Wasser überschwemmte Gänge zu entleeren.

Im Laufe der Industrialisierung wurden die Wasserräder mehr und mehr durch die von J.B.Francis 1849 konstruierten Francis-Turbinen abgelöst. Später folgten die Pelton-Turbine (1879) und die Kaplan-Turbine (1912). Mit Hilfe von Turbinen können viel grössere Wassermengen und Höhenunterschiede ausgenützt werden.

3.2 Einteilung der Wasserräder

Das wohl bekannteste und einfachste Wasserrad ist das unterläufige Wasserrad (*Fig.1* in *Bild 3.4*). Dabei steht das Rad in einem grösseren fliessenden Gewässer und dreht sich. Meistens wird es aber in einen Kanal gesetzt um zu verhindern, dass das Wasser um das Rad herum fliesst, ohne dieses anzutreiben. Da sich in den kleinen Ritzen zwischen Kanal und Rad leicht etwas verfangen kann und so das Rad blockieren würde, benötigt dieses Rad im Vorlauf einen Rechen. Ein Vorteil dieses Rades besteht darin, dass es schon bei sehr kleinem Gefälle funktioniert. Die Energie wird hier hauptsächlich aus der Geschwindigkeit des Wassers, also der kinetischen Energie, gewonnen. Die Schaufeln sind meistens aus Holz und flach, da

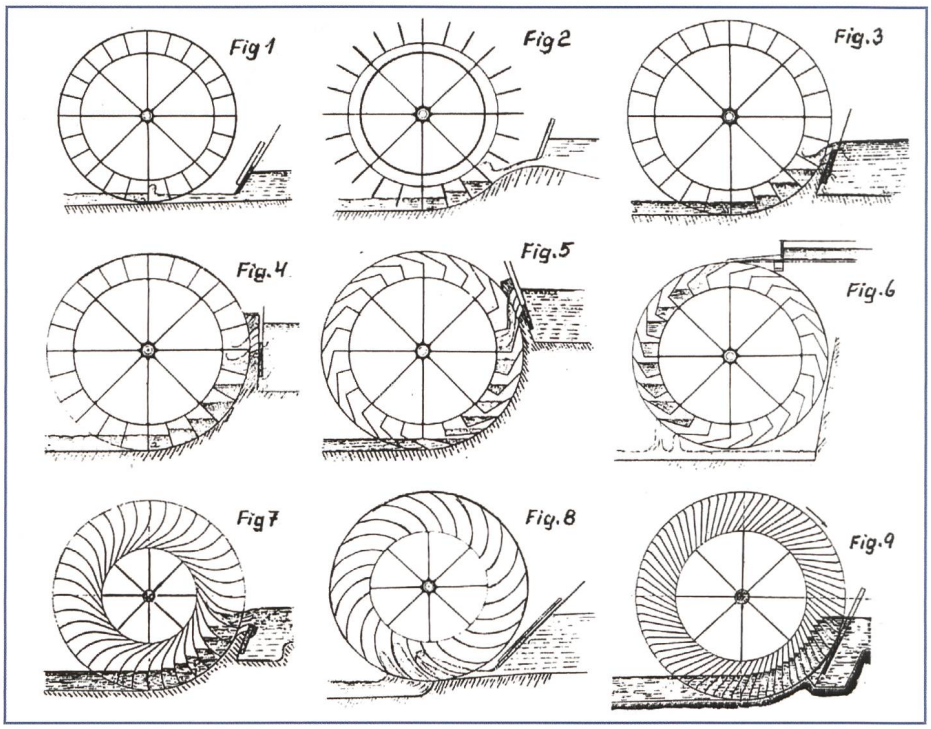


Bild 3.4. Wasserradtypen.

der Aufwand die Schaufeln zu krümmen, in einem schlechten Verhältnis mit dem Ertrag stehen würde. Der Wirkungsgrad beträgt maximal etwa 30%.

Weit verbreitet ist das oberläufige Wasserrad (*Fig.6* in *Bild 3.4*), bei dem das Wasser aus einem Kanal auf das Rad fällt. Die Schaufeln können verschiedene Formen haben. Man gewinnt die Leistung hauptsächlich aus der potenziellen Energie des Wassers, also dem Höhenunterschied. Dieser entspricht etwa dem Durchmesser des Rades. Je grösser das Rad, desto mehr Leistungsvermögen hat es. Aus praktischen Gründen sind die Wasserräder aber selten grösser als zehn Meter (das grösste bekannte Rad hat einen Durchmesser von knapp über zwanzig Metern und steht auf der Isle of Man). Die Fallhöhe des Wassers aus dem Kanal auf das Rad sollte möglichst klein gehalten werden. Denn je grösser diese wird, desto mehr spritzt das Wasser, wenn es auf das Rad trifft und so fliesst ein Teil des Wassers nicht über das Rad, sondern fällt wirkungslos daneben. Der Kanal sollte aber auch nicht zu nahe am Rad sein, damit es im Falle, dass sich ein Ast oder etwas anderes im Rad verklemmt, nicht zu Beschädigungen kommt.

Neben diesen beiden wichtigen Typen gibt es eine Vielzahl von «Zwischentypen» (*Fig. 2–5* in *Bild 3.4*) und Spezialformen (*Fig. 7–9*). *Fig. 7* zeigt ein sogenanntes Zuppingerrad (erfunden 1848 vom Schweizer Walter Zuppinger), welches sowohl bei Hoch- als auch bei Niedrigwasser wirkungsvoll eingesetzt werden kann.

4. Physikalische Grundlagen

4.1 Theoretische Leistung

Die in fliessendem Wasser enthaltene Energie liegt in zwei Formen vor:

- Potenzielle Energie (Lageenergie)
- Kinetische Energie (Bewegungsenergie)

Die potenzielle Energie ergibt sich aus dem Höhenunterschied Δh von Ober- und Unterwasserspiegel, die kinetische Energie aus der Geschwindigkeit des Wassers.

Mit den Bezeichnungen:

Δh Höhenunterschied [m]
ρ Dichte von Wasser [kg/m^3]
g Fallbeschleunigung [kg m/s^2]
Q Volumenstrom [m^3/s]
v Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers [m/s] ergibt sich für die entsprechende Leistung (in Watt)

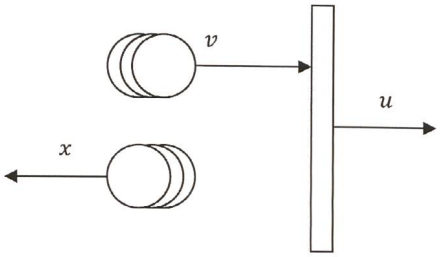
$$P_{zu} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta h + \frac{1}{2}\rho \cdot Q \cdot v^2 \qquad (4.1)$$

Die Berechnung der kinetischen Energie auf das Rad lässt sich beim unterläufigen Rad auch wie folgt berechnen: Bezeichnet A die Fläche, auf die das Wasser wirkt, so ist $Q = A \cdot v$, d.h.

$$P_{zu} = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot v^3 \qquad (4.2)$$

Für die Berechnung der theoretischen Leistung stützte ich mich aber nur auf Formel 4.1. Beim unterläufigen Wasserrad mag man sich wundern, warum ich nicht Formel 4.2 verwendet habe. Diese Formel fordert die Kenntnis über die Eintauchfläche des Wasserrades und die Geschwindigkeit des Wassers. Diese zwei Werte sind sehr schwierig zu messen, da sie stark variieren. Je nachdem wie schnell das Rad läuft, staut sich das Wasser dahinter höher auf und läuft langsamer. Auch bleibt die Fläche bei konstanter Belastung nicht gleich. Wenn die Schaufel ins Wasser eintaucht, steht sie noch nicht rechtwinklig zur Fliessrichtung, die Angriffsfläche wird also verkleinert. Formel 4.1 hat gegenüber 4.2 den Nachteil, dass sie nicht die alleinige Leistung des Rades sondern jene der ganzen Apparatur (d.h. inklusive des in Kapitel 5.1. beschriebenen Kanals) liefert.

Die maximale Leistung wird idealerweise bei halber Maximalumdrehungszahl (Drehzahl ohne Belastung, im Leerlauf) erreicht. Dies lässt sich etwa so plausibel machen: Wenn ein Objekt mit der Masse m und der Geschwindigkeit v auf einen sich mit der Geschwindigkeit u wegbewegenden Gegenstand trifft, springt das Objekt mit der Geschwindigkeit x wieder zurück und verübt dabei den Impuls $p = m \cdot \Delta v$, mit $\Delta v = v - x$ (siehe Zeichnung unten).



Der Impuls wird am grössten, wenn Δv maximal ist, also bei $x = 0$. Wann aber ist $x = 0$, und von was ist x abhängig? Das Objekt trifft mit der Geschwindigkeit $v - u$ auf den Gegenstand auf. Danach wird es reflektiert, jedoch wird die Geschwindigkeit des Objektes um u reduziert. Damit ergibt sich $x = (v - u) - u = v - 2u$. Aus $x = 0$ folgt also $v = 2u$ oder

$$u = \frac{v}{2} \qquad (4.3)$$

Weiterführende Erklärungen dafür finden sich in [1] S. 5–6 und [2] S. 197.

4.2 Praktische Leistungsmessung

Die effektive Leistung von Maschinen kann man auf drei verschiedene Arten messen:

- Man verwandelt die kinetische Energie der Maschine in potenzielle Energie,

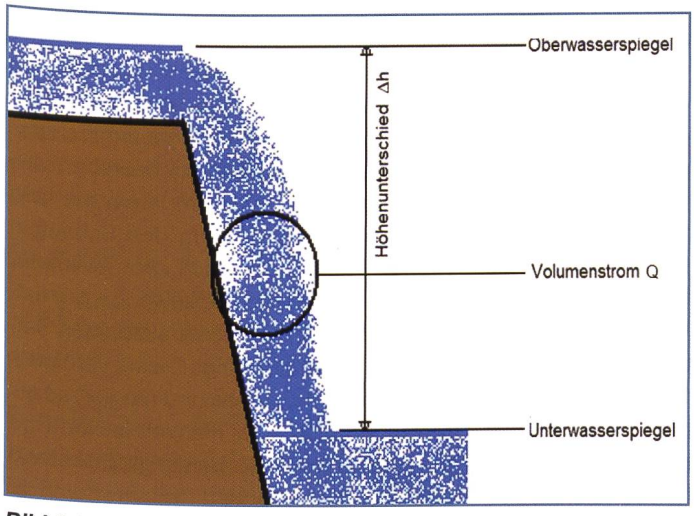


Bild 4.1. Grundlegende Faktoren.

Bild 4.2. Unterläufiges Rad in Betrieb.

Bild 4.3. Die Prony-Bremse im Einsatz.

indem man die Maschine ein Gewicht heben lässt.

- Man verwandelt die kinetische Energie der Maschine in Wärme durch Anhängen einer Reibungsbremse (Pronyscher Zaum).
- Man verwandelt die kinetische Energie der Maschine in elektrische Energie.

Im Falle des ***unterläufigen Wasserrades*** entschied ich mich für die einfachste, d.h. erste Methode. Ich befestigte also das eine Ende eines Seils an der Achse des Rades, liess das Seil über eine Rolle laufen und machte am anderen Ende das Gewicht fest. Wenn sich das Rad nun zu drehen begann, wickelte sich das Seil um die Achse und das Gewicht begann sich zu heben. Gemessen wurde die Zeit t, die benötigt wurde, um die Masse m um Δh = 1 m zu heben. Es zeigte sich, dass die Leistung des Wasserrades stark von dessen Belastung abhängt. Um diese Abhängigkeit zu ermitteln, wurden Massen zwischen 1 und 20 Kilogramm verwendet. Die Leistung ergibt sich aus

$$P_{ab} = \frac{m \cdot g \cdot \Delta h}{t} \tag{4.4}$$

Der Wirkungsgrad berechnet sich mit

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}.$$

Dabei verwende ich für P_{zu} wie erwähnt die Formel 4.1. Damit wird nicht der Wirkungsgrad des Rades sondern jener des ganzen Kanals mit Rad berechnet. Eingeschlossen ist also der Reibungsverlust des Wassers im Kanal.

Beim ***oberläufigen Wasserrad*** wird die theoretische Leistung ebenso nach der Formel (4.1)

$$P_{zu} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta h + \frac{1}{2}\rho \cdot Q \cdot v^2$$

berechnet. Dabei ist Δh die Höhe zwischen dem unteren Ende des Kanals und dem untersten Punkt des Rades.

Die Methode der Gewichthebung zur praktischen Leistungsmessung eignete sich hier nicht, da die Gewichte zu gross geworden wären (über 200 kg). Ich verwendete daher die zweite Methode und verwandelte die Energie mit Hilfe einer Prony-Bremse in Reibungswärme. Die Prony-Bremse (*Bild 4.3* und *Bild 6.3*) funktioniert folgendermassen: Es werden zwei nicht zu kurze Hartholzlatten mittig um die Achse zusammengepresst. An einem Ende wird ein Newtonmesser befestigt. Dreht sich die Achse, werden die Latten einerseits durch die Reibung mitgedreht anderseits durch das Newtonmeter zurückgehalten. Mit den Bezeichnungen

- F Kraft am Newtonmeter [N]
- l Abstand der Achse zum Newtonmeter [m]
- M Drehmoment [Nm]
- ω Winkelgeschwindigkeit des Rades [s^{-1}]
- T Umlaufzeit des Rades [s] und den bekannten Formeln

$$P_{ab} = M \cdot \omega, \quad M = F \cdot l, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

folgt:

$$P_{ab} = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot l}{T} \tag{4.5}$$

Die einzigen Reibungskräfte, die zusätzlich auftauchen, sind der Widerstand in den Kugellagern, jener zwischen Rad und Luft und jener des Wassers in der Luft. Diese sind alle sehr klein und ich vernachlässige sie. Der Wirkungsgrad berechnet sich wiederum, in dem man die praktische durch die theoretische Leistung teilt:

$$\eta = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot l}{T \cdot \rho \cdot Q \cdot (\frac{1}{2}v^2 + g \cdot \Delta h)} \tag{4.6}$$

5. Unterläufiges Wasserrad

5.1 Bau

Da ich mich zum ersten Mal mit der Theorie der Wasserräder befasste, wollte ich als Erstes ein möglichst einfaches Rad bauen, also ein unterläufiges Rad mit geraden Schaufeln, welches in einem Kanal läuft.

Unser Bach führt normalerweise etwa10 Liter pro Sekunde. Da ich etwa mit einer Umlaufgeschwindigkeit von 1U/s rechnete, brauchte das Rad ein «Fassungsvermögen» von etwa 20 Litern (nur der untere Teil des Rades liegt im Wasser). So schienen mir ein Durchmesser von 45 cm und eine Breite von 20 cm vernünftige Masse. Die Anzahl Schaufeln legte ich auf 8 fest, eine Zahl in der Mitte zwischen Aufwand und Ertrag. Das Rad fertigte ich aus Birkenspanplatten an.

Damit sich das Holz unter den nassen Bedingungen nicht zersetzt oder verzieht, ist alles dreimal mit Holzschutzfarbe bestrichen. Zudem bestehen alle Schrauben und anderen Kleinteile aus rostfreiem Edelstahl. Um den Schaufeln Halt zu geben, habe ich drei Millimeter tiefe Schlitze in die Seitenwände gefräst. Im Zentrum des Rades ist auf beiden Seiten ein Flansch befestigt. Dieser verbindet das Rad mit der Achse und fungiert so als Kraftübertrager. Der Flansch ist am Rad mit acht Schrauben befestigt. Er hat ein Loch im vorstehenden Teil, wodurch er mit der Achse mittels einer Schraube oder

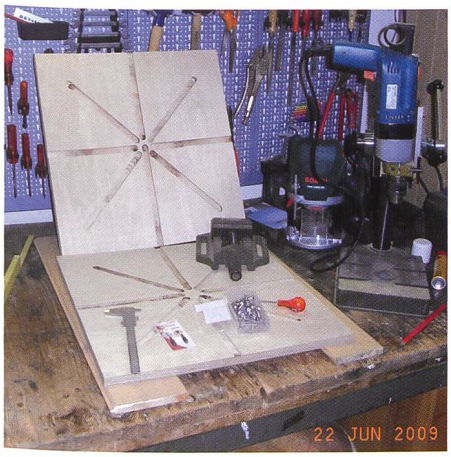


Bild 5.1. Beide Seitenwände des unterläufigen Wasserrads.

Bild 5.2. Unterläufiges Wasserrad in Betrieb.

Bild 5.3. Der Flansch.

eines Stifts verbunden werden kann. Es war schon bald klar, dass das Rad in einem Kanal laufen muss. Ansonsten nimmt das Wasser den Weg des kleinsten Widerstandes und läuft bei einer Belastung des Rades einfach links und rechts am Rad vorbei. So baute ich aus demselben Material einen passenden Kanal. Links, rechts und unterhalb des Wasserrades hielt ich einen Sicherheitsabstand von einem Zentimeter zwischen dem Kanal und dem Rad ein, damit dieses auch bei nicht ganz exakter Bauweise nicht mit dem Kanal in Berührung kommt. Diese Lücke hat auch den Vorteil, dass kleine Steinchen oder Zweige hindurchfliessen können ohne das Rad zu beschädigen oder gar zu blockieren.

Auf kleinen Konsolen an den Seitenwänden des Kanals wurden zwei Kugellager befestigt, wodurch die Achse relativ reibungsfrei gelagert werden konnte.

5.2 Messungen, Resultate

Die Leistung der Apparatur wurde wie in Kapitel 4.2 beschrieben gemessen und zwar bei drei verschiedenen Neigungen des Kanals jeweils für eine Serie von 17 unterschiedlichen Belastungen im Bereich zwischen 1 kg und 20 kg. Die Neigungen des Kanals wurden so gewählt, dass die Kanalsenkung k (= Höhendifferenz zwischen Kanaleingang und Kanalausgang) 0.1 m, bzw. 0.2 m, bzw. 0.3 m betrug. In der Formel (4.1) ist

$P_{zu} = \rho \cdot Q \cdot g \cdot \Delta h + \frac{1}{2}\rho \cdot Q \cdot v^2$ ist

$v = 0\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (Einlauf erfolgt von einem Stausee)

$\rho = 1000\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$, $Q = 0.01\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$, $g = 9.81\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Damit folgt

$$P_{zu} = 98.1\ \frac{kg \cdot m}{s^3}\Delta h\ . \qquad (5.1)$$

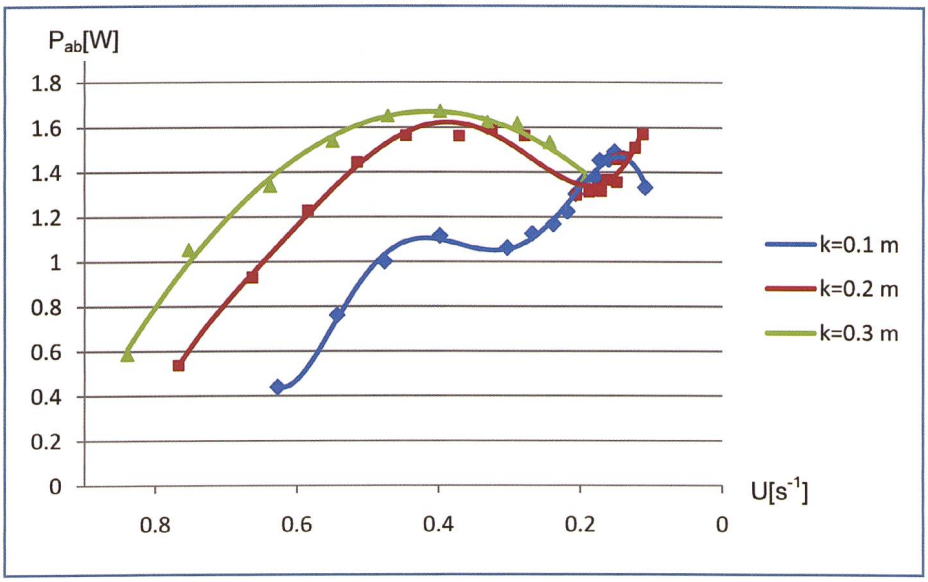


Diagramm 5.1. Leistung in Abhängigkeit der Umdrehungszahl (polynomisch genähert).

Die gemessenen Werte sind im Anhang 8.1 aufgeführt (*Tabellen 1* und *2*). *Diagramm 5.1* zeigt die abgegebene Leistung des Rades in Abhängigkeit der Umdrehungszahl polynomisch genähert.

Betrachten wir zuerst die Leistungskurve für die Kanalsenkung k=0.1 m. Anfänglich steigt sie, erreicht bei 0.4 Umdrehungen pro Sekunde (Ups) einen ersten Maximalpunkt und beginnt zu fallen. Soweit entspricht dies auch der Theorie (Kap. 4.1), welche eine nach unten gekrümmte parabelförmige Kurve mit Maximalpunkt bei der halben Leerlaufumdrehungszahl erwarten lässt. Nun beginnt die Kurve bei 0.3 Ups aber von neuem zu steigen. Wieso das nun? Dies ist mit dem beobachteten «Staueffekt» zu erklären. Wenn das Rad stark belastet wird, dreht es sich langsamer und es kann weniger Wasser vorbeifliessen. Deshalb staut sich das Wasser vor dem Rad im Kanal und entwickelt so zusätzlichen Druck auf das Rad. Mit dieser zusätzlichen Unterstützung vermag das Rad nun wieder mehr Gewicht zu heben. Das zweite Maximum befindet sich bei 0.15 Ups. Danach wird die Belastung endgültig zu gross und das Rad steht ganz still. Der maximale Wirkungsgrad wird in der Stauphase erreicht und beträgt

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 16.5\% \qquad (5.2)$$

Die Leistungskurve für k=0.2 m nimmt einen ähnlichen Verlauf. Am Anfang verhält sie sich wie eine Parabel und erreicht das erste Maximum ebenfalls bei 0.4 Ups. Danach fällt sie bis auf 1.3 Watt bei 0.18 Ups ab und steigt schliesslich bis zum Stillstand wieder fast auf den Maximalwert an. Der maximale Wirkungsgrad beträgt

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 8.8\% \qquad (5.3)$$

Auch die Leistungskurve für k=0.3 m verhält sich nach denselben Regeln der

Kunst. Sie steigt bis zum Maximum bei 0.4 Ups und fällt danach wieder ab. Jedoch beginnt sie nicht ein zweites Mal zu steigen. Der maximale Wirkungsgrad beträgt in diesem Fall

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = 6.2\% \qquad (5.3)$$

Generell kann gesagt werden: Je grösser die Neigung des Kanals, desto mehr versagt der Staueffekt. Bei grösserer Neigung des Kanals ist auch die Fliessgeschwindigkeit des Wassers grösser. Wenn die Geschwindigkeit des Wassers bei gleichbleibendem Volumenstrom zunimmt, nimmt der Querschnitt des Wassers ab, da $Q=v\cdot A$ ist. Wird die Querschnittsfläche des Wassers kleiner, kann mehr Wasser wirkungslos durch den unteren Sicherheitsabstand fliessen. Im Extremfall fliesst sogar alles Wasser durch und das Rad steht still. Der Sicherheitsabstand ist also ein weiterer Parameter, der sich optimieren liesse. Die Verkleinerung dieses Abstandes würde aber eine grössere Exaktheit beim Bau des Rades fordern und das Risiko für Betriebspannen durch Schwemmgut erhöhen.

6. Oberläufiges Wasserrad

6.1 Bau

Das Ziel beim Bau dieses Wasserrades war, eine Leistung von etwa 50 W zu erreichen. Da der Wirkungsgrad in der Literatur (z.B. [4]) mit etwa 70–80% angegeben wird, war also bei 10 Litern Wasser pro Sekunde ein Durchmesser D von ca. 70 cm gefordert

$$\left(D = \frac{P}{Q\cdot g\cdot \eta} = \frac{50}{10\cdot 9.81\cdot 0.75} \approx 0.7\right). \qquad (6.1)$$

Die Tiefe der Schaufeln wurde auch aus praktischen Gründen auf 20 cm festgesetzt (solche Bleche waren einfach erhältlich). Die Anzahl der Schaufeln konnte aus Platzgründen höchstens 16 betragen. Ein exakter Bauplan des oberläufigen Wasserrades befindet sich in Anhang 8.2. Hier nur die wichtigsten Daten: Die Seitenwände bestehen aus 15 mm dicken Birkenspanplatten, welche mit Holschutzlack bestrichen wurden, die 16 Schaufeln aus Aluminiumblechen mit den Massen 0.8 × 200 × 250 mm. Das innere Bodenblech besteht ebenfalls aus Aluminium. Dies gibt dem Rad eine äussere Breite von 23 cm und eine innere von 20 cm. Der Aussenradius beträgt 36 cm, wobei die Seitenwände einen Zentimeter über die Bleche hinausragen. Der Innenradius beträgt 22 cm, wobei auch hier die Seitenwände einen

Bild 6.1. Das oberläufige Wasserrad fertig montiert im Bach.

Bild 6.2. Oberläufiges Wasserrad mit nur einer Seitenwand und ohne inneres Blech.

Zentimeter länger sind als die Bleche. Die Bleche wurden so geformt, dass das Wasser möglichst sanft abgebremst wird und nicht spritzt. Die theoretisch beste Form

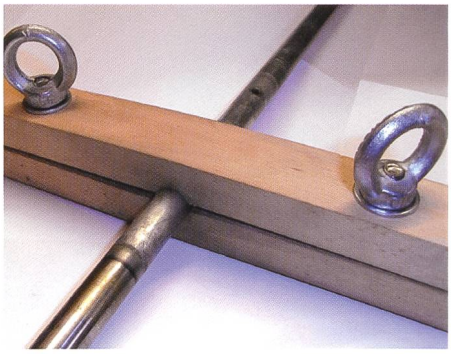


Bild 6.3. Die Prony-Bremse alleine mit der Achse des Rades.

dafür ist eine spiralartige Kurve mit immer grösser werdender Krümmung. Da diese aber schwierig herzustellen wären, habe ich die Form mit zwei Kreisbögen angenähert. Das innere Ende der Schaufeln läuft in eine geknickte Lasche aus *(Bild 6.2)*. Damit können sie am inneren Blech einfach angeschraubt werden. Jedes Blech ist mit vier Winkeln à je vier Schrauben an den Seitenwänden befestigt und mit zwei Schrauben am inneren Blech. Die Winkel sind ein wenig vom Rand abgesetzt befestigt, damit die Bleche leicht in das Holz gedrückt und so die Zwischenräume abgedichtet werden.

Für die Versuche habe ich das Wasserrad auf einem Gestell montiert. Dieses besteht aus zwei trapezförmigen Hölzern, welche an jedem Ende durch zwei gekreuzte Aluminiumleisten vor dem Auseinanderscheren bewahrt werden. Das Wasser wird wieder über den gleichen Kanal wie beim unterläufigen Wasserrad zugeleitet. Als Abbremsmechanismus habe ich wie erwähnt eine Prony-Bremse gebaut.

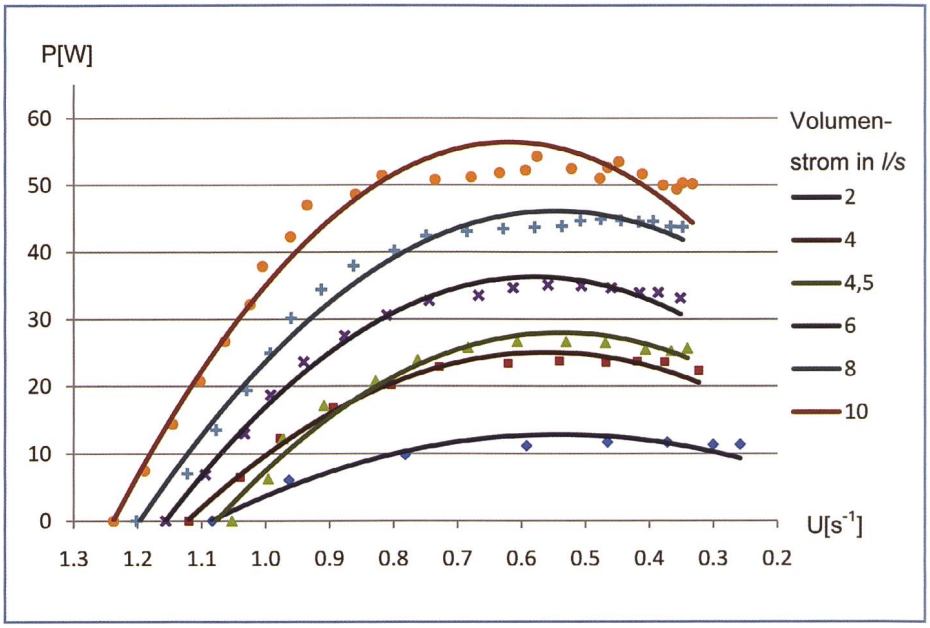


Diagramm 6.1. Leistung in Abhängigkeit der Umdrehungszahl (polynomisch 2. Grades genähert).

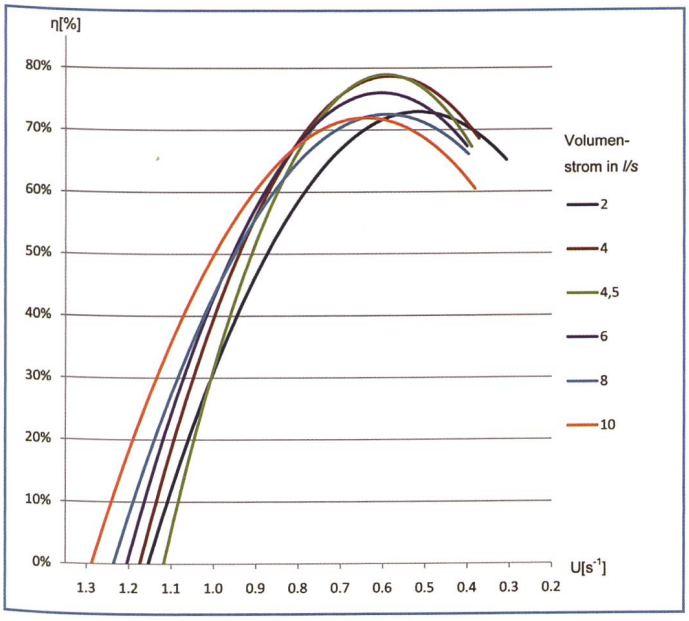


Diagramm 6.2. Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Umdrehungszahl (polynomisch 2. Grades genähert).

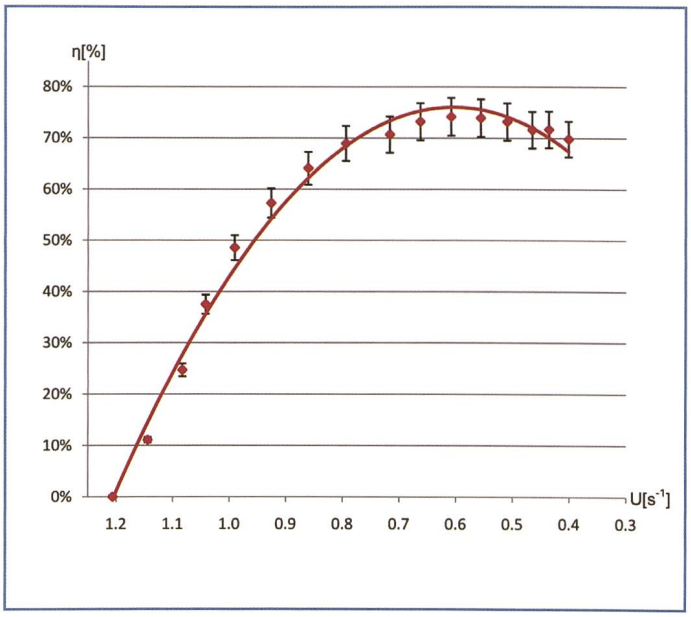


Diagramm 6.3. Wirkungsgradkurve bei 6 l/s mit 5%-igen Fehlerbalken.

6.2 Messungen, Resultate

Beim oberläufigen Wasserrad machte ich die Leistungsmessungen von zwei Parametern abhängig. Der erste ist die Wassermenge, der zweite die Belastung des Rades. Die Wassermenge variierte ich zwischen 2 Litern pro Sekunde und dem Maximum unseres Baches, welches etwa 10 Litern pro Sekunde entspricht. Bei jeder Wassermenge belastete ich das Rad zuerst mit 1 N/m Bremsdrehmoment. Danach steigerte ich das Bremsdrehmoment kontinuierlich um 1 N/m bis zum völligen Stillstand des Rades. Die Rohdaten dieser Messungen sind im Anhang 8.1 in den *Tabellen 3–8* zu finden.

Diagramm 6.1 zeigt die Leistung in Abhängigkeit der Umdrehungszahl für die verschiedenen Wassermengen. Schön zu sehen sind wieder die auftretenden Maxima bei etwa halber Leerlaufdrehzahl. Das Leistungsmaximum ist in etwa proportional zur Wassermenge.

Wie *Diagramm 6.2* zeigt, ist der Wirkungsgrad ziemlich unabhängig von der Wassermenge (im Bereich von 2 bis 10 Litern pro Sekunde). Etwas erstaunlich ist, dass der Wirkungsgrad seinen höchsten Wert bei einem Wasserzufluss von 4 Litern pro Sekunde erreicht, obwohl das Rad eigentlich für 10 Liter konzipiert wurde. Es lässt sich aber gut erklären. Bei 10 Litern werden die Schaufeln des Rades fast voll gefüllt und durch die Bewegung, die das Wasser beim Einfliessen schon hat, schwappt es zum Teil wieder aus den Schaufeln. Bei 4 Litern kann das Rad die Wassermenge vollständig aufnehmen; die Gefässe sind nur teilweise gefüllt. Wenn sich das Rad dreht, fliesst bei 10 Litern zudem das Wasser früher wieder aus den Schaufeln, als dies bei 4 Litern der Fall ist.

Bemerkung: Alle Diagrammkurven zum oberläufigen Wasserrad sind polynomisch 2. Grades gezeichnet. *Diagramm 6.3* zeigt exemplarisch am Beispiel der Wirkungsgradkurve bei 6 l/s, dass diese Näherung sinnvoll und zulässig ist: Die Näherungskurve verläuft mit mehr als 68.3% (also einer 1σ-Umgebung) im 5%-Intervall der Messwerte.

7. Schlusswort

Der Bau und die Messungen mögen durch meine Beschreibungen relativ einfach erscheinen. Es traten aber sowohl beim Bau wie auch bei den Messungen viele kleinere und grössere praktische Probleme auf wie zum Beispiel:

- Wie schafft man es, dass das ganze Wasser des Baches möglichst in den Kanal läuft und nicht neben oder unten durch?
- Wie kann man eine Leiter vor dem Umkippen bewahren, wenn von der Seite mit 200 N gezogen wird?
- Wie kann man mit einer Bohrmaschine «um die Ecke bohren», um Schrauben im Innern des Wasserrades zu befestigen?
- Wie misst man den Volumenstrom beim unterläufigen Wasserrad?
- Wieso beginnt die Prony-Bremse bei einer bestimmten Einstellung so zu schwingen, dass der Newtonmeter überfordert wird?

Auch bleiben viele interessante Fragen leider unbeantwortet, zum Beispiel:

- Wie wirken sich die Anzahl und die Form der Schaufeln auf die Leistung aus?
- Welches sind die idealen Dimensionen eines Rades bei einem gegebenen Volumenstrom?
- Welcher Typ von Rad eignet sich am besten für eine konkrete Situation?
- Was passiert, wenn das Wasser mit Druck auf das unterläufige Rad geleitet wird?

In der im Anhang angegebenen Literatur sind zu diesen Fragen einige Angaben zu finden. Es scheint aber so, dass das Interesse an Wasserrädern im 20. Jahrhundert nicht sehr gross war und daher nur wenig geforscht wurde. Die Dissertation von Meerwarth [4] ist die einzige Forschungsarbeit, die ich finden konnte. Es wird sich zeigen, ob auf der Suche nach Alternativenergien die Wichtigkeit von Wasserrädern wieder zunimmt.

Das Arbeiten an und mit meinen beiden Wasserrädern war äusserst interessant. Insbesondere die praktischen Arbeiten haben mir viel Spass bereitet, obwohl sie einiges an Aufwand gekostet haben (auch im wortwörtlichen Sinne: Die Materialkosten betrugen ca. CHF 900.–).

Ich hoffe aber gezeigt zu haben, dass sich der Bau eines Wasserrades trotzdem durchaus lohnen kann, wenn nicht finanziell, dann doch ideell. Denn wenn sich das Wasserrad dann endlich dreht, kann man das berühmte Klappern wirklich hören. Ein schöner Moment.

8. Anhang

8.1 Tabellen

	t [s]			U [s^{-1}]		
m[kg]	k=0.1 m	k=0.2 m	k=0.3 m	k=0.1 m	k=0.2 m	k=0.3 m
1	22.32	18.25	16.68	0.63	0.77	0.84
2	25.77	21.12	18.60	0.54	0.66	0.75
3	29.41	23.95	21.96	0.48	0.58	0.64
4	35.17	27.19	25.48	0.40	0.51	0.55
5	46.20	31.40	29.70	0.30	0.45	0.47
6	52.30	37.73	35.20	0.27	0.37	0.40
7	58.80	43.10	42.30	0.24	0.32	0.33
8	64.10	50.25	48.51	0.22	0.28	0.29
9	67.80	68.09	57.58	0.21	0.21	0.24
10	72.00	74.75	72.12	0.19	0.19	0.19
11	78.50	82.05	∞	0.18	0.17	0.00
12	81.06	86.25	∞	0.17	0.16	0.00
13	87.60	94.18	∞	0.16	0.15	0.00
14	92.10	94.20	∞	0.15	0.15	0.00
15	100.70	100.30	∞	0.14	0.14	0.00
17.5	128.94	113.80	∞	0.11	0.12	0.00
20	∞	125.00	∞	0.00	0.11	0.00

Tabelle 1. Messung am unterläufigen Wasserrad: Zeit und die entsprechende Umdrehungszahl, um eine Masse m um einen Meter zu heben bei der Kanalsenkung k.

	P [W]		
m[kg]	k=0.1 m	k=0.2 m	k=0.3 m
1	0.44	0.54	0.59
2	0.76	0.93	1.05
3	1.00	1.23	1.34
4	1.12	1.44	1.54
5	1.06	1.56	1.65
6	1.13	1.56	1.67
7	1.17	1.59	1.62
8	1.22	1.56	1.62
9	1.30	1.30	1.53
10	1.36	1.31	1.36
11	1.37	1.32	0.00
12	1.45	1.36	0.00
13	1.46	1.35	0.00
14	1.49	1.46	0.00
15	1.46	1.47	0.00
17.5	1.33	1.51	0.00
20	0.00	1.57	0.00

Tabelle 2. Messung am unterläufigen Wasserrad: Leistung in Abhängigkeit der (belastenden) Masse m und der Kanalsenkung k.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	9.23	1.08	0.00	0.00
2	10.38	0.96	6.05	36.98
4	12.79	0.78	9.83	60.03
6	16.89	0.59	11.16	68.19
8	21.48	0.47	11.70	71.49
10	26.87	0.37	11.69	71.44
12	33.28	0.30	11.33	69.21
14	38.72	0.26	11.36	69.40

Tabelle 3. Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen, daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 0.0021 m^3/s, (entspricht 2.1 Litern pro Sekunde) in Abhängigkeit von der Belastung.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	8.93	1.12	0.00	0.00
2	9.62	1.04	6.53	21.03
4	10.23	0.98	12.28	39.54
6	11.18	0.89	16.86	54.27
8	12.44	0.80	20.20	65.04
10	13.72	0.73	22.90	73.71
12	16.10	0.62	23.42	75.38
14	18.49	0.54	23.79	76.57
16	21.36	0.47	23.53	75.75
18	23.86	0.42	23.70	76.29
20	26.58	0.38	23.64	76.10
22	30.94	0.32	22.34	71.91

Tabelle 4.Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen und daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 4.0 Litern pro Sekunde in Abhängigkeit von der Belastung.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	9.5	1.05	0.00	0.00
2	10.04	1.00	6.26	17.86
4	10.28	0.97	12.22	34.88
6	11	0.91	17.14	48.90
8	12.07	0.83	20.82	59.42
10	13.11	0.76	23.96	68.38
12	14.62	0.68	25.79	73.59
14	16.48	0.61	26.69	76.16
16	18.85	0.53	26.67	76.10
18	21.32	0.47	26.52	75.69
20	24.6	0.41	25.54	72.89
22	27.3	0.37	25.32	72.25
24	29.33	0.34	25.71	73.36

Tabelle 5. Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen und daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 4.5 Litern pro Sekunde in Abhängigkeit von der Belastung.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	8.65	1.16	0.00	0.00
2	9.14	1.09	6.87	14.73
4	9.68	1.03	12.98	27.83
6	10.08	0.99	18.70	40.08
8	10.63	0.94	23.64	50.68
10	11.41	0.88	27.53	59.02
12	12.33	0.81	30.58	65.54
14	13.43	0.74	32.75	70.20
16	14.99	0.67	33.53	71.88
18	16.31	0.61	34.67	74.32
20	17.90	0.56	35.10	75.24
22	19.75	0.51	34.99	75.01
24	21.75	0.46	34.67	74.30
26	24.06	0.42	33.95	72.77
28	25.89	0.39	33.98	72.83
30	28.44	0.35	33.14	71.03

Tabelle 6. Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen und daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 6.0 Litern pro Sekunde in Abhängigkeit von der Belastung.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	8.32	1.20	0.00	0.00
2	8.91	1.12	7.05	11.30
4	9.28	1.08	13.54	21.69
6	9.71	1.03	19.41	31.09
8	10.07	0.99	24.96	39.98
10	10.41	0.96	30.18	48.34
12	10.95	0.91	34.43	55.15
14	11.59	0.86	37.95	60.78
16	12.51	0.80	40.18	64.36
18	13.34	0.75	42.39	67.90
20	14.58	0.69	43.09	69.03
22	15.9	0.63	43.47	69.63
24	17.25	0.58	43.71	70.01
26	18.62	0.54	43.87	70.26
28	19.68	0.51	44.70	71.59
30	20.99	0.48	44.90	71.92
32	22.48	0.44	44.72	71.63
34	23.99	0.42	44.52	71.32
36	25.35	0.39	44.61	71.46
38	27.25	0.37	43.81	70.17
40	28.72	0.35	43.75	70.08

Tabelle 7. Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen und daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 8.0 Litern pro Sekunde in Abhängigkeit von der Belastung.

F[N]	t[s] (10 U)	UPS[s^{-1}]	P[W]	η[%]
0	8.08	1.24	0.00	0.00
2	8.41	1.19	7.47	9.86
4	8.73	1.15	14.39	19.00
6	9.07	1.10	20.78	27.44
8	9.40	1.06	26.74	35.30
10	9.76	1.02	32.19	42.49
12	9.95	1.01	37.89	50.02
14	10.40	0.96	42.29	55.83
16	10.69	0.94	47.02	62.08
18	11.63	0.86	48.62	64.19
20	12.22	0.82	51.42	67.88
22	13.60	0.74	50.82	67.09
24	14.73	0.68	51.19	67.58
26	15.76	0.63	51.83	68.42
28	16.84	0.59	52.24	68.96
30	17.36	0.58	54.29	71.67
32	19.16	0.52	52.47	69.27
34	20.94	0.48	51.01	67.34
36	21.50	0.47	52.60	69.45
38	22.32	0.45	53.49	70.61
40	24.32	0.41	51.67	68.21
42	26.40	0.38	49.98	65.98
44	27.98	0.36	49.40	65.22
46	28.72	0.35	50.32	66.43
48	30.04	0.33	50.20	66.27

Tabelle 8. Messung am oberläufigen Wasserrad: Zeit für 10 Umdrehungen und daraus resultierende Umdrehungszahl, Leistung und Wirkungsgrad bei Q = 9.75 Litern pro Sekunde in Abhängigkeit von der Belastung.

Weitere Konstanten:
Am unterläufigen Wasserrad:
- Wassermenge: 9.25 l/s

Am oberläufigen Wasserrad:
- Höhenunterschied Δh: 0.76 m
- Geschwindigkeit des Wassers beim Verlassen des Kanals: 0.8 m/s

8.2 Bauplan

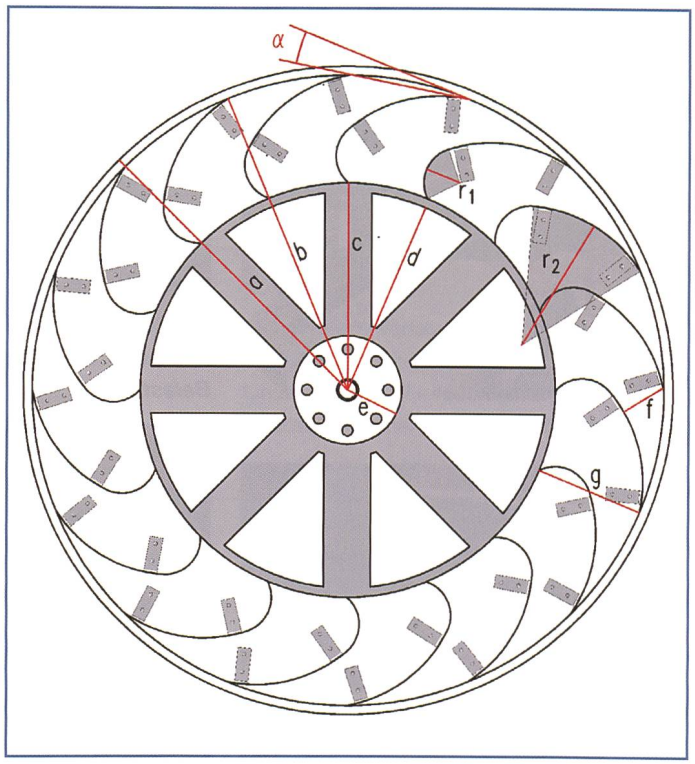


Bild 8.1. Bauplan des oberläufigen Wasserrades.

a	Gesamtradius	36 cm
b	Aussenradius der Schaufeln	35 cm
c	Innenradius der Schaufeln	23 cm
d	Innenradius der Aussparungen	22 cm
e	Radius des Flansches	6 cm
f	Schluckweite	5 cm
g	Tiefe der Schaufeln	12 cm
r_1	Kleiner Radius der Schaufeln	3.9 cm
r_2	Grosser Radius der Schaufeln	15.5 cm
α	Schaufelwinkel (Einflusswinkel des Wasser)	10.22°

Tabelle 8.1. Angaben zu Bild 8.1.

8.3 Bildmaterial zum unterläufigen Wasserrad

Bild 8.2. Das unterläufige Rad noch in der Werkstatt.

Bild 8.3. In Betrieb.

Bild 8.4. Bei grosser Belastung staut sich das Wasser im Kanal.

Bild 8.5. Langzeitbelichtung und dadurch entstandene Effekte.

8.4 Bildmaterial zum oberläufigen Wasserrad

Bild 8.6. Oberläufiges Wasserrad vor dem Betrieb...

Bild 8.7. ...und in Betrieb noch ohne Belastung.

Bild 8.8. Das Rad wird installiert.

Bild 8.9. Sicht auf den Füllstand der Schaufeln.

Bild 8.10. Messung der Wassermenge mithilfe eines 60 l-Fasses und einer Stoppuhr.

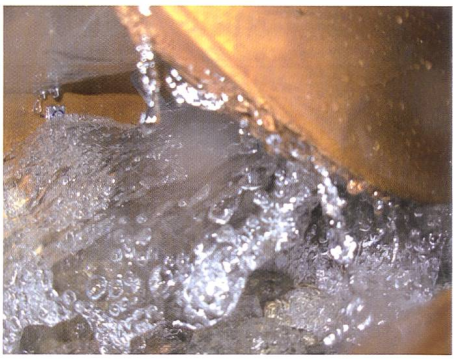


Bild 8.11. Das Auslaufen des Wassers.

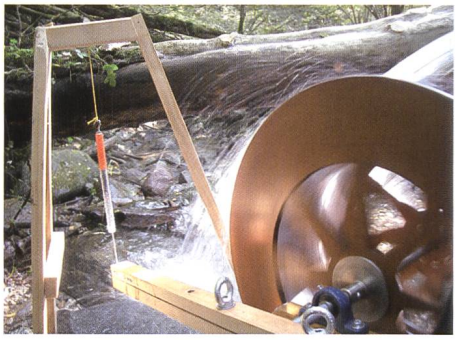


Bild 8.12. Erste Versuche.

Bild 8.13. Grosses Gespritze bei geringer Belastung und viel Wasser.

Bild 8.14. Das Rad mit 3 N/m Belastung und einer Zuflussmenge von 2 l/s.

Literaturverzeichnis
[1] *Brüdern Richard*, 2006: Wie man Wasserräder baut, Richard Brüdern, Rothemüle
[2] *Grimsehl, E.* 1977: Lehrbuch der Physik, Band 1, Teubner Verlag, Leipzig
[3] *Löffel Wilhelm,* 1987: Das Wasserrad: Technik und Kulturgeschichte, Udo Pfiemer Buchverlag, Berlin
[4] *Meerwarth K. W.,* 1934: Experimentelle und theoretische Untersuchungen am oberschlächtigen Wasserrad, Dissertation an der Technischen Hochschule Stuttgart, Wilhelm Heiges, Esslingen a.N.
[5] *Müller Wilhelm,* 1939: Die Wasserräder, Verlag Moritz Schäfer, Leipzig
Manfred Brücher, http://www.opentheory.org/wasserrad/text.phtml [28.12.09]
Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserrad [28.12.09]

Bildnachweis
Alle Objekte ohne Quellen sind selbst erstellt.
Bild 3.1. Wilhelm Löffel 1987: Das Wasserrad: Technik und Kulturgeschichte, Vorläufer des Wasserrades, Udo Pfiemer Buchverlag, Berlin, S.18
Bild 3.2. Wilhelm Löffel 1987: Das Wasserrad: Technik und Kulturgeschichte, Wassermühlen, Udo Pfiemer Buchverlag, Berlin, S.32
Bild 3.3. Wilhelm Löffel 1987: Das Wasserrad: Technik und Kulturgeschichte, Wasserkünste im Bergbau, Udo Pfiemer Buchverlag, Berlin, S.127
Bild 3.4. Richard Brüdern 2006: Wie man Wasserräder baut, Einleitung, Richard Brüdern, Rothemüle, S.1.

Anschrift des Verfassers
Arno Aeschbacher
Lindenweg 19, CH-4528 Zuchwil
arno.aeschbacher@hotmail.com

Kiesschüttungen zur Reaktivierung des Geschiebehaushalts der Aare – die kieslaichenden Fische freuts

Ueli Schälchli, Martina Breitenstein, Arthur Kirchhofer

Zusammenfassung
Seit der II. Juragewässerkorrektion und dem Bau der Kraftwerke Flumenthal und Bannwil hat die Geschiebeführung der Aare stark abgenommen. Das resultierende Geschiebedefizit führte zu einer massiven Beeinträchtigung des aquatischen Lebensraums [1]. Auf Basis einer Machbarkeitsstudie [2] beschlossen die Kantone Bern und Solothurn, den Geschiebehaushalt der Aare zwischen Flumenthal und Murgenthal zu reaktivieren. Die Kernstücke der Massnahmen bilden zwei Kiesschüttungen in Deitingen und Aarwangen im Jahr 2005 mit einem Schüttvolumen von 12 000 m³, resp. 10 000 m³. Die Schüttungen wurden im Laufe der Zeit von der Aare teilweise erodiert und der Kies flussabwärts abgelagert. Dies wurde mittels periodisch stattfindender Vermessung der Kiesschüttungen, weiterer Kontrollprofile sowie durch ein morphologisches Monitoring bei Wolfwil-Wynau dokumentiert. Als Indikator für die Wirkung dieser Kiesschüttungen auf den ganzen «Lebensraum Aare» wurden die kieslaichenden Fischarten gewählt. Die Resultate der Äschenlarven-Kartierungen in mehreren Kontrollstrecken sind ermutigend, der Fortpflanzungserfolg der Äschen war unterhalb der Kiesschüttungen um ein Vielfaches grösser als im Ausgangszustand vor den durchgeführten Schüttungen.

1. Historische Entwicklung des Geschiebehaushalts in der Aare

Der Geschiebehaushalt der Aare im Mittelland war im unbeeinflussten, natürlichen Zustand durch die Geschiebelieferung aus Emme (15 000–20 000 m³/a), Wigger (ca. 3000 m³/a), Reuss (ca. 6000 m³/a) und Limmat (ca. 2000 m³/a) geprägt. Weitere Zubringer waren Murg (Langete), Dünnern, Suhre, Aabach/Bünz und Surb [2], [3]. Unter Berücksichtigung des Abriebs wurden durchschnittlich rund 13 500 m³/a Geschiebe in den Rhein transportiert *(Bild 1)*. Im Aare-Abschnitt von Aarberg bis Büren konnte bereits vor der I. Juragewässerkorrektion (JGK) kein Geschiebe transportiert werden, sodass die Aare zwischen Grenchen und Solothurn – abgesehen von den Einträgen der Bäche aus dem Jura – von Natur aus geschiebelos ist.

Im 20. Jahrhundert wurde der Geschiebehaushalt der Aare im Wesentlichen durch folgende wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Eingriffe verändert:

Bau des Kraftwerks Klingnau (1935): Das Geschiebe wird im Stauwurzelbereich abgelagert und kann nicht mehr bis zum Rhein transportiert werden.

An der Emmemündung wird 1970 im Rahmen der II. JGK ein grosser Geschiebesammler erstellt. Im gleichen Jahr werden die Kraftwerke Flumenthal und Bannwil in Betrieb genommen. Das Geschiebe der Emme wird nicht mehr in die Aare transportiert.

Reuss: Mit dem Bau des Kraftwerks Bremgarten-Zufikon (Inbetriebnahme 1975) wird der Geschiebehaushalt der Reuss unterbrochen. Aus dem Einzugsgebiet der Kleinen Emme kann kein Geschiebe mehr in die Aare transportiert werden.

Geschiebesammler Wigger bei Dagmersellen: Seit Anfang der 80er Jahre werden durchschnittlich 2000 m³/a Geschiebe entnommen. Die Geschiebezufuhr in die Aare wird auf 500–1000 m³/a reduziert, wovon ein Teil dieser Fracht auf Sohlenerosionen in der Wigger zurückzuführen ist.

Neubau Kraftwerk Ruppoldingen (2000): Der Oberwasserspiegel der Aare