

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK, IWES

# PROJEKT „GONDELPRÜFSTAND“

## Abschlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

„Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325623A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“



# GONDELPRÜFSTAND

Für getriebelose Windenergieanlagen als Teil des  
DyNaLab (Dynamic Nacelle Testing Laboratory)

**Dipl. Ing. Martin Pilas**



Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, IWES  
in Bremerhaven

Förderkennzeichen: 0325332  
Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie  
Projektträger: Forschungszentrum Jülich

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Abbildungen.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Voraussetzungen und Planung des Vorhabens.....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Technik zu Beginn des Vorhabens .....</b>	<b>10</b>
4.1	National Renewable Energy Laboratoy (USA) – In Betrieb .....	10
4.2	Centro Nacional de Energias Renovables (Spanien) – In Betrieb .....	10
4.3	National Renewable Energy Center (England).....	10
4.4	Clemson University (USA) .....	11
4.5	Lindoe Offshore Renewables Center (Dänemark) .....	11
4.6	CWD (RWTH Aachen University) .....	11
<b>5</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Eingehende Darstellung des Prüfstandes .....</b>	<b>13</b>
6.1	Prüfstandsbeschreibung .....	15
6.1.1	Antriebsmotor.....	15
6.1.2	Netzersatzanlage und elektronische Komponenten .....	18
6.1.2.1	Transformatoren .....	19
6.1.2.2	Umrichter .....	21
6.1.2.3	Inbetriebnahme der Netzersatzanlage .....	22
6.1.3	Kupplungssystem .....	26
6.1.3.1	Überlastkupplung .....	26
6.1.3.2	Ausgleichkupplung .....	27
6.1.4	Krafteinleitung .....	28
6.1.4.1	Inbetriebnahme Krafteinleitung Phase I .....	30
6.1.4.2	Inbetriebnahme Krafteinleitung Phase II .....	32
6.1.5	Prüflingsaufnahme .....	33
6.1.6	Arbeitsplattform.....	34
6.1.7	Kalibriereinrichtung.....	35
6.1.8	Automatisierung und Upgrade des Kühlsystems.....	36
6.1.9	Wiederverwertbares Lager .....	37
6.1.10	3-d Lasertracker .....	39
<b>7</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen und zukünftige Verwertbarkeit .....</b>	<b>40</b>



# 1 Abbildungen

Abb. 01: DyNaLab mit Hubgerüst .....	8
Abb. 02: Übersicht Gondelprüfstand .....	13
Abb. 03: Liste vorhabensspezifischer Anlagen/Gegenstände .....	13
Abb. 04: Layout Gondelprüfstand.....	14
Abb. 05: Schnittdarstellung 2x5 MW Antriebsmotor.....	15
Abb. 06: Motorwellenkomponenten .....	16
Abb. 07: 1. Stator am LDW Standort in Bremen .....	16
Abb. 08: Anlieferung Stator.....	16
Abb. 09: Montage von Rotor und Stator .....	17
Abb. 10: 10 MW Antrieb auf dem Prüfstands-fundament .....	17
Abb. 11: Back-to-Back Inbetriebnahme .....	18
Abb. 12: Junction box .....	19
Abb. 13: Single Line Diagramm .....	19
Abb. 14: Prüfstandstrans-formatoren .....	20
Abb. 15: Umrichtersystem .....	22
Abb. 16: Test Matrix 1 Netzersatzanlage .....	24
Abb. 17: Test Matrix 2, Netzersatzanlage .....	25
Abb. 18: Triebstrang mit hydraulischer Überlastkupplung und Ausgleichkupplung .....	26
Abb. 19: Überlastkupplung (Quelle Voith Turbo) .....	27
Abb. 20: Ausgleichs-kupplung zwischen Antriebsmotor und Momentenlager .....	28
Abb. 21: KS-Krafteinleitungssystem .....	28
Abb. 22: Eigenschaften Krafteinleitungssystem.....	28
Abb. 23: Blick auf das Krafteinleitungssystem vom Motor.....	29
Abb. 24: Hydraulikaufbau DyNaLab .....	29
Abb. 25: Hydrauliksystem .....	30
Abb. 26: hydraulische Leistungseinheit .....	30
Abb. 27: Aufgeprägte Lasten Phase I.....	31
Abb. 28: Fall 1 A: 250 kN; f:0.25 Hz in Fz .....	31
Abb. 29: Fall 2 A: 200 kN; f: 0.5 Hz in Fz .....	31
Abb. 30: Fall 3 A: 100 kN; f: 1 Hz in Fz .....	31
Abb. 31: Fall 4 A: 50 kN; f: 1.5 Hz in Fz .....	32
Abb. 32: Fall 5 50 kN; f: 2 Hz in Fz .....	32
Abb. 33: Maximale/Minimale Kräfte .....	32
Abb. 34: Maximale/Minimale Momente.....	32
Abb. 35: Sinus $F_x$ A=150 kN und f=1.4 Hz .....	33
Abb. 36: Rampe: $F_x$ +/- 150 kN und Auf bzw. Abstiegszeit 0.3 s .....	33
Abb. 37: Prüfpalette .....	34
Abb. 38: Verschiebung Palette.....	34
Abb. 39: Arbeitsplatt-formen.....	35
Abb. 40: Kalibrier-einrichtung.....	35
Abb. 41: Kühlsystem HMI .....	36
Abb. 42: Hybrid Kühltürme DyNaLab .....	37
Abb. 43: Anlieferung Ersatzlager .....	38
Abb. 44: 3d-Lasertracker (Quelle FARO).....	39

## 2 Aufgabenstellung

Trotz des rasch fortschreitenden Ausbaus der Offshore-Windenergie in einigen europäischen Ländern, im Besonderen ist hier das Vereinigte Königreich zu nennen, wo zur Zeit mehr als die Hälfte der global installierten Offshore-Windenergiekapazität installiert ist, hat die Offshore Windenergie bisher eine vergleichsweise kurze Entwicklungszeit durchgemacht.

Insbesondere in Deutschland wo erst seit 2009 mit dem Offshore-Windpark Alpha Ventus in größerem Umfang Erfahrungen mit Offshore Windenergie gesammelt werden, ist die Offshore Windenergie also noch sehr jung.

Dabei werden geplante deutsche Windparks die Offshore-Windenergieindustrie vor besondere Herausforderungen stellen. Die Windparks in der deutschen Nordsee werden überwiegend in Entfernungen von 60 km-140 km von der deutschen Küste in Wassertiefen von bis zu 50 Metern entstehen. Diese im internationalen Vergleich außergewöhnlichen geographischen Bedingungen bringen auch außergewöhnliche Belastungen durch Wellen und Wetter mit sich und stellen außergewöhnliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit der installierten Anlagen.

Bevor Windparks im großen Maßstab errichtet werden, muss daher sichergestellt sein, dass die Anlagen unter diesen rauen Bedingungen auf See dauerhaft zuverlässig betrieben werden können.

Unter den Gesichtspunkten Kostensenkung und Ertragssteigerung stehen Forschungsaktivitäten im Vordergrund, die auf eine höhere Verfügbarkeit der Anlagen abzielen. Dazu gehören Vorhaben zur Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungstechnik (z.B. Fehlerfrüherkennung), die Materialforschung (z.B. im Hinblick auf Gewichtsreduzierung und Langlebigkeit), sowie das Wartungs- und Reparaturmanagement.

In puncto Kostensenkung sind die Tragstrukturen (Fundament, Turm) ein weiterer zentraler Ansatzpunkt für Forschungsaktivitäten. Die Tragstrukturen machen im Offshore-Bereich 25–50 Prozent der gesamten Investitionskosten einer Anlage aus. Dabei hat das Gewicht der Anlage einen signifikanten Einfluss auf die Tragstrukturkosten. In diesem Zusammenhang ist die Reduzierung des Anlagengewichts, beispielsweise durch neue Triebstrangkonzeppte (z.B. getriebelose Anlagen) ein wichtiges Ziel aktueller Entwicklungs- und Forschungsarbeiten.

Der geplante Gondelprüfstand am Fraunhofer IWES wird helfen, viele wichtige Windenergieforschungsschwerpunkte aus Wirtschaft und institutioneller Forschung entscheidend voranzubringen. Insbesondere durch die Erweiterung des Prüfstandes um die Krafteinleitung sind bei einigen zentralen Forschungsthemen deutliche Fortschritte in der Entwicklung zu erwarten.

Ziel des Vorhabens war die Realisierung eines 10 MW Gondelprüfstandes für das am Fraunhofer IWES entstandene DyNaLab (Dynamic Nacelle Laboratory). Dieses Ziel wurde im Oktober 2015 bei der feierlichen Einweihung erreicht.

### 3

## Voraussetzungen und Planung des Vorhabens

Voraussetzungen und Planung  
des Vorhabens

Im Folgenden bezeichnet der Begriff Gondelprüfstand den Antrieb, die Elektrotechnik sowie das Krafteinleitungssystem des DyNaLabs. Der Begriff DyNaLab bezeichnet das gesamte Labor inklusive Infrastruktur bestehend aus weiteren Prüfflächen für andere Prüfaufbauten, Kräne, Fundamente, Leitstand, Büros etc. Der Gondelprüfstand ist dabei die Kernkomponente des vom Fraunhofer IWES aufgebauten DyNaLab. Das Gebäude, das Prüfstandsfundament des Gondelprüfstandes sowie weitere Laborinfrastruktur waren Teil eines anderen Förderprojekts. Die Personalmittel für die Abteilung Antriebsstrang wurden von Fraunhofer getragen. Die folgende Abbildung zeigt das Gebäude und das für Logistikzwecke zur Verfügung stehende Hugerüst.



**Abb. 01: DyNaLab mit  
Hubgerüst**

Das Gebäude bietet Platz für ca. 25 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die sich um Fragestellungen rund um die Antriebssysteme von Windenergieanlagen kümmern.

Die ursprüngliche Planung des Gondelprüfstandes sah zunächst ein System vor das aus folgenden Komponenten besteht.

Phase I:  
Gondelprüfstand 1 dof

In der ersten genehmigten Phase wurde ein System genehmigt das es ermöglicht den torsionalen Freiheitsgrad von Windenergieanlagen auf einem Systemprüfstand zu untersuchen. Dabei sollte die Dynamik und Untersuchung der elektrischen Netzurückwirkungen im Vordergrund stehen.

Phase II:  
Gondelprüfstand 1 dof + x

In der zweiten Phase wurde eine Erweiterung des Prüfstandes um eine Krafteinleitung genehmigt. Mit dieser Krafteinleitung verfügt der Prüfstand über weitere Funktionalitäten bezüglich einer realitätsnahen Windlastnachbildung.

Phase III:  
Gondelprüfstand Funktionalitätserweiterung

.....  
Voraussetzungen und Planung  
des Vorhabens  
.....

Die dritte Phase umfasste eine generelle Funktionalitätserweiterung des Prüfstandes.

Alle Phasen bauen aufeinander auf und führten letztendlich dazu, dass ein im internationalen Vergleich konkurrenzfähiger Gondelprüfstand realisiert wurde der der einheimischen und ausländischen Windindustrie helfen wird zuverlässigere Anlagen zu entwickeln.

## 4

### Stand der Technik zu Beginn des Vorhabens

-----  
Stand der Technik zu Beginn des  
Vorhabens  
-----

Gondelprüfstände unterschiedlicher Größe und Funktionalität sind bereits bei verschiedenen Herstellern und Forschungseinrichtungen in Betrieb bzw. waren zu Beginn des Projekts in Planung.

Während einige der größten Windkraftanlagenhersteller der Welt bereits eigene Gondelprüfstände besitzen existierte in Deutschland kein Gondelprüfstand für umfangreiche Systemtests in der Größenordnung, die notwendig ist um Offshore-Windenergieanlagen zu testen. Eine Ausnahme hiervon stellt ein Back-to-Back-Prüfstand von Areva dar, der jedoch als Qualitätssicherungsmaßnahme zu verstehen ist und sich somit in Zielsetzung und Funktionalität deutlich vom DyNaLab und vergleichbaren Einrichtungen unterscheidet.

Hersteller die keinen eigenen Gondelprüfstand besitzen sind also, wollen sie Tests durchführen, auf die Nutzung eines öffentlichen Prüfstandes angewiesen.

Zu Beginn des Projekts waren wenige Gondelprüfstände bereits in Betrieb und einige weitere in Planung.

#### 4.1

##### National Renewable Energy Laboratory (USA) – In Betrieb

Das National Renewable Energy Laboratory der USA (NREL) hat seit mehreren Jahren einen Gondelprüfstand mit einer Nennleistung von 2,5MW in Betrieb. Das IWES / ISET hat 2007 DeWind bei der Durchführung einer Gondelprüfung auf diesem Prüfstand unterstützt. Der NREL Prüfstand weist einen Freiheitsgrad (Antrieb) auf. Die elektrische Energie wird mittels Leistungsrückführung dem Antrieb wieder zugeführt.

Die DeWind Gondel mit 2 MW Nennleistung konnte auf dem NREL Prüfstand nicht dynamisch getestet werden. Die einfache Reproduktion von GL Lastfällen war ebenfalls unmöglich. Der Antrieb schien für die DeWind Gondel falsch oder »zu elastisch« ausgelegt. Der Prüfstand genügt momentanen Anforderungen nicht und erscheint veraltet.

Das NREL behebt derzeit die o.g. Mängel und rüstet diesen Prüfstand hinsichtlich mehr Antriebsleistung und mehr Freiheitsgraden mit einer Krafteinleitung auf. Die zur Zeit der Antragsstellung in Bau befindlichen Prüfstände sind mittlerweile größtenteils fertig gestellt.

#### 4.2

##### Centro Nacional de Energias Renovables (Spanien) – In Betrieb

Das neue Forschungszentrum Centro Nacional de Energias Renovables (CENER) besitzt eine großzügig ausgelegte Prüfhalle für Antriebsstrangprüfungen. CENER verfolgt hier den Ansatz der komponentenweisen Prüfung. Die Gondel wird also nicht als Ganzes geprüft, sondern bestimmte Bauteile werden separat geprüft. Es existieren ein Getriebeprüfstand mit Seitenkrafteinleitung und ein Generatorprüfstand. Die CENER Prüfstände verfügen über keinen Direktantrieb und sind daher für dynamische Tests und Modellvalidierungen ungeeignet.

#### 4.3

##### National Renewable Energy Center (England)

Das National Renewable Energy Center (Narec) in Großbritannien verfügt über zwei Gondelprüfstände.

Der erste Prüfstand hat eine Leistung von 3MW und ist damit vergleichbar mit dem Prüfstand des CWD in Aachen und eignet sich primär für Onshore Windenergieanlagen.

Der zweite Prüfstand ist für Anlagen mit Nennleistungen ab 7,5MW ausgelegt. Dieser Prüfstand soll es unter anderem ermöglichen Zertifizierungslastfälle im Labor nachzufahren und weist eine leistungsstarke Krafteinleitung auf.

-----  
Stand der Technik zu Beginn des  
Vorhabens  
-----

## 4.4

### Clemson University (USA)

An der Clemson University in South Carolina entstand ein speziell auf Offshore Windkraftanlagen ausgerichteter Prüfstand, der funktionell dem NaRec-Prüfstand sehr ähnlich ist. Der Prüfstand ist für Anlagen mit einer Nennleistung über 7,5 MW ausgelegt und hat eine Antriebsleistung von 15 MW. Der Gondelprüfstand kann dem Prüfling an der Schnittstelle Nabe-Gondel Lasten in sechs Freiheitsgraden aufprägen. Zusätzlich verfügt die Clemson University über einen kleineren Prüfstand mit 7,5 MW Antriebsleistung.

## 4.5

### Lindoe Offshore Renewables Center (Dänemark)

Das Lindoe Offshore Renewables Center (LORC) in Dänemark entstand auf einem ehemaligen Werftgelände, was schon den Fokus auf den Offshore-Bereich verdeutlicht. Das System verfügt über einen Prüfstand mit nur dem torsionalen Freiheitsgrad.

## 4.6

### CWD (RWTH Aachen University)

An der RWTH Aachen werden zwei Systemprüfstände in unterschiedlichen Leistungsklassen errichtet. In Phase I des Projektes wurde ein vorhandener Universalprüfstand mit 1 MW Leistung als Gondelprüfstand umgebaut. Die Phase II umfasste den vollumfänglichen Aufbau eines 4-MW-Systemprüfstands zur Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens von WEA-Gondeln im Rahmen des Centers for Wind Power Drives (CWD) an der RWTH Aachen.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

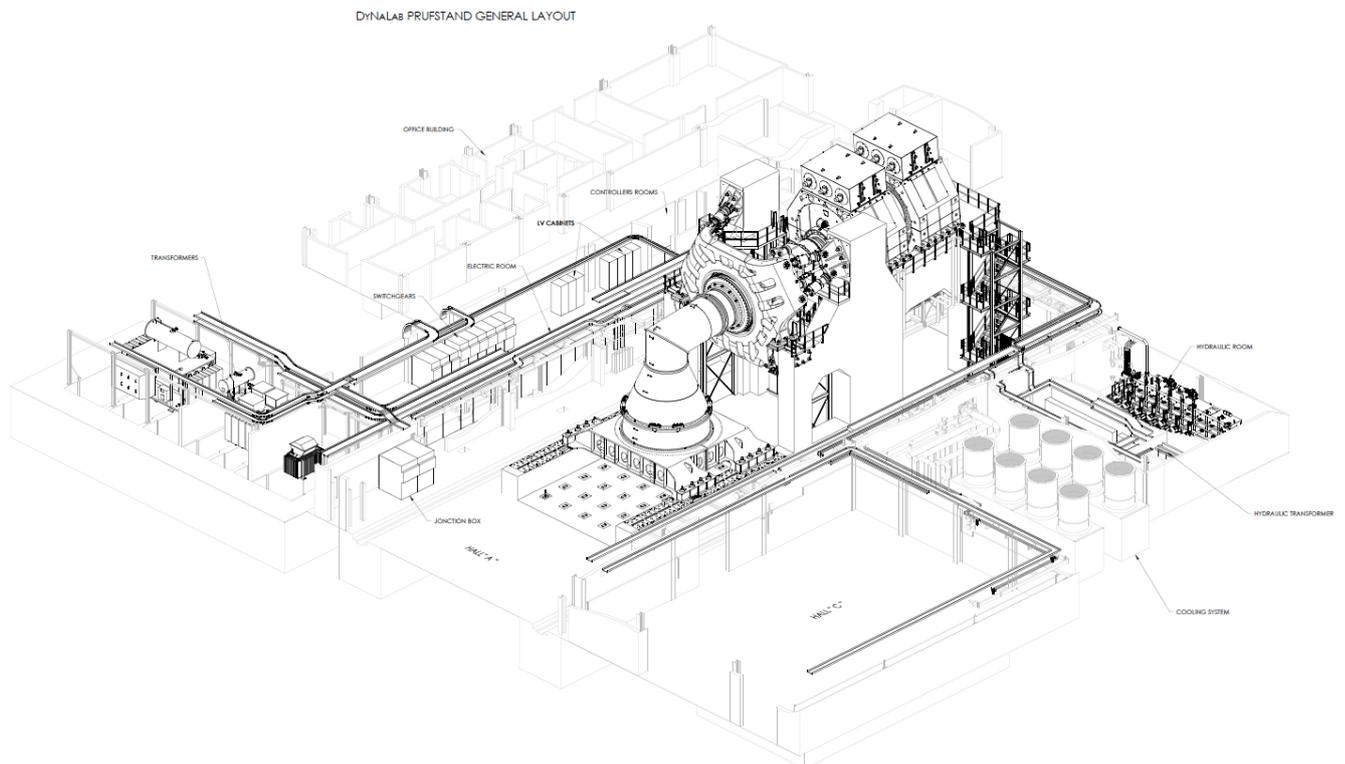
.....  
Zusammenarbeit mit anderen  
Stellen  
.....

Während der Projektlaufzeit entwickelten sich unterschiedliche Möglichkeiten für den technischen Austausch zwischen den unterschiedlichen Prüfstandsprojekten. Dieser Austausch erfolgte sowohl über einführende Diskussionen im Rahmen von Konferenzen als auch über weiterführende Treffen. Beispielhaft sei hier die Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer IWES und dem NREL zu nennen wo sich tiefergehend mit den ähnlichen Netzsimulationssystemen ausgetauscht wurde. Zurzeit wird mit anderen Forschungseinrichtungen und interessierten Unternehmen am Aufbau einer gemeinsamen Plattform gearbeitet, in der Forschungsergebnisse zusammenfließen sollen. Durch ein gemeinsames Auftreten kann beispielsweise gegenüber Zertifizierungsunternehmen für den Nutzen von WEA Prüfständen besser argumentiert werden. Hier sei beispielhaft die Zusammenarbeit im neuen IEA Task 35 „Full Size Ground Testing for Wind Turbines and their Components“ erwähnt. Hinsichtlich einer möglichen elektrischen Zertifizierung von Windenergieanlagen wird die Arbeitsgruppe „Prüfstände“ bei der FGW TR3 von Fraunhofer IWES geleitet.

## 6 Eingehende Darstellung des Prüfstandes

Eingehende Darstellung des Prüfstandes

Dieses Kapitel beschreibt die Realisierung des Gondelprüfstandes über die Projektdauer hinweg. Die folgende Abbildung zeigt hierbei das finale Design des Prüfstandes und der dazugehörigen Komponenten.



**Abb. 02: Übersicht Gondelprüfstand**

Die „Liste der vorhabensspezifischen Anlagen/Gegenstände“ für einen Gondelprüfstand gemäß Zuwendungsbescheid vom 9. Februar 2015 stellt sich wie folgt dar:

### Lfd. Nr. Bezeichnung

1	Antriebsmotor
2	Trafo-Anlage
3	Umrichter-Anlage
4	Kupplungssystem
5	Krafteinleitung
6	Prüflingsaufnahme
7	Arbeitsplattform
8	Sonstige Prüfstandselektrik

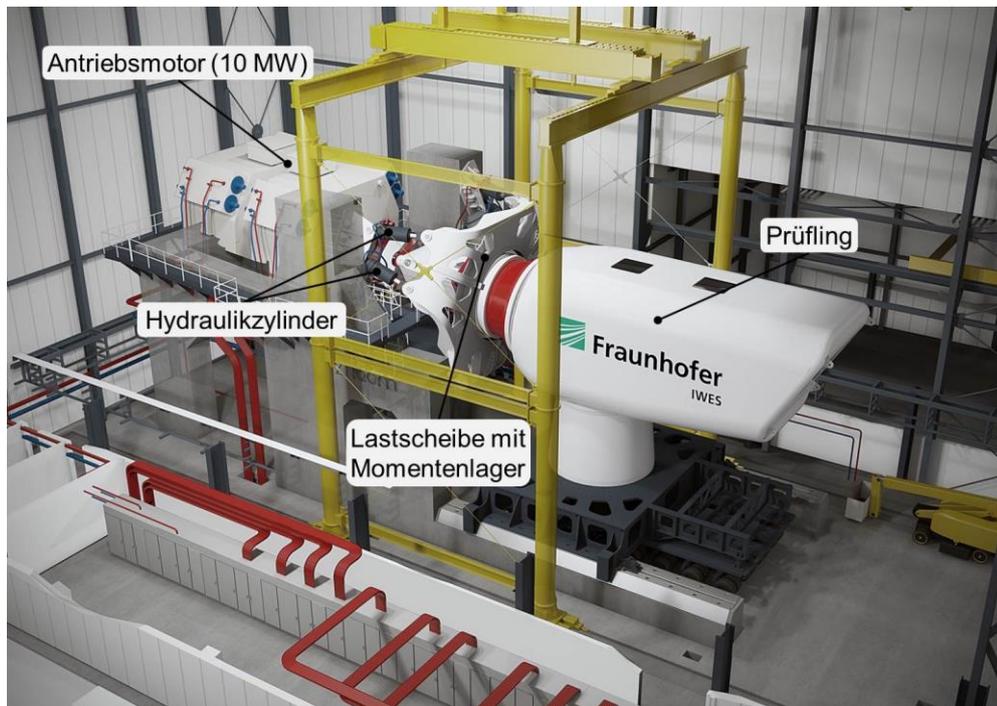
**Abb. 03: Liste vorhabensspezifischer Anlagen/Gegenstände**

9	Erhöhte Einspeiseleistung
10	Messtechnik
11	Kalibriereinrichtung
12	Automatisierung des Kühlsystems
13	Upgrade des Kühlsystems
14	Wiederverwertbares Lager
15	3d-Lasertracker und Implementierung

Eingehende Darstellung des Prüfstandes

Soweit vorhanden sind die Komponenten ebenfalls in der vorangehenden Abbildung dargestellt. Eine detaillierte Darstellung des realisierten Systems erfolgt in Absatz 0.

Die folgende Abbildung zeigt den Prüfstand mit den Hauptkomponenten Antriebsmotor und mechanische Krafteinleitung. Die Netzersatzanlage ist durch die Umrichterschränke im unteren Bildrand angedeutet.



**Abb. 04: Layout Gondelprüfstand**

Soweit vorhanden sind die Komponenten ebenfalls in der vorangehenden Abbildung dargestellt. Eine detaillierte Darstellung des realisierten Systems erfolgt in Absatz 0.

## 6.1 Prüfstandsbeschreibung

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

### 6.1.1 Antriebsmotor

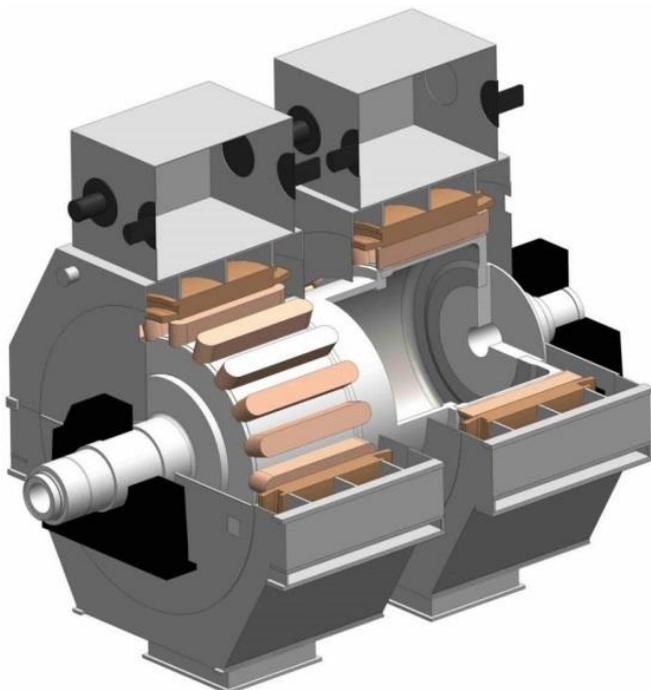
Detaillierte Untersuchungen zum Stand der Technik zeigten bereits frühzeitig im Projekt die generellen Spezifikationswerte des Antriebes. Um Windenergieanlagen bis zu 7.5 MW Leistung auf dem Prüfstand sinnvoll untersuchen zu können, sind mindestens 10 MW nominelle Antriebsleistung des Antriebsmotors notwendig. Weiterhin sollte die Antriebsmaschine über eine ausreichende Leistungsreserve verfügen die für die Untersuchung von transienten Lastfällen notwendig ist.

Für die geforderte maximal mögliche Dynamik an der Rotorwellenschnittstelle wurde ein Direktantrieb für die hochdynamische Drehmomenteinprägung benötigt. Aufgrund der bereits feststehenden Dimensionen des Antriebsmotorfundaments beschränkte sich die Auswahl auf zwei mögliche Motortypen:

- Permanenterregte Synchronmaschine (PMSM)
- Fremderregte Synchronmaschine (SM)

Eine Lösung mit zwei Antriebsmaschinen in Tandemanordnung ist möglich, sofern die Dynamikanforderungen eingehalten werden.

Im DyNaLab kommt ein Antriebsmotor der Lloyd Dynamowerke (LDW) zum Einsatz. Abb. 05: zeigt den LDW Antriebsmotor, über den das durch den Wind eingeleitete Drehmoment nachgebildet wird.



**Abb. 05: Schnittdarstellung  
2x5 MW Antriebsmotor**

Bei der Motorkonfiguration handelt es sich um zwei fremderregte Synchronmaschinen in Tandemanordnung mit einer jeweiligen Antriebsleistung von 5 MW. Dadurch stehen für den Testbetrieb 10 MW Antriebsleistung zur Verfügung, wodurch Drehmomente von über 8600 kNm in den Prüfling eingeleitet werden können. Untersuchungen von LDW haben ergeben, dass für eine Dauer von sechs Minuten ein Drehmoment von bis

zu 13.000 kNm eingeleitet werden kann. Somit lässt sich der prüfbare Bereich mit gewissen Einschränkungen auf Anlagen mit einer Nennleistung von 8 MW erweitern. Dadurch ergibt sich eine Bandbreite der Prüflingsnennleistung von 2 bis 8 MW. Während der Detaillierungsphase wurde das Antriebskonzept auf eine möglichst hohe Steifigkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Trägheit hin optimiert.

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

Die folgende Abbildung zeigt einzelne Teile der Rotorwelle und Pole. Die Komponenten wurden zusammen mit der Überlastkupplung in den Niederlanden zusammengebaut um die Rundlaufgenauigkeit der Rotorwelle zu überprüfen.



**Abb. 06: Motorwellenkomponenten**

Die Statorgehäuse wurden im Bremer LDW Werk mit Ständerblechen ausgestattet. Abbildung Abb. 07: zeigt das Projektteam bestehend aus Mitarbeitern des Fraunhofer IWES, LDW und idom vor dem ersten der beiden Statoren.



**Abb. 07: 1. Stator am LDW Standort in Bremen**

Nach Fertigstellung der beiden Statoren und der beiden Rotorwellen wurden diese zum DyNaLab geliefert, wo die Endmontage stattfand. Hierfür wurden zunächst die einzelnen Hälften montiert. Das heißt, dass jeweils ein Rotor mit einem Stator „verheiratet“ wird. Dafür werden die ca. 130 t schweren Rotoren in den Stator eingefahren. Der dabei zur Verfügung stehende Luftspalt beträgt nur 7 mm. Die folgende Abbildung zeigt die Anlieferung des prüflingsseitigen Rotors in Bremerhaven.



**Abb. 08: Anlieferung Stator**

Der Transport erfolgte über den Seeweg und das letzte Stück vom Hafen zum Labor erfolgte auf einem SPMT, einem mehrachsigen Schwerlasttransporter. Der auf dem vorangehenden Bild zu sehende vordere Wellenabsatz ist dabei die verpackte Überlastkupplung. Die in Bremen vormontierten Statorgehäuse wurden ebenfalls nach Bremerhaven gebracht. Dabei wurde der hintere Stator direkt zur Baustelle gebracht und der prüflingseitige Stator bis zur endgültigen Montage in unmittelbarer Nähe zum DyNaLab zwischengelagert. Die folgende Abbildung zeigt den hinteren Stator in der Prüfhalle. Auf dem Bild sind außerdem das 420 t hebende Hubgerüst sowie der hinter dem Stator stehende hintere Rotor zu sehen. Der Zustand der Komponenten wurde am Ende 2014 durch eine elektrische Messung überprüft. Hierfür wurde der Widerstand der einzelnen Phasen gegenüber Masse bei einer anliegenden Spannung von 1000 V gemessen. Der Quotient, der nach 1 und 10 Minuten gemessenen Widerstandswerte, ergibt dabei einen Indikationswert für die Feuchtigkeit der empfindlichen Wicklungen. Diese Messungen verliefen positiv mit ähnlichen Ergebnissen zu den Messungen im Werk, so dass mit der Motormontage begonnen werden konnte. Die folgende Abbildung zeigt das an der Montage beteiligte Team nach erfolgreicher Zusammenführung vor dem antriebsseitigen Motor. Nach Montage am Boden wurden die Motoren auf den Prüfblock gehoben und dort mechanisch verbunden und final ausgerichtet.

-----  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
-----



**Abb. 09: Montage von Rotor und Stator**

Die folgende Abbildung zeigt den Antriebsmotor in Position auf dem Prüfstandsfundament.



**Abb. 10: 10 MW Antrieb auf dem Prüfstandsfundament**

Nach abgeschlossener elektrischer und mechanischer Installation wurde der Antriebsmotor in Betrieb genommen und seine technischen Parameter überprüft. Hierbei konnten die gestellten Anforderungen im vollen Umfang überprüft werden. Die nachfolgende Abbildung Abb. 11: zeigt exemplarisch den »Hochlauf« eines Motors beim back-to-back Test des Antriebs bei Nennleistung und Nenndrehzahl über einen Zeitraum von vier Stunden. Bei diesem Test wurde ein Motor des Tandem Antriebs als

Motor, der andere als Generator genutzt. Damit war es möglich auch ohne einen leistungsstarken Prüfling den Antrieb bis an die Leistungsgrenze in Betrieb zu nehmen. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Antrieb sicher im Nennbetrieb arbeitet.

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

Motor 1 SN 403002 - Diagramm

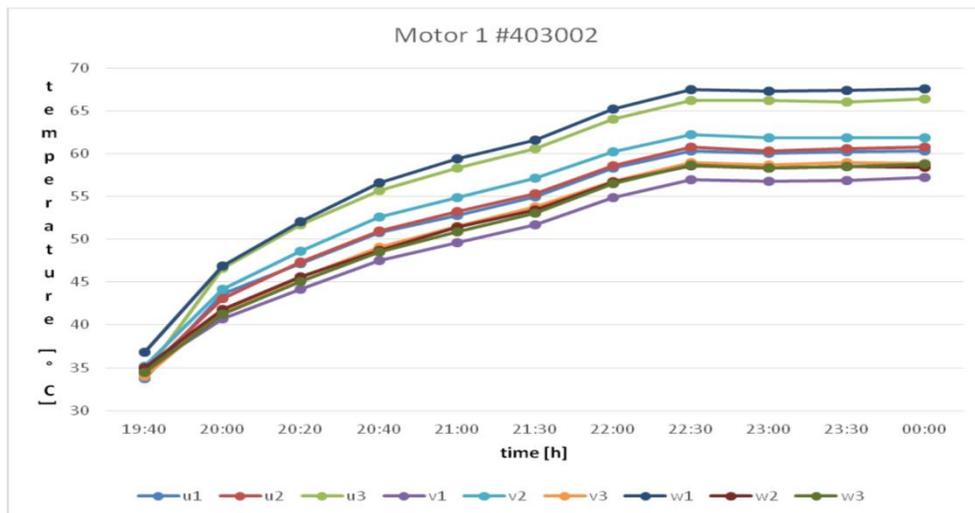


Abb. 11: Back-to-Back Inbetriebnahme

### 6.1.2 Netzersatzanlage und elektronische Komponenten

Im DyNaLab ist es möglich unterschiedliche Netzsituationen nachzubilden. Dadurch soll das Verhalten von Windenergieanlagen und deren Rückwirkungen auf das Netz bei Störfällen des Netzes untersucht werden. Für die Realisierung dieser Netzersatzanlage sind unterschiedliche Subsysteme erforderlich. Bezogen auf die in Abb. 03: vorgestellte Liste der Vorhabens spezifischen Anlagen/Gegenstände handelt es sich dabei um die Punkte 2 (Trafoanlagen), 3 (Umrichteranlage), 8 (erhöhte Einspeiseleistung) und 10 (sonstige Prüfstandelektrik). Das Konzept für die Netzersatzanlage wurde dabei in enger Zusammenarbeit mit dem Lieferanten, ABB, abgestimmt. Hierfür wurden aufwendige Simulationen durchgeführt um die bestmögliche Konfiguration zu ermitteln.

Das elektrische System wird zum einen dafür verwendet elektrische Energie in mechanische zu wandeln und den Antriebsmotor anzutreiben und somit den Prüfling. Zum anderen die erzeugte Prüflingsenergie in das elektrische System kontrolliert zurückzuführen. Die erzeugte Prüflingsenergie wird ins System zurückgespeist wodurch eine effiziente Prüfstandsnutzung ermöglicht wird.

Das System basiert auf ACS 6000 Umrichtern, ein modulares System dass durch Gleich-, - und erneute Wechselrichtung definierte elektrische Bedingungen einstellt. Damit werden zwei unterschiedliche Ziele verfolgt: Zum einen wird dadurch die Motorenregelung ermöglicht wodurch definierte Drehmoment oder Drehzahl Vorgaben realisiert werden und zum anderen für die Netzersatzanlage wo eine definierte Spannungsquelle reale Netzereignisse nachbilden kann.

Die Schnittstelle zum Gebäude bildet beim DyNaLab eine 20 kV Einspeisung. Die Schnittstelle zum Prüfling bildet die so genannte Junction Box (siehe. Dieses separate Anschlussfeld ermöglicht die akkurate Messung von Spannungen und Strömen am direkten Verbindungspunkt zu den kundenseitigen elektrischen Komponenten.



Aufstellung auf einer Sicherheitswanne erforderlich. Die folgende Abbildung zeigt die drei Transformatoren.

-----  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
-----



**Abb. 14: Prüfstandstransformatoren**

Von links nach rechts sind dabei folgende Trafos zu sehen: der große Trafo links (TX2) dient der Netzersatzanlage und erlaubt es das Spannungslevel für den Prüfling einzustellen (10, 20 oder 36 kV), der mittlere (TX1) und rechte (TX3) Trafo sind für den Antriebsmotor erforderlich.

Der Einspeisetrafo (TX1) ist an die Hauptschaltanlage angeschlossen und wird für die Speisung der ARU Umrichter (Motoreinspeisung) benötigt. Die Hauptmerkmale des Transformators sind die Folgenden:

- Öltrafo für Außeneinsatz
- Nennspannung 20 kVAC.
- Nenn-Secondary Spannung 3,16kVAC.
- Nennfrequenz 50Hz.
- Abmessungen 3500 x 3700 x 4700 mm (LxWxH).

Der Step-up Trafo (TX2) wird für die Netzersatzanlage benötigt. Hiermit lassen sich unterschiedliche, Spannungslevel von 10, 20 und 36 kV realisieren.

Die Hauptmerkmale des Transformators sind die Folgenden:

- Öltrafo für Außeneinsatz
- Nennleistung auf Mittelspannungsseite 15MVA und auf der anderen Seite 6x2,5MVA.
- Semi-automatische TapChanger
- Nennspannung 10, 20 or 36 kVAC.
- Nenn Secondary Spannung 3,16kVAC.
- Nennfrequenz 50/60 Hz.
- Erwartete Kurzschlussspannung 5% (basierend auf 15MVA und 36kV).
- Abmessungen 7100 x 5000 x 4900 mm (LxWxH).

Der Erreger Trafo (TX3) ist an die Hauptschaltanlage angeschlossen und wird benötigt für die Erregung des Antriebsmotors.  
Die Hauptmerkmale des Transformators sind die Folgenden:

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

- Öltrafo für Außeneinsatz
- Nennspannung Mittelspannungsseite 664 kVA und Niederspannungsseitig 332 kVa.
- Nennspannung 20000 VAC.
- Nenn Secondary Spannung 690 VAC.
- Nennfrequenz 50 Hz.
- Erwartete Kurzschlussspannung 5%
- Abmessungen 2200 x 1200 x 2100 mm (LxWxH).

### 6.1.2.2 Umrichter

Das ACS 6000 Multidrive Variable Speed Converter System wird für die Versorgung der zwei Antriebsmotoren verwendet. Die Regelung basiert dabei auf Direct Torque Control (DTC) eine Art Pulsweitenmodulation (PWM). DTC ist dabei eine Motorregelung für Mittelspannungsantriebe und ermöglicht:

- Drehmomentregelung
- Drehzahlregelung
- Positionsregelung

Der ACS 6000 Power Electronics Grid Simulator (PEGS) Controller, ist ein spezielles Regelungselement das es herkömmlichen ACS 6000 Power Units erlaubt als Netzersatzanlage zu arbeiten.

Der Power Electronics Grid Simulator (PEGS) ermöglicht es ein stabiles und definiertes Netz bereitzustellen und darüber hinaus realitätsnahe Netzausfälle zu simulieren. Das System lässt die echtzeitfähige Steuerung folgender Parameter zu:

- Spannungsamplituden und Phasenverschiebung für jede Phase
- Spannungsfrequenz
- Netzimpedanz

Die Power unit basiert auf ACS6000 variable speed drive Hardware und Control. Power unit control ist ein Masterregler für PEGS und ist verantwortlich für Sicherheits- und Schutzfunktionen sowie für Initialisierung und Umrichterbetrieb. Die Power Unit unit erlaubt darüber hinaus Remote Zugriff und Überwachung. Dies kann für zur Fehlerbehebung genutzt werden

Netzsimulation wird durch den PEGS Controller gesteuert. Dabei müssen alle sicherheitsrelevanten Parameter die Freigabe für die Netzsimulation geben. Der Power Electronics Grid Simulator (PEGS) nutzt besondere Modulationsalgorithmen um einen niedrigen THD (total harmonic distortion) und hohe Spannungsdynamik zu realisieren. Dies sind die Voraussetzungen um die Anlage für Fault Ride Through Tests (FRT) zu nutzen.

Die folgende Abbildung zeigt das gesamte Umrichtersystem welches im DyNaLab installiert wurde:



-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

**Abb. 15: Umrichtersystem**

### **6.1.2.3 Inbetriebnahme der Netzersatzanlage**

Das System wurde umfangreich gemäß der unten stehenden Test Matrix getestet. Folgende Tests wurden auf jedem Spannungslevel durchgeführt:

- Spannungsrampe bis Nennspannung und wieder runter
- Verweilen auf jedem Punkt für mindestens 3 Minuten

Für jede circuit breaker protection group (10/20/36kV) wurde die jeweilige Schutzfunktion überprüft:

- 105% / 4s limit
- 130% / 0.6s limit

Weitergehende Tests mit unterschiedlichen Konfigurationen des dynamischen Verhaltens der Netzersatzanlage wurden vornehmlich bei tap 1&2 durchgeführt. Alle durchgeführten „non-load tests“ konnten erfolgreich absolviert werden und zeigten somit die Eigenschaftserfüllung der Netzersatzanlage.

#### **LVRT tests**

In Abhängigkeit des Betriebsmodus, Testparameter und kommandiertes Spannungsprofil lassen sich unzählige unterschiedliche LVRT Tests (low voltage ride through) durchführen. Während der Inbetriebnahme wurde versucht möglichst viele unterschiedliche Kombinationen durchzuführen. Generell lassen sich dabei LVRT Tests durch die folgenden Parameter beschreiben:

1. Spannungseinbruch in % des Ausgangswertes
2. Slewrate
3. Rate of change limiting type: Sync or Normal
4. Symmetrie der Spannungsreferenz bei Einbruch: symmetrisch oder asymmetrisch
5. Spannungsfrequenz
6. Pattern shape

#### **Profil 1**

Profil 1 ist durch einen Spannungseinbruch und sofortige Spannungsrückkehr innerhalb von 100-600 ms charakterisiert.

#### Profil 2

Profil 2 ist durch einen Spannungseinbruch und eine rampenförmige Spannungsrückkehr zum Ausgangswert innerhalb von 1-3 s beschrieben.

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

#### Profil 4

Profil 4 beschreibt einen Spannungs- und Phasensprung um die rampenförmige Rückkehr zum Ursprungszustand innerhalb von 1-3 s zu untersuchen.

### **HVRT tests**

In Abhängigkeit des Betriebsmodus, Testparameter und kommandiertes Spannungsprofil lassen sich unzählige unterschiedliche HVRT Tests (high voltage ride through) durchführen. Während der Inbetriebnahme wurde versucht möglichst viele unterschiedliche Kombinationen durchzuführen. Generell lassen sich dabei HVRT Tests durch die folgenden Parameter beschreiben:

HVRT Test ist durch die folgenden Parameter beschreiben:

- 1) HVRT Anstieg in % des Ausgangswerts
- 2) Slewrate
- 3) Rate of change limiting type: Sync or Normal
- 4) Symmetrie der Spannungsreferenz bei Einbruch: symmetrisch oder asymmetrisch
- 5) Spannungsfrequenz
- 6) Pattern shape

#### Profil 1

Profil 1 ist durch einen Spannungseinbruch und sofortige Spannungsrückkehr innerhalb von 100-600 ms charakterisiert.

#### Profil 2

Profil 2 wird ist durch einen Spannungseinbruch und eine rampenförmige Spannungsrückkehr zum Ausgangswert innerhalb von 1-3 s beschrieben.

#### Profil 4

Profil 4 beschreibt einen Spannungs- und Phasensprung um die rampenförmige Rückkehr zum Ursprungszustand innerhalb von 1-3 s zu untersuchen.

### **OCB tests**

OCB Tests wurden durchgeführt um zu überprüfen dass die output circuit breaker bei Überspannungsevents nach folgenden Kriterien auslösen:

- 1) Spannungsniveau ist höher als 105% der Nennspannung für mehr als 4 s
- 2) Spannungsniveau ist höher als 105% der Nennspannung für mehr als 0.06 s

Für jede Spannungsebene (10 / 20 / 36kV) wurden ride-through tests durchgeführt um das entsprechende Verhalten bei Erreichen der oben genannten Kriterien sicherzustellen. Für jede Spannungsebene (10 / 20 / 36kV) wurde ein Trip simuliert um das korrekte Verhalten der circuit breaker nachzuweisen.

Abb. 16: Test Matrix 1  
Netzersatzanlage

TID	Test case	Profile no	Depth [%]	SR [PU/cycle]	OPP	Sync	Sym	F	bin_GSCW	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap 4	Tap 5	Tap 6
T1	Operation														
T1.1	Ramp Up								1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T1.2	Operational reached								1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T1.3	Ramp Down								1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T2	Steady state														
T2.1	PWM - RefSync				0	1			65	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T2.2	PWM - Normal				0	0			1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T2.3	OPP				1	0			33	OK	OK	OK	OK	OK	OK
T2.4	V/F sweep				0	0			1	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T2.5	V/F sweep				1	0			33	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3	LVRT														
T3.1	10% Profile 1	1	10	2	0	1	0	50	65	OK	OK	OK	opt	opt	opt
T3.2	10% Profile 2	2	10	2	0	1	0	50	65	opt	opt	opt	opt	OK	opt
T3.3	30% Profile 1	1	30	2	0	1	1	60	577	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.5	30% Profile 1	1	30	20	0	1	0	50	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.8	30% Profile 2	2	30	0.5	0	0	0	50	1	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.10	30% Profile 2	2	30	0.05	1	0	1	50	545	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.13	50% Profile 1	1	0.5	2	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.15	70% Profile 1	1	70	2	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.17	90% Profile 1	1	90	2	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.19	90% Profile 1	1	90	20	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.22	90% Profile 1	1	90	0.05	1	0	1	50	545	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.26	100% Profile 1	1	100	2	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.28	100% Profile 1	1	100	20	0	1	0	50	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.30	100% Profile 1	1	100	0.5	0	0	0	50	1	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.31	100% Profile 2	2	100	0.5	0	0	0	50	1	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.33	100% Profile 2	2	100	0.05	1	0	1	60	545	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.38	Profile 4	4	30	0.5	0	0	0	50	1	OK	opt	opt	opt	opt	opt
T3.39	Profile 4	4	60	20	0	1	0	60	65	OK	opt	opt	opt	opt	opt

Abb. 17: Test Matrix 2, Netzersatzanlage

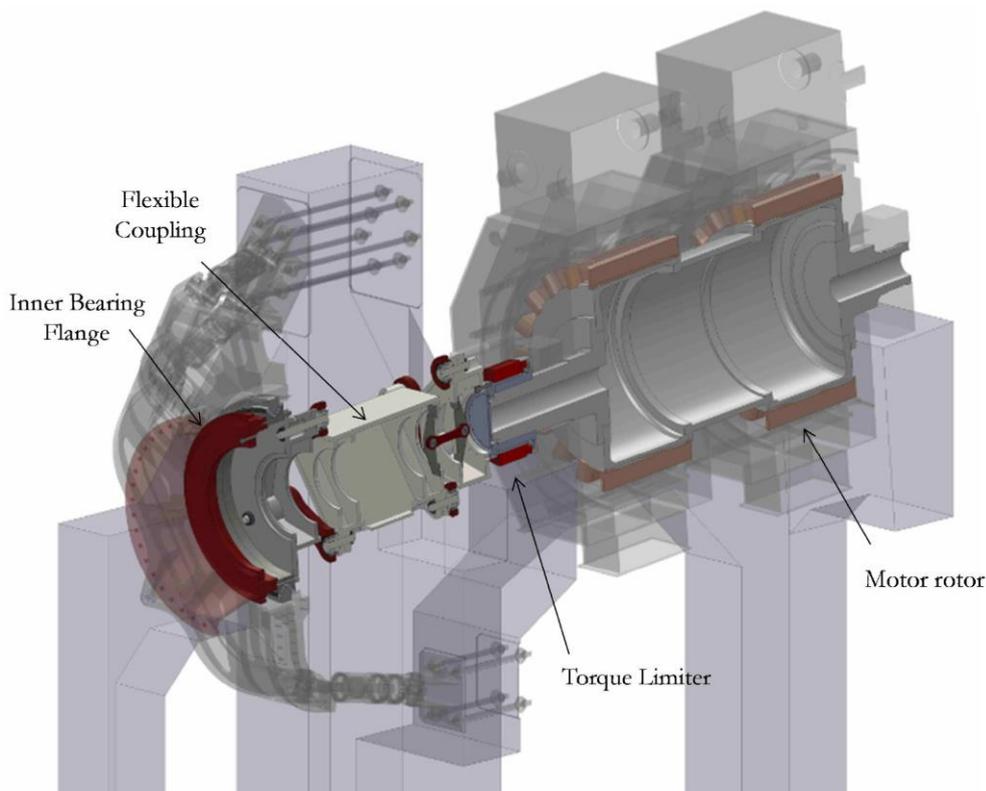
TID	Test case	Profile no	Depth [%]	SR [PU/cycle]	OPP	Sync	Sym	F	bin_GSCW	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Tap4	Tap 5	Tap 6
T4	HVRT														
T4.1	10% Profile 1	1	10	20	0	1	1	50	577	OK	OK	OK	opt	OK	OK
T4.2	10% Profile 2	2	10	20	0	1	0	60	65	opt	opt	opt	opt	opt	OK
T4.3	20% Profile 1	1	20	20	0	1	1	50	577	NA	OK	NA	opt	NA	OK
T4.4	20% Profile 2	2	20	2	0	1	0	50	65	NA	opt	NA	opt	NA	OK
T4.5	20% Profile 1	1	20	0.5	0	0	1	60	513	NA	OK	NA	opt	NA	opt
T4.6	20% Profile 2	2	20	0.5	0	0	0	50	1	NA	opt	NA	opt	NA	opt
T4.7	30% Profile 1	1	30	20	0	1	1	50	577	NA	OK	NA	OK	NA	OK
T4.8	30% Profile 2	2	30	20	0	1	0	60	65	NA	OK	NA	OK	NA	OK
T4.9	30% Profile 1	1	30	0.5	0	0	1	60	1025	NA	OK	NA	opt	NA	opt
T4.10	30% Profile 2	2	30	0.5	0	0	0	50	1	NA	opt	NA	opt	NA	opt
T5	OCB tests														
T5.1	HVRT 10% 3s			2				50	1	OK	OK	OK	opt	OK	opt
T5.2	HVRT 10% 5s			2				50	1	OK	OK	OK	opt	OK	opt
T5.3	HVRT 35% 0.3s			2				50	1	NA	OK	NA	OK	NA	OK
T5.4	HVRT 35% 0.6s			2				50	1	NA	OK	NA	OK	NA	OK

### 6.1.3 Kupplungssystem

Eingehende Darstellung des Prüfstandes

Der mechanische Triebstrang des Prüfstandes muss unterschiedliche Voraussetzungen erfüllen. Primär müssen hohe Drehmomente bei niedriger Drehzahl übertragen werden. Da der Prüfstand über ein hydraulisches Krafteinleitungssystem verfügt, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Lastsituationen zu Verformungen an der Schnittstelle zum Prüfstandtriebstrang. Diese Verlagerungen sind sowohl radial, axial als auch angular. Dieser Umstand macht eine Ausgleichskupplung zwingend erforderlich um Zwangskräfte auf den Antriebsmotor zu vermeiden.

Mit dem Gondelprüfstand sollen unterschiedliche Prüflinge im Bereich von 2-8 MW getestet werden, das bedeutet, dass der Prüfstand unter Umständen ein Vielfaches der maximalen Prüflinglasten auf den Prüfling übertragen kann. Deswegen wurde in der Designphase beschlossen eine hydraulische Überlastkupplung einzubauen, so dass bei mechanischer Last eine Trennung zwischen Prüfling und Prüfstand erfolgt. Die folgende Abbildung zeigt einen Schnitt des Triebstrangs und die Position der hydraulischen Überlastkupplung und der Ausgleichskupplung.



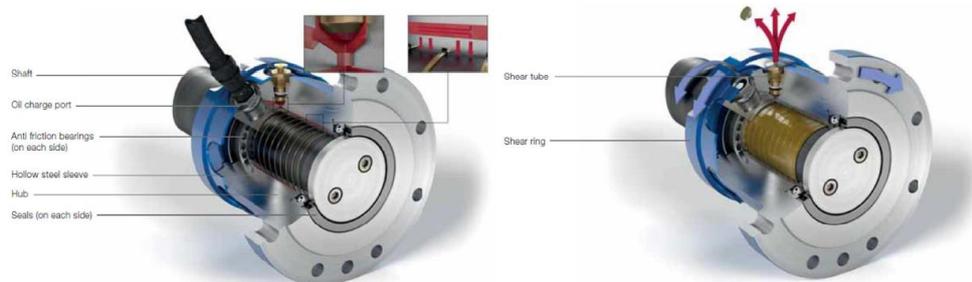
**Abb. 18: Triebstrang mit hydraulischer Überlastkupplung und Ausgleichkupplung**

#### 6.1.3.1 Überlastkupplung

Die Überlastkupplung schützt den Antriebsmotor bei ungewollt auftretenden hohen Drehmomentspitzen und trennt dafür die Antriebs- und Abtriebsseiten mechanisch voneinander. Die Überlastkupplung befindet sich zwischen dem Prüflingsseitigen Lager des Antriebsmotors und der Ausgleichskupplung. Die Verbindung zur Ausgleichkupplung erfolgt über eine Hirth Verzahnung. Bei der umgesetzten Lösung handelt es sich um eine Sonderanfertigung von Voith Turbo. Die Überlastkupplung hat einen Einstelbereich von 8000 kNm bis 15000 kNm und somit über den kompletten

Arbeitsbereich des Prüfstandes. Die Einstellgenauigkeit des Losbrechmoments beträgt +/- 10%.

Eingehende Darstellung des Prüfstandes



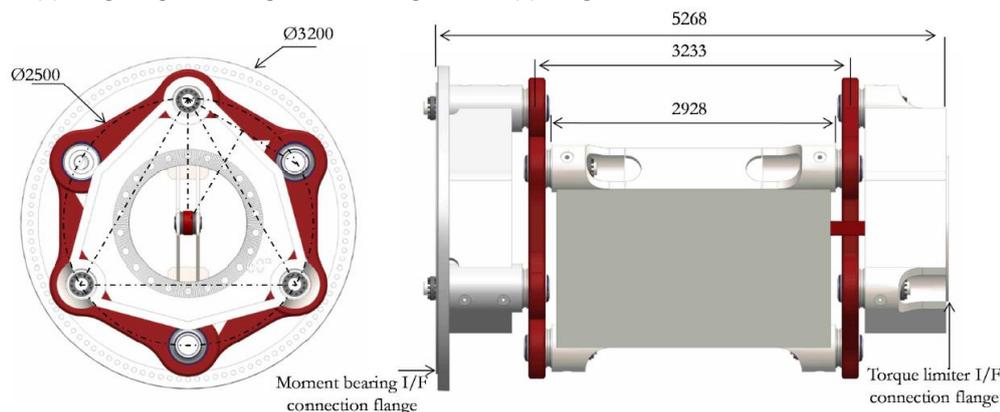
**Abb. 19: Überlastkupplung (Quelle Voith Turbo)**

Das Durchrutschmoment hängt direkt von dem eingestellten Druck in der Kupplung ab, so dass durch einstellen des Drucks auch der Arbeitsbereich der Kupplung eingestellt wird. Sobald das eingestellte maximale Drehmoment überschritten wird, rutscht die Verbindung und schert durch diese Bewegung Scherbolzen ab. Durch trennen der Scherbolzen entspannt sich der Druck in der Kupplung und die mechanische Welle-Nabe Verbindung wird gelöst. Um die Kupplung wieder in Betrieb zu nehmen müssen lediglich die defekten Bolzen ersetzt werden und der gewünschte Druck wieder eingestellt werden.

Bei der eingesetzten Überlastkupplung handelt es sich um eine robuste und zuverlässige Lösung mit einem sehr fein einstellbaren Auslösebereich.

### 6.1.3.2 Ausgleichkupplung

Die Ausgleichkupplung überträgt drehsteif das Antriebsdrehmoment auf den Prüfling. Außerdem gleicht die Kupplung Verlagerungen in Folge von, mit dem Krafterleitungssystem eingeleiteten Lasten, sowie mögliche Fehlstellungen die aufgrund von Montagetoleranzen aufgetreten sind, aus. Dadurch soll die Einleitung von parasitären Lasten auf den Antriebsmotor vermieden werden. Die folgende Kupplung zeigt die eingesetzte Ausgleichkupplung.



Das Funktionsprinzip basiert darauf, dass auf jeder Seite der Kupplung angular frei bewegliche Lenker das Drehmoment übertragen. Durch die sphärische Lagerung ist eine Verlagerung in allen anderen Freiheitsgraden möglich. Weitergehend verfügt die Kupplung über ein einstellbares System um "backlash" zu vermeiden.

Die Kraft übertragenden Lenker werden außerdem zur Drehmomentenmessung genutzt. Dafür befinden sich kalibrierte DMS auf den Lenker und über die geometrischen Bedingungen lässt sich aus den Lenkerkräften auf das wirkende Drehmoment schließen.

Die folgende Abbildung zeigt die installierte Ausgleichskupplung zwischen Antriebsmotor und Momentenlager.

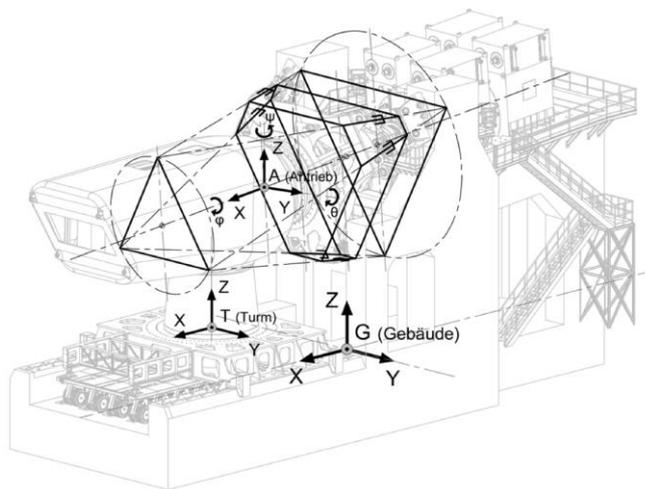


**Abb. 20: Ausgleichskupplung zwischen Antriebsmotor und Momentenlager**

-----  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
-----

### 6.1.4 Krafteinleitung

Das hydraulische Krafteinleitungssystem (engl. LAS) simuliert die realen Windlasten die auf eine Windenergieanlage wirken. Es ermöglicht die Applikation von Biegemomenten, radialen Lasten und Schubkräften. Dadurch ist es Möglichkeit das Anlagenverhalten in Folge von äußeren Kräften im Labor zu untersuchen. Weiterhin bietet dieses System die Möglichkeit bestehende Simulationsmodelle zu validieren und darauf aufbauend zu optimieren. Das Konzept basiert auf einer Stewart Plattform (Hexapod) für Krafteinleitung in 6 Freiheitsgraden. Das System verfügt über 6, hexagonal angeordnete, Servozylinder. Alle Freiheitsgrade sind geregelt. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die geometrische Beziehung zwischen den einzelnen Zylindern und dem Krafteinleitungspunkt.



**Abb. 21: KS-Krafteinleitungssystem**

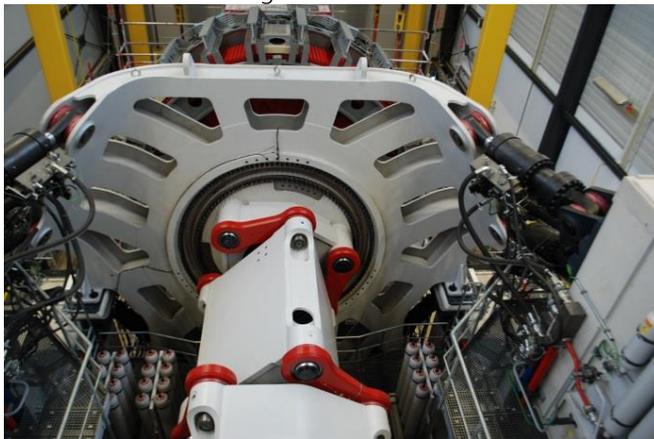
Die folgende Tabelle fasst die grundsätzlichen Eigenschaften des Krafteinleitungssystems zusammen:

Biegemomente ( $M_y$ und $M_z$ )	+/- 20000 kNm	<b>Abb. 22: Eigenschaften Krafteinleitungssystem</b>
----------------------------------	---------------	--

Schubkräfte	+/- 1900 kN
Frequenz	2 Hz
Servozyylinder	3000 kN
Typ	Stewart Plattform

Eingehende Darstellung des Prüfstandes

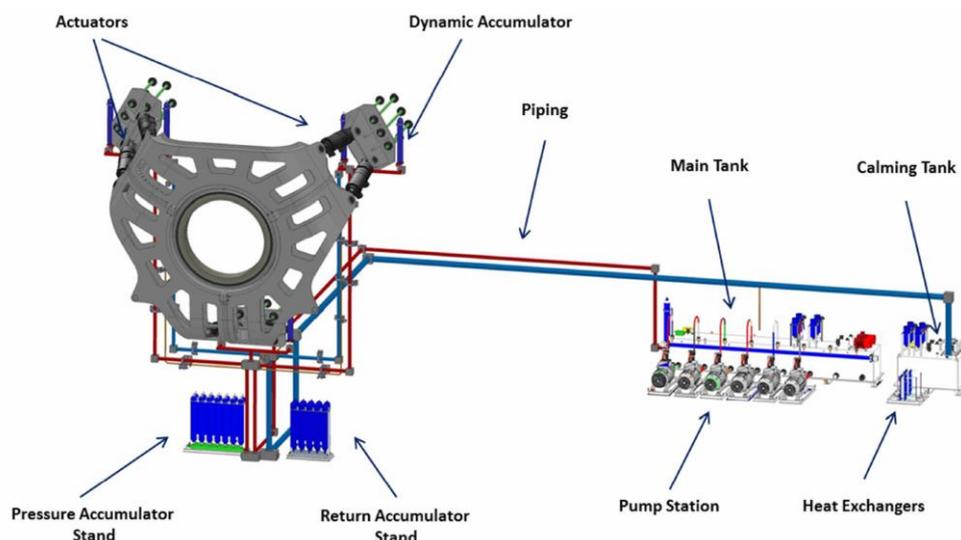
Der Vorteil dieses Systems ist, dass es auch für die Ausrichtung bei der Montage genutzt werden kann. Dafür wird das System im Positionsmodus gesteuert. Ein weiterer Vorteil liegt in den relativ großen möglichen Verfahrwegen gegenüber anderen Krafeinleitungssystem für Gondelprüfstände. Die Zylinder ermöglichen Verfahrwege von +/- 150 mm. Die folgende Abbildung zeigt das Krafeinleitungssystem mit feststehender Krafeinleitungsstruktur, den Servozyindern und dem Momentenlager von den Motoren aus.



**Abb. 23: Blick auf das Krafeinleitungssystem vom Motor**

Zusätzlich zu den 6 Servozyindern verfügt das Krafeinleitungssystem die Möglichkeit einer Gravitationskraftkompensation. Dies erfolgt über zwei zusätzliche Zylinder die die radiale Last des Hexpoden kompensieren können und es somit ermöglichen kleinere Anlagen sicher testen zu können.

Um den benötigten Öldurchfluss und Druck an den Servozyindern zu realisieren wurde ein umfangreiches Hydrauliksystem installiert. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über den Aufbau der Hydraulik im DyNaLab.



**Abb. 24: Hydraulikaufbau DyNaLab**

Von der Pumpenstation erfolgt die Versorgung. Druckspeicher sorgen dafür, dass jederzeit mehr als 300 bar Systemdruck zur Verfügung stehen. Das rückgeführte Öl

gelangt zunächst in einen Beruhigungstank bevor es dem System wieder zugeführt wird. Die folgende Tabelle fasst die generellen Daten des Hydrauliksystems zusammen:

-----  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
-----

Pumpen	6 x 270 cm <sup>3</sup>
Druck	315 bar
Maximaler Durchfluss	2.430 l/min
Haupttank	9000 l
Beruhigungstank	3.000 l

**Abb. 25: Hydrauliksystem**

Die folgende Abbildung zeigt die installierte hydraulische Leistungseinheit.



**Abb. 26: hydraulische Leistungseinheit**

Die Inbetriebnahme der Krafteinleitung erfolgte in zwei Stufen:

1. Phase I durch den Prüfstandslieferanten
2. Phase II durch IWES mit Hilfe der Kalibriereinrichtung

Die erste Phase erfolgte im Juli 2015 und die zweite Phase erfolgte im Dezember 2015 bzw. Januar 2016. Im Folgenden wird die Inbetriebnahme des Systems kurz erläutert.

#### **6.1.4.1 Inbetriebnahme Krafteinleitung Phase I**

Die Inbetriebnahme umfasste folgende Schritte:

1. Inbetriebnahme des Hydrauliksystems
2. Steuerung des Krafteinleitungssystems im Positionsmodus
3. Steuerung des Krafteinleitungssystems im Kraftmodus

Im Kraft geregelten Modus wurden dabei unter anderem folgende Laststufen angefahren. Da keine Reaktionstruktur vorhanden war, erfolgte die Inbetriebnahme durch vertikale Lasten auf das Prüfstandsfundament.

	Mittlere Last	$F_z = -300 \text{ kN}$
Fall 1	Amplitude und Frequenz	250 kN; f: 0.25 Hz
Fall 2	Amplitude und Frequenz	200 kN; f: 0.5 Hz
Fall 3	Amplitude und Frequenz	100 kN; f: 1 Hz
Fall 4	Amplitude und Frequenz	50 kN; f: 1.5 Hz
Fall 5	Amplitude und Frequenz	50 kN; f: 2 Hz

Abb. 27: Aufgeprägte Lasten Phase I

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Inbetriebnahme zu sehen.

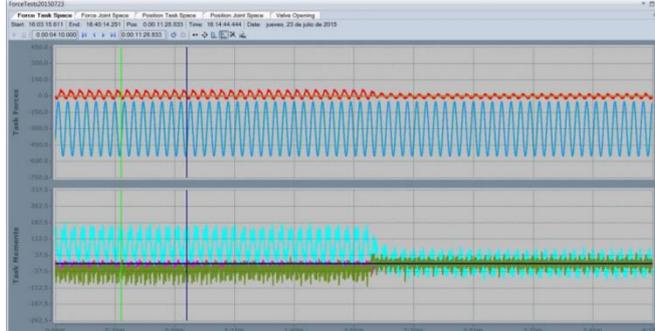


Abb. 28: Fall 1  
A: 250 kN; f: 0.25 Hz in Fz

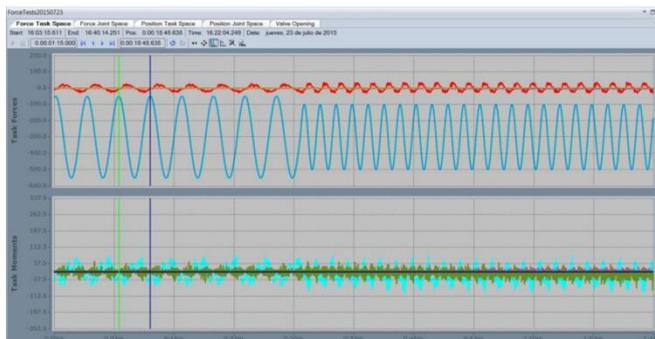


Abb. 29: Fall 2  
A: 200 kN; f: 0.5 Hz in Fz

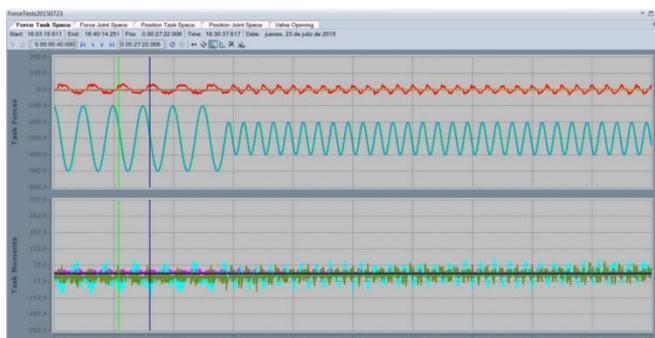
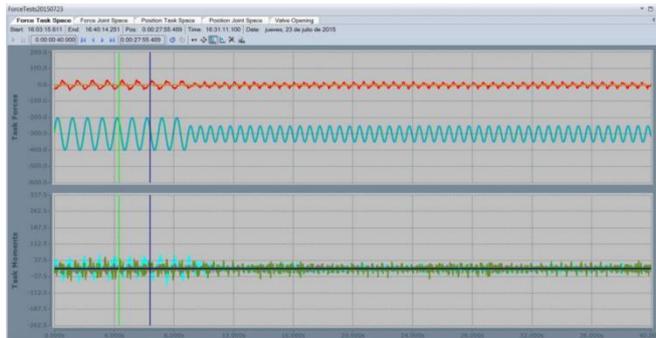
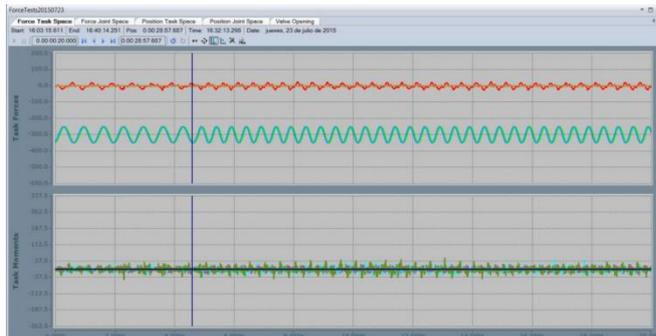


Abb. 30: Fall 3  
A: 100 kN; f: 1 Hz in Fz



**Abb. 31: Fall 4**  
**A: 50 kN; f: 1.5 Hz in Fz**

-----  
 Eingehende Darstellung des  
 Prüfstandes  
 -----



**Abb. 32: Fall 5**  
**50 kN; f: 2 Hz in Fz**

Die Inbetriebnahme verlief erfolgreich und wurde vom IWES abgenommen.

#### 6.1.4.2 Inbetriebnahme Krafteinleitung Phase II

Mit Hilfe der Kalibriereinrichtung konnten auch die anderen Freiheitsgrade überprüft werden und Kräfte und Momente in allen Richtungen aufgeprägt werden. Die maximalen Lasten waren durch die verwendeten Kraftmessdosen limitiert. Die folgenden Tabellen tragen die maximalen Lasten, die während der kurzen Prüfphase, aufgeprägt wurden zusammen.

**Abb. 33: Maximale/Minimale Kräfte**

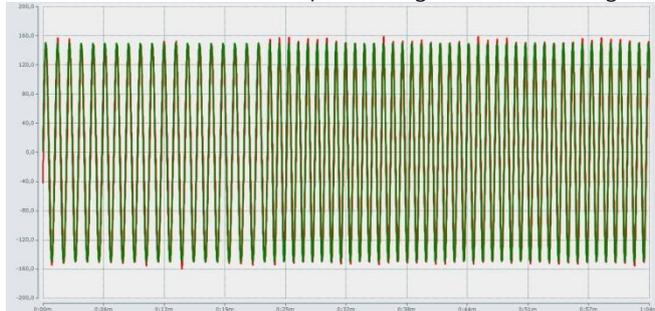
$F_x$	-1500 kN
	+800 kN
$F_y$	-400 kN
	350 kN
$F_z$	0
	1400 kN

**Abb. 34: Maximale/Minimale Momente**

$M_y$	-6000 kN
	+5000 kN
$M_z$	-3000 kN
	4000 kN

Obwohl die Kalibriereinrichtung vorrangig für die Überprüfung der statischen Lasten konzipiert wurde, konnten auch einige dynamische Untersuchungen durchgeführt werden. Es wurden Frequenzen von bis zu 1.4 Hz bei einer Amplitude von 140 kN in  $F_x$  Richtung gefahren. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen zum einen für eine sinusförmige Krafteinleitung und zum anderen für eine Rampenförmige Krafteinleitung.

-----  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
-----



**Abb. 35: Sinus  $F_x$**   
**A=150 kN und f=1.4 Hz**



**Abb. 36: Rampe:  $F_x$**   
**+/- 150 kN und Auf bzw.**  
**Abstiegszeit 0.3 s**

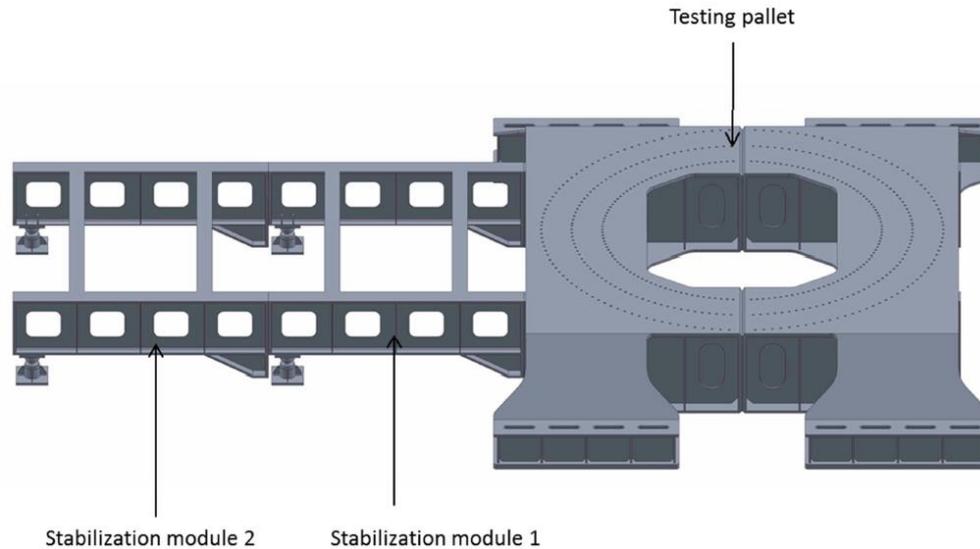
### 6.1.5 Prüflingsaufnahme

Das DyNaLab verfügt über ein einzigartiges Logistikkonzept, das einen schnellen Prüflingswechsel ermöglicht. Hierfür wird der Prüfling auf einer Palette vormontiert und dann, mit Hilfe eines Schwerlastfahrzeugs (SPMT) in die Prüfhalle gefahren. Ein aufwendiges Ausrichten ist dann nicht mehr notwendig. Ein weiterer Vorteil eines solchen Palettensystems liegt darin, dass der Prüfstand ausgelegt ist für unterschiedlich große Anlagen. So lassen sich kleinere Anlagen auf dem Palettensystem montieren und der Abstand zum Prüfstandsflansch wird dadurch minimiert. Bei besonders großen Anlagen wie zum Beispiel Multi-MW Direktantrieben, kann der Prüfling direkt auf dem Hallenboden befestigt werden. Dafür wurde ein spezielles Fundament erstellt.

Die Prüfpalette muss für den Prüfbetrieb folgende Eigenschaften erfüllen:

- Übertragung von statischen und dynamischen Lasten während des Testbetriebs
- Ausreichende Steifigkeit um Verlagerungen zu minimieren
- Möglichkeit der Anbringung eines Stabilitätsmoduls (bei nicht auf der Prüfpalette befindlichem Schwerpunkt)

Die folgende Abbildung zeigt die Prüfpalette mit den Stabilitätsmodulen.



Die Prüfpalette ist eine Schweißstruktur mit den Abmessungen 7.5x10x1.5 m. Diese Abmessungen passen zu den Standard SPMT Fahrzeugen. Der Anschluss zum Prüfling erfolgt über weitere "Turmadapter" die an unterschiedliche Lochkreise (2500 - 6000 mm) der Prüfpalette angeschlossen werden können. Diese Adapter sind individuell für jeden Prüfling bereitzustellen.

Die Palette kann außerdem dazu verwendet werden, eventuelle Fertigungs- und Montageabweichungen beim Anschluss des Prüflings auszugleichen. Dafür kann die Palette in den Raumrichtungen, über Hydraulikstempel, verschoben werden.

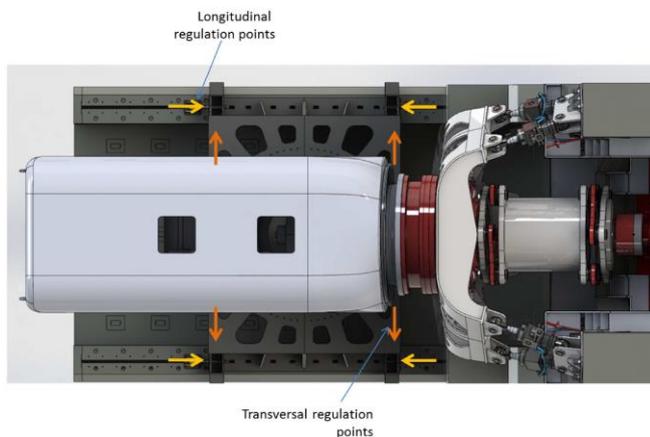
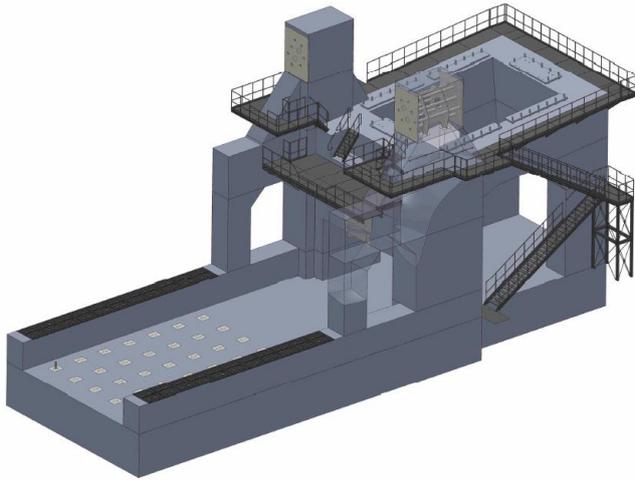


Abb. 38: Verschiebung Palette

Eine Anpassung in der Höhe ist ebenfalls möglich. Dies geschieht über das unterlegen von Füllblechen die in verschiedenen Stärken zur Verfügung stehen.

### 6.1.6 Arbeitsplattform

Die unterschiedlichen Prüfstands Subsysteme wie Antriebsmotor oder auch die hydraulische Krafteinleitung müssen für Wartungs- und Einstellarbeiten sicher zugänglich sein. Hierfür wurde der Prüfstand insoweit durch Treppenaufstiege, Gerüste und Brüstungen erweitert so dass dies gewährleistet ist. Die folgende Abbildung zeigt die realisierten Arbeitsplattformen.



**Abb. 39: Arbeitsplatt-  
formen**

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

Der Aufstieg zu den Antrieben auf dem Fundamentblock ist darüber hinaus über ein besonderes zwei Schlüssel Schließsystem gesichert. Ein Aufstieg ist nur mit dem im Leitstand befindlichen A-Schlüssel möglich. Dieser muss im Leitstand eingesteckt sein um den Prüfstand zu betreiben. Während der Arbeiten oben wird ein B-Schlüssel mitgenommen und ein Abziehen des A-Schlüssels ist nicht mehr möglich. Damit wird auch das unbeabsichtigte Anfahren des Prüfstandes verhindert wenn sich Personen in der Nähe von rotierenden Teilen befinden.

### 6.1.7 Kalibriereinrichtung

Nach Abbau des ersten Prüflings wurde zur Validierung des Lasteinleitungssystems die Kalibriereinrichtung (CaU) aufgebaut. Auf den folgenden Abbildungen ist zum einen die CaU zu sehen.



**Abb. 40: Kalibrier-  
einrichtung**

In Zukunft kann die CalU für weitergehende Untersuchungen genutzt und eventuell erweitert werden.

Eingehende Darstellung des Prüfstandes

### 6.1.8 Automatisierung und Upgrade des Kühlsystems

Der Gondelprüfstand des Fraunhofer IWES verfügt über unterschiedliche Komponenten, die aufgrund der teilweise hohen Abwärme aktiv gekühlt werden müssen. Die im Folgenden aufgezählten Komponenten haben dabei unterschiedliche Anforderungen an das zentrale Kühlsystem:

- Umrichter
- Antriebsmotor
- Hydraulik
- Prüfling

Das durch das Gebäude bereitgestellte Kühlsystem verfügte über eine rudimentäre und manuelle Steuerung des Kühlsystems. Diese ist ausreichend um das Kühlsystem manuell zu steuern. Allerdings ist ein Überhitzen der Komponenten nicht ausgeschlossen bzw. lassen sich dadurch nur bedingt konstante Bedingungen einstellen. Diese sind allerdings für einen aussagekräftigen Prüfstandsbetrieb notwendig. Kundenanforderungen verlangen nach maximalen Temperaturgradienten unter 4 °C/h der Umgebung. Weiterhin ist diese manuelle Art der Kühlsystemsteuerung unwirtschaftlich. Eine automatische Kühlung erhöht darüber hinaus die Sicherheit des Bedienpersonals, da die Überwachung von der Schaltzentrale aus erfolgen kann. Um die immer leistungsstärkeren Kundenanlagen im DyNaLab testen zu können (8 MW), ist es notwendig, die Prüfstandskomponenten und den Prüfling effektiv zu kühlen und somit den Prüfstand an seiner Leistungsgrenze betreiben zu können. Der genehmigte Prüfstand war zum Zeitpunkt der Bewilligung ausgelegt für Anlagen bis zu 7.5 MW. Die zahlreichen Anfragen für Prüfstandstests leistungsstärkerer Anlagen (8.x MW) lassen den Trend erkennen, dass der Prüfstand in hohem Maße an seiner absoluten Leistungsgrenze betrieben wird. Mit einer automatisierten Kühlsystemsteuerung ist es möglich, auch diese Anlagen im DyNaLab testen zu können.

Hierzu wurden zunächst zusätzliche Messstellen appliziert. Diese Messstellen werden nun genutzt um das Kühlsystem anzusteuern. Die Integration der Kühlsystemsteuerung ins Prüfstandskonzept wurde realisiert. Die folgende Abbildung zeigt die Visualisierung des Kühlsystems.

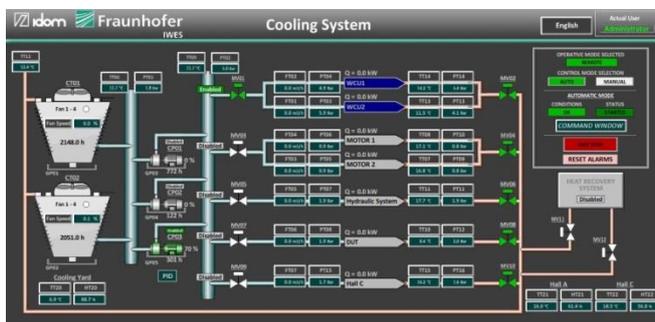


Abb. 41: Kühlsystem HMI



**Abb. 42: Hybrid Kühltürme  
DyNaLab**

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

Das bauseitige Kühlsystem wurde fertiggestellt und an das Fraunhofer IWES übergeben. Die vorangehende Abbildung zeigt die zwei die Hybridkühltürme. Im Nennlastbereich reicht hierfür die installierte Kühlleistung aus. Um jedoch die Antriebsmaschine auch bei ca. 120 % der Nennantriebsleistung konstant betreiben zu können, ist eine Aufstockung der Kühlleistung erforderlich. Die Realisierbarkeit der Erweiterung wurde geprüft und durch den Motorhersteller realisiert.

### **6.1.9 Wiederverwertbares Lager**

Der Gondelprüfstand des Fraunhofer IWES wurde ursprünglich ausgelegt für WEA bis ca. 7.5 MW. Der Fokus des Prüfstandes liegt dabei auf der dynamischen Untersuchung des Triebstrangs. Zusätzlich ist es, durch die hydraulische Krafteinleitung, möglich Kräfte und Momente auf den Prüfling aufzuprägen. Die Kraftübertragung auf die rotierende Welle erfolgt über das, zum Designstatus größte auf dem Markt verfügbare, Momentenlager. Dieses Momentenlager ist zeitfest für Biegemomente bis zu 20.000 kNm ausgelegt. Aufgrund der starken Nachfrage von WEA-Herstellern zur mechanischen Prüfung von Prüflingen im Bereich > 7.5 MW, ist der Ausfall des Lagers ein erhebliches und unausweichliches Risiko. Die Lieferzeit für ein solches Lager beträgt ca. 12 Monate. Mit Hilfe eines neuartigen, im Lager verbauten, Überwachungssystems lassen sich die Historie und die Zukunft des Lagers abschätzen. Dadurch ist es möglich das Lager vor dem kompletten Ausfall auszutauschen und durch zielgerichtete Reparatur des Lagers, die Lebensdauer zu verlängern bzw. zukünftige Betriebskosten des Prüfstandes zu reduzieren. Um diese Strategie verfolgen zu können, wurde ein zweites Lager bestellt, um die in Zukunft erforderlichen Reparaturmaßnahmen jederzeit durchführen zu können. Ein Ausfall des Lagers, ohne vorliegendes Ersatzlager, kann im ungünstigsten Fall zu einer Prüfstandstillstandzeit von bis zu einem Jahr führen.



**Abb. 43: Anlieferung Ersatzlager**

.....  
Eingehende Darstellung des Prüfstandes  
.....

In der vorangehenden Abbildung ist das Ersatzlager bei der Anlieferung zu sehen. Es wurde fachgerecht konserviert und für den zukünftigen Gebrauch eingelagert.

### 6.1.10 3-d Lasertracker

-----  
Eingehende Darstellung des  
Prüfstandes  
-----

Aufgrund der hohen Massen und geometrischen Abmessungen der Prüflinge ist eine genaue Ausrichtung auf dem Prüfstand mit erheblichem Aufwand verbunden. Ferner ist es für die sicheren Prüfläufe mit den verschiedenen Kundenanlagen notwendig die Verlagerungen vom Prüfling bzw. der Reaktionsstruktur der Krafteinleitung zu kennen, um deren Steifigkeit genau, experimentell bestimmen zu können. Der hierfür benötigte 3D-Lasertracker wurde geliefert und zur Ausrichtung des ersten und zweiten Prüflings erfolgreich verwendet. Die folgende Abbildung zeigt ein ähnliches Produkt.



**Abb. 44: 3d-Lasertracker  
(Quelle FARO)**

In Zukunft wird durch den Lasertracker ein genaues Ausrichten ermöglicht. Außerdem bietet dieser die Möglichkeit Verlagerungen im Betrieb zu erfassen.

Innerhalb der Projektlaufzeit konnten bereits zwei Kunden für die Nutzung des geförderten Gondelprüfstands akquiriert werden. Als erster Kunde nutzte den Prüfstand das Unternehmen Jacobs Powertec (JPT) den Prüfstand zur Absicherung eines neuartigen Generatorkonzepts. Die am Prüfstand ermittelten Erkenntnisse konnten weitreichenden Aufschluss über die weiteren Entwicklungsschritte liefern. Als zweiter Kunde konnte das Unternehmen Adwen (ehemals unter anderem Areva) sich einen Prüfzeitraum im DyNaLab sichern. Dieser zweite Kunde führt eine umfangreiche Prüfkampagne durch bevor der Prototyp aufgestellt wird. Für die Zukunft liegen bereits aussichtsreiche Anfragen vor, so dass festgehalten werden kann, dass der Gondelprüfstand die Absicherung bei der Entwicklung von neuen Windenergieanlagen unterstützt.

Aufgrund eines effektiven Logistikkonzepts erscheint das realisierte Projekt besonders für die in Bremerhaven ansässigen WEA Unternehmen interessant, da eine schnelle Inbetriebnahme von Prüflingen im Vordergrund steht. Besonderer Fokus bei dem geförderten Vorhaben lag auf der hohen torsionalen Steifigkeit und der damit hohen Dynamik an der Schnittstelle zum Prüfling sowie der Möglichkeit umfangreiche elektrische Untersuchungen mit Hilfe des Prüfstands durchzuführen. Dies bildet ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zu anderen Konkurrenzlösungen. Mit der in Untersuchungen nachgewiesenen Überlastfähigkeit des Prüfstandantriebs lassen sich mit dem entstandenen Prüfstand Anlagen im Bereich zwischen 2 und 8 MW testen. Dadurch konnte die potentielle Zielgruppe erweitert werden.

Im aktuellen und folgenden Berichtszeitraum sind IWES Mitarbeiter aktiv an der Anpassung von Vorschriften für die elektrische Zertifizierung von Windenergieanlagen beteiligt. Ziel ist es in Zukunft die elektrische Zertifizierung im Prüfstand durchführen zu können. Dies stellt einen deutlichen monetären als auch zeitlichen Nutzen für Kunden des DyNaLab gegenüber Felduntersuchungen dar.

Der geförderte Gondelprüfstand stellt zurzeit den einzigen industriell genutzten Prüfstand im Multi-MW Bereich dar. Somit zeichnet sich ab, dass das vom IWES verfolgte Konzept von der Industrie angenommen wird.