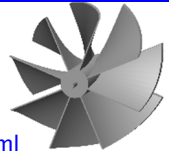

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH

Im Weingarten 1
CH-5620 Bremgarten
Switzerland

Phone: +41 (0)56 535 00 21
E-Mail: max@energie-blatter.ch

www.energie-blatter.ch/generbine.html



Projekt "Generbine"

Unterwasserturbine, bei der ein und dasselbe Bauteil den permanentmagnetischen Rotor eines Generators und das hydraulisch aktive Laufrad einer Turbine bildet

Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH
erstellt 2009-11-13
vollständig überarbeitet 2013-01-04
letzte Änderung 2018-05-21

Inhalt

1.	Allgemeines Konzept	3
1.1	Grundsätzliches Design	3
1.2	Elektrische Schaltung	4
1.3	Hydraulisches Verhalten	5
1.4	Vervollständigung zur Gesamtanlage	5
1.4.1	Ein- und Ausströmung	5
1.4.2	Aneinanderreihen und elektrisches Zusammenschalten von Generbinen	7
2.	Dimensionierung eines ersten Prototyps	8
2.1	Bestimmungsgrößen der Generbine und deren Zusammenhänge	8
2.2	Form und Dimensionierung der Laufradschaufeln	9
2.3	Kalkulationsblatt	11
2.4	Aufmagnetisierung des Rotors	12
3.	Von den Versuchsläufen zu beantwortende Fragen	14
3.1	Bestätigung der Theorie, „Go/No-go“-Entscheidung	14
3.2	Werkstoff und Formgebung der Laufradschaufeln	14
3.2.1	Beständigkeit des Laufradschaufel-Werkstoffs	14
3.2.2	Form der Laufradschaufeln	14
3.3	Weitere Optimierung	15
3.3.1	Optimierung des Betriebsverhaltens	15
3.3.2	Minimierung des Produktionsaufwandes	15
4.	Referenzpublikationen	16

Zusammenfassung

Es wird eine Unterwasserturbine vorgeschlagen, deren Laufrad aus hartmagnetischen Material gefertigt ist und die Funktion des Rotors eines permanent-erregten Generators übernimmt. Diese Dokumentation zeigt den konzeptionellen Entwurf eines Prototyps. Sie analysiert dessen hydraulisches, elektrodynamisches und elektrisches Verhalten auf einer theoretischen Basis. Ebenso wird ein Ausblick auf die detaillierte Analyse und weitere Entwicklungsschritte gegeben.

Patentanmeldung

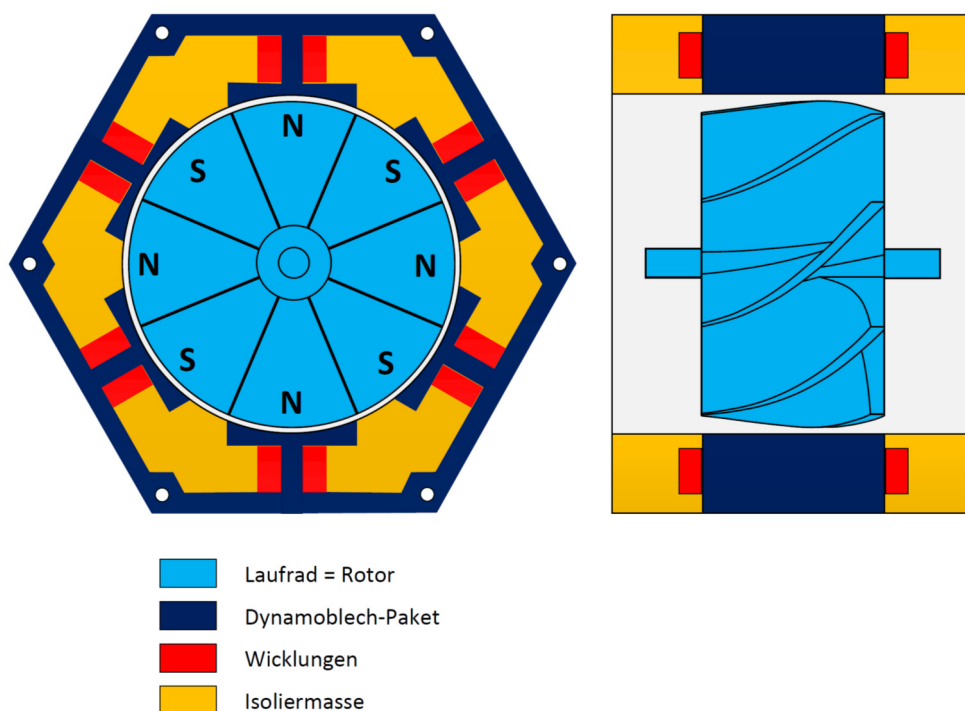
Das Grundprinzip, die Laufradschaufeln und die permanent-magnetischen Rotorpole in einem Bauteil zu vereinigen, war Gegenstand einer Europäischen Patentanmeldung [1]. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass eine solche Kombination in anderer Form schon früher vorgeschlagen wurde [2]. Die Patentanmeldung für die Generbine wurde deshalb gestoppt, aber natürlich ist nun gewährleistet, dass die Entwicklung der Generbine nicht durch künftige Patente behindert werden kann.

1. Allgemeines Konzept

1.1 Grundsätzliches Design

Die Grundidee der Generbine besteht darin, dass ein und dasselbe Bauelement sowohl als Laufrad einer Turbine wie auch als Rotor eines Generators verwendet wird. Konkret ausgedrückt, führte diese Idee auf der hydraulischen Seite zu einer Propellerturbine, deren Schaufeln feststehend sind, die aber mit variabler Drehzahl betrieben wird. Auf der elektrischen Seite bildet die Generbine vom Prinzip her einen permanent-erregten Synchrongenerator. Allerdings variiert, wie wir in Abschnitt 1.2 detaillierter sehen werden, die Ausgangsfrequenz mit der Drehzahl und so wurde es vorgezogen, die produzierte Elektrizität gleichzurichten und sie als Gleichspannung zu verwenden.

Figur 1 zeigt die grundsätzliche Konstruktion in zwei Schnittbildern von vorne und von der Seite.



Figur 1: Konstruktionsprinzip des Stators und des Rotors

Der Stator der Generbine besteht, wie im Generatorbau üblich, aus einem Paket gestanzter weichmagnetischer Dynamobleche, die gegeneinander isoliert sind, um Wirbelstromverluste auf ein Minimum zu beschränken. Die Wicklungen sind über die Polschenkel des Stators geschoben.

Der Rotor ist aus hartmagnetischem Material gefertigt, was grundsätzlich durch Gießen, Sintern oder Spritzgießen erfolgen kann (letzteres im Falle kunststoffgebundener Materialien). Die einzelnen Segmente dienen einerseits als Turbinenschaufeln, wozu ihre Form optimiert wird, beispielsweise in Anlehnung an die feststehenden Schaufeln üblicher Propellerturbinen. Auf der andern Seite bilden sie die magnetischen Pole, was bedeutet, dass ihre Anzahl gerade sein muss und sie ebenso an die Anforderungen eines optimalen magnetischen Kreises angepasst werden müssen.

Es wurden Überlegungen angestellt betreffend den Werkstoff der Rotorsegmente wie auch die Anzahl der Schaufeln und der Stator-Pole. Der erforderliche Kompromiss zwischen hydraulischen und elektrischen Eigenschaften führte zum Vorschlag, $z_{Rot} = 8$ Rotorschauflern aus einer (Fe-)Al-

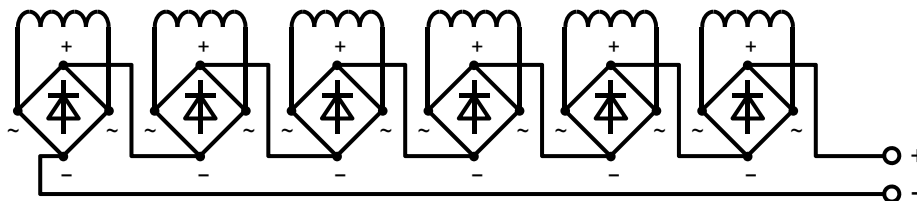
Ni-Co-Gusslegierung zu verwenden. Möglicherweise wird es notwendig sein, diese mit einem geeigneten Material zu beschichten, um eine genügende Korrosionsbeständigkeit zu erreichen.

- Die vorgeschlagene Anzahl von $Z_{Stat} = 6$ Statorpolen unterscheidet sich von der Anzahl Laufradschaufeln, da sich herausgestellt hat, dass dies die Qualität der produzierten Elektrizität verbessert (mehr Details siehe Abschnitt 1.2).

1.2 Elektrische Schaltung

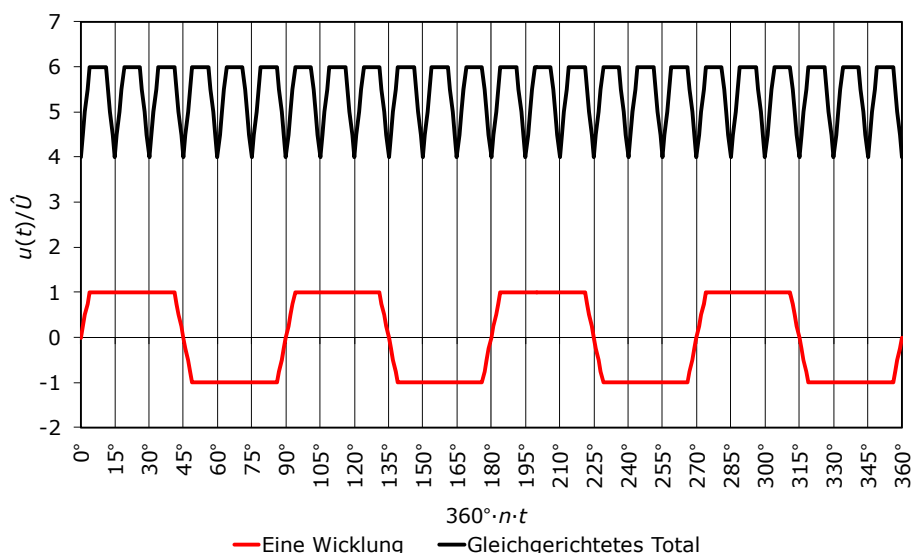
Gemäß der Theorie der Synchrongeneratoren erzeugt jede der Statorwicklungen eine Wechselspannung. Deren Amplitude wie auch deren Frequenz steigen proportional zur Drehzahl des Rotors.

Wie bereits erwähnt, wird der Ausgang vorzugsweise gleichgerichtet. Dies wird durch je einen Brückengleichrichter pro Wicklung durchgeführt. Die Gleichrichterausgänge werden elektrisch in Reihe geschaltet, wie in Figur 2 gezeigt.



Figur 2: Elektrische Schaltung der Statorwicklungen

Figur 3 zeigt zunächst rot den zeitlichen Verlauf der in Wicklung 1 induzierten Spannung. Sie weist die Form trapezförmiger Pulse auf. Die Spannungen der anderen Wicklungen werden nicht gezeigt; sie wären um einen Phasenwinkel von $(k-1) \cdot 360^\circ / Z_{Stat}$ gegenüber Wicklung 1 verschoben (wobei k die Nummer der jeweiligen Wicklung ist).



Figur 3: Zeitlicher Verlauf der induzierten Spannung

Hinter den seriegelassenen Gleichrichtern resultiert die schwarz gezeigte Gleichspannung. Sie enthält eine Komponente, die mit einer Frequenz pulsiert, die der mit dem kleinsten gemeinschaftlichen Vielfachen von Z_{Rot} und Z_{Stat} multiplizierten Drehzahl entspricht. Somit erhöht eine unterschiedliche Anzahl von Rotorschaukeln und Statorpolen die Frequenz des Rippels, wodurch

es leichter wird, diesen durch Filter am Ausgang der Generbine zu reduzieren. Zudem kann eine geschickte Formgebung der Statorpole den Rippel selbst sogar beinahe auf Null reduzieren.

1.3 *Hydraulisches Verhalten*

Wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, ist die Generbine eigentlich eine Propellerturbine, die aber mit variabler Drehzahl läuft. Vereinfacht ausgedrückt, bestimmt der Volumenstrom des Wassers die Drehzahl. Wenn elektrische Leistung gezogen wird, wird das Laufrad unter die Leerlaufdrehzahl abgebremst; die Generbine wirkt dem Volumenstrom entgegen, indem sie eine Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslauf aufbaut. Diese Druckdifferenz kann wie üblich durch ein Stauwehr aufgebracht werden, das die nötige Fallhöhe schafft, oder aber einfach durch den Staudruck des frei fließenden Wassers, wie man es von Windturbinen kennt.

Jeder der bekannten Turbinentypen wird durch einen oder zwei einstellbare Parameter an veränderlichen Wasserdurchfluss angepasst: die Pelton turbine durch den Durchsatz der Nadeln; die Francis-, Propeller- und Kaplan turbine durch den Anstellwinkel der Leitschaufeln. Die Kaplan turbine weist zusätzlich verstellbare Laufradschaufeln auf, um die Stoßverluste zu vermeiden, die bei Teillastbetrieb der Francis- und Propellerturbinen auftreten.

Und die Generbine? Sie wird durch die veränderliche Drehzahl an den Teillastbetrieb angepasst. Wie erwähnt, sind ihre Laufradschaufeln nicht verstellbar; Abschnitt 1.4.1 wird zudem zeigen, dass zwar die Verwendung von Leitblechen empfohlen wird, aber ebenfalls in nicht verstellbarer Ausführung. Indessen zeigt die Theorie, dass Schockverluste bestens vermieden werden können, indem einzig die Drehzahl an den Wasserdurchfluss angepasst wird. Demnach sollte die Generbine theoretisch ein ähnlich gutes Teillastverhalten zeigen wie eine voll regelbare Kaplan turbine. (Natürlich wird der hydraulische Wirkungsgrad insgesamt schlechter sein, weil die Form der Laufradschaufeln den zum Teil widersprüchlichen hydraulischen und elektrodynamischen Anforderungen genügen muss. Das ist der Preis, der für die Doppelfunktion der Schaufeln zu zahlen ist.)

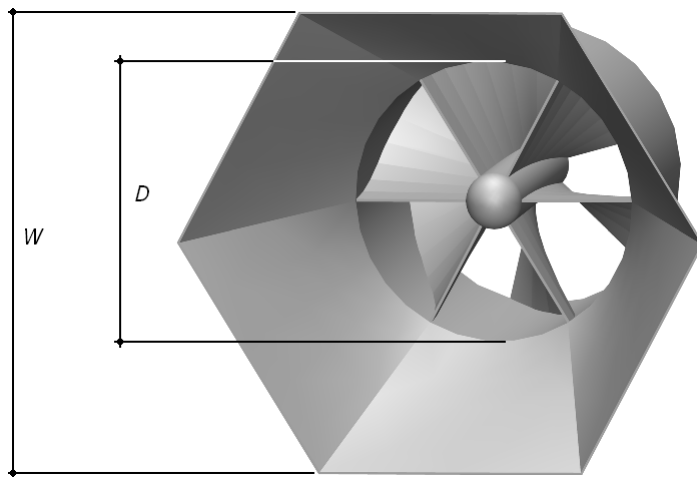
Aber wie wird die korrekte Anpassung der Drehzahl an einen variablen Wasserdurchfluss sichergestellt? Es wird vorgeschlagen, dazu einen Maximum-Power-Point-Tracker zu verwenden, ähnlich dem einer Fotovoltaik-Anlage: Die elektrische Last der Generbine (und somit ihr hydraulischer Widerstand) wird so angepasst, dass man die maximale elektrische Leistung erhält.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass die Generbine niemals auf einen bestimmten Volumenstrom oder einen bestimmten Oberwasserpegel geregelt werden soll. Dies kann mit Kaplan turbinen getan werden, weil ihre Leitschaufeln recht weit geschlossen werden können und die Turbine immer noch mit akzeptablem Wirkungsgrad arbeitet. Eine Generbine könnte jedoch auf Null abgebremst werden (was auch die Leistungsproduktion auf Null reduzieren würde) und ließe immer noch einen beträchtlichen Anteil des nominalen Volumenstroms passieren. – Die Generbine ist kein Regulierventil, sondern eine Anlage, die Energie erzeugt, und als solche muss sie auf maximale Leistung reguliert werden!

1.4 *Vervollständigung zur Gesamtanlage*

1.4.1 *Ein- und Ausströmung*

Zur Verbesserung des hydraulischen Wirkungsgrades wird eine mit Leitblechen versehene Einlaufdüse verwendet. Die konische Verengung erhöht die Fließgeschwindigkeit vom Einlauf bis zur Generbine um den Faktor r (siehe Figur 4).

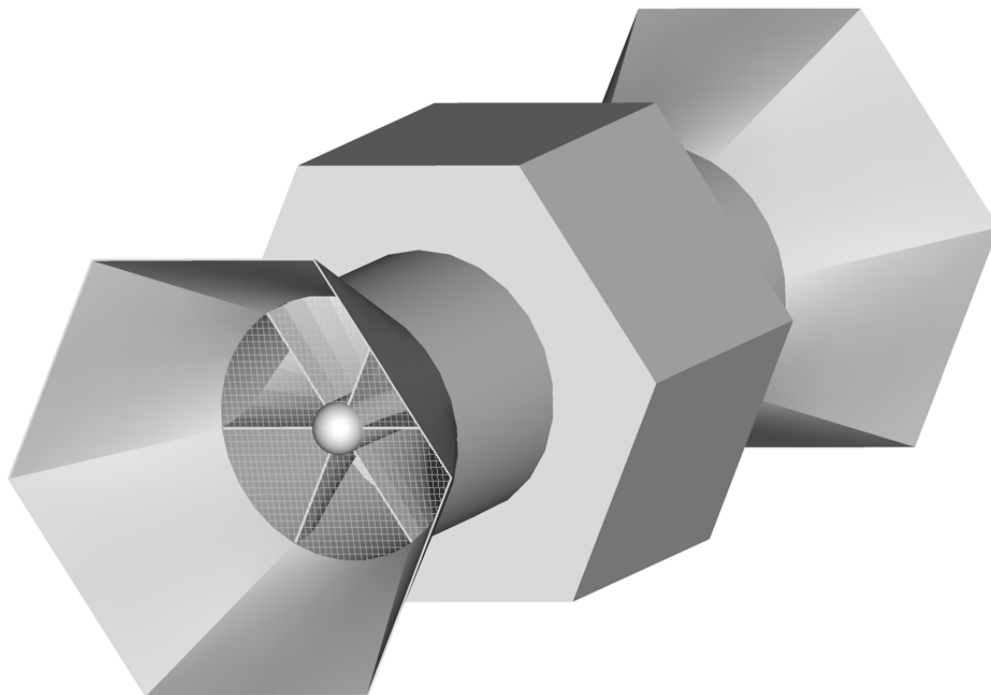


$$r = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot W^2}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot \left(\frac{W}{D}\right)^2$$

Figur 4: Form der Einlaufdüse inklusive festen Leitblechen

Ein entsprechender Diffusor, aber ohne Leitbleche, wird auf der Auslaufseite verwendet. Die Größe des äußeren Sechsecks entspricht mindestens der Größe der Generbine selbst, kann aber auch größer gewählt werden. Indem man einen großen Wert des Faktors r wählt, also eine große Verhältniszahl W/D , können Einlaufdüse und Auslaufdiffusor die Generbine an langsam fließende Gewässer anpassen. Dies ist vor allem in frei strömendem Wasser wichtig, um genügend Volumenstrom zu sammeln und so die Generbine in ihrem optimalen Arbeitsbereich zu betreiben.

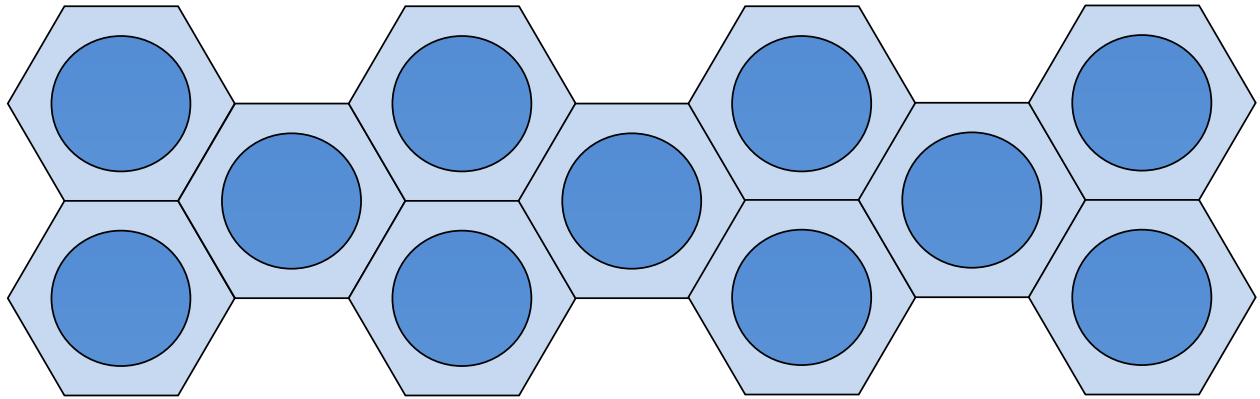
Zumindest auf der Einlaufseite sollte ein Gitter vorgesehen werden, das einerseits die Generbine vor Beschädigungen durch Schwemmgut schützt, andererseits Tiere, vor allem Fische, vom Hineinschwimmen abhält. Dies wird auch für die Auslaufseite empfohlen. – Figur 5 zeigt die komplett zusammengestellte Einheit.



Figur 5 Komplett Einheit, bestehend aus der Einlaufdüse mit Gitter und Leitblechen, der Generbine selbst und dem Auslass-Diffusor

1.4.2 Aneinanderreihen und elektrisches Zusammenschalten von Generbinen

Gemäß Konzept werden größere Wasserkraftanlagen modular aufgebaut, indem mehrere Generbinen aneinandergereiht werden, wie in Figur 6 gezeigt. Infolge der sechseckigen Form ist dies lückenlos möglich.

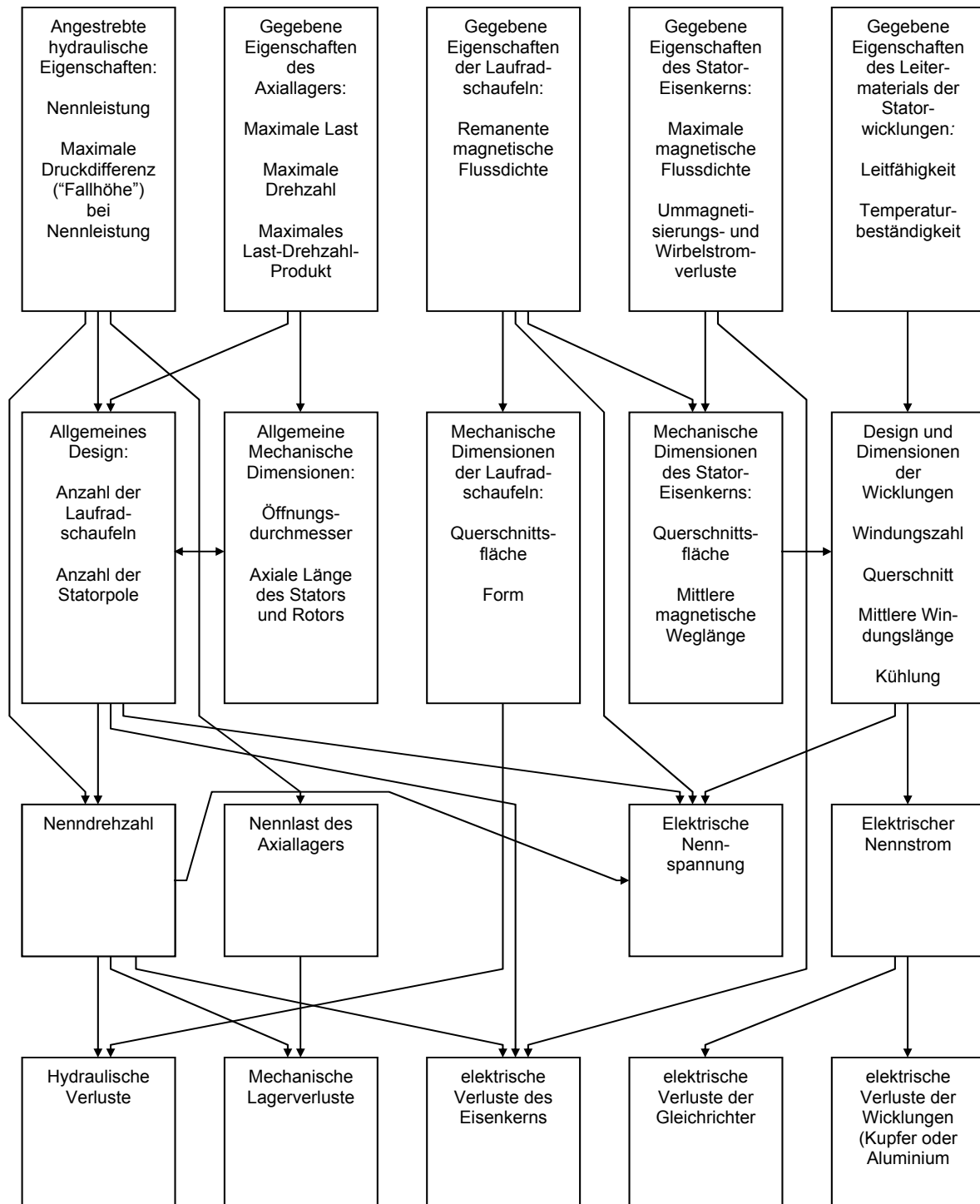


Figur 6: Aneinanderreihen von Generbinen

Was die elektrische Schaltung betrifft, ist die beste Lösung, für jede Generbine oder Gruppe von Generbinen einen Gleichspannungssteller zu verwenden, der als Maximum-Power-Point-Tracker dient wie in Abschnitt 1.3 erwähnt. Der Ausgang wird auf einen Gleichspannungs-Bus gespeist, von wo die Umwandlung in Netz-Wechselspannung erfolgen kann. Ein entsprechendes Konzept wird in [3] vorgeschlagen.

2. Dimensionierung eines ersten Prototyps

2.1 Bestimmungsgrößen der Generbine und deren Zusammenhänge



Figur 7: Vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zwischen Ziel- oder gegebenen Größen (oberste Reihe), Bestimmungsgrößen für Design oder Dimensionierung (mittlere Reihen) und resultierendem Betriebsverhalten (unterste Reihe)

Figur 7 gibt eine erste allgemeine Idee der komplexen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Parametern der Generbine.

Für das Design und die Dimensionierung sind etliche iterative Berechnungsläufe durchgeführt worden, um den vorgeschlagenen Prototyp so weit zu optimieren, wie es auf rein theoretischer Basis möglich schien.

Die folgenden Designpunkte wurden in einem frühen Stadium der Evaluation festgelegt:

- ◆ Der Prototyp wird einen Öffnungsdurchmesser von 0.5 m haben. Dies wird vermutlich auch in einer Serienproduktion die einzige Größe der Generbine sein, obschon das Konzept grundsätzlich auf andere Größen skalierbar wäre. (Tatsächlich hat sich die Evaluation lange auf einen Öffnungsdurchmesser von 1 m konzentriert. Allerdings stellte sich heraus, dass eine Größe von 0.5 m zwar einen tieferen elektrischen Wirkungsgrad, dafür aber ein besseres Verhältnis Masse-zu-Leistung aufwies, was vermutlich auch zu einem besseren Kosten-Nutzen-Verhältnis führt.)
- ◆ Als Werkstoff für die Laufradschaufeln wird eine Al-Ni-Co-Gusslegierung vorgeschlagen, wie schon in Abschnitt 1.1 erwähnt. Sie weist eine remanente magnetische Flussdichte von über 1 Tesla auf und ist gleichzeitig weit korrosionsbeständiger als Magnetwerkstoffe aus Seltenen Erden. Das Gussverfahren erlaubt es, den Schaufeln die verwundene Form zu geben, die für ihre hydraulische Funktion notwendig ist.
- ◆ Eine Anzahl von $Z_{Rot} = 8$ Laufradschaufeln und $Z_{Stat} = 6$ Statorpolen hat sich als einfache und folgerichtige Bauart des magnetischen Kreises herausgestellt. Zwar würde eine für den Arbeitsbereich der Generbine (siehe Abschnitt 2.2) optimierte Turbine vermutlich mit weniger Schaufeln gebaut. Dennoch wurde an der gewählten Schaufel- und Polzahl als einem guten Kompromiss zwischen hydraulischen und elektrodynamischen Anforderungen festgehalten.
- ◆ Die Konstruktion des Statorkerns wurde ebenfalls von Anfang an festgelegt; wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, wird handelsübliches Dynamoblech verwendet.

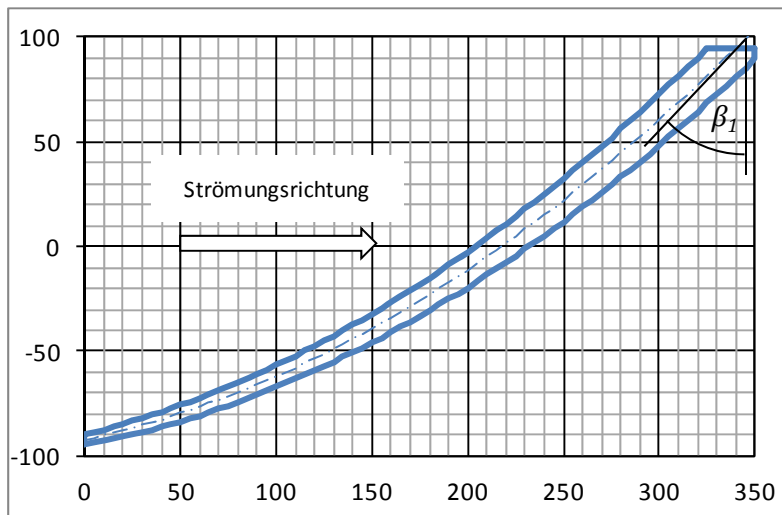
2.2 Form und Dimensionierung der Laufradschaufeln

Nachdem die oben genannten Parameter festgelegt sind, muss noch die Dimensionierung und die Formgebung der einzelnen Laufradschaufel bestimmt werden.

Um einen genügend großen magnetischen Fluss im Luftspalt zwischen Rotor und Stator zu erhalten, der wiederum die verfügbare elektrische Leistung bestimmt, muss ein bestimmter Mindest-Querschnitt eingehalten werden. Das bedingt eine Mindestdicke, die dazu noch (in axialer Richtung gemessen) über die Schaufelbreite hinweg konstant sein soll, um eine regelmäßige Verteilung des Flusses zu erreichen. Wenn jedoch die Schaufel zu dick gemacht wird, vermindert dies den hydraulischen Wirkungsgrad.

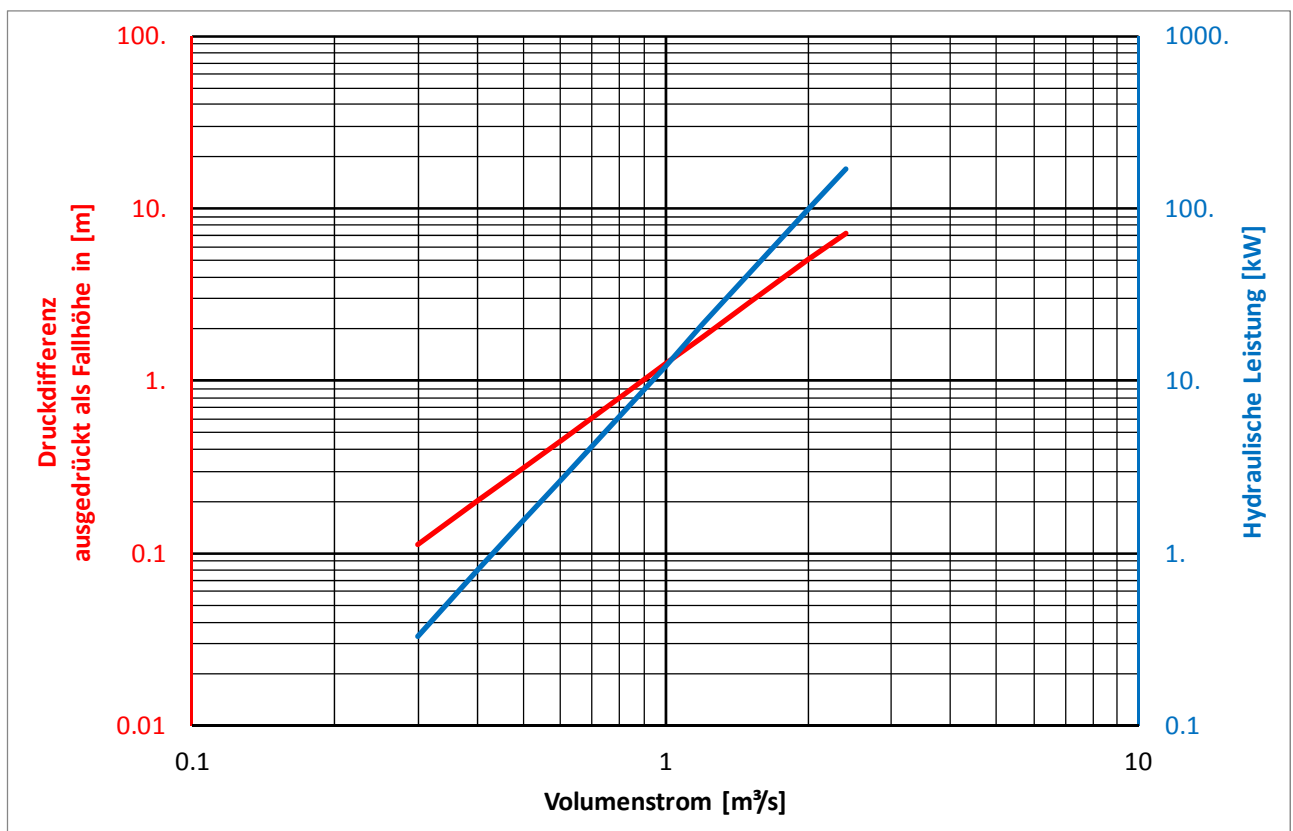
Die axiale Länge und die Gesamtform der Schaufel kann den hydraulischen Anforderungen entsprechend bestimmt werden. Während der Berechnungsgänge tauchte jedoch ein weiterer Aspekt auf: Es zeigte sich die Möglichkeit, für die Lagerung des Laufrades wartungsfreie Kunststoff-Gleitlager zu verwenden; allerdings nur, wenn die resultierende Axiallast und vor allem das Last-Drehzahl-Produkt nicht zu hoch war. Es mussten also zusätzlich gewisse Anforderungen betreffend Druckdifferenz und Drehzahl bei Volllast erfüllt werden.

Dies führte (bei 0.5 m Öffnungsdurchmesser) zu Laufradschaufeln mit einer axialen Länge von $L = 350$ mm, einem Querschnitt von ungefähr $A_{Rot} \approx 5000$ mm² und einer parabolischen Formgebung, die am Umfang einen ungefähren Austritts-Schaufelwinkel von $\beta_1 = 47^\circ$ vorsieht (siehe Figur 8, links).



Figur 8: Formgebung der Laufradschaufeln
(Links: Schaufelform am Umfang; rechts: 3D-Ansicht des Laufrades)

Die nächste Figur zeigt das theoretische Volumenstrom-Druckdifferenz- und Volumenstrom-Leistungs-Diagramm, das für das so dimensionierte und geformte Laufrad resultiert.



Figur 9: Theoretische Betriebskennlinie der Generbine im Volumenstrom-Druckdifferenz- und Volumenstrom-Leistungs-Diagramm

Wie aus Figur 9 ersichtlich, wird der Prototyp der Generbine einen Volumenstrom-Bereich von etwa 0,3 bis 2,4 m³/s abdecken. Die dazugehörige Fallhöhe in diesem Bereich beträgt nur 11 cm bis 7,2 m; die maximale hydraulische Leistung wird theoretisch ungefähr 170 kW betragen.

2.3 Kalkulationsblatt

Generbine												
Dimensionierung												
Größe	Symbol	Einheit	Betriebspunkt									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Öffnungsdurchmesser	D	m	0.50									
Nabendurchmesser	$D_{(i)}$	m	0.10									
Axiale Länge von Stator und Rotor	L	m	0.35									
Laufschaukelwinkel an der Abströmkante	β_1	°	47.5									
Leitschaukelwinkel an der Abströmkante	β_5	°	-47.5									
Volumenstrom	Q	m^3s^{-1}	2.40	2.00	1.50	1.20	1.00	0.80	0.60	0.50	0.40	0.30
Strömungsquerschnitt	A	m^2	0.1885									
Axiale Strömungsgeschwindigkeit	c_m	ms^{-1}	12.7	10.6	8.0	6.4	5.3	4.2	3.2	2.7	2.1	1.6
Betriebsdrehzahl bei drallfreier Abströmung	n	s^{-1}	7.4	6.2	4.6	3.7	3.1	2.5	1.9	1.5	1.2	0.9
Durchgangsdrehzahl	n_{max}	s^{-1}	14.9	12.4	9.3	7.4	6.2	5.0	3.7	3.1	2.5	1.9
Dichte Wasser	ρ_{H2O}	kgm^{-3}	1000									
Theoretische hydraulische Leistung	P_{th}	kW	170.2	98.5	41.5	21.3	12.3	6.3	2.7	1.5	0.8	0.3
Theoretische Druckdifferenz	Δp_{th}	kPa	70.9	49.2	27.7	17.7	12.3	7.9	4.4	3.1	2.0	1.1
Zu erwartender Achsschub im Betrieb	F_{ax}	kN	13.4	9.3	5.2	3.3	2.3	1.5	0.8	0.6	0.4	0.2
Lagerreibungsverluste (spez. Worksheet)	$P_{D,Bearing}$	kW	15.7	9.1	3.8	2.0	1.1	0.6	0.2	0.1	0.1	0.0
Mechanischer Wirkungsgrad	η_{Mech}	1	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Schaufelzahl (Rotor)	Z_{Rot}	1	8									
Querschnitt Rotor = Querschnitt Luftspalt	A_{Rot}	m^2	0.0050									
Magnetische Weglänge im Rotor	ℓ_{Rot}	m	0.250									
Wirksames Volumen des Rotors	V_{Rot}	m^3	0.0100									
Dichte Rotor-Magnetmaterial	ρ_{Rot}	kgm^{-3}	7200									
Wirksame Masse des Rotor-Materials	m_{Rot}	kg	72									
Flussdichte Luftspalt	B_{Gap}	T	1.25									
Polzahl des Stators	Z_{Stat}	1	6									
Flussdichte im Eisen des Stators	B_{Fe}	T	1.50									
Eisenquerschnitt Stator	A_{Fe}	m^2	0.0042									
Eisen-Füllfaktor	k_{Fe}	1	0.90									
Spezif. Verluste Statorblech (1.5 T / 50 Hz)	$p_{Fe1.5/50}$	W/kg	6.0									
Breite Statorschenkel (Jochbreite = 1/2)	b_{Fe}	m	0.013									
Mittlere magnetische Weglänge im Stator	ℓ_{Fe}	m	0.702									
Wirksames Eisenvolumen des Stators	V_{Fe}	m^3	0.0175									
Dichte Statorblech	ρ_{Fe}	kgm^{-3}	7600									
wirksame Eisenmasse des Stators	m_{Fe}	kg	133									
Frequenz pro Statorpol	f_W	Hz	29.71	24.76	18.57	14.86	12.38	9.90	7.43	6.19	4.95	3.71
Resultierende Pulsfrequenz	f_{puls}	Hz	178.26	148.55	111.41	89.13	74.28	59.42	44.57	37.14	29.71	22.28
Eisenverluste	$P_{D,Fe}$	kW	0.48	0.40	0.30	0.24	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08	0.06
Windungszahl pro Wicklung	N_{Cu}	1	100									
Ind. Spannung pro Wicklung	\dot{U}_W	V	74	62	46	37	31	25	19	15	12	9
dito bei Durchgangsdrehzahl	$\dot{U}_{W,max}$	V	149	124	93	74	62	50	37	31	25	19
Wicklungsbreite	b_W	m	0.150									
Wicklungshöhe	h_W	m	0.035									
Min. Windungslänge	$w_{Cu,min}$	m	0.73									
Max. Windungslänge	$w_{Cu,max}$	m	1.01									
Mittl. Windungslänge	w_{Cu}	m	0.87									
Kupfer-Wicklung Füllfaktor	k_{Cu}	1	0.75									
Kupfer-Wicklung Querschnitt	A_{Cu}	m^2	0.0039									
Dichte Kupfer	ρ_{Cu}	kgm^{-3}	8900									
Kupfermasse	m_{Cu}	kg	159									
Isoliermasse: Kontaktfläche	A_{th}	m^2	0.3206									
Isoliermasse: Dicke	h_{th}	m	0.0020									
Wärmeleitfähigkeit	λ_{th}	$Wm^{-1}K^{-1}$	0.9600									
Strangstrom	I_W	A	381.8	265.1	149.1	95.5	66.3	42.4	23.9	16.6	10.6	6.0
Stromdichte	J	A/mm^2	9.7	6.7	3.8	2.4	1.7	1.1	0.6	0.4	0.3	0.2
Leitfähigkeit Kupfer, 120°C	κ	Sm^{-1}	4.11E+07									
Leitwert einer Wicklung	G_{Cu}	S	1.87E+01									
Wicklungsverluste	$P_{D,Cu}$	kW	46.79	22.56	7.14	2.92	1.41	0.58	0.18	0.09	0.04	0.01
Temperaturerhöhung	ΔT	K	50.7	24.4	7.7	3.2	1.5	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
Diode-Spannungsabfall	$U_{F,Diode}$	V	1.00									
Gleichrichterverluste	$P_{D,Rect}$	kW	4.58	3.18	1.79	1.15	0.80	0.51	0.29	0.20	0.13	0.07
Elektrischer Wirkungsgrad	η_{El}	1	0.70	0.73	0.78	0.80	0.80	0.80	0.78	0.75	0.69	0.57
Betriebsparameter												
Konstruktionsparameter												
Material- oder physikalische Konstante												
Rest: Daraus berechnete Größen												

Tabelle 1: Arbeitsblatt für die Kalkulation des Generbine-Prototyps

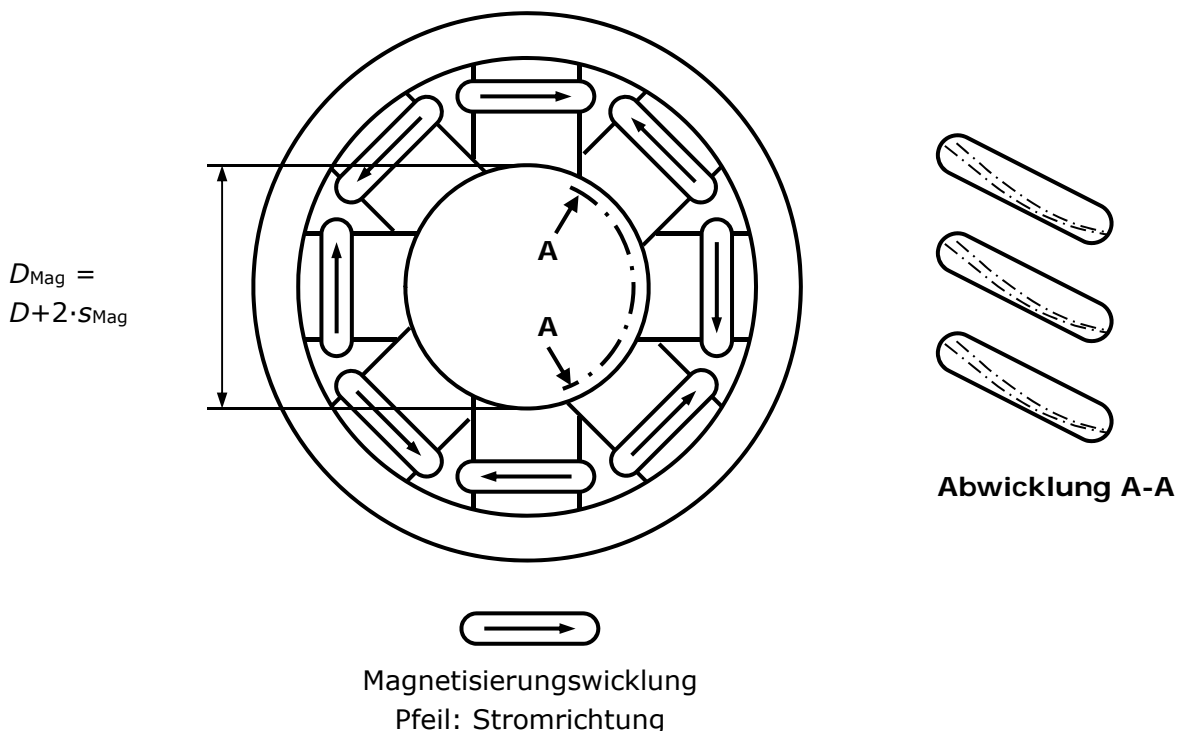
Tabelle 1 zeigt das Arbeitsblatt, das für die Berechnungsgänge verwendet wurde. Ausgehend von dem in Figur 1 gezeigten Konstruktionsprinzip wurden die in Figur 7 dargestellten Abhängigkeiten in Formeln gefasst. Auf diese Weise ist das Arbeitsblatt ein exzellentes Werkzeug, um verschiedene Parameter auszuprobieren und durch eine ausschließlich theoriebasierte Methode von Versuch und Irrtum das Optimum zu finden. Sogar das Arbeitsblatt selbst ist im Laufe dieses Prozesses mehreren Verbesserungen unterworfen worden.

Am Ende wurde eine Variante ausgewählt, welche die Basis für die Konstruktionszeichnungen des Prototyps bilden wird. Sie besitzt einen Öffnungsdurchmesser von 0.5 m (wie oben erwähnt) und verwendet Kupfer für die Statorwicklungen (eine Version mit Aluminiumwicklungen wurde ebenfalls evaluiert). Die resultierenden Parameter werden in Tabelle 1 gezeigt.

Der hydraulische Wirkungsgrad kann nicht auf rein theoretischer Grundlage berechnet werden; sobald der Prototyp gebaut sein wird, werden Testläufe darüber Auskunft geben müssen. Dagegen ist der zu erwartende elektrische Wirkungsgrad im Arbeitsblatt aufgelistet. Da die Wicklungsverluste dominieren, wird der maximale Wirkungsgrad weit unterhalb der Nennleistung erreicht. Mit anderen Worten: Vom elektrodynamischen Standpunkt aus wird die Generbine ein sehr gutes Teillastverhalten aufweisen.

2.4 Aufmagnetisierung des Rotors

Zum Aufmagnetisieren des Rotors muss eine Einrichtung verfügbar sein, die in ihrem Inneren ein genügend starkes achtpoliges radiales Magnetfeld erzeugen kann. Solch ein Gerät wird in Figur 10 gezeigt.



Figur 10: Einrichtung zum Aufmagnetisieren des Rotors

Für die Dimensionierung der Magnetisierungseinheit müssen folgende Werkstoff- und Design-Eigenschaften der Generbine berücksichtigt werden:

- ◆ Öffnungsdurchmesser D der Generbine
- ◆ Magnetische Sättigungsflussdichte B_s des Laufradschaufel-Werkstoffes
- ◆ Koerzitivfeldstärke H_c des Laufradschaufel-Werkstoffes
- ◆ Anzahl z_{Rot} der Laufradpole
- ◆ Magnetische Weglänge l_{Rot} in den Laufradpolen
- ◆ Magnetische Querschnittsfläche A_{Rot} der Laufradpole

Daraus folgen die Anforderungen, die von der Magnetisierungseinheit erfüllt werden müssen:

- ◆ Form und Querschnittsfläche der Magnetisierungspole:
Die Magnetisierungspole müssen zumindest die Magnetpole des Rotors überdecken (letztere sind in Figur 10 durch strichpunktierte Linien dargestellt). Eigentlich sollte ihre Querschnittsfläche genügend viel größer sein als diejenige der Rotorpole, um sicherzustellen, dass der weichmagnetische Werkstoff genügend weit unterhalb des Sättigungsbereichs arbeitet.
- ◆ Spalt zwischen den Magnetisierungspolen und den Rotorpolen, s_{Mag} :
 s_{Mag} sollte nicht zu groß sein (etwa so groß wie der Luftspalt der Generbine), sodass der Hauptanteil der magnetischen Durchflutung in den Rotorpolen aktiv wird.
- ◆ Magnetische Durchflutung („Amperewindungen“) in den Polwicklungen der Magnetisierungseinheit, θ :
 θ sollte gemäß den Herstellerangaben des für die Rotorscheufeln verwendeten Magnetwerkstoffs gewählt werden. Üblicherweise sollte die Feldstärke in den Rotorpolen den fünf-fachen Wert der Koerzitivfeldstärke erreichen. Wenn der Einfluss des Luftspaltes vernachlässigt werden kann, folgt daraus:
 $\theta > 5 \cdot H_c \cdot l_{Rot}$; bei einer Koerzitivfeldstärke von beispielsweise $H_c = 60 \text{ kA/m}$ und einer magnetischen Weglänge von $l_{Rot} = 0.49 \text{ m}$ bedeutet dies $\theta > 147 \text{ kA}$ oder ungefähr 150 000 Amperewindungen.

Die Magnetisierung kann mit einem kurzen Strompuls erreicht werden.

Je nach den hartmagnetischen Eigenschaften des Rotor-Werkstoffs ist unter Umständen eine offene Lagerung nach der Magnetisierung nicht mehr zulässig, da der Rotor teilweise entmagnetisiert werden könnte, wenn der magnetische Kreis nicht geschlossen ist. Es wird empfohlen, den Rotor mit einer kontrollierten Schraubenbewegung von der Magnetisierungseinheit in eine magnetische Kurzschluss-hülse zu schieben, sodass die Rotorpole ununterbrochen von weichmagnetischem Material umgeben sind. Der Rotor kann dann lange Zeit in der Hülse gelagert werden, bis er bei der endgültigen Montage von der Hülse direkt in den Stator geschoben wird.

3. Von den Versuchsläufen zu beantwortende Fragen

Es wurde schon mehrfach erwähnt, dass das gesamte Betriebsverhalten der Generbine nicht allein aufgrund der Theorie berechnet werden kann. Deswegen wird es notwendig sein, einen Prototyp zu bauen und zu testen. Detaillierte Maßzeichnungen sind in Arbeit, um dessen Konstruktion zu ermöglichen. Die Ausführung wird jedoch erst möglich sein, sobald ein Investor und Hersteller gefunden ist.

Im Folgenden werden die Fragestellungen aufgelistet, die von den Testläufen mit diesem Prototyp zu beantworten sind.

3.1 Bestätigung der Theorie, „Go/No-go“-Entscheidung

Natürlich können theoretische Überlegungen immer Fehler enthalten, oder wichtige Aspekte können unbeachtet geblieben sein. Somit wird die erste Aufgabe sein, die Voraussagen der Theorie zu bestätigen. In zweiter Linie müssen die Testläufe Informationen über den hydraulischen Wirkungsgrad des Prototyps liefern.

Sollten in der Theorie schwerwiegende Fehler stecken oder der hydraulische Wirkungsgrad zu schlecht erscheinen, wird dies die letzte Gelegenheit für eine Entscheidung zum Projektabbruch sein. Man wird dann einige hunderttausend Euro für ein Experiment ausgegeben haben, das hoffentlich einen wissenschaftlichen Wert besitzt, aber nicht zu einem ökonomisch verwertbaren Produkt führt. Natürlich ist ein solches Risiko allen wirklichen Innovationen eigen und der fragliche Investor sollte sich dessen bewusst sein.

3.2 Werkstoff und Formgebung der Laufradschaufeln

3.2.1 Beständigkeit des Laufradschaufel-Werkstoffs

Da das Laufrad zur gleichen Zeit den permanent-magnetischen Rotor bildet, ist die Auswahl des Werkstoffes hauptsächlich durch die magnetischen Eigenschaften gegeben. Jedoch müssen infolge der hydraulischen Funktion einige zusätzliche Anforderungen erfüllt werden:

- ◆ Widerstandsfähigkeit gegen chemische Korrosion durch das Fluss- oder Meerwasser
- ◆ Widerstandsfähigkeit gegen Erosion durch Schwebepartikel im Wasser
- ◆ Widerstandsfähigkeit gegen mögliche Kavitations-Erosion

Diese Anforderungen betreffen die Oberfläche des Werkstoffs. Es mag deshalb notwendig sein, den aufgrund der magnetischen Eigenschaften gewählten Basiswerkstoff zu beschichten.

3.2.2 Form der Laufradschaufeln

Ein besonderer Aspekt der Generbine ist, dass die Dicke der Laufradschaufeln durch ihre Zweitfunktion als magnetische Rotorpole festgelegt ist. Dadurch ist es unmöglich, die Formgebung der Schaufeln im Hinblick auf die hydraulischen Anforderungen korrekt zu optimieren. Die für den Prototyp vorgeschlagene Form ist ein erster Kompromiss. Die Versuchsläufe mit dem Prototyp werden zeigen, welcher hydraulische Wirkungsgrad dadurch bereits erreicht wird, und so die Basis für weitere Verbesserungen bilden, wie in Abschnitt 3.3.1 dargelegt.

3.3 Weitere Optimierung

3.3.1 Optimierung des Betriebsverhaltens

Wie in Abschnitt 2 erklärt wurde, ist das Design des vorgeschlagenen Prototyps so weit optimiert worden, wie es auf einer rein theoretischen Basis möglich erschien. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass weitere Verbesserungen möglich sind.

Die Testläufe mit dem Prototyp werden eine Basis bilden, von der aus gestartet werden kann. Da die Konstruktion verschiedener modifizierter Prototypen ziemlich kostspielig sein wird, sollte ihre Anzahl begrenzt bleiben. Numerische Computersimulationen und/oder herunterskalierte Modellversuche können an ihrer Stelle eingesetzt werden. Dazu wird eine Zusammenarbeit mit Forschungszentren erforderlich sein; dafür dürften auch öffentliche Fördergelder erhältlich sein.

3.3.2 Minimierung des Produktionsaufwandes

Ein zweites Optimierungsfeld ist natürlich die Reduktion des Produktionsaufwandes, mit anderen Worten die Minimierung der Produktionskosten. Dieser Prozess ist stark verknüpft mit den Möglichkeiten, der Struktur, der Ausrüstung, dem Know-how des fraglichen Herstellers. Das einzige, was in diesem frühen Stadium ausgesagt werden kann, ist dass die Generbine gemäß Konzept ein Massenprodukt werden muss, wenn sie ein ökonomischer Erfolg sein soll. Der Hersteller sollte sich dessen von Anfang an bewusst sein.

4. Referenzpublikationen

- [1] Europäisches Patentamt, 9. März 2011
Patentanmeldung EP 2 292 923 A2, Anmelder: Blatter, Max
Titel: Unterwasserturbine
- [2] Europäisches Patentamt, 2. Februar 2002
Patentanmeldung EP 0 977 343 A1, Anmelder: Fukada, Mitsuhiro
Titel (englisch): Permanent magnet generator
- [3] Max Blatter:
Netzeinspeisung elektrischer Energie aus dezentralen, leistungsvariablen Quellen über einen Gleichspannungs-Bus
Teil 1: Gesamtkonzept für PV-Anlagen sowie kleinere drehzahlvariable Wasser- und Windturbinen
Max Blatter, dipl. El.-Ing. ETH, Biel/Bienne, 2009