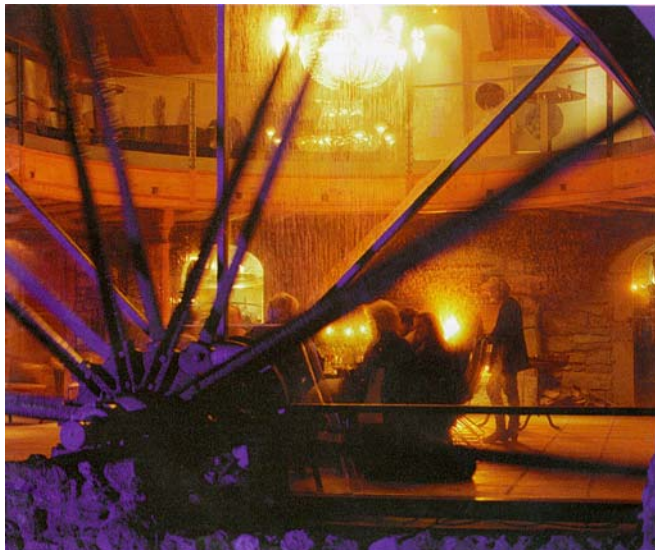


Schlussbericht Juni 2001

# Elektrifizierung des Wasserrades Kislig Oberwil bei Büren

Arbeitspunktregelung eines overschlächtigen Mühlewasserrades  
zur Erzeugung elektrischer Energie mit Rückspeisung ins 50Hz  
Netz

ausgearbeitet durch  
Benjamin Wepfer MS EE  
Murtenstrasse 7  
3270 Aarberg



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>Vorgeschichte</b>	<b>4</b>
<b>Projektidee und deren Begründung</b>	<b>4</b>
<b>Ausführung</b>	<b>5</b>
<b>Ein Plädoyer vor dem Energiegericht</b>	<b>6</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Anhang</b>	<b>9</b>

## Zusammenfassung

In der Schweiz liegt ein spannendes Potenzial an ungenutzten oder stillgelegten Wasserrädern. Jene Wasserräder die noch in Betrieb stehen, zeigen musealen Charakter, andere speisen elektrische Energie mittels einem Asynchrongenerator ins öffentliche Stromnetz.

Die meisten Wasserräder beziehen ihre Lebensenergie aus einem Bach, welcher geohydrologisch bedingt, variable Wassermengen führt. So muss man mit erheblichen Wassermengendifferenzen rechnen.

Turbinen oder Wasserräder haben bei einem bestimmten Wasserfluss eine optimale Drehzahl. Eine neuartige Regelung soll alleine über Messung und Beeinflussung der elektrischen Grössen am Eingang des Wechselrichters auch bei variablem Wasserfluss ein Wasserrad in seinem optimalen Arbeitspunkt drehen lassen. Das überschlächtige Wasserrad z.B. arbeitet optimal, wenn der Schaufelraum zu ca. 35% mit Wasser gefüllt wird.

Um dieser Bedingung gerecht zu werden, muss die Drehzahl des Wasserrades ständig den Verhältnissen des Wasserdargebotes angepasst werden können. Dies kann mit entsprechender Leistungselektronik erreicht werden.

An Industriemessen konnten wir viele Umrichter vergleichen und fanden ein Gerät das unsere Bedürfnisse abdeckt. Servoregler und Rückspeiseeinheit sind eigenständige Geräte.

Regelverhalten sowie andere Parameter mussten noch Softwaremässig angepasst werden. In dieser Kombination von Servoregler, Rückspeiseeinheit sowie Stirnrad-, Flachriemen- und Kettengetriebe, wurde ein Gesamtanlagenwirkungsgrad (Zurückgespeisene elektrische Leistung, zu potenzieller Leistung des Wassers vor dem Wasserrad) von 65 %  $\pm$  5% erreicht.

Die Regelung birgt nach wie vor Verbesserungspotenzial. An der Anlage können interessante Semester- und Diplomarbeiten ausgeschrieben werden.

Diese, in Oberwil bei Büren, erstellte Anlage kann jederzeit besucht werden.

Mit dieser neuartigen Regelung des Wasserrades wurde eine Demonstrationsanlage geschaffen, welche für Industrie und Schule von Bedeutung ist weil

- sie die mit Standardkomponenten erreichbaren Resultate aufzeigt
- neue Standardkomponenten getestet werden können
- sie ein Objekt für den Test von Wechselrichterkomponenten, Rückspeiseeinheiten und Generatoren im Kleinstleistungsbe- reich ist
- sie Potenzial für die Entwicklung komplizierter Regelstrategien für Kleinstturbinen hat
- sie eine relativ kleine Leistung von z.B. 1...2 kW sichtbar, fühlbar oder begreifbar macht
- die Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Projekt für alle elektrischen Energieerzeugungsanlagen, welche einen Generator drehzahlentkoppelt zur Energieeinspeisung ins Netz betreiben, angewendet werden können.

Diese Gründe erfordern einen Kontakt zu Turbinen- und Wasserradhersteller von Pikkraftwerken, zur Definition von geeigneten Regelstrategien. Interessant wäre die Entwicklung eines Kleinstleistungsgenerators für tiefe Drehzahlen mit gutem Wirkungsgrad zur Eliminierung von Getrieben bei langsamdrehenden Wirkleistungslieferanten.

## Vorgeschichte

In Schnottwil (SO) steht eine vor dem Zerfall bedrohte und von Idealisten belagerte alte Oele. Ein mächtiges oberschlächtiges Wasserrad lässt vermuten was es einst geleistet, trotz einer seither realisierten Renovation...

Die Verhandlungen mit dem Gemeindepräsidenten, die alte Oele zu einer Demonstrationsanlage werden zu lassen, schienen erfolgreich bis zum Zeitpunkt wo tatsächlich Kosten zu Lasten der Gemeinde entstanden wären. Ein neues Objekt musste gesucht werden, obwohl Unterstützungsbeiträge von Elektrizitätswerk, Bund und Kanton unterschrieben eingegangen waren.

Das zweite Objekt schien bessere Voraussetzungen zu bieten, war es doch bereits als Kleinod der Gemeinde Büren a. Aare für öffentliche und private Anlässe renoviert worden. Diesmal war es eine Mühle die in Fronarbeit fachkundig und kompetent zu neuem Leben erweckt wurde.

Die Anträge an Bund, Kanton, Heimatschutz und weiteren potenziellen Unterstützern wurden modifiziert eingereicht und sind bewilligt worden. Die Konstellation erwies sich aber auch diesmal als ungünstig. Die zahlreichen Mühlebetreiber haben sich gegen eine Beregelung des Wasserrades ausgesprochen. Sie konnten sich nicht für die Ankoppelung „Ihrer“ werten Mühle an das öffentliche Stromnetz durchringen.

Ein dritter Standort musste evaluiert werden und ist in Oberwil bei Büren auch gefunden worden.

Ein stolzes stählernes Rad drehte sich gemächlich im Takte der öffentlichen Energieversorgung. Eine Anlage also die nach untenstehendem Schema (Abbildung 1) bereits realisiert war. Neue Vorabklärungen liessen uns zum Schluss kommen, ein gutes Objekt gefunden zu haben. Der Besitzer der Anlage, Hr. Kislig ein Macher mit Feingefühl, gab uns sein grosszügiges Einverständnis zur Umsetzung dieser Demo-Anlage. An dieser Stelle nochmals herzlichen Dank. Unbürokratisch verlief auch die Änderung der Unterstützungsanträge bei Bund und Kt. Solothurn.

Nun konnte mit der Umsetzung begonnen werden, ca. ½ Jahr nach dem Aus in Schnottwil.

## Projektidee und deren Begründung

### Drehzahlstarre Systeme

In unserer Umgebung (Bucheggberg Kt. Bern/Solothurn) laufen noch Dutzende von Wasserrädern leer, produzieren Strom unregelmäßig über einen einfachen Asynchrongenerator, oder harren der Restauration. Dabei fiel uns auf, dass die stromproduzierenden Räder meist zu schnell drehen. Die Wasserfächer waren zu wenig gefüllt, weil die Drehzahl nicht reduziert werden kann aufgrund dem starr ans Netz gekoppelten Generator (Abbildung 1). In selteneren Fällen drehen die Räder zu langsam, wenn gerade mal sehr viel Wasser zur Verfügung steht, aber sozusagen nie dreht das Rad in seinem optimalen Arbeitspunkt. Jüttemann (Lit.1,S. 71) und auch Müller (Lit. 2, S.139 ff.) sehen den optimalen Arbeitspunkt für oberschlächtige Wasserräder, wenn die Wasserfächer zu 35% gefüllt werden.

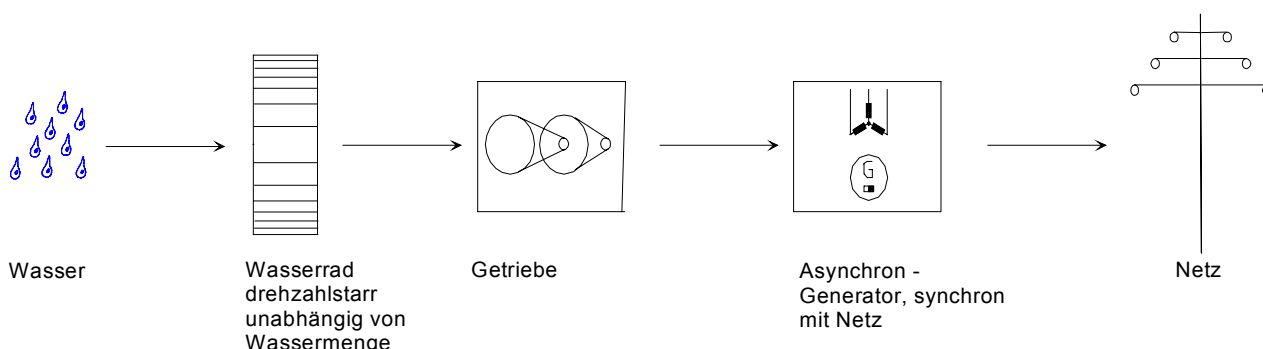


Abbildung 1

Diese Arbeit ist mit Unterstützung des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Drehzahlvariables System

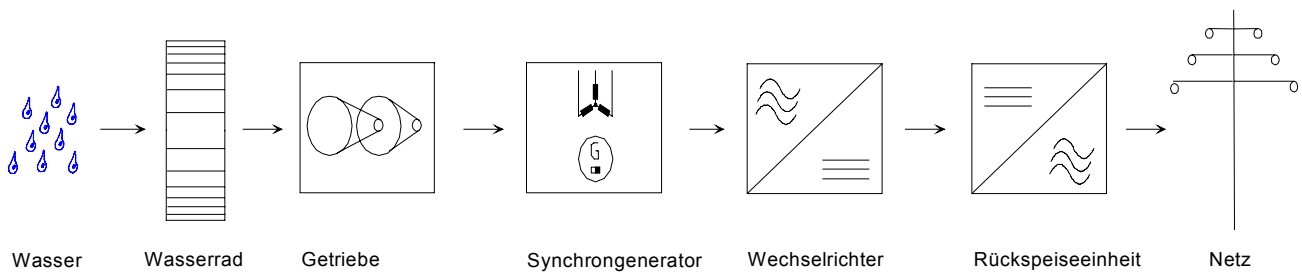


Abbildung 2

Dieses einfache Kriterium hat uns bewogen, mit elektronischen Mitteln den Wirkleistungslieferanten auch für variable Wassermengen auf den optimalen Arbeitspunkt zu regeln (Abbildung 2).

### Ausführung

Die grundsätzliche Funktionsweise und die Begründung der Idee wurde im vorangehenden Abschnitt beschrieben und wird im folgenden Kapitel im Detail behandelt.

Im Anhang unter „Wichtigste Charakteristika der Hauptkomponenten“ sind, mit Rücksicht auf die technischen Angaben, alle verwendeten Komponenten aufgeführt.

In einem Kanal in luftiger Höhe wird das Wasser dem mächtigen Wasserrad zugeführt, wo es kurz vor dem Einlauf eine Notklappe passiert, welche bei Bedarf (Netzausfall, Überlastung, allgem. Störung, Überdrehzahl, usw.) automatisch mittels einem Federrücklaufantrieb geöffnet wird. Zeitgleich mit dem Notöffnen entkoppelt ein Schütz den Generator von der Leistungselektronik, und der Generator wird

mittels einer Ohm'schen Last gebremst. Die noch für kurze Zeit gelieferte Energie des Restwassers wird so in Wärme umgewandelt. Sobald keine Störung mehr vorliegt, wird die Notklappe geschlossen und der Generator auf seine Solldrehzahl gebracht. Nur bei Netzausfall muss der Hauptschütz wieder manuell eingeschaltet werden, bei allen anderen Störungen, sofern behoben oder nicht mehr anstehend, ist ein vollautomatischer Anlauf gewährleistet.

Müssen z.B. zu Versuchszwecken die Rückspeiseeinheit, der Servoregler oder gar der Generator ausgetauscht oder bestimmte Eigenschaften gemessen werden, kann die Notöffnung manuell betätigt werden, die Anlage kommt dann zum Stillstand. Alle Anschlüsse sind, unter Berücksichtigung der gesetzlichen Bestimmungen, gut zugänglich. Die Riemenverbindung zwischen Generator und Getriebe kann binnen Sekunden gelöst werden, so dass neue Komponenten ohne starre Verbindung mit dem Wasserrad gefahrlos getestet werden können.

Diese Arbeit ist mit Unterstützung des Amt für Wirtschaft und Arbeit, Kanton Solothurn entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Ein Plädoyer vor dem Energegericht

Die einfache Bedingung zur Optimierung des Arbeitspunktes eines Wasserrades hat uns nun bewogen die Energieflüsse in diesem System genauer zu betrachten und mit jener einer Druckturbine zu vergleichen.

Auf physikalisch-mathematische Weise soll aufgezeigt werden ob und wenn ja in welchen Grenzen die alte Einrichtung Wasserrad neben einer Turbine noch Berechtigung anmelden kann.

### Wasserrad

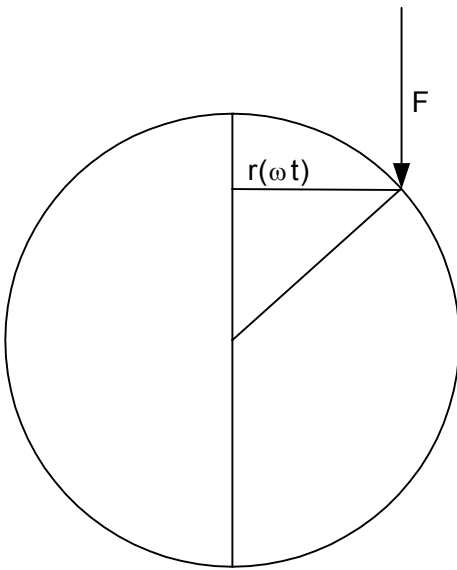


Abbildung 3

$$M = F \cdot r(\omega \cdot t)$$

$$\overline{M} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{2}T} F \cdot r(\omega t) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{2}T} F \cdot r \cdot \sin(\omega t) dt =$$

$$\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{2}T} m \cdot g \cdot r \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot r}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{2}T} \sin(\omega t) dt$$

$$\overline{M} = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot r}{\pi} = \frac{2 \cdot \frac{Z}{2} \cdot V \cdot \varepsilon \cdot g \cdot r}{\pi}$$

Herleitung 1

$$\overline{P} = \overline{M} \cdot \omega = \frac{2 \cdot m \cdot g \cdot r}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{T(m, \varepsilon)} =$$

$$\frac{2 \cdot \frac{Z}{2} \cdot V \cdot \varepsilon \cdot g \cdot r}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{Z \cdot V \cdot \varepsilon} = m \cdot g \cdot h$$

Herleitung 2

Für die Wassermenge von z.B.  $16 \frac{l}{s} (= 16 \frac{kg}{s})$  bedeutet dies folgende theoretische Leistung:

$$\overline{P} = m \cdot g \cdot h = 16 \frac{kg}{s} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 7.8m = 1'224W$$

Gleichung 1

### Druckturbine

$$F = m \cdot a \quad \text{mit} \quad a = \frac{v - c}{t}$$

Gleichung 2

Betrachten wir folgende Konstruktion. Eine Flüssigkeit tritt mit der Geschwindigkeit  $c$  in die Röhre innerhalb des Wagens, wird mit einem Winkel  $\beta$  abgelenkt und verlässt das Rohr und somit auch den Wagen wieder mit der Eintrittsgeschwindigkeit. Verursacht durch den Stoss bei der Ablenkung entsteht eine Kraft  $F_v$ .

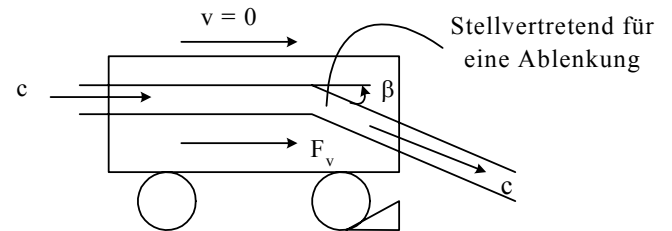


Abbildung 4

$$F_v = \dot{m} \cdot (c - c \cdot \cos(\beta))$$

Gleichung 3

Wir lassen den Wagen nun losfahren.

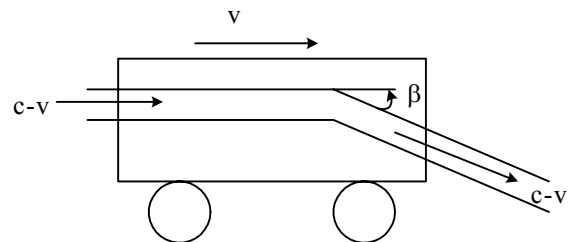


Abbildung 5

Somit wird

$$F_v = \dot{m} \cdot [(c - v) - (c - v) \cdot \cos(\beta)]$$

Gleichung 4

und

$$P = F_v \cdot v = \dot{m} \cdot v \cdot [(c - v) - (c - v) \cdot \cos(\beta)]$$

Gleichung 5

Um die maximale Leistung in Abhängigkeit von  $v$ ,  $c$  zu erhalten, suchen wir die erste Ableitung in Bezug nach  $v$ :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dv} &= \dot{m} \cdot \frac{d}{dv} [v \cdot [(c-v) - (c-v) \cdot \cos(\beta)]] + \\ & v \cdot [(c-v) - (c-v) \cdot \cos(\beta)] \cdot \frac{d}{dv} \dot{m} \\ & \underbrace{\hspace{10em}}_{=0} \\ &= \dot{m} \cdot \frac{d}{dv} [v \cdot c - v^2 - v \cdot c \cdot \cos(\beta) + v^2 \cdot \cos(\beta)] \\ &= \dot{m} [c - 2 \cdot v - c \cdot \cos(\beta) + 2 \cdot v \cdot \cos(\beta)] \end{aligned}$$

Herleitung 3

diese wird Null gesetzt und ausgewertet:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dv} = 0 \text{ somit } c - 2 \cdot v - c \cdot \cos(\beta) + 2 \cdot v \cdot \cos(\beta) &= 0 \\ \rightarrow c \cdot [\cos(\beta) - 1] = 2 \cdot v \cdot [\cos(\beta) - 1] &\rightarrow v = \frac{c}{2} \end{aligned}$$

Gleichung 6

Die eine Bedingung lautet also:  $v$  muss halb so gross sein wie  $c$  so dass  $P$  maximal wird. Bedingung von Gleichung 6, eingesetzt in Gleichung 5:

$$\begin{aligned} P &= F_v \cdot v = \dot{m} \cdot \frac{c}{2} \cdot \left[ \left( c - \frac{c}{2} \right) - \left( c - \frac{c}{2} \right) \cdot \cos(\beta) \right] \\ P &= \dot{m} \cdot \frac{c}{2} \cdot \left[ \frac{c}{2} \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] \end{aligned}$$

Gleichung 6

Eine kleine Herleitung der Fallgeschwindigkeit:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= v \quad s = \int v \cdot dt = \int g \cdot t \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \\ t_{Fall} &= \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} \quad \text{und} \quad v_{End} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \end{aligned}$$

Herleitung 4

Somit Herleitung 4 eingesetzt in Gleichung 6:

$$P = \dot{m} \cdot \frac{c^2}{4} \cdot (1 - \cos(\beta)) \text{ wobei } c^2 = 2 \cdot g \cdot h \text{ worauf folgt dass,}$$

$$P = \dot{m} \cdot g \cdot \frac{h}{2} \cdot (1 - \cos(\beta))$$

Gleichung 7

Unter der Voraussetzung dass  $\beta = 180^\circ$ , so dass  $\cos(\beta) = 1$ , dann wird  $P = \dot{m} \cdot g \cdot h$

Gleichung 8

## Diskussion:

### Wasserrad



Abbildung 6

Abgesehen von Nebeneffekten, z.B. das frühzeitige Austreten des Wassers aus den Behältern an der Unterseite, bestehen keine Bedingungen die die theoretisch zur Verfügung stehende Arbeit ( $Kraft \cdot Weg$ ), reduzieren würde. Die Gewichtswirkung des Wassers ist aus dieser Sicht eine sehr ideale.

Anders sieht es bei der Grösse der Anlage aus. Wasserräder baut man bis ca. 10 m im Durchmesser, wobei der Wirkungsgrad mit grösser werdendem Durchmesser steigt (Lit 2, S.117). Dies aber benötigt viel Platz, bauliche Massnahmen für die Wasserzuführung, solide Verankerungen und gute Handwerker...

Sehr gutmütig reagiert das Wasserrad auf Wasserschwankungen (kein Reservoir) und auf Verunreinigungen wie Kies, Schlamm und dergleichen (keine aufwändige Reinigung).

### Druckturbin

Systembedingt weist die Ausnutzung der kinetischen Energie des Wassers zur Erzeugung von Leistung an der Generatorwelle Schwächen auf. Stets ist man bestrebt die vorhandene Geschwindigkeitsenergie in Stosswirkung umzuwandeln und muss sich die Frage stellen: Wohin mit dem abgebremsten Wasser, resp. wie erreicht man eine Umlenkung von  $180^\circ$  (Gleichung 7), ohne dabei das zuführende Wasser zu stören?

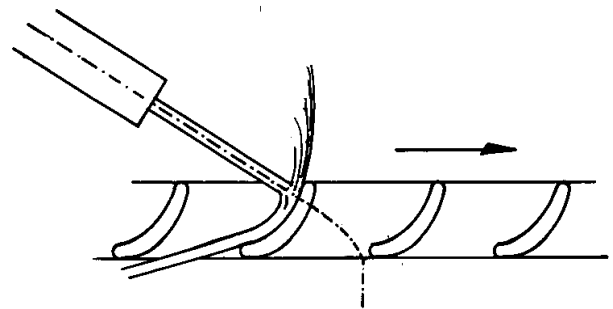


Abbildung 7

Im Vergleich zum Wasserrad jedoch, gibt es auch Vorteile, einer davon ist der massiv kleinere Platzbedarf. Das Wassertransportsystem muss bei gleichem Fluss viel weniger Volumen zur Verfügung stellen, weil doch das Wasser weit weniger lang im System. Ein schlanker, im wörtlichen Sinne, Energiewandler also.

Wasserräder verdienen vor Turbinen den Vorzug bei Gewässern, welche Grundeis, Laub, Treibholz oder Geschiebe, Sand oder Säuren führen, und bei kleinen Zuflüssen ein Stauwehr nicht angelegt werden kann.

Beim Kostenvergleich zwischen Wasserrad und Turbine stellen sich die Gesamtanlagekosten für Wasserräder oder Turbinen in beiden Fällen gleich hoch (Lit. 2, S.135), Selbstverständlich für beschränktes Gefälle von bis zu ca. 12m bei Wasserräder und Leistungen  $\leq 50 - 100$  kW (Lit. 2, S. 117).

Im betrachteten Leistungsbereich ist das Wasserrad robuster und konkurrenzfähig im Vergleich mit der Druckturbine.

## Symbolverzeichnis

M	Drehmoment	Nm
F	Kraft	N
r	Radius von Wasserrad	m
T	Periodendauer (Zeit für eine Umdrehung)	s
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
t	Zeit	s
m	Masse	kg
g	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$\pi$	Konstante	3.1416
P	Leistung	W
Z	Anzahl Zellen des Rades	
V	Gesamtvolumen einer Zelle	dm <sup>3</sup> [Liter]
$\varepsilon$	Füllungsgrad einer Zelle	
h	Gefälle (meist ist $h = 2 \cdot r$ )	m
v	Endgeschwindigkeit	m/s
c	Anfangsgeschwindigkeit	m/s
a	Beschleunigung	m/ s <sup>2</sup>
l	Liter [dm <sup>3</sup> ]	
$\eta$	Wirkungsgrad	$P_{ab}/P_{auf}$
$\bar{x}$	Mittelwert der Grösse x	
$\dot{x}$	Ableitung von x nach der Zeit t	

## Literaturverzeichnis

- Herbert Jüttemann  
***Bauernmühlen im Schwarzwald***  
Verlag: Konrad Theiss  
ISB-Nr: 3-8062-0537-X
- Wilhelm Müller  
***Die Wasserräder***  
Verlag: Moritz Schäfer  
ISB-Nr: 3-87696-114-9



## Anhang

### Wichtigste Charakteristika der Hauptkomponenten

<b>Wasserfluss</b>	Wasserrechtlich zulässig	30 l/s
<b>Wasserrad</b>	Typ Durchmesser Anzahl Fächer Inhalt der Fächer Breite	Oberschlächtiges Wasserrad 7.8 m 60 24 l 0.5 m
<b>Kette</b>	Übersetzung: Wasserradwelle/Getriebe Wirkungsgrad	$76:20 = 3.8$ 0.97
<b>Getriebe</b>	Zweistufiges Stirnradfussgetriebe im Oelbad Typ Uebersetzung Drehzahl max auf schneller Seite Drehmoment max auf langsamer Seite	RT/125/2/16/ECE/B3 16.5 $200 \text{ min}^{-1}$ 3.2 kNm $0.97 \cdot 0.97 = 0.94$
<b>Riemenübersetzung</b>	Uebersetzung: Getriebe/Generator Wirkungsgrad	$44/15 = 2.93$ 0.97
<b>Generator</b>	Typ Leistung Nennstrom Nenn Drehzahl Nennfrequenz Wirkungsgrad bei Nennleistung	Drehstrom synchron permanenterregt WGP 160 M 8 D 5k VA 7.22 A $750 \text{ min}^{-1}$ 50 Hz 92%
<b>Wechselrichter</b>	Typ Strom bei 8kHz PWM-Freq. Leistung Zwischenkreis Leistung U,V,W Verlust bei Nennleistung	LENZE EVS9324-ES 7 A 3 kW 5.8 kVA 150 W
<b>Rückspeiseeinheit</b>	Typ Leistung Strom max.	LENZE 9341 E.1A.10 5.5 kW 12 A

# Eichmessungen

## Eichmessung A vom 12. August 1998



Amt für Umwelt  
 Werkhofstrasse 5  
 4509 Solothurn  
 Telefon 032 627 24 47  
 Telefax 032 627 76 93  
 afu@bd.so.ch

### Eichmessung

**Abfluss: 16 l / s** oder 945 l/Min

mit Wassertiefenkorrektur v **0.00 m** (senkrecht, nur kleine Wassertiefenkorrektur zulässig)

Querschnitt 0.08 m<sup>2</sup> Mittlere Fliessgeschwindigkeit: 0.20 m / s

Ufer Koeff 0 (0 bis 1) Wassertemperatur: \_\_\_\_\_ °C  $K_{\text{Sohle}} = \frac{\quad}{\quad} \text{m}^{1/3}/\text{s}$   
 Ufer Koeff X (0 bis 1)  $K_{\text{Böschung}} = \frac{\quad}{\quad} \text{m}^{1/3}/\text{s}$

	Ufer- abstan- d (m)	Wasse- r- tiefe	1.Mes- sung (m/s)	2.Mes- sung (m/s)	3.Mes- sung (m/s)	Mess- geschwi- n-	Mittlere Geschwin- digkeit	Mittlere Tiefe (m)	Breite (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Abfluss (m <sup>3</sup> /s)
Ufer 0	0.00	0.00									
Profil 1	0.02	0.12	0.18	0.17	0.16	0.17	0.0850	0.060	0.02	0.0012	0.0001
Profil 2	0.04	0.18	0.18	0.20	0.19	0.19	0.1775	0.150	0.02	0.0030	0.0005
Profil 3	0.06	0.21	0.19	0.20	0.19	0.19	0.1875	0.195	0.02	0.0039	0.0007
Profil 4	0.08	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22	0.2025	0.215	0.02	0.0043	0.0009
Profil 5	0.12	0.22	0.22	0.22	0.20	0.21	0.2125	0.220	0.04	0.0088	0.0019
Profil 6	0.20	0.22	0.21	0.21	0.23	0.22	0.2150	0.220	0.08	0.0176	0.0038
Profil 7	0.30	0.22	0.16	0.22	0.22	0.19	0.2050	0.218	0.10	0.0218	0.0045
Profil 8	0.32	0.21	0.23	0.23	0.23	0.23	0.2100	0.213	0.02	0.0043	0.0009
Profil 9	0.34	0.21	0.17	0.21	0.22	0.20	0.2125	0.210	0.02	0.0042	0.0009
Profil 10	0.36	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.2025	0.210	0.02	0.0042	0.0009
Profil 11	0.38	0.19	0.17	0.18	0.17	0.17	0.1900	0.200	0.02	0.0040	0.0008

# Eichmessung A vom 5. Juni 2001



**SOLOTHURN** kanton  
 homepage  
 amt für umwelt

Amt für Umwelt  
 Werkhofstrasse 5  
 4509 Solothurn  
 Telefon 032 627 24 47  
 Telefax 032 627 76 93  
 afu@bd.so.ch

## Eichmessung

**Abfluss:** 13 l / s oder 795 l/Min

mit Wassertiefenkorrektur von **0.00 m** (senkrecht, nur kleine Wassertiefenkorrektur zulässig)

Querschnitt: 0.05 m<sup>2</sup>

Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.25 m/s

Ufer Koeff 0 0.95 (0 bis 1)

Wassertemperatur: °C

K<sub>Sohle</sub> = m<sup>1/3</sup>/s

Ufer Koeff X 0.95 (0 bis 1)

K<sub>Böschung</sub> = m<sup>1/3</sup>/s

	Uferabstand (m)	Wassertiefe (m)	1.Messung (m/s)	2.Messung (m/s)	3.Messung (m/s)	Messgeschwindigkeit	Mittlere Geschwindigkeit	Mittlere Tiefe (m)	Breite (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Abfluss (m <sup>3</sup> /s)
Ufer 0	0.00	0.00									
Profil 1	0.00	0.11	0.16	0.16	0.16	0.16	0.0000	0.000	0.00	0.0000	0.0000
Profil 2	0.05	0.13	0.18	0.18	0.18	0.18	0.1700	0.120	0.05	0.0060	0.0010
Profil 3	0.10	0.14	0.21	0.19	0.20	0.21	0.1925	0.135	0.05	0.0068	0.0013
Profil 4	0.15	0.14	0.21	0.23	0.23	0.22	0.2125	0.140	0.05	0.0070	0.0015
Profil 5	0.20	0.14	0.25	0.27	0.26	0.26	0.2375	0.140	0.05	0.0070	0.0017
Profil 6	0.25	0.14	0.29	0.28	0.29	0.29	0.2725	0.140	0.05	0.0070	0.0019
Profil 7	0.30	0.14	0.31	0.31	0.31	0.31	0.3000	0.140	0.05	0.0070	0.0021
Profil 8	0.35	0.14	0.28	0.28	0.29	0.29	0.2975	0.140	0.05	0.0070	0.0021
Profil 9	0.40	0.11	0.24	0.26	0.22	0.23	0.2708	0.125	0.05	0.0063	0.0017
Profil 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.2185	0.000	0.00	0.0000	0.0000

# Eichmessung A vom 6. Juni 2001



**SOLOTHURN**  
 k a n t o n  
 homepage  
 amt für umwelt

Amt für Umwelt  
 Werkhofstrasse 5  
 4509 Solothurn  
 Telefon 032 627 24 47  
 Telefax 032 627 76 93  
 afu@bd.so.ch

## Eichmessung

**Abfluss: 2 l / s** oder 131 l/Min

mit Wassertiefenkorrektur 0.00 m (senkrecht, nur kleine Wassertiefenkorrektur zulässig)  
 von

Querschnitt: 0.03 m<sup>2</sup>      Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.06 m / s

Ufer Koeff 0 0.95 (0 bis 1)      Wassertemperatur: °C      KSohle = m<sup>1/3</sup>/s  
 Ufer Koeff X 0.095 (0 bis 1)      KBöschung = m<sup>1/3</sup>/s

	Ufer- abstand (m)	Wasser- tiefe (m)	1.Mes- sung (m/s)	2.Mes- sung (m/s)	3.Mes- sung (m/s)	Mess- geschwin- digkeit	Mittlere Geschwin- digkeit	Mittlere Tiefe (m)	Breite (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Abfluss (m <sup>3</sup> /s)
Ufer 0	0.00	0.00									
Profil 1	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.000	0.00	0.0000	0.0000
Profil 2	0.05	0.08	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0000	0.070	0.05	0.0035	0.0000
Profil 3	0.10	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.0300	0.085	0.05	0.0043	0.0001
Profil 4	0.15	0.09	0.06	0.07	0.07	0.07	0.0625	0.090	0.05	0.0045	0.0003
Profil 5	0.20	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.0750	0.090	0.05	0.0045	0.0003
Profil 6	0.25	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.0950	0.090	0.05	0.0045	0.0004
Profil 7	0.30	0.09	0.11	0.11	0.11	0.11	0.1075	0.090	0.05	0.0045	0.0005
Profil 8	0.35	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.1075	0.090	0.05	0.0045	0.0005
Profil 9	0.40	0.05	0.09	0.08	0.08	0.09	0.0100	0.070	0.05	0.0035	0.0000
Profil 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0081	0.000	0.00	0.0000	0.0000

## Eichmessung B vom 6. Juni 2001



**SOLOTHURN**  
 k a n t o n  
 homepage  
 amt für umwelt

Amt für Umwelt  
 Werkhofstrasse 5  
 4509 Solothurn  
 Telefon 032 627 24 47  
 Telefax 032 627 76 93  
 afu@bd.so.ch

### Eichmessung

**Abfluss:**      **24 l / s**      oder      1448 l/Min

mit Wassertiefenkorrektur      0.00 m      (senkrecht, nur kleine Wassertiefenkorrektur zulässig)  
 von

Querschnitt:      0.07 m<sup>2</sup>      Mittlere Fließgeschwindigkeit:      0.36 m / s

Ufer Koeff 0 0.95      (0 bis 1)      Wassertemperatur:      °C      KSohle =      m<sup>1/3</sup>/s  
 Ufer Koeff X 0.95      (0 bis 1)      KBöschung =      m<sup>1/3</sup>/s

	Ufer- Abstand (m)	Wasser- tiefe (m)	1.Mes- sung (m/s)	2.Mes- sung (m/s)	3.Mes- sung (m/s)	Mess- geschwin- digkeit	Mittlere Geschwin- digkeit	Mittlere Tiefe (m)	Breite (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )	Abfluss (m <sup>3</sup> /s)
Ufer 0	0.00	0.00									
Profil 1	0.00	0.14	0.31	0.31	0.33	0.32	0.0000	0.000	0.00	0.0000	0.0000
Profil 2	0.05	0.17	0.33	0.33	0.34	0.34	0.3275	0.155	0.05	0.0078	0.0025
Profil 3	0.01	0.17	0.37	0.36	0.36	0.37	0.3500	0.170	-0.04	-0.0068	-0.0024
Profil 4	0.15	0.17	0.36	0.37	0.36	0.36	0.3625	0.170	0.14	0.0238	0.0086
Profil 5	0.20	0.17	0.37	0.38	0.39	0.38	0.3700	0.170	0.05	0.0085	0.0031
Profil 6	0.25	0.17	0.39	0.38	0.38	0.39	0.3825	0.170	0.05	0.0085	0.0033
Profil 7	0.30	0.17	0.37	0.39	0.38	0.38	0.3800	0.170	0.05	0.0085	0.0032
Profil 8	0.35	0.17	0.34	0.37	0.37	0.36	0.3650	0.170	0.05	0.0085	0.0031
Profil 9	0.40	0.14	0.32	0.33	0.32	0.32	0.3373	0.155	0.05	0.0078	0.0026
Profil 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.3040	0.000	0.00	0.0000	0.0000

# Eichmessung C vom 6. Juni 2001

**SOLOTHURN**  
 k a n t o n  
 homepage  
 amt für umwelt  
 Amt für Umwelt  
 Werkhofstrasse 5  
 4509 Solothurn  
 Telefon 032 627 24 47  
 Telefax 032 627 76 93  
 afu@bd.so.ch

## Eichmessung

**Abfluss:** 27 l / s oder 1601 l/Min  
 mit Wassertiefenkorrektur von 0.00 m (senkrecht, nur kleine Wassertiefenkorrektur zulässig)

Querschnitt: 0.07 m<sup>2</sup>      Mittlere Fließgeschwindigkeit: 0.37 m / s  
 Ufer Koeff 0 0.95 (0 bis 1)      Wassertemperatur: °C      KSohle = m<sup>1</sup>/3/s  
 Ufer Koeff X 0.95 (0 bis 1)           KBöschung = m<sup>1</sup>/3/s

	Ufer- abstand (m)	Wasser- tiefe (m)	1.Mes- sung (m/s)	2.Mes- sung (m/s)	3.Mes- sung (m/s)	Mess- geschwin- digkeit	Mittlere Geschwin- digkeit	Mittlere Tiefe (m)	Breite (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )
Ufer 0	0.00	0.00								
Profil 1	0.00	0.14	0.34	0.32	0.33	0.34	0.0000	0.000	0.00	0.0000
Profil 2	0.05	0.18	0.32	0.36	0.34	0.33	0.3325	0.160	0.05	0.0080
Profil 3	0.10	0.19	0.37	0.37	0.39	0.38	0.3550	0.185	0.05	0.0093
Profil 4	0.15	0.19	0.39	0.39	0.40	0.40	0.3875	0.190	0.05	0.0095
Profil 5	0.20	0.19	0.39	0.40	0.39	0.39	0.3925	0.190	0.05	0.0095
Profil 6	0.25	0.19	0.38	0.40	0.40	0.39	0.3900	0.190	0.05	0.0095
Profil 7	0.30	0.18	0.37	0.37	0.39	0.38	0.3850	0.185	0.05	0.0093
Profil 8	0.35	0.17	0.39	0.37	0.36	0.38	0.3775	0.175	0.05	0.0088
Profil 9	0.40	0.14	0.33	0.36	0.32	0.33	0.3563	0.155	0.05	0.0078
Profil 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.3088	0.000	0.00	0.0000

## Messungen zur Wirkungsgradbestimmung

Theoretische Werte *kursiv*, gemessene Werte **fett**

Aufgrund Messungen vom 12. August 98 (Messprotokoll Anhang „Eichmessung A vom 12. August 1998“)

				$\eta$	Leistung [W]
<b>Wasser</b>	<b>16 l/s</b>	theoretisch		1	<b>1224</b>
<b>Wasserrad</b>		Lit. 2, S. 117, 139ff.	ca.	0.85	1040
<b>Kettenuntersetzung</b>		Erfahrung	ca.	0.97	1009
<b>Zweistufiges Stirnradgetriebe</b>		Erfahrung	ca.	0.94	948
<b>Flachriemen</b>		Erfahrung	ca.	0.97	920
<b>Generator</b>			ca.	0.91	837
<b>Gemessen</b>	U	V	W		
Wirkleistung [W]					
Scheinleistung [VA]					
<b>Rückspeisemodul</b>				0.92	
<b>Gemessen</b>	L1	L2	L3		
Wirkleistung [W]					
Scheinleistung [VA]					
<b>Netz</b>	L1	L2	L3	0.98	
<b>Gemessen</b>					
Wirkleistung [W]	<b>290</b>	<b>250</b>	<b>290</b>		<b>830</b>
Scheinleistung [VA]	<b>900</b>	<b>800</b>	<b>850</b>		
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>				<u><b>0.67</b></u>	

Aufgrund Messungen vom 6. Juni 2001 (Messprotokoll Anhang „Eichmessung B vom 6. Juni 2001“)

				$\eta$	Leistung [W]
<b>Wasser</b>	<b>24 l/s</b>	theoretisch		1	<b>1837</b>
<b>Wasserrad</b>		Lit. 2, S. 117, 139ff.	ca.	0.85	1561
<b>Kettenuntersetzung</b>		Erfahrung	ca.	0.97	1514
<b>Zweistufiges Stirnradgetriebe</b>		Erfahrung	ca.	0.94	1423
<b>Flachriemen</b>		Erfahrung	ca.	0.97	1380
<b>Generator</b>			ca.	0.91	(1256)
<b>Gemessen</b>	U	V	W		
Wirkleistung [W]	<b>410</b>	<b>430</b>	<b>420</b>		<b>1260</b>
Scheinleistung [VA]	<b>420</b>	<b>440</b>	<b>430</b>		
<b>Rückspeisemodul</b>				0.92	
<b>Gemessen</b>	L1	L2	L3		
Wirkleistung [W]	<b>300</b>	<b>465</b>	<b>390</b>		<b>1155</b>
Scheinleistung [VA]	<b>550</b>	<b>740</b>	<b>640</b>		
<b>Netz</b>	L1	L2	L3	0.98	
<b>Gemessen</b>					
Wirkleistung [W]	<b>320</b>	<b>435</b>	<b>375</b>		<b>1130</b>
Scheinleistung [VA]	<b>545</b>	<b>710</b>	<b>655</b>		
<b>Gesamtwirkungsgrad</b>				<u><b>0.615</b></u>	