



Wasserrad Antriebs- Generator-System

VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!



Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds



Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Kurzfassung | 3 |
| 2 | Abstract | 4 |
| 3 | Einleitung | 5 |
| 4 | Inhaltliche Darstellung der Arbeitspakete | 6 |
| 5 | Ergebnisse und Schlussfolgerungen | 8 |
| 6 | Ausblick und Empfehlungen | 19 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 22 |
| 8 | Anhang | 25 |

1 Kurzfassung

Zielsetzung dieser Studie war die Überprüfung ob eine Integration des gesamten, bis dato bei herkömmlichen Wasserrädern seitlich angebauten, Energieumwandlungssystems in den zur Verfügung stehenden Bauraum unterschiedlichster Wasserradtypen technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Um diese Vorgabe zu erreichen, ist eine elektrische Maschine notwendig, welche die sehr niedrigen Drehzahlen von Wasserrädern und die anfallenden hohen Momente bewältigen kann. Diesen Anforderungen entsprachen lediglich, die am Markt erhältlichen Torque-Motoren. Darunter versteht man permanenterrregte Synchronmaschinen, deren Nennmoment vergleichsweise hoch ist, der Drehzahlbereich hingegen vergleichsweise niedrig. Da die erforderliche Mindestdrehzahl von Wasserrädern direkt trotzdem nicht erreicht werden kann, wurden unterschiedlichste Übersetzungsvarianten untersucht. Als effizienteste Methode erwies sich ein fix mit dem rotierenden Teil des Wasserrades verbundenes großes Innenzahnrad in Kombination mit einem kleinen Stirnrad. Möglich war diese Lösung erst durch das Konzept der „Luftspaltnahen Lagerung“. Dabei sind die Lagerschalen direkt an Stator und Rotor der elektrischen Maschine befestigt. Die so erreichbare sehr geringe Luftspaltlänge ist von der Positioniergenauigkeit der Lagerschalen abhängig. Der wasserfassende äußere Teil vom Wasserrad dreht sich bei dieser Art der Lagerung um den fix stehenden und somit als Systemraum nutzbaren inneren Teil vom Wasserrad. Investitionskosten können durch den Wegfall der Wasserradwelle und einer schmierölfreien einfachen Stirnradübersetzung sowie einer geringeren Bebauungsintensität minimiert werden. Die „Luftspaltnahe Lagerung“ erweist sich bei großen Bohrungsdurchmessern permanenterrregter Maschinen als realistisches Konzept für eine störungsfreie lange Lebensdauer und ermöglicht gleichzeitig die Vollintegration des Energieumwandlungssystems in Wasserräder. Schon bei einer mittelfristigen Kosten-Nutzen-Rechnung bringt das neu entwickelte System im sogenannten „Kompakt-Wasserrad“ neben einer Ertragssteigerung, einem reduzierten Wartungsaufwand, einer Investitionskostenminimierung und Betriebskosteneinsparungen, wesentliche umweltrelevante Vorteile mit sich.

2 Abstract

This study aimed at analyzing the technical and economic feasibility of the integration of the energy conversion system (converter-generator system) that is currently installed in parallel to water wheels into the space available inside the water wheel. The electric machine appropriate for this purpose needs to meet the low speed and high torque requirements of the water wheel. Such machines are called "high torque machines". These include permanent magnet synchronous machines with comparatively large rated torques and low speed. The study showed that the minimum speed requirement of water wheels cannot be met directly. Therefore, different transfer ratios of gears and gear types were analyzed. A gear consisting of a gear wheel integrated into the rotating part of the water wheel in combination with a small spur gear was identified as the most efficient method. This approach has only become possible through "air gap near mounting", where the outer and inner bearing shells are mounted directly at the stator and the rotor of the electric machine. Thereby, very small air gaps are possible, depending on the position accuracy of the bearing shells. Furthermore, the water carrying outer part of the water wheel turns around the inner part of the water wheel that is at rest and can therefore be used to host the system components. Investment costs can be minimized by elimination of the water wheel shaft, a lubrication-free spur gear and reduced required material. For large permanent magnet machines with large bore diameters, the "air gap near mounting" allows operation with hardly any breakdown risk and low maintenance over a long time of operation as well as complete integration of the energy conversion system into the water wheel. A cost-benefit analysis has shown that economic gains can be expected from the newly developed "compact water wheel" already after a relatively short time operation. This is due to increased gain of energy, reduced maintenance costs, reduced investment costs, and reduced operating costs, as well as environmental benefits.

3 Einleitung

Als Projektart wurde die *Sondierung* im Bereich *industrieller Forschung* gewählt und dem Themenfeld *Fortgeschrittene Speicher- und Umwandlungssystem* zugeordnet.

Aufgabenstellung war die Erstellung einer *Machbarkeitsstudie*. Inhalt dieser Studie sind neun Arbeitspakete, in denen geklärt wurde, ob der direkte Einbau, eines oder mehrere von zehn untersuchten Antriebs-Generator-Systemen in den zur Verfügung stehenden Bauraum eines Wasserrades zur Erzeugung elektrischer Energie, technisch möglich ist und eine Ertragssteigerung sowie eine Kostenoptimierung mit sich bringt.

Schwerpunkt war die *Integration des Energieumwandlungssystems* in den zur Verfügung stehenden Bauraum von Wasserrädern, deren Charakteristik in jedem Fall durch geringe Drehzahlen 3 bis 16 min^{-1} und hohe Momente gekennzeichnet ist. Das Energieumwandlungssystem besteht herkömmlicher Weise aus einem Getriebe, einer elektrischen Maschine und der Steuerungselektronik. Als besondere Herausforderung erwies sich schlussendlich das Ziel der vollkommenen Systemintegration in ein Wasserrad sowie die Realisierung eines möglichst kleinen Luftspaltes für die Erzielung einer hohen Luftspaltflussdichte zwischen Rotor und Stator der permanent erregten elektrischen Maschine bei gleichzeitig großen Bohrungsdurchmessern. Erst der Lösungsansatz, einer sogenannten „*Luftspaltnahen Lagerung*“, ermöglichte die Realisierung einer minimalen Luftspaltlänge von 1 mm bei einer statisch ausgewogenen Robustheit und einer hohen Lebensdauer. Diese Anforderungen sind bei Maschinen mit einem Durchmesser größer als 1 m und herkömmlicher Lagerung praktisch nicht möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Lagerung ist, dass sich nur der äußere Teil des Wasserrades dreht und dadurch eine Wasserradwelle nicht mehr erforderlich ist. Der innen liegende Teil, auf dem der Stator sitzt, steht still und kann für weitere Verbauungen genutzt werden.

4 Inhaltliche Darstellung der Arbeitspakete

AP 1) ***Festlegung von ursprünglich vier, schlussendlich zehn Systemen.***

Die Grobauslegung der Generatoren und der Getriebevarianten erfordert die vorherige Festlegung von Kenngrößen einer im Durchschnitt am häufigsten vorkommenden Wasserrad-Referenzanlage. Im Zuge dieses Arbeitspaketes legen sich die Projektpartner, auf Basis von Recherchen und Erfahrungen, auf die in den weiteren Arbeitspaketen genauer untersuchten Systeme fest. Bereits an diesem Punkt ist auf die Einbausituation von Getriebe und Generator Rücksicht zu nehmen.

AP 2) ***Grobbauslegung von ursprünglich vier, schlussendlich zehn Generatoren.***

Aus den Vorgaben aus AP 1 werden unterschiedliche permanenterregte Synchrongeneratoren aber auch Asynchrongeneratoren ausgelegt, um die Möglichkeit der Unterbringung im zur Verfügung stehenden Bauraum von Wasserrädern nachzuweisen. Eine Optimierung hinsichtlich Materialeinsatz und damit auch des Gewichts unter den gegebenen Einbaubedingungen wird für alle Systeme durchgeführt.

AP 3) ***Grobbauslegung von ursprünglich drei, schlussendlich sieben Getriebevarianten.***

Aus den Vorgaben aus AP 1 werden für sieben unterschiedliche Systeme unterschiedliche Getriebe ausgelegt, um die Möglichkeit der Unterbringung im zur Verfügung stehenden Wasserrad-Bauraum nachzuweisen. Eine Optimierung hinsichtlich Materialeinsatz und damit auch des Gewichts unter den gegebenen Einbaubedingungen wird für alle Systeme durchgeführt, wobei unterschiedliche Getriebetechnologien in Betracht gezogen wurden und vor allem weiterhin Augenmerk auf eine Getriebe- und somit Industrieölfreie Lösung gelegt wurde.

AP 4) ***Untersuchung modularer Bauweisen aller Systeme.***

Um die in den einzelnen Systemen zur Anwendung kommenden Bauteile leichter an den Bestimmungsort transportieren zu können, wird die Möglichkeit einer Modulbauweise, ähnlich wie sie bereits bei Großmaschinen angewendet wird, untersucht. Dabei müssen sowohl Getriebe als auch Generator betrachtet und die Umgebungsbedingungen auf unterschiedlichen Baustellen berücksichtigt werden.

AP 5) ***Anforderungsprofil für den Umrichter aller Systeme.***

Bei ausreichend hoher Drehzahl des Generators ist es denkbar, diesen direkt ans Netz zu schalten. Dies erfordert besondere Berücksichtigung des Regelverhaltens hinsichtlich der abgegebenen Wirkleistung, insbesondere aber auch des Austauschs von Blindleistung mit dem Netz. Besonders im Inselbetrieb ist zu erwarten, dass ohne die Verwendung eines Umrichters das Einhalten der Grenzen für die Spannung kaum zu gewährleisten ist. Bei Verwendung eines Umrichters zur Übertragung der Leistung vom Generator ans Netz können sowohl die Frequenz und damit verbunden die Drehzahl des Generators, als auch die Blindleistungsbilanz von Generator und Netz entkoppelt werden. Für den Umrichter müssen die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit im Hinblick auf Wirkleistungsabgabe und Blindleistungsaustausch sowie an die Qualität der Regelung für Netz und Maschine festgelegt werden.

AP 6) ***Kostenschätzung aller Systeme.***

Aufgrund der Grobdimensionierung und der vorgegebenen Einbausituation wurden Informationen bei potenziellen Zulieferfirmen für die einzelnen Komponenten bezüglich der Herstellungskosten eingeholt.

AP 7) ***Technische Optimierung des effizientesten Systems.***

Die technischen Eigenschaften und die wirtschaftlichen Aspekte werden unter Variation der in den Arbeitspaketen 1 bis 5 festgelegten Randbedingungen optimiert.

AP 8) ***Vergleich des effizientesten Systems mit Standardsystemen.***

Für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit aller Systeme gegenüber am Markt verfügbaren Standardsystemen werden die unterschiedlichen Eigenschaften entsprechend der Marktrelevanz gewichtet und einer vergleichenden Bewertung (Benchmarking) zugeführt.

AP 9) ***Projektmanagement, Koordination, Controlling.***

Das neunte Arbeitspaket umfasst die Koordination von Arbeitsprozessen sowie die Kontrolle der den Arbeitspaketen zu Grunde liegenden Zielsetzungen mit termingerechter Einhaltung der Meilensteine und Kostenkontrolle. Aufgabe hierbei war auch die laufende Kommunikation unter den Forschungspartnern und die Beschaffung externer Informationen sowie die formale Abwicklung dieses Forschungsprojektes.

5 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Für elektrische Maschinen mit Drehzahlen größer als 100 min^{-1} eignen sich noch sogenannte *verteilte Wicklungen*. Für Drehzahlen kleiner als 100 min^{-1} können fast nur noch sogenannte *Zahnspulenwicklungen* verwendet werden. Der Grund liegt in der hohen Polpaarzahl und den damit einhergehenden kleinen Nutbreiten. Zudem haben diese Maschinen ein niedriges Länge-zu-Durchmesserverhältnis. Bei der Länge meint man die Länge des Eisenpaketes, beim Durchmesser den Bohrungsdurchmesser. Aus diesen Gründen werden diese Maschinen meist mit Zahnspulenwicklungen ausgeführt. Kennzeichnend für eine Zahnspulenwicklung ist, dass die Lochzahl kleiner 1 ist.

In der folgenden Tabelle sind die Dimensionierungsgrundgrößen angeführt. Aus der Wahl dieser Größen leiten sich die wesentlichen Parameter der bemessenen Maschinen ab.

Dimensionierungsgrundgrößen für die bemessenen Maschinen

| Größe | Bemerkung |
|--|---|
| Drehschub τ_m in kNm/m^3 | |
| Bauraum | Bohrungsdurchmesser D , Eisenlänge L_{Fe} , Verhältnis L_{Fe}/D |
| Polpaarzahl p | möglichst hoch -> niedrige Drehzahl |
| Frequenz f_N in Hz | Kompromiss zwischen -> Bauraum, Massen und Eisenverlusten $P_{v,Fe}$ |
| Stromdichte S in A/m^2 | |
| Abmessungen PM | |

Tabelle 1: Dimensionierungsgrundgrößen für die bemessenen Maschinen

Überblick aller Kategorien der bemessenen elektrischen Maschinen

| Typ A) Direktantrieb | | Typ B) Antrieb über Getriebe | | | |
|----------------------|--|------------------------------|---|--------------------------|---|
| | | B.a) Getriebe einstufig | | B.b) Getriebe mehrstufig | |
| A1) | PMSM $f_N = 50 \text{ Hz}$ | B.a1) | PMSM $f_N = 50 \text{ Hz}$, Planetengetriebe ($i=1:4$) | B.b1) | PMSM mit 50 Hz, Stirnrad- oder Planetengetriebe ($i=1:20$) |
| A2) | PMSM mit SR, $f_N \geq 20 \text{ Hz}$ | B.a2) | PMSM mit SR, $f_N < 20 \text{ Hz}$, Planetengetriebe ($i=1:4$) | B.b2) | ASM mit 50 Hz, Stirnrad- oder Planetengetriebe ($i=1:20$) |
| A3) | PMSM mit SR, $f_N < 20 \text{ Hz}$ | B.a3) | PMSM $f_N = 50 \text{ Hz}$, im „Kompakt-Wasserrad“ | B.b3) | ASM mit SR, $f_N \geq 20 \text{ Hz}$, Stirnrad- oder Planetengetriebe ($i=1:20$) |
| | | | | B.b4) | ASM mit SR, $f_N < 20 \text{ Hz}$, Stirnrad- oder Planetengetriebe ($i=1:20$) |

Tabelle 2: Überblick aller Kategorien der bemessenen elektrischen Maschinen

Für die Asynchronmaschine ASM ist neben dem Wirkungsgrad auch noch der Leistungsfaktor von Interesse. Wenn die ASM direkt am Netz betrieben wird, muss die Blindleistung vom Netz gedeckt werden. Wird die ASM über einen Stromrichter betrieben, dann liefert der SR die Blindleistung. Wird die permanent erregte Synchronmaschine PMSM mit einer Zahnspulenwicklung ausgeführt, dann kann diese Maschine nur über einen SR an das öffentliche Netz angeschlossen werden.

AP 1) Festlegung von ursprünglich vier, schlussendlich zehn Systemen.

Hier wurde auf die Einbausituation des Energieumwandlungssystems in den Bauraum eines Wasserrades Bedacht genommen. Neben der Abmessung und dem Gewicht sind zahlreiche Randbedingungen zu berücksichtigen. Um die einzelnen Komponenten des Antriebes auszulegen, wurden folgende *Kenngößen für ein oberflächliches Wasserrad* bestimmt:

| | |
|------------------------|--|
| Fallhöhe: | $H = 6.6 \text{ m}$ |
| Wassergeschwindigkeit: | $v_{\text{wasser}} = 1.7 \text{ m/s}$ |
| Raddurchmesser: | $d = 6 \text{ m}$ |
| Wasserraddrehzahl: | $n = 5.5 \text{ 1/min}$ |
| Radkranztiefe: | $a = 0.37 \text{ m}$ |
| Wassermenge | $Q_{\text{wasser}} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Radbreite: | $B = 1.7 \text{ m}$ |
| Mechanische Leistung: | $P_{\text{mech}} = 26 \text{ kW}$ |

Schlussendlich wurden zehn und nicht, wie ursprünglich geplant, vier Energieumwandlungssysteme definiert. Die folgende Untersuchung aller festgeschriebenen Systeme hatte zum Ziel, *Pro und Kontra* gegenüber zu stellen und ab dem siebenten Arbeitspaket das effizienteste System zu optimieren.

AP 2) Grobauslegung von ursprünglich vier, schlussendlich zehn Generatoren.

Hier wurden PMSM und ASM für alle festgelegten Systeme in denen diese vorgesehen waren, rechnerisch ausgelegt. Eine Optimierung des Materialeinsatzes in Verbindung mit maximal möglicher Gewichtsreduktion und Beibehaltung von Leistungsparametern unter den gegebenen Einbaubedingungen war zentraler Untersuchungsbestandteil aller Maschinen.

Schlussfolgerung zu den direkt angetriebenen Varianten Typ A1, A2 und A3:

Bewertet wurden die Ergebnisse anhand des Wirkungsgrades. Aus den Berechnungen erkennt man ganz deutlich, dass die Eisenmasse und die Kupfermasse bei steigendem Wirkungsgrad und mit niedrigerer Frequenz stark ansteigen. Weiters haben die Berechnungen ergeben, dass mit abnehmender Frequenz der Durchmesser der Maschine kleiner wird. Dies erklärt sich aus der niedrigeren Polpaarzahl. Gleichzeitig muss die Maschinenlänge zunehmen, um das erforderliche Drehmoment erzeugen zu können. Die berechneten Maschinen sind geteilt ausgeführt. An beiden Enden des Wasserrades sitzt eine Maschine, die jeweils die halbe Nennleistung besitzt. Der hier angenommene Wasserraddurchmesser hat mit 6 m einen Durchmesser der über dem Median von 4 m liegt. Für sehr viele Anwendungen kann deshalb der Typ A1 PMSM $f_N = 50 \text{ Hz}$ schon alleine wegen eines zu großen Maschinendurchmessers nicht verwendet werden. Mit dem wesentlich

geringeren Maschinendurchmesser der anderen Typen A2 PMSM mit SR, $f_N \geq 20$ Hz und A3 PMSM mit SR, $f_N < 20$ Hz könnte ein großer Bereich von Wasserrädern abgedeckt werden.

Schlussfolgerung bei einstufigen Getrieben der Varianten Typ B.a1 und B.a2:

Die Maschinen und das Getriebe werden an das Wasserrad angebaut. Eine Integration ist somit nicht möglich. Bei gleichem Wirkungsgrad sind die Massen der Variante B.a2 wesentlich höher als die der Variante B.a1. Als Getriebe könnte das PG 6501 MS 3,83 P225 FF FL von Stöwer dienen. Das Planetengetriebe weist laut Herstellerangaben pro Stufe Verluste von 3 % auf. Die Abmessungen betragen 450 x 700 mm. Beide Maschinen sind für eine Drehzahl von 21.4 min^{-1} ausgelegt. Die Berechnungen zeigen deutlich, dass der Wirkungsgrad der Anlage bei Verwendung der niedrigeren Nennfrequenz von 10 Hz bei der Variante B.a2 gegenüber der Variante B.a1 ansteigt. Gleichzeitig steigt allerdings auch die Maschinenmasse und hier insbesondere die Eisenmasse beträchtlich an.

Schlussfolgerung zur Variante Typ B.a3 im „Kompakt-Wasserrad“:

Bei Verwendung des in Folge vorgestellten Getriebes für das „Kompakt-Wasserrad“ kann die Nenndrehzahl der elektrischen Maschine 50 min^{-1} betragen. In der folgenden Abbildung sind schematische Darstellungen des Wasserrades und der elektrischen Maschine sowie die Maschinendaten zu sehen. Bei dieser Drehzahl kann die Nennfrequenz 50 Hz betragen, da sich mit der Polpaarzahl und dem Maschinendurchmesser eine ausreichend große Nutteilung ergibt. Die Maschinenmassen sind beträchtlich niedriger als bei den bisherigen Varianten.

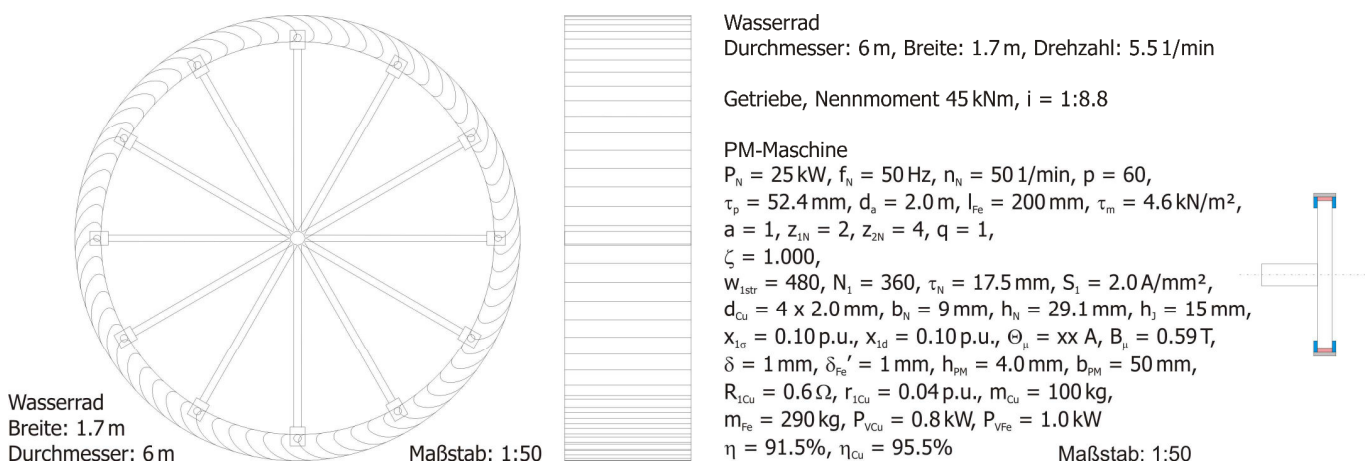


Abbildung 1: Referenz-Wasserrades und der Maschinendaten für Typ B.a3) mit 50 Hz

Schlussfolgerung bei zweistufigen Getrieben der Varianten Typ B.b1 bis B.b4:

Mit zweistufigen Getrieben lassen sich Übersetzungsverhältnisse von größer als 1 : 10 erreichen. Bei höheren Drehzahlen werden die Bedingungen für die elektrische Maschine tendenziell besser. Beispielsweise erreicht man mit einem Stirnradgetriebe von SEW der Type MC2PLSF08 ein

Übersetzungsverhältnis von 1 : 20. Die Verluste pro Stufe betragen laut Herstellerangaben 1,5 % bei Nennbetrieb. Das Getriebenennmoment beträgt 44,5 kNm. Das Getriebe ist 907 kg schwer und mit 55 Liter Öl gefüllt. Damit beträgt für die Referenzanlage die Drehzahl am Abtrieb des Getriebes 110 min^{-1} . Für diese Drehzahl ist nicht nur eine PMSM sondern auch eine ASM denkbar.

Bei einer ASM gilt es, die Polpaarzahl möglichst niedrig zu halten. Je höher die Polpaarzahl ist desto niedriger ist der Leistungsfaktor. Damit sinkt auch der Wirkungsgrad der Maschine ab. Bei höherer Nennleistung wirkt sich eine höhere Polpaarzahl weniger stark aus als bei niedrigeren Nennleistungen. Je geringer die Leistung desto niedriger muss die Polpaarzahl sein, um noch einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Die Ergebnisse der Bemessungen von ASM haben gezeigt, dass mit ca. 85 % ein Maximum im Wirkungsgrad erreicht wird. Zu niedrigeren Frequenzen hin steigt der Leistungsfaktor an, gleichzeitig jedoch auch die Maschinenmassen.

Wichtig für die Auslegung der elektrischen Maschine ist neben der kleinen Luftspaltlänge ein ausgewogenes Maß an Luftspaltflussdichte. Ist diese Flussdichte zu hoch, steigt der Magnetisierungsstrom, womit ein höherer Statorstrombelag und ein niedrigerer Wirkungsgrad einhergehen. Ist die Flussdichte zu niedrig, steigt der Statorstrombelag ebenfalls an, auch hierbei erhält man einen niedrigeren Wirkungsgrad und höhere Maschinenmassen.

Bei der PMSM kann das Drehmoment über die Maschinenlänge angepasst werden. Im Konzept der Direktantriebe wurde die 25 kW Maschine auf zwei 12.5 kW Maschinen aufgeteilt, die gleichzeitig als Lager des Wasserrades dienen. Alle anderen Maschinen wurden für 25 KW ausgelegt. Die oben angeführten ASM sollten auch nicht mit kleineren Leistungen bemessen werden, da sich dadurch das Problem mit Leistungsfaktor und Wirkungsgrad wieder verschärft.

AP 3) Grobauslegung von ursprünglich drei, schlussendlich sieben Getriebevarianten.

Der Typ A basiert auf der Vorstellung eines getriebelosen Direktantriebes, der Typ B hingegen benötigt unterschiedliche Übersetzungsvarianten auf Grund der Drehzahlauslegung der Generatoren. Hier wurden auch unterschiedliche Getriebearten untersucht, die zur Unterbringung im zur Verfügung stehenden Bauraum von Wasserrädern geeignet sind. Der Typ B gliedert sich in einstufige und zweistufige Getriebe. Bei einstufigen Getrieben sind verschiedene Möglichkeiten denkbar. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein:

- einstufiges Planetengetriebe, ein
- Kettengetriebe, ein
- Keilriemengetriebe, ein
- Flachriemengetriebe und das
- einstufige Stirnradgetriebe im „Kompakt-Wasserrad“

untersucht. Einstufige Planetengetriebe, die das Nennmoment des Referenzwasserrades verarbeiten können, weisen ein Übersetzungsverhältnis von maximal 1 : 4 auf. Kettengetriebe sind aufgrund der erforderlichen Zähnezahlen mit 1 : 8.8 begrenzt. Nachteil beim Kettengetriebe ist, dass es nur außen an das Wasserrad angebaut werden kann. Für das Keilriemen- und das Flachriemengetriebe ist noch eine Übersetzung von 1 : 9 maximal möglich. Diese weisen aber sehr ungünstige Dimensionen auf und kommen deshalb für ein kompaktes Wasserrad nicht in Frage.

Das *einstufige Stirnradgetriebe* weist gegenüber dem Kettengertriebe bei gleichem Übersetzungsverhältnis den wesentlichen Vorteil auf, dass es in den Bauraum von Wasserrädern integriert werden kann. Deshalb wurde dem einstufigen Stirnradgetriebe im „Kompakt-Wasserrad“ gegenüber dem Kettengertriebe der Vorzug gegeben.

Auslegung eines Getriebes im „Kompakt-Wasserrad“:

Im Gegensatz zu den Ketten- und Riemengetrieben muss beim Planetengetriebe die elektrische Maschine konzentrisch zur Achse des Wasserrades angebracht werden. Diese Anordnung erlaubt eine Positionierung im inneren Bauraum des Wasserrades und erleichtert somit die Integrierung neuester Antriebstechnik mit wenig Aufwand in bestehende Wasserräder, die bis dato nicht für die Umwandlung in elektrische Energie genutzt werden.

Neben dem schon beschriebenen Planetengetriebe mit allen Vor- und Nachteilen sind insbesondere beim neuen Konzept des „Kompakt-Wasserrades“ Stirnrad-Getriebevarianten möglich um die elektrische Maschine in den Innenraum zu schaffen. *Stirnradgetriebe basierend auf einem großen Innenzahnrad* ermöglichen mehrere Varianten der Anordnung der elektrischen Maschine. Es sind konzentrische als auch nicht konzentrische Anordnung der elektrischen Maschine bis hin zur Anordnung mehrerer kleiner dimensionierter elektrischer Maschinen möglich. Kernstück dieses Getriebes ist das Innenzahnrad als Antrieb und das Stirnrad als Abtrieb:

Auslegungsvariante der einfachen Übersetzung im „Kompakt-Wasserrad“

| | |
|---------------|-------------------------|
| Leistung | 25 kW |
| Übersetzung | 1:10 |
| Material | 16MnCr5 einsatzgehärtet |
| Modul | 12 |
| Zahnradbreite | 140 mm |

| | |
|-----------------|----------|
| Gebrauchsdauer | 200000 h |
| Tangentialkraft | 36135 N |
| Normalkraft | 38493 N |
| Radialkraft | 13265 N |
| | |

| | Innenzahnrad | Stirnrad |
|-----------------------------|--------------|----------|
| Drehzahl | 50 1/min | 5 1/min |
| Drehmoment | 6821 Nm | 46314 Nm |
| Zähnezahl | 12 | 220 |
| Sicherheitsfaktor Lochfraß | 1,29 | 1,23 |
| Sicherheitsfaktor Zahnbruch | 4,08 | 5,90 |

Der Wirkungsgrad eines qualitativ hochwertigen Stirnradgetriebes liegt laut Roloff/Matek zwischen 93 und 95 %. Leistungsoptimierte Stirnradgetriebe liegen bei ca. 97 %. Die mögliche Übersetzung ist ungefähr 10, wobei sich bei *Innenradpaarungen* (Hohlrad und Ritzel) durch die geometrischen Gegebenheiten höhere Tragfähigkeiten ergeben, was wiederum dem Wirkungsgrad entgegen kommt.

AP 4) Untersuchung modularer Bauweisen aller Systeme.

Um die in den einzelnen Systemen zur Anwendung kommenden Bauteile leichter an den Bestimmungsort transportieren zu können, wurde in diesem Arbeitspaket die Möglichkeit einer Modulbauweise untersucht. Das Demonstrationsmodell stellt einen kleinen Ausschnitt aus einem in Zukunft realisierbaren ringförmigen Stator und Rotor einer permanent erregten elektrischen Maschine dar und zeigt auf Grund der hohen Magnetisierungskräfte sehr schnell, dass die elektrische Maschine komplett im Werk zusammengebaut werden muss und dann mit unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Transportmitteln zu ihrem Bestimmungsort gelangt.

AP 5) Anforderungsprofil für den Umrichter aller Systeme.

Für den Umrichter wurden hier die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit im Hinblick auf *Wirkleistungsabgabe* und *Blindleistungsaustausch* sowie an die *Qualität der Regelung* für Netz und Maschine festgelegt. Die Drehzahlvarianz durch den, für die PMSM im zukünftigen „Kompakt-Wasserrad“, notwendigen Stromrichter bringt allgemein für jeden Wasserradtypen, jedoch ganz besonders bei unterschlächtigen Wasserrädern durch eine optimierte Fallhöhenausbeute bei schwankendem Wasserdargebot, wesentliche Ertragssteigerungen mit sich. Darüber hinaus werden in Zukunft die Bestimmungen zur Blindleistungskompensation durch Energieversorgungsunternehmen bzw. Netzbetreiber verschärft, daher ist der Stromrichter ein fixer Bestandteil in der weiteren Konzeption vom „Kompakt-Wasserrad“. Über einen SR ist, wenn es vom Kunden gewünscht wird, auch ein Inselbetrieb realisierbar.

AP 6) Kostenschätzung aller Systeme.

Aufgrund der Grobdimensionierung und der vorgegebenen Einbausituation wurden Informationen bei potenziellen Zulieferfirmen für die einzelnen Komponenten bezüglich der Herstellungskosten eingeholt. Diese Kosten sind die Grundlage für wirtschaftliche Aspekte in Anbetracht der festgelegten Systeme.

Kosten der Antriebsvarianten

| Bezeichnung | Kosten elektr. Maschine in € | Kosten Strom-Richter in € | Kosten Getriebe in € | Kosten Antrieb in € |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|
| Referenzanlage 25 kW, ASM | 4.000,- | kein SR | 13.000,- | 17.000,- |
| Typ A1) PMSM mit 50 Hz | 45.300,- | 5.300,- | kein Getriebe | 50.600,- |
| Typ A2) PMSM mit 20 Hz | 110.000,- | 5.300,- | kein Getriebe | 115.300,- |
| Typ A3) PMSM mit 10 Hz | 172.000,- | 5.300,- | kein Getriebe | 177.300,- |
| Typ B.a1) PMSM mit 50 Hz | 21.900,- | 5.300,- | 8.000,- | 35.200,- |
| Typ B.a2) PMSM mit 10 Hz | 64.700,- | 5.300,- | 8.000,- | 78.000,- |
| Typ B.a3) PMSM mit 50 Hz | 17.900,- | 5.300,- | 5.500,- | 28.700,- |
| Typ B.b1) PMSM mit 50 Hz | 13.100,- | 5.300,- | 8.000,- | 26.400,- |
| Typ B.b2) ASM mit 50 Hz | 19.600,- | kein SR | 8.000,- | 27.600,- |
| Typ B.b3) ASM mit 20 Hz | 19.900,- | 5.300,- | 8.000,- | 33.200,- |
| Typ B.b4) ASM mit 10 Hz | 26.700,- | 5.300,- | 8.000,- | 40.000,- |

Tabelle 3: Kosten der Antriebsvarianten

Hierbei zeichnen sich bereits Kostenverschiebungen durch den Wegfall der Wasserradwelle und das nicht erforderliche mehrstufige und Industrieöl fassende Getriebe ab. Wenn die elektrische Maschine direkt, ohne dazwischen liegendes Getriebe, vom Wasserrad angetrieben werden soll, dann können am Markt erhältliche Torque-Motoren nicht verwendet werden. Unter Torque Motoren versteht man permanenterregte Synchronmaschinen PMSM, deren Nennmoment vergleichsweise hoch ist, der Drehzahlbereich jedoch vergleichsweise niedrig. Für den Direktantrieb müsste eine Maschine neu bemessen werden. Die am Markt erhältlichen Maschinen weisen höhere Nenndrehzahlen auf und das Nennmoment reicht nicht aus. Bei denen, die in die Nähe der Anforderungen kommen, liegt der Wirkungsgrad niedriger als der bei der Referenzanlage und der Preis sehr hoch. Kommen hingegen Übersetzungsstufen in Betracht, dann erfüllen einige Torque-Motoren die Bedingungen in Hinblick auf Leistung und Wirkungsgrad. Einstufige Getriebe erreichen ein Übersetzungsverhältnis von maximal 1 : 10, zweistufige maximal 1 : 20. Für die Maschinendrehzahl bedeutet dies:

- Einstufiges Getriebe, $n_{N,Maschine} = 50 \text{ min}^{-1}$
- Zweistufiges Getriebe, $n_{N,Maschine} = 110 \text{ min}^{-1}$

Für diese Bedingungen findet man *Torque-Motoren* am Markt.

Da die Drehzahlen bei Wasserrädern generell niedrig sind, wurde in diesem Projekt, wie bereits in der Einleitung erwähnt, die „Luftspaltnahe Lagerung“ konzipiert. Dabei sind die Lagerschalen direkt an Stator und Rotor befestigt. Der Vorteil ist, dass der Luftspalt nur von der Positioniergenauigkeit der Lagerschalen abhängt. Er ist um den Umfang konstant, da selbst ein leicht verformbarer Stator oder Rotor auf die Höhe des Luftspaltes keinen Einfluss hat. Die Verformbarkeit rührt vom dünnen Joch her, das bei niedriger Lochzahl entsprechend dünn ausgeführt werden kann. Damit sind selbst bei Durchmessern die größer als 1 m sind, Luftspaltlängen von weniger als 1 mm zu erzielen. Bei den Bemessungen wurde zur Vorsicht aber mit einer Luftspaltlänge von $\delta = 1 \text{ mm}$ gerechnet. Zur Lagerung kann entweder ein Kugel-, Rollen- oder Gleitlager verwendet werden.

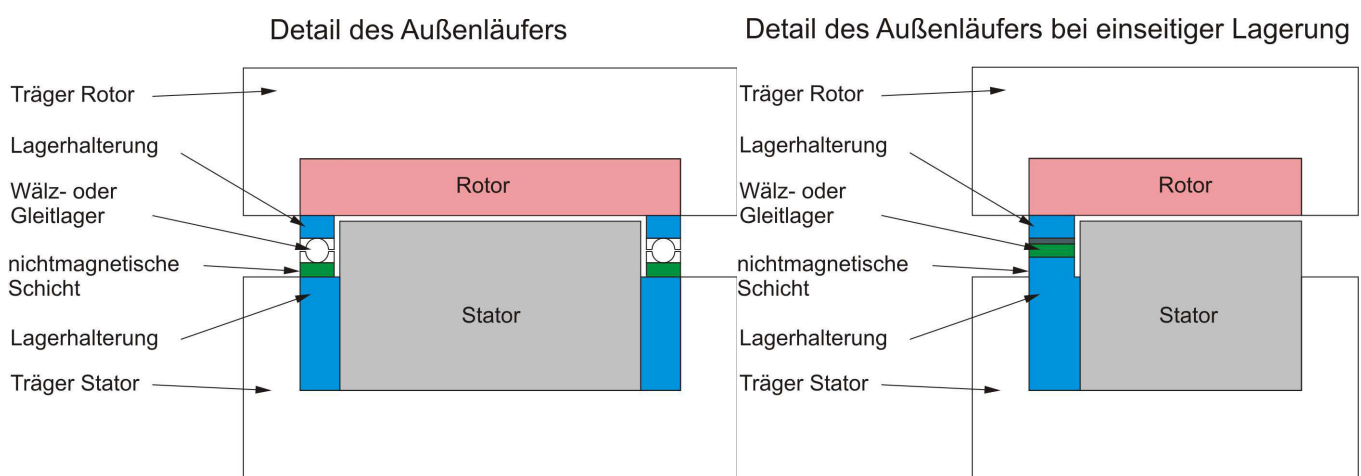


Abbildung 2: Details zur luftspaltnahen Lagerung, die a) doppelseitig oder b) einseitig ausgeführt ist

AP 7) Technische Optimierung des effizientesten Systems.

Auf Basis der Ergebnisse aus den AP 1 bis 6 wurde das am besten geeignet erscheinende System, im vorliegenden Fall die Variante Typ B.a3 eine permanenterregte Synchronmaschine PMSM mit einer Nenndrehzahl von 50 min^{-1} , einer Nennleistung von 25 kW und einer Frequenz von 50 Hz unter den bis dato gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen technisch optimiert.

Ziel der Optimierung dieser elektrischen Maschine ist das Herausfiltern des idealen Zusammenspiels aus Wirkungsgrad und Kosten. Diese Optimierung hat bei folgenden Bemessungsgrößen angesetzt:

- Drehschub
- Bohrungsdurchmesser
- Notwendige Scheinleistung (wird durch X_d und X_σ bestimmt)
- Wicklung
- Stromdichte
- Flussdichte

Im vorliegenden Fall wurden einige Größen als konstant angesetzt und andere variiert.

Konstante Größen:

- Luftspaltflussdichte B_δ ca. 0.65 T, B_j ca. 1 T
- Wicklung; Lochzahl $q = 2/5$
- Stromdichte $S = 3 \text{ A/mm}^2$.

Variable Größen:

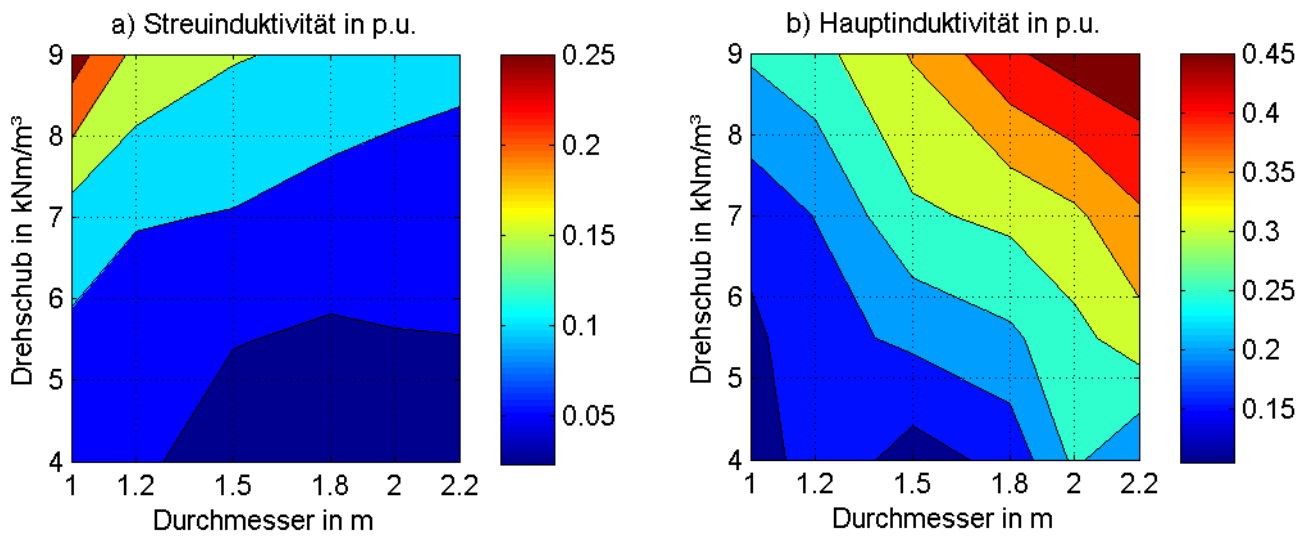
- Durchmesser D von 1 - 2.2 m
- Drehschub τ_m von 4 - 9 kNm/m³.

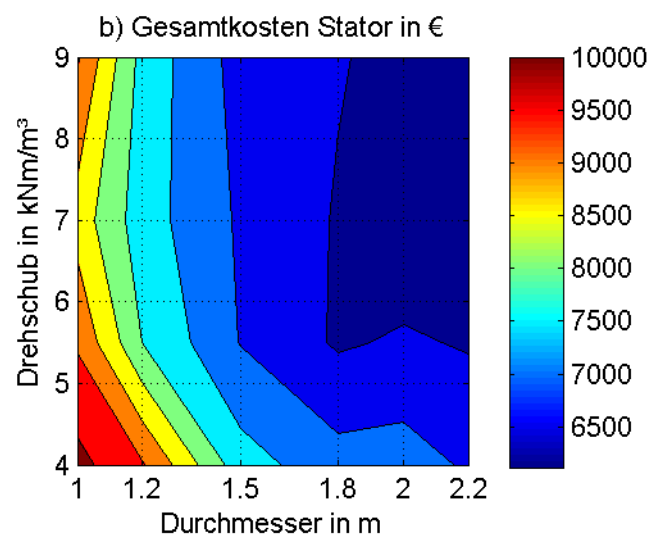
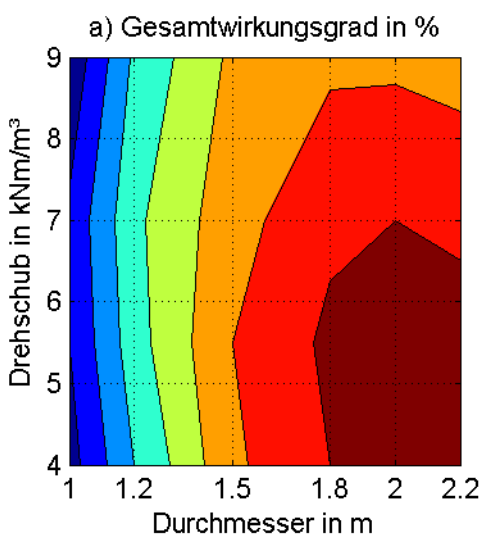
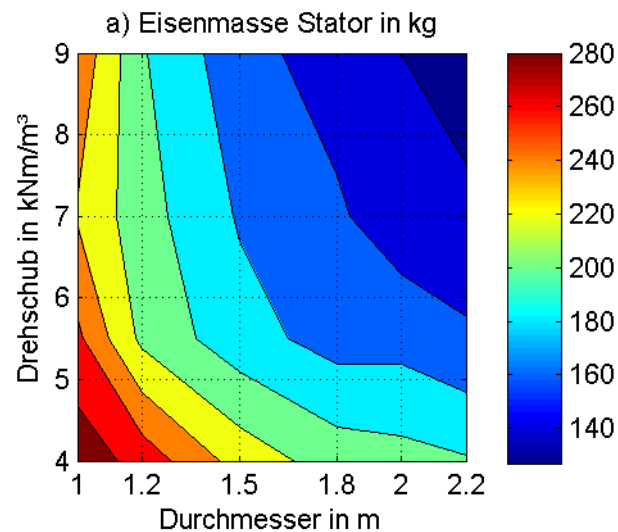
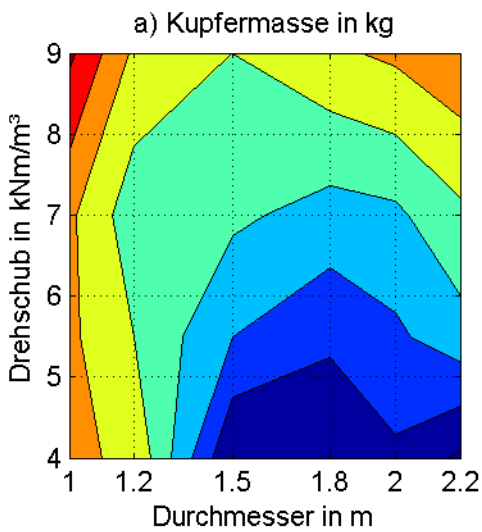
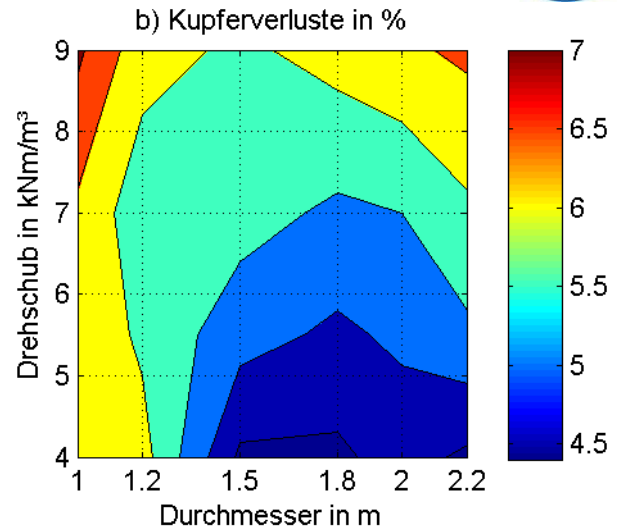
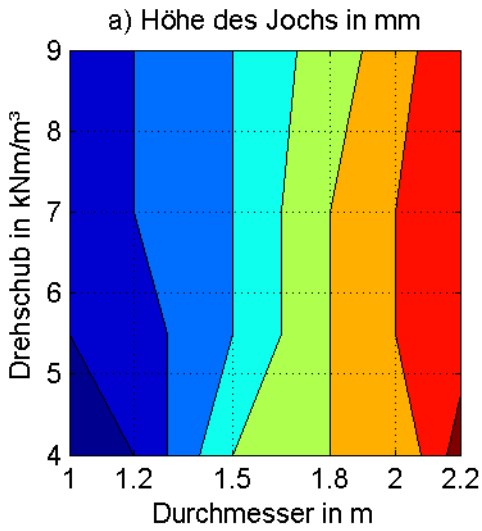
Der Einfluss der Variationen auf die Maschinenmassen m_{Cu} und m_{Fe} , die Kosten, den Wirkungsgrad, die Streureaktanz X_σ , die Hauptreaktanz X_d und die Streuinduktivität L_σ werden untersucht. Für die letzten beiden Größen gelten folgende Prämissen:

- Hauptreaktanz möglichst groß (unter Berücksichtigung der Permanentmagnete)
- Streuinduktivität nicht zu groß (zu kleines Hauptfeld) und nicht zu klein (zu hohe Kurzschlussströme)

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Untersuchung zu sehen. Illustriert wurden die Abbildungen als 2-D-Konturenplot. Die jeweilige Farbe gibt den Wert der untersuchten Größe an. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass es günstiger ist, eine Maschine mit größerem Durchmesser und mittlerem Drehschub zu nehmen. Der für die Untersuchung verwendete Wertebereich des Drehschubes liegt gegenüber der ASM der Referenzanlage ca. um den Faktor 4 niedriger.

Abbildung 3: Untersuchungsergebnisse





Aus dem Verlauf des Gesamtwirkungsgrades ist ersichtlich, dass für eine Drehzahl von 50 min^{-1} der Wertebereich vom Drehschub passt. Vergleicht man die Kosten des Stators mit dem Gesamtwirkungsgrad, dann gibt es ein Optimum für folgendes Wertepaar:

- Durchmesser D ca. 1.8 m und Drehschub τ_m ca. 5.5 kNm/m^3

Diese Variante zeichnet sich auch dadurch aus, dass Kupfermasse und Eisenmasse noch in der Nähe des Minimums liegen.

AP 8) Vergleich des effizientesten Systems mit Standardsystemen.

Die Bewertung reicht von sehr gut (+++) bis ungünstig (---). Neutrale Bewertungen sind mit \emptyset gekennzeichnet.

Benchmarking

| Variante | A1 | A2 | A3 | B.a1 | B.a2 | B.a3 | B.b1 | B.b2 | B.b3 | B.b4 |
|-------------------------------|-------------|-----|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Öl (Getriebe) | +++ | +++ | +++ | --- | --- | \emptyset | --- | --- | --- | --- |
| Kosten (Produktion, Material) | -- | --- | --- | - | -- | + | ++ | + | + | \emptyset |
| Technische Umsetzbarkeit | \emptyset | - | - | - | - | ++ | +++ | ++ | +++ | \emptyset |
| Technisches Risiko | --- | --- | --- | \emptyset | \emptyset | + | +++ | ++ | +++ | \emptyset |
| Transporttauglichkeit | -- | - | - | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| Marktpotential | -- | - | - | \emptyset | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| Montageaufwand | + | + | + | \emptyset | \emptyset | +++ | \emptyset | \emptyset | \emptyset | \emptyset |
| Integrierbarkeit | +++ | +++ | +++ | \emptyset | \emptyset | +++ | - | - | - | - |

Tabelle 4: Benchmarking

In einem Benchmarkingverfahren wurden alle Systeme untereinander verglichen. Aus der Zusammenfassung des Benchmarkings wird klar ersichtlich, dass der Typ B.a3, die beste Bewertung aufweist. Diese Variante weist im Vergleich vorteilhafte Eigenschaften für die Übersetzung und ein geringes Risiko bei der technischen Umsetzung auf. Hervorzuheben ist die Kompaktheit dieser Variante, durch eine Vollintegration des gesamten Energieumwandlungssystems, die sich in einer guten Transporttauglichkeit und einem geringen Montageaufwand niederschlägt.

AP 9) Projektmanagement, Koordination, Controlling.

Diese Aufgaben reichten vom Projektbeginn bis zum Projektende der Machbarkeitsstudie und lagen im Projektmanagement, in der Koordination und im Controlling. An dieser Stelle ist auch noch zu erwähnen, dass die vorliegende Forschungstätigkeit zu gleich zwei Gemeinschaftserfindungen geführt hat. Europaweite Patente werden für das sogenannte

- *Kompakt-Wasserrad mit vollintegriertem Energieumwandlungssystem und die*
- *Luftspaltnahe Lagerung*

noch im Jänner 2011 am Patentamt angemeldet.

6 Ausblick und Empfehlungen

Das „*Compact-Wasserrad*“ wird mit dieser Produkt-Markenbezeichnung als Wort- und Bildmarke geschützt und in den nächsten Jahren neben der Vielzahl an Turbinen ein eigenes Marktsegment abdecken. Die angewendeten Technologien von der elektrischen Maschine bis zur Lagerung und Übersetzung bewähren sich bereits seit Jahren am Markt und sind trotzdem durch ganz wesentliche Bereiche als vollkommen Neuartig zu betrachten.

Ein Bereich ist die komplette Integration aller notwendigen Anlagenteile für das Energieumwandlungssystem in das Wasserrad selbst, deshalb auch die Bezeichnung „*Compact-Wasserrad*“. Möglich ist dies nur, weil sich der äußere Teil vom Wasserrad um einen fix stehenden inneren Teil des Wasserrades dreht. Denn die Anlage muss von der steuerungstechnischen Seite her auch im Betrieb sicher zugänglich sein und die erzeugte Energie muss natürlich auch abgeleitet werden können.

Ein weiterer Bereich ist die „*Luftspaltnahe Lagerung*“ zwischen Rotor und Stator der elektrischen Maschine. Diese Entwicklung ermöglicht in Zukunft unter bestimmten Voraussetzungen vielleicht sogar eine nur durch das Wasserrad direkt getriebene Maschine.

Das ökonomische Potential am Ende des Berichtszeitraumes!

1. Es ergibt sich ein Kostenvorteil durch den Wegfall der Wasserradwelle:

Da eine Welle wie am Beispiel unserer Referenzanlage mit einer Wasserradbreite von 1,7 m eine Gesamtlänge von an die 3 m aufweist, gibt es nur wenige Industriebetriebe, die in der Lage sind solche Längen zu bearbeiten. Das schnürt den Wettbewerb ein und man ist bei der Herstellung eines Wasserrades neben hohen Kosten für die Anfertigung einer Welle auch mit langen Lieferzeiten konfrontiert. Aus diesem Grund schafft das neue Gesamtsystem mit dem „*Kompakt-Wasserrad*“ ohne Welle Wettbewerbsvorteile vor allem hinsichtlich Zulieferunabhängigkeit.

2. Es ergibt sich ein weiterer Kostenvorteil durch den Wegfall eines mehrstufigen Getriebes:

Bei Anlagen mit höherer Leistung kommen zum Großteil mehrstufige Getriebe zum Einsatz. Preise, Lieferzeiten, Garantie- und Reparaturleistungen unterscheiden sich sehr stark bei unterschiedlichen Produkten und Herstellern bzw. Lieferanten. Der Verschleiß ist über mehrere Jahre hinweg auch eine zu berücksichtigende Größe. Nur eine Übersetzungsstufe ist beim „*Kompakt-Wasserrad*“ integrierter Bestandteil der Konstruktion. Das schafft wiederum bei der Fertigungsdauer wichtige Zulieferunabhängigkeit und Wettbewerbsvorteile. Darüber hinaus müssen keine aufwendigen Getriebeauslegungen unter Berücksichtigung wesentlicher Betriebsfaktoren mit unterschiedlichen Anbietern erarbeitet werden, sondern sind Bestandteil der Konstruktionsplanung vom Wasserrad selbst. Ursprünglich war das Ziel ohne Übersetzungsstufen auszukommen, jedoch kann dieses unter Berücksichtigung der mechanischen und ökonomischen Randbedingungen bis dato nicht erreicht

werden. Diese eine Untersetzungsstufe bringt aber trotzdem einen unbeachteten Vorteil der individuellen Drehzahlanpassung an genormte elektrische Maschinenleistungsabstufungen.

3. Bei den Gesamtinvestitionskosten ergibt sich in Summe ebenfalls ein Kostenvorteil:

Die Baukosteneinsparungen resultieren hier vor allem durch den Wegfall von Kraftwerksgebäude und Maschinenraum. Anlagenteile sind im Sommer und Winter ohne Maschinenraum hohen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt. Trotzdem werden nach wie vor Anlagen ohne Maschinenraum realisiert. Im Vergleich zum „Kompakt-Wasserrad“ muss bei herkömmlichen Anlagen noch immer zumindest eine Einhausungs-Konstruktion samt Fundamentierung für die Antriebseinheit, die elektrische Maschine und die Steuerungseinheit errichtet werden.

4. Durch die Reduktion von Übersetzungsverlusten kommt es zu einer geringfügigen Gesamtwirkungsgradsteigerung:

Der Gesamtwirkungsgrad war in dieser Machbarkeitsstudie ein wichtiger Parameter und bleibt es natürlich für jede weitere Entwicklung. Garantierte Wirkungsgrade sind für potentielle Kunden wichtige Sicherheiten und liegen trotz vieler anderer Vorteile nicht unter, sondern eher geringfügig über jenen herkömmlicher Anlagen.

5. Effizienzsteigerung und somit höhere Jahreserträge:

Die Effizienzsteigerung resultiert durch geringere Stillstandzeiten, da u. a. ein Getriebeölwechsel oder Lagerwartungen wegfallen und Kälteperioden durch das Abwärme speichernde kompakte System optimal ausgenutzt werden können.

6. Reduktion von Betriebskosten:

Betriebskosten verringern sich, da kein periodischer Ölwechsel mehr notwendig ist und wartungsfreie Lager eingebaut sind. Darüber hinaus minimieren sich Versicherungskosten, weil kein umweltgefährdendes Industrie-Öl in ökologisch sensiblen Bereichen von Fließgewässern mehr zum Einsatz kommt.

Alle oben genannten Vorteile sind auch für technisch weniger versierte Kunden nachvollziehbar und unterstreichen das ökonomische Potential vom „Kompakt-Wasserrad“ als effizientes sauberes und erneuerbares Energieumwandlungssystem an unzähligen Standorten mit geringen Fallhöhen und kleineren aber relativ konstanten Wasserdargeboten.

Die gegenwärtige Leistung der installierten Wasserräder beträgt im Mittel 17 kW und kann in Zukunft durch optimierte Anlagen im noch höheren Leistungsbereich liegen. Um 1890 gab es ca.

70.000 Wasserräder und Turbinen zur Wasserkraftnutzung in Deutschland. Im Jahr 1948 wurden in einer Studie für das Deutsche Bundesministerium für Wirtschaft BMWi ca. 6.500 betriebene und weitere ca. 6.500 ausbauwürdige Kleinwasserkraftanlagen genannt. Aktuelle Schätzungen gehen von 20.000 ungenutzten existierenden Wasserrechten nur in Deutschland aus. Das gegenwärtige Potential in Deutschland lt. König 1997, das durch Wasserräder genutzt werden kann, beträgt 500 MW. Nimmt man Österreich und den Großteil der europäischen Länder dazu so multipliziert sich der Wert schätzungsweise auf das Zwanzigfache!

Die weiterführende Forschungs- und Entwicklungsempfehlung zielt auf den Bau des „Kompakt-Wasserrades“ als Prototypen ab. Zusätzlich ist die Erstellung einer Software empfehlenswert, um Wasserräder, die auf diesem System basieren, einfach und schnell zu konzeptionieren. Ein weiterer Teil dieser Software ist die Berechnung des regional spezifischen Wasserdargebotes aus hydrologischen Daten, damit die Jahreserträge solcher Anlagen berechnet und eine plausible Rentabilitätsrechnung für Kunden erstellt werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Müller W., „Die Wasserräder“, 2.Auflage, Verlag Moritz Schäfer, Leipzig, 1939.
- [2] Vogt K., „Elektrische Maschinen. Berechnung“, 4. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1988.
- [3] Köfler H., „Bemessung und Konstruktion von elektrischen Maschinen“, Skriptum zur Vorlesung, TU-Graz 2007.
- [4] Institut für Siedlungswasserwirtschaft RWTH Aachen, „Einsatz eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung“, Kurzbericht zum Forschungsvorhaben, 2006.
- [5] Drews H., „Kleinwasserkraftwerk“, in: „Faustzahlen für die Landwirtschaft“, Hrsg.: KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, 2005.
- [6] Drews H., „Wasserrad mit integriertem Generator“, <http://www.wasserrad-drews.de/dokumente/Exposee2.pdf>
- [7] Müller G., Kauppert K., „Die Wasserräder als hydraulische Kraftmaschinen“, in: Bautechnik 80, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 2003.
- [8] Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, „Nutzung kleinster Wasserkraftpotenziale (<10KW)“, 6. fwu-Workshop: Unterlagen zum Workshop mit Kurzfassung der Beiträge, Siegen, 2006.
- [9] Aschenbrenner F., „High Torque Disc Generator“, http://www.gbl.at/img/Endbericht_High_Torque_Disc_Gen.pdf, 2008.
- [10] Huth G., Urschel S., „Drehzahlveränderbare Pumpenantriebe in permanenterregter AC-Technik“, in: Antriebstechnik, Vereinigte Fachverlage, Band 45, Nummer 6, Seiten 56-61, 2006.
- [11] Huth G., „Permanent-Magnet-Excited AC Servo Motors in Tooth-Coil Technology“, in: IEEE Transactions on Energy Conversion, Band 20, Nummer 2, Seiten 300-307, 2005.

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Dimensionierungsgrundgrößen für die bemessenen Maschinen | 8 |
| Tabelle 2: Überblick aller Kategorien der bemessenen elektrischen Maschinen | 8 |
| Tabelle 3: Kosten der Antriebsvarianten | 13 |
| Tabelle 4: Benchmarking | 18 |

9 **Abbildungsverzeichnis**

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Referenz-Wasserrades und der Maschinendaten für Typ B.a3) mit 50 Hz | 10 |
| Abbildung 2: Details zur luftspaltnahen Lagerung, die a) doppelseitig oder b) einseitig ausgeführt ist | 14 |
| Abbildung 3: Untersuchungsergebnisse | 16 |

10 Anhang

Formelzeichen und Abkürzungen

| | |
|----------------|---|
| a | Radkranztiefe in m bzw. Anzahl der parallelen Zweige pro Strang |
| A | Strombelag in A/m |
| b_N | Nutbreiten in m |
| b_{PM} | Breite der Permanentmagnete in m |
| B | Radbreite in m |
| B_J | Flussdichte im Joch in T |
| B_r | Remanenzflussdichte in T |
| B_δ | Luftspaltflussdichte in T |
| d | Raddurchmesser in m |
| d_{Cu} | Kupferdrahtdurchmesser in m |
| D | Bohrungsdurchmesser der elektrischen Maschine in m |
| f_N | Nennfrequenz in Hz |
| h_J | Höhe des Jochs in m |
| h_N | Höhe der Nut in m |
| h_{PM} | Höhe der Permanentmagnete in m |
| H | Fallhöhe in m |
| i | Übersetzungsverhältnis |
| I_{Str} | Strangstrom in A |
| L_{Fe} | Länge des Eisenpaketes in m |
| m_{aktiv} | Masse des aktiven Teils der elektrischen Maschine in kg |
| m_{Cu} | Kupfermasse in kg |
| m_{Fe} | Eisenmasse in kg |
| m_{Limit} | Limit der aktiven Masse in Vergleich zum Referenzantrieb in kg |
| m_{Rotor} | Masse des Rotors in kg |
| m_{Stator} | Masse des Stators in kg |
| M_N | Nennmoment in Nm |
| δ | Luftspaltlänge in m |
| δ_{Fe}' | Ersatzluftspaltlänge des Eisens in m |
| Θ_μ | Erregungsaufwand für den Luftspalt in A |

| | |
|------------------|---|
| η | Wirkungsgrad in % |
| η_1 | Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Statorverluste in % |
| η_{Cu1} | Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Statorkupferverluste in % |
| η_{ges} | Gesamtwirkungsgrad in % |
| λ | Leistungsfaktor |
| n | Drehzahl in min^{-1} |
| n_N | Nenndrehzahl in min^{-1} |
| $n_{N,Maschine}$ | Drehzahl der elektrischen Maschine in min^{-1} |
| N | Anzahl der Nuten |
| p | Polpaarzahl |
| $P_{N,el}$ | Nennleistung elektrisch in W |
| P_{mech} | mechanische Leistung in W |
| $P_{v,Cu}$ | Kupferverluste in W |
| $P_{v,Fe}$ | Eisenverluste in W |
| q | Lochzahl |
| Q | Blindleistung in var |
| Q_{wasser} | Wassermenge in m^3/s |
| r_{Cu} | Kupferwiderstand in p.u. |
| R_{Cu} | Kupferwiderstand in Ω |
| $R_{Cu,Str}$ | Strangkupferwicklungswiderstand in Ω |
| S | Stromdichte in A/m^2 |
| v_{wasser} | Wassergeschwindigkeit in m/s |
| w_{str} | Windungen der Wicklung |
| x_σ | Streureaktanz der Wicklung in p.u. |
| x_d | Längsreaktanz in p.u. |
| Z_{1N} | Anzahl der Spulen pro Nut |
| Z_{2N} | Anzahl der Windungen pro Spule |
| τ_N | Nutteilung |
| τ_m | Dreh Schub in N/m^2 |
| τ_p | Polteilung in m |
| ζ_N | Nutschlitzfaktor |
| ζ_Z | Zonenfaktor |
| ζ_S | Sehnungsfaktor |

ζ Wicklungsfaktor

Indizes)

1 Stator

2 Rotor

ASM Asynchronmaschine

PMSM Permanenterregte Synchronmaschine

SR Stromrichter

PM Permantenmagnete

IMPRESSUM

Verfasser

Jerne KG

Gerald Jerne
Klopeiner Straße 9
9122 St. Kanzian am Klopeiner See
E-Mail: gerald@jerne.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH