

Energieertrag von Flussturbinen

Abschätzung des Energieertrags von Turbinen ohne Staustufen am Oberrhein, der Weser, der Werra und der Unterelbe

-
- ▶ Prof. Dr.-Ing. Carsten Fräger
 - ▶ 23. Januar 2014
 - ▶ 2013-11-02-0.0
-

1 Übersicht

In diesem Beitrag wird der Energieertrag von Flussturbinen abgeschätzt. Flussturbinen arbeiten ohne Staustufen in der Strömung der Flüsse. Die Energieberechnung erfolgt an den Flüssen Oberrhein, Weser, Werra und Unterelbe.

Unter der Annahme von mittleren Fließgeschwindigkeiten und Werten zum Ausnutzungsgrad von frei fahrenden Wasserturbinen wird der Energieertrag ermittelt.

Bei Einsatz von Flussturbinen mit einem Laufraddurchmesser $D = 2,5$ m und im Mittel 33 Turbinen je km ergibt sich eine jährliche Gesamtenergie von 1,2 TWh. Dies sind mehr als 10% des in einer BMBF-Studie ermittelten Energiepotenzials der frei fließenden Strecken von Fließgewässern in Deutschland mit einem Einzugsgebiet von mehr als 10 km².

Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht	1
2 Einleitung	2

3	Aufbau Flussturbinen	3
4	Leistung und Energie Flussturbinen	3
5	Energieertrag an deutschen Flüssen	7
6	Zusammenfassung	8

2 Einleitung

Für Deutschland werden in einer Studie des BMBF [1] die Wasserkraftpotenziale für fließende Gewässer mit einem Einzugsgebiet größer 10 km^2 dargestellt. Danach beträgt das gesamte technisch nutzbare Potenzial etwa 33...42 TWh pro Jahr. Hiervon werden zzt. ca. 21 TWh genutzt. Vom Rest haben die frei fließenden Strecken ein Potenzial von 9,5...12,0 TWh. Durch Flussturbinen ohne Staustufen und Wasserführung, könnte ein Teil dieses Potenzials zur Gewinnung elektrischer Energie genutzt werden.

Mit den Aussagen der Studie des BMBF [1] wurde durch die Hochschule Weserbergland (HSW) eine Machbarkeitsstudie für Wasserkraftanlagen an der Leine durchgeführt [3]. Die Leine weist über weite Strecken nur geringe Höhendifferenzen auf. Dadurch lassen sich Staustufen nicht wirtschaftlich realisieren. Die Analyse zeigt, dass die kinetische Energie des Wassers ein hohes Potenzial aufweist. Es steht alldings heute nicht die richtige Technik zur Nutzung zur Verfügung.

Die Energiegewinnung in Schwellen- und Entwicklungsländern durch Flussturbinen wurde an der Hochschule Hannover (HsH) am Beispiel von Dörfern in Malaysia betrachtet [4]. Für das Dorf Sabah wurde die Versorgung mit elektrischer Leistung durch Dieselgeneratoren, Windkraftanlagen, Fotovoltaik, Wellenkraftwerk und Flussturbine betrachtet. Das Dorf Sabah steht dabei stellvertretend für Dörfer mit 20...30 Häusern ohne Anbindung an die öffentliche Stromversorgung, die es in Malaysia aber auch in anderen Teilen Asiens und Afrikas in großer Zahl gibt.

Vielfach sind in der Nähe der Dörfer Flüsse zu finden, die ganzjährig Wasser führen. Die Entfernungen sind wenige hundert m bis zu einigen km. Der Energiebedarf je Haus liegt bei etwa 1000 kWh im Jahr (zum Vergleich: in Deutschland 1000...2000 kWh je Person im Jahr).

Die Flussturbine zeichnet sich gegenüber den anderen Energiegewinnungsmöglichkeiten dadurch aus, dass sie relativ günstig zu installieren ist und ganzjährig zuverlässig elektrische Leistung zur Verfügung stellt. Dies gilt auch für die Nachtstunden. Dadurch kann auf aufwändige Speicher verzichtet werden. Der heutige Bedarf eines Dorfes mit 20...30 Häusern kann schon durch eine Flussturbine gedeckt werden.

Vor diesem Hintergrund laufen Untersuchungen zur Nutzung der kinetischen Energie des Wassers ohne Staustufen. So hat die Firma KSB eine Flussturbine entwickelt, die ohne weitere bauliche Maßnahmen in Fließgewässern eingesetzt werden kann [5].

3 Aufbau Flussturbinen

Die Firma KSB hat einen Prototypen einer Flussturbine entwickelt. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Bild 1. Das Wasser fließt durch den kegelförmigen Einlaufrechen in die Einlaufdüse. Danach durchströmt das Wasser den Propeller, so dass die kinetische Energie des Wassers in mechanische Energie umgewandelt wird.

Im Diffusor wird die Wassergeschwindigkeit abgesenkt, so dass eine zusätzliche Druckdifferenz in der Turbine entsteht.

Mit dem Propeller ist ein Generatorsystem verbunden, das die mechanische Leistung des Propellers in elektrische Leistung umwandelt. Die Generatorsysteme bestehen aus dem Generator, der Leistungselektronik und der Regelung und Steuerung des Systems. Insbesondere der Inselbetrieb der Flussturbinen zur autarken Versorgung kleiner Siedlungen in Entwicklungs- und Schwellenländern stellt hohe Anforderungen an die Steuerung und Regelung des Systems.

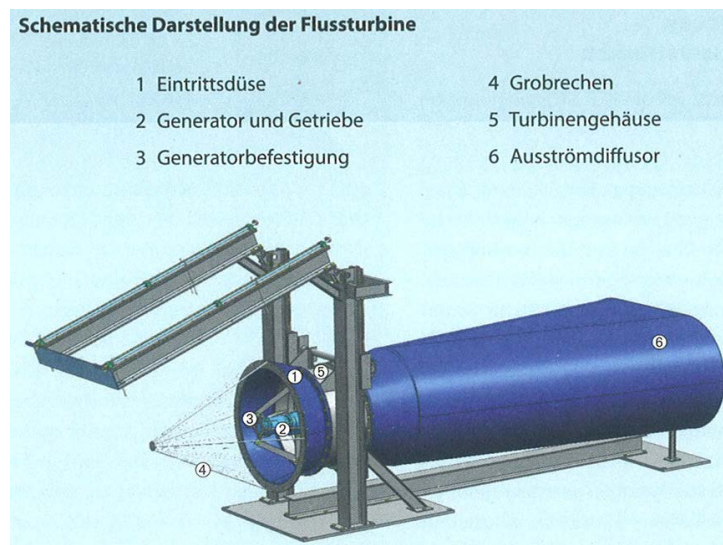


Abbildung 1: Aufbau der Flusswasserturbine mit Schutzrechen, Einlaufdüse und Austrittsdiffusor (KSB 2010).

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen einen ausgeführten Prototypen mit einem Laufraddurchmesser von $D = 2,0$ m.

4 Leistung und Energie Flussturbinen

Die Flussturbine muss ihre Leistung aus der kinetischen Energie des Wassers nehmen. D.h. die Fließgeschwindigkeit wird durch die Flussturbine herabgesetzt. Die kinetische Energie des Wassers

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$



Abbildung 2: Axiale Flusswasserturbine mit Schutzrechen, Einlaufdüse und Austrittsdiffusor während der Installation im Fluss (KSB 2010).



Abbildung 3: Propeller der Flusswasserturbine (KSB 2010).

führt bei Strömung mit der Geschwindigkeit v durch einen Querschnitt A zur Leistung

$$P_{\text{Wasser}} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \quad (2)$$

mit dem Massenstrom

$$\dot{m} = A \cdot \rho \cdot v \quad (3)$$

wobei ρ die Dichte des Wassers ist ($\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$).

Dies ergibt die Leistung P_{Wasser} , die das Wasser mit der Geschwindigkeit v durch einen Querschnitt A führt, zu

$$P_{\text{Wasser}} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4)$$

Die Turbine kann dabei nur einen Teil der Energie aus dem Wasser nehmen, da das Wasser zum Teil um die Turbine herum fließt. Zur Berücksichtigung dieses Effekts hat Betz [2] einen Ausnutzungsgrad für frei fahrende Turbinen ermittelt. Dieser ist in [7] für Flussturbinen zu

$$c_p = 0,59 \quad (5)$$

ermittelt worden.

Für eine Turbine mit dem Durchmesser D ergibt dies die Turbinenleistung

$$P_{\text{Turb}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \quad (6)$$

Die Turbinenleistung P_{Turb} wird mit dem Wirkungsgrad der Turbine in mechanische Leistung und mit dem Wirkungsgrad des Generatorsystems in elektrische Leistung gewandelt. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} berücksichtigt alle Verlustanteile wie z.B.

- ▶ Strömungsverluste in der Turbine und in der Wasserführung
- ▶ Reibungsverluste in der Lagerung
- ▶ Reibungs- und Planschverluste im Getriebe
- ▶ Stromwärmeverluste und Ummagnetisierungsverluste im Generator
- ▶ Schaltverluste und Stromwärmeverluste im Umrichter
- ▶ Stromwärmeverluste in Filter und Zuleitungen
- ▶ Leistungen für die Steuerung und Überwachung der Anlage

Der Gesamtwirkungsgrad steigt mit der Leistung P . Hier wird der Gesamtwirkungsgrad durch folgenden Zusammenhang abgeschätzt:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_m - k_v \cdot \left(\frac{P_{\text{bezug}}}{P_{\text{Turb}}} \right)^{k_e} \quad (7)$$

mit $\eta_m = 0,95$, $k_v = 0,35$, $P_{\text{bezug}} = 500 \text{ W}$, $k_e = 0,5$

Das Diagramm 4 zeigt den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Leistung.

Zusammen mit dem Wirkungsgrad η_{ges} erhält man die elektrische Leistung

$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{ges}} \cdot P_{\text{Turb}} \quad (8)$$

$$= \left(\eta_m - k_v \cdot \left(\frac{P_{\text{bezug}}}{P_{\text{Turb}}} \right)^{k_e} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \quad (9)$$

Den Zusammenhang zeigt Abb. 5 für die Turbinendurchmesser $D = 1,5/2,0/2,5 \text{ m}$. Das Diagramm zeigt deutlich, dass erst mit hohen Fließgeschwindigkeiten eine vernünftige Leistung zu

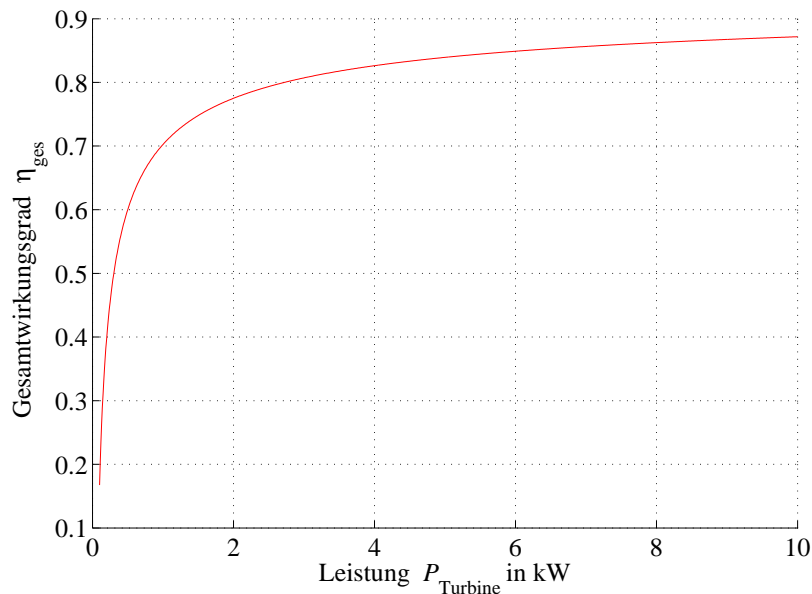


Abbildung 4: Abhängigkeit des Wirkungsgrads η_{ges} von der Turbinenleistung P_{Turbine} nach Gleichung (7)

erwarten ist. Zum einen wächst die Leistung mit v^3 . Zum anderen steigt auch der Wirkungsgrad mit der Leistung an.

Die Leistung ergibt zusammen mit der Jahresbetriebszeit T_a die Jahresenergiemenge W_a :

$$W_a = T_a \cdot P_{\text{el}} \tag{10}$$

Tabelle 2 zeigt die Jahresenergiemenge für verschiedene Turbinendurchmesser und Fließgeschwindigkeiten bei einer Jahresbetriebszeit von $T_a = 6500$ h.

Tabelle 1: Jahresenergiemenge für verschieden Turbinendurchmesser D und Fließgeschwindigkeiten v bei einer Jahresbetriebszeit von $T_a = 6500$ h

	Fließgeschwindigkeit v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$		
	1,25	1,5	2,0
Durchmesser D in m	Jahresenergie W_a in kWh		
1,5	4664	8731	22467
2,0	9013	16469	41402
2,5	14759	26623	66060

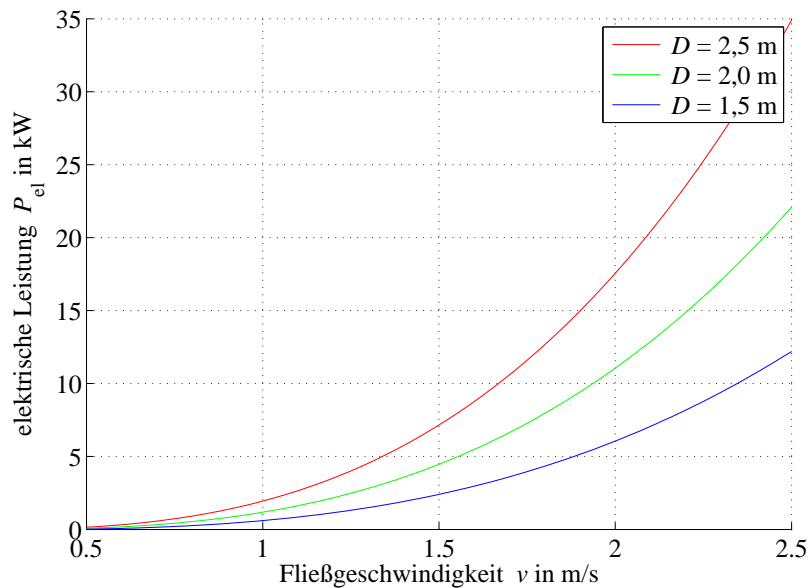


Abbildung 5: elektrische Leistung P_{el} für die Turbinendurchmesser $D = 1,5/2,0/2,5$ m, $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit v nach Gleichung (9)

5 Energieertrag an deutschen Flüssen

Zur Ermittlung des Energieertrags wurden die mittleren Fließgeschwindigkeiten und Längen der Weser, des Oberrheins, der Werra und der Unterelbe betrachtet. Für die Berechnung werden $z = 33$ Turbinen je km Flusslänge angenommen.

Tabelle 2: Jahresenergiemenge für Weser, Werra, Oberrhein und und Unterelbe bei verschiedenen Turbinendurchmessern D bei einer Jahresbetriebszeit von $T_a = 6500$ h. Die Längen und Fließgeschwindigkeiten sind unterschiedlichen Quellen [6] entnommen.

	Weser	Unterelbe	Werra	Oberrhein	Summe
Flusslänge l in km	450	140	300	350	
mittlere Fließgeschwindigkeit v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	1,25	1,4	1,5	2,0	
Anzahl Turbinen z in km^{-1}	33	33	33	33	
Anzahl Turbinen $k = z \cdot l$	13636	4242	9091	10606	37575
Durchmesser D in m	Jahresenergie W_{ages} in GWh				
1,5	64	29	79	238	411
2,0	123	56	150	439	767
2,5	201	90	242	701	1234

Dies ergibt für die Flusslänge l die Gesamtjahresenergie

$$W_{\text{ages}} = l \cdot z \cdot W_a \quad (11)$$

Die Tabelle 2 zeigt die ermittelten Energien für die betrachteten Flüsse. Die Längen und Fließgeschwindigkeiten sind unterschiedlichen Quellen [6] entnommen.

Bei Einsatz von Flussturbinen mit einem Laufraddurchmesser $D = 2,5$ m und im Mittel $z = 33$ Turbinen je km ergibt sich eine jährliche Gesamtenergie von 1,2 TWh. Dies sind mehr als 10% des in einer BMBF-Studie [1] ermittelten Energiepotenzials der frei fließenden Strecken von Fließgewässern in Deutschland mit einem Einzugsgebiet von mehr als 10 km².

6 Zusammenfassung

Für die Flüsse Weser, Werra, Oberrhein und Unterelbe werden die Jahresenergieerträge für Flussturbinen ermittelt. Zur Berechnung werden vereinfachende Annahmen zur Ausnutzung der kinetischen Energie und zu den Wirkungsgraden gemacht. Mit diesen Annahmen ergibt sich eine Gesamtjahresenergie von 1,2 TWh für die genannten Flüsse. Dies sind mehr als 10% des in einer BMBF-Studie ermittelten Energiepotenzials der frei fließenden Strecken von Fließgewässern in Deutschland.

Literatur

- [1] Potenzialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland. BMBF (2010)
- [2] Betz: Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen (1926)
- [3] Projekt Machbarkeitsstudie zur Errichtung eines Wasserkraftwerkes im Auftrag der Stadtwerke Neustadt a. Rbge. Projektleiter Prof. Kesting.
- [4] Mustafa, Bashirudin, Mohamad, Abdullah, Osman: Entwicklung einer Energiebox für strukturschwache Regionen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Projektbericht der Hochschule Hannover (2011)
- [5] Produktdarstellung Flussturbine KSB http://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/Wassertechnik/Wasserkraft/40730/ (2013)
- [6] Wasserschiffsverkehrsverband WSV, ARD-Tagesschau, Wikipedia
- [7] Thiericke Ch., Surek D.: Entwicklung von Axialturbinen für die Flussenergienutzung. Zeitschrift für Nachwuchswissenschaftler 2 (2011)