



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine





Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Einleitung

- Der Wirkungsgrad von Turbinen ist nur im Nennpunkt maximal. Er sinkt mit geringer werdenden Wassermengen.
- Bei doppelt geregelten Turbinen (z. B. Kaplan) kann eine Anpassung/Optimierung über z. B. Flügelverstellung erfolgen.
- Bei Francis-Turbinen, die in der Regel über ein Getriebe mit einem Asynchrongenerator gekoppelt sind, ist dies nicht möglich. Die Netzfrequenz gibt bei allen Lastzuständen eine feste Drehzahl vor.
- Eine Drehzahlverstellung würde das Problem lösen, einen höheren Wirkungsgrad ergeben und so zu einer Erhöhung der Energieerzeugung führen.

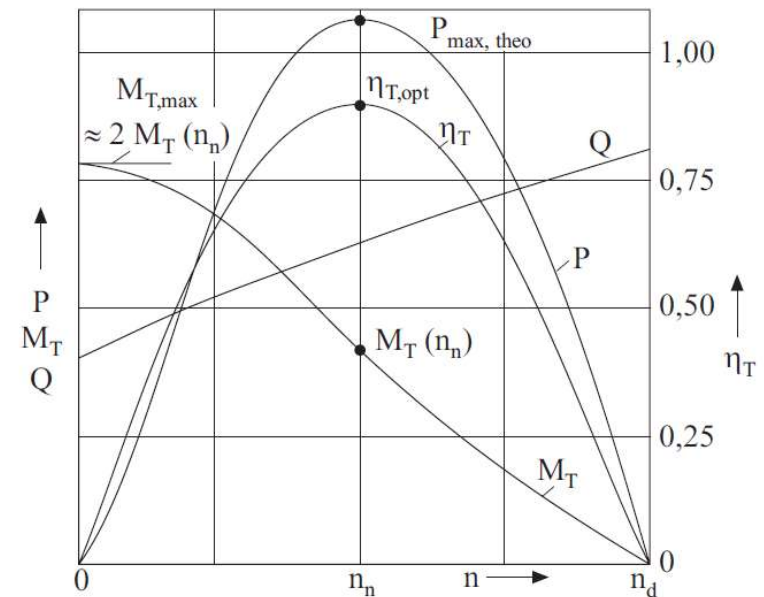


Abbildung 1: Leistungs-, Drehmoment-, und Wirkungsgradkennlinie einer Turbine in Abhängigkeit von n bei konstanter Fallhöhe h_f und konstanter Öffnung des Leitapparates a_0

Quelle: Giesecke et al. 2014, Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb, Verlag Axel Springer, S. 548



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Theoretische Grundlagen

$$P = P_{\text{hyd}} \cdot \eta_T = \rho_W \cdot g \cdot h_f \cdot Q \cdot \eta_T$$

$$P \sim \eta_T$$

P	Turbinenleistung [W]
P_{hyd}	hydraulische Leistung [W]
ρ_W	Dichte des Wassers [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
h_f	Nettofallhöhe [m]
Q	Durchflussmenge [m ³ /s]
η_T	Turbinenwirkungsgrad gesamt [-]

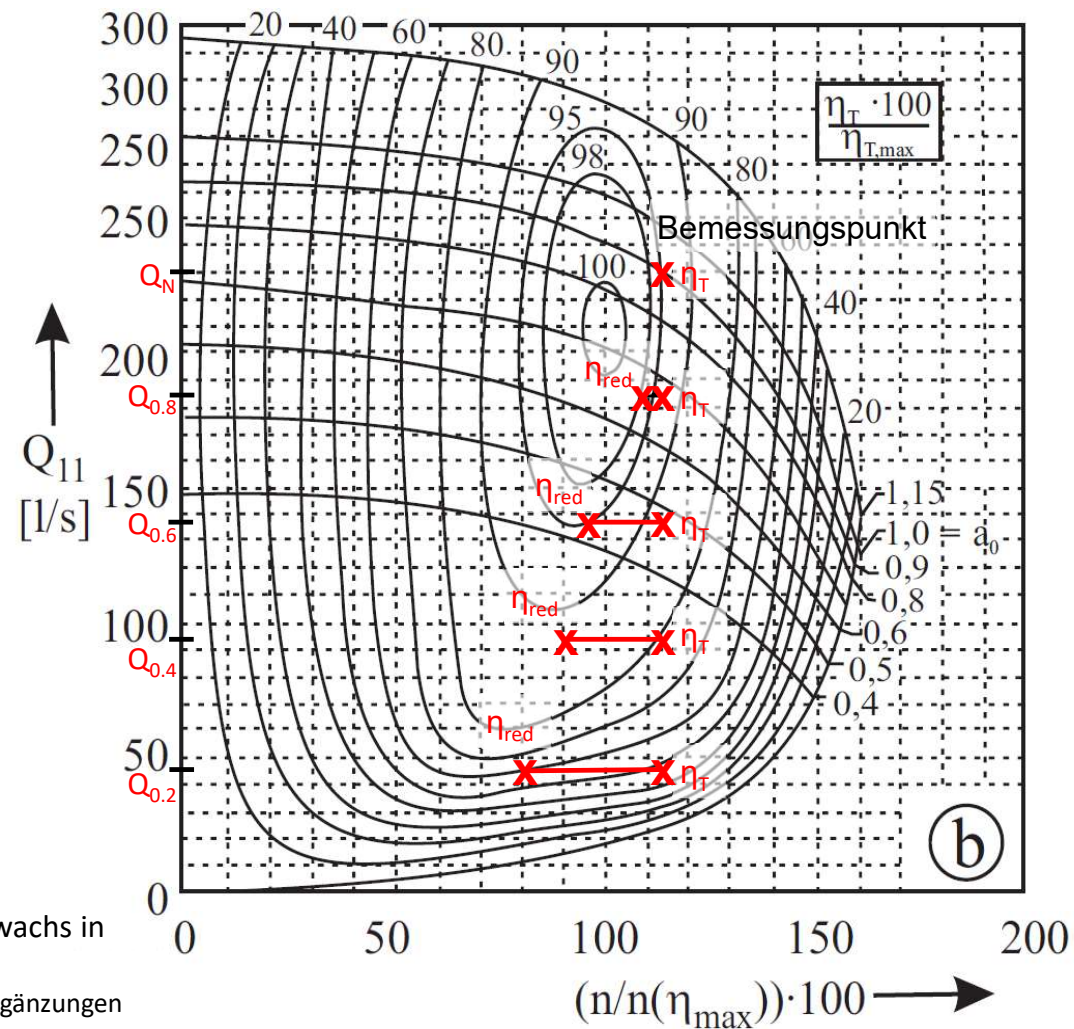


Abbildung 2: Möglicher Leistungszuwachs in Abhängigkeit vom Durchfluss

Quelle: Giesecke et al. 2014, S. 552, mit Ergänzungen



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Realisierung I

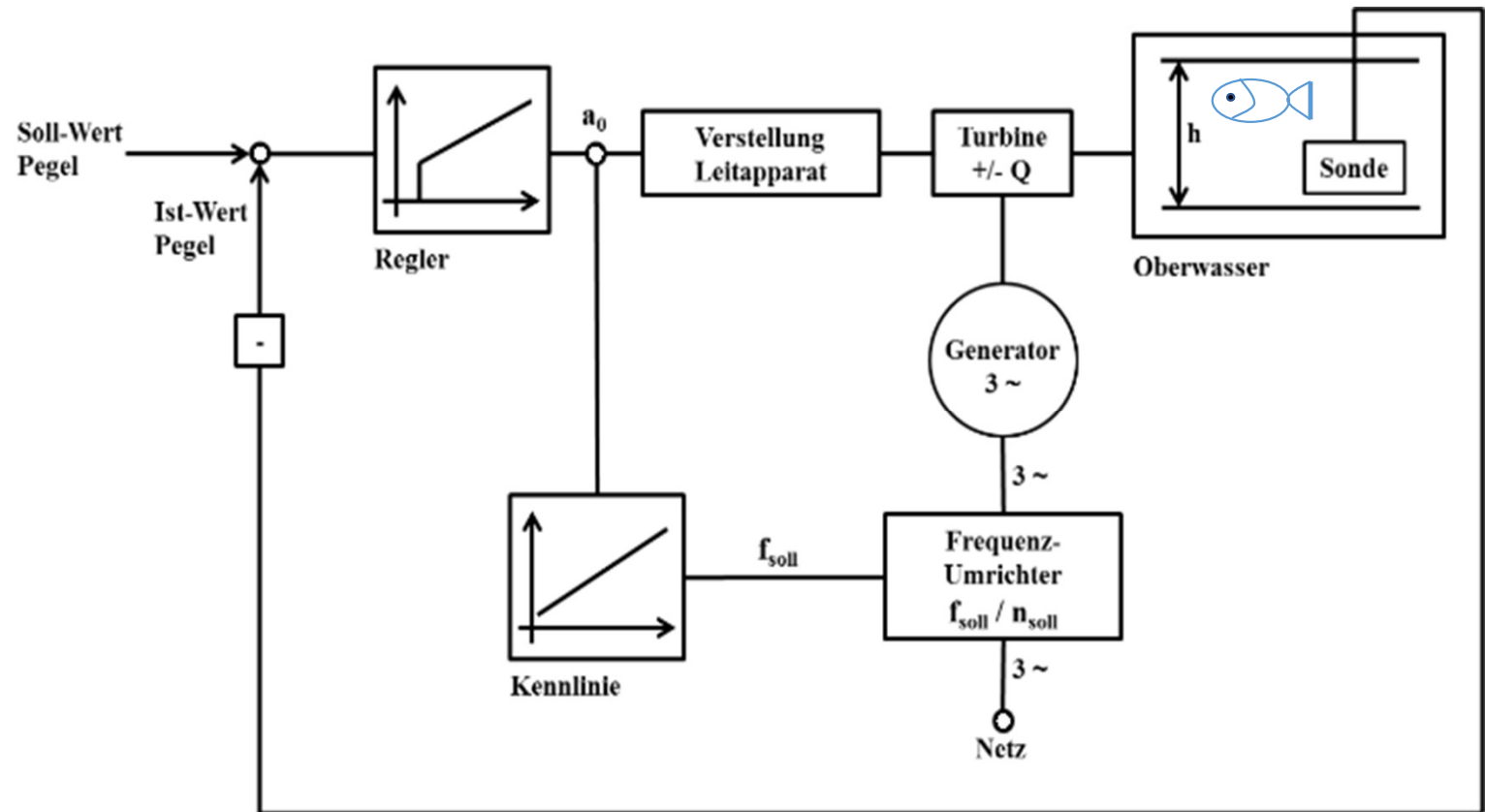


Abbildung 3: Blockschaltbild eines Wasserkraftwerks mit Francis-Turbine und variabler Drehzahl



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Realisierung II

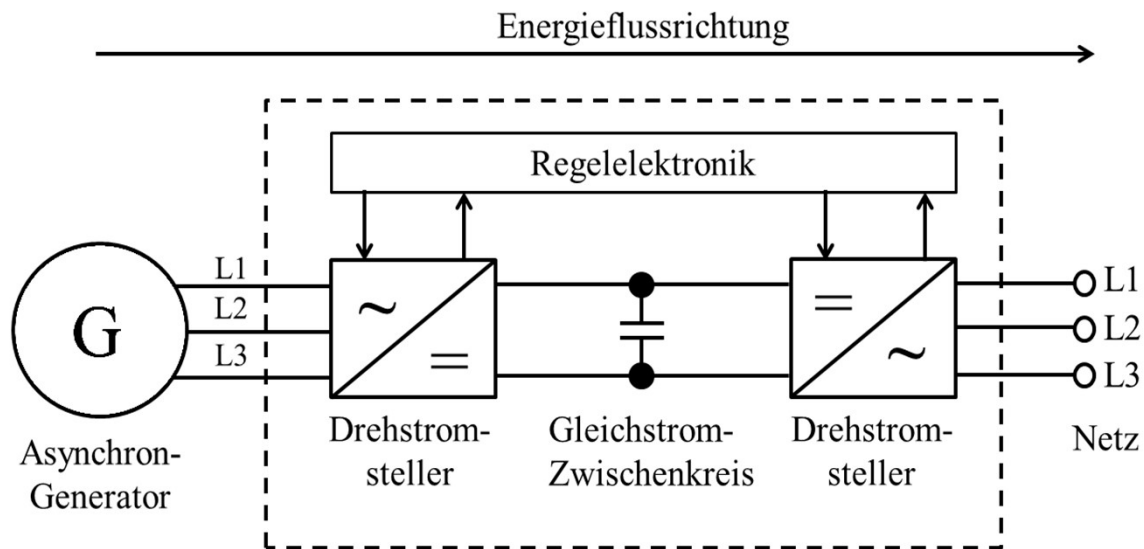


Abbildung 4: Prinzipschaltbild eines Frequenzumrichters



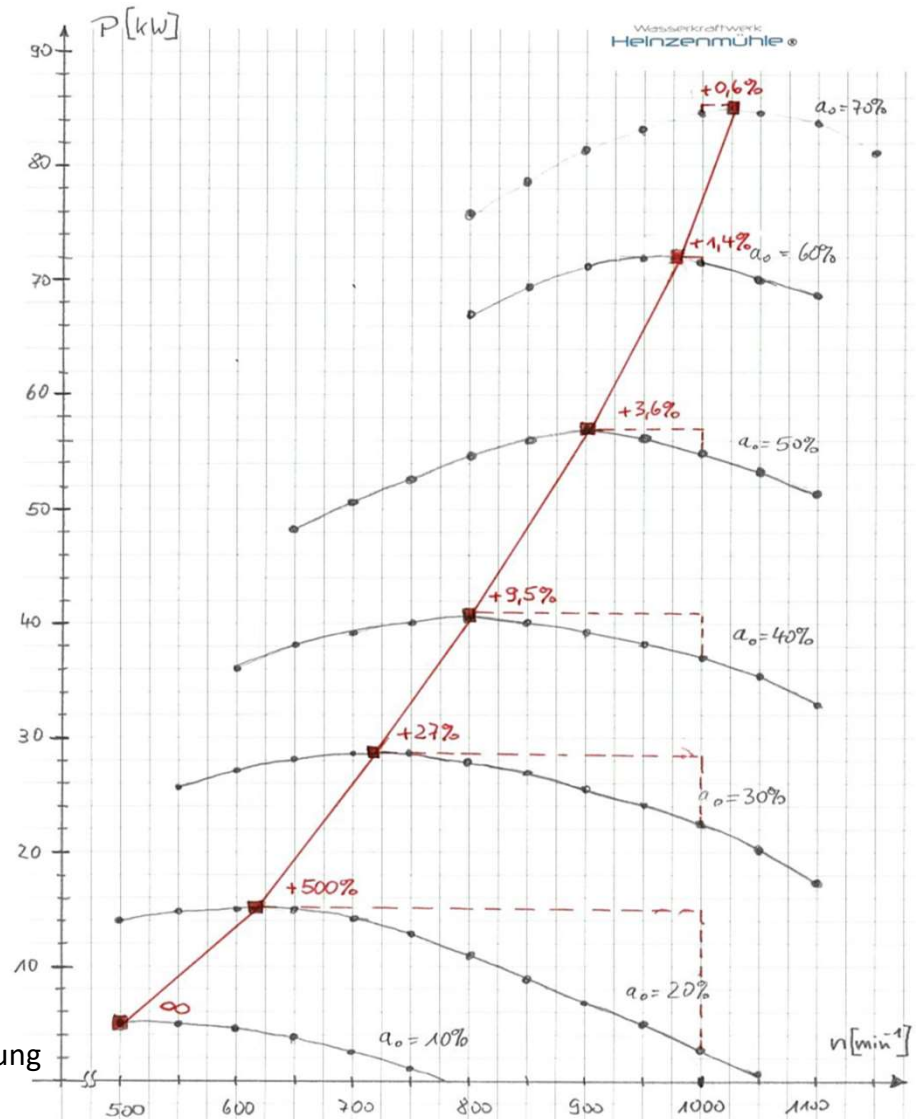
Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Messungen

P_{a0} [kW]	P_{a0}/P_N	a_0	n_{red} [min ⁻¹]	Δ_{red} [min ⁻¹]	Δ_{red}	P_+ [kW]	ΔP [kW]	ΔP
0,0	0%	10%	500	-500	-50%	5,0	5,0	∞
2,5	3%	20%	630	-370	-37%	15,0	12,5	500,0%
22,5	25%	30%	730	-270	-27%	28,5	6,0	26,7%
37,0	41%	40%	800	-200	-20%	40,5	3,5	9,5%
55,0	61%	50%	900	-100	-10%	57,0	2,0	3,6%
71,0	79%	60%	970	-30	-3%	72,0	1,0	1,4%
84,5	94%	70%	1030	30	3%	85,0	0,5	0,6%

Tabelle 1: Leistungszuwachs der Francis-Turbine des WKW Heinzenmühle durch Drehzahlveränderung

Abbildung 5: Messprotokoll der Leistungssteigerung durch Drehzahlabsenkung





Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Realisierung III

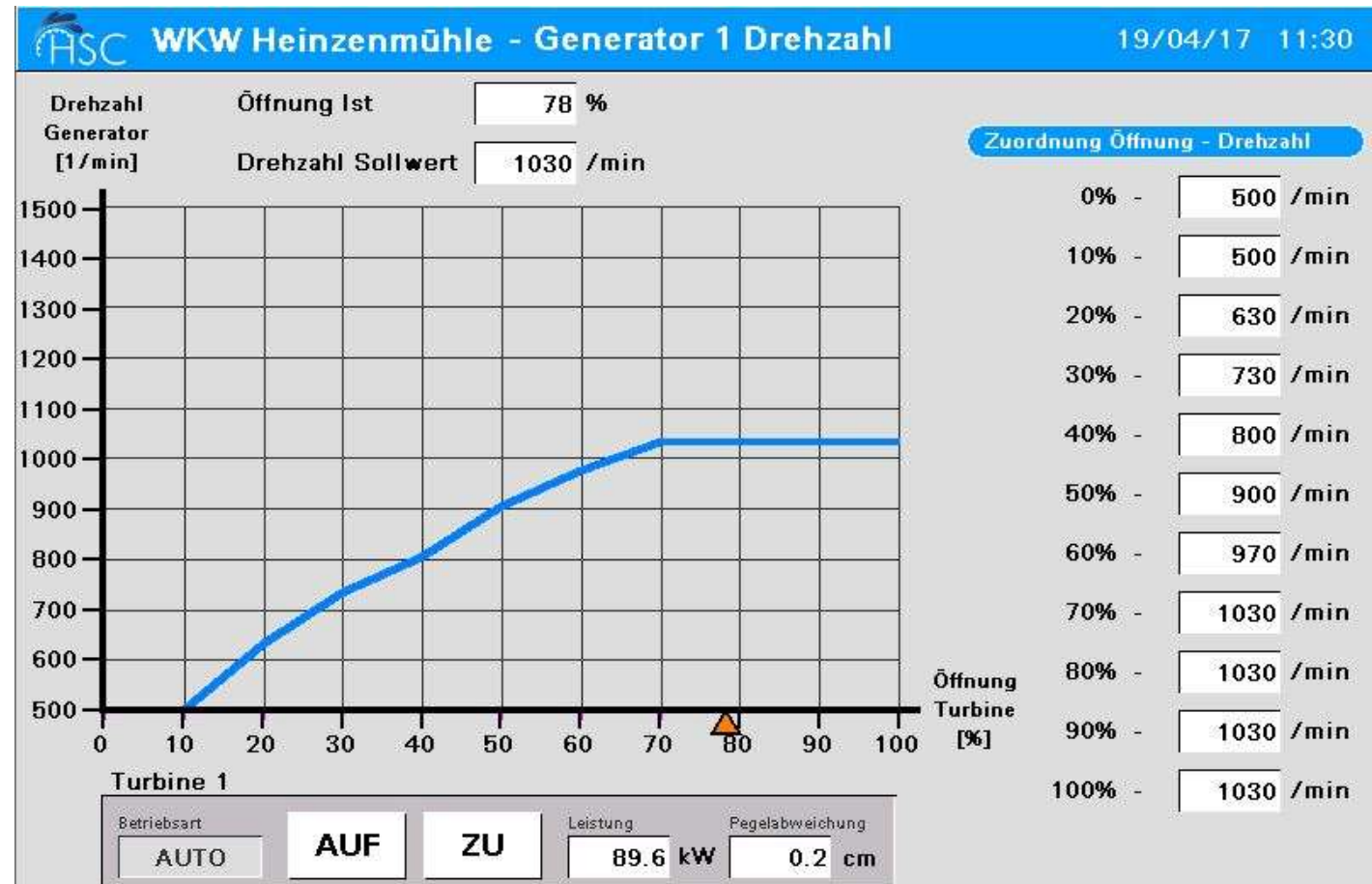


Abbildung 6: Kennlinie für die Drehzahlabsenkung im WKW Heinzenmühle



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Steigerung der Jahresarbeit

Die Ermittlung der Jahresarbeit erfolgt aufgrund der Tabelle der Unterschreitungstage (Jahresdauerlinie). Den verschiedenen Abflüssen werden die Leistungen der Turbine zugeordnet. Multipliziert mit den Zeiträumen/Tagen ergibt sich die jährliche Energieerzeugung in kWh.

Ersetzt man die Leistungen durch die höheren Werte, die durch die Drehzahlabsenkung erreicht werden (s. Tabelle 1), so erhält man den Wert für die höhere Energieerzeugung.

Für die untersuchte Anlage ergab sich eine Steigerung von +13,1%.

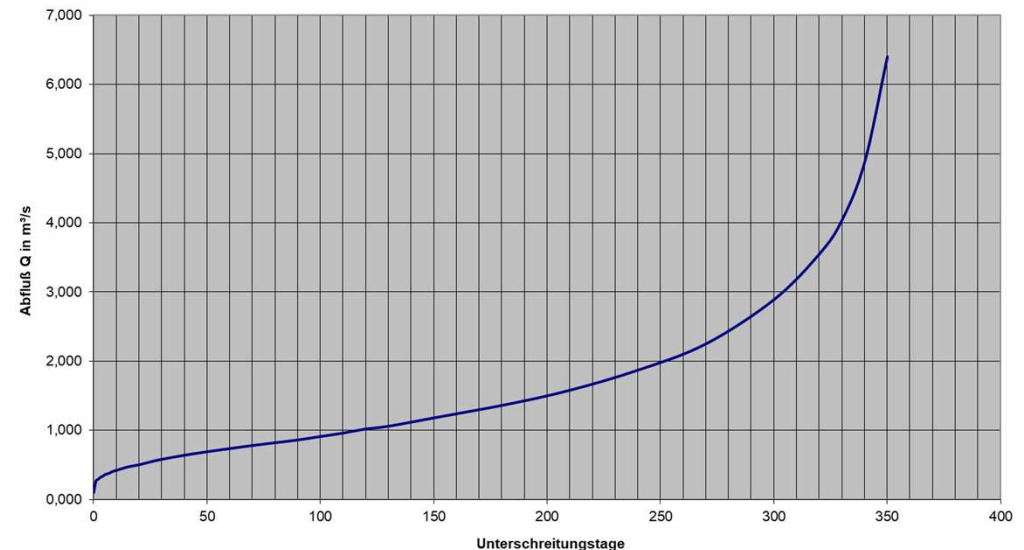


Abbildung 7: Jahresdauerlinie eines typischen Wasserkraftstandortes



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Rentabilität

Positive Effekte aus dem geringeren Zukauf von teurem Fremdstrom sind nicht berücksichtigt.

Ausbauleistung (=Umrichterleistung)	kW	22	55	110	160	300
jährliche Energieerzeugung (60 % Ausbauleistung x 365 Tage x 24 h)	kWh	115.632	289.080	578.160	840.960	1.576.800
Einspeisevergütung	ct/kWh	12,03	12,03	12,03	12,03	12,03
Anschaffungskosten						
Frequenzumrichter mit fertigem Schaltschrank	EUR	10.100	12.500	18.200	27.000	52.300
Installation, Software, Inbetriebnahme	EUR	3.900	4.100	5.200	6.300	7.800
Summe Anschaffungskosten	EUR	14.000	16.600	23.400	33.300	60.100
zusätzliche Energieerzeugung (13 % der jährlichen Energieerzeugung)	kWh	15.032	37.580	75.161	109.325	204.984
zusätzliche Erlöse	EUR	1.808	4.521	9.042	13.152	24.660
Amortisationszeit (Anschaffungskosten / zusätzliche Erlöse)	Jahre	7,74	3,67	2,59	2,53	2,44
EEG 2023: Ertüchtigung der Anlage um > 10%; erhöhte Einspeisevergütung 12,03 ct/kWh statt 7,67 ct/kWh						
Erlöse aus zusätzlicher Energieerzeugung	EUR	1.153	2.882	5.765	8.385	15.722
Erlöse aus erhöhter Einspeisevergütung (ges. Energieerzeugung x 12,03-7,67 ct/kWh)	EUR	5.697	14.242	28.485	41.432	77.686
	EUR	6.850	17.125	34.250	49.818	93.408
Amortisationszeit (Anschaffungskosten / zusätzliche Erlöse)	Jahre	2,04	0,97	0,68	0,67	0,64

Tabelle 2: Berechnung der Amortisation für Frequenzumrichter verschiedener Leistungsklassen

Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> WKW Heinzenmühle

Marktzeuln in Oberfranken

Fluss: Rodach

Flussgebiet: Oberer Main

Fallhöhe: 2,6 m

Turbine I: 90 kW; 5,6 m³/sec.

Turbine II: 45 kW; 3,1 m³/sec.

700.000 kWh/a

Investition (90 kW):	21.500 EUR
Zusätzliche jährliche Erlöse:	
zus. Energieerzeugung:	7.200 EUR
erhöhte Einspeisevergütung:	5.600 EUR
(11,67 ct/kWh → 12,46 ct/kWh)	
Amortisationszeit:	1,7 Jahre



Abbildung 8: 90 kW Generator mit Frequenzumrichter von Fa. Schneider Electric

Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> WKW Löhnberg

Löhnberg in Hessen

Fluss: Lahn

Flussgebiet: Rhein

Fallhöhe: 1,75 m

Turbine I: 120 kW; 10 m³/sec.

Turbine II: 120 kW; 10 m³/sec.

„Durch die Möglichkeit, die zweite Turbine mit Frequenzumrichter im Teillastbereich zuschalten zu können, schätze ich den Mehrertrag pro Jahr auf 20%.“

Ulrich Meierfrankenfeld (Besitzer)

Abbildung 9: 120 kVA Frequenzumrichter von Fa. Siemens inkl. Überbrückungseinrichtung





Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> WKW Altenkunstadt I

Altenkunstadt in Oberfranken

Fluss: Main

Flussgebiet: Oberer Main

Fallhöhe: 2,20 m

Turbine I: 190 kW; 16,6 m³/sec. (Kaplan-Turbine)

Turbine II: 120 kW; 7 m³/sec.; getriebeloser (direkt angetriebener) permanenterregter Synchrongenerator;
Frequenzumrichter 164 kW von Fa. Baumüller

„Der Mehrertrag durch den drehzahlvariabel betriebenen getriebelosen Synchrongenerator beträgt rund 20% jährlich.“

Peter Bergmann (Besitzer)



Abbildung 10: Außenansicht Wasserkraftwerk Altenkunstadt, Streichwehr und Turbinenhaus

Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> WKW Altenkunstadt II



Abbildung 11: Permanenterregter Synchrongenerator



Abbildung 12: Frequenzumrichter von Fa. Baumüller



Höhere Energieerzeugung mit Francis-Turbinen bei Hochwasser

> Kennlinienermittlung

Ermittlung des maximalen Effekts durch Variation der Drehzahl bei verschiedenen Hochwassersituationen

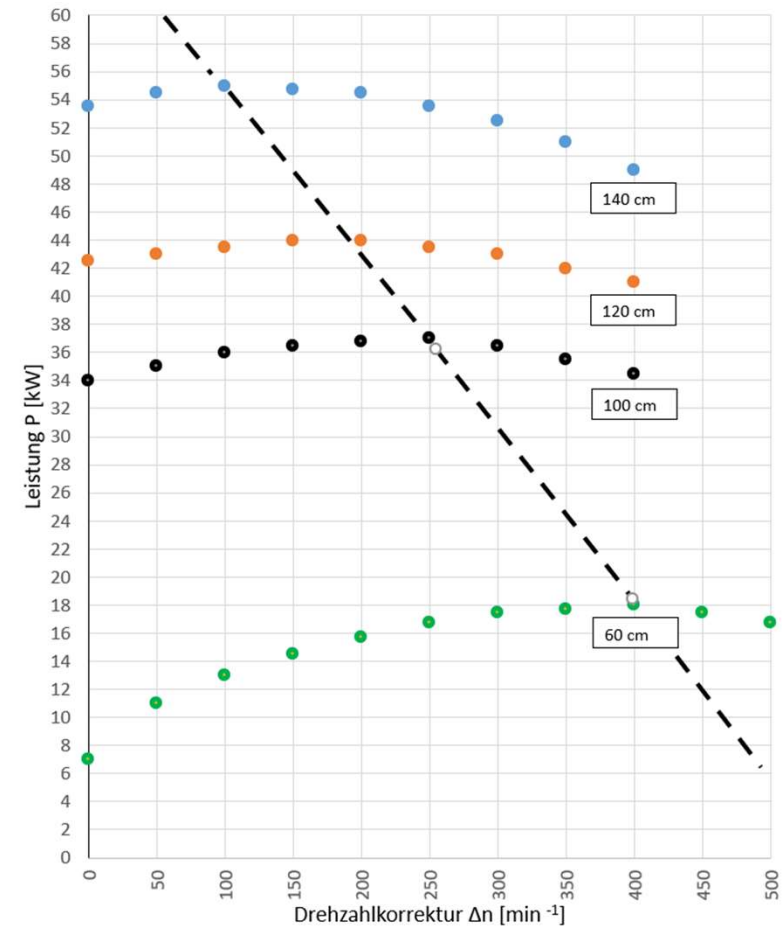


Abbildung 13: Kennlinien



Höhere Energieerzeugung mit Francis-Turbinen bei Hochwasser

> 2. Kennlinie

Zur Kennlinie für die unterschiedlichen Zuflussmengen (Öffnungswinkel) wird eine zweite Kennlinie in der Steuerung abgelegt

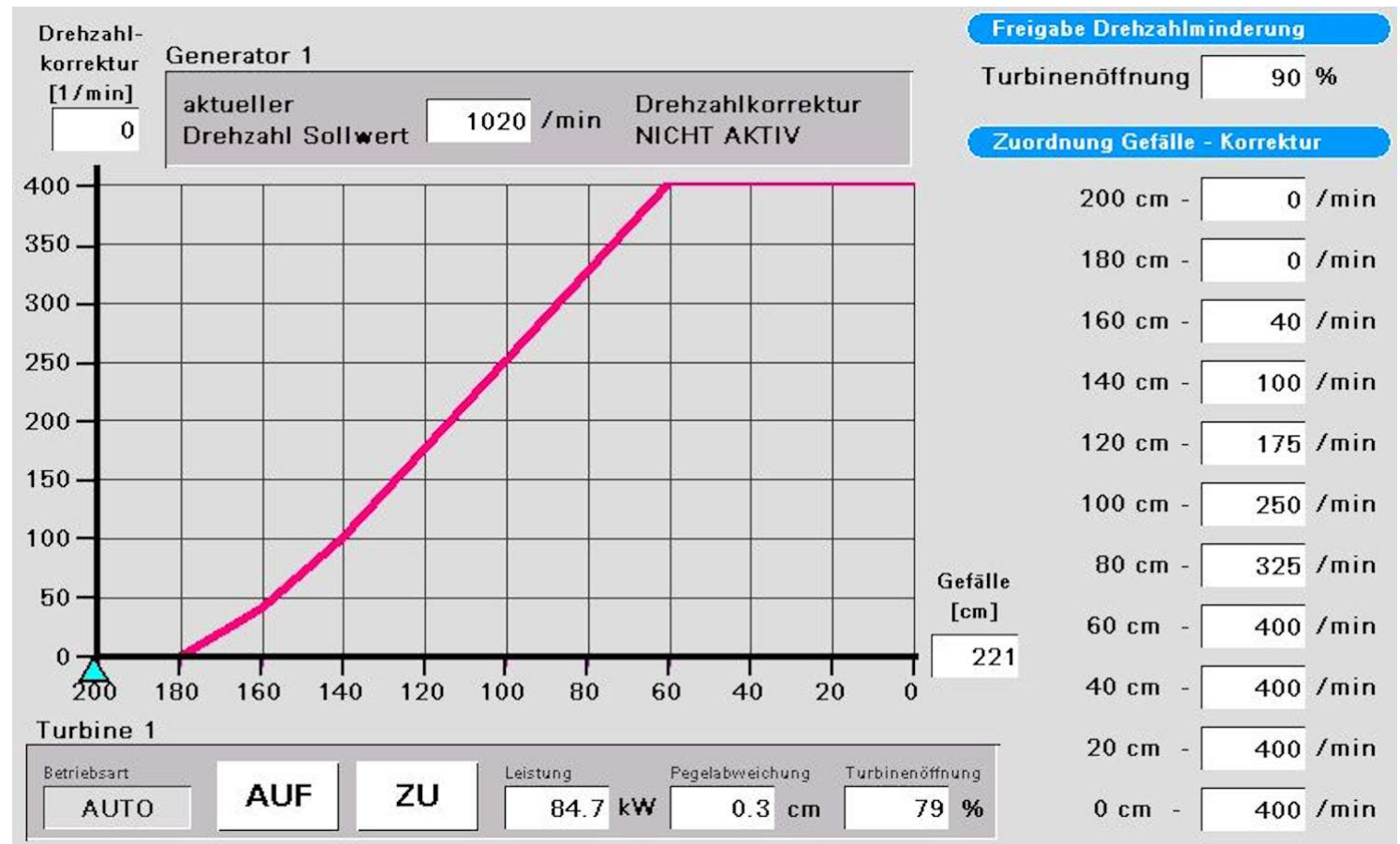


Abbildung 14: Kennlinie Drehzahlkorrektur bei Hochwasser



Höhere Energieerzeugung mit Francis-Turbinen bei Hochwasser

> Realisierung

Der Zusatzaufwand ist gering.
Neben der 2. Kennlinie muss nur
noch der Unterwasserpegel
gemessen werden; hier mit einer
Radarmesssonde realisiert.



Abbildung 15: Radarmesssonde



Höhere Energieerzeugung mit doppelt geregelter Francis-Turbine

> Zusammenfassung und Ausblick

- Der Einsatz eines Frequenzumrichters führt bei Francis-Turbinen durch Anpassung der Drehzahl an unterschiedliche Wassermengen zu einer deutlichen Erhöhung der Jahresarbeit. Eine Steigerung um mindestens 10 % kann als gesichert angenommen werden; 20 % sind erreichbar.
- Addiert man die Steigerung der Energieerzeugung aus der Drehzahlabsenkung in Hochwassersituationen hinzu, die mit 3 – 5 % angenommen wird, erhöhen sich die oben genannten Werte bzw. können als gesicherter gelten. Der Zusatzaufwand ist gering: Benötigt werden lediglich eine zusätzliche Kennlinie und eine Messsonde für die Messung des Unterwasserpegels.
- Die Anschaffung eines Frequenzumrichters ist sowohl bei Neu- als auch bei Bestandsanlagen zumindest bei größeren Leistungen wirtschaftlich. Wenn eine erhöhte Einspeisevergütung erreicht werden kann, gilt dies auch bei kleinen Anlagen.
- Der Einsatz eines Frequenzumrichters ist auch angesichts der Folgen des Klimawandels mit längeren Trockenperioden und vermehrten Starkregenereignissen unter den beschriebenen Rahmenbedingungen eine sinnvolle Maßnahme, denn er stellt die maximal mögliche Energieerzeugung sicher.
Und er leistet einen Beitrag zur Energiewende, denn „**Jede Kilowattstunde zählt**“.



®

Wasserkraftwerk
Heizenmühle

Dr.-Ing. Peter Zimmermann
Schützenstr. 21
D-96275 Marktzeuln

Mobil: +49 173 523 7297
Mail: zim44668@arcor.de