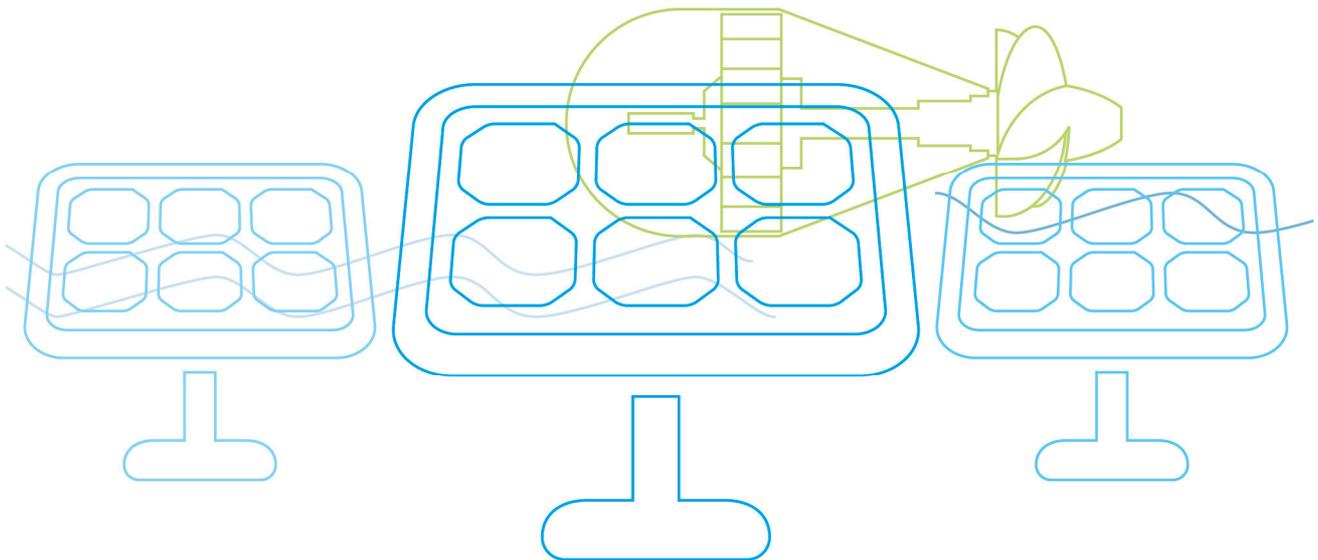




Differenzialantrieb

Elektrischer Differenzialantrieb für eine
3MW Windkraftanlage



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.

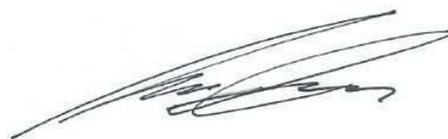
Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische 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

Abbildungsverzeichnis	2
Kurzfassung	3
Abstract	4
1 Einleitung	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Schwerpunkt des Projektes	6
1.3 Einordnung in das Programm	6
1.4 Aufbau und Methodik der Arbeiten	6
2 Inhaltliche Darstellung	8
2.1 Arbeitspaket 1 – Engineering	8
2.1.1 Systemauslegung Differenzialgetriebe	8
2.1.2 Detaillierte Programmierung eines dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab	8
2.1.3 Systemauslegung Differenzial-Antrieb (Servoantrieb)	10
2.1.4 Spezifikation Mittelspannungs-Synchrongenerator	11
2.1.5 Detailauslegung Differenzialgetriebe	11
2.1.6 Programmierung Software	12
2.1.7 Engineering Prüfstände	13
2.1.8 Unterstützung eines Windkraftanlagenherstellers bezügl. Adaption einer WKA um das Differenzialsystem einbauen zu können	14
2.2 Arbeitspaket 2 – Bau Forschungsanlagen	15
2.2.1 Lieferantenabstimmung	15
2.2.2 Beschaffung	15
2.2.3 Montage	15
2.3 Arbeitspaket 3 – Prüfstandsläufe	16
2.3.1 Werkstests Servomotor	16
2.3.2 Werkstests Differenzialgetriebe	16
2.3.3 Systemtest	17
2.3.4 Lebensdauertest	17
2.4 Arbeitspaket 5 - Auswertung der Tests und Update der Engineering-Tools	18
2.4.1 Auswertung der Messungen/Anpassung des dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab	18
2.4.2 Re-design der Getriebeteile	23
2.4.3 Update der Spezifikationen/Update des Source-Codes und der Betriebsanleitung der Software	23
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	24
3.1 Energiestrategische Ziele:	24
3.2 Systembezogene Ziele:	24
3.3 Technologiestrategische Ziele:	25
4 Ausblick und Empfehlungen	26
4.1 Verwertung	26
4.2 Markt	26
4.3 Empfohlene weitere Entwicklungsarbeiten auf Basis der Ergebnisse:	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dynamisches Modell Matlab _____	9
Abbildung 2: Dynamisches 3D-Modell Excite _____	9
Abbildung 3: Cambell Diagramm _____	9
Abbildung 4: Simulationsergebnis _____	10
Abbildung 5: Ein Ergebnis der dynamischen Analyse des Servomotors in Verbindung mit dem Differenzialgetriebe und dem Generator _____	10
Abbildung 6: 3D-Darstellung des elektromechanischen Teils des Differenzialsystems _____	11
Abbildung 7: DataViewer in Version 1.1.1 mit real aufgezeichneten Prüfstandsdaten _____	13
Abbildung 8: Prüfstandsaufbau _____	14
Abbildung 9: 3MW Prüfstand _____	14
Abbildung 10: Montage Stirnradstufe/Schmierölpumpe _____	15
Abbildung 11: Anbau des Synchrongenerator an das Differenzialgetriebe _____	16
Abbildung 12: Messaufbau bei KEB _____	16
Abbildung 13: Prüfstand in der Montagehalle der SET _____	17
Abbildung 14: Tragbild Planetenrad _____	18
Abbildung 15: Vergleich der Drehzahlen Messung vs. Simulation _____	19
Abbildung 16: Servodrehzal Zoom _____	19
Abbildung 17: Drehmoment Servowelle _____	20
Abbildung 18: Sprungantwort Drehmoment (1) _____	20
Abbildung 19: Sprungantwort Drehmoment (2) _____	21
Abbildung 20: Reaktionszeit des Systems im Falle einer Sprungantwort _____	21
Abbildung 21: Verhalten des System bei Netzfehlern _____	22
Abbildung 22: Wirkungsgradverlauf beider Konzepte im Vergleich _____	23
Abbildung 23: Global Annual MW Added by Turbine Size _____	27

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation:

Windkraftwerke gewinnen zunehmend an Bedeutung. Dies wiederum führt zu einerseits neuen Standards bezüglich Stromqualität und andererseits zu immer größeren drehzahlvariablen Windkraftanlagen (v.a. auch für Offshore-Anwendungen). Eine optimale Lösung im Hinblick auf Stromqualität, Wirkungsgrad und Kosten stellt der Einsatz von direkt netzgekoppelten Mittelspannungs-Synchrongeneratoren dar. Die Ergebnisse einer Vorstudie zeigen entscheidende Vorteile im Vergleich zu konventionellen Triebstranglösungen bzw. am Markt verfügbaren Differenzialsystemen.

Inhalte und Zielsetzung:

Gegenstand der Entwicklung war ein elektromechanisches Differenzialsystem welches zu Forschungszwecken so konzipiert und gefertigt wurde, dass es zwischen Hauptgetriebe und Generator einer konventionellen 3MW Windkraftanlage montierbar ist, um kommerziell verfügbare Windkraftanlagen ohne wesentliches Redesign als Anlage nutzen zu können. Das im Zuge dieses Forschungsprojektes entwickelte Differenzialsystem wurde an einem 3MW-Prüfstand getestet und optimiert.

Methodische Vorgehensweise:

Das Entwicklungsprojekt bestand aus folgenden Arbeitspaketen: Engineering, Fertigung Prototyp, Prüfstandläufe, Auswertung der Tests und Updates der Engineering-Tools.

Quantitative Ergebnisse:

zertifizierbare Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für das Differenzialsystem am Prüfstand getestetes und optimiertes dynamisches Modell des Triebstranges
ein für das Anlagenlasten-Berechnungsprogramm integrierbares Simulationsmodell des Differenzialsystems
Testanlage und Betriebssoftware für Prüfstand und Windkraftanlage
Testergebnisse Prüfstand

Qualitative Ergebnisse:

Das elektromechanische Differenzialsystem übertrifft die Stand-der-Technik-Konzepte in allen relevanten Punkten wie Wirkungsgrad, Kosten, Stromqualität und Baugröße

Nutzung der Ergebnisse:

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung des Systems, welches in 2012/13 in eine Windkraftanlage implementiert und in Feldtests erprobt wird.

Abstract

Initial Situation/Motivation

Wind turbines are rapidly gaining in importance. As a result, new standards governing power quality are emerging and variable speed WECs are becoming larger and larger (in particular for offshore applications). An ideal solution in terms of power quality, efficiency and cost is using medium-voltage, synchronous generators connected directly to the grid. The results of a preliminary study show that they have key advantages over conventional drive train solutions and the differential systems currently available on the market.

Content and Objective

The subject of the development is an electro-mechanical differential system to be designed and manufactured for research purposes in such a way that it can be installed between the main gear box and generator of a conventional 3 MW wind turbine. This will enable commercially available WECs to be used without a major redesign being required. The differential system developed in the course of the research project can then be evaluated on a test bed and consequently optimized.

Methodical Procedure

The following work packages have been defined: engineering, building the research turbine, test bed testing, test evaluation and engineering tool updating.

Anticipated Results

- Certifiable calculation and design documentation for the differential gear box and differential drive
- Dynamic model of the drive train tested and optimized both on the test bed and the WEC
- A simulation model of the differential system that can be integrated in the WEC load calculation program
- Test turbine for the test bench and WEC
- Differential system control software integrated in the electric differential drive's converter
- Test results for the test bench and WEC

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Windkraftwerke gewinnen zunehmend an Bedeutung als Elektrizitätserzeugungsanlagen. Dadurch erhöht sich kontinuierlich der prozentuale Anteil der Stromerzeugung durch Wind. Allen Anlagen gemeinsam ist die Notwendigkeit einer variablen Rotordrehzahl, einerseits zur Erhöhung des aerodynamischen Wirkungsgrades im Teillastbereich und andererseits zur Regelung des Drehmomentes im Antriebsstrang der Windkraftanlage. Letzteres zum Zweck der Drehzahlregelung des Rotors in Kombination mit der Rotorblattverstellung.

Derzeit sind großteils Windkraftanlagen im Einsatz, welche diese Forderung durch Einsatz von drehzahlvariablen Generator-Lösungen in der Form von sogenannten doppelt-gespeisten Drehstrommaschinen bzw. permanentmagneterregte Synchrongeneratoren in Kombination mit Niederspannungs-Frequenzumrichtern erfüllen. Diese Lösungen haben jedoch den Nachteil, dass

- (a) das elektrische Verhalten der Windkraftanlagen im Fall einer Netzstörung nur bedingt den Anforderungen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen erfüllt,
- (b) die Windkraftanlagen nur mittels Transformatorstation an das Mittelspannungsnetz anschließbar sind und
- (c) die für die variable Drehzahl notwendigen Frequenzumrichter sehr leistungsstark und daher eine Quelle für Wirkungsgradverluste sind.

Diese Probleme können durch den Einsatz von fremderregten Mittelspannungs-Synchrongeneratoren gelöst werden. Hierbei bedarf es jedoch alternativer Lösungen um die Forderung nach variabler Rotor-Drehzahl bzw. Drehmomentregelung im Triebstrang der Windkraftanlage zu erfüllen. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Differentialgetrieben welche durch Veränderung des Übersetzungsverhältnisses bei konstanter Generatordrehzahl, eine variable Drehzahl des Rotors der Windkraftanlage erlauben.

Die Nachteile bekannter, am Markt verfügbarer Ausführungen von Differenzialsystemen sind einerseits hohe Verluste im Differential-Antrieb bzw. andererseits bei Konzepten die dieses Problem lösen, komplexe Mechanik und damit hohe Kosten. Bei hydrostatischen Lösungen ist darüber hinaus die Lebensdauer der eingesetzten Pumpen ein Problem bzw. ein hoher Aufwand bei Anpassung an extreme Umgebungsbedingungen erforderlich.

Generell ist festzustellen, dass die gewählten Nenn-Drehzahlbereiche entweder für die Ausregelung von Extrembelastungen zu klein oder für einen optimalen Energieertrag der Windkraftanlage zu groß sind.

Aufgabenstellung im Rahmen des Projektes war daher die Entwicklung eines hochdynamischen, elektromechanischen Differenzialsystems, zur Realisierung der für z.B. Windkraftanlagen notwendigen variablen Rotordrehzahl.

1.2 Schwerpunkt des Projektes

Schwerpunkt des Forschungsprojektes war die Entwicklung, Fertigung und Test eines hochdynamischen, elektro-mechanischen Differenzialsystems für Energiegewinnungsanlagen, insbesondere für Windkraftanlagen. Die wesentliche Entwicklungsarbeit lag in der Entwicklung des Differenzialgetriebes inkl. –Antrieb und in der Systemsteuerung und der detaillierten Vermessung und Untersuchung des Systems am Prüfstand.

Folgende wesentliche Projektergebnisse wurden erzielt:

- zertifizierbare Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Differenzialgetriebe und Differenzial-Antrieb.
- ein am Prüfstand getestetes und optimiertes dynamisches Modell des Triebstranges, als Basis für (a) die Simulation sämtlicher Betriebszustände der Windkraftanlage und (b) die Auslegung der Regelungs-Algorithmen.
- ein für das Anlagenlasten-Berechnungsprogramm (z.B. „Bladed“) integrierbares Simulationsmodell des Differenzialsystems.
- Testanlage (Getriebe und elektrischer Antrieb) für Prüfstand.
- In den Umrichter des elektrischen Differenzial-Antriebes integrierte Betriebssoftware des Differenzialsystems.
- Testergebnisse Prüfstand (u.a. Funktion der Schmierung, Verzahnungs-Tragbilder, Wirkungsgrade, Vibrationsmessungen, Verhalten des Systems bei Extremzuständen wie Not-Stop, Netzkurzschluss und dergleichen).

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt „Differenzialantrieb – Elektrischer Differenzialantrieb für eine 3MW Windkraftanlage“ wird in das Themenfeld „Sonstige erneuerbare Energien“, Themenpunkt „Windkraftanlagen“ als „experimentelle Entwicklung“ eingegliedert.

1.4 Aufbau und Methodik der Arbeiten

Das Projekt bestand aus den folgenden Arbeitspaketen:

- Engineering mit folgenden Teilbereichen:
 - Systemauslegung Differenzialgetriebe
 - Detaillierte Programmierung eines dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab
 - Systemauslegung Differenzial-Antrieb (Servoantrieb)
 - Spezifikation Mittelspannungs-Synchrongenerator
 - Detailauslegung Differenzialgetriebe
 - Programmierung Software

- Engineering Prüfstände und Feldtests
- Unterstützung eines Windkraftanlagenherstellers bezüglich Adaption einer Windkraftanlage, um elektromechanisches Differenzialsystem einbauen zu können mit:
 - Bau Forschungsanlage mit folgenden Teilbereichen:
 - Lieferantenabstimmung
 - Beschaffung
 - Montage
 - Prüfstandsläufe mit folgenden Teilbereichen:
 - Werkstests Servoantrieb
 - Werkstests Differenzialgetriebe
 - Systemtest
 - Lebensdauertest
 - Auswertung der Tests und Update der EngineeringTools mit folgenden Teilbereichen:
 - Auswertung der Messungen
 - Anpassung des dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab
 - Re-design der Getriebeteile
 - Update der Spezifikationen
 - Update des Source-Codes und der Betriebsanleitung der Software

Das elektromechanische Differenzialsystem wurde zu Forschungszwecken so entwickelt und gefertigt, dass es zwischen Hauptgetriebe und Generator einer konventionellen 3MW Windkraftanlage montierbar ist. Dadurch konnte das im Zuge dieses Forschungsprojektes entwickelte Differenzialsystem sehr effizient und v.a. praxisnahe am Prüfstand getestet und optimiert werden.

Darüber hinaus dient die Forschungsanlage als Referenzanlage, an der man (a) Langzeiterfahrungen sammeln und (b) welche man potentiellen Kunden vorführen kann.

Die aus diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Verifizierung der in der Vorstudie gewonnenen Ergebnisse, und werden in die Simulation und die Entwicklung eines für die Serie optimierten Differenzialsystems fließen.

2 Inhaltliche Darstellung

In diesem Abschnitt werden die erarbeiteten Inhalte der einzelnen Arbeitspakete im Detail beschrieben:

2.1 Arbeitspaket 1 – Engineering

2.1.1 Systemauslegung Differenzialgetriebe

Die Auslegung des Systems bestehend aus:

- Festlegung der Drehzahl-/Leistungsbereiche
- Vorauslegung der Lastkollektive und Abstimmung mit „EES Gear“
- Vordimensionierung von Verzahnung und Lagerung mit der Berechnungssoftware KissSys
- Definition des Schmierungs- und Lagerungskonzeptes
- Festlegung Sicherheitskonzept
- daraus resultierende Grob-Spezifikation der Anforderungen an den Servoantrieb

Die technischen Parameter für den 3MW-Prototyp sind:

WKA-Rotordrehzahl	10,8 rpm 14,9 rpm 15,7 (17,5) rpm
Nennleistung Synchrongenerator	2,750 kW
Nennspannung Synchrongenerator	10 kV
Nennleistung Differenzial-Antrieb	390 kW (250 kW im Nennpunkt)
Nenn Drehmoment Differenzial-Antrieb ...	2 kNm
Nennspannung Differenzial-Antrieb	690 V

2.1.2 Detaillierte Programmierung eines dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab

Ein dynamisches Modell wurde in beiden Softwarepaketen Matlab/Simulink und „Excite“ erstellt und aufeinander abgestimmt.

Folgende Darstellung zeigt die Übersicht über das Matlab-Modell.

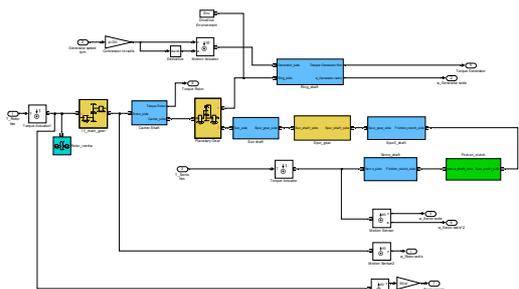


Abbildung 1: Dynamisches Modell Matlab

Darüber hinaus wurde planmäßig ein 3D Mehrkörper-Simulationsmodell in Excite erstellt. Folgende Darstellungen zeigen das Modell und das daraus resultierende Campbell-Diagramm für die Bestimmung der kritischen Drehzahlen.

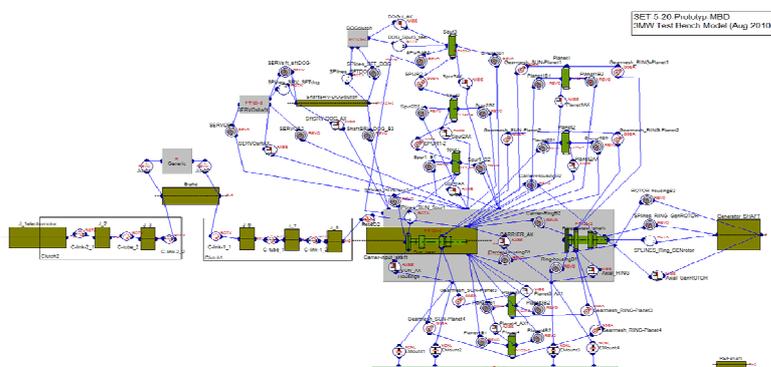


Abbildung 2: Dynamisches 3D-Modell Excite

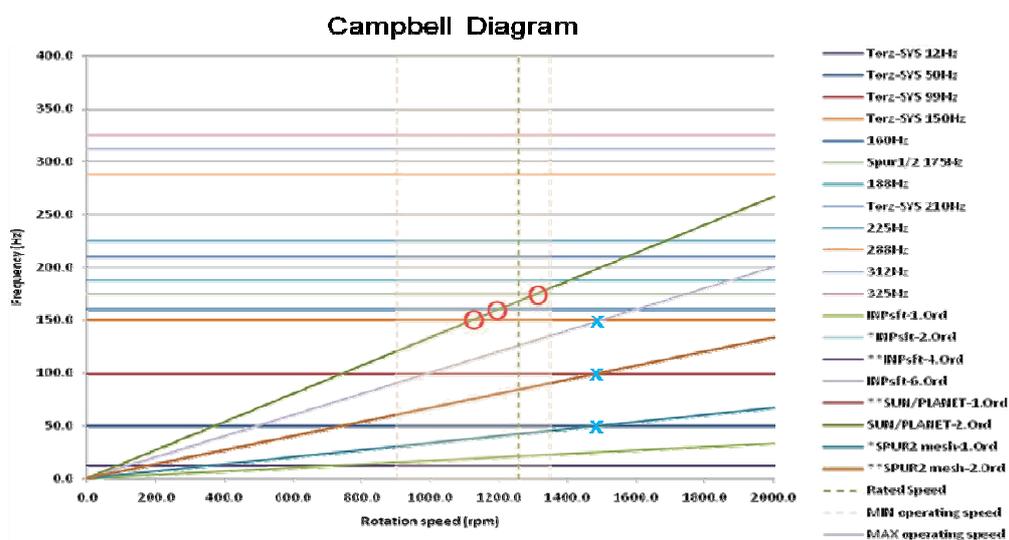


Abbildung 3: Campbell Diagramm

Auf Basis eines Lastenheftes für zu untersuchende Betriebszustände wurden die spezifizierten Lastfälle simuliert. Folgende Darstellung zeigt exemplarisch ein daraus resultierendes Simulationsergebnis.

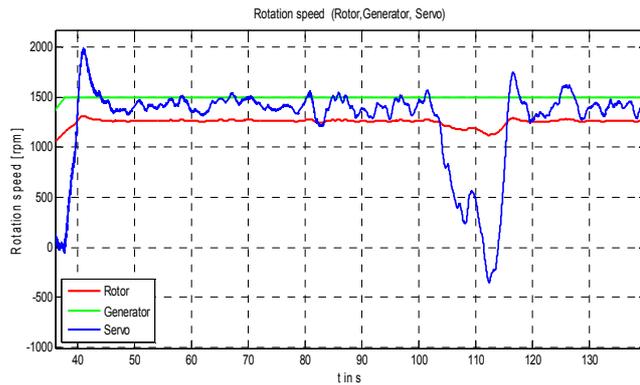


Abbildung 4: Simulationsergebnis

Die Simulationsergebnisse bildeten die Basis für die dimensionierenden Lastkollektive bzw. die Regelungsalgorithmen/-parameter.

2.1.3 Systemauslegung Differenzial-Antrieb (Servoantrieb)

In Zusammenarbeit mit der Firma KEB wurde für den Servoantrieb die Spezifikation inkl. Drehzahl- bzw. Feldschwächebereich, Kühlkonzept und max. erlaubtem Massenträgheitsmoment erarbeitet. Darüber hinaus wurden die Regelungs-/Steuerungsschnittstelle und eine Strategie für die Notstromversorgung bei Netzfehlern definiert.

Seitens SET wurde die Konstruktion des Servomotors mittels FEM-Analyse überprüft und in das dynamische Gesamtmodell integriert.

Folgende Darstellung zeigt beispielhaft ein Ergebnis der dynamischen Analyse des Servomotors in Verbindung mit dem Differentialgetriebe und dem Generator:

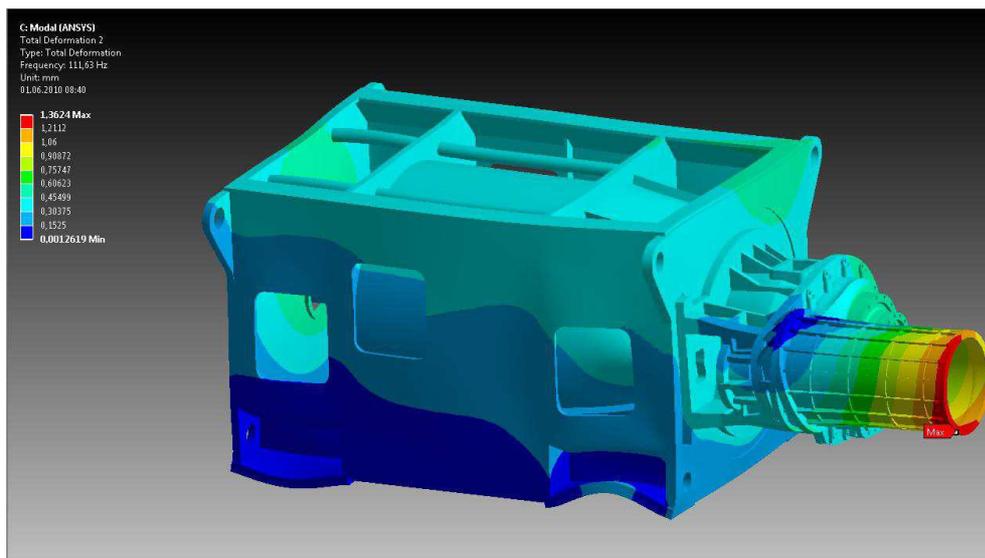


Abbildung 5: Ein Ergebnis der dynamischen Analyse des Servomotors in Verbindung mit dem Differentialgetriebe und dem Generator

2.1.4 Spezifikation Mittelspannungs-Synchrongenerator

In Zusammenarbeit mit der Firma Elin wurde die detaillierte Spezifikation für den Generator erarbeitet und freigegeben. Schwerpunkt der Arbeiten war die Anbindung des Differentialgetriebes an den Generator.

Seitens SET wurde die Konstruktion des Generators mittels FEM-Analyse überprüft und in das dynamische Gesamtmodell integriert (vergl. dazu auch Darstellung oben).

2.1.5 Detailauslegung Differentialgetriebe

Das Differentialgetriebe wurde mittels KissSoft (Feinauslegung Verzahnung und Lager) und FEM-Analyse (Planetenträger, Gehäuse und Wellen) vollständig berechnet und mit Inventor 3D konstruiert bzw. die Fertigungszeichnungen und Stücklisten erstellt (kplt. Getriebe inkl. Anbindung an Servomotor und Generator).

Ergänzend wurde durch dynamische Simulation eine Optimierung der Schmierung/Kühlung durchgeführt. Darauf abgestimmt wurden die Betriebs- und Wartungsvorschriften festgelegt.

Folgende Darstellungen zeigt eine 3D-Darstellung des elektromechanischen Teils des Differenzialsystems:

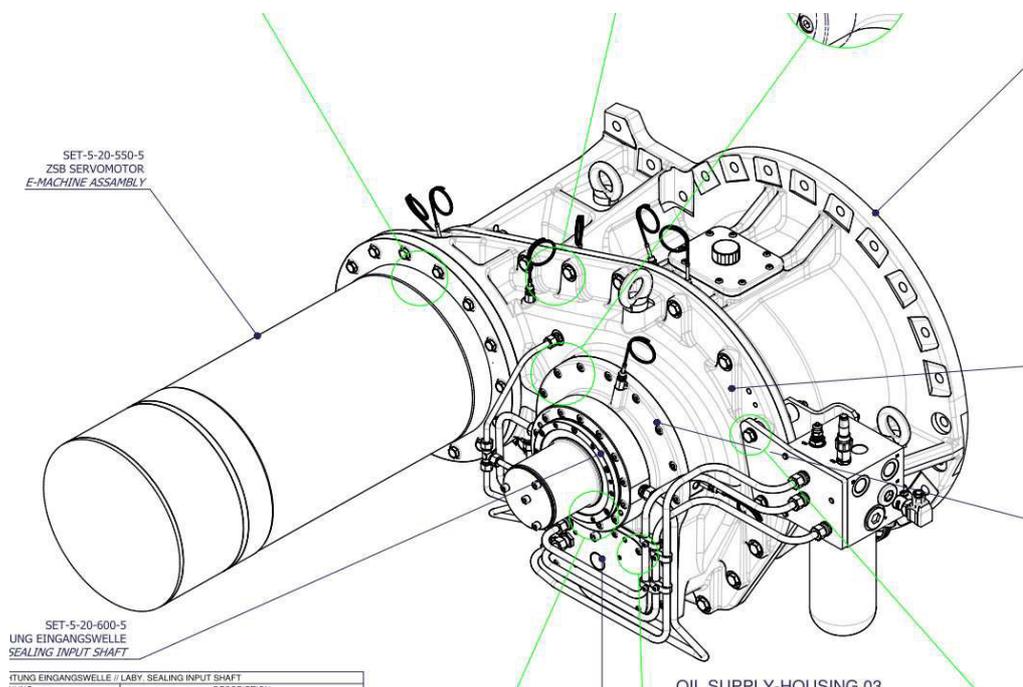


Abbildung 6: 3D-Darstellung des elektromechanischen Teils des Differenzialsystems

2.1.6 Programmierung Software

Auf Basis einer Funktionsbeschreibung für Betriebs- und Visualisierungs- und IBN-Software wurden folgende Systembestandteile spezifiziert bzw. programmiert:

Hardware:

Das Differenzialsystem wird von einer Beckhoff Steuerung (SPS) der Type CX9010 geregelt/gesteuert. Diese zeichnet sich durch ihren modularen Aufbau und die damit verbundene Flexibilität aus → somit war sie für Prototyp die beste Option.

Steuerungssoftware:

Die Steuerungssoftware ist modular aufgebaut. Dies ermöglicht es unter anderem zwei Programmiersprachen in einem Projekt zu verwenden. Steuerungsorientierte Programmteile sind in Instruction List und regelungsorientierte in Structured Text implementiert.

Die aktuelle Version ist gegenwärtig erfolgreich am Prüfstand im Einsatz. Die Kommunikation zwischen Visualisierung und Steuerung erfolgt über das TCP/Modbus Protokoll.

Visualisierungssoftware:

Die Differenzial System Visualisierung ist in C++ auf WinAPI Basis realisiert und besteht aus zwei Applikationen. Die Namen der Applikationen lauten DS Admin und DataViewer.

Der DS Admin kann Live Daten Anzeigen, Befehle an das Differenzial System absetzen und bei bestehender Verbindung mit dem Differenzial System Daten aufzeichnen.

Der DataViewer kann jene vom DS Admin aufgezeichneten SET Nativen Daten anzeigen und in das neutrale csv Datenformat exportieren. Durch diese Trennung der Funktionalitäten ist es möglich Native Daten ohne eine Reduktion des Informationsgehalts zu versenden. Zur Ansicht und Auswertung muss lediglich besagter DataViewer installiert werden. Die Installation ist für jeden Anwender möglich, da diese keinerlei Administratorrechte erfordert.

Der nachfolgenden Screen-Shot zeigt den DataViewer, welcher reale aufgezeichnete Daten aus den Prüfstandsversuchen anzeigt.

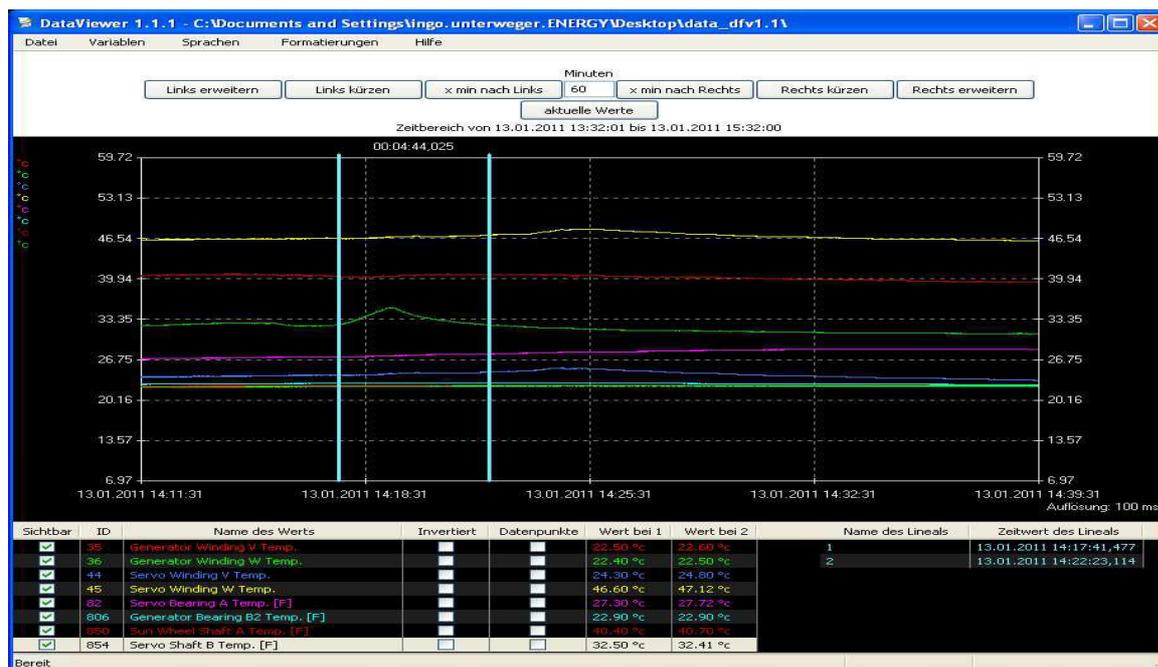


Abbildung 7: DataViewer in Version 1.1.1 mit real aufgezeichneten Prüfstandsdaten

Für die Steuerungssoftware existieren, wie für die dynamischen Modelle, sogen. DLLs – das sind für das Anlagenlasten-Berechnungsprogramm (z.B. „Bladed“) integrierbare Simulationsmodelle des Differenzialsystems.

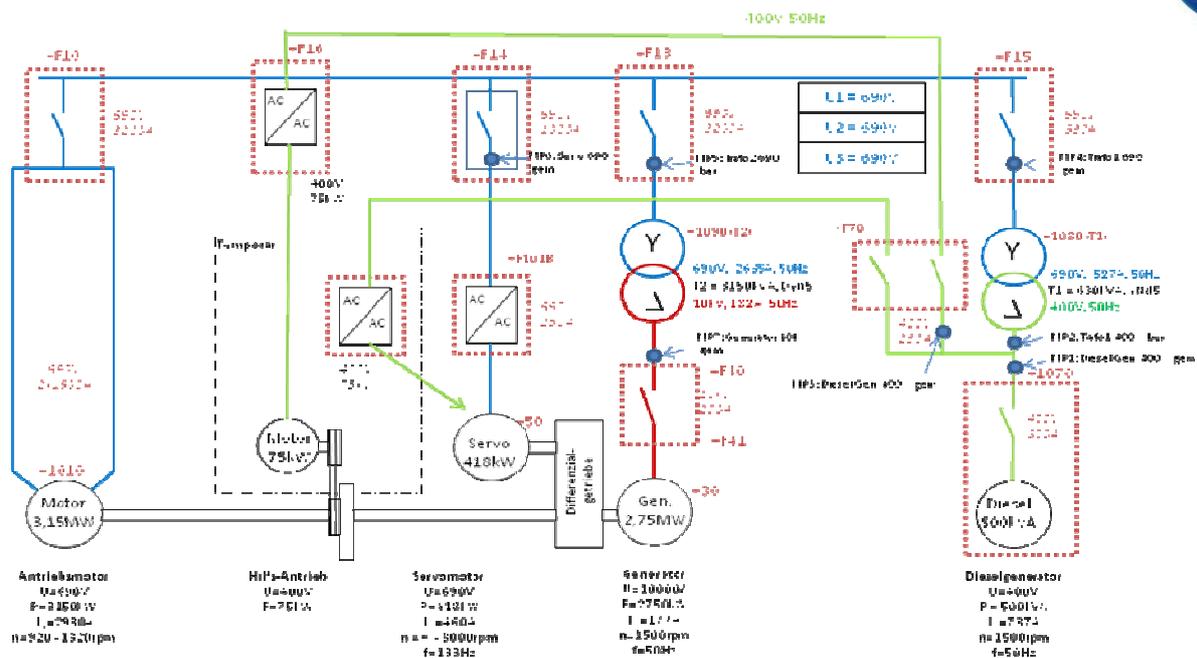
2.1.7 Engineering Prüfstände

Auf Basis des Testplanes (vergl. Pkt. 3.3.3) wurde der Prüfstand konzipiert, die erforderlichen Konstruktions- (Rahmen und Kühlsysteme), Schalt- bzw. Aufbaupläne (Antriebs- und Messtechnik) erstellt und diese dann entsprechend den IBN-Erfahrungen ergänzt bzw. adaptiert. Letzteres betrifft v.a. die Bereiche Sicherheitssystem und Messtechnik.

Als Messdaten-Erfassungssystem wird das Messwerterfassungs- und Analysesystem „DEWE-800“ von der Fa. Dewetron mit insgesamt 32 Messkanälen eingesetzt.

Darin befinden sich zwei Messkarten („DEWE-ORION-1616-505“ und „DEWE-ORION-1616-100“). Auf diesen Messkarten werden dann die Messverstärker [„DAQP-HV-B“ (+/-1400V) und „DAQP-LV-D“ (+/-50V)] aufgesetzt.

Folgende Darstellung gibt einen Überblick über den Prüfstandsaufbau:



Übersicht Prüfstands Aufbau mit Messpunkten

Abbildung 8: Prüfstands Aufbau

Folgende Aufnahmen zeigen den fertigen Prüfstand:



Abbildung 9: 3MW Prüfstand

2.1.8 Unterstützung eines Windkraftanlagenherstellers bezügl. Adaption einer WKA um das Differenzialsystem einbauen zu können

In diesem Zusammenhang wurden sogen. DLLs (vergl. Pkt. 3.1.6), I/O-Listen der verwendeten Sensoren/Aktuatoren und eine Spezifikation der CANbus-Schnittstelle erstellt. Die Integration wird dadurch vereinfacht, dass durch Einsatz der modularen Beckhoff-SPS (vergl. Pkt. 3.1.6) sämtliche nicht vom Kunden unterstützten Steuerungs- bzw. Regelungsaufgaben in das SET-System integriert werden können.

Darüber hinaus sehen wir auf Basis von mehreren untersuchten Anlagendesigns derzeit keine großen Probleme, die elektromechanischen Teile in bestehenden Maschinenhäusern (sog. WKA-Gondeln) unterzubringen.

2.2 Arbeitspaket 2 – Bau Forschungsanlagen

2.2.1 Lieferantenabstimmung

Die einzelnen Bauteile wurden bei jeweils mehreren Herstellern angefragt. Gleichzeitig wurden die notwendigen fertigungsrelevanten Pläne bzw. Spezifikationen erstellt und die erforderlichen Prüfpläne festgelegt. Parallel wurde mit den potentiellen Herstellern eine Konstruktionsoptimierung im Hinblick auf Fertigungskosten durchgeführt.

2.2.2 Beschaffung

Sämtliche Bauteile wurden bestellt und wo relevant beim Kunden abgenommen.

2.2.3 Montage

Die Montage wurde abgeschlossen und verlief bis auf einige kleinere Nacharbeiten problemlos.

Folgende Darstellungen zeigen die Montage der Stirnradstufe bzw. der Schmierölpumpe als einen der letzten Montageschritte.



Abbildung 10: Montage Stirnradstufe/Schmierölpumpe

Nach Abschluss der Werkstests von Generator und Differentialgetriebe wurde das Differentialgetriebe an den Synchrongenerator angebaut.



Abbildung 11: Anbau des Synchrongenerator an das Differentialgetriebe

Im Anschluss daran wurde die Mess-Sensorik installiert und in Betrieb genommen.

2.3 Arbeitspaket 3 – Prüfstandsläufe

2.3.1 Werkstests Servomotor

Der Servomotor wurde beim Lieferanten (KEB) mit Teillast vermessen (Funktion und Erwärmung). Folgende Darstellung zeigt den Messaufbau bei KEB:



Abbildung 12: Messaufbau bei KEB

Die Wirkungsgradbestimmung wurde auf die Tests am Systemprüfstand verlegt, da nur hier die erforderliche Messgenauigkeit realisierbar war.

2.3.2 Werkstests Differentialgetriebe

Nach abgeschlossener Montage des Differentialgetriebes, wurden an einem mobilen 7kW-Prüfstand Schmierungs- und Erwärmungstests durchgeführt. Folgende Darstellung zeigt diesen Prüfstand in der Montagehalle der SET:

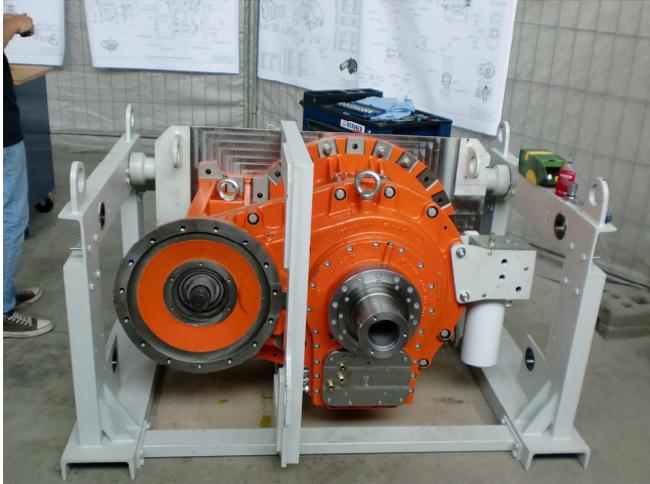


Abbildung 13: Prüfstand in der Montagehalle der SET

Auf Basis der Messergebnisse wurden die Einstellungen für das Schmiersystem angepasst und die Vorspannung div. Getriebelager verändert. Abschließend wurde das Getriebe probezerlegt und die Teile auf Einlaufspuren bzw. allfällige Auffälligkeiten überprüft.

2.3.3 Systemtest

Die folgende Tabelle gibt einen groben Überblick über die durchgeführten Tests:

Tests zur Wirkungsgradbestimmung:

- Allgemeine IBN-Tests
- Erwärmungsläufe
- Softwaretests
- Regler-Optimierung
- Verifizierung dynamisches Matlab-Modell

Ein sehr wichtiger Teil der Arbeiten im Zusammenhang mit den Messungen war die Kalibrierung der Messsensorik und hier v.a. die Drehmomentmessung zwischen Antrieb und Differenzialsystem.

Um einen belastbaren Wirkungsgrad-Nachweis zu erhalten, war eine Mess-Toleranz der gesamten Messkette von $< \pm 1\%$ zu realisieren.

2.3.4 Lebensdauertest

Im Anschluss an die System-Funktionstests wurde ein Dauertest kombiniert mit Extrembelastungen (Notstopps und sog. Sprungantworten) durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgte eine Tragbildabnahme der Verzahnung des Differenzialgetriebes.

Das Ergebnis war positiv – d.h. die Tragbilder der Verzahnung zeigten ein gutes Einlaufverhalten.

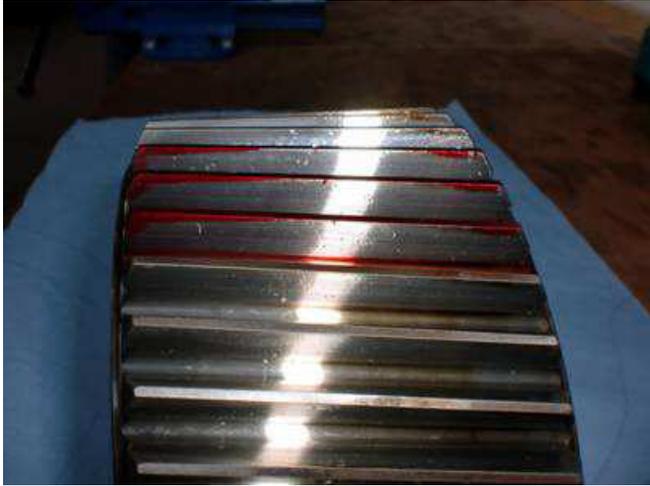


Abbildung 14: Tragbild Planetenrad

2.4 Arbeitspaket 5 - Auswertung der Tests und Update der Engineering-Tools

Die Arbeiten dieses Arbeitspaketes wurden auf Basis der Prüfstandsläufe und der in diesem Zusammenhang erzielten Messergebnissen durchgeführt. Die herangezogenen Messergebnisse sind auszugsweise Zeitschriebe für Drehzahlen, Drehmomente, Strom, Spannung, Schwingungen und Temperaturverläufe.

2.4.1 Auswertung der Messungen/Anpassung des dynamischen Modelles des Triebstranges in Matlab

Die folgenden Darstellungen zeigen auszugsweise Messergebnisse im Vergleich zu den Simulationen.

Simulation Notstopp: Die Hauptbremse wurde eingelegt und gleichzeitig die Servobremse. Aufgenommen wurden die Grafen der Drehzahlen und die Drehmomentverläufe an der Servowelle und an der System-Antriebswelle.

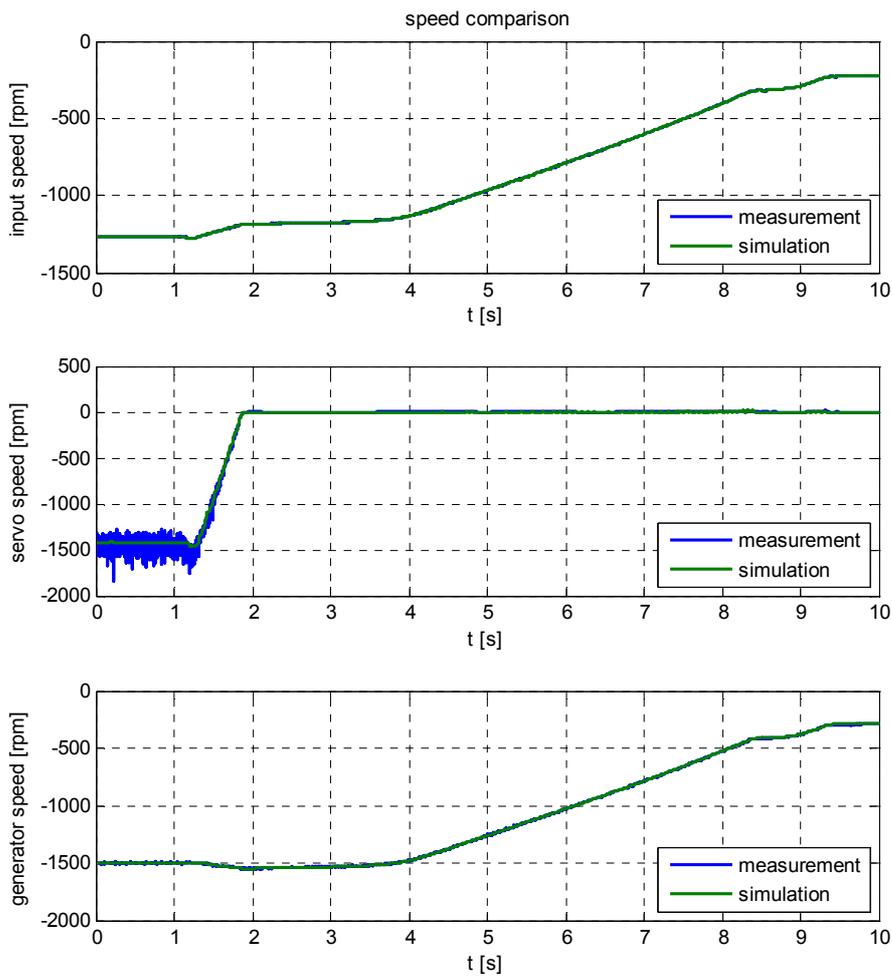


Abbildung 15: Vergleich der Drehzahlen Messung vs. Simulation

Vergleich der Drehzahlen Messung vs. Simulation: Eingangswelle, Servowelle, Generatorwelle

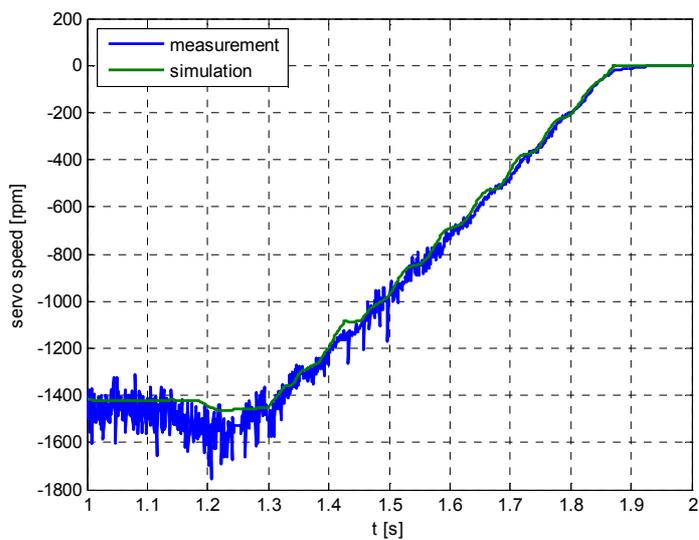


Abbildung 16: Servodrehzahl Zoom

Servodrehzahl Zoom: Verlauf der Drehzahl wenn die Bremse einfällt.

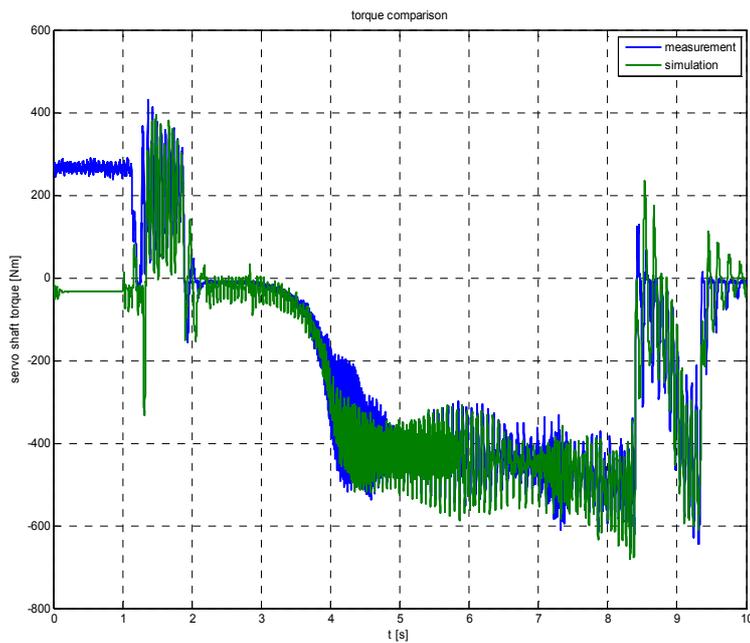


Abbildung 17: Drehmoment Servowelle

Sprungantwort Servomotor: Für die Reglerentwicklung ist es notwendig die Übertragungsfunktion des Stellgliedes (= Servomotor) zu kennen. Die Grafen zeigen den Vergleich zwischen dem verwendeten Modell und der Messung am realen Objekt.

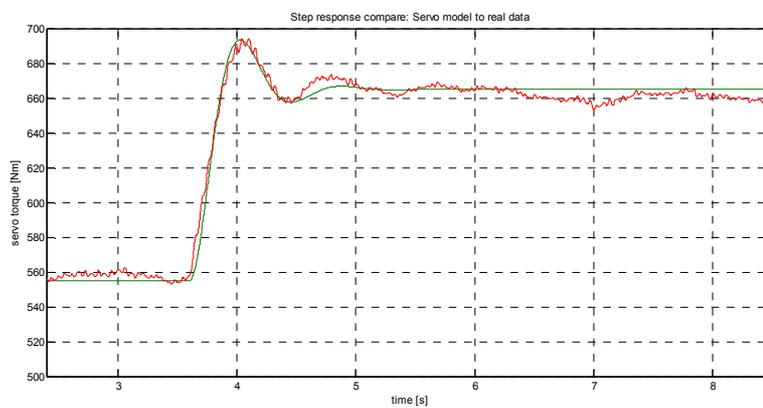


Abbildung 18: Sprungantwort Drehmoment (1)

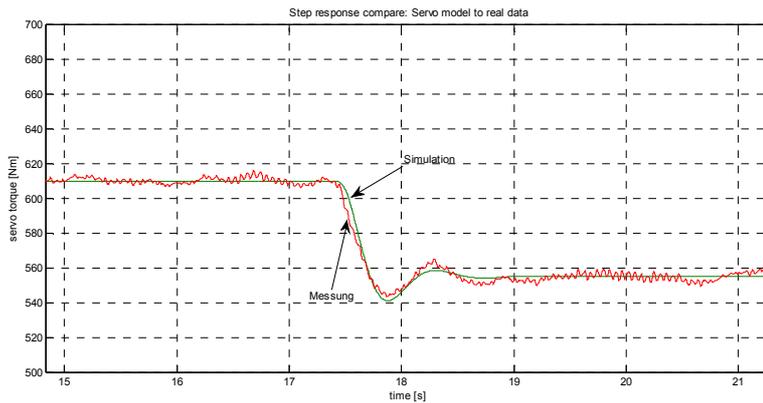


Abbildung 19: Sprungantwort Drehmoment (2)

Positiv ist die bereits nach wenigen Iterationsschritten erzielte gute Übereinstimmung von Simulation und Messung. Dadurch sind die entwickelten Simulationstools eine optimale Basis für weitere Entwicklungsschritte bzw. zukünftige kundenspezifische Entwicklungen.

In weiterer Folge wurde die System-Reaktionszeit verifiziert um das dynamische Reaktionsverhalten des Systems analysieren zu können. Folgende Auswertung zeigt die Reaktionszeit des Systems im Falle einer Sprungantwort. Innerhalb von rd. 50ms ab Sollwertvorgabe durch die übergeordnete Regelung, steht ein Momentensprung von 50% des Nenn-Drehmomentes an der Welle des Servomotors an.

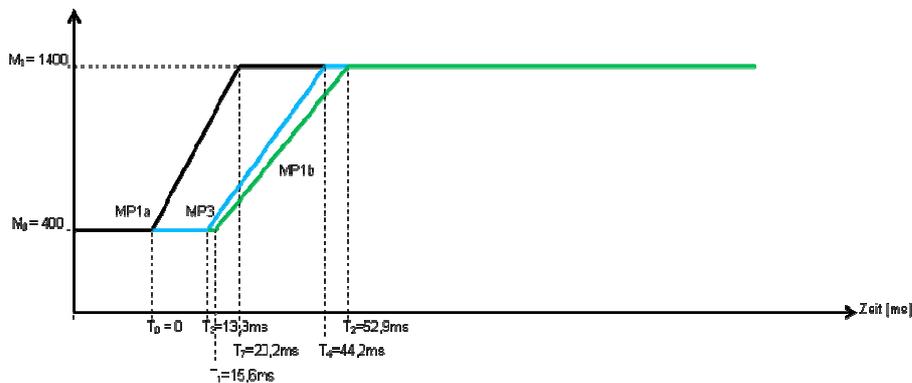


Abbildung 20: Reaktionszeit des Systems im Falle einer Sprungantwort

Ein weiterer Bestandteil der Untersuchungen war einen Ansatzpunkt für das Verhalten des Systems bei Netzfehlern zu finden. Diesbezüglich wurden Untersuchungen zum Verhalten des Systems bei Spannungs- bzw. Leistungseinbrüchen durchgeführt.

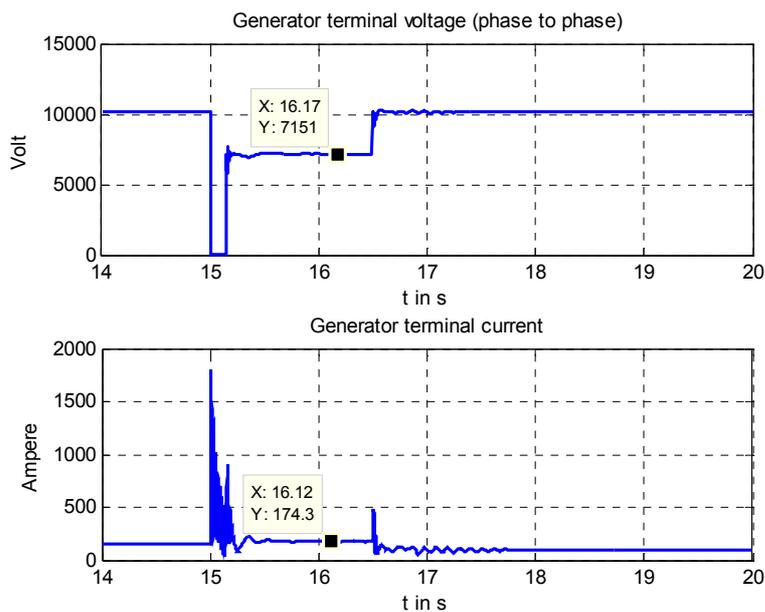


Abbildung 21: Verhalten des System bei Netzfehlern

Wesentliche Erkenntnis aus diesen Untersuchungen war die Quantifizierung der erforderlichen Kapazität des Gleichstrom-Zwischenkreisspeichers in Abhängigkeit der weltweit anerkannten „grid codes“.

Auf Basis der oben beschriebenen Versuche am Prüfstand und auf Basis der qualitativ sehr hochwertigen Simulationen können nunmehr verlässliche Aussagen über das LVRT-Verhalten des Systems gemacht werden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Messungen war die Bestimmung der Systemwirkungsgrade und in weiterer Folge der Vergleich mit der Antriebsmaschine. Die Antriebsmaschine ist ein permanenterregter Synchrongenerator mit Vollumrichter (FC) und angeschlossenem Netztransformator. Diese Antriebsmaschine ist ein Serienprodukt der Fa. TheSwitch und ist das derzeit in der Windbranche meist favorisierte elektrische Antriebskonzept. Aus diesem Grund ist der direkte Wirkungsgradvergleich mit dem elektromechanischen Differenzialsystem (DS) umso wichtiger.

Folgende Darstellung zeigt den Wirkungsgradverlauf beider Konzepte im Vergleich:

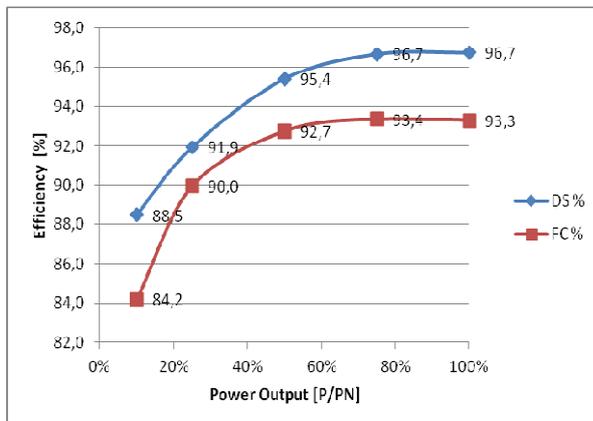


Abbildung 22: Wirkungsgradverlauf beider Konzepte im Vergleich

Der Vergleich zeigt, dass der Systemwirkungsgrad des Differenzialsystems (DS) im Durchschnitt um rd. 3% besser ist, als der für das System mit permanenterregtem Synchrongenerator und Vollumrichter (FC).

2.4.2 Re-design der Getriebeteile

Auf Basis der Ergebnisse der Prüfstandsläufe wurde der Redesign-Prozess eingeleitet.

Sämtliche für den Prototyp durchgeführte Arbeiten wie Berechnung (Komponenten und Triebstrangmodell), Konstruktion, Spezifikationen, Abstimmung der zu erstellenden Zertifizierungsunterlagen, etc. wurden auch für das Redesign durchgeführt.

2.4.3 Update der Spezifikationen/Update des Source-Codes und der Betriebsanleitung der Software

Sowohl die Spezifikationen als auch die Software wurden entsprechend den Erkenntnissen vom Prüfstand und den damit zusammenhängenden Erfordernissen angepasst bzw. ergänzt und entsprechend dokumentiert.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend wurden folgende wesentlichen Ergebnisse bzw. Erkenntnisse aus dem Projekt gewonnen:

- Das Differenzialsystem ist hochdynamisch regelbar und wichtige Eigenschaften wie die sogenannte Triebstrangsämpfung können problemlos umgesetzt werden.
- Wichtiger Bestandteil der Untersuchungen war, einen Ansatzpunkt für das Verhalten des Systems bei Netzfehlern zu finden. Wesentliche zu treffende Aussage ist, dass

das System grundsätzlich weltweit jeden sog. „grid code“ erfüllen kann. Jedoch müssen entsprechend leistungsfähige Notstromsysteme implementiert werden, welche noch im Detail zu entwickeln und zu testen sind.
- Die Vorteile in Bezug auf Systemwirkungsgrade sind höher als erwartet – als sogen. „benchmark“ diente hier der direkte Vergleich mit einer permanenterregten Synchronmaschine mit Vollumrichter (= vermessener Prüfstandsantrieb).
- Extrem positiv war auch die gute Übereinstimmung von Simulation und Messung – dies liefert eine optimale Basis für Weiterentwicklungen.
- Die ursprünglichen Kostenziele werden erreicht und lassen sich durch entsprechende Optimierung weiter reduzieren.
- Das Differenzialsystem mit einem parallel zur Antriebswelle positionierten Servomotor ist nur mit relativ langen Kupplungen in eine konventionelle WKA integrierbar. Hier würde eine geänderte mechanische Anordnung zusätzliche Vorteile bringen.

Die Projektergebnisse erfüllen die determinierten energiestrategischen, systembezogenen und technologiestrategischen Projektziele und zugleich die Programmziele der 3. Ausschreibung „Neue Energien 2020“. Dies sind:

3.1 Energiestrategische Ziele:

- Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz
- Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen
- Verbesserung des Wissens über langfristige Entwicklungen, ihre Kosten und Wirkungen

3.2 Systembezogene Ziele:

- Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger
- Verbesserung der Umwandlungseffizienz
- Entwicklung von Schlüsseltechnologien
- Herstellung einer Optionenvielfalt bei Technologien und Energieträgern

- Multiplizierbarkeit, Hebel- und Signalwirkung
- (Kosten-)Effizienz der Treibhausgas-Reduktion

3.3 Technologiestrategische Ziele:

- Unterstützung von Innovationssprüngen
 - Verstärkung des Systemdenkens
 - Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch verbesserte Technologien
-
- Verstärkung internationale Kooperationen und Ausbau der internationalen Führungsrolle
 - Förderung von Qualifikationen im Energie- und Klimaschutzbereich und Ausbau des Forschungsstandortes
 - Stärkung der Technologie- und Klimakompetenz österreichischer Unternehmen
 - Generierung von Sekundärnutzen bzw. Spin Offs durch eine Technologie

4 Ausblick und Empfehlungen

4.1 Verwertung

Die Forschungsanlage am Prüfstand ist die Referenz, auf denen die darauf folgende Vertriebsstrategie basiert.

Nächster Schritt ist eine Referenz-Windkraftanlage im europäischen Raum zu errichten. Mit div. Windkraftanlagenherstellern gab es Vorgespräche.

In den Magazinen DEWI-Journal und Windkraftjournal wurden Berichte geschaltet.

Bei der Europäischen (März 2011) bzw. der Amerikanischen Windenergiekonferenz (Mai 2011) nahm SET als Aussteller teil und präsentierte dabei ein 1:1 Modell des entwickelten Differenzialsystems.

Im 4. Quartal 2011 sind Vorträge auf Konferenzen in Korea und China geplant.

Parallel zum Forschungsprojekt hat die SET in einem separaten Investitions-Projekt ein Entwicklungszentrum mit angegliederter Montagehalle für die Assemblierung und die Tests der Differenzialsysteme (für rd. 300Stk./Jahr, Arbeitsschicht) errichtet.

Hier werden in Folge Prototypen und Vorserien gebaut und zur Serienreife herangeführt bzw. (Klein-)Serien für den europäischen Markt gefertigt oder zumindest assembliert.

Mögliche an den Projektergebnissen interessierte andere Zielgruppen:

Die beschriebenen Ausführungsformen wurden bevorzugt für Windkraftanlagen konzipiert, sind jedoch bei technisch ähnlichen Anwendungen ebenfalls umsetzbar. Dies betrifft v.a. Wasserturbinen bzw. Pumpen und Anlagen zur Gewinnung von Energie aus Meeresströmungen.

Für diese Anwendung gilt die gleiche Grundvoraussetzung wie für Windkraftanlagen, nämlich variable Strömungsgeschwindigkeit. Die Antriebswelle wird jeweils von den vom Strömungsmedium, beispielsweise Wasser, angetriebenen Einrichtungen direkt oder indirekt angetrieben.

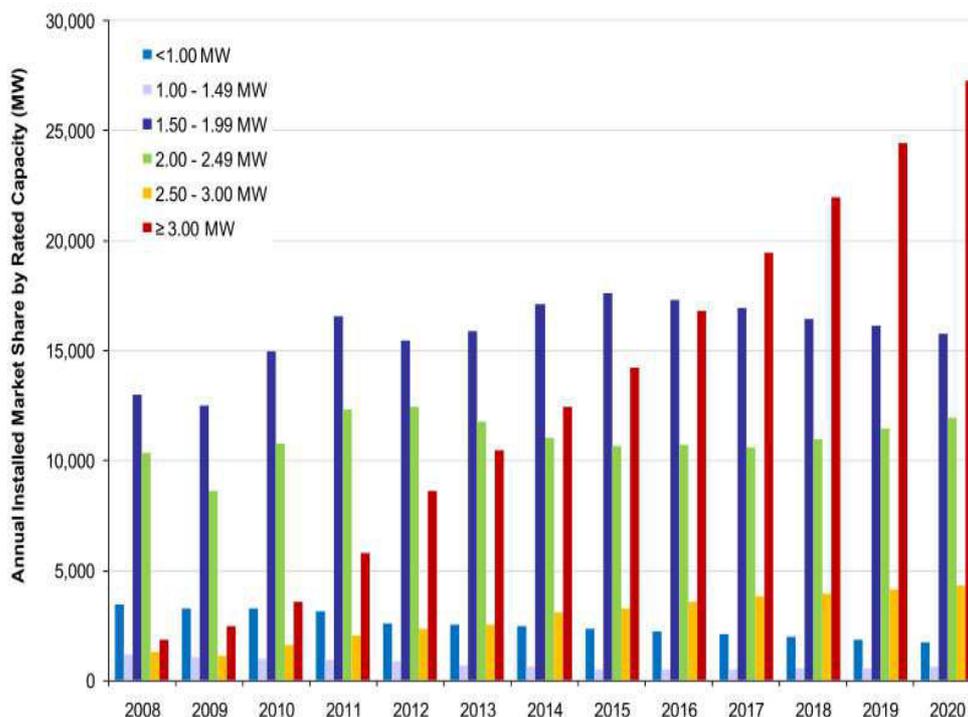
Darüber hinaus sind jede Art von Industrieanlagen, welche mit eingeschränktem Drehzahlbereich arbeitet, die idealen Einsatzgebiete für Differenzialsysteme.

4.2 Markt

Beispielhaft kann hierzu die „EER Global Wind Turbine Markets and Strategies 2009-2020“ mit folgenden Trends herangezogen werden:

- Kontinuierlich wachsender Windmarkt
- Zunehmende Anlagengröße

Exhibit 1-3: Global Annual MW Added by Turbine Size



Source: Emerging Energy Research

Abbildung 23: Global Annual MW Added by Turbine Size

Die zunehmende durchschnittliche Nennleistung der neu errichteten Windkraftanlagen und die verschärften technischen Netz-Einspeisebedingungen (z.B. EoN-Netz, USA, Canada, ...) verlangen vermehrt nach optimierten Triebstrang-Lösungen, welche den geänderten Anforderungen gerecht werden. In diesem Zusammenhang erfüllt das Konzept des elektromechanischen Differenzial-Antriebes sämtliche relevanten Punkte.

4.3 Empfohlene weitere Entwicklungsarbeiten auf Basis der Ergebnisse:

- Entwicklung eines hochdynamischen und gut feldschwächbaren PM-Servomotors als Differenzial-Antrieb.
- Entwicklung eines 2MW Differenzialantriebes mit Stufenplanet als Planetenstufe des Differenzialgetriebes und
- optimierter, kostenoptimaler mechanischer Aufbau des Differenzialsystems.
- Redundanter Aufbau von Frequenzumrichter und Statorwicklung des Differenzial-Antriebes.
- Entwicklung einer maßgeschneiderten Controller-Platine für die Systemsteuerung.
- Entwicklung eines DC/DC-Wandlers für die optimierte Notstromversorgung des Differenzial-Antriebes bei Netzfehlern (z.B. LVRT).

IMPRESSUM

Verfasser

SET Sustainable Energy Technologies GmbH

Gerald Hehenberger

Neuer Platz 5, 9020 Klagenfurt

Tel.: 0043 (0) 508989 - 12

E-Mail: gerald.hehenberger@ghp-set.com

Web: www.ghp-set.com

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