

Abdeckung von Belastungsspitzen durch die kinetische Energie von Flussturbinen

Abdeckung von Belastungsspitzen im
Inselbetrieb von Flussturbinen durch die
Nutzung der in der Turbine gespeicherten
kinetischen Energie des Wassers.

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

1 Übersicht

In diesem Beitrag wird die Möglichkeit dargestellt, wie Belastungsspitzen beim Betrieb von Flussturbinen in Inselnetzen durch die kinetische Energie des Wassers abgedeckt werden können. Als Beispiel dienen dabei Kühlgeräte für Lebensmittel.

Flussturbinen arbeiten ohne Staustufen in der Strömung der Flüsse. Sie stellen eine Möglichkeit zur Energieversorgung von kleinen Siedlungen ohne öffentliche Stromversorgung dar. Der besondere Vorteil ist, dass sie ohne aufwändige Bauwerke zur Wasserführung auskommen.

Bei der Versorgung von Inselnetzen muss die Turbine alleine die benötigte Leistung bereitstellen. Dies gilt auch für die Abdeckung von Belastungsspitzen.

In diesem Beitrag wird anhand von Beispielrechnen dargestellt, welches Potenzial die kinetische Energie des Wassers in der Turbine hat, um die Belastungsspitzen abzudecken.

Inhaltsverzeichnis

1 Übersicht	1
2 Einleitung	2
3 Aufbau Flussturbinen	3
4 Leistung Flussturbinen	4
5 Belastungsspitzen durch Kühlgeräte	6
6 Energie der Flussturbine zur Abdeckung der Belastungsspitzen	9
7 Zusammenfassung und Ausblick	10

2 Einleitung

Die Energiegewinnung in Schwellen- und Entwicklungsländern durch Flussturbinen wurde an der Hochschule Hannover (HsH) am Beispiel von Dörfern in Malaysia betrachtet [2]. Für das Dorf Sabah wurde die Versorgung mit elektrischer Leistung durch Dieselgeneratoren, Windkraftanlagen, Fotovoltaik, Wellenkraftwerke und Flussturbinen 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 [3].

Die Flussturbine arbeitet bei der Versorgung kleiner Dörfer abseits der öffentlichen Energieversorgung im Inselbetrieb. Das bedeutet, dass die Turbine die Leistung entsprechend den schwankenden Belastungen durch die Verbraucher bereitstellen muss, obwohl sich die Fließgeschwindigkeit des Flusses nicht ändert.

Belastungsspitzen entstehen etwa beim Einschalten von Kühlgeräten und beim Füllen von Kühl- und Gefriergeräten mit frischen, noch warmen Lebensmitteln.

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. Dadurch wird die Leistung gesteigert.

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.

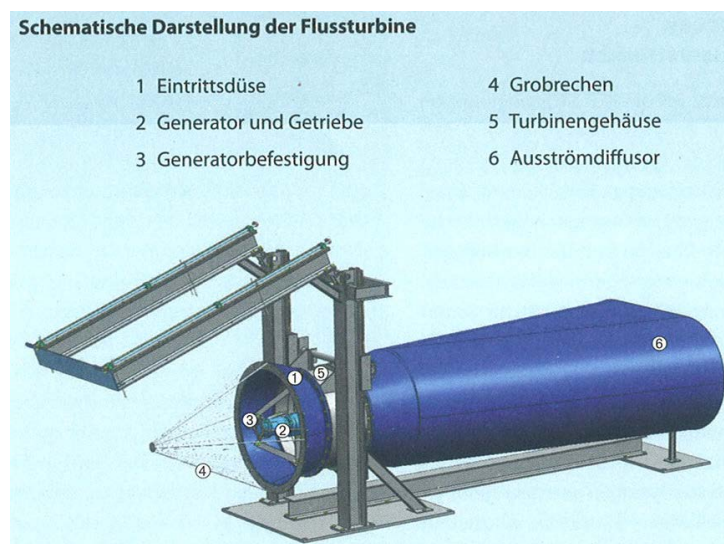


Abbildung 1: Aufbau der Flussturbine mit Schutzrechen, Einlaufdüse und Austrittsdiffusor (KSB 2010).

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



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

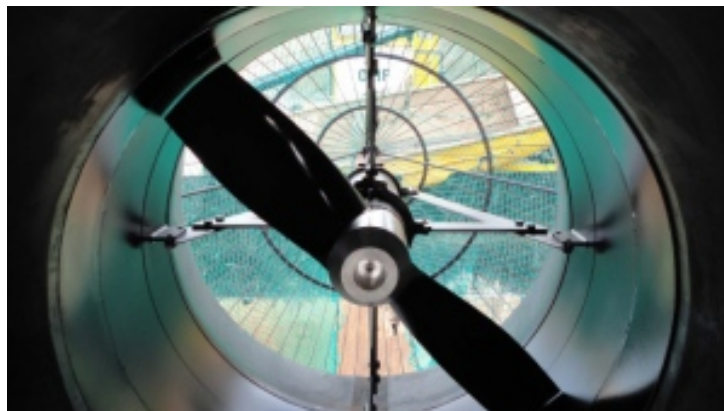


Abbildung 3: Propeller der Flussturbine (KSB 2010).

4 Leistung 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

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

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 [1] einen Ausnutzungsgrad für frei fahrende Turbinen ermittelt. Dieser ist in [5] 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

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

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

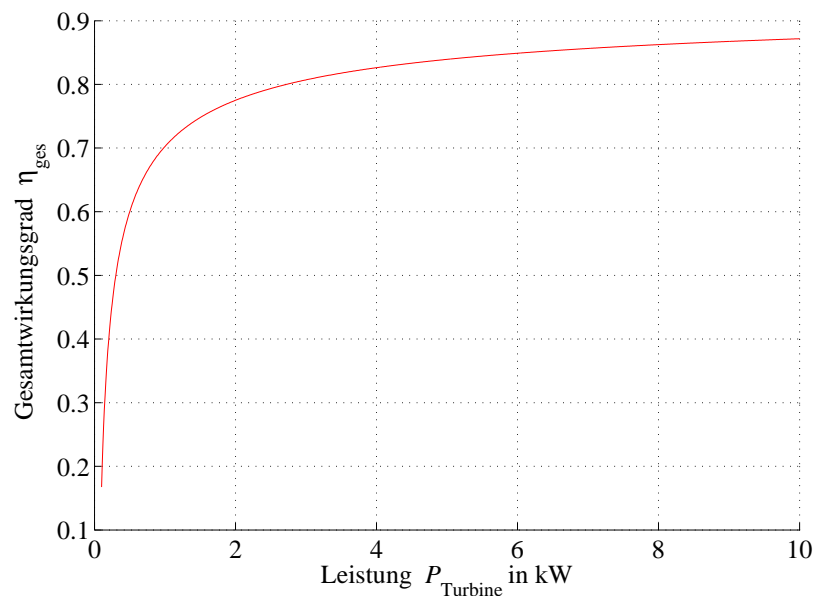


Abbildung 4: Abhängigkeit des Wirkungsgrads η_{ges} von der Turbinenleistung P_{Turbine} nach Gleichung (7)

Den Zusammenhang zeigt Abb. 5 für die Turbinendurchmesser $D = 1,5/2,0/2,5$ m. Das Diagramm zeigt deutlich, dass erst mit hohen Fließgeschwindigkeiten eine vernünftige Leistung zu erwarten ist. Zum einen wächst die Leistung mit v^3 . Zum anderen steigt auch der Wirkungsgrad mit der Leistung an.

5 Belastungsspitzen durch Kühlgeräte

Zu Ermittlung des Energiebedarfs wird das Kühlen von Lebensmitteln betrachtet.

Hier sind zwei Anteile zu beachten:

- ▶ Leistung und Energie zum Einschalten des Kühlaggregats
- ▶ Leistung und Energie zum Kühlen und Gefrieren der Lebensmittel

Zum Kühlen von Lebensmitteln muss den Lebensmitteln Wärme entzogen werden. Dazu wird in der Regel ein Kühlaggregat eingesetzt, bei dem ein Elektromotor einen Kompressor für den Kühlkreislauf antreibt.

Der Kühlkreislauf ist so ausgelegt, dass das Kühlaggregat im normalen Betrieb durch einen Zweipunktregler zyklisch ein- und ausgeschaltet wird. Dies führt zu hohen Leistungsspitzen beim Anlauf des Kühlaggregats. Danach fällt die Leistung auf die Dauerleistung ab. Wenn die Temperatur im Kühlgerät die Solltemperatur um einen gewissen Wert unterschreitet, wird das

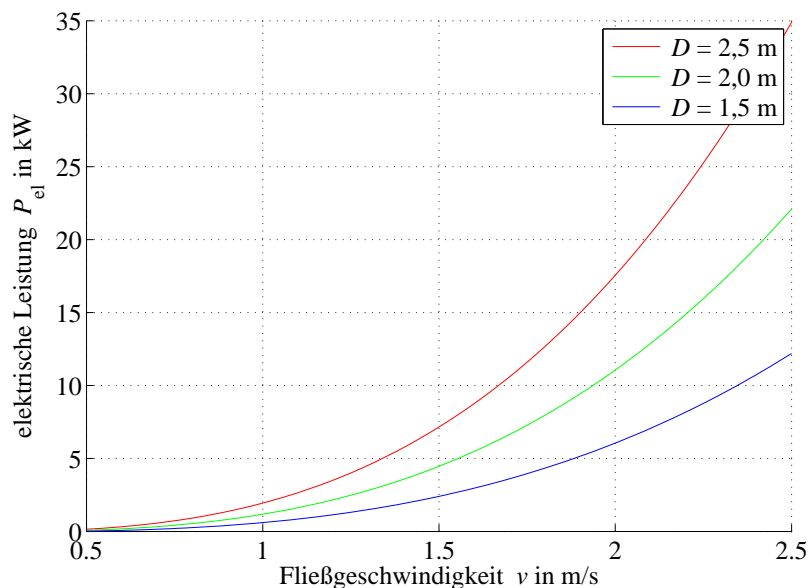


Abbildung 5: elektrische Leistung P_{el} für die Turbinendurchmesser $D = 1,5/2,0/2,5$ m, $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit v nach Gleichung (9)

Kühlaggregat abgeschaltet. Wenn die Temperatur die Solltemperatur wieder überschreitet, wird das Aggregat wieder eingeschaltet.

Für diesen Betrieb muss das Generatorsystem der Flussturbine die Maximalleistung für den Anlauf und die zugehörige Arbeit zur Verfügung stellen. Aus der Leistung beim Anlaufen P_{an} ergibt sich mit der Anlaufdauer T_{an} die Arbeit W_{an} zu

$$W_{an} \approx T_{an} \cdot P_{an} \quad (10)$$

Zahlenwerte für zwei unterschiedliche Kühlgeräte gibt Tabelle 1 wieder. Mit der grob geschätzten Anlaufdauer $T_{an} = 0,5$ s ergeben sich Anlaufarbeiten von $W_{an} = 1 \dots 1,5$ kJ. Diese Arbeit muss die Flussturbine kurzfristig bei jedem Anlauf des Kühlaggregats über die stationäre Leistung der Turbine hinaus zur Verfügung stellen können.

Wenn frische Lebensmittel in das Kühlgerät gebracht werden, muss das Kühlgerät die noch warmen Lebensmittel mit der Temperatur ϑ_{warm} auf die Lagertemperatur ϑ_{kalt} herunterkühlen. Dazu muss das Kühlgerät dem Lebensmittel Wärme entsprechend der Wärmekapazität und der Temperaturdifferenz entziehen. Sollen die Lebensmittel gefroren werden, muss zusätzlich die Schmelzwärme entzogen werden.

Aus der spezifischen Wärmekapazität $c_{w\ddot{a}rme}$, der Masse m und der Temperaturdifferenz

$$\Delta T = \vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt} \quad (11)$$

ergibt sich die Wärmemenge zu

$$W_{\text{kühl}} = \Delta T \cdot c_{\text{wärme}} \cdot m = (T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}) \cdot c_{\text{wärme}} \cdot m \quad (12)$$

Zum Gefrieren der Lebensmittel muss zusätzlich die Schmelzwärme

$$W_{\text{schmelz}} = c_{\text{schmelz}} \cdot m \quad (13)$$

entnommen werden. Dies ergibt die gesamte Wärmemenge

$$W_{\text{ges}} = W_{\text{schmelz}} + W_{\text{wärme}} = (c_{\text{schmelz}} + \Delta T \cdot c_{\text{wärme}}) \cdot m \quad (14)$$

Zur Entnahme der Wärmemenge wird eine elektrische Arbeit W_{el} benötigt. Der Zusammenhang zwischen der Wärmemenge und der elektrischen Arbeit wird durch die Leistungszahl ϵ_K beschrieben:

$$W_{\text{ges}} = \epsilon_K \cdot W_{\text{el}} \quad , \quad W_{\text{el}} = \frac{W_{\text{ges}}}{\epsilon_K} \quad (15)$$

Die Leistungszahl hängt von dem Kühlgerät und den Temperaturen ab. Als Anhaltspunkt wird hier beim Kühlschrank $\epsilon_K = 3$ und beim Gefrierschrank $\epsilon_K = 2$ verwendet (in Anlehnung an [4]).

Die Tabelle 1 gibt Zahlenwerte für das Kühlen und Gefrieren wieder. Dabei sind die Werte z.T. Herstellerangaben entnommen, z.T. aber auch nur geschätzt. Vereinfachend wird die gesamte Menge Lebensmittel mit den Wärmedaten für Wasser behandelt. Dabei wird die spezifische Wärmekapazität zur Vereinfachung als konstant unterstellt. So erhält man grobe Werte für die erforderliche elektrische Arbeit.

Die Tabelle zeigt, dass zum Kühlen und Gefrieren der Lebensmittel erhebliche elektrische Arbeit erforderlich ist (in den Beispielen $W_{\text{el}} = 640 \dots 2700$ kJ). Diese Arbeit kann von den Kühlaggregaten nur über Zeiträume von $T = 1,5 \dots 5$ h geleistet werden.

Das Einlagern von Lebensmitteln bedeutet also aus Sicht der Turbine einen Dauerbetrieb.

Die Turbine mit ihrem Generatorsystem muss daher zum Einlagern von Lebensmitteln zunächst die Anlaufarbeit von $W_{\text{an}} = 1 \dots 1,5$ kJ kurzzeitig aufbringen. Danach ist über einen längeren Zeitraum die Leistung $P_{\text{elN}} = 120 \dots 160$ W erforderlich.

Beim dauerhaften Betrieb der Kühlgeräte ist zyklisch die Anlaufarbeit $W_{\text{an}} = 1 \dots 1,5$ kJ erforderlich. Danach wird für eine gewisse Zeit die Leistung $P_{\text{elN}} = 120 \dots 160$ W benötigt. Anschließend schaltet das Kühlaggregat ab und das Kühlgerät braucht nur noch eine geringe Leistung für die Steuerelektronik.

Tabelle 1: Anhaltswerte für die Leistung und die Arbeit für einen Gefrierschrank und einen Kühlschranks. Die Werte sind z.T. Herstellerangaben entnommen, z.T. geschätzt. Vereinfachend wird die gesamte Menge Lebensmittel mit konstanten Wärmedaten für Wasser behandelt.

			Gefrierschrank	Kühlschrank
Bruttoinhalt	V	l	252	179
Leistung	P_{elN}	W	160	120
Anlaufleistung	P_{an}	W	3000	2100
Anlaufzeit	T_{an}	s	0,5	0,5
Anlaufarbeit	W_{an}	kJ	1,5	1,05
Lagertemperatur	ϑ_{kalt}	°C	-18	7
Temperatur der frischen Lebensmittel	ϑ_{warm}	°C	30	30
Temperaturdifferenz	ΔT	K	48	23
Leistungszahl	ϵ_K	1	2	3
Masse Lebensmittel	m	kg	10	20
spezifische Wärmekapazität	$c_{w\u00e4rme}$	$\frac{kJ}{kgK}$	4,18	4,18
spezifische Schmelzw\u00e4rme	$c_{schmelz}$	$\frac{kJ}{kg}$	333,5	333,5
K\u00fchlarbeit	$W_{k\u00fch}$	kJ	2006	1923
Schmelzw\u00e4rme	$W_{schmelz}$	kJ	3335	0
gesamte W\u00e4rmearbeit	W_{ges}	kJ	5341	1923
elektrische Arbeit	W_{el}	kJ	2671	641
K\u00fchldauer	T	h	4,6	1,5

6 Energie der Flussturbine zur Abdeckung der Belastungsspitzen

Im station\u00e4ren Betrieb entnimmt die Turbine dem Wasser Leistung, indem die Turbine die Geschwindigkeit des Wassers station\u00e4r reduziert. Im station\u00e4ren Betrieb sind die Wassergeschwindigkeiten am Einlauf und Auslauf der Turbine zeitlich konstant.

Zur Abdeckung von Belastungsspitzen kann die Turbine die Geschwindigkeit des Wassers in der Turbine zus\u00e4tzlich dynamisch reduzieren.

In der Turbine mit der L\u00e4nge l , dem Durchmesser D und der Flie\u00dfgeschwindigkeit v ist in etwa die kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot l \cdot v^2 \quad (16)$$

gespeichert (ρ : Dichte des Wassers).

Diese Energie kann dynamisch dem Wasser teilweise entnommen werden. Da bei dieser dynamischen Leistungsentnahme die Turbine nicht im optimalen Arbeitspunkt arbeitet, ist der Wirkungsgrad gegen\u00fcber dem station\u00e4ren Betrieb reduziert.

Diese beiden Effekte werden hier durch den Entnahmewirkungsgrad η_{entnahme} berücksichtigt, der beschreibt, welcher Anteil der im Wasser gespeicherten kinetischen Energie durch die Turbine und das Generatorsystem entnommen und als elektrische Arbeit W_{el} abgegeben wird.

Die elektrische Arbeit W_{el} ergibt sich dann zu

$$W_{\text{el}} = \eta_{\text{entnahme}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot l \cdot v^2 \quad (17)$$

Nach der Entnahme muss sich durch den Fluss die Geschwindigkeit in der Turbine wieder erhöhen, um wieder die stationäre Leistung nach Abschnitt 4, Gl. (6) entnehmen zu können.

Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der elektrischen Arbeit von der Fließgeschwindigkeit und dem Turbinendurchmesser für einen Entnahmewirkungsgrad von $\eta_{\text{entnahme}} = 0,25$ bei einer Turbinenlänge von $l = 10$ m.

Aus der Grafik ist zu erkennen, dass eine Turbine mit einem Durchmesser von $D = 2,5$ m ab einer Fließgeschwindigkeit von $v \approx 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die erforderliche Arbeit für einen Gefrierschrank bereitstellen kann. Eine Turbine mit $D = 1,5$ m benötigt hierfür eine Fließgeschwindigkeit von $v \approx 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. D.h. ab diesen Geschwindigkeiten ist die Flussturbine in der Lage, zusätzlich zur stationären Leistung die Belastungsspitzen abzufangen und kurzzeitig elektrische Arbeit zu leisten.

Beim Betrieb von Kühlgeräten an Flussturbinen im Inselbetrieb kann das zyklische Einschalten der Kühlaggregate ein kritischer Betriebspunkt sein. Dies gilt jedenfalls dann, wenn die Turbine schon durch die stationäre Belastung anderer Verbraucher an der Grenze ihrer Leistung ist.

Beim Betrieb mehrerer Kühlgeräte ist ggf. eine Synchronisation der Einschaltzeitpunkte erforderlich, um zu vermeiden, dass mehrere Kühlaggregate gleichzeitig einschalten und so zum Spannungseinbruch im Inselnetz führen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Berechnungen an Kühlgeräten zeigen, dass das Einschalten der Kühlaggregate ein kritischer Betriebspunkt beim Betrieb von Flussturbinen in Inselnetzen sein kann. Dies gilt besonders dann, wenn die stationäre Leistung bereits nahe an der verfügbaren Leistung ist.

Hier muss in recht kurzer Zeit eine große elektrische Arbeit zur Verfügung gestellt werden, die Leistung also in kurzer Zeit ansteigen und anschließend wieder abfallen.

Die Abschätzung der elektrischen Arbeit, die sich aus der kinetischen Energie des Wassers in der Turbine gewinnen lässt, zeigt aber, dass durch Absenken der Fließgeschwindigkeit kurzfristig die benötigte elektrische Leistung und Arbeit bereit gestellt werden kann.

Weitere Arbeiten sollen aufzeigen, welche Maßnahmen erforderlich sind, um einen zuverlässigen Betrieb von Flussturbinen in Inselnetzen auch bei Belastungsspitzen zu ermöglichen.

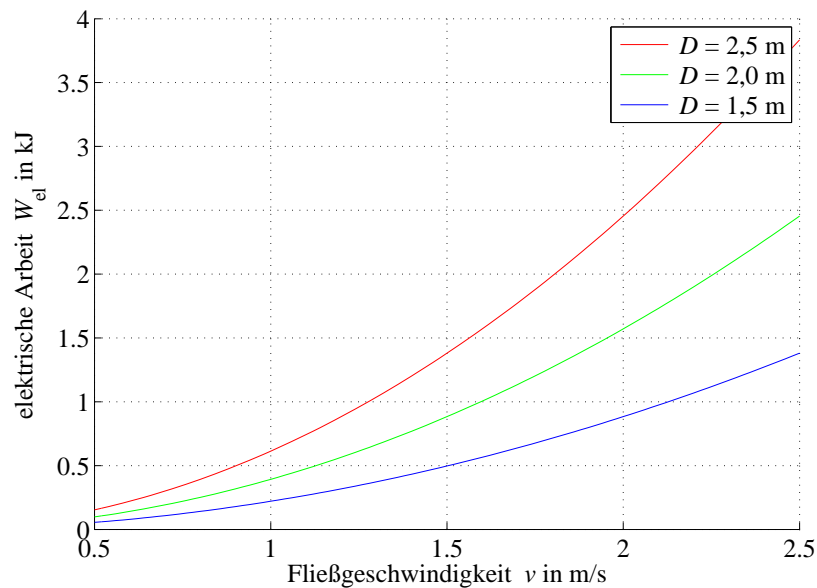


Abbildung 6: elektrische Arbeit W_{el} für die Turbinendurchmesser $D = 1,5/2,0/2,5$ m und die Länge $l = 10$ m in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit v nach Gleichung (17) für einen Entnahmewirkungsgrad von $\eta_{entnahme} = 0,25$

Literatur

- [1] Betz: Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen (1926)
- [2] Mustafa, Bashirudin, Mohamad, Abdullah, Osman: Entwicklung einer Energiebox für strukturschwache Regionen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Projektbericht der Hochschule Hannover (2011)
- [3] Produktdarstellung Flussturbine KSB http://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/Wassertechnik/Wasserkraft/40730/ (2013)
- [4] Müller, C.: Leistungszahlen für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme. friscaldo 1-2008 S. 31–33 (2008)
- [5] Thiericke Ch., Surek D.: Entwicklung von Axialturbinen für die Flussenergienutzung. Zeitschrift für Nachwuchswissenschaftler 2 (2011)