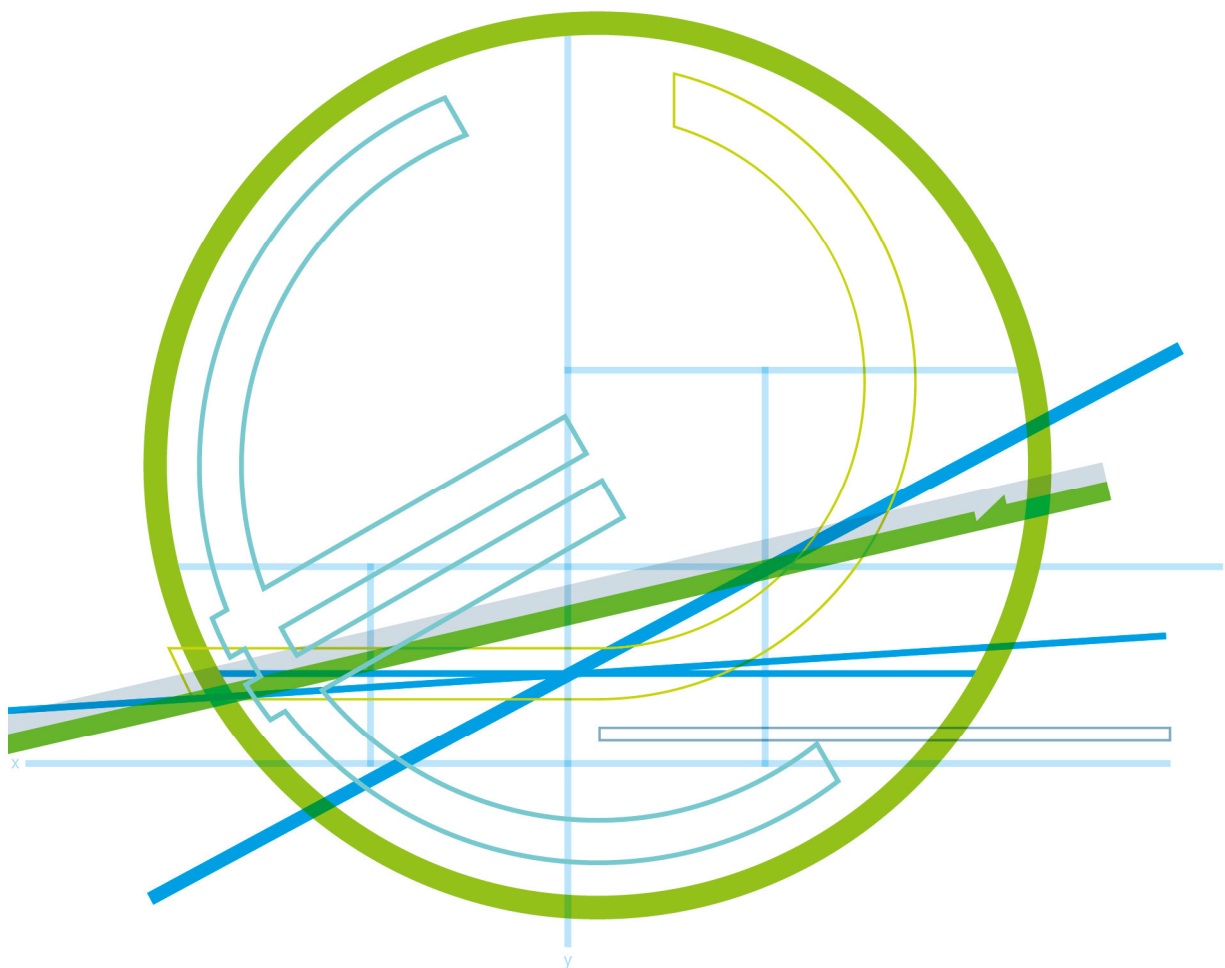


Entwicklung einer modularen, kompakten Pumpturbine für die dezentrale Energiespeicherung



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!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink that reads 'Theresia Vogel' in a cursive script.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Entwicklung einer modularen, kompakten Pumpturbine für die dezentrale Energiespeicherung

Autoren:

TU Wien – Institut f. Energietechnik und Thermodynamik E302

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Christian BAUER

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Eduard DOUJAK

Projektass. Dipl.-Ing. Philipp UNTERBERGER

TU Wien – Institut f. Energiesysteme und Elektrische Antriebe E370-2

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas WOLBANK

Projektass. Dipl.-Ing. Matthias SAMONIG

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	5
2 Inhaltliche Darstellung.....	7
2.1 Modulares Konzept.....	7
2.2 Modulare Pumpturbine.....	8
2.2.1 Spirale.....	9
2.2.2 Umlenker.....	9
2.2.3 Saugrohr.....	10
2.2.4 Laufrad.....	10
2.3 Modularer Motor-Generator.....	11
2.3.1 Halbleitertechnologie.....	11
2.3.2 Umrichter.....	12
2.3.3 Maschine.....	13
2.4 Anwendung.....	14
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	16
4 Ausblick und Empfehlungen.....	16
5 Literaturverzeichnis.....	16
6 Kontaktdaten.....	18

1 Einleitung

Der stetig steigende Anteil an volatiler Erzeugung von Strom durch erneuerbare Energieträger wie Wind und Sonnenenergie, führt zu speziellen Herausforderungen um einen kontinuierlichen Betrieb eines Stromnetzes gewährleisten zu können. In einem solchen Stromnetz muss Erzeugung und Konsum in einem stetigen Einklang stehen. Da dies in den seltensten Fällen gewährleistet ist, muss regulierend eingegriffen werden, um die Netzfrequenz innerhalb eines schmalen Bands halten zu können. Bei überschüssiger Energie im Netz, muss diese gespeichert werden und im umgekehrten Fall schnell wieder zur Verfügung stehen. Hierfür ist die Pumpspeicherung hervorragend geeignet, da sie die einzige marktfähige Speichertechnologie darstellt, die geringe spezifische Kosten mit hohen Zykluswirkungsgraden von 75-80% [1] kombiniert, und dabei auch im großen Maßstab eingesetzt werden kann.

Die Funktionsweise der Pumpspeicherung ist dabei relativ simpel (siehe Abbildung 1). Wenn die Stromproduktion die Nachfrage übersteigt, wird dabei der überschüssige Strom in Form von potentieller Energie gespeichert. Hierfür treibt ein Motor die Pumpe an und Wasser wird vom unteren Speicher in den oberen Speicher gepumpt. Besteht schließlich wieder Bedarf im Netz, wird das Wasser über eine Turbine abgearbeitet, welche den Generator antreibt, wobei wieder Strom ins Netz eingespeist wird.

Laut Untersuchungen der National Hydropower Association (NHA) [3] gibt es weltweit etwa 270 Pumpspeicherkraftwerke, die bereits existieren oder gerade gebaut werden. Ihre Gesamtleistung beläuft sich auf rund 127 000 MW, mit den größten Kapazitäten in Europa, Asien und Nordamerika, die zusammen rund 90% der Gesamtleistung ausmachen. Die Aufteilung der Anzahl an Installationen über den verschiedenen Leistungsklassen ist in Abbildung 2 dargestellt. Wie zu sehen ist, stellen die Bereiche von 100 MW bis 400 MW und 1 GW bis 2 GW die Haupteinsatzgebiete für PSKW dar. Bei genauerer Betrachtung wird klar, dass der Bereich der Kleinwasserkraft (KWK), mit einer installierten Leistung unter

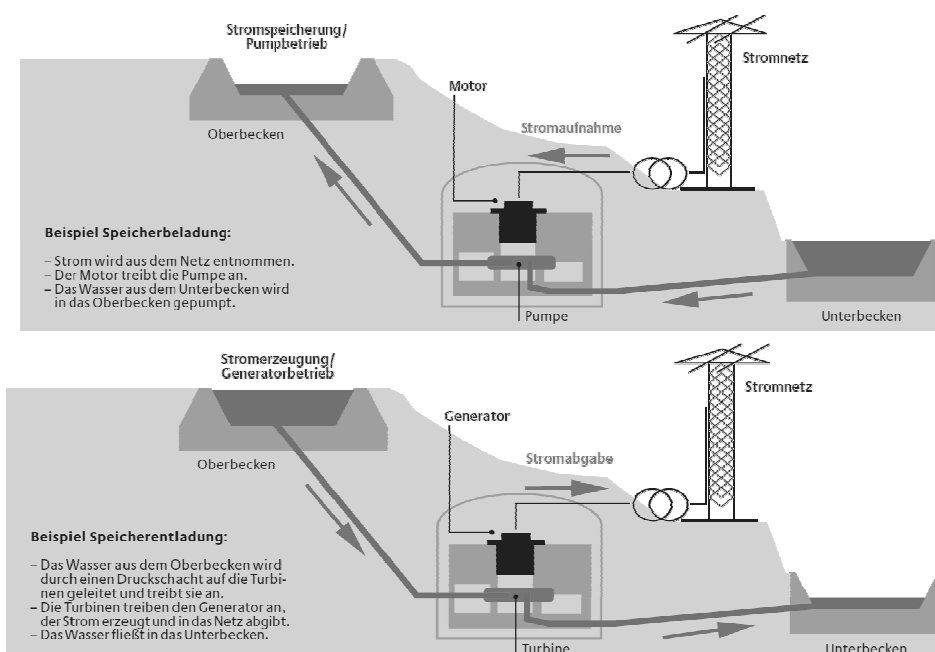


Abbildung 1: Funktionsweise eines Pumpspeicherkraftwerks [2].

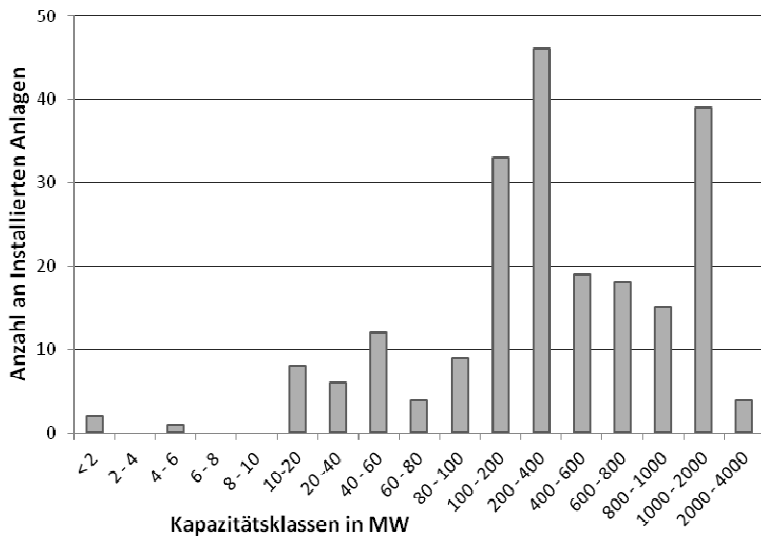


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen der Anzahl an installierten PSKW und der jeweiligen Kapazitätsklasse von 1960 – 2007. Basierend auf den Daten aus [4]

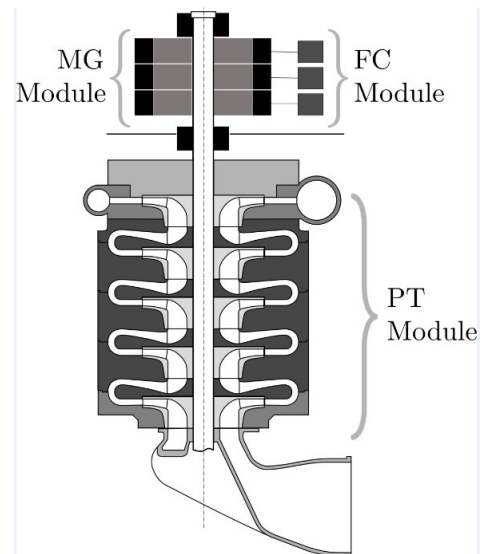


Abbildung 3: Grundkomponenten des modularen Konzepts

20 MW, sowohl in Bezug auf die Anzahl der Anlagen (11) als auch auf den Anteil der installierten Leistung (ca. 125 MW), verschwindend klein ist. Eine mögliche Ursache für diese „Abwesenheit der KWK“ ist auf der ökonomischen Seite zu finden. Ein PSKW, welches im kleinen MW Bereich arbeitet, kann mit einem konventionellen Kraftwerk der höheren Kapazitätsklassen nicht mithalten, wenn die Wirtschaftlichkeit mit einem Preis pro eingespeister kWh bewertet wird.

An der Technischen Universität Wien wurde deshalb im Zuge dieses Projekts, in einer Kooperation des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik und des Instituts für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, ein modulares Pumpturbinenkonzept für die dezentrale Pumpspeicherung entwickelt. Dabei wurde ein Ansatz verwendet, der durch den modularen Aufbau sowohl auf der elektrischen als auch auf der hydraulischen Seite eine Standardisierung der Komponenten und damit einhergehend eine Kostenreduktion ermöglicht. Eine weitere Kostenreduktion soll erreicht werden indem bereits vorhandene Speicherbecken, wie sie beispielsweise in Skigebieten für Beschneizwecke angelegt werden, als Oberwasserspeicher eingesetzt werden.

Im Folgenden wird der gewählte Ansatz in Bezug auf die Modularität beschrieben und auf die Umsetzung auf der hydraulischen und elektrischen Seite eingegangen. Dabei werden die Komponenten und die angewendeten Methoden beschrieben. Abschließend werden noch die Vorteile von dezentralen Anwendungen der Pumpspeichertechnologie diskutiert, Anwendungsmöglichkeiten dargestellt und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf dargestellt.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Modulares Konzept

Ganz allgemein ist ein modulares Design ein Ansatz, welcher eine Baugruppe oder ein System in Untergruppen - sogenannte Module unterteilt. Dabei wird das Gesamtsystem in Funktionsgruppen aufgespaltet und die jeweiligen Modulgrenzen mit den entsprechenden Randbedingungen definiert [5]. Die Hauptvorteile eines solchen Ansatzes sind einerseits die Kostenreduktion durch Standardisierung der Module und entsprechende Fertigung in einer Kleinserie und andererseits eine zusätzliche Kostenreduktion durch schnellere Planungsprozesse bei der Umsetzung.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, wird das modulare Konzept für kleine Pumpturbinen auf drei Maschinengruppen umgesetzt:

- Pump-Turbinen (PT) Module: Die Anpassung an anlagenseitige Randbedingungen wie Förderhöhe, Durchfluss und Leistung erfolgt durch die Wahl der Stufenanzahl der reversiblen Pump turbine. Dabei sind die Grundmodule Saugrohr und Spirale immer vorzusehen und entsprechend die Laufräder mit den benötigten Umlenkern zu wählen (siehe auch Abbildung 4).
- Motor-Generator (MG) Module: Die Leistungsanpassung entsprechend der benötigten Leistung im Pumpmodus geschieht durch die Wahl der Stator- und Rotorscheiben einer Axialflussmaschine (siehe auch Abbildung 4).
- Elektrische Versorgungsmodule: Die elektrischen Module, im speziellen der Frequenzumrichter (FU), sind dem Motor/Generator entsprechend zu wählen.

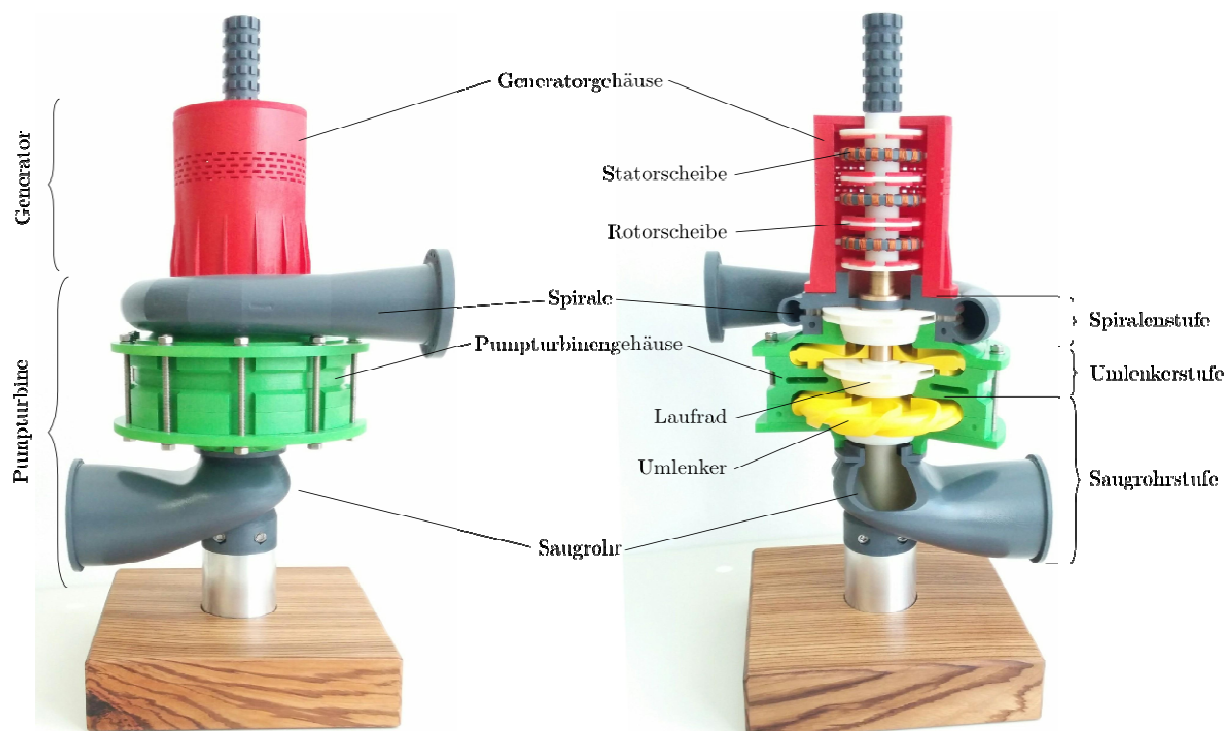


Abbildung 4: 3D Druckmodell und Beschreibung der Komponenten

2.2 Modulare Pumpturbine

Die Grundlage für den Einsatz eines einheitlichen Maschinendesigns für einen erweiterten Anwendungsbereich wie er in Abbildung 5 dargestellt ist, liegt in der Kombination eines Antriebs mit variabler Drehzahl und einer reversiblen Pumpturbine, die in ihrer Stufenzahl variabel ist. Die Variation der Stufenanzahl ermöglicht die Anpassung an anlagenseitige Vorgaben, primär an den geodätischen Höhenunterschied, aber auch an das Speichervolumen und die gewünschte tägliche Einsatzdauer. Erst durch die weitere Anpassungsmöglichkeit der Drehzahl ist dabei sichergestellt, dass sich die Pumpturbine sowohl im Turbinen- als auch im Pumpbetrieb, im Betriebsoptimum, also dem Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad, betreiben lässt.

Die Mehrstufigkeit ermöglicht neben den genannten anlagenseitigen Vorteilen erst die Umsetzung der Modularität auf der Seite der Pumpturbine. Die Umsetzung des modularen Grundgedankens geschieht hierbei durch die Bereitstellung von vier Grundmodulen die schließlich in Kombination und Anzahl an die anlagenseitigen Gegebenheiten und Wünsche angepasst werden. Die Entwicklung der vier Grundmodule:

- Spirale
- Umlenker
- Laufrad
- Saugrohr,

wie sie in Abbildung 4 abgebildet sind, war hierbei die Hauptaufgabe des Antragstellers.

Im Zuge des Projekts gelang es relativ rasch ein Erstdesign der Gesamtmaschine umzusetzen. Dieses Erstdesign konnte schließlich, in detaillierten Modifikationen am strömungstechnischen Profil jeder Komponente, verbessert werden. Hierzu waren aufwendige strömungstechnische Simulationen mittels CFD notwendig. Für das finale Design gelang es schließlich für jede Komponente spezifische Verbesserungen umzusetzen, einerseits auf strömungstechnischer Seite, andererseits auch zum Teil durch Reduktion des Platzbedarfs. Ausgewählte Ergebnisse für die Einzelkomponenten werden im Folgenden dargestellt

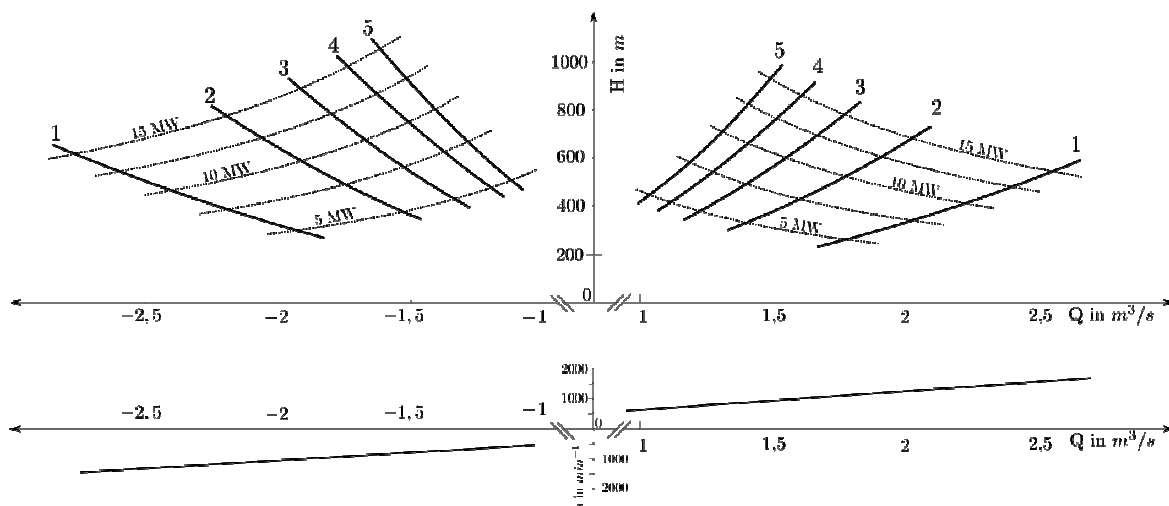


Abbildung 5: Analytisches Kennfeld und zugehörige Drehzahlen für unterschiedliche Stufenzahlen (1-5) im Leistungsbereich von 5MW bis 15MW. Pumpbetrieb $Q > 0$, Turbinenbetrieb $Q < 0$. Abbildung aus [6].

2.2.1 Spirale

Die folgende Ergebnisse und Abbildungen wurden aus der Veröffentlichung [7] entnommen.

Das ursprüngliche Design verwendete eine Leitschaufelverstellung (siehe Abbildung 6) wie sie bei einstufigen Maschinen üblich ist. Um in der Weiterentwicklung eine einfache Bedienbarkeit der Maschine in Verbindung mit verringerter Wartungsarbeit und einem wesentlich kompakteren Design zu ermöglichen, wurde auf diese Verstellmöglichkeit verzichtet. Die Reduktion der Außenabmessungen wird bei Betrachtungen von Abbildung 7 deutlich. Im Zuge des Projekts wurden schließlich unterschiedliche Auslegungskriterien für den Spiralenquerschnittsverlauf untersucht. Namentlich sind diese die Auslegungsmethode nach konstantem Querschnittsverlauf und jene nach konstantem Drall, in den Berechnungsquerschnitten am Umfang des Spirale Grundkreises. Eine detaillierte transiente strömungstechnische Untersuchung wurde angewendet um die entstehenden Druckpulsationen die durch Vorbeilaufen der stehenden und rotierenden Schaufelkomponenten entstehen, zu untersuchen. Abbildung 8 zeigt die Auswirkung dieser Druckpulsationen auf den Druckrückgewinn in der Spirale über einer Laufradrotation von 160° .

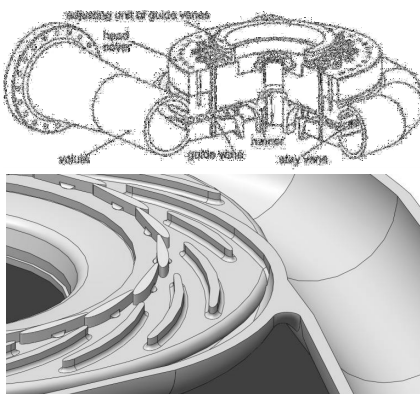


Abbildung 6: Ursprüngliches Design: Spirale mit Leitapparat und Verstelleinrichtung

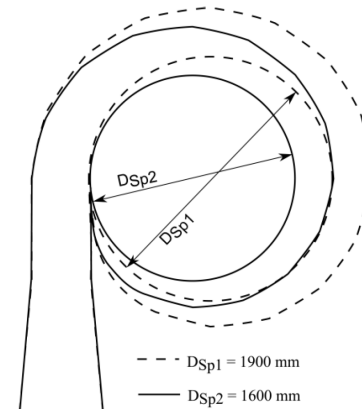


Abbildung 7: Größenvergleiche der Spirale Geometrie mit (1) und ohne (2) Leitapparat

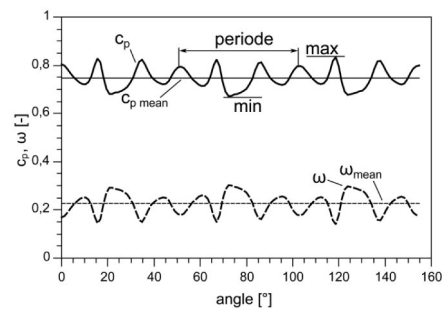


Abbildung 8: Druckrückgewinn CP und Verlustbeiwert ω über eine Laufradrotation von 160° .

2.2.2 Umlenker

Die folgende Ergebnisse und Abbildungen wurden aus den Veröffentlichungen [8] und [9] entnommen.

Ein gutes Umlenkerdesign stellt für einen Entwurfsingenieur eine besondere Herausforderung dar. Hier kommen verzögerte Strömung und mehrmalige Richtungsänderung zusammen. In gezielten CFD-Untersuchungen wurden zwei Auslegungsvarianten gegenübergestellt. Zum einen das klassische Design in dem die Verzögerung der Strömung in einem beschauelten Ringdiffusor geschieht, die Strömung umgelenkt wird und schließlich der Restdrall in den Rückführ-Schaufeln abgebaut wird, siehe auch Abbildung 9. Demgegenüber stand eine Auslegungsvariante in dem die Diffusor-Schaufeln mit den Rückführ-Schaufeln im Umlenkraum verbunden werden und damit einen durchgehenden Kanal ausbilden (Abbildung 10). Die ersten Simulationsergebnisse zeigten eine deutliche Verbesserung der Strömung durch diese Maßnahme wobei die Verluste im Turbinenbetrieb um 20 - 35% reduziert werden konnten. Auch im Pumpbetrieb waren klare Vorteile zu erkennen: Reduktion des Restdralls um 5 - 15% wodurch ein höherer Wirkungsgrad des darauffolgenden Laufrads erzielt werden kann. In Abbildung 11 ist weiter der statische Druckrückgewinn, repräsentiert durch den CP -Wert, dargestellt. Bei genauerer

Betrachtung wird deutlich, dass die beschauelte Geometrie einen besseren Druckrückgewinn über die gesamte mittlere Strömungslänge erzielen kann.

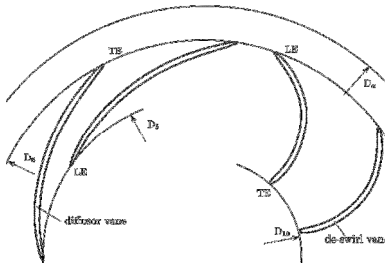


Abbildung 9: Geometrie für die Lösung mit unbeschaueltem Umlenkraum

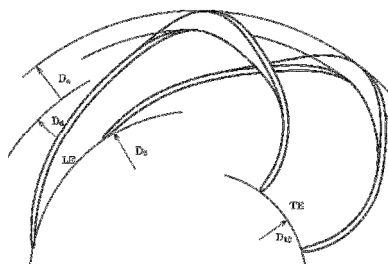


Abbildung 10: Geometrie für die Lösung mit beschaueltem Umlenkraum

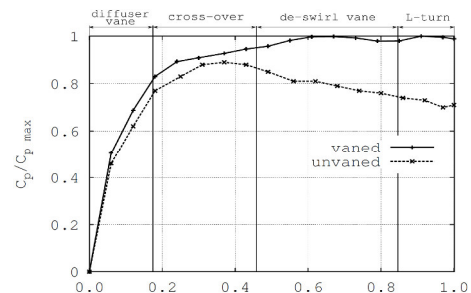


Abbildung 11: CP-Wert Verlauf (Druckrückgewinn) über der bezogenen Lauflänge des Umlenklers

2.2.3 Saugrohr

Die folgende Ergebnisse und Abbildungen wurden aus der Veröffentlichung [10] entnommen.

Das Erstdesign des Saugrohrs verwendete einen Querschnittsverlauf über der Meridianlänge der im Umlenkbereich (90° Bogen) konstant verläuft und die Verzögerung der Strömung im Turbinenbetrieb in einem Horizontaldiffusor stattfindet. Diese Anfangsgeometrie konnte entscheidend kompakter gestaltet werden, wie Abbildung 12 zeigt. Mit der verbesserten Version konnte die gleiche Verzögerung auf einer um 45% reduzierten meridionalen Länge erzielt werden. Dabei resultierte zusätzlich ein geringfügig höherer Druckrückgewinn (c_p -Wert), wie die Kennlinien in Abbildung 13 zeigen.

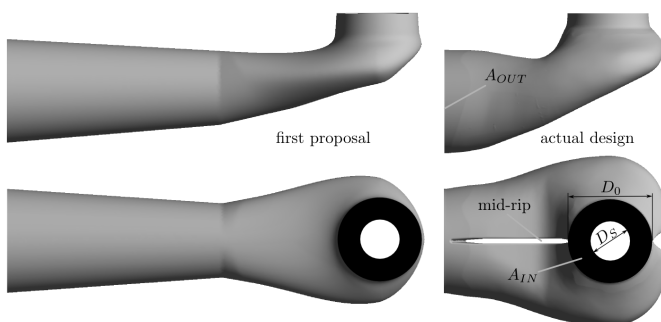


Abbildung 12: Vergleich der untersuchten Geometrieansätze der ursprünglichen- und der finalen Saugrohrgeometrie

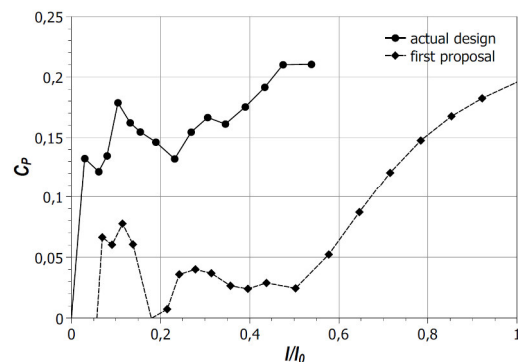


Abbildung 13: Turbinenbetrieb: Vergleich des Druckrückgewinn-Faktors c_p über der mittleren Lauflänge bezogen auf die Länge des Initialdesigns.

2.2.4 Laufrad

Die folgende Ergebnisse und Abbildungen wurden aus der Veröffentlichung [11] entnommen.

In Bezug auf das Laufrad konnten erste Kennlinien für den Turbinen- und Pumpbetrieb simuliert werden. Zusätzlich wurde gezielt der Einfluss des Eintrittswinkels und der Eintrittskantengeometrie im Pumpbetrieb untersucht. In Abbildung 14 sind die verwendete Berechnungsdomain sowie Rand- und Symmetriebedingungen dargestellt. Abbildung 15 zeigt den Einfluss verschiedener Eintrittswinkel für ein Ellipsenverhältnis der Eintrittskante von $ER=6$. Wie deutlich wird, liegen die Werte für die größte Stufenförderhöhe und den höchsten Wirkungsgrad nicht beim gleichen Wert des Eintrittswinkels. Abbildung 16

zeigt weiter den Einfluss des Ellipsenverhältnisses ER der Eintrittskante. Wie deutlich zu erkennen ist, resultieren die Verhältnisse von $ER=2-4$ mit gute Wirkungsgradwerte. Zusätzlich wird deutlich, dass grundsätzlich eine Ellipse besser geeignet ist, als ein Kreis ($ER=1$) und große Ellipsenverhältnisse ($ER>4$) sehr anfällig gegen Fehlanströmung sind.

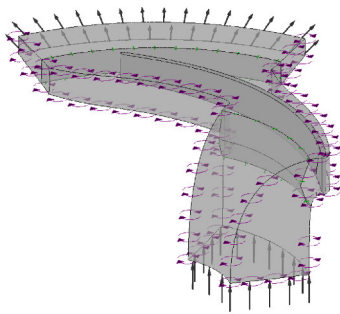


Abbildung 14: Berechnungsgebiet eines Laufradkanals mit Randbedingungen

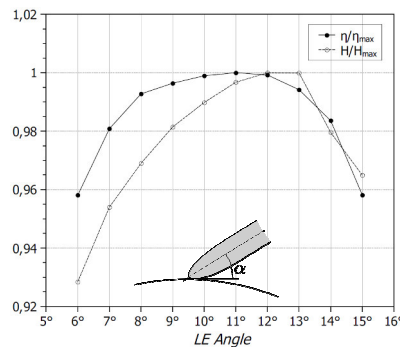


Abbildung 15: Einfluss des Eintrittswinkels auf die Förderhöhe und den Wirkungsgrad des Laufrads

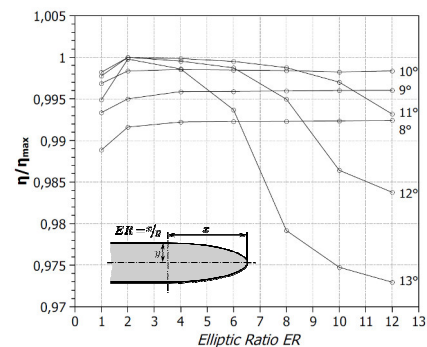


Abbildung 16: Studie zu den Ellipsenverhältnissen an der Eintrittskante für ausgewählte Eintrittswinkel.

2.3 Modularer Motor-Generator

Die vorliegende Studie stellt den Ausgangspunkt zur Beurteilung der Potentiale konventioneller und zukünftiger Antriebstechnologie dar. Begonnen wurde mit dem Vergleich verschiedener Umrichter- und Halbleitertechnologien.

2.3.1 Halbleitertechnologie

Im Leistungsbereich, der im Rahmen des Projekts HYDMOD als interessant erachtet wird (etwa ab 1 MVA), ist der Einsatz von Voltage Source Invertern (VSI) weit verbreitet, wobei bis 1,5 MW (maximal bis 2 MW) von Standardumrichtern gesprochen werden kann. In VSIs werden asymmetrisch sperrende, abschaltbare Elemente (IGBTs, IGCTs) mit antiparallelen Freilaufdioden verwendet. Wie in Abbildung 17 dargestellt, decken diese aus Silizium (Si) bestehenden Leistungsschalter Spannungen von 1,7-6,5 kV bei Strömen zwischen 0,6 und 6 kA ab. Der Hauptvorteil der zukunftssträchtigen SiC- (Silicon Carbide) gegenüber den Si-Halbleitern liegt im größeren Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband wodurch derzeit erhältliche Bauelemente (nur Schottky-Dioden und MOSFETs) eine um den Faktor 10 erhöhte Spannungsfestigkeit gegenüber vergleichbaren Bauelementen in Si-Technologie aufweisen. Die Spannungen und Ströme sind dabei auf $\approx 1,2$ kV und einige 10 A beschränkt. Aus diesem Grund können Leistungen im MW-Bereich nur durch Parallelschaltung einer hohen Anzahl von Bauelementen erreicht werden. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass SiC-Leistungshalbleiter nach dem heutigen Stand der Technik weit von dem Begriff "Standardkomponente" entfernt sind und für die hier betrachtete Anwendung nicht in Frage kommen. Durch die schrittweise Erweiterung der SiC-Leistungsgrenzen werden diese Halbleiter in Zukunft die Produktpalette der Leistungsschalter zu höheren Spannungen hin erweitern (siehe Abbildung 17) und ihre Stromfestigkeit wird dabei in Bereiche vorstoßen, die sie auch für Anwendungen höhere Leistung interessanter machen wird.

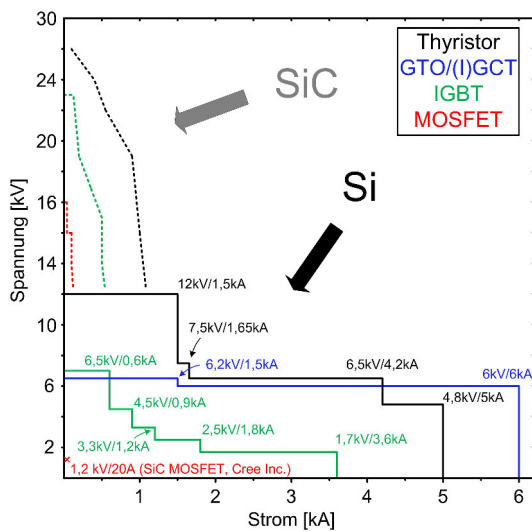


Abbildung 17: Betriebsgrenzen von gängigen (Si) und zukünftigen (SiC) aktiven Hochleistungsschaltern, vgl. [14], [15].

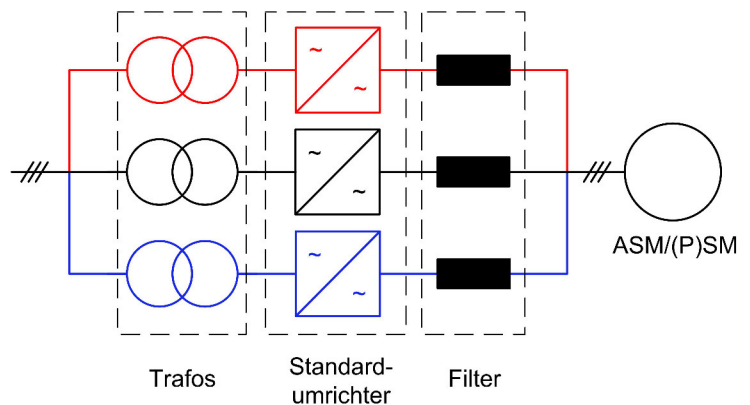


Abbildung 18: Erhöhung der Leistung durch Parallelschaltung dreier Umrichterzweige.

2.3.2 Umrichter

Die Modularität der Einzelkomponenten stellt einen zentralen Punkt des Projektes dar. Wie die gewonnen Erkenntnisse zeigen, kann Modularität auf verschiedenste Weise, sowohl auf Seiten des Umrichters, als auch auf Maschinenseite realisiert werden. Auch konzeptionell einfach aussehende Umsetzungen, wie die Parallelschaltung mehrerer Einzelumrichter um die Gesamtleistung des Antriebssystems zu erhöhen, bergen Schwierigkeiten, die bedacht werden müssen. Aus diesem Grund wurden Überlegungen, wie jene zur Stromaufteilung parallelgeschalteter Umrichter um die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Technologien abwägen zu können.

Bei einem modularen Aufbau durch Parallelschaltung mehrerer separater Umrichter, entsprechend einer galvanischen Kopplung auf der Maschinenseite, muss für die gleichmäßige Leistungsaufteilung auf alle Komponenten Sorge getragen werden. In Abbildung 18 sind drei parallelgeschaltete Umrichterzweige zu sehen. Wie im Folgenden erläutert wird, kann die Kopplung der Umrichter zu den gemeinsamen Anschlüssen auf Netz- bzw. Maschinenseite durch Transformatoren und/oder Koppelinduktivitäten erfolgen.

Wird in jedem der parallelen Zweige ein 3-Level NPC-Umrichter mit dem gleichen synchronen PWM-Schaltmuster verwendet, so erscheint das entstehende System von Außen gesehen als 3-Level Umrichter der dreifachen Leistung. Ein Problem, welches sich dabei ergibt, stellen die nicht exakt gleichen Schaltzeitpunkte in den parallelen Zweigen und die von einander abweichenden Durchlassspannungen der eingesetzten Leistungshalbleiterbauteile dar. Diese Abweichungen haben an den Umrichterausgängen unterschiedliche Potentiale zur Folge, was wiederum zur Entstehung von Kreisströmen führt. Dadurch bedingt kommt es zur ungleichmäßigen Stromaufteilung zwischen den einzelnen Umrichterzweigen, wobei abweichende Schaltzeitpunkte den größten Einfluss zeigen. Die entstehenden Kreisströme können in die folgenden Gruppen unterteilt werden ([17] u. [18]):

- 1) Wechselströme mit der Grundfrequenz des Umrichters,
- 2) Wechselströme mit der Frequenz des PWM-Trägersignals,

3) Gleichstromkomponenten.

Die Gruppen 1 und 2 können durch netz- bzw. maschinenseitige Induktivitäten (siehe „Filter“ in Abbildung 18) reduziert werden. Außerdem ist der Einsatz von Transformatorschaltungen möglich, die aufgrund gegenseitiger Phasendrehung bestimmte Frequenzen eliminieren. Transformatoren bringen zusätzlich den Vorteil der Gleichstromunterdrückung mit sich, haben jedoch den Nachteil eines erhöhten Platzbedarfs und sind zudem kostenintensiv. Auf jeden Fall ist eine geeignete Anpassung der eingesetzten Kopplungsinduktivität bzw. der Streuinduktivität des verwendeten Transformators vorzunehmen.

Für Anwendungen mit hohen Anforderungen hinsichtlich Strom- oder Momentenrippel kann eine beträchtliche Verbesserung des Verhaltens durch die Kopplung mit größeren Induktivitäten ($\approx 0,25$ p.u.) und die gleichzeitige Anwendung von „Interleaving“ erreicht werden. Das Konzept des „Interleaving“ ermöglicht eine Erhöhung der Schaltfrequenz des Gesamtsystems und der Anzahl von diskreten Niveaus in der Ausgangsspannung ($2N+1$ diskrete Spannungsniveaus für N parallele Zweige mit je einem 3-L-NPC-Umrichter). Es kann durch Phasenverschiebung zwischen den PWM Trägersignalen in den einzelnen Zweigen realisiert werden. Durch dieses Vorgehen können unerwünschte Harmonische destruktiv überlagert werden, während die Grundfrequenz verstärkt wird. Am gemeinsamen Kopplungspunkt werden die unerwünschten Harmonischen zwar ausgelöscht bzw. reduziert, jedoch entstehen durch die Phasenverschiebung zwischen den Schaltzeitpunkten wie bereits erwähnt Kreisströme eben dieser Frequenzen zwischen den parallelen Zweigen. Diese Kreisströme können durch Anpassung der Zweiginduktivitäten reduziert werden. Die Induktivitäten werden dabei für die doppelte Schaltfrequenz $2 \cdot f_C$ (dominanter Frequenzanteil auch für Umrichter mit nur einem Zweig und ohne Interleaving) des Umrichters ausgelegt, da Kreisströme höherer Frequenz vernachlässigbar sind. Die gleichmäßige Stromaufteilung im Grundfrequenzbereich (weit unter der Schaltfrequenz) kann durch die Stromregelung der Zweige übernommen werden. Die Schaltfrequenz in den parallelen Zweigen bleibt beim Konzept des „Interleaving“ unverändert oder kann sogar herabgesetzt werden, siehe [19] und [20]. „Interleaving“ ermöglicht somit den Einsatz von langsam schaltenden kostengünstigen Halbleiterelementen, bedarf jedoch auch genauer Synchronisation der einzelnen PWM-Trägersignale.

2.3.3 Maschine

Eine inhärent modulare Maschine stellt die Scheibenläufer Axialflussmaschine dar. Wie Abbildung 19 zeigt, ist bei diesem Maschinentyp eine Anpassung der Leistung durch Variation der eingesetzten Stator- bzw. Rotorscheiben denkbar. Des Weiteren ist in der Abbildung ein Konzept zur Aufteilung der Leistung auf Statormodule (Statorsektoren mit separaten Wicklungssystemen) dargestellt.

Wie bereits realisierte Großprojekte (z.B. Goldisthal mit 340 MVA) zeigen, stellt die doppelt gespeiste Asynchronmaschine ein weiteres interessantes Konzept zur Reduktion der Durchgangsleistung des Umrichters dar, da dieser nur für die Schlupfleistung ausgelegt werden muss, Abbildung 20. Sollte die benötigte Umrichterleistung dennoch zu groß ausfallen, kann die Rotorwicklung, wie bereits erwähnt, aufgeteilt und durch separate Umrichter angespeist werden.

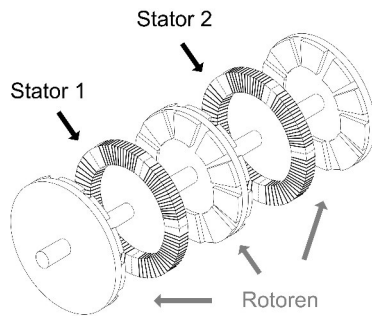


Abbildung 19: Modularität einer PSM Axialflussscheibenläufermaschine, vgl. [15].

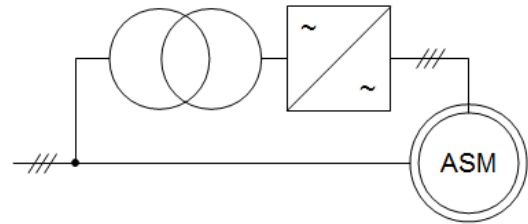
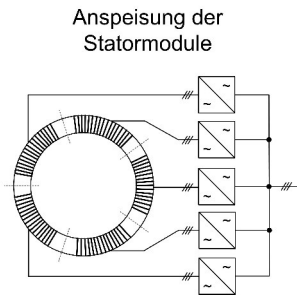


Abbildung 20: Reduktion der Umrichterleistung durch rotorseitige Speisung einer Asynchronmaschine (ASM).

Den Ausgangspunkt für die Auslegung dieser beiden Maschinentypen stellte die Entwurfsgleichung nach Esson dar. Damit konnten die Maschinenabmessungen für die geforderten Randbedingungen (Leistung, Drehzahl, usw.) abgeschätzt werden. In weiterer Folge konnte ein analytischer Entwurfsgang die Umsetzbarkeit bestätigen. Typische Ergebnisse für die Auslegung einer Schleifringläufer-Asynchronmaschine sind in Abbildung 21 dargestellt. Aus der Abbildung ist unter Anderem zu erkennen, dass die realisierbaren Leistungen für die gewählten Maschineparameter (z.B. Spannung und Wicklungsausführung) mit steigender Drehzahl abnehmen. Die geforderten 1000 U/min sind im betrachteten Leistungsbereich jedoch realistisch. Zwei weitere mechanische Grenzen sind durch die Belastbarkeit des verwendeten Materials (Elektroblech) gegeben. Zum einen ergibt die Berücksichtigung der 0.2% Dehngrenze eine maximale Drehzahl von etwa 2000 U/min, zum anderen liegen die notwendigen Maschinenlängen weit unter den Grenzwerten für Betrieb unter der ersten kritischen Geschwindigkeit. Aus den Ergebnissen lässt sich die Realisierbarkeit einer Maschine mit den geforderten Randbedingungen (5MW-15MW und 1000U/min) schlussfolgern. Das Betriebsverhalten dieser Maschine wurde sowohl stationär (Ortskurve des Primärstromes) als auch transient (dynamisches Maschinenmodels in MATLAB/SIMULINK) untersucht.

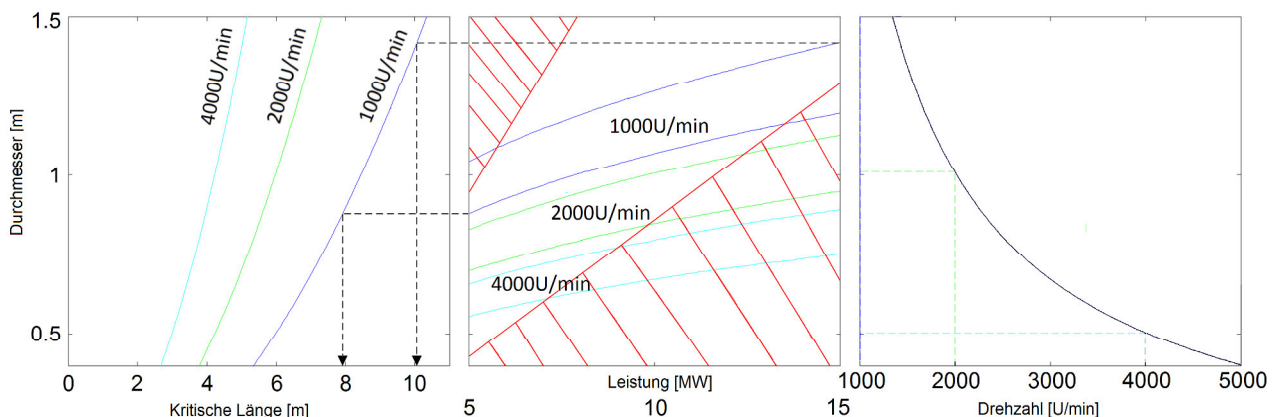


Abbildung 21: **Mitte:** Bereiche typischer Durchmesser für 1000 (blau), 2000 (grün) und 4000 (türkis) U/min und Begrenzung durch den Bereich typischer Strombelastbarkeit (rot). Die oberen/unteren Grenzen der Drehzahlbereiche sind durch den Bereich typischer Längenverhältnisse gegeben. **Links:** Zusammenhang zwischen maximal möglicher Länge und Durchmessers für Betrieb unter der ersten kritischen Geschwindigkeit (strichlierte Linien zeigen max. Längen für 5MW bzw. 15 MW). **Rechts:** Abhängigkeit des mechanisch realisierbaren maximalen Durchmessers von der Drehzahl.

2.4 Anwendung

Wie in Kap. 1 dargestellt spielt die aktuelle Anwendung der Pumpspeichieranlagen mit kleinen Leistungen eine untergeordnete Rolle. Mit dem entwickelten modularen System soll die Lücke im unteren Leistungsbereich von 5-15 MW geschlossen werden. Solch kleine Pumpspeichersysteme bilden die Grundlage für die Integration von erneuerbarer Stromproduktion auf dezentraler Ebene, da ihre Einbindung von der verfügbaren Regelernergie abhängig ist. Zusammen mit den konventionellen Großanlagen werden die dezentralen kleinen Pumpspeichersysteme wichtige Aufgaben übernehmen können, wie Ausgleich lokaler fluktuierender Einspeisung, Lastregulierung aber auch Hochfahren von Inselnetzen nach einem Black Out.

Das Maschinendesign ist darauf ausgelegt um bei großen H/Q Verhältnissen, also bei großen Höhen und kleinen Durchflüssen, betrieben zu werden. Solche großen Höhenunterschiede und kleinen Speicher sind in Skigebieten für Beschneigungszwecke vorhanden. Ihre normale Anwendung beschränkt sich auf Füllen während der Sommermonate und Entleeren innerhalb von einigen Tagen im Winter. Da die installierten Pumpen im Normalfall zu klein sind um das Becken kurzfristig zu füllen, werden solche Speicher, über das Jahr gesehen, meist relativ wenig genutzt. Die Perioden wo die Speicher nicht für Beschneigungszwecke verwendet werden, könnten also für die Anwendung mit einem Pumpspeichersystem genutzt werden. Interne Studien [12] und [13], die außerhalb dieses Projekts durchgeführt wurden, zeigen aktuell fast 300 Anwendungsmöglichkeiten im Leistungsbereich des ausgearbeiteten modularen Konzepts für die Untersuchten Regionen in Österreich und dem benachbarten Südtirol. Einen Auszug der gesammelten Speicherbecken zeigt Abbildung 22.

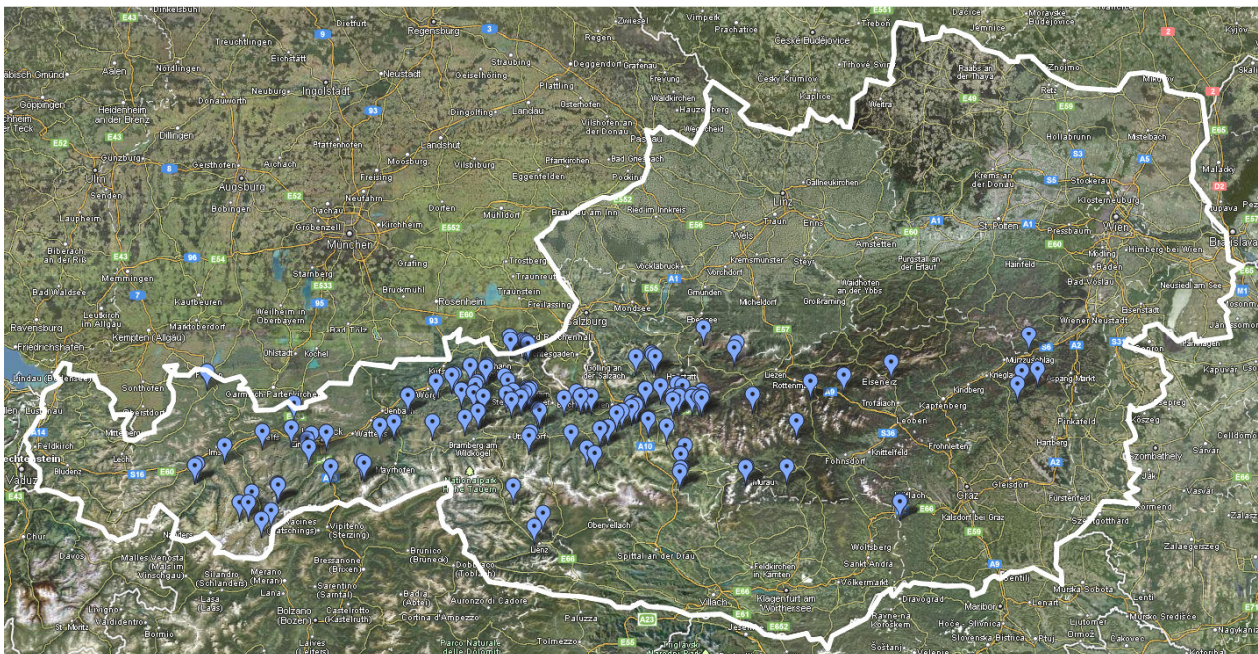


Abbildung 22: Auszug aus den gesammelten Speicherbecken für Beschneigungsspeicher, Kartenmaterial von Google Maps.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Pumpturbinenprojekte im kleinen Leistungsbereich können heute aus ökonomischer Sicht nicht umgesetzt werden. Die spezifischen Investitionskosten für die Maschinen sind noch zu hoch. Hier ist die TU Wien mit der Entwicklung einer modularen Pumpturbine auf dem besten Weg die Lücke im Leistungsbe-
reich unter 80 MW zu schließen. Speziell im Bereich zwischen 5 MW und 15 MW gibt es konkrete An-
wendungsgebiete für die Verwendung vorhandener Strukturen als Oberwasserbecken. Darin liegen auch
die klaren Vorteile gegenüber Großprojekten, da der Platzbedarf sowie der Eingriff in die Natur gering
sind und deshalb mit höherer Akzeptanz und schnelleren Bewilligungsverfahren gerechnet werden kann.

Aufgrund der Preisentwicklung im Bereich der Halbleitertechnologie werden auch Umrichter mit sehr
großen Leistungen günstiger. Dies führt dazu, dass der Kostenvorteil der doppelt gespeisten Asyn-
chronmaschine mit kleinem Umrichter im Rotorstromkreis schwindet und vermehrt auf Konzepte mit
Vollumrichter gesetzt wird. Aus diesem Grund wurde für die Erstellung des Gesamtmodells das Konzept
der Synchronmaschine mit Scheibenläufer gewählt, siehe Abbildung 4 u. Abbildung 19. Jede der 3
Statorscheiben kann von einem eigenen Umrichter gespeist werden, wodurch die bereits erwähnten
Probleme betreffend die Stromaufteilung bei Parallelschaltung dreier Umrichter umgangen werden. Die
gewählte Maschine zeigt auch in besonders anschaulicher Weise das Konzept der Modularität, d.h. Auf-
teilung des Gesamtsystems in Einzelkomponenten (hier austauschbare Stator- und Rotorscheiben bzw.
Umrichter). Diese Modularität bringt eine gewisse Flexibilität und Redundanz mit sich, die nicht zuletzt
auch Einfluss auf die Zuverlässigkeit und die Anpassbarkeit des Systems hat.

In diesem Bericht wurde die Funktionsweise eines Pumpspeicherkraftwerks dargestellt und internationa-
le Statistiken präsentiert um auf die Abwesenheit der kleinen Leistungsklassen hinzuweisen. Schließlich
wurde der modulare Ansatz im Überblick sowie detailliert für die hydraulische und elektrische Seite be-
schrieben.

4 Ausblick und Empfehlungen

Ein sehr wichtiger Punkt für die weiterführende Arbeit an diesem Projekt wäre die Untersuchung der
Pumpturbine in einem hydraulischen Prüfstand. Eine rechnerische strömungstechnische Untersuchung
an den Komponenten ist nicht in der Lage einen solchen Teststand zu ersetzen. Nur in gezielten Unter-
suchungen anhand eines Modells in einem hydraulischen Prüflabor kann das Maschinenverhalten detail-
liert untersucht werden. Die Kenntnis dieses Verhaltens ist für den praktischen Einsatz als Energiespei-
cher von außerordentlicher Wichtigkeit und muss als Voraussetzung für das Erzielen eines praktischen
Nutzens der Arbeit in diesem Projekt gesehen werden.

Bedingt durch die reduzierten Kosten der Leistungselektronik geht der Trend im Bereich Wasserkraft in
Richtung des Einsatzes von Umrichtern großer Leistungen. Dies bedeutet, dass der Kostenvorteil dop-
pelt-gespeister Konzepte schwindet und vermehrt auf Full-size Umrichter gesetzt wird. Da diese Systeme
für die volle Leistung ausgelegt sind, bieten sie auch die Möglichkeit der Regelung über den gesam-
ten Drehzahlbereich, während die Drehzahlregelung bei doppelt-gespeisten Konzepten zumeist auf ei-
nen Bereich von maximal $\pm 30\%$ beschränkt ist.

Technologien wie Siliziumcarbid bieten aufgrund besserer physikalischer Eigenschaften interessante Alternativen zu konventionellen Siliziumhalbleitern, benötigen aber noch einiges an Entwicklungsarbeit um bei schon jetzt vorhandener, deutlich erhöhter Spannungsfestigkeit auch genügend Stromführungsvermögen mitzubringen.

Die Modularität auf Seiten des elektrischen Antriebssystems lässt sich auf vielfältige Art sowohl auf der Umrichter- als auch auf der Maschinenseite realisieren. Aufgrund der angestrebten Kostenreduktion, weisen im Hinblick auf einen in Zukunft eventuell zu realisierenden Prototypen jene Varianten großes Potential auf, die möglichst wenig Entwicklungsarbeit erfordern. Dies ist vor allem durch konventionelle Maschinentypen gegeben, für die im Bereich der Wasserkraft schon umfassende Erfahrungswerte vorhanden sind, sprich Radialflussmaschinen. Der hier eingesparte Entwicklungsaufwand sollte vielmehr in die Feinabstimmung des Interfaces zwischen Hydraulik und Elektrik und die Maschinenregelung investiert werden, um ein optimales Ergebnis im Hinblick auf die Energieausbeute erzielt zu können.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Vannemann, P., Gruber, K. H., Haaheim, H. U., Kunsch, A., Sistenich, H.-P., and Thoni, H.-R. Pumped Storage Plants - Status and Perspectives. VGB PowerTech, 4 (2011), 32–38.
- [2] DENA - Deutsche Energie Agentur. Pumpspeicherwerke und ihr Beitrag zum Ausbau erneuerbarer Energien. Onlineversion: http://www.pumpspeicher.info/fileadmin/user_upload/dena_Broschuere_Pumpspeicher.pdf, 20.11.2014
- [3] NHA: Challenges and Opportunities for New Pumped Storage Development, 2012 (http://hydro.org/wp-content/uploads/2012/07/NHA_PumpedStorage_071212b1.pdf, Abruf 12.12.2012).
- [4] Inage Shin-Ichi: Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids, OECD/IEA, 2009
- [5] Gupta M., Spiridon, M., Melet, L. Schubert, A.: Bearing standardization – a modular design approach in hydro products. In Proceedings of the Hydro 2012, Wellington: Aqua~Media International, 2012.
- [6] E. Doujak, P. Unterberger, C. Bauer, M. Samonig: "Modular Concept for Decentralised Pump Storage Systems A Small Hydro Approach"; Vortrag: 14th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, Hawaii, USA; 27.02.2012 - 02.03.2012; in: "14th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery", Technische Universität Darmstadt, (2012), 8 S.
- [7] E. Doujak, P. Unterberger, P. Steiner, C. Bauer: "Numerical Investigation on the spiral case of a fully variable speed multistage pump turbine"; Vortrag: ISROMAC 15, Honolulu, Hawaii, USA; 24.02.2014 - 28.02.2014; in: "15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery", (2014), 10 S.
- [8] E. Doujak, P. Unterberger, M. Weltzl, C. Bauer: "Numerical investigation of the refeeding channel of a multistage high-head pump-turbine"; Vortrag: Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'12), Budapest; 04.09.2012 - 07.09.2012; in: "Conference Proceedings", (2012), S. 772 - 779.
- [9] P. Unterberger, E. Doujak, C. Bauer: "Numerical Investigation on a pump turbine stage with fully vaned return-channel geometry"; Vortrag: ISROMAC 15, Honolulu, Hawaii, USA; 24.02.2014 - 28.02.2014; in: "15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery", (2014), 8 S.

- [10] E. Doujak, P. Unterberger, C. Bauer: "Numerical Simulation of Multistage Pump-Turbine Components"; Vortrag: Hydroturbo 2012, Brno; 25.09.2012 - 27.09.2012; in: "Hydroturbo 2012", (2012), S. 3 - 13.
- [11] E. Doujak, P. Unterberger, C. Bauer: "Design concept of a modular multistage pump-turbine"; Vortrag: Hydro 2012, Bilbao; 29.10.2012 - 31.10.2012; in: "Innovative Approaches to Global Challenges", (2012), 10 S.
- [12] Gadermaier, G. Potentialstudie über die Verwendung von Beschneigungsspeicherseen als Oberwasser für Pumpspeichieranlagen. Bachelorarbeit, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2014
- [13] Kettler, C. Pumpspeicherkraftwerke mit Beschneigungsseen. . Bachelorarbeit, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, TU Wien, 2014
- [14] Chattopadhyay, A.K.: "Alternating Current Drives in the Steel Industry," IEEE Industrial Electronics Magazine, pp. 30-42, December 2010.
- [15] Zhang, Q., Callanan, R., Das, M.K., Ryu, S.-H., Agarwal, A.K., and Palmour, J.W.: "SiC Power Devices for Microgrids," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 12, pp. 2889-2896, 2010.
- [16] Caricchi, F., Crescimbeni, F. and Honorati, O.: "Modular Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Ship Propulsion Drives," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 673-679, 1999.
- [17] M. Hashii, K. Kousaka and M. Kaimoto, "New Approach to a High-Power GTO PWM Inverter for AC Motor Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, no 2, pp. 263-268, 1987.
- [18] T. Yoshikawa, H. Inaba and T. Mine, „Analysis of Parallel Operation Methods of PWM Inverter Sets for an Ultra-High Speed Elevator," Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 2, pp. 944-950, 2000.
- [19] J. Holtz, W. Lotzkat and K.-H. Werner, „A High-Power Multitransistor-Inverter Uninterruptable Power Supply System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 3, no. 3, pp. 278-285, 1988.
- [20] S. Schröder, P. Tenca, T. Geyer, P. Soldi, L. J. Garcés, R. Zhang, T. Toma and P. Bordinon, "Modular High-Power Shunt-Interleaved Drive System: A Realization up to 35 MW for Oil and Gas Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 2, pp. 821-830, 2010.

6 Kontaktdaten

Projektleiter:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Christian Bauer
Institut f. Energietechnik und Thermodynamik,
E302, TU Wien
Getreidemarkt 9, E302, BA – 4. Stock
Tel. +43(0)1/58801-302500
Fax +43(0)1/58801-302399
<http://www.ite.tuwien.ac.at/>

Kooperationspartner:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.Thomas Wolbank
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
E370-2, TU Wien
Gußhausstrasse 25-29/370-2, 1040 Wien
Tel: +43-1-58801-37001
Fax: +43-1-58801-37099
<http://www.ieam.tuwien.ac.at/>

IMPRESSUM

Verfasser

Projektleiter: Christian Bauer
Institut f. Energietechnik und
Thermodynamik, E302, TU Wien
Getreidemarkt 9, E302, BA – 4. Stock
Tel. +43(0)1/58801-302500
Fax +43(0)1/58801-302399
Web: <http://www.ite.tuwien.ac.at/>

Kooperationspartner

Thomas Wolbank
Institut für Energiesysteme
und Elektrische Antriebe
E370-2, TU Wien
Gußhausstrasse 25-29/370-2, 1040 Wien
Tel: +43-1-58801-37001
Fax: +43-1-58801-37099
Web: <http://www.ieam.tuwien.ac.at/>

AutorInnen

TU Wien – Institut f. Energietechnik und
Thermodynamik E302
– Christian BAUER
– Eduard DOUJAK
– Philipp UNTERBERGER

TU Wien – Institut f. Energiesysteme und
Elektrische Antriebe E370-2
– Thomas WOLBANK
– Matthias SAMONIG

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: 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.

Weder der Klima- und Energiefonds noch
die Forschungsförderungsgesellschaft
(FFG) sind für die Weiternutzung der hier
enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH