



WindMUSE Schlussbericht

Windturbine in multidisziplinärer
Simulationsumgebung
– FKZ 0325683A

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Dokumenteigenschaften

Titel	WindMUSE - Windturbine in multidisziplinärer Simulationsumgebung
Betreff	Schlussbericht
Institut	DLR Institut für Flugsystemtechnik
Erstellt von ¹	Holger Schumann, Leonel Akoto, Sascha Dähne, Alexander Gatter, Gerrit Heilers, Alexander Klawonn, Eugen Kohl (IWES), Maximilian Mindt, Oliver Seebach, Dorit Sobotta, Philipp Thomas (IWES), Johannes Wagner, Christian Willberg
Beteiligte	DLR: Institut für Flugsystemtechnik, Institut für Aeroelastik, Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik, Institut für Aerodynamik, Institut für Physik der Atmosphäre, Simulations- und Softwaretechnik Fraunhofer: Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)
Geprüft von	
Freigabe von	
Datum	27.10.2017
Version	1.0
Dateipfad	WindMUSE-PM-10.7_Schlussbericht.docx

¹ Die Verantwortung für diese Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhaltsverzeichnis

Teil I	4
1. Aufgabenstellung	4
2. Voraussetzungen	5
3. Planung und Ablauf	5
4. Wissenschaftlich technischer Stand	7
4.1. Referenzanlagen	7
4.2. Eingabedaten.....	8
4.3. Schnittstellen Technologien	10
4.4. Simulationswerkzeuge.....	11
4.5. Echtzeit-Technologien	15
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
Teil II	17
1. Verwendung der Zuwendung	17
1.1. Übersicht der Liefergegenstände.....	17
1.2. Ergebnisse der Anforderungsanalyse (AP1).....	18
1.3. Ergebnisse der Modellierung (AP2).....	23
1.4. Basissoftware und Simulationsergebnisse (AP3-4).....	81
1.5. Ergebnisse der Anwendungsdemonstration (AP5).....	149
1.6. Referenzen	164
2. Übersicht zahlenmäßiger Nachweis	166
3. Angemessenheit der geleisteten Arbeit	167
4. Voraussichtlicher Nutzen	168
5. Fortschritt an anderen Stellen	169
6. Veröffentlichungen	170
Anhang A	171
Anhang B	186

Teil I

Dieser Teil enthält eine kurze Darstellung des Projekts.

1. Aufgabenstellung

Die Simulation ist ein notwendiges Hilfsmittel bei der Analyse von Windenergieanlagen, da reale Tests aufgrund extremer Komponentenabmessungen sehr aufwändig sind. Im Verbundprojekt WindMUSE waren Simulationsmodelle von Windenergieanlagen und eine entsprechende Simulationsumgebung zu erarbeiten, um Windenergieanlagen ganzheitlich abbilden und analysieren zu können. Die Simulationsumgebung war so zu gestalten, dass einerseits vorhandene DLR Expertise aus der Luftfahrt für die Windenergie nutzbar gemacht werden kann und andererseits, Realversuche auf der DLR Forschungsplattform Windenergie vorbereitet werden können. Damit sollte es möglich sein, Windenergieanlagen mithilfe von in der Luftfahrt etablierten, hochgenauen Verfahren genauer als üblich abbilden zu können, was durch Referenzrechnungen zu zeigen war. Darüber hinaus waren das bereits verfügbare Simulationsframework OneWind des Verbundpartners Fraunhofer IWES und die damit verbundene Kompetenz zu nutzen.

Dementsprechend waren Modelle und Simulationswerkzeuge aus allen wesentlichen Disziplinen wie Meteorologie, Aerodynamik, Faserverbund-Strukturen, Aeroelastik und Systemtechnik zu erarbeiten, um eine multidisziplinäre und ganzheitliche Simulation zu ermöglichen. Die Modellgüte war so zu gestalten, dass eine hochgenaue Abbildung der:

- zeitlich und räumlich stark variablen meteorologischen Anströmbedingungen und der meteorologischen Messtechnik,
- Rotordynamik, -aerodynamik, -statik (inkl. Festigkeit) und Turmdynamik mit entsprechender Analyse aeroelastischer Effekte,
- Rotorblattregelung,
- Aktuatorkonzepte zur aktiven Blattregelung sowie der Elemente des Abtriebs mit Wellen und Getrieben

ermöglicht wird.

Die Simulationsumgebung war so zu gestalten, dass:

- Simulationen automatisiert ausgeführt werden, da eine Vielzahl an Lastfällen bzw. Simulationsiterationen zu berechnen sind,
- die Austauschbarkeit von Modellen und Simulationswerkzeugen gegeben ist,
- eine gemeinsame Sprache zur parameterbasierten Beschreibung von Windenergieanlagen zur Verfügung steht,
- das Simulationsframework OneWind von Fraunhofer IWES genutzt wird und
- ein Echtzeitbetrieb die Einbindung von realen Geräten erlaubt.

2. Voraussetzungen

Das DLR baut eine „DLR Forschungsplattform Windenergie“, bestehend aus min. 2 realen Windturbinen in der Größenordnung von ca. 2,5 MW auf und beantragte erfolgreich entsprechende Unterstützung beim Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) und beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Wie sich seit Jahrzehnten in der Luftfahrt bewährt hat, werden vor jedem kostenintensiven Realversuch Simulationen durchgeführt, um den Versuchsablauf sowie die erarbeiteten Methoden und Konzepte zu optimieren und Risiken während des Versuchs zu minimieren. Daher wurde ebenfalls beim BMUB der Aufbau einer solchen Simulationsumgebung zusammen mit dem Verbundpartner Fraunhofer IWES beantragt. Unter der Voraussetzung, dass die DLR Expertise im Luftfahrtbereich, die in Form von hochgenauen Simulationsmodellen und -Werkzeugen besteht, für die Windenergie nutzbar gemacht wird und dass das bereits durch das BMUB geförderte Simulationsframework OneWind® (Fraunhofer IWES) weiterverwendet wird, wurde das Projekt WindMUSE durch den Zuwendungsbescheid vom 11.12.2013 als Verbundprojekt genehmigt und gestartet.

Ursprüngliches Ziel war dabei, die erarbeiteten Werkzeuge und Modelle gegenüber Messdaten aus der eigenen Forschungsplattform zu validieren. Da zu Beginn des Projekts abzusehen war, dass die Messbereitschaft der realen Turbinen erst spät oder nicht mehr innerhalb des 3-jährigen Förder- und Bearbeitungszeitraums sichergestellt werden könnte, wurden 2 Referenzturbinen ausgewählt, die in der wissenschaftlichen Community verbreitet sind und für die veröffentlichte Daten zur Verfügung stehen, um zumindest durch eine sogenannte Code-to-Code Comparison die Qualität der Ergebnisse bewerten zu können.

3. Planung und Ablauf

Das Projekt wurde in Anlehnung an den Projektmanagementstandard des PMI (Project Management Institute) durch den entsprechend zertifizierten Gesamtprojektleiter geplant und geführt. Neben dem Gesamtprojektleiter waren auch die Projektassistenz aus dem DLR und der Ansprechpartner des Verbundpartners Fraunhofer IWES im Projektmanagementteam vertreten. Das Projekt wurde entsprechend des Rolling-Wave-Planning Verfahrens immer für ein Jahr geplant und mit mindestens je einem Jahresmeilenstein versehen. Dazu wurde die Projektstruktur mit allen zugehörigen Arbeitspaketen mittels der Software Microsoft Project 2010 für jedes Jahr neu definiert, wobei die ausführlichen Beschreibungen (Dictionary) separat in verlinkten Textdateien gespeichert wurden. Dieses Vorgehen hatte den Vorteil, dass der jeweilige Planungszeitraum überschaubar und besser vorhersagbar war und sich weniger Planänderungen ergaben, die dazu oft in die nächste reguläre Planungsphase zum Jahreswechsel verschoben werden konnten. Dadurch dass zudem die Beschreibungen der Arbeitspakete in separate Textdateien ausgelagert wurden, wurde der Änderungsbedarf an der Projektstruktur auf ein Minimum reduziert.

Für jedes Arbeitspaket wurde ein Dokument gefordert, das die Ergebnisse beschreibt. Alle Projektmanagement- sowie auch alle Ergebnisdokumente wurden online und für das gesamte Pro-

jektteam transparent, auf einer Microsoft SharePoint Projektteamsite abgelegt. Änderungen erfolgten jederzeit mit Hilfe des vereinfachten integrierten Versionsmanagements.

Die Terminplanung wurde ebenfalls mit MS Project vorgenommen. Der für das jeweilige Arbeitspaket verantwortliche Projektmitarbeiter gab dabei für die mit dem Gesamtprojektleiter vereinbarten Inhalte den Arbeitszeit- bzw. Ressourcenbedarf mit Hilfe der 3-Punkt- bzw. PERT-Schätzung ab. Durch den Abstand zwischen Best- und Worst-Case Zeitangaben, ließ sich die Unsicherheit des verantwortlichen Schätzers ableiten. Aus dem geschätzten Arbeitszeitbedarf konnte der Gesamtprojektleiter unter Berücksichtigung dieser Unsicherheit sowie Urlaubs- und Krankheitstagen, eine sinnvolle Zeitplanung ableiten. Dabei wurden auch die Ressourcenauslastung und ein optimierter Projektablauf (PERT Chart) berücksichtigt.

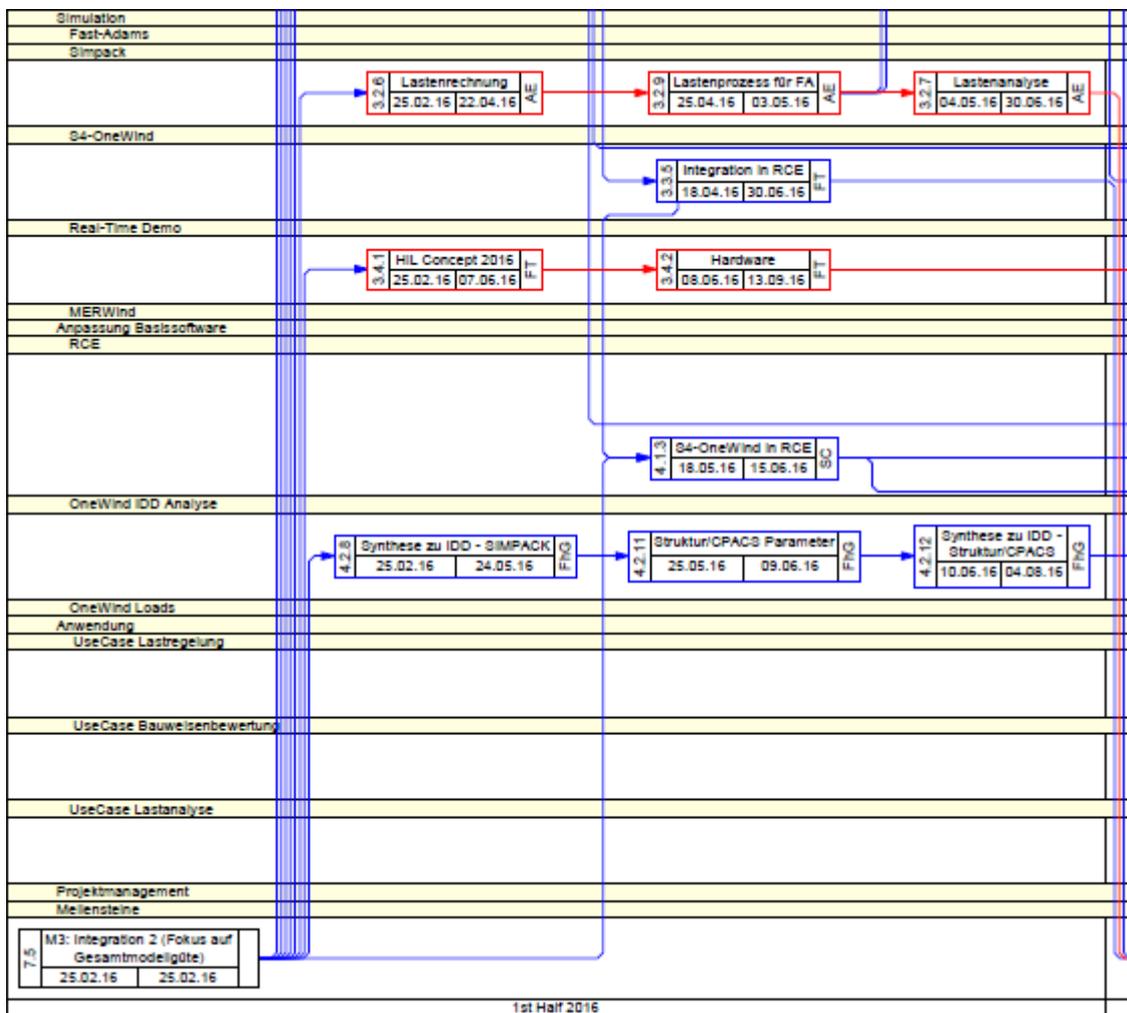


Abbildung 1: Auszug aus dem Projektablaufdiagramm

Das Management des Budgets, der Beschaffung und der Qualität wurde entsprechend der zugehörigen DLR-Richtlinien über die jeweiligen Institute abgewickelt. Eine angemessene Kommunikation innerhalb des Projektteams wurde durch halbjährliche Gesamtprojekttreffen und zentrale

Online-Speicher erreicht. Berichte an den Zuwendungsgeber bzw. dessen Projektträger erfolgten halbjährlich, wie gefordert.

Die wesentlichen Risiken wurden mitsamt zugehöriger Minderungsstrategie in einem Risk-Register aufgeführt und jeweils vor Gesamtprojekttreffen aktualisiert. Die Trendgrafik zeigte, dass einige Risiken nur kurzzeitig hoch und andere durchgängig auf überdurchschnittlichem Niveau lagen. Diese Grafik half sehr, die Dringlichkeit der Risiken richtig einzuschätzen. Alle Risiken nahmen schließlich zum Projektende hin ab.

Alle Projektbeteiligten bzw. Stakeholder wurden in einem entsprechenden Register mit ihren Interessen gelistet und während des Projekts entsprechend informiert. Eine zusätzliche elektronische Liste mit allen nach Organisationen sortierten E-Mail-Adressen half sehr, jederzeit die relevanten Adressaten herauszukopieren, ohne jemanden zu vergessen.

Der Fortschritt wurde mindestens vor jedem Gesamtprojekttreffen hinsichtlich Zielen, Terminen und Kosten (Project Baseline) gemessen. Dabei half es, Quotienten zu berechnen, wie den Quotienten aus der Anzahl fertiggestellter und bis dato geplanter Liefergegenstände oder den aus gebuchten und geplanten Arbeitsstunden sowie Sachmitteln. Weiterhin wurde mit Hilfe des Werkzeugs PERT Chart EXPERT (Critical Tools, Inc.) ein übersichtliches Ablaufdiagramm aus der MS Project-Datei erzeugt, aus dem man zu jedem Zeitpunkt den kritischen Pfad sowie den geplanten Stand zum Vergleich ablesen konnte (siehe Abbildung 1).

Dennoch ergaben sich Verzögerungen. Zum einen gestaltete sich die hochgenaue Abbildung aerodynamischer Effekte mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) Verfahren aufgrund komplexer Abhängigkeiten zwischen verwendeten Netzen und Berechnungseinstellungen aufwendiger als angenommen, wodurch sich auch die Simulation der entsprechenden Referenzturbinen verzögerte. Zum anderen gerieten auch Dokumentationen und die Beschaffung kostengünstiger Echtzeithardware zeitlich in Verzug, sodass das Projekt schließlich um 3 Monate kostenneutral verlängert wurde und am 21.02.2017 mit der Abschlussveranstaltung unter Erreichung aller Ziele erfolgreich endete.

4. Wissenschaftlich technischer Stand

Im Folgenden werden die Verfahren, Technologien, Werkzeuge und Referenzdaten aufgeführt, die im Projekt genutzt wurden oder auf die aufgesetzt wurde.

4.1. Referenzanlagen

Wie im Kapitel *Voraussetzungen* (Kap. 2) bereits erläutert, wurden aufgrund fehlender eigener Messdaten geeignete Referenzturbinen gesucht, über die sich die Projektergebnisse bewerten lassen. Dementsprechend wurden veröffentlichte Daten von zwei weit verbreiteten Referenzturbinen herangezogen.

Das NREL (National Renewable Energy Laboratory) stellt Daten zu einer 5 MW Turbine mit 126 m Rotordurchmesser zur Verfügung. Obwohl diese Turbine virtuell ist, also nur als Computermodell

existiert, sind jedoch sowohl die Daten zur Beschreibung der Turbine, als auch umfangreiche Simulationsergebnisse weltweit sehr verbreitet und frei verfügbar.

Später entwickelten die DTU (Technical University of Denmark) und Vestas ebenfalls ein virtuelles Windturbinenmodell mit einer Leistung von 10 MW und einem Rotordurchmesser von 178.3 m. Das Modell wurde mit Fokus auf das Blatt, jedoch ohne Vernachlässigung der restlichen Turbine, entworfen. Es ist zu erwarten, dass die NREL 5 MW Anlage im internationalen Umfeld mittelfristig von der 10 MW und ihren zukünftigen Derivaten abgelöst wird.

Beide Turbinen sind bereits in den internationalen Forschungsprojekten OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) bzw. OC4 (... Continuation) als Referenz genutzt worden. Aufgrund der großen Anzahl beteiligter internationaler Forschungseinrichtungen und Unternehmen sowie der Vielzahl der verwendeten relevanten Simulationswerkzeuge, gelten diese Daten als Referenz in der Windenergiesimulation. Daher wurden die o.g. Referenzturbinen auch im Laufe des Projekts WindMUSE abgebildet und gerechnet. Sie sind im Teil II, Kap. 1.2.1, näher beschrieben.

4.2. Eingabedaten

Als Eingabedaten werden hier die erzeugten Daten verstanden, die für die Ausführung der Simulation notwendig sind. Die Eingabedaten bestehen hier aus Winddaten, aerodynamischen Beiwerten der Rotorblattprofile und modal reduzierten Strukturdaten, welche implizit die Holmpositionen, Material- und Masseverteilung im Blatt beinhalten.

Wind

Die Winddaten wurden durch verbreitete freie Werkzeuge derart generiert, dass die resultierenden Simulationsergebnisse vergleichbar mit den o.g. internationalen Forschungsprojekten OC3/4 und zudem konform zur Norm IEC 61400 sind. Daher wurden die Windparameter zur Datengenerierung diesen Forschungsprojekten oder der Norm direkt entnommen. Als Generierungswerkzeug wurde das verbreitete TurbSim (NREL) eingesetzt, um Winddaten für unterschiedliche Windprofile und im Fall von turbulentem Wind, mit dem Kaimal-Modell / Normal Turbulence Model (NTM) zu erzeugen. Zur Generierung mit dem Turbulenzmodell nach Jakob Mann wurde das Werkzeug IEC Turbulence Simulator (WAsP Engineering) verwendet.

Die oben genannten Turbulenzmodelle, bei denen die Turbulenz statistisch erzeugt wird, wurden für die Code-to-Code Comparison eingesetzt. Zusätzlich wurden aber auch Windfelder durch numerische Large-Eddy-Simulationen (LES) mit dem numerischen Wettermodell WRF (Skamarock, 2008) durchgeführt. Die daraus erhaltenen Windfelder beinhalten physikalisch induzierte und damit realistischere Turbulenzstrukturen und erlauben die Berücksichtigung von Geländetopologien mit Wäldern oder Hügeln.

Aerodynamik

Die aerodynamischen Beiwerte der Rotorblattprofile müssen für jede Anströmrichtung bekannt sein, wenn Windturbinen simuliert werden sollen. Für die in der NREL-Turbine verwendeten Profile, sind die Beiwerte bereits veröffentlicht. Diese basieren allerdings auf Messungen in einem klei-

nen Anstellwinkelbereich ($\pm 32^\circ$) und wurden für eine 360° -Polare in Analogie zur ebenen Platte extrapoliert.

Da bei der DTU Turbine aus Leichtbaugründen besonders dicke Profile zum Einsatz kommen, ist die Verwendung von CFD (Computational Fluid Dynamics) zur Berechnung der Beiwerte sinnvoll. Für die detailliertere DTU-Turbine sind per CFD (Computational Fluid Dynamics) gerechnete Beiwerte sinnvoll. Die DTU berechnete entsprechende Daten mit ihrem hausinternen Strömungslöser EllipSys2D ebenso für den eingegrenzten Winkelbereich. Die gerechneten Profilpolaren haben aufgrund der Verwendung mehrerer Berechnungsmethoden keinen besonders glatten Verlauf und beinhalten einen nicht vollständig konsistenten Datensatz.

Das freie Werkzeug XFOIL nutzt eine 2D Panel Methode, die auf der Potentialtheorie beruht. Sie beinhaltet einen Grenzschichtcode, der laminar turbulente Transition vorhersagen kann und beinhaltet Korrekturen für den kompressiblen Bereich. Anstellwinkel mit abgelöster Strömung können aufgrund der potenzialtheoretischen Annahmen nicht korrekt berechnet werden. Daher sind die Ergebnisse von XFOIL in diesem Bereich generell in Frage zu stellen.

Mit dem DLR Strömungslöser TAU wurden die Beiwerte über den kompletten Umlauf nachgerechnet. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die Genauigkeit im linearen und maximalen Auftriebsbereich gelegt und gleichzeitig die physikalische Konsistenz über den kompletten Anstellwinkelbereich mit stark abgelöster Strömung sowie Rückanströmung gewahrt.

Struktur

Die Strukturdaten beinhalten alle Informationen, welche die Struktureigenschaften des Rotors und des Turms definieren. Üblicherweise werden in der Industrie zur Modellierung der Struktur im Vorentwurfsprozess finite Balkenelemente verwendet. Diese können sowohl im Lasten- als auch im Dimensionierungsprozess genutzt werden. Die Lastenanalyse benötigt Steifigkeits- und Massenverteilungen. Dabei werden, mit Hilfe zusätzlicher Modelle für die Turbine und die Aerodynamik, die auf die Rotorblattstruktur wirkenden Kräfte bestimmt. Für die Strukturdimensionierung werden dann die Materialien, Laminatlagenaufteilungen und Lagendicken bestimmt, welche die notwendige Tragfähigkeit des Rotorblattes erzeugen. Mit den finiten Balkenelementmodellen kann zwar einfach und schnell gerechnet werden, sie bilden allerdings nicht alle Deformations- und Belastungseffekte des Rotorblattes genau ab. Innerhalb des Projektes wurde zum Aufbau, zur Bewertung und zur Verifizierung das Rotorblattmodell der DTU verwendet. Analysen haben gezeigt, dass die Größenordnung der Dimensionierungsergebnisse der DTU dargestellt werden konnten (bzgl. Steifigkeitsverteilung und Masse). Diese Ergebnisse wurden bereits publiziert (siehe [3] in *Veröffentlichungen*).

Allerdings ist die Dokumentation der DTU nicht in allen Bereichen und Details vollständig, sodass nicht alle Annahmen innerhalb des DTU Referenzprozesses nachvollziehbar waren.

Im Projekt wurde die Dimensionierung eines Windrotors mit deutlich komplexeren Modellen in automatisierter Weise erneut durchgeführt. Mittels einer finiten Schalenelementformulierung können Materialverteilung und Rotorblattkomponenten diskret betrachtet werden. Entsprechend sind Schalenelementmodelle in der Lage, die Spannungsverteilung in der Struktur höher aufgelöst

darzustellen und Querkontraktions- und Verwölbungseffekte besser abzubilden, welche bei größeren Rotorblättern eine Rolle spielen. Dadurch werden u.a. die Berücksichtigung von kritischen fehleranfälligen Bereichen im Vorentwurf (Sandwichübergänge, Verklebungen, etc.) und eine designgerechte Dimensionierung ermöglicht. Die Ergebnisse der Dimensionierung werden dann in Form von reduzierten Strukturinformationen (Massen- und Steifigkeitsverteilungen) durch eine modale Reduktion für die Lastenanalyse bereitgestellt. Das Schalenelementmodell des Rotorblatts wurde auf Basis der geometrischen Blattstrukturdaten mit Hilfe des DLR Tools DELiS (Design environment for light weight structures) aufgebaut. Weiterhin wurde die kommerzielle Software Ansys zur Lösung des Finite-Elemente-Modells genutzt.

4.3. Schnittstellen Technologien

Das Functional Mock-up Interface (FMI) ist ein werkzeugunabhängiger Standard zur Unterstützung sowohl des Modellaustausches, als auch der Co-Simulation. Der Standard wird von der Modelica Association, der auch das DLR angehört, entwickelt, ist bereits in über 35 namhaften Werkzeugen implementiert und wird weltweit in unterschiedlichen Branchen eingesetzt.

Simulationswerkzeuge, die FMI unterstützen, können Modelle, z.B. von Turbinenkomponenten wie Antriebsstrang oder Regler, als eine binäre Library (DLL) exportieren und zusammen mit einer XML-Beschreibung der Datenschnittstellen in einer Datei, genannt FMU (Functional Mock-up Unit) zusammenfassen. Diese FMU kann von einem anderen Simulationswerkzeug importiert und verwendet werden.

Bei der Co-Simulation wie in Abbildung 2, wird neben dem Modell auch der zugehörige Löser des Ursprungswerkzeugs als FMU exportiert und durch das integrierende Werkzeug verwendet.

Im Projekt WindMUSE wurde dieser Standard zur Co-Simulation bzw. zur harten Werkzeugkoppelung eingesetzt, um auch künftig für die Integration neuer Modelle oder Werkzeuge flexibel zu sein - auch über Organisationsgrenzen hinweg.

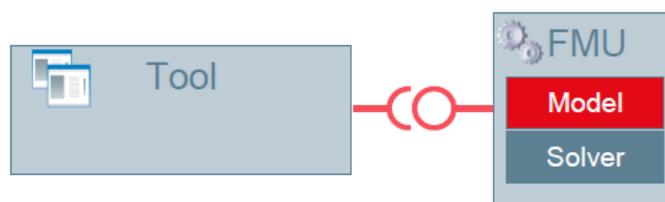


Abbildung 2: Co-Simulation mit FMI

Das Bladed Interface ist eine Schnittstelle zur Einbindung eigens entwickelter Regler zur Betriebsführung von Windturbinen in das kommerzielle Simulationswerkzeug Bladed. Bladed ist eine Entwurfs- und Simulationssoftware für Windturbinen, entwickelt und vertrieben durch die Klassifikationsgesellschaft DNV GL (Zusammenschluss zwischen der norwegischen Det Norske Veritas und des deutschen Germanischer Lloyd). Die Schnittstelle besteht im Wesentlichen aus einer Konvention zur Zuordnung von Channelnummern zu Signalen. Sie gilt mittlerweile als Quasi-Standard, wird auch von NREL verwendet und ebenfalls im WindMUSE-Projekt eingesetzt.

4.4. Simulationswerkzeuge

FAST und AeroDyn

Das Online-Portal des NREL National Wind Technology Center (NWTC Information Portal), stellt Software und Daten u.a. zur Simulation von Windturbinen kostenfrei zur Verfügung. Einige der erarbeiteten Simulationsworkflows nutzen Daten oder Werkzeuge dieses Portals. Z.B. wurden das Simulationswerkzeug FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) und die AeroDyn Softwarebibliothek für Aerodynamik in WindMUSE-Simulationsworkflows integriert und zur Generierung von Referenzdaten genutzt. Die entsprechenden Lizenzbedingungen sind vor Verwendung zu berücksichtigen.

Die Strukturdynamik von FAST V7.02 ist eingeschränkt, da für eine 3-Blatt-Anlage nur maximal 24 Freiheitsgrade berücksichtigt werden können. Für die elastischen Blätter können beispielsweise nur zwei Schlagmoden und eine Schwenkmode gerechnet werden. Die für das aeroelastische Verhalten wichtige Torsion des Blattes ist nicht abbildbar. Außerdem werden die Moden für FAST in Form von Polynomkoeffizienten in den Eingabedateien angegeben, wodurch der Einfluss von Drehzahl und Blatteinstellwinkel auf die Dynamik ebenfalls nicht abgebildet werden kann. Daher wurden zusätzlich leistungsfähigere Simulationswerkzeuge in die WindMUSE-Umgebung integriert.

Die Aerodynamik von AeroDyn basiert auf der Blattelemententheorie (BEM) und auf Table-look-up Profildaten. Dabei werden für die einzelnen Blattelemente 3D korrigierte Polaren genutzt. Diesen Polaren liegen die 2D-Polarendaten der genutzten Profile zugrunde, die dann angepasst werden, um Einflüsse des Einbauzustands und des Betriebspunktes der Elemente berücksichtigen zu können. Zu den Einflüssen des Einbauzustands zählen Streckung des Blattes und Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Profilen. Ein Einfluss des Betriebspunktes ist die radiale Strömung entlang des Blattes aufgrund der Rotation. Die Nutzung dieser angepassten Polaren führt dazu, dass die jeweilige Polare so nur für ein bestimmtes Blatt an einer bestimmten radialen Position und einem bestimmten Betriebspunkt einzusetzen ist. Bei Änderung der Blattgeometrie, aber auch bei Untersuchung mit abweichender Blattelementenzahl oder eines anderen Betriebspunktes müssten daher die Polaren wieder angepasst werden.

Dymola für Modelica

Modelica ist eine objektorientierte Modellierungssprache für physikalische Systeme. Da Modelica mit Gleichungen anstatt mit Zuweisungen arbeitet, ist das entsprechende Modell unabhängig vom Simulationsziel, d.h., die Gleichung muss nicht nach der gesuchten Variablen aufgelöst werden. Dymola ist eine verbreitete, kommerzielle Entwicklungs- und Simulationsumgebung für Modelica und wurde ebenfalls zur Simulation der Referenzanlagen verwendet.

SIMPACK

SIMPACK ist eine Software zur Mehrkörper-Simulation (MKS) für die dynamische Analyse mechanischer und mechatronischer Systeme. Im Gegensatz zu hochauflösenden Finite-Element-

Methoden (FE) ist eine besondere Stärke von MKS, komplexe kinematische Systeme mit einer sehr geringen Anzahl von Freiheitsgraden und damit mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand zu beschreiben. Durch Optimierung der Lösungsabfolge der Systemgleichungen (Order-n-Formalismus) und Nutzung eines speziell angepassten Solvers ist SIMPACK in der Lage, auch Systeme mit vielen Freiheitsgraden innerhalb kleiner Rechenzeiten zu lösen. So ist die Simulation von Systemen mit über 200 Freiheitsgraden im Echtzeitbetrieb bereits erprobt. Darüber hinaus können beliebige elastische Körper aus FE-Systemen eingebunden werden. In SIMPACK steht für die Einbindung von Reglern zur Steuerung von Windkraftanlagen ein eigenes sogenanntes Control-Element zur Verfügung. Die dabei geladenen Regler-Bibliotheken müssen das Bladed Interface aufweisen.

S4

S4 ist ein in der Abteilung für Hubschrauber des DLR Instituts für Flugsystemtechnik entwickeltes und mittels zahlreicher Windkanalversuche validiertes Werkzeug zur Simulation isolierter Hubschrauberrotoren. Die Aerodynamik basiert auf einer Blattelemententheorie und kann Effekte von Kompressibilität, Queranströmung und dynamischem Strömungsabriss abbilden. Dabei werden die 2D-Profilpolaren in eine analytische Beschreibung umgewandelt und das Verhalten beeinflussende Faktoren wie die vorgenannten Effekte und Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Profilen zur Laufzeit berücksichtigt.

Die S4-interne Strukturmechanik nutzt einen Modalsynthese-Ansatz für eindimensionale Balken, um die elastische Deformation der Blätter zu berechnen. Im Zuge des Projekts Digital-X wurde S4 mit einer Co-Simulations-Schnittstelle für SIMPACK ausgestattet, um die relativ eingeschränkte Strukturmechanik von S4 durch SIMPACK ersetzen zu können. Zur Berechnung des Nachlaufs der Rotorblätter stehen sowohl einfache globale Abwind-Modelle als auch ein Freewake-Modell zur Verfügung, bei dem der Einfluss der einzelnen Blattspitzenwirbel aufeinander sowie auf die Anströmung der Blattelemente berechnet wird.

Ursprünglich war S4 nicht für die Simulation von Windkraftanlagen ausgelegt. So war die für Hubschrauberrotoren gültige Beschränkung von S4, nur mit konstanten Drehzahlen arbeiten zu können, aufzuheben, da Windkraftanlagen mit variabler Rotationsgeschwindigkeit betrieben werden. Außerdem war das Einlesen standardmäßig genutzter Dateiformate zur Beschreibung von Windfelddaten und die Berücksichtigung des Turmvorbaus sowie der Bewegung der Rorturnabe auf die Anströmung der Blattelemente zu ermöglichen.

RCE

RCE ist ein im DLR entwickeltes Simulationsframework zur automatisierten Ausführung von verteilten Simulationsprozessen. Mit RCE ist es möglich, Simulationswerkzeuge in ein gemeinsames Simulationsframework zu integrieren und mit Hilfe eines grafischen Editors zu Workflows zu verbinden. Diese können automatisiert ausgeführt werden. Manuelle Schritte entfallen und somit auch Wartezeiten zwischen Teilprozessen. Die Performance steigt, während der Prozess weniger fehleranfällig wird. Des Weiteren erhöht die Repräsentation der Gesamtsimulation als grafischer

Workflow die Nachvollziehbarkeit und Transparenz. Ist ein Simulationsprozess einmal automatisiert, kann er beliebig oft erneut durchgeführt werden. Somit sind Simulationsergebnisse reproduzierbar und deren Entstehungsprozess ist dokumentiert.

Im Gegensatz zu proprietären Simulationsframeworks ist RCE als Open-Source Software frei verfügbar. Da RCE im DLR entwickelt wird, ist eine enge Zusammenarbeit möglich. Somit können Lösungen für die projektspezifischen Anforderungen zeitnah und in enger Absprache umgesetzt werden. Ein wichtiges Augenmerk bei der Entwicklung von RCE liegt auf einem hohen Maß an Gebrauchstauglichkeit. Dadurch wird sichergestellt, dass die Projektpartner Simulationsworkflows effizient erstellen können und diese auch langfristig verwendbar bleiben.

OneWind

OneWind ist eine Modellierungs- und Softwareumgebung zur Entwicklung von Windenergieanlagen. Das gleichnamige Entwicklungsprojekt wurde durch das BMWi in 2 Phasen von 2009 bis 2014 gefördert und durch das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (FhG IWES) geführt und umgesetzt. Die OneWind-Umgebung ermöglicht die datenkonsistente Entwicklung von Windenergieanlagen, -Parks und deren Komponenten mit Modellen verschiedener Detaillierungsgrade umzusetzen. Als Ergebnis der physikalischen Modellierung wurde die OneWind Modelica Library zur Simulation von Windenergieanlagen auf dem Niveau von Lastenrechnung geschaffen. Mit dem OneWind Framework steht eine Softwareumgebung zur Verfügung, auf deren Basis Anwendungssoftware für Modelle verschiedener Detaillierungsgrade und deren Postprocessing im Windenergiebereich entwickelt werden. Im Zuge des Projektes sind spezielle Anwendungen für die gesamte Anlage und für spezielle Komponenten wie Blätter und Türme, bzw. eine Entwicklungsumgebung für weitere Anwendungen erstellt worden. [aus Schlussbericht zum Projekt OneWind (Phase 2)]

Während OneWind den Ansatz verfolgt, das Gesamtmodell in Modelica auszudrücken und auf einer einzigen Plattform zu simulieren, wird im WindMUSE-Projekt die Kopplung unterschiedlicher Werkzeuge über eine standardisierte Schnittstelle wie FMI angestrebt. Dabei werden auch OneWind-Modelle und Teile des OneWind-Frameworks integriert.

Wie RCE basiert auch OneWind auf der Eclipse RCP (Rich Client Platform). Diese Integrationsplattform für Entwicklungswerkzeuge wurde ursprünglich von IBM entwickelt und ist zurzeit die am meisten genutzte Java IDE. Das Ziel von RCP ist die Unabhängigkeit, mit besonderem Augenmerk auf nichtkommerzielle Einrichtungen und Organisationen. RCP ist ein mächtiges Rahmenwerkzeug zum Entwickeln von Rich Client Applikationen. Der komplette Source Code ist unter der Eclipse Public Licence verfügbar (Open Source) und wird von der Eclipse Foundation weiterentwickelt. Bei Rich Clients handelt es sich i.d.R. um Desktop-Applikationen, die über eine Rich-UI (Rich User Interface) verfügen, also grafische Editoren, ohne feste Grenzen. Der Runtime Kernel ist ein fester und notwendiger Bestandteil einer RCP Anwendung. Dieser kann dann durch beliebig viele Plugins erweitert werden, wodurch eine eigene Entwicklungsumgebung auf Basis von Eclipse

entsteht. Plugins sind dabei die Basiskomponenten, die Abhängigkeiten zu anderen Plugins enthalten. Das aus mehreren Plugins bestehende Produkt ist das finale Resultat der RCP-Entwicklung.

Das OneWind SDK (Software Development Kit) ist ein Produkt bzw. eine Anwendung des RCP-basierten OneWind Frameworks. Es stellt Kernfunktionalitäten, wie z.B. das zentrale Datenmodell zur parametrischen Beschreibung von Windturbinen, bereit. Dieses Datenmodell, genannt IDD (Ingenieur Design Daten), wurde mit Hilfe des Eclipse Modeling Frameworks (EMF) definiert und somit liegt das zugehörige Metamodell als sogenannte Ecore-Datei vor. Es wurde im WindMUSE Projekt übernommen und erweitert, damit weitere physikalische Effekte und, neben der Modellierungssprache Modelica, weitere Simulationstechnologien berücksichtigt werden können.

OneWind stellt je nach Anwendungsbedarf verschiedene Sichten auf das Windturbinenmodell durch entsprechende Produkte bereit. OneModelica bietet z.B. einen Editor bzw. eine Entwicklungsumgebung für Modelica. Einen Editor zur Bearbeitung des nativen IDD-Datenmodells gibt es daher nicht in OneWind. Da EMF und insbesondere Xtext die Definition und Generierung eines entsprechenden Texteditors unterstützen, wurde ein IDD-Editor innerhalb des WindMUSE-Projekts bereitgestellt. Darüber hinaus wurden mittels der Programmiersprache Xtend weitere Generatoren entwickelt, die auf Basis des IDD entsprechende Eingabedateien für die o.g. Simulationstools erzeugen.

OneWind Modelica Library

Die OneWind Modelica Library ([15], [16], [17]) ist ein weiteres Projektergebnis von OneWind. Die OneWind® Modelica Library beinhaltet alle Komponenten, die für die Lastberechnung aktueller Onshore- und Offshore-Windenergieanlagen (WEA) benötigt werden und ist zur akademischen Nutzung frei verfügbar. Modelle der Umgebungsbedingungen und ihrer jeweiligen Einflüsse auf die Struktur stehen ebenfalls zur Verfügung. Die Bibliothek beschreibt ein gekoppeltes multiphysikalisches Modell auf Basis der Modellierungssprache Modelica.

Der Quellcode der Bibliothek ist verfügbar und kann für spezifische Anwendungsfälle adaptiert werden. Auf diese Weise können bestehende Funktionalitäten ausgetauscht oder modifiziert und der Code um benutzerdefinierte Funktionen erweitert werden. Der Zweck der Bibliothek ist die Durchführung von Zertifizierungslastberechnungen nach IEC 61400-1 und 61400-3 sowie der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Mit dieser Bibliothek ermittelte Daten werden fortlaufend mit den Ergebnissen der IEA Offshore Code Comparison Collaboration [12] verglichen und mithilfe

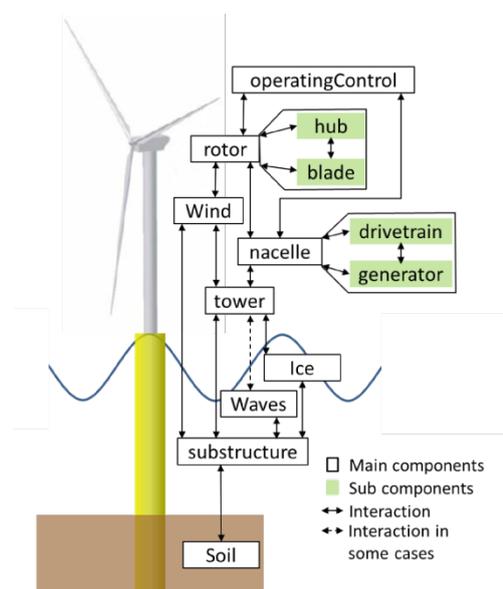


Abbildung 3: Komponenten einer Offshore-Windenergieanlage in der OneWind® Modelica Library.

von FAST [13] und Bladed [14] verifiziert. Angewendet und weiterentwickelt wird die Bibliothek in den Forschungsprojekten IcedBlades, AVATAR, InterWiLa, TANDEM, OC5, OptiDesgin, Smart-Blades I und II, GIGAWIND life sowie SeaLOWT.

Simulation von Windenergieanlagen

Die OneWind® Modelica Library ermöglicht die Durchführung von aero-hydro-servo-elastischen Simulationen von Windenergieanlagen, d.h. sie beinhaltet Modelle von Windanströmung, Aerodynamik (aero), Wellen und Strömungen, Hydrodynamik (hydro), Regelungssystemen (servo) und Strukturdynamik (elastisch), die von der Simulationsumgebung im Zeitbereich analysiert werden können. Die Modelle sind nach WEA-Komponenten unterteilt, wie in Abbildung 3 für eine Offshore-Windenergieanlage dargestellt. Die Abbildung zeigt die Modellierungsinstanzen und die zugehörigen Schnittstellen der Hauptkomponenten einer WEA: den Rotor (mit den Teilkomponenten Blatt und Nabe), den Turm, die Substruktur, die Gondel (mit den Teilkomponenten Triebstrang und Generator), die Betriebsführung, Wind, Wellen, Eis und den Boden. Zur Simulation in unterschiedlichen Detaillierungsgraden sind verschiedene Modelle für die Hauptkomponenten einer WEA verfügbar.

In WindMUSE war exemplarisch zu zeigen, dass die Modelle der OneWind® Modelica Library über FMI in die WindMUSE-Simulation integriert werden können. Weiterhin war die Verwendbarkeit für die Echtzeitsimulation zu evaluieren.

4.5. Echtzeit-Technologien

Das US-amerikanische Unternehmen Concurrent Real-Time bietet Hochleistungsrechnersysteme auf Linux-Basis für Echtzeitanwendungen an. Das iHawk-System wurde bereits mit SIMPACK-Simulationen erfolgreich erprobt und war im benötigten Zeitraum leihweise, und damit kostengünstig, verfügbar. Es wurde zur Turbinensimulation während der Demonstration des Echtzeitbetriebs eingesetzt.

Die dSPACE GmbH bietet verbreitete Werkzeuge und Dienstleistungen, u.a. für die Entwicklung und den Test von Steuergeräten an. Da der Echtzeitsimulator DS1005 mit entsprechenden Interface-Karten bereits im DLR vorhanden ist, wurde dieser zur exemplarischen Einbindung einer realen Hardware in die Echtzeitsimulation verwendet.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zum National Renewable Energy Laboratory (NREL) wurde ein Kontakt zum Entwickler des integrierten Simulationswerkzeugs FAST und Hauptautor entsprechender Referenzdokumente hergestellt. Dieser unterstützte bei Fragen bzgl. der Reglerintegration in FAST.

Zur Technical University of Denmark (DTU) entstand ein Kontakt bzgl. der Bereitstellung der Referenzturbinendaten.

Zur SIMPACK AG wurde Kontakt aufgenommen, um Fragen bzgl. der FMI-Implementierung und bzgl. des Realtime-Plugins zu klären. Außerdem traten Fragen bezüglich unterschiedlichen Verhaltens der elastischen Blätter bei Nutzung verschiedener Modellierungsvarianten in SIMPACK auf. Im Zuge der Untersuchungen konnte ein Fehler im SIMPACK-Tool *Rotorblade Generator* nachgewiesen werden, der später von SIMPACK korrigiert wurde.

Mit der MSC.Software GmbH wurden ebenfalls Fragen bzgl. der FMI-Implementierung in ADAMS und der Umsetzung des detaillierten Mehrkörpermodells für Antriebsstränge besprochen.

Von der Fa. Concurrent Real-Time wurde ein iHawk Echtzeit-Rechner ausgeliehen.

Teil II

Dieser Teil enthält die eingehende Darstellung der Projektergebnisse.

1. Verwendung der Zuwendung

Im nächsten Abschnitt werden zunächst die Hauptergebnisse bzw. Liefergegenstände in Form von Daten, Modellen und Werkzeugen zusammen mit deren Kopplung vorgestellt. Die darauffolgenden Abschnitte erläutern alle Ergebnisse, die zur Erzeugung der Liefergegenstände notwendig waren, eingehend. Sie sind den entsprechenden Arbeitspaketen aus der Projektstruktur (siehe Teil 1 Kap. 3) zugeordnet.

1.1. Übersicht der Liefergegenstände

Die wesentlichen Daten und Modelle, die in der WindMUSE-Umgebung genutzt werden können und im Projektverlauf genutzt wurden, bestehen aus folgenden Elementen:

- Winddatensätze für unterschiedliche variable Anströmbedingungen
- 360° Profilpolaren der verwendeten Rotorblätter
- Strukturdaten zur aeroelastischen Analyse von Blättern und Turm
- Generische Mehrkörpersimulationsmodelle für Windturbinen
- Rotorblattregelung
- Austauschbare Systemkomponentenmodelle

Diese Daten und Modelle sind im 1.3 eingehend dargestellt und entsprechen den wesentlichen Ergebnissen aus AP2. Die Modelle sind konfigurierbar und zumindest für Anlagen von 2 bis 10 MW ausgelegt. Diese Liefergegenstände erfüllen die in der Aufgabenstellung (Teil I Kap. 1) gestellten Anforderungen an die Modelle und Modellgüte. Die Anforderungen unter dem Stichpunkt „Rotordynamik“ werden dabei durch die Profilpolaren, Strukturdaten und Mehrkörpersimulationsmodelle erfüllt, die Anforderungen unter dem Punkt „Aktuatorkonzepte“ werden durch die Systemkomponentenmodelle erfüllt.

Die Simulationsumgebung mit integrierten Werkzeugen, die die WindMUSE-Umgebung ausmacht, besteht aus folgenden Elementen:

- Remote Component Environment (RCE) zur Steuerung von Simulationsworkflows
- Ingenieur Design Daten (IDD), Datenmodell zur Turbinenbeschreibung
- OneWind Editor und –Generator für das Arbeiten mit dem IDD Datenmodell
- TurbGen und TurbLoads zur Generierung von Turbinenmodellen und zu deren Lastanalyse
- Rotorsimulationstool S4 und CFD-Kopplung, zur Simulation der Rotor-aerodynamik
- DELiS zur Generierung und Dimensionierung von Strukturmodellen
- Hardware-in-the-Loop Demonstration, zum Nachweis eines möglichen Echtzeitbetriebs

Diese Simulationsumgebung und entsprechende Basissoftware sind im Abschnitt 0 eingehend dargestellt und entsprechen den wesentlichen Ergebnissen aus den APs 3-4. Diese Liefergegenstände erfüllen die in der Aufgabenstellung (Teil I Kap. 1) gestellten Anforderungen an die Simulationsumgebung. Damit ist die Aufgabenstellung vollständig erfüllt.

1.2. Ergebnisse der Anforderungsanalyse (AP1)

Im Arbeitspaket 1 (AP1) wurden die Anforderungen an die Simulationsumgebung und die Turbinenmodelle erarbeitet. Außerdem wurden Anwendungsszenarien und Möglichkeiten der Validierung definiert.

1.2.1. Referenzturbinen

Wie im Kapitel *Voraussetzungen* (Teil I, Kap. 2) bereits erläutert, wurden aufgrund fehlender eigener Messdaten geeignete Referenzturbinen gesucht, über die sich zumindest anhand eines Code-zu-Code Vergleichs die erarbeiteten Modelle bewerten lassen.

NREL 5 MW

Das NREL (National Renewable Energy Laboratory) stellt Daten zu einer 5 MW Turbine mit 126 m Rotordurchmesser zur Verfügung [1]. Sie hat eine Nabhöhe von 90 m und ist für eine Windgeschwindigkeit von 11,4 m/s ausgelegt. Diese Turbine ist virtuell, existiert also nur auf dem Computer und nicht in der Realität, jedoch sind sowohl die Daten zur Beschreibung der Turbine, als auch umfangreiche Simulationsergebnisse weltweit sehr verbreitet und frei verfügbar. Die Turbine wird u.a. in den beiden internationalen Forschungsprojekten OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) [2] und OC4 (... Continuation) [5] als Referenzturbinen verwendet. Daher wurde diese Turbinen auch im Projekt WindMUSE als Referenzturbinen genutzt.

Bzgl. der Struktur liegen sektionsweise definierte Strukturdaten vor. Mit Ausnahme des Turmes und der Rotorblätter werden alle Bauteile als starr angenommen. Sowohl Turm als auch Rotorblatt sind als diskretes 1-D Balken Modell beschrieben. An jedem Knoten ist die Steifigkeits- und Trägheitsverteilung der Querschnitte, die jeweilige Masse pro Längeneinheit sowie die Ablagerungen zwischen elastischer Achse und Schwerpunktsachse angegeben. Die Erstellung von Schalen- oder Volumen Modellen in einem FEM Pre-Prozessor ist jedoch nicht möglich, dafür liegen keine ausreichenden Daten der Blatttopologie vor. Hinsichtlich der Aerodynamik sind 3D-korrigierte 2D-Profildaten vorhanden, die ursprünglich aus dem DOWEC (Dutch Offshore Wind Energy Converter) Projekt stammen. Ebenso sind Informationen zu den generierten Winddaten, z.B. für OC4 in [6] und [7], gegeben. Ein einfacher Anlagenregler ist als Fortran Sourcecode [1] und zusätzlich als DLL im GH Bladed Interface-Format (siehe NWTC Forum) verfügbar.

Eigenfrequenzen und quasi-stationäre Werte (Drehzahl, Schub, Blatteinstellwinkel, etc. über Windgeschwindigkeit) sind ebenfalls im Referenzdokument der Anlage abrufbar [1]. Zusätzliche Frequenz- und Lastergebnisse wurden in den OC3/OC4 Projekten während der Code-zu-Code Vergleiche generiert [2]-[5].

DTU 10 MW

Im Rahmen des „Light Rotor“ Projekts zwischen DTU Wind Energy und Vestas wurde ein 10 MW Windturbinenmodell (bekannt als 10 MW RWT) mit einem Rotordurchmesser von 178,3 m entwickelt und 2013 veröffentlicht [9]. Die Turbine hat eine Nabenhöhe von 119 m und ist für eine Windgeschwindigkeit von 11,4 m/s ausgelegt. Ziel war die im Projekt angestrebten Entwicklungen im Bereich der Blattgewichtsreduktion (z.B. durch Nutzung von Biege-Torsions-Kopplung) an einer realistischen Referenzanlage zu überprüfen. Dafür wurde das Modell mit Fokus auf das Blatt (CFD/FEM Daten), jedoch ohne Vernachlässigung der restlichen Turbine (zunächst mit Ausnahme des Triebstrangs), entwickelt. Das Projekt INNWIND.EU traf die Entscheidung im Projekt ebenfalls die 10 MW RWT einzusetzen. Es ist zu erwarten, dass die NREL 5 MW Anlage im internationalen Umfeld mittelfristig von der 10 MW RWT und ihren zukünftigen Derivaten abgelöst wird. Die Dokumentation der 10 MW Turbine umfasst die Eigenfrequenzen der Anlage und ein beinahe vollständiges IEC-61400-1 Lastfallspektrum mit seinen Extrem- und Ermüdungslasten. Zusätzlich werden die maximalen Blattdurchbiegungen für die einzelnen Lastfälle angegeben. Auf der Website der 10 MW RWT ist zudem das vollständige Lastmodell zur Berechnung mit dem Simulationscode HAWC2 abrufbar.

Hinsichtlich der Struktur liegen für das Rotorblatt sowohl reduzierte sektionsweise Strukturdaten als auch die detaillierte Blatttopologie und der Blattlagenaufbau vor. Bzgl. der Aerodynamik sind für die benutzten aerodynamischen Profile 2D Daten aus CFD-Rechnungen und entsprechend 3D-korrigierte Versionen verfügbar. Die Leistungsregelung ist in [8] dokumentiert und dort auch als Fortran Source-Code verfügbar (implementiert als DLL für DTU's HAWC2).

Für die 10 MW Anlage liegen die Eigenfrequenzen und Dämpfungen vor. Zusätzlich werden die maximalen Blattdurchbiegungen der Lastfälle sowie die statistische Auswertung vom DLC1.1 (Design Load Case aus IEC 61400-1) bzgl. Pitch, rpm, Torque, Power, Blattwurzel- und Turmmomente dargestellt. Darüber hinaus werden Werte für die Ermüdungslasten (Life time equivalent fatigue loads) von Turm, Welle, Blättern und die Extremlasten in den einzelnen Blattsektionen, sowie in Turm und Blattwurzel bereitgestellt.

1.2.2. Last- und Simulationsszenarien

Es wurden Last- und Simulationsszenarien ausgewählt, anhand derer die Simulationsumgebung demonstriert werden kann. Ein Szenario beschreibt dabei eine Menge von Eingangswerten (z.B. Winddaten, Turbinenzustand etc.) und die zu errechnenden Ausgangsgrößen (z.B. Lastspektrum) für die im vorhergehenden Kap. vorgegebenen Referenzturbinen. Die definierten Szenarien ermöglichen, aufbauend

- 1) die Voraussetzungen für eine Validierung der Simulationsergebnisse zu schaffen,
- 2) Lastfälle aus relevanten Standards auszugsweise und beispielhaft abzudecken,
- 3) besondere Forschungsaspekte der Simulationsumgebung hervorzuheben.

Da für die Projektpartner keine Messdaten zur Verfügung standen, wurden andere errechnete Ergebnisse zum Vergleich herangezogen. Hierfür eignen sich die Ergebnisse der internationalen Forschungsprojekte OC3 / 4 (Offshore Code Comparison Collaboration / Continuation) in besonderer Weise. Die Projekte benutzen die im vorangegangenen Kap. beschriebene 5 MW NREL Anlage und stellen vielfältige Simulationsergebnisse verschiedener Codes zur Verfügung.

Eine relevante Norm für die Zertifizierung von Windturbinen ist die DIN EN 61400 bzw. die IEC 61400. Auch aus dieser Norm (IEC 61400-1 ed3.) wurden Lastfallszenarien ausgewählt, um zu zeigen, dass Simulationsumgebung und -modelle grundsätzlich in der Lage sind, solche industrie-relevanten Rechnungen durchzuführen. Neben den zur Validierung der Werkzeuge geeigneten Lastszenarien, wurden zur Demonstration der WindMUSE-Fähigkeiten weitere realistische Szenarien definiert, die die atmosphärische Grenzschicht berücksichtigen.

Im Projekt OC3 wurden Lastfälle für eine 5 MW Windturbine mit unterschiedlichen Substrukturen (Offshore-Gründungen) gerechnet. Da im Projekt WindMUSE vorrangig Onshore-Turbinen betrachtet wurden, wurden hier nur die Struktur „Monopile with Rigid Foundation“ (Chapter 2 in [2]) berücksichtigt. Dementsprechend wurden alle Offshore-Lastfälle mit Wasserbewegung (Wave Conditions) ausgeschlossen. Folglich sind die 9 OC3-Lastfälle, siehe Tabelle 1 weiter unten, im Projekt WindMUSE berücksichtigt worden (vgl. [2], Table 4, S. 17).

Entsprechend wurden weiterhin 7 Lastfälle aus dem OC4-Projekt berücksichtigt (vgl. [5], Table 2, S. 3). Weitere Details zu diesen Lastfällen sind in [10] beschrieben.

Die DTU Lastfälle sind entsprechend für die DTU 10MW Turbine zu verwenden. Auch hier liegen in der Literatur einige Vergleichsdaten zur Validierung bereit.

Für die DTU 10 MW Referenzturbinen sollte demonstriert werden, dass ähnliche Ergebnisse wie in [9] erzielt werden können. Dazu wurden 19 Lastfälle (Design Load Cases, DLC) aus dem Anhang D in [9] ausgewählt. Die DTU Lastfälle entsprechen weitestgehend den Lastfällen aus der Norm IEC 61400 [11] und sind in der Tabelle 1 dargestellt. Einer der fehlerbehafteten Lastfälle bzgl. Power Production (DLC-2.2) wurde nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden weitere Lastfallszenarien beschrieben, die der Industrienorm IEC 61400 [11] entnommen sind. Diese erhalten hier das Kürzel DLC und wurden innerhalb des WindMUSE-Projekts für beide Referenzturbinen berücksichtigt. Sie dienen weniger der Werkzeug- bzw. Modell-Validierung, sondern mehr den wissenschaftlichen Analysen. Weiterhin ermöglichen sie den Vergleich sowohl zwischen den Referenzturbinen, als auch zwischen den in WindMUSE eingesetzten Werkzeugen. So können z.B. Änderungen in den Fachdisziplinen (Blattstruktur/Aerodynamik/Regelung) bezogen auf die Leistungsänderung (DLC-1.1, DLC-Power) und die exemplarischen Lasten (DLC-1.1/1.5/5.1) mit verschiedenen Tools beurteilt werden. Sie sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt.

Neben den meteorologischen Daten, die für die standardisierten Validierungs- und Lastfallszenarien benötigt werden, wurden auch folgende realistische Szenarien, mit dem Kürzel *MET*, definiert, da sie typische Vertreter der meteorologischen Grundzustände in der atmosphärischen Grenzschicht sind:

1. Konvektive Grenzschicht mit keinem oder schwachem mittleren Wind und hoher Fluktuation von Richtung und Betrag des Windes (MET-1)
2. Stabil geschichtete (nächtliche) Grenzschicht mit Strahlstrom in Nabenhöhe und intermittierender Turbulenz (MET-2)
3. Neutral geschichtete Grenzschicht mit log. und zeitlich variablem Windprofil (MET-3)

Diese drei Hauptszenarien können auch unterteilt werden, z. B. können Szenen mit Bäumen oder Gebäuden gerechnet werden und somit die Nachbildung der realen Umgebung der DLR Forschungsplattform Windenergie ermöglichen. Weiterhin soll Szenario 3 (Met-3) so gewählt und angepasst werden, dass es zum Vergleich mit einigen der vorhergenannten Szenarien geeignet ist.

1.2.3. Werkzeugkopplungen

Neben den Last- und Simulationsszenarien wurden auch mehrere Werkzeugkopplungen ausgewählt, mit denen unterschiedliche Fragestellungen betrachtet werden können. Die sogenannte Basissoftware bildet dabei die Grundlage für jede zu koppelnde Werkzeugkombination. Sie besteht, wie in Abbildung 4 dargestellt, aus dem DLR Workflowmanagementwerkzeug RCE und aus Kernfunktionalitäten des OneWind Frameworks des Verbundpartners Fraunhofer IWES (siehe Kapitel 4.4 in Teil 1 zu beiden Frameworks). Das IDD (Ingenieur Design Daten) stellt dazu die Turbinenbeschreibung in allgemeiner Form zur Verfügung, die durch je einen Generator in eine werkzeugspezifische Eingabedatei transformiert wird. RCE übernimmt sämtliche Automatisierungsaufgaben wie das Einlesen des IDD-Datensatzes, Ausführen der Generatoren, Starten der Simulationswerkzeuge mit den generierten Eingabedateien bis hin zum Einsammeln der Simulations- und Analyseergebnisse.

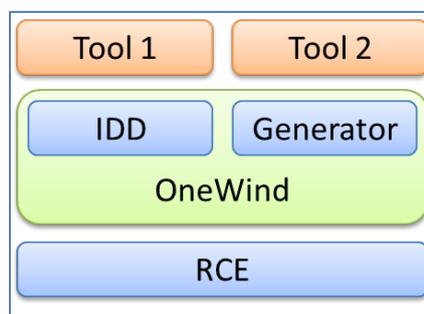


Abbildung 4: Aufbau der WindMUSE Simulationsumgebung

Die folgenden Kopplungen wurden ausgewählt und im Projekt eingerichtet. Sie sind im jeweiligen Unterkapitel des Kapitels 1.4 näher beschrieben:

- **FAST:** FAST mit AeroDyn
- **SIMPACK:** SIMPACK mit AeroDyn und integrierten FMUs
- **SIMPACK-S4:** SIMPACK mit Aerodynamik aus dem DLR Rotorsimulationstool S4
- **SIMPACK-Loads:** SIMPACK mit AeroDyn plus DLR Lastenanalysemodul TurbLoads
- **Loads-Structure:** SIMPACK mit TurbLoads, iterativ gekoppelt mit DLR DELiS zur Dimensionierung der Blattstruktur
- **Real-time Demo:** SIMPACK auf Echtzeitrechner gekoppelt mit realem Getriebeprüfstand

Im Folgenden werden jedoch zunächst die zur Ausführung notwendigen Eingabedaten und Modelle beschrieben.

1.3. Ergebnisse der Modellierung (AP2)

In diesem Arbeitspaket 2 (AP2) wurden die Simulationsmodelle erarbeitet, die zur ganzheitlichen Simulation von Windturbinen mit Horizontalrotor notwendig sind. Zunächst wird erläutert, welche Eingangsdaten bzgl. Wind, Aerodynamik und Blattstruktur für die Ausführung der Simulationsszenarien zugrunde lagen und wie diese zustande kommen.

1.3.1. Wind

Zur Berechnung von Lastfällen werden Winddaten verschiedener Standard Szenarien (OC3, OC4, DLC und DTU) verwendet. Grundlage der meisten Einströmdaten für Lastuntersuchungen ist das Normale Wind Profil (NWP) gemäß

$$V(z) = V_{hub} (z/z_{hub})^\alpha \quad (1)$$

wobei V_{hub} die Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe (z_{hub}), z die Vertikalkoordinate und α den Hallmann-Exponenten des Geschwindigkeitswachstums bezeichnen. Für hier ausschließlich in Betracht kommende Windturbinen an Land, setzt IEC $\alpha=0.2$, gemäß IEC 61400-1. Die Turbulenzintensität des Windes ist definiert als

$$TI = \sigma_1 / V_{hub} \quad (2)$$

wobei σ_1 die Standardabweichung des Windes vom 10-Minuten-Mittel in longitudinaler Richtung in Nabenhöhe kennzeichnet. Die verschiedenen zum Einsatz kommenden Turbulenzmodelle (s.u.) gehen alle aus IEC Standards hervor. Die zur Bestimmung von σ_1 benutzten Parameter variieren allerdings von Studie zu Studie. Meist werden beide Größen aus (2) angegeben und damit ist die Turbulenzintensität festgelegt. Ein Standort gilt als schwach turbulent, wenn $TI \leq 0.1$, als moderat turbulent bei $0.1 < TI \leq 0.25$ und als stark turbulent für Werte von $TI > 0.25$.

Die Windfluktuationen (Turbulenz) in der Rotorebene werden von den einzelnen Turbulenz-Modellen als Funktion der Zeit sowie der lateralen und vertikalen Richtung $f(t,y,z)$ beschrieben. Die mathematischen Modelle dazu werden mit steigendem Komplexitätsgrad eingeteilt in (aus [6])

- räumlich nicht uniform, zeitlich konstant: $f = f(0,y,z)$,
- räumlich konstant, zeitlich instationär: $f = f(t,0,0)$,
- nicht uniform und instationär: $f = f(t,y,z)$ und
- stochastisch $f = f(\text{power spectrum vs. discrete gust parameters})$.

Turbulenzmodelle

Es werden folgende Turbulenz-Modelle verwendet.

Von-Karman Turbulence Model und Kaimal Turbulence Model

Das Von-Karman Modell beschreibt isotrope Turbulenz. Dem gegenüber setzt das Kaimal Modell anisotrope Standardabweichungen für die laterale und vertikale Windkomponente gemäß $\sigma_2=0.8 \sigma_1$ und $\sigma_3=0.5 \sigma_1$ fest. Für Details der beiden Modelle siehe Kapitel „Turbulence Spectra“ in [5], Seite 22 ff.

Normal Turbulence Model (NTM)

Dieses Modell definiert die monotone Abnahme der Turbulenzintensität (Gl. 2) mit zunehmender Windgeschwindigkeit unter „normalen“ Betriebsbedingungen. Es enthält zufällige Schwankungen des longitudinalen Windes um den 10-Minuten Mittelwert und des lateralen Windes um den Mittelwert 0. Beide Komponenten sind Gauß-verteilt und verwenden Standardabweichungen von

$$\sigma_1 = 0.18 \left(\frac{1}{3} 15 + \frac{2}{3} V_{hub} \right) \quad (3)$$

oder allgemein nach IEC 61400-1:2005

$$\sigma_1 = I_{ref} (b + 0,75 V_{hub}); \quad b=5,6\text{m/s} \quad (4)$$

für die longitudinale Windkomponente und $\sigma_2=0.8 \sigma_1$ für die laterale Windkomponente. I_{ref} ist die erwartete Turbulenzintensität bei 15 m/s, wobei Werte zwischen 0,12 und 0,16 verwendet werden.

Extreme Turbulence Model (ETM)

Das ETM verwendet nach IEC-Standard ein NWP mit geänderter Standardabweichung des longitudinalen Windes von

$$\sigma_1 = c I_{ref} \left(0,072 \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right); \quad c=2\text{m/s} \quad (5)$$

Mann Turbulence Model

Im Gegensatz zu bisherigen Modellen, die die Turbulenz aus 1-dimensionaler Fast Fourier Transformation (FFT) für jede Koordinate unabhängig bestimmen, wird im Mann'schen Turbulenzmodell mittels einer 3-dimensionalen FFT des voll entwickelten drei-dimensionalen spektralen Turbulenzensors ein realistisches Turbulenzfeld im drei-dimensionalen Raum erzeugt. Der 3-d spektrale Tensor wird aus einem isotropen Turbulenzfeld (von Karman) abgeleitet, das einer vorgegebenen Störung durch eine konstante vertikale Windscherung ausgesetzt ist. Dadurch sind die horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsfluktuationen gemäß der Reynolds-Spannungen statistisch korreliert. Trotz erhöhter Komplexität unterscheidet sich das Modell nur in einem Parameter (sog. shear distortion parameter) vom isotropen Karman-Modell.

Die Turbulenz-Modelle nach Kaimal und Mann erfüllen vornehmlich die von der IEC 61400-1:2005 geforderten Ansprüche und werden dementsprechend zur Anwendung für die Lastfallrechnung von realistischen Turbulenzen empfohlen.

Windprofile

Auf Basis der beschriebenen Turbulenzmodelle können folgende Windprofile definiert werden.

Normal Wind Profile (NWP)

Im Falle von Standardwindturbinen gibt das NWP die mittlere Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe nach Potenzgesetz (1) an und wird zur Bestimmung der mittleren vertikalen Windscherung über das vom Rotordurchmesser erfasste Feld verwendet. Wobei hier wieder nach IEC-Standard der Höhenexponent $\alpha=0.2$ ist.

Extreme Wind Speed Model (EWM)

Das EWM verwendet entweder stetige oder turbulente Windfelder und basiert auf einer fixierten Turbulenz-Standardabweichung σ_1 und einer gegebenen Referenzgeschwindigkeit V_{ref} . Dabei definiert der IEC Standard die einmal in 50 Jahren auftretende Extremwindgeschwindigkeit V_{50} (gemittelt über 3 Sekunden) an einem Standort als das 1.4-fache von V_{ref} in Nabenhöhe, wobei V_{ref} das 5-fache des Jahresmittelwertes der Windgeschwindigkeit V_{ave} an diesem Standort bedeutet. Der Wind variiert dabei mit der Höhe gemäß Gleichung (1) mit $\alpha=0,11$.

Extreme Operating Gust (EOG)

Bei diesem auch als „Mexican Hat“ bezeichneten Ereignis, nimmt die Geschwindigkeit zunächst ab und steigt dann steil an; fällt wieder ab, steigt nochmal an und kehrt dabei zum Ausgangswert zurück. Amplitude und Dauer der Böe variieren mit der Wiederkehrperiode.

Extreme Direction Change (EDC)

Dies bezeichnet eine fortgesetzte Änderung der Windrichtung gemäß einer Kosinus-Funktion. Die Windgeschwindigkeit soll dabei dem NWP folgen und es wird angenommen, dass nach durchgeführter Windrichtungsänderung keine weitere Veränderung erfolgt. Wieder variieren Amplitude und Dauer der Richtungsänderung mit der Wiederkehrperiode.

Extreme Coherent Gust (ECG)

Analog zur EDC bezeichnet dies eine fortgesetzte Änderung der Windgeschwindigkeit gemäß einer Kosinus-Kurve, wobei die erreichte konstante Endgeschwindigkeit höher ist als die Windgeschwindigkeit im Ausgangszustand. Ebenso variieren Amplitude und Dauer der Geschwindigkeitsänderung mit der Wiederkehrperiode.

Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD)

Dies ist eine Kombination aus EDC und ECG, also eine gleichzeitige Änderung von Betrag und Richtung des Windes. Wobei die Böe mit einer Stärke von $V_{cg}=15\text{ms}$ angenommen wird und die Windgeschwindigkeitsfunktion gemäß dem NWP gegeben ist.

Extreme Wind Shear (EWS)

Dies bezeichnet eine transiente Änderung der horizontalen und vertikalen Windscherung entlang des Rotordurchmessers. Gemäß einer Kosinus-Funktion steigen die Gradienten dabei zunächst an und fallen dann auf den Ausgangswert zurück. Es erfolgt jedoch keine gleichzeitige Anwendung beider Scherungen. Alle transienten Ereignisse verwenden eine longitudinale Standardabweichung des Windes nach NTM.

Winddaten

Die Turbine, die den OC3- und OC4-Lastfällen zugrunde liegt, ist vom Typ NREL 5-MW (siehe Kap. 1.2.1). Drei mittlere Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe werden betrachtet, $V_{\text{hub}} = 8.0, 11.4$ und 18.0 m/s mit longitudinalen Standardabweichungen von $\sigma_1 = 0, 1.981, 2.674$ m/s. Dies entspricht Turbulenzintensitäten von $TI = 0, 17.4$ und 14.9% . Während die OC3-Fälle das Turbulenzmodell nach Mann zugrunde legen, wird bei den OC4-Fällen das Kaimal-Modell verwendet. Das jeweils erste Windszenario wird mit $V_{\text{hub}} = 8$ m/s und turbulenzfrei gerechnet.

Winddaten der DTU-Szenarien bestehen aus 19 Extremlastfällen der DTU 10 MW-Turbine. Diese Lastfälle entsprechen im Wesentlichen den Lastfällen der Design Load Cases (DLC) aus der Norm IEC 61400. Die DTU-Referenzturbinen sind in Kap. 1.2.1 beschrieben.

Die Lastfälle der DLC Szenarien können für beide Referenzturbinen (NREL 5 MW und DTU 10 MW) gerechnet werden.

Zusätzlich zu den Validierungslastfällen wurden Windfelder für 6 realistische MET-Szenarien erzeugt. Dazu wurden numerische Large-Eddy-Simulationen (LES) mit dem numerischen Wettermodell WRF [22] durchgeführt. Die daraus erhaltenen Windfelder beinhalten physikalisch induzierte und damit realistischere Turbulenzstrukturen im Gegensatz zu den Windfeldern aus obigen Turbulenzmodellen, bei denen Turbulenz statistisch erzeugt wird. Alle Simulationen wurden mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 10m und 0.1s über einen Zeitraum von 1h durchgeführt. Während der letzten 10min jeder Simulation wurden Querschnitte aller drei Windkomponenten (u, v, w) in der Mitte des Feldes und senkrecht zur Strömungsrichtung mit den räumlichen Abmessungen von 260m x 250m (Breite x Höhe) als Zeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von 0.1s abgespeichert. Die Wind-Dateien der 6 Szenarien sind sowohl für die NREL, als auch für die DTU Turbinen verfügbar und berücksichtigen konvektive Grenzschicht (MET1.1-1.2), Grenzschicht mit Low-level Jet (MET2.1-2.2) und neutral geschichtete Grenzschicht über einem Wald (MET3.1-3.2).

Die folgende Tabelle 1 enthält zusammenfassend alle Last- und Simulationsszenarien, für die im Projekt Winddaten vorbereitet wurden. Sie können alle mit der WindMUSE-Umgebung gerechnet werden.

Src.	No.	Simulation scenario	Wind speed [m/s]	Wind condition [σ_1 in m/s]	Time [s]
OC3 ²	1.1	DOFs: Tower, drivetrain, blades	No wind	No wind	Any
	1.2	DOFs: Tower, drivetrain, blades	No wind	No wind	Any
	2.1a	Constant rotor speed and fixed blade pitch, no DOF	$V_{hub}=8$	No turbulence	600
	2.1b	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=8$	No turbulence	600
	2.2	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=11.4$	Mann, $\sigma_1=1.981$	600
	2.3	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=18$	Mann, $\sigma_1=2.674$	600
	3.1	DOFs: Tower, drivetrain, blades	$V_{hub}=8$	No turbulence	600
	3.2	DOFs: Tower, drivetrain, blades	$V_{hub}=11.4$	Mann, $\sigma_1=1.981$	600
	3.3	DOFs: Tower, drivetrain, blades	$V_{hub}=18$	Mann, $\sigma_1=2.674$	600
OC4 ³	1.0	DOFs: Support structure or all	No wind	No wind	Any
	2.1	No DOF	No wind	No wind	Any
	2.2	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=8$	No turbulence	600
	2.4a	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=1.981$	600
	2.4b	Rot. spd. & pitch via contr., no DOF	$V_{hub}=18$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.674$	600
	3.2	Rot. spd. & pitch via contr., all DOFs	$V_{hub}=8$	No turbulence	600
	3.4a	Rot. spd. & pitch via contr., all DOFs	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=1.981$	600
	DTU ⁴	1.1	Power prod., consider rotor imbal.	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$
1.2		Power prod., consider rotor imbal.	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
1.3		Power prod., consider rotor imbalance	$V_{hub}: 4-25$	ETM Kaimal 50 m/s, $\sigma_1: 2.8-4.8$	600
1.4		Power prod., consider rotor imbalance	$V_{hub}=11.4$ ± 2	ECD, up to $\pm 77^\circ$	40+10
1.5		Power prod., consider rotor imbalance	$V_{hub}=11.4$	EWS horiz. & vert. up to ± 1.168	40+12
2.1		Power production; control system fault or loss of electrical network	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
2.3		Power prod.; external or internal elec. fault incl. loss of elec. network	$V_{hub}: 9.4, 13.4, 25$	EOG up to 6.679 m/s	40+10.5

² Nur für NREL 5 MW; Nr. 2.4, 2.5 und 2.6 nur für Offshore-Turbinen und hier ausgeschlossen

³ Nur für NREL 5 MW; Nr. 2.3a, 2.3b und 2.5 nur für Offshore-Turbinen und hier ausgeschlossen

⁴ Nur für DTU 10 MW; Nr. 2.2 beschreibt fehlerbehafteten Lastfall, hier ausgeschlossen

Src.	No.	Simulation scenario	Wind speed [m/s]	Wind condition [σ_1 in m/s]	Time [s]
	2.4	Power prod.; ctrl., protection or elec. system faults incl. loss of elec. net	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
	3.1	Start up	V_{hub} : 4-25	NWP	Any
	3.2	Start up	V_{hub} : 4, 9.4, 13.4, 25	EOG up to 6.679 m/s	40+10.5
	3.3	Start up	V_{hub} : 4, 9.4, 13.4, 25	EDC, up to $\pm 54.3^\circ$	40+6
	4.1	Normal shut down	V_{hub} : 4-25	NWP	Any
	4.2	Normal shut down	V_{hub} : 9.4, 25	EOG up to 6.679 m/s	40+10.5
	5.1	Emergency shut down	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal $\sigma_1=2,264$	699
	6.1	Parked; yaw misalign. up to $\pm 15^\circ$	$V_{hub}=70$	EWM 50y	Any
	6.2	Parked; loss of elec. power network, wind direction changes up to $\pm 180^\circ$	$V_{hub}=70$	EWM 50y	Any
	6.3	Parked; yaw misalign. up to $\pm 30^\circ$	$V_{hub}=56$	EWM 1y	Any
	6.4	Parked for expected hours of non-power production, considering fatigue damage	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
	7.1	Parked; yaw misalign. for faulty yaw $\pm 180^\circ$ or $\pm 15^\circ$ for any other fault	$V_{hub}=56$	EWM 1y	Any
DLC	1.1	Power prod., consider rotor imbal.	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
	1.5	Power prod., consider rotor imbalance	$V_{hub}=11.4$	ETM Kaimal 50 m/s, σ_1 : 3.513	600
	5.1	Emergency shut down	$V_{hub}=11.4$	NTM Kaimal, $\sigma_1=2.264$	600
Pwr.	Any		V_{hub} : 4-25	NTM Kaimal, $\sigma_1 < 3.896$, $\alpha = 0.2$	600
MET	1.1	Any	$V_{hub}=2$	Convective PBL, LES	600
	1.2	Any	$V_{hub}=10$	Convective PBL, LES	600
	2.1	Any	$V_{hub}=10$	Low-lev.jet katabatic, LES	600
	2.2	Any	$V_{hub}=2$	Low-lev. jet anabatic, LES	600
	3.1	Any	$V_{hub}=2$	Neutral stratification, LES	600
	3.2	Any	$V_{hub}=10$	Neutral stratification, LES	600

Tabelle 1: Ausgewählte Last- und Simulationsszenarien mit entsprechenden Winddaten

Simulationen zu MET-Szenarien

Konvektive Grenzschicht

Die Simulationen zur konvektiven Grenzschicht wurden mit einer stabilen Schichtung (Brunt-Vaisala-Frequenz $N^2 = 10^{-4} \text{ s}^{-2}$) und horizontalen Windgeschwindigkeiten von 2 und 10 m/s initialisiert. Am Boden diente ein konstanter Wärmefluss von 290 W m^{-2} als Forcing zur Erzeugung von Konvektion. Schnappschüsse von horizontaler und vertikaler Windgeschwindigkeit der MET1.2 Simulation nach einer Simulationszeit von 1h in 100m Höhe sind in nachfolgender Abbildung 5 dargestellt.

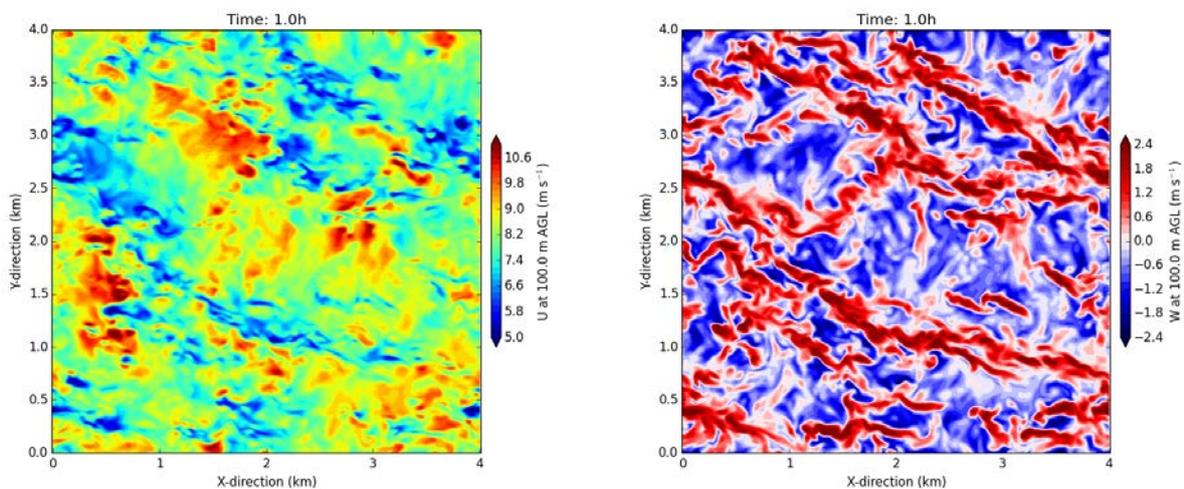


Abbildung 5: Horizontale und vertikale Windgeschwindigkeit in 100m Höhe der MET1.2 Simulation nach einer Simulationszeit von 1h.

Mittlere Profile von horizontaler Windgeschwindigkeit und turbulenter kinetischer Energie (TKE) der MET1.1 und MET1.2 Simulationen sind in nachfolgender Abbildung 6 gezeigt.

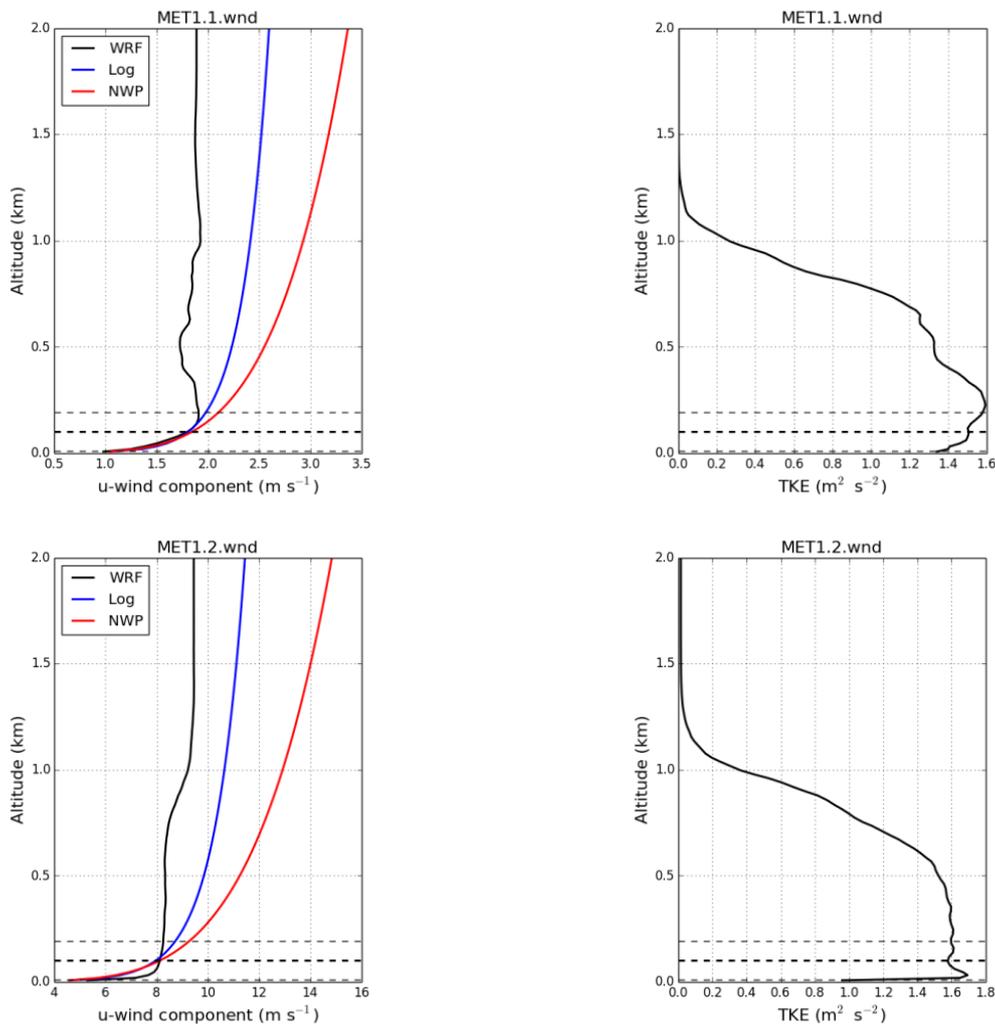


Abbildung 6: Mittlere Profile für horizontale Windgeschwindigkeit und TKE der MET1.1 Simulation (oben) und der MET1.2 Simulation (unten).

Low-level Jet

Die Simulationen zu Strahlströmen in Bodennähe (low-level Jets) wurden mithilfe des analytischen Prandtl-Modells [23] initialisiert, welches die Beziehung zwischen thermischer Schichtung und Windgeschwindigkeit beschreibt. Im Fall MET2.1 wurde der Wärmefluss am Boden ausgeschaltet, wodurch eine sehr stabile Schichtung mit geringer Turbulenz im Bereich des Jets erzeugt wird. Diese Situation ähnelt Fällen mit katabatischen Winden, welche sich häufig in der nächtlichen Grenzschicht entlang von Gebirghängen bilden und hohe, bodennahe Windgeschwindigkeiten erzeugen können. Im Fall MET2.2 wurde ein Bodenwärmefluss von 120 Wm^{-2} verwendet, um anabatische Bedingungen zu simulieren. Dieser Fall ähnelt thermischen Aufwinden entlang von

Gebirghängen und zeichnet sich durch stärkere Turbulenz und schwächere Gradienten im Jet aus. Mittlere Profile der MET2.1 und 2.2 Simulationen sind in Abbildung 7 dargestellt.

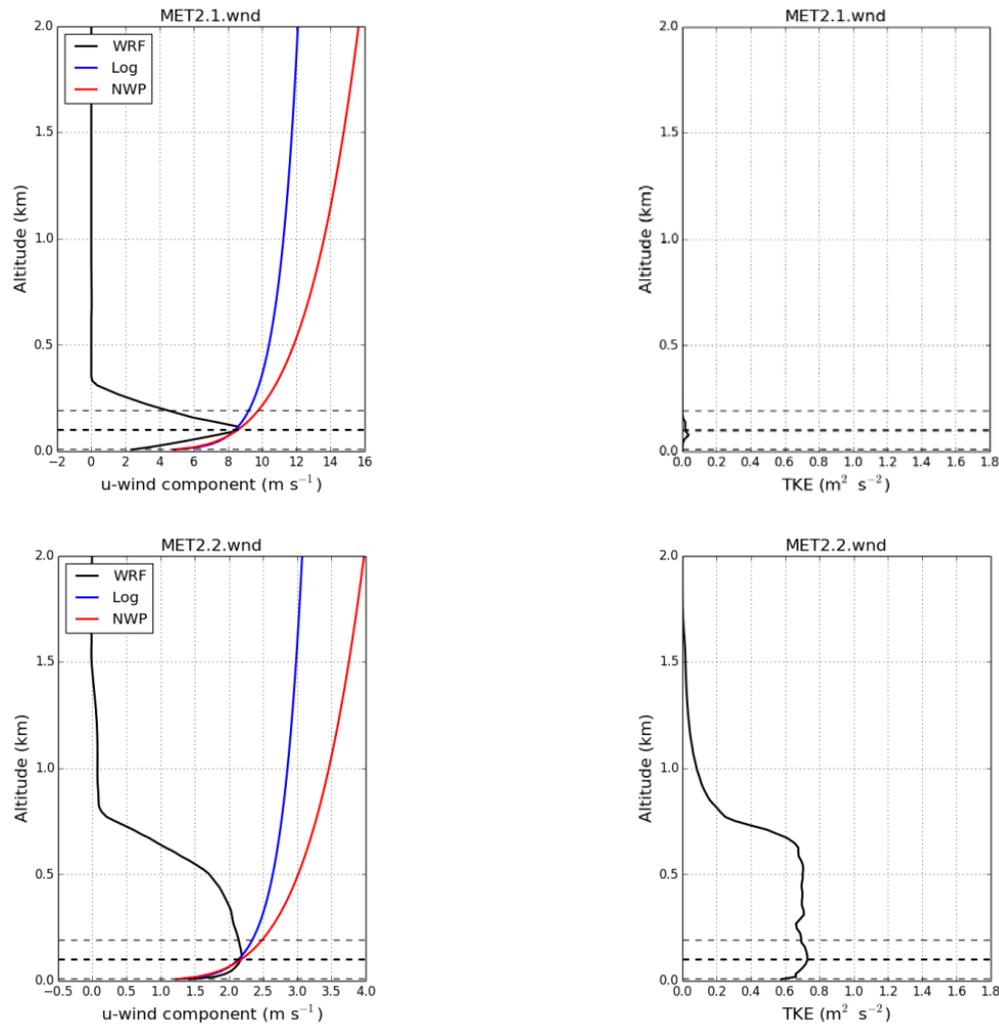


Abbildung 7: Wie Abbildung 6, jedoch für die MET2.1 und MET2.2 Simulationen.

Neutrale Grenzschicht

Simulationen der MET3.1 und MET3.2 Fälle wurden mit einer neutralen Schichtung und Windgeschwindigkeiten von 2 und 10 m/s initialisiert. Die Oberfläche wurde mit einem 30m (± 5 m) hohen Wald bedeckt und im Modell gemäß Shaw [29] parametrisiert. Die Rauigkeit des Waldes erzeugt starke Turbulenz über dem Wald und eine starke Windzunahme mit der Höhe, wie anhand der mittleren Profile in Abbildung 8 erkannt werden kann.

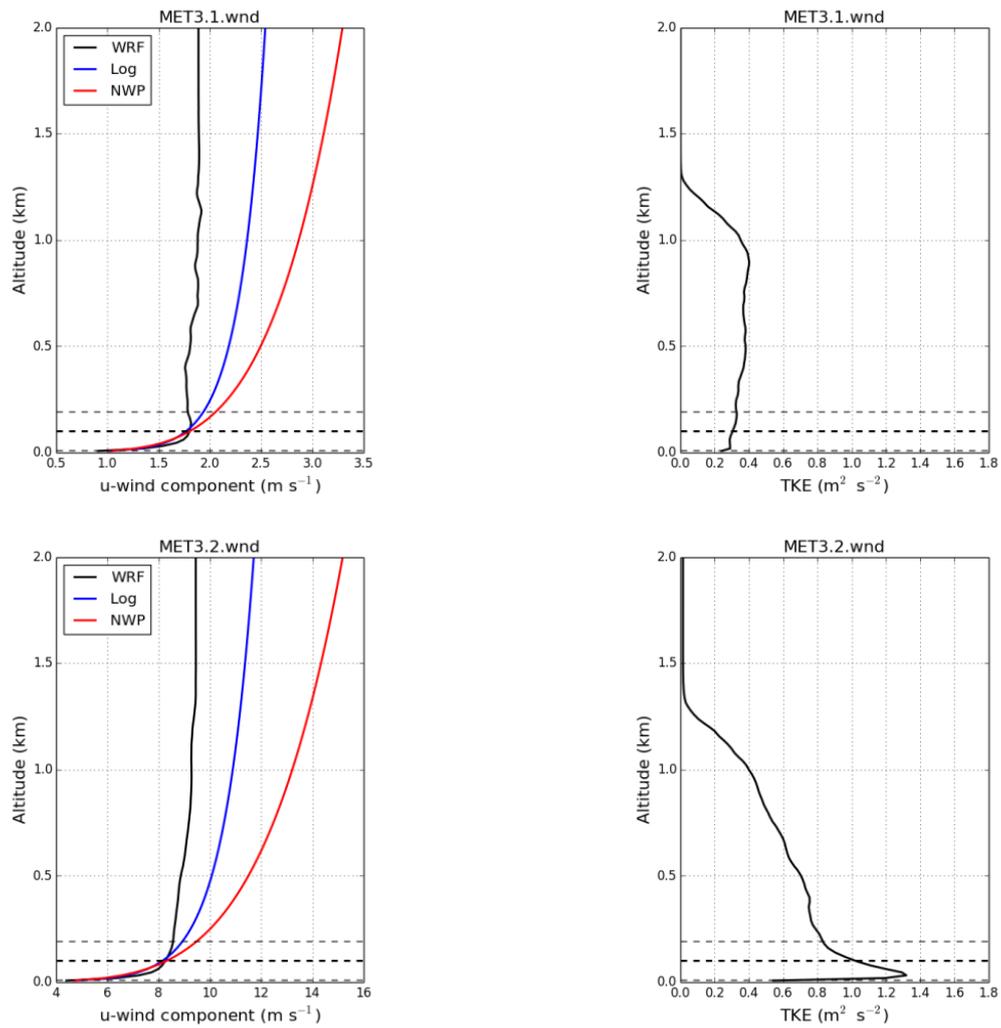


Abbildung 8: Wie Abbildung 6, jedoch für die MET3.1 und MET3.2 Simulationen.

1.3.2. 360° Profilpolaren

Der Rotorcode S4, der die Daten aus den Profilpolaren weiterverarbeitet, ist auf glatte Verläufe der aerodynamischen Beiwerte angewiesen. Um diese Anforderung bei den unterschiedlichsten Anströmbedingungen (Anstellwinkelbereich $\pm 180^\circ$) und Profilen (rel. Dicke 24%-60%, mit und ohne Gurneyflap an der Hinterkante, siehe Abbildung 10) zu erfüllen, müssen besonders robuste Einstellungen für die CFD-Prozesskette (Abbildung 9) gefunden werden.

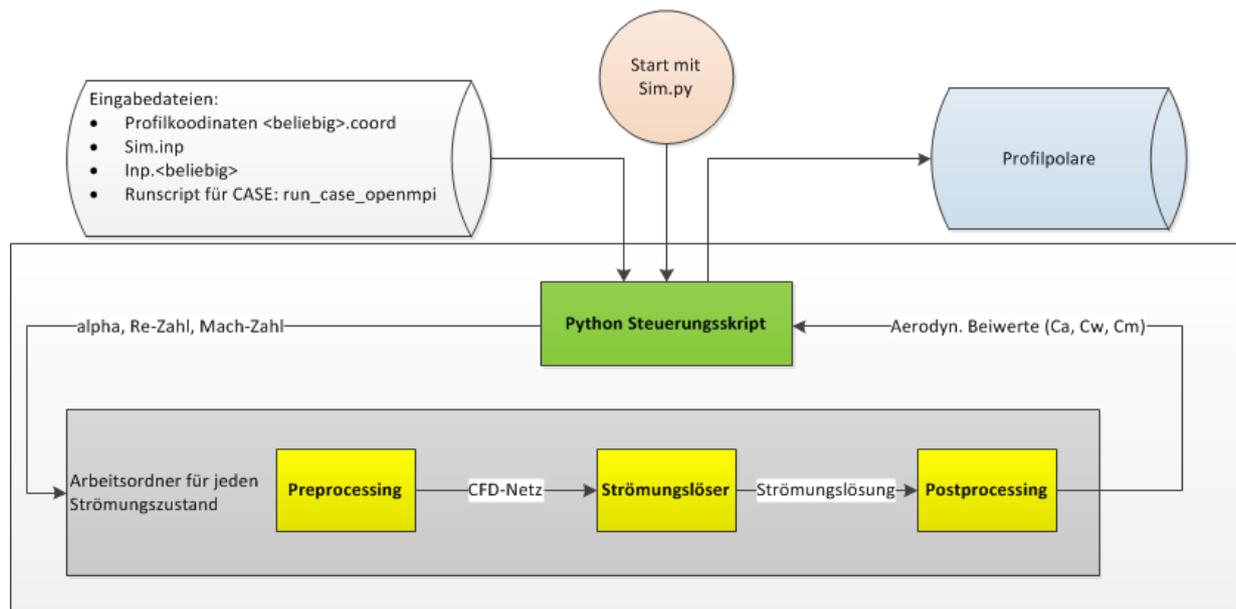


Abbildung 9: Ablaufdiagramm Prozesskette zur automatischen Berechnung von Profilpolaren

Im Zuge dessen wurde die automatische Netzerstellung optimiert. Dabei wurde vor allem die Netzkrümmung an der Profiloberfläche verbessert, wodurch nun eine Transitionsvorhersage für einen Anstellwinkelbereich von $-180^\circ < \alpha < +180^\circ$ möglich ist. Beim Vergleich verschiedener Netztopologien stellte sich die O-Netztopologie besser als die C-Topologie heraus. Obwohl das C-Netz im Anstellwinkelbereich um $\alpha=0^\circ$ genauer ist, besteht die O-Topologie durch ihr anstellwinkelunabhängiges Verhalten und kann die Anforderungen der 360°-Polare besser erfüllen. Mit den Profilnetzen unterschiedlicher Punktzahl wurde eine Netzverfeinerungsstudie durchgeführt und die

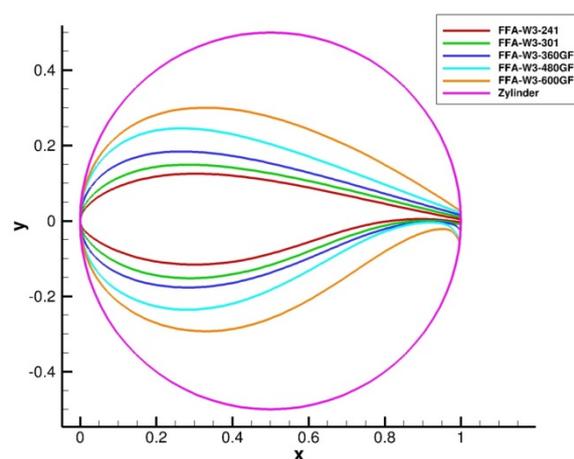


Abbildung 10: Profilkonturen der an der 10MW DTU Anlage verwendeten Profile

Polaren berechnet (Bericht auf Anfrage verfügbar).

Zum Vergleich der Ergebnisse wurden Profildaten von der DTU herangezogen. Diese setzen sich aus CFD-Berechnungen bei geringen Anstellwinkeln und der Analogie zur ebenen Platte bei hohen Anstellwinkeln zusammen. Gegenüber diesen Ergebnissen weisen die im Rahmen des Projektes WindMUSE produzierten Daten eine physikalisch höhere Qualität auf, weil auf die Analogie zur ebenen Platte verzichtet und die Vorhersage der Transition verbessert wird. Dies äußert sich in einer genaueren Lage der Transition und der Fähigkeit, Transition für jeden Anstellwinkel inklusive Rückanströmung vorherzusagen. Da nur eine Methode zur Berechnung der Polaren verwendet wird, erhält man einen glatteren Verlauf der Profilbeiwerte und einen in sich homogenen Datensatz. Dies ist besonders für die Implementierung der Daten in den Rotorcode S4 von Bedeutung. Insgesamt hat sich bestätigt, dass die zu untersuchenden Profile mit den Merkmalen einer großen Dicke, großem Nasenradius und Gurneyflap nicht den klassischen Vereinfachungen dünner Profile folgen und die Verwendung von CFD mit Transitionsvorhersage erforderlich ist.

Neben der Berechnung der Polaren wurde explizit für das dickste Profil FFA-W3-600GF eine instationäre Anstellwinkelschwingung berechnet, um Unterstützung für die Modellierung des Abreißverhaltens in S4 zu leisten. Abgesehen von einem anderen Hystereseverhalten ist das Ergebnis ähnlich zum Verlauf und den Größen der stationären Profilbeiwerte.

Für einige Anstellwinkel mit massiver Ablösung und Rückanströmung kann mit dem verwendeten RANS-Verfahren keine Lösung erzielt werden. Für diese Anstellwinkel wurde händisch unter Zuhilfenahme vollturbulenter Vergleichsrechnungen interpoliert. Dadurch ist eine vollautomatische Generierung der Polaren nicht möglich. In Abbildung 11 ist exemplarisch eine Polare des Profils FFA-W3-301 dargestellt, wie sie zur Verwendung in S4 übergeben wurde.

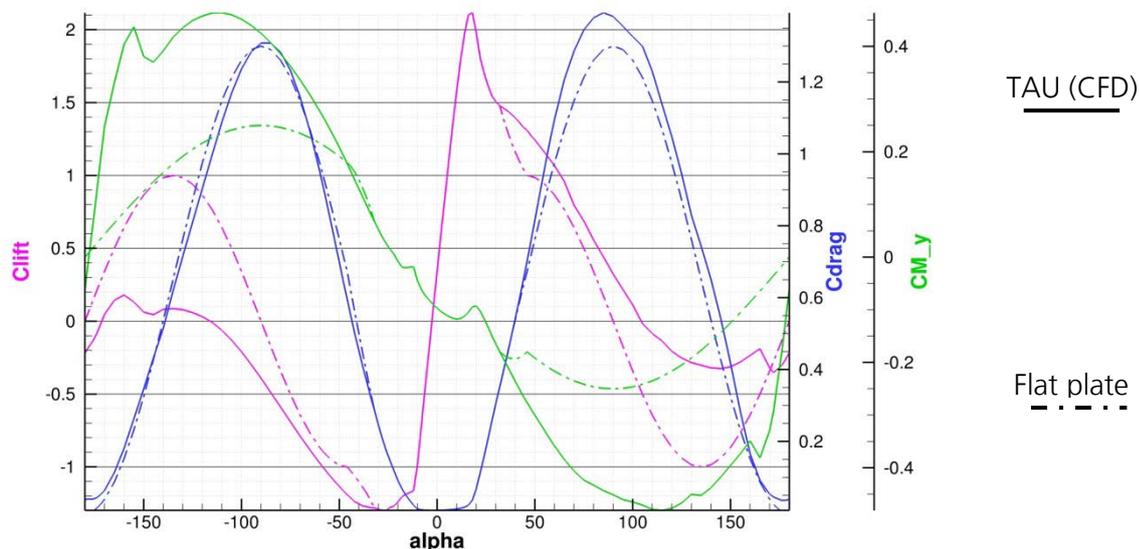


Abbildung 11: Vergleich der TAU (CFD) Daten mit den erweiterten Daten in der Analogie zur ebenen Platte (vgl. [9]). Die Daten von $-45^\circ < \alpha < -32^\circ$ und $+32^\circ < \alpha < +45^\circ$ sind zwischen TAU (CFD) und der ebenen Platte interpoliert.

1.3.3. Analytische Profilaerodynamik der DTU-Rotorblätter

Analytische Beschreibung

Zur Berechnung der Aerodynamik wurde in S4 eine analytische Beschreibung der Blattgeometrie sowie der aerodynamischen Koeffizienten der verwendeten FFA-W3 Profile integriert. Die Blattgeometrie entstammt dem von der DTU veröffentlichten Anlagendokument [9] und ist in Abbildung 12 dargestellt.

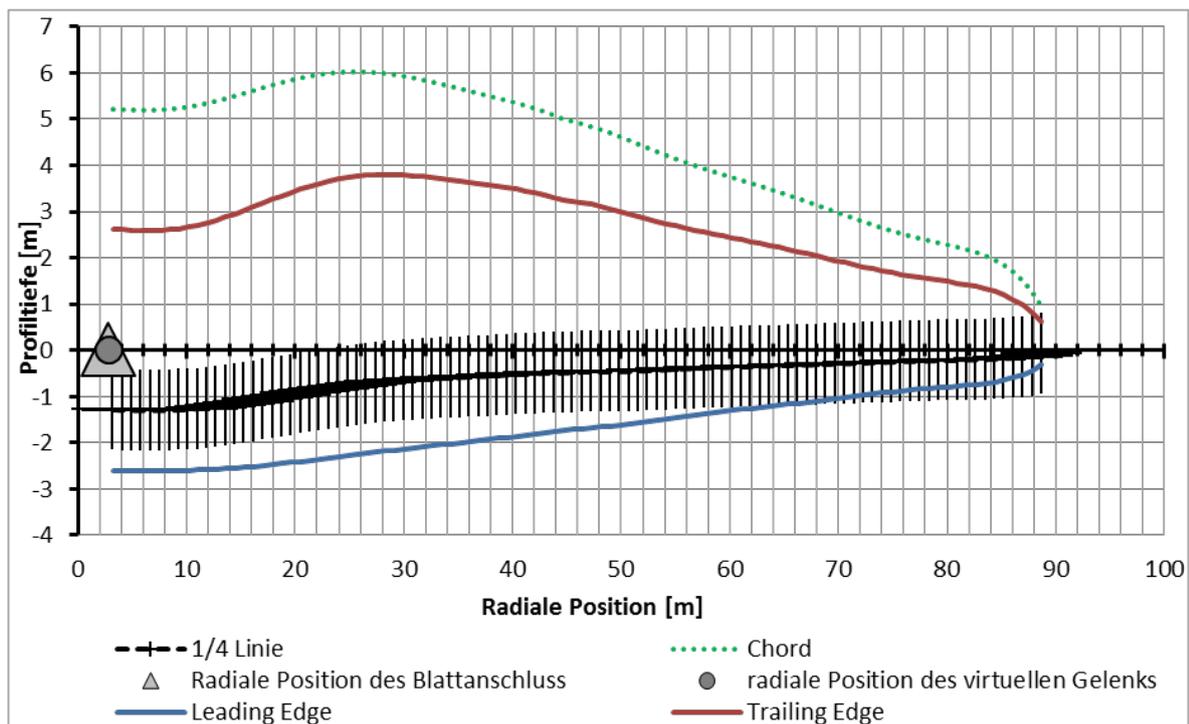


Abbildung 12: Blattgeometrie der DTU 10MW RWT Anlage

Das analytische Aerodynamikmodell in S4 ermöglicht eine Modellierung der Aerodynamik bei instationären Phänomenen, wie sie beispielsweise bei sich schnell ändernden lokalen Anstellwinkeln auftreten kann. Die dafür mittels CFD berechnete zugrundeliegende Aerodynamik wurde im vorherigen Abschnitt beschrieben.

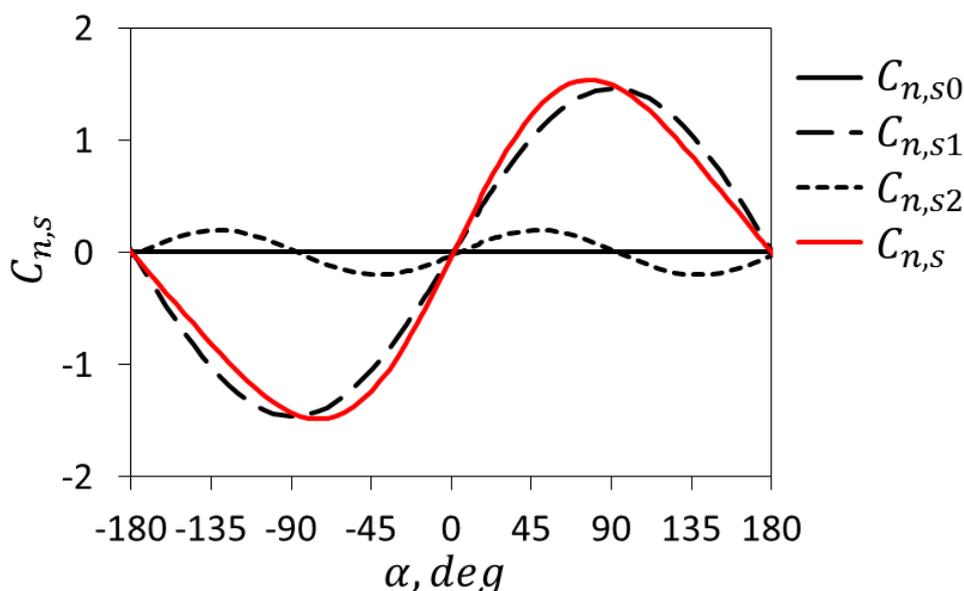
Profil	Gurney Flap	r/R
Kreis	-	0.031
FFA-W3-600	Ja	0.193
FFA-W3-480	Ja	0.232
FFA-W3-360	Ja	0.315
FFA-W3-301	-	0.408
FFA-W3-241	-	0.712

FFA-W3-241	-	1.000
------------	---	-------

Tabelle 2: Verteilung der aerodynamischen Profile am Blatt

Die in S4 berechneten aerodynamischen Kräfte werden am jeweiligen aerodynamischen Angriffspunkt an SIMPACK übergeben. Da sich dieser jedoch nicht zwangsmäßig an einer radialen Position liegt, an welcher sich ein „reines“ aerodynamisches Profil befindet, wird die Aerodynamik an den Zwischenstellen aus den nächstgelegenen Profilen interpoliert. Tabelle 2 beinhaltet die Positionen aller am Blatt verwendeter Rein-Profile.

In dem in S4 verwendeten analytischen aerodynamischen Modell wird die Strömung um jedes Profil in einen abgelösten und einen anliegenden Teil unterteilt. Dabei werden beide Teile durch analytische Funktionen beschrieben, welche den gesamten 360° Anstellwinkelbereich abdecken. Im Folgenden wird dies beispielhaft anhand der Modellierung des FFA-W3-241 Profils aufgezeigt. Nachdem Auftrieb und Widerstand, beschrieben durch die dimensionslosen Koeffizienten c_L und c_D , in die Normal- und Tangentialkoeffizienten c_N und c_T umgewandelt wurden, die im Profilkordinatensystem definiert sind, werden die Koeffizienten in Anteile aus abgelöster und anliegender Strömung aufgeteilt. Dabei bestehen beide Strömungstypen wiederum aus mehreren Einzel-funktionen. Exemplarisch wird das in Abbildung 13 bis Abbildung 15 anhand des Normalkoeffizients dargestellt. Jede dieser einzelnen Funktionen beinhaltet ihrerseits mehrere Koeffizienten, welche die Ausprägung eines jeweiligen Strömungsphänomens beschreiben. So erhält man für alle 3 Beiwerte insgesamt 51 Koeffizienten. Diese müssen für jedes Profil einzeln bestimmt werden. Während einer Simulation werden nun je nach lokalen Anströmbedingungen die Koeffizienten angepasst um deren Einfluss auf die aerodynamischen Kräfte abzubilden.

Abbildung 13: Einzelne Komponenten der abgelösten Strömung von c_N für das FFA-W3-241 Profil

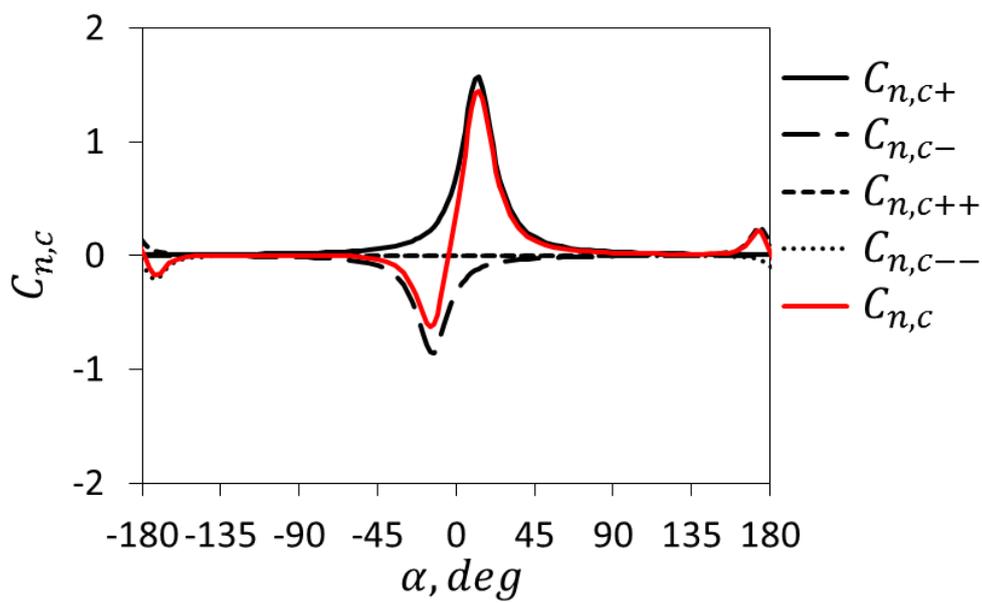


Abbildung 14: Einzelne Komponenten der anliegenden Strömung von c_N für das FFA-W3-241 Profil

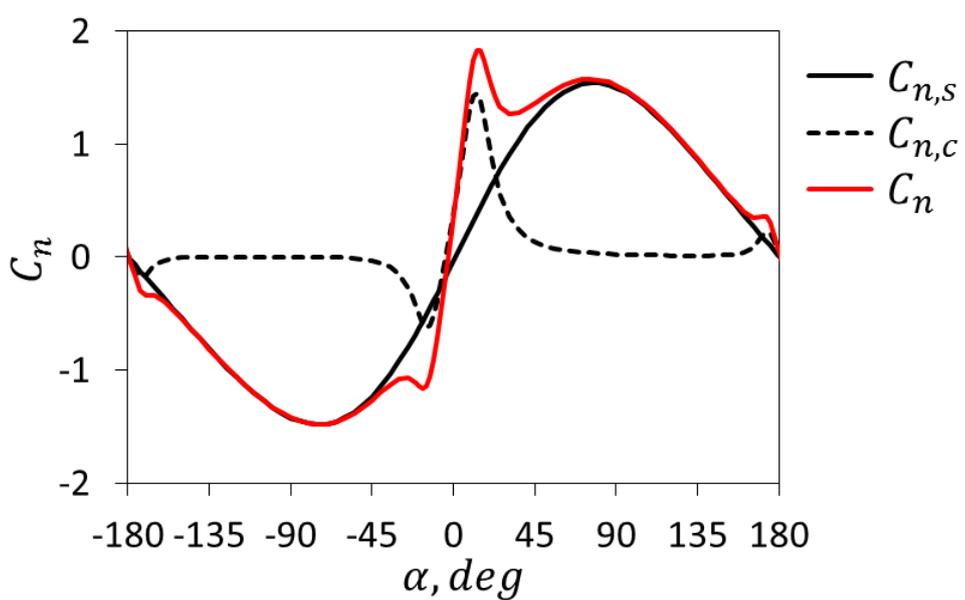


Abbildung 15: Einfluss der abgelösten und anliegenden Strömung von c_N auf den gesamt Koeffizienten für das FFA-W3-241 Profil

Die für das FFA-W3-241 resultierenden Auftriebs-, Widerstands- und Momentenbeiwerte sind zusammen mit den zugrundeliegenden CFD Daten (SA) in Abbildung 16 dargestellt.

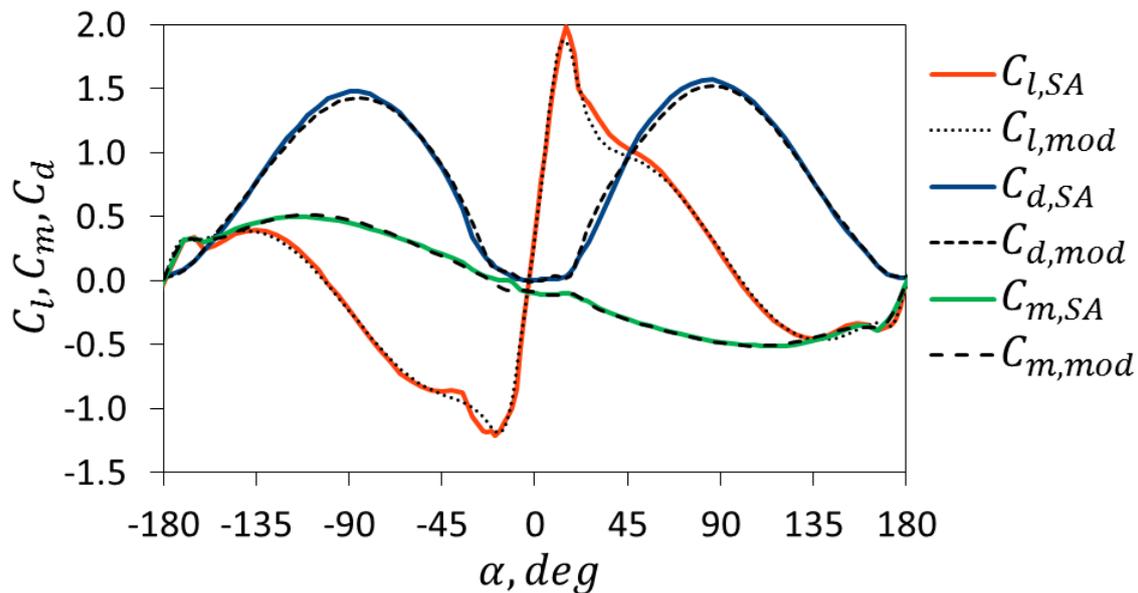


Abbildung 16: Modellierung der aerodynamischen Beiwerte des analytischen Modells für das FFA-W3-241 Profil

Da besonders bei dickeren Profilen das Strömungsverhalten der CFD Simulationen bei Anstellwinkeln um $\pm 170^\circ$ nicht immer eindeutig interpretierbar war, konnte bei manchen dieser Profile die anliegende Strömung bei rückwertiger Anströmung nicht modelliert werden. Die verhältnismäßig kleinen Saugspitzen in diesem Bereich sind in Abbildung 14 für das dünnste aller verwendeten Profile ersichtlich. Dort erkennt man das um den Anstellwinkel von 180° wesentlich schwächer als bei kleinen Anstellwinkeln ausgeprägte lokale Maximum und Minimum der roten Summenkurve. Eine akkurate Modellierung der Beiwerte wurde in jedem Fall im Anstellwinkelbereich von -40° bis 140° für jedes Profil gewährleistet. Somit hat diese Vereinfachung keinen Einfluss auf die Simulation der DTU 10MW RWT Anlage solange sich diese im normalen Betriebszustand befindet. Das Anlaufverhalten der Anlage bei normaler Anströmung von vorne kann ebenfalls ohne Einschränkungen in der Simulationsgüte gerechnet werden. Wird dieser Bereich verlassen, ist mit Ungenauigkeiten zu rechnen. Einen Überblick über das Verhalten der Aerodynamik aller Profile liefern Abbildung 17 bis Abbildung 19.

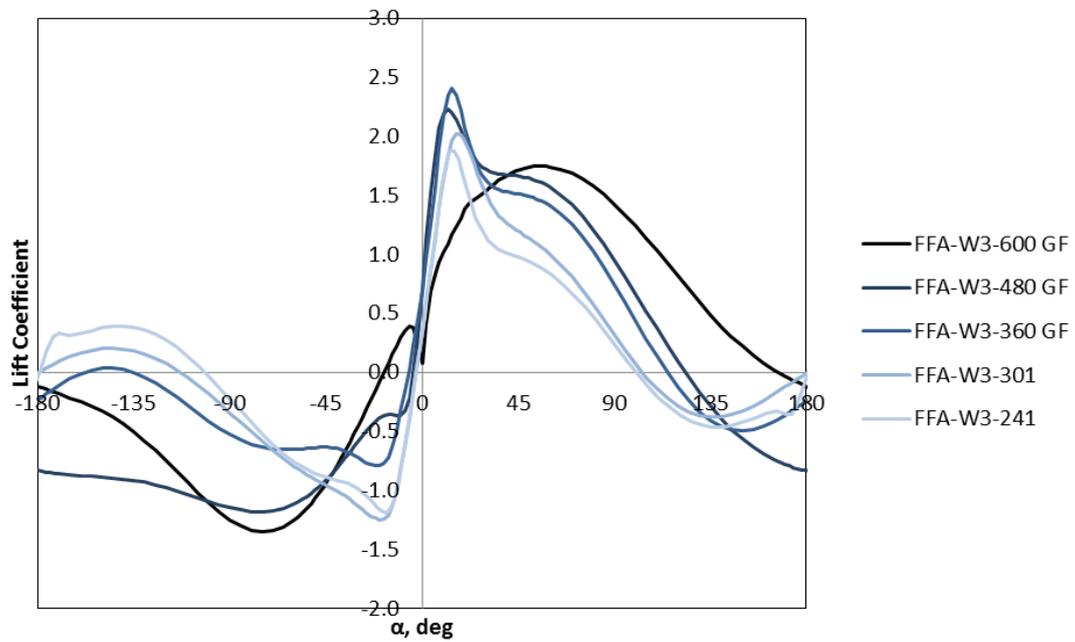


Abbildung 17: Analytische Beschreibung des Auftriebes aller Profile der DTU 10MW RWT Anlage

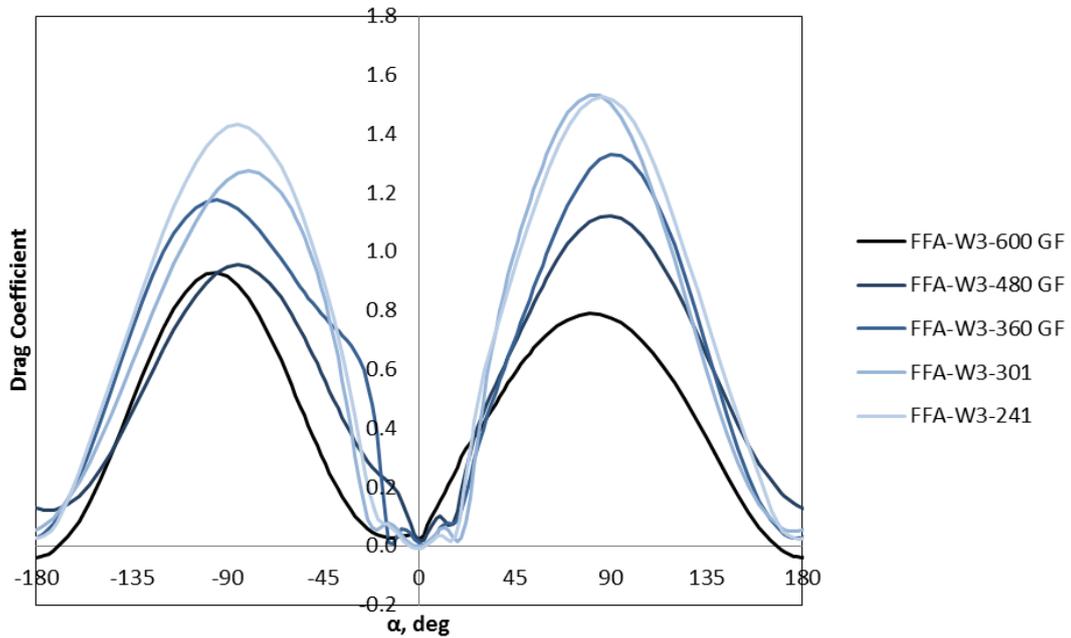


Abbildung 18: Analytische Beschreibung des Widerstandes aller Profile der DTU 10MW RWT Anlage

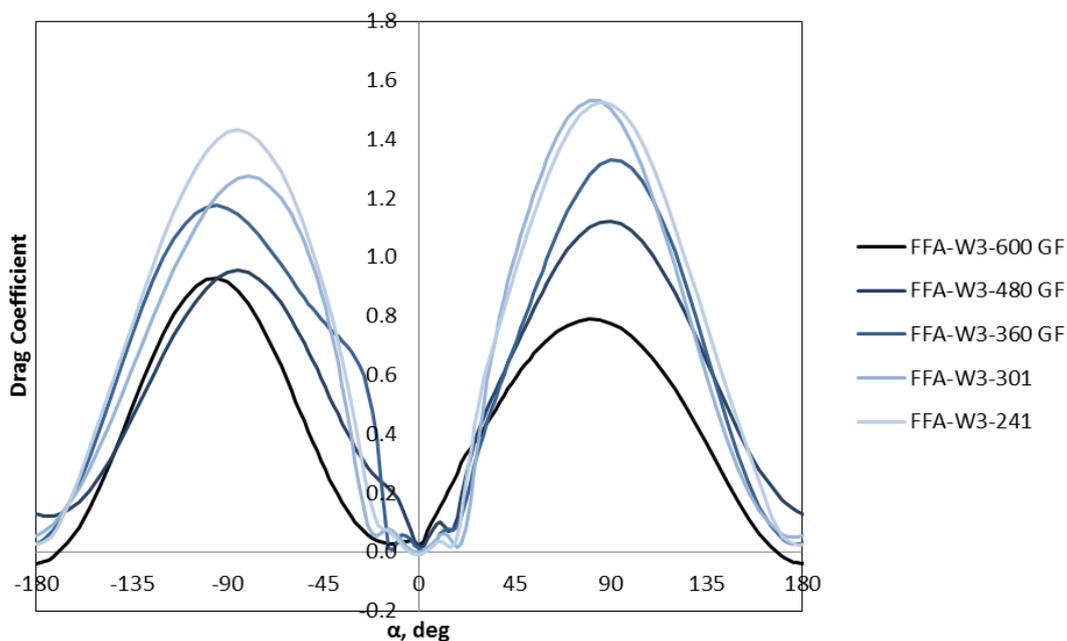


Abbildung 19: Analytische Beschreibung des Momentes aller Profile der DTU 10MW RWT Anlage

Validierung der Aerodynamik

Die aerodynamische Modellierung wird nun in der Kopplung mit Simpack anhand von Vergleichen mit Veröffentlichungen von der DTU [9] sowie mit Simulationen des Instituts für Aeroelastik, validiert. Bei allen hier durchgeführten Simulationen und Vergleichen wird die DTU 10MW Anlage frontal, mit konstanter Windgeschwindigkeit angeströmt.

Konstante Windgeschwindigkeit

Der erste Vergleich zwischen den Simulationen wurde bei konstanten Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Dabei befand sich die Anlage am Anfang einer jeden Simulation im Stillstand mit Blättern ohne Einstellwinkel. Zur Validierung der Anlage wurde die Simpack - S4 Kopplung (SPCK-S4) mit Simpack-AeroDyn Rechnungen (SPCK-AeroDyn) sowie mit DTU Veröffentlichungen verglichen. Eine Übersicht über angewandte Berechnungsmethoden ist in Tabelle 3 gegeben. Aufgrund von Umsetzungsschwierigkeiten mit dem Regler der DTU unter Windows wurde der in [24] vorgestellte Regler in der SPCK-S4 Kopplung verwendet.

	Aerodynamik	Strukturdynamik	Regler
DTU	HAWC2	HAWC2	DTU
SPCK-S4	S4	Simpack	Beschrieben in [9]
SPCK-AeroDyn	AeroDyn	Simpack	Beschrieben in [9]

Tabelle 3: Modellierungsübersicht für konstanten Wind

Für die im Folgenden dargestellten Umdrehungsgeschwindigkeiten, Leistungsbeiwerte, Schubbeiwerte und Einstellwinkel wurden die Ausgangsgrößen zeitlich gemittelt, nachdem die Anlage vollständig hochgefahren war. Es wurden Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 25 m/s analysiert. In den folgenden Diagrammen sind die jeweiligen Parameter über der Windgeschwindigkeit v_w aufgetragen. Aus den Abbildung 22 bis Abbildung 23 wird ersichtlich, dass alle Vergleichsgrößen eine relativ gute Übereinstimmung mit den DTU Rechnungen aufweisen. Im niedrigen Windgeschwindigkeitsbereich produziert die Simpack-S4 Kopplung etwas mehr Leistung (Koeffizient c_p) und Schub (Koeffizient c_t) als die DTU Veröffentlichungen. Dies liegt an den unterschiedlichen verwendeten aerodynamischen Koeffizienten. Ein direkter Vergleich der aerodynamischen Koeffizienten ist in Abbildung 24 für das Profil an der Blattspitze und Abbildung 25 für ein Profil in der Blattmitte dargestellt. Daraus wird ein zum Teil deutlich stärker ausgeprägter Auftriebsbeiwert im kleinen Anstellwinkelbereich in S4 ersichtlich, welcher die höhere Leistung und den höheren Schub erklärt.

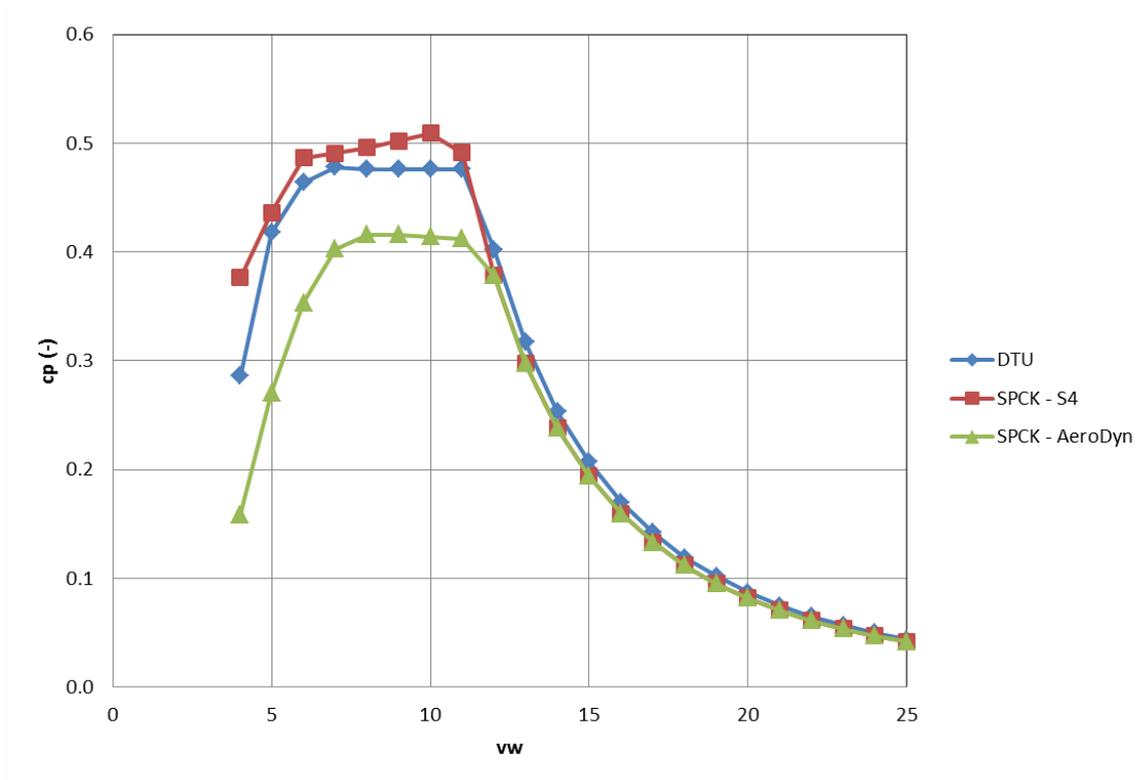


Abbildung 20: Vergleich der Leistungsbeiwerte der DTU 10MW RWT Anlage

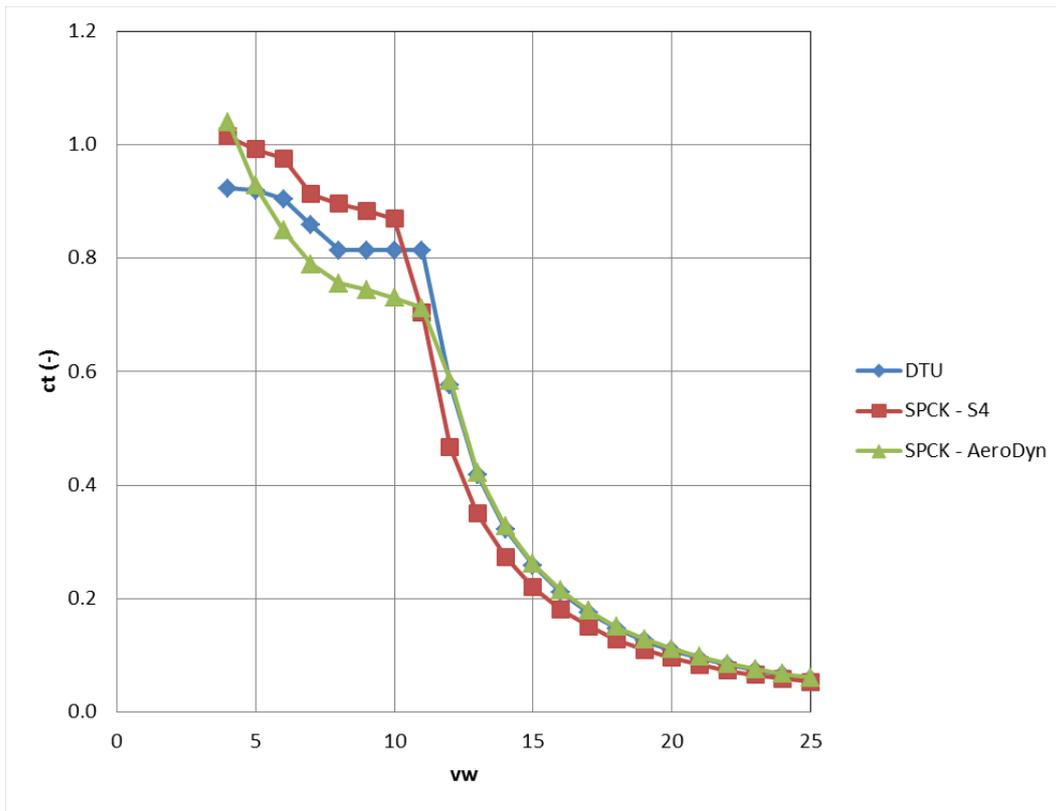


Abbildung 21: Vergleich der Schubbeiwerte der DTU 10MW RWT Anlage

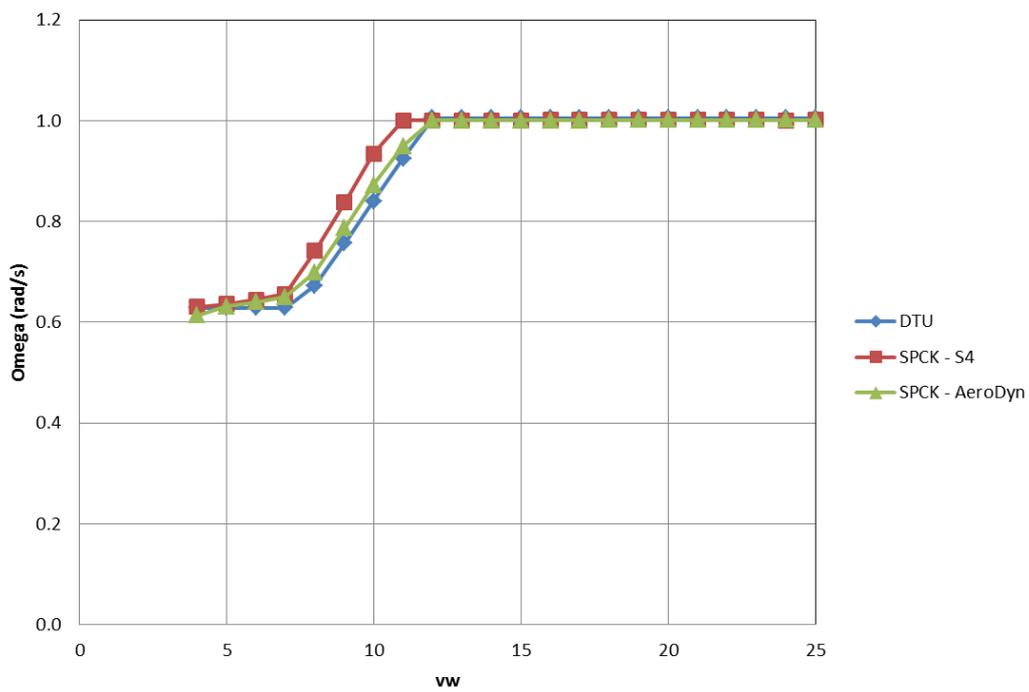


Abbildung 22: Vergleich der Drehzahl der DTU 10MW RWT Anlage

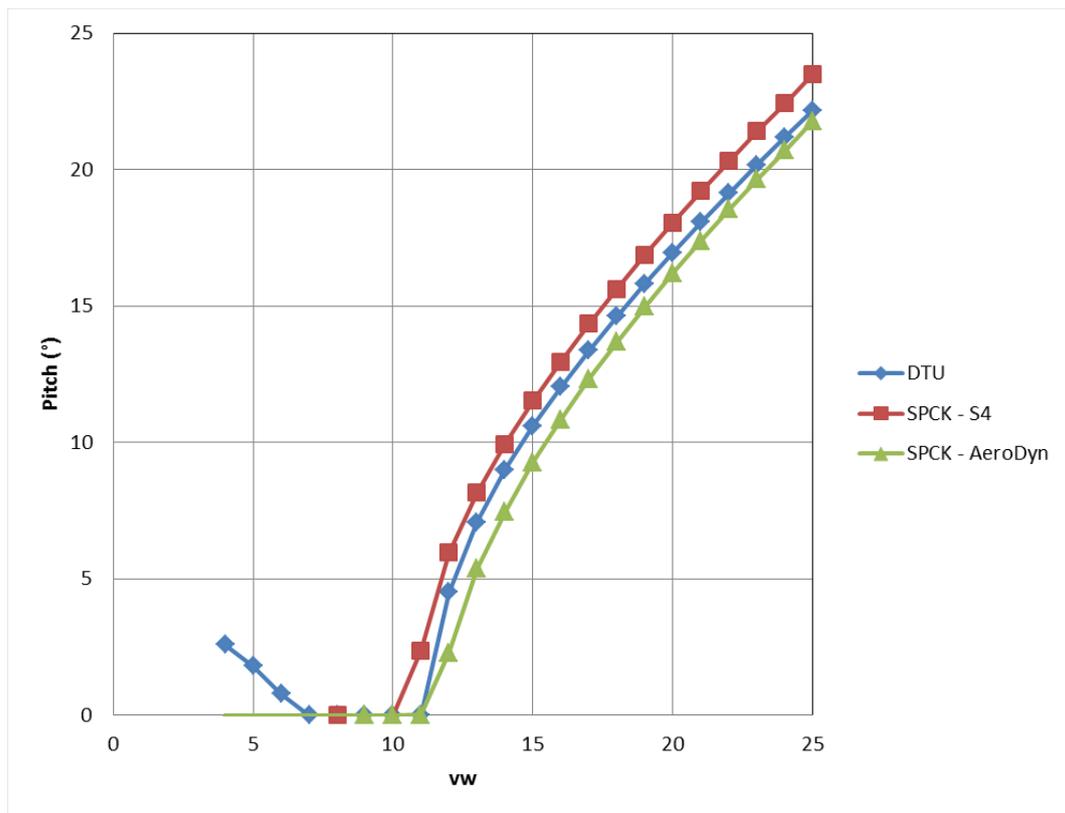


Abbildung 23: Vergleich der Einstellwinkel der DTU 10MW RWT Anlage

In Abbildung 22 wird ersichtlich, dass die Simpack-S4 Kopplung im Windgeschwindigkeitsbereich von 6 m/s bis 12 m/s eine etwas höhere Drehzahl erreicht als bei der DTU Veröffentlichung. Die Drehzahlerhöhung ist ein Resultat aus den Unterschieden in den aerodynamischen Koeffizienten zwischen S4 und AeroDyn.

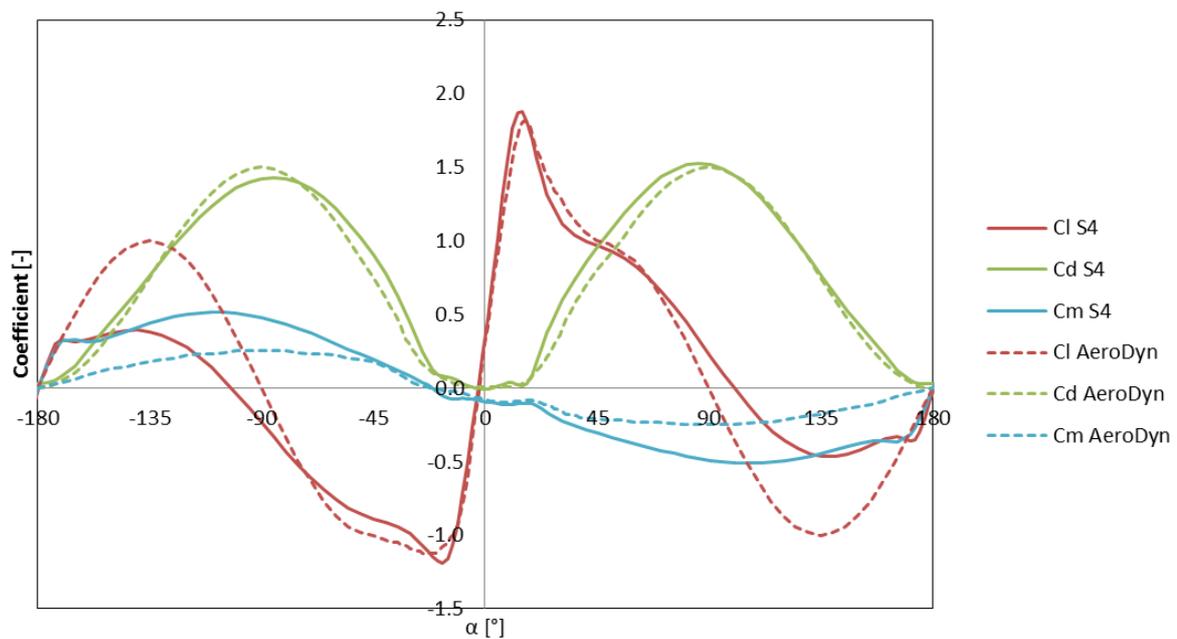


Abbildung 24: c_L , c_D und c_M Vergleich von FFA-W3-241 und „airfoil_8588“

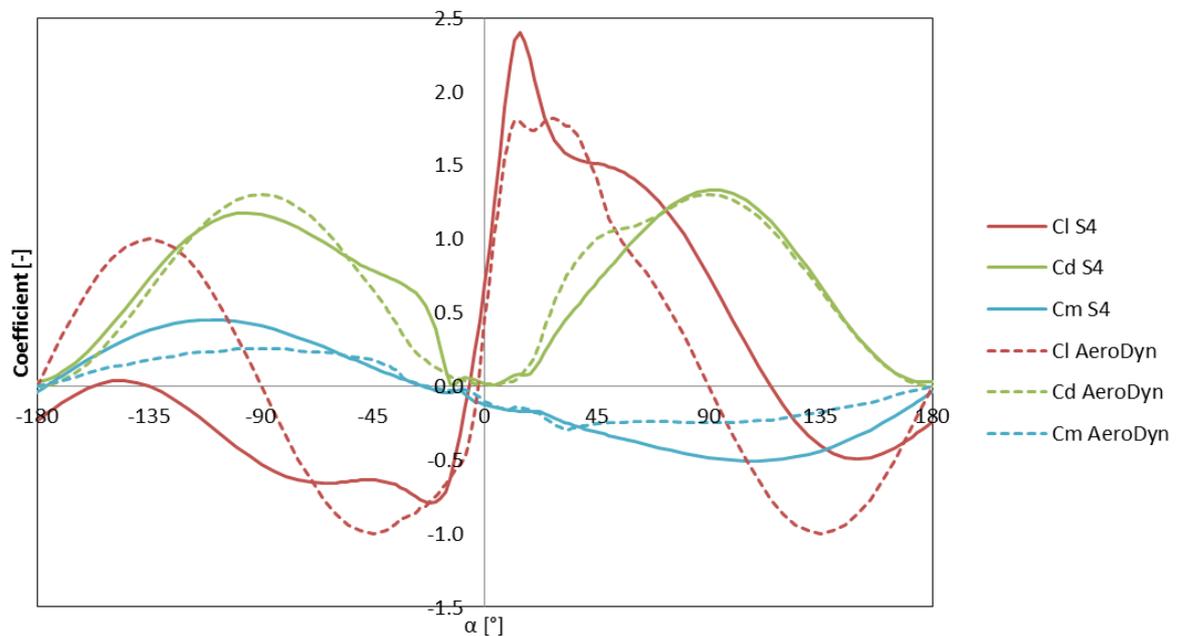


Abbildung 25: c_L , c_D und c_M Vergleich zwischen FFA-W3-360 und „airfoil_2740“

Ein weiterer Grund für Unterschiede in der S4-Simpack und S4-AeroDyn Kopplung liegt in der Anpassung der aerodynamischen Koeffizienten zur Laufzeit. Während für AeroDyn die aerodynamischen Koeffizienten bereits in der Eingabedatei 3D-Korrekturen beinhalten, werden in S4 Einstellwinkeländerungen und Schiebewinkeinfluss während der eigentlichen Simulation be-

rechnet. Dies hat für AeroDyn den Nachteil, dass die 3D-Korrekturen immer nur für einen bestimmten Betriebspunkt der Anlage berücksichtigt werden können. Somit entstehen während des Hochfahrens der Anlage Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten treten bei S4 Simulationen nicht auf, da die Koeffizienten hier während der Simulation angepasst werden.

Windstufensimulation

Bei der Windstufensimulation wird der Wind stufenweise in 30 Sekunden-Inkrementen von 4 auf 25 m/s erhöht. Dementsprechend befindet sich die Anlage bei niedrigen Windgeschwindigkeiten noch im Hochfahrprozess. Die Ergebnisse der S4-Simpack Kopplung in der Windstufensimulation wurden mit Simpack-AeroDyn Simulationen, welche von Institut für Aeroelastik durchgeführt wurden, verglichen. Da diese sich jedoch nicht nur durch die Aerodynamik voneinander unterscheiden, sondern auch ebenfalls durch die Nutzung eines unterschiedlichen Reglers, wurden die S4-Simpack Simulationen ebenfalls mit im Hause durchgeführten Simpack-AeroDyn Simulationen verglichen welche den gleichen Regler benutzen. Dies ist in Tabelle 4 übersichtlich zusammengefasst.

	Aerodynamik	Strukturdynamik	Regler	Dargestellt in
SPCK-S4	S4	Simpack	Siehe [24]	Abbildung 26 bis Abbildung 30
Von AE: SPCK-AeroDyn	AeroDyn	Simpack	Siehe AP 2.3.3	Abbildung 26
Von FT: SPCK-AeroDyn	AeroDyn	Simpack	Siehe [24]	Abbildung 27 bis Abbildung 30

Tabelle 4: Modellierungsübersicht Windstufensimulation

In Abbildung 26 wird ersichtlich, dass die Simulationen vergleichbare Ergebnisse erzielen. Jedoch hat die S4-SPCK Anlage bereits nach 215 Sekunden ihre Nennleistung erreicht, wohingegen die vom Institut für Aeroelastik berechnete Anlage circa 245 Sekunden dafür benötigt. Dementsprechend beginnt der Regler in der S4-SPCK Kopplung die Blätter der Anlage früher aus dem Wind zu drehen. Dieses Verhalten bleibt auch bei höheren Windgeschwindigkeiten bestehen. Die vom Generator erbrachte Leistung ist in diesem Bereich vergleichbar. Unterschiede sind hier durch die Nutzung verschiedener Regler zu erklären.

Um den Einfluss der Aerodynamik isolieren zu können, wurden in Abbildung 27 bis Abbildung 30 Ergebnisse von Windkraftanlagen mit identischem Regler dargestellt. Die Anlagen variieren hier ausschließlich durch die Modellierung der Aerodynamik mithilfe von S4 bzw. von AeroDyn. Die mit AeroDyn durchgeführten Simulationen zeigen ein sehr ähnliches Verhalten des Einstellwinkels und der Generatorleistung. Jedoch erlaubt der in [24] beschriebene Regler ein etwas schnelleres Hochfahren der Anlage. Auch hier erreicht die mit der S4 Aerodynamik berechnete Anlage am schnellsten ihre Nenndrehzahl. Dies ist konsistent mit den im vorherigen Abschnitt gemachten Beobachtungen. Aus Abbildung 20 und Abbildung 21 wurde ersichtlich, dass die S4-Simpack

Simulationen bei konstanter Windgeschwindigkeit bis 11 m/s eine deutlich höhere Leistung sowie einen deutlich höheren Schub als die AeroDyn-Simpack Simulationen liefern.

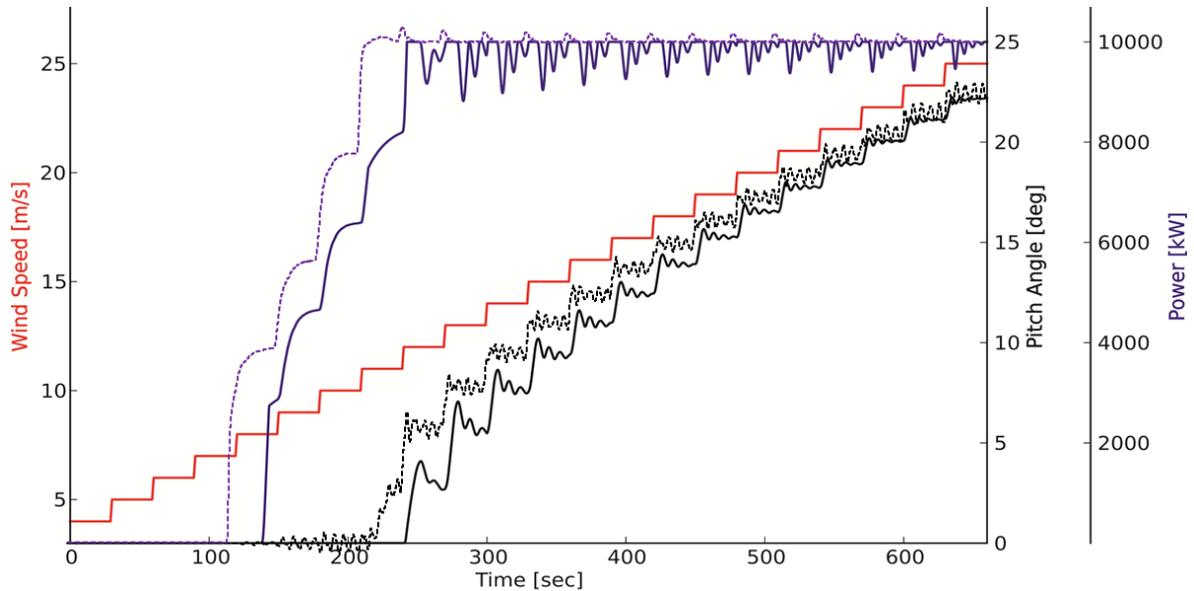


Abbildung 26: Windstufensimulation der DTU 10MW Anlage (durchgängig=SPCK-AeroDyn (vom Institut für Aeroelastik), gestrichelt=SPCK-S4)

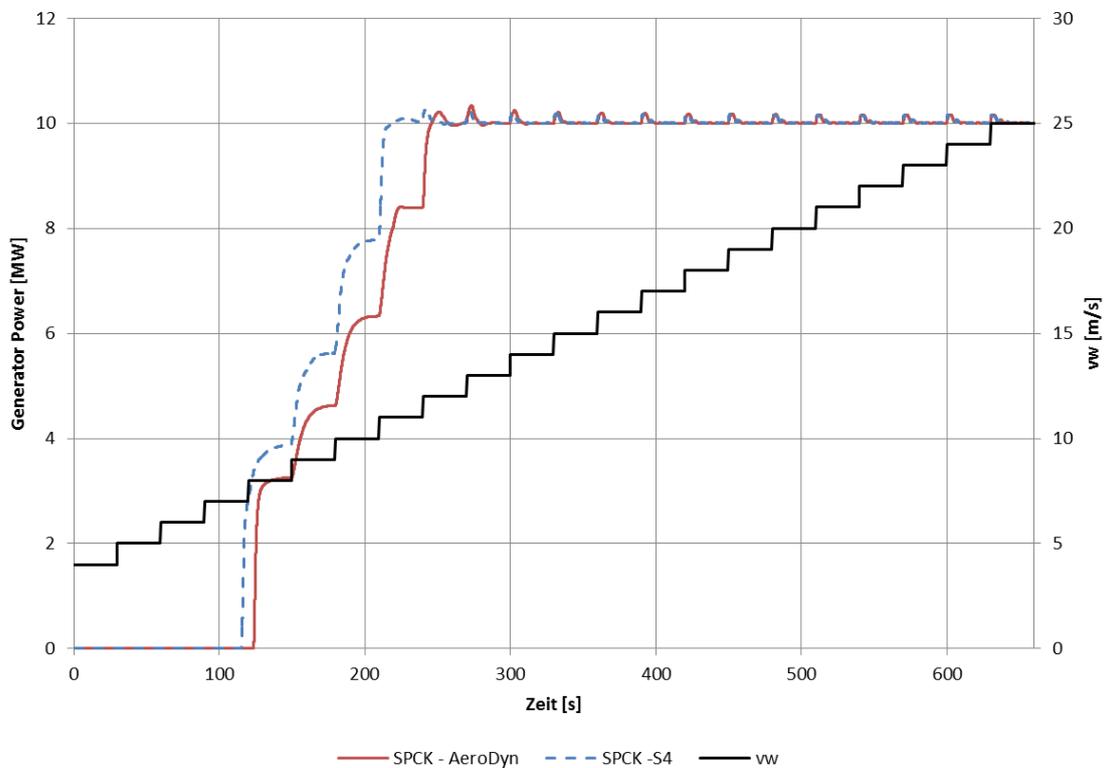


Abbildung 27: Vergleich der Generatorleistung von SPCK-S4 und SPCK-AeroDyn (Windstufensimulation)

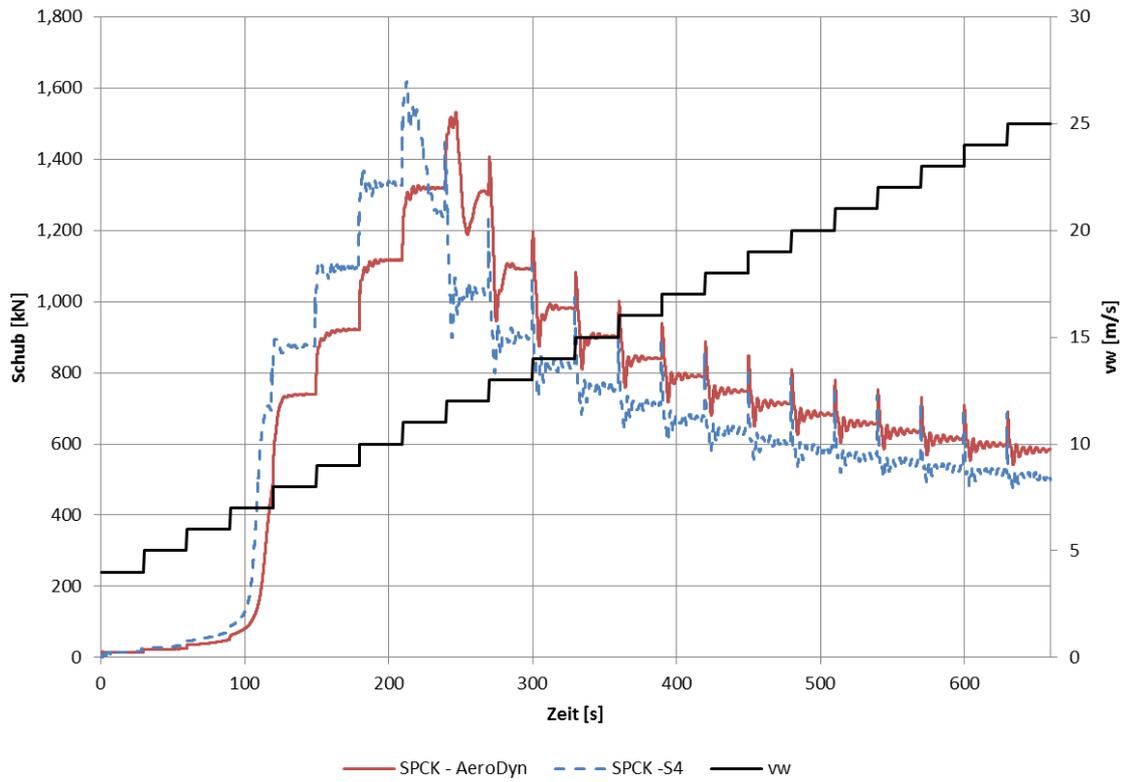


Abbildung 28: Schubvergleich von SPCK-S4 und SPCK-AeroDyn (Windstufensimulation)

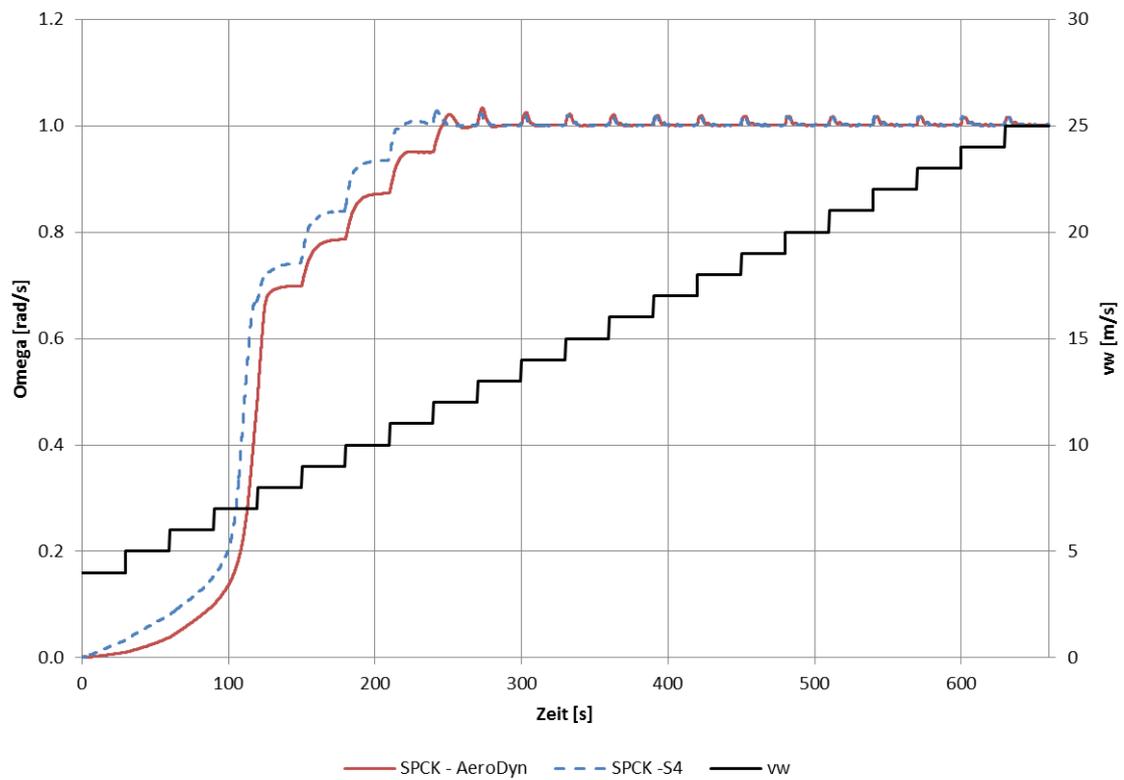


Abbildung 29: Rotordrehzahlvergleich von SPCK-S4 und SPCK-AeroDyn (Windstufensimulation)

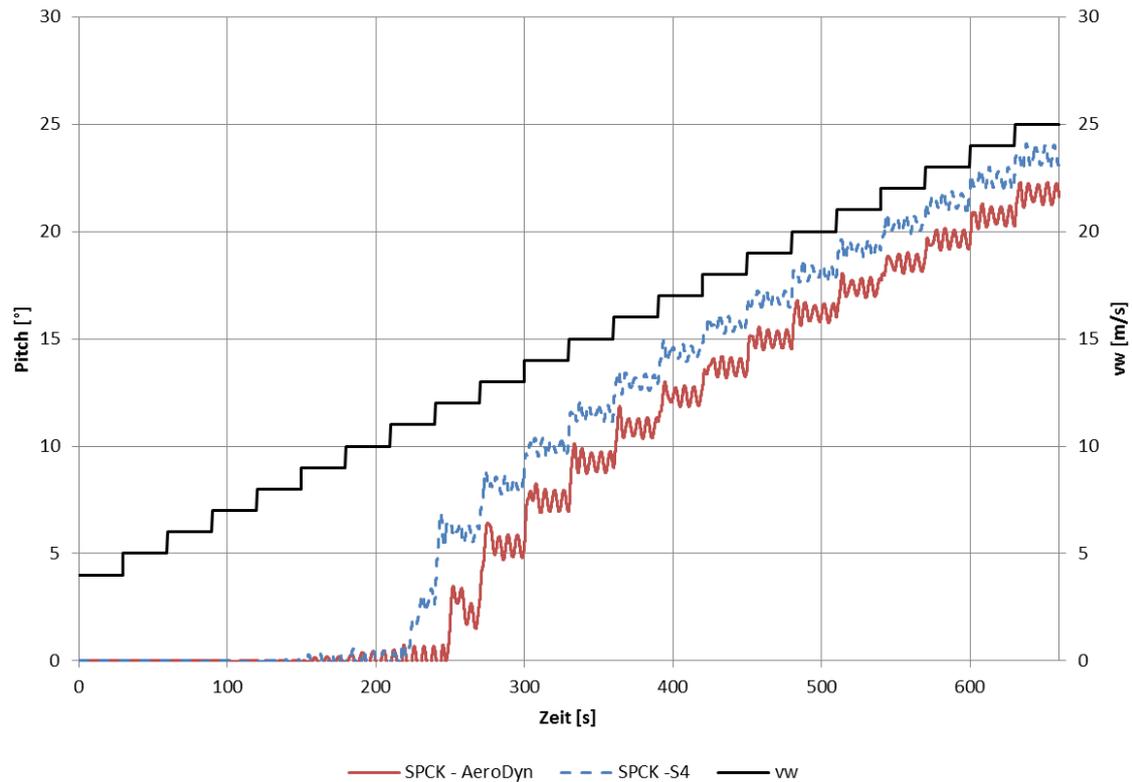


Abbildung 30: Vergleich der Einstellwinkel von SPCK-S4 und SPCK-AeroDyn (Windstufensimulation)

Es kann also abschließend festgehalten werden, dass die Unterschiede in der errechneten Generatorleistung primär durch den eingebundenen Regler erzielt werden. Ist dieser identisch zeigen sich sekundäre Effekte durch die Benutzung verschiedener aerodynamischer Modellierungen. Bei den Simulationen mit konstanten Windgeschwindigkeiten sowie bei den Windstufensimulationen resultiert die S4-Aerodynamik in der höchsten Generatorleistung wenn die Anlage unter ihrer Nennleistung arbeitet. Muss der Regler die Generatorleistung der Anlage durch Einstellwinkelsteuerung drosseln, sind Unterschiede in der Generatorleistung ausschließlich auf die Einbindung des spezifischen Reglers zurückzuführen.

1.3.4. Strukturdaten der DTU-Rotorblätter

Die Strukturdaten beinhalten alle Informationen, welche die Struktureigenschaften des Rotors definieren. Diese Daten liegen in verschiedenen Detailgraden vor. So werden für den Lastenprozess Steifigkeits- und Massenverteilungen benötigt. Für die Strukturdimensionierung wurden detailliertere Modelle verwendet, bei denen die Materialverteilung und Rotorblattkomponenten diskret betrachtet werden. Die Ergebnisse der Dimensionierung wurden dann an den Lastenprozess in Form von reduzierten Strukturinformationen (Massen- und Steifigkeitsdaten) durch eine modale Reduktion bereitgestellt.

Der Dimensionierungsprozess wurde folgendermaßen umgesetzt. Auf Basis der geometrischen Blattstrukturdaten wurde ein Rotorblattmodell aufgebaut. Hierzu wurde das DLR Tool DELiS (Design environment for light weight structures) verwendet. Dieses Modell ist ein finites Schalenelementmodell und daher deutlich komplexer als die in der Windindustrie üblicherweise im Vorentwurf verwendeten finiten Balkenelementmodelle. Finite Schalenelemente sind in der Lage die Spannungsverteilung in der Struktur höher aufgelöst darzustellen. Das Finite-Elemente-Modell wird mit den Lasten aus dem Lastenprozess beaufschlagt, um die Spannungen und Dehnungen im Rotorblatt zu bestimmen. Die Lösung des Finite-Elemente-Modells findet in der kommerziellen Software Ansys statt. Diese Spannungs- und Dehnungswerte werden gegen Kriterien abgeglichen, um die Tragfähigkeit der Struktur zu erreichen. Hierzu wird die Materialverteilung (Material, Lagenaufbau, Materialdicke) angepasst, um die Kriterien (Festigkeit, Stabilität, etc.) zu erfüllen. Dieser Schritt wird mit der Software Hypersizer durchgeführt. Das Ergebnis dieses automatisierten Prozesses wird modal reduziert und als vereinfachtes Modell mit Hilfe der DLR Software RCE an den Lastenprozess übergeben. Die Übergabe ist notwendig, da aufgrund der nach der Dimensionierung veränderten Steifigkeits- und Massenverteilungen sich die Lasten ändern. Dieser Zyklus wird wiederholt, bis das Ergebnis konvergiert ist.

Innerhalb des Projektes WindMUSE wurde zum Aufbau, zur Bewertung und Verifizierung das Rotorblattmodell der DTU verwendet. Die Analysen haben gezeigt, dass die Größenordnung der Ergebnisse der DTU dargestellt werden konnten. Allerdings ist die Dokumentation der DTU lückenhaft, sodass nicht alle Annahmen innerhalb des DTU Referenzprozesses nachvollziehbar waren.

Im Projekt WindMUSE wurde die Dimensionierung eines Windrotors mit deutlich komplexeren Modellen automatisiert durchgeführt. Das ermöglicht zukünftig die Berücksichtigung von kritischen fehleranfälligen Bereichen im Vorentwurf (Sandwichübergänge, Verklebungen, etc.) und daher eine designgerechte Dimensionierung. Der Prozess ist vollautomatisiert und ermöglicht es im Anschluss diskrete Laminataufbauten abzuleiten.

Die Finite-Elemente-Modelle werden mit DELiS (siehe Abschnitt 1.4.7) erstellt. Als Basis dienen die Informationen aus der Beschreibung der Referenzturbine [9]. Abbildung 31 zeigt den strukturellen Aufbau des Referenzblattes.

Die geometrische Korrektheit der Modelle wurde im direkten Geometrievergleich und mittels einer Eigenfrequenzanalyse nachgewiesen. Hierzu wurde eine konstante Hautdickenverteilung mit konstantem Material angenommen. Unterschiede in der Geometrie des Rotorblattmodells

zum Referenzrotor beeinflussen das dynamische Verhalten und sind daher ein Indikator für Fehler in der Massen- und Steifigkeitsverteilung aufgrund einer fehlerhaften Geometrie.

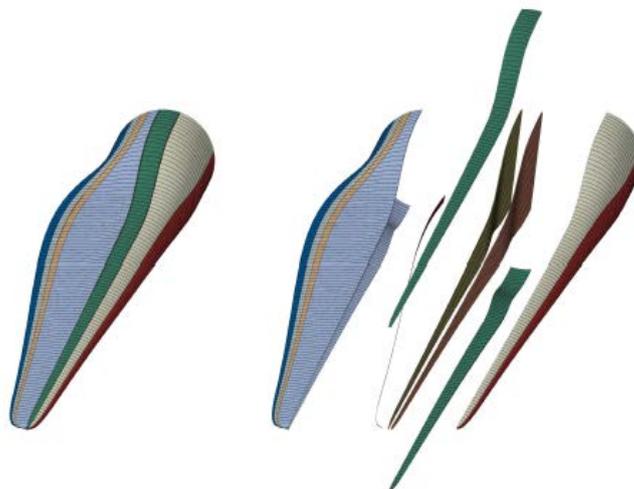


Abbildung 31: DTU 10MW Struktur

Der verwendete Dimensionierungsprozess ist in Abbildung 32 dargestellt. Der dazugehörige Lastenprozess und die Kopplung mit diesem sind in Abschnitt 1.5.2 näher erläutert.

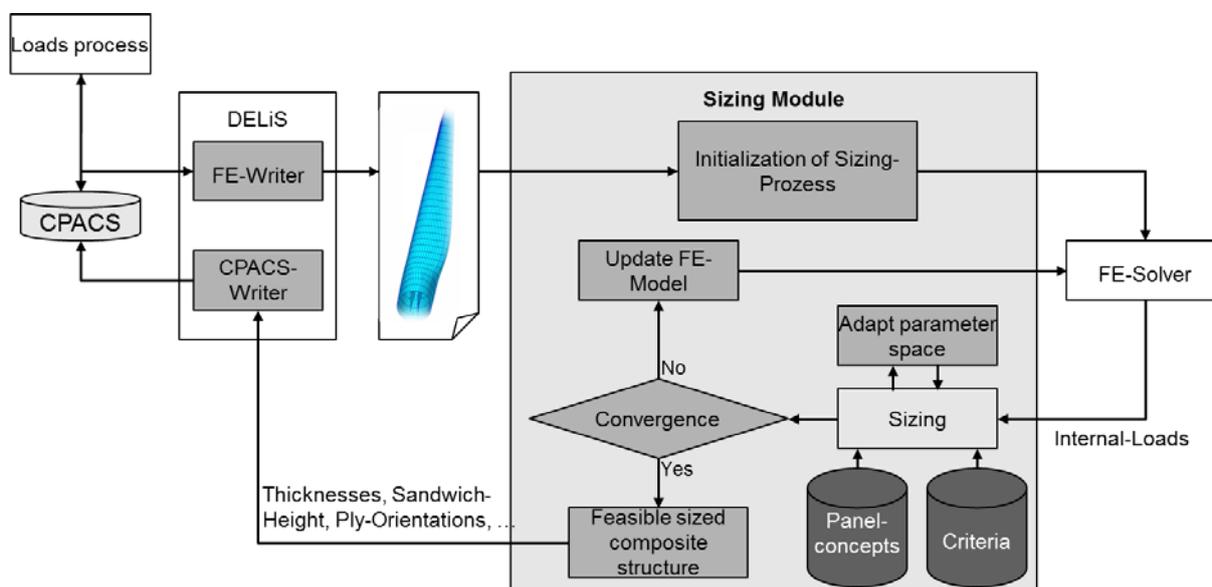


Abbildung 32: Dimensionierungsprozess mit VErSO

Im Rahmen des Projektes wurde der Dimensionierungsprozess erweitert um präzisere und robustere Ergebnisse zu erzielen. Im detaillierten Auslegungsprozess werden neben den UD-Gelegen verschiedene Multiaxialgelege (Biaxial- und Triaxialgelege) besser berücksichtigt. Dieses Vorgehen erlaubt eine genauere Abbildung der Steifigkeiten.

Die Fertigbarkeit stellt eine große Herausforderung an den Dimensionierungsprozess. Aus diesem Grund wurden Methoden implementiert, um eine kontinuierliche Dickenverteilung der einzelnen Geleгеformen zu unterstützen. Mittels Randbedingungen wird der Dickenverlauf über dem Radius angeglichen. Das Ergebnis ist ein kontinuierlicherer Dickenverlauf, welcher hinsichtlich Fertigbarkeit eines Rotorblattes zu besseren Ergebnissen führt. Darüber hinaus findet auch eine dynamische Parameteranpassung statt. Basierend auf den Reservefaktoren wird der Parameterraum für die nächste Iteration angepasst.

Das Ergebnis der Dimensionierung mit dem gekoppelten Prozess ergibt eine plausible Strukturpräsentation, welche mit den Ergebnissen der DTU vergleichbar ist. Darüber hinaus wurden auch alternative Bauweisen untersucht. Dabei wurde die gleiche Außengeometrie mit geänderter Holmbauweise betrachtet, siehe Abschnitt 1.5.2.

1.3.5. Generische Simulationsmodelle für Windturbinen

1.3.5.1. SIMPACK

Seitens des DLR wurden die zwei in Abschnitt 1.2.1 genannten Referenzturbinen modelliert. Als Software-Umgebung für diese Modellierungsarbeit war bereits im Vorfeld das Mehrkörper-Simulationstool Simpack ausgewählt worden. Strukturseitig, zum Zwecke der Beschreibung der flexiblen Rotorblätter sowie des Turms, wurde Simpack ergänzt durch das Finite-Elemente-Werkzeug Ansys, während die aerodynamischen Kräfte vom Werkzeug AeroDyn V13 abgebildet wurden, das auf der Blatt-Elementen-Impuls-Theorie aufbaut. Die Einbindung der Anlagenregelung erfolgte durch die Kommunikation mit einer Turbinen-spezifischen Programmbibliothek, für dessen Referenzierung innerhalb von Simpack geeignete Möglichkeiten vorliegen.

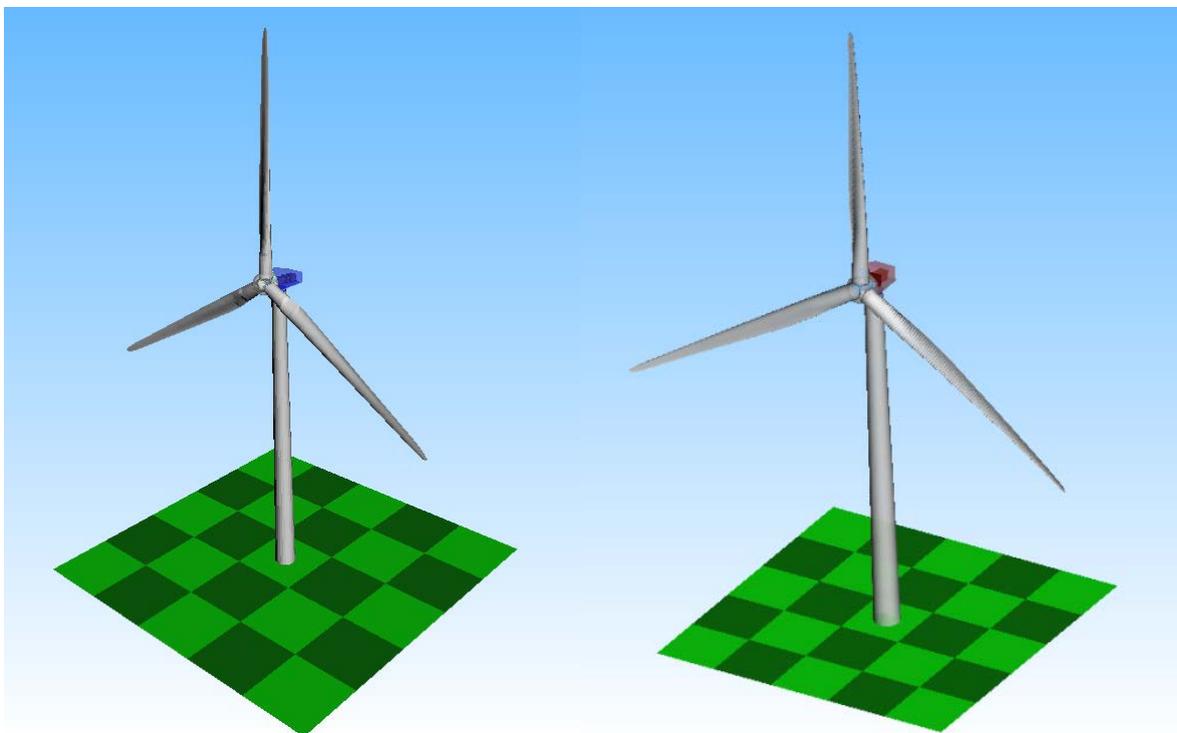


Abbildung 33: Visualisierung der NREL-Turbine (links) und DTU-Turbine (rechte) in SIMPACK

In dieser Mehrkörpermodellierung wird jede Komponente, ob starr oder flexibel, durch die Definition von Körpereigenschaften sowie der Beschreibung eines Gelenks (Joints) beschrieben. Die Körpereigenschaften starrer Komponenten beschränken sich auf die Angabe von Trägheitseigenschaften (Masse, Massenschwerpunkt, Trägheitstensor), während flexible Komponenten durch Verteilungen von Trägheits- und Steifigkeitseigenschaften beschrieben werden. Zwei Substrukturen des Anlagenmodells werden flexibel modelliert, dies sind der Turm und das Rotorblatt. Diese beiden Strukturen unterscheiden sich bezüglich ihres Modellierungsanspruches dahingehend

voneinander, dass bei dem Rotorblatt bereits in der Strukturmodellierung die Möglichkeit einer aerodynamischen Schnittstelle vorgesehen werden muss, während eine solche beim Turm nicht vorgesehen ist. Eine weitere Erleichterung der strukturellen Turmmodellierung findet sich in der Tatsache, dass sich der Turm als Balken mit gerader Referenzachse beschreiben lässt. Das Rotorblatt hingegen weist eine gekrümmte Referenzachse auf.

Legt man in diesem Fall zwischen die Knoten des FE-Modells jeweils ein Balkenelement, so werden im Allgemeinen die verschiedenen Elemente verschiedene Orientierungen im Raum haben. Die Angaben der DTU, welche als Basis für die Modellierung dienen sollen, sehen jedoch vor, dass jedes Balkenelement des FE-Modells parallel zur Pitch-Achse liegt. Für die FE-Modellierung bedeutet dies, dass zwei Balkenelemente sich im Allgemeinen nicht unmittelbar berühren, sondern durch eine starre Zwangsbedingung (rigid body element) in Kontakt stehen. Die resultierende Struktur wird somit treppenartig aufgebaut (vgl. Abbildung 34).

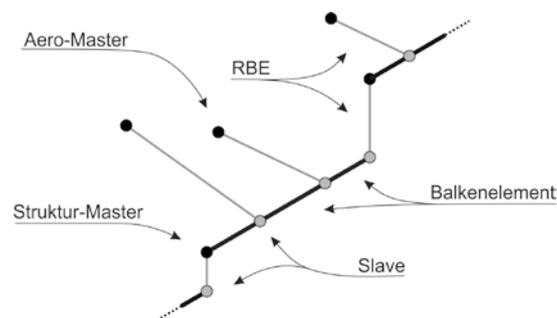


Abbildung 34 Balkenmodellierung zur Nachbildung des Rotorblattes

Neben dieser speziellen Balkenmodellierung muss die aerodynamische Kopplung berücksichtigt werden, welche in der Simulation auf Einzelkräfte reduziert werden, deren Aufprägung auf das Rotorblatt einen entsprechenden Angriffspunkt erfordern. Ein solcher muss als FE-Knoten modelliert, und daher bereits im Strukturmodell vorgesehen werden. Insgesamt sind 50 Angriffspunkte in einer Kosinus-Verteilung über das Rotorblatt aufgeteilt, an denen Aerodyn die aerodynamischen Kräfte berechnet.

Auf diesem Wege wurden beide Referenzturbinen zunächst händisch aufgebaut (also ohne die Unterstützung von Skripten) und validiert. Die hierbei erzielte Übereinstimmung mit vorhandenen Simulationsergebnissen von dritter Seite (NREL bzw. DTU) waren meist gut bis sehr gut.

Der prinzipiell gleiche Aufbau (mit sehr wenigen qualitativen Unterschieden) beider Referenzturbinen führte zu der Idee, den Aufbau derartiger Turbinen zu automatisieren. Diese Automatisierung wurde mit der Entwicklung des Turbinengenerators TurbGen umgesetzt, vergleiche Abschnitt 1.4.4. Nach Abschluss der Hauptarbeiten an TurbGen wurden beide Referenzturbinen erneut, diesmal mithilfe von TurbGen, erzeugt. Die hierbei erzielten Ergebnisse waren identisch mit jenen der händisch erzeugten Turbinen.

1.3.5.2. OneWind Modelica Library

NREL 5MW RWT Modell

Es werden das Simulationsmodell der NREL 5-MW RWT [1] und die Simulationseinstellungen in Dymola dargestellt. Im Anschluss erfolgt der Vergleich der Simulationsergebnisse in Dymola mit den Ergebnissen in [1].

Das Simulationsmodell besteht auf folgenden Komponentenmodellen:

- Rotor,
- Turm,
- Gondel,
- Wind und
- Betriebsführung.

Der Rotor besteht aus der starren Nabe sowie 3 linear-elastischen, modal reduzierten Rotorblättern. Jedes Rotorblatt ist mit 17 aerodynamischen Elementen verbunden, die in radialer Richtung von innen nach außen entlang des Blattes angeordnet sind. Die aerodynamischen Elemente berechnen die normale und tangentielle Kraftkomponente sowie das aerodynamische Nickmoment in der Rotorebene. Die aerodynamischen Lasten werden an diskreten Punkten, den sog. Connectoren, an die Struktur übergeben, vgl. Abbildung 35. Die modal reduzierten Strukturkomponenten basieren auf [16] und verwenden die Eigenformen, um die elastische Verformung der Struktur zu ermöglichen. Dabei wirken die Eigenformen wie ein Filter, der den Zusammenhang zwischen wirkenden internen und externen Lasten und modalen Freiheitsgraden herstellt.

In der Aerodynamik wird die stationäre BEM gelöst und anschließend werden instationäre Effekte wie dynamic stall und dynamic wake berücksichtigt. Die BEM verwendet folgende Korrekturen:

- Naben und Blattspitzenverluste,
- Schräganströmungskorrektur,
- Bladed [14] turbulent wake state Korrektur und
- Relaxation der Induktionsfaktoren.

Der Turm ist ähnlich aufgebaut wie das Rotorblatt und verwendet das gleiche Strukturmodell. Der Turm ist am Boden fest eingespannt.

Die Gondel enthält den Maschinenträger und den Triebstrang als elastischen 1-Freiheitsgrad Torsionsschwinger.

Der Wind verwendet eine Treppenfunktion, die die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe schrittweise erhöht. Windscherung und Turmschatten können berücksichtigt werden.

Die Betriebsführung basiert auf dem Regler in [1]. Eine externe DLL wird nicht verwendet.

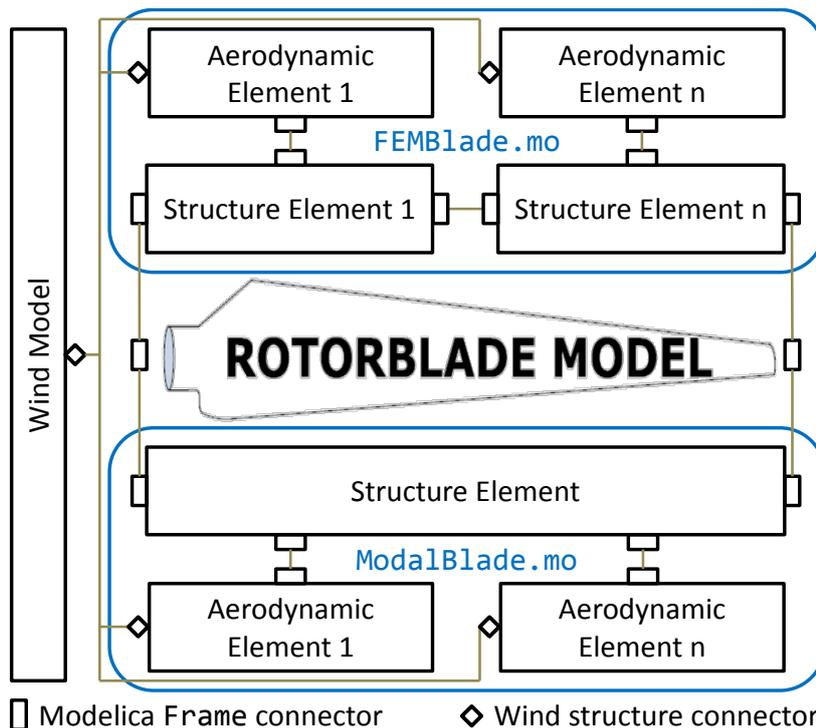


Abbildung 35: Vergleich des Aufbaus des FEM und modalen Rotorblatts und Interaktion zwischen dem Strukturmodell und der Aerodynamik.

Die Simulationseinstellungen wurden basierend auf Erfahrungswerten vorgenommen und unterscheiden sich nicht von den „default“ Einstellungen, die in der Lastsimulation mit Modelica verwendet werden.

Einstellungen des Modells:

- Moden Rotorblatt: 6
- Moden Turm: 10
- Dynamic Stall: ein
- Dynamic Wake: ein
- Turbulent Wake State Correction: Bladed Modell [14]
- Triebstrangflexibilität: ein
- Turmschatten: aus
- Windscherung: ein

Einstellung des Integrators:

- Algorithmus: Runge-Kutta 4. Ordnung
- Integrationsschrittweite: 10 ms
- Ausgabeschrittweite: 50 ms
- Simulationszeit: 1030 s

Die Ergebnisse der Simulation im Zeitbereich werden mit den Daten der NREL 5-MW RWT verglichen. In Abbildung 36 werden die elektrische Generatorleistung (GenPwr), die aerodynamische

Rotorleistung (RotPower), die Generatorleistung (GenPower), der Rotorschub (RotThrust) sowie das Rotormoment (RotTorq) dargestellt.

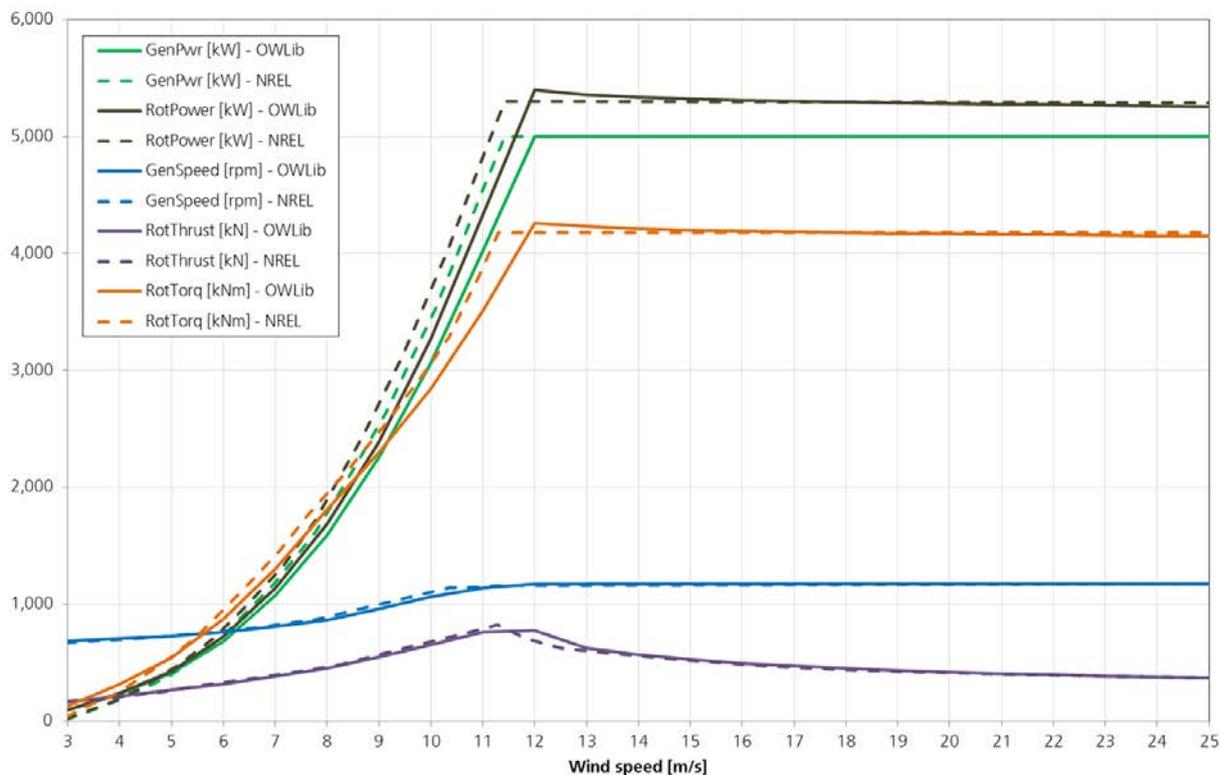


Abbildung 36: Elektrische Generatorleistung (GenPower), die aerodynamische Rotorleistung (RotPower), die Generatorleistung (GenPower), der Rotorschub (RotThrust) sowie das Rotormoment (RotTorq).

Grundsätzlich zeigt der Rotor der OWLib eine geringere Dynamik. Die Beschleunigung und alle damit verbundenen Größe steigen langsamer an als die jeweiligen Referenzwerte. Die Ursache kann sowohl in der instationären Aerodynamik als auch im Strukturmodell liegen. Es ist bekannt, dass im direkten Vergleich zwischen FAST und Bladed die OWLib immer eher zu den Ergebnissen aus Bladed tendiert, mit teils erheblichen Abweichungen zu FAST. Die erhöhte Rotorleistung beim Übergang vom Teil- in den Volllastbereich ist durch den geringeren Blatteinstellwinkel zu erklären. In Abbildung 37 sind das elektrische Generatormoment (GenTorq), die Schnelllaufzahl (TSR), der Blatteinstellwinkel (BIPitch) und die Rotordrehzahl (RotSpeed) zusammengestellt. Hier ist wieder die gegenüber den Referenzwerten verzögerte Beschleunigung des Rotors zu erkennen. Alle davon beeinflussten Größen reagieren ebenfalls verzögert. Abgesehen von diesem Verhalten, zeigen die Ergebnisse eine ähnliche Tendenz in ihren stationären Werten.

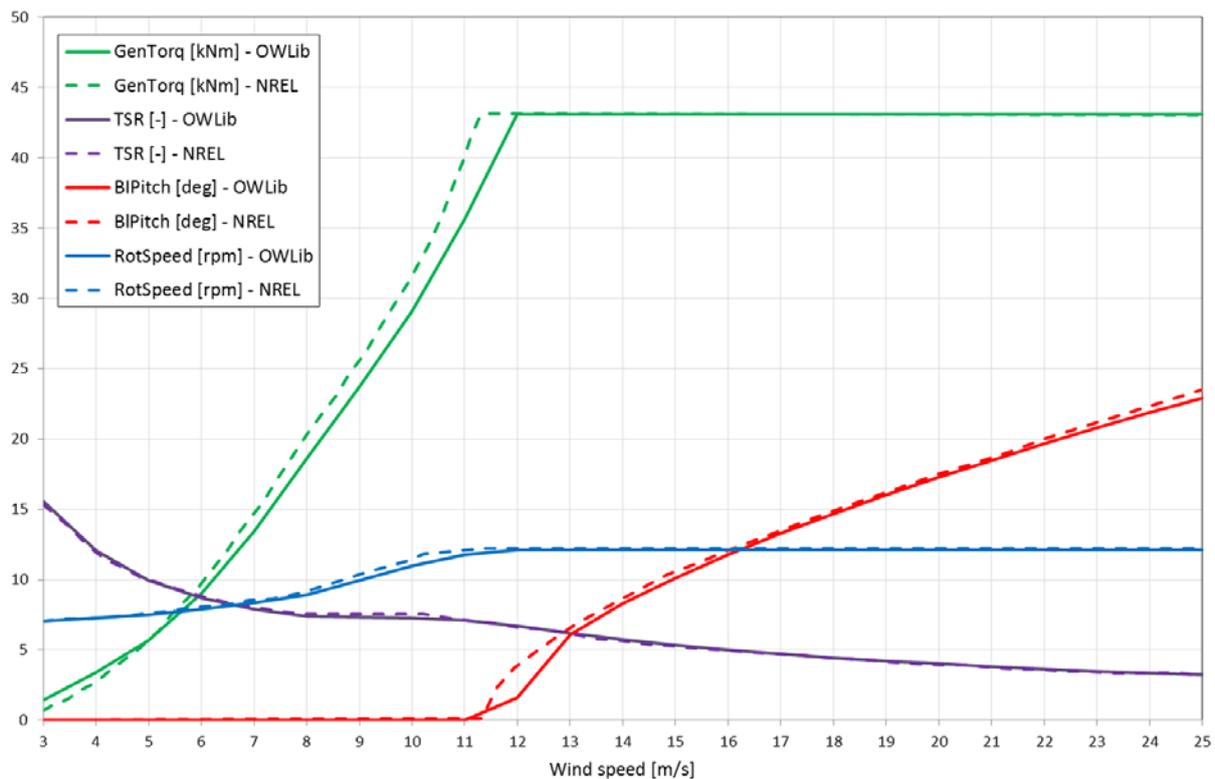


Abbildung 37: Elektrische Generatormoment (GenTorq), die Schnelllaufzahl (TSR), der Blatteinstellwinkel (BIPitch) und die Rotordrehzahl (RotSpeed).

DTU 10MW RWT Modell

Es werden das Simulationsmodell der DTU 10MW RWT [9] und die Simulationseinstellungen in Dymola dargestellt. Im Anschluss erfolgt der Vergleich der Simulationsergebnisse in Dymola mit den Ergebnissen in [9].

Der Aufbau des Simulationsmodells ist gleich dem Aufbau der NREL 5-MW RWT im vorherigen Abschnitt mit der Ausnahme, dass jedes Rotorblatt mit 20 aerodynamischen Elementen ausgestattet ist und dass die Betriebsführung eine externe DLL [8] verwendet, die mit der DTU 10MW RWT veröffentlicht wurde.

Die Simulationseinstellungen wurden basierend auf Erfahrungswerten vorgenommen und unterscheiden sich nicht von den „default“ Einstellungen, die in der Lastensimulation mit Modelica verwendet werden.

Einstellungen des Modells:

- Moden Rotorblatt: 8
- Moden Turm: 10
- Dynamic Stall: ein
- Dynamic Wake: ein
- Turbulent Wake State Correction: Bladed Modell [14]
- Triebstrangflexibilität: ein

- Turmschatten: ein
- Windscherung: ein
- Regler-Modus: Constant Power Mode [8]

Einstellung des Integrators:

- Algorithmus: Runge-Kutta 4. Ordnung
- Integrationsschrittweite: 10 ms
- Ausgabeschrittweite: 50 ms
- Simulationszeit: 650 s

Die Ergebnisse einer Steady-State-Response Simulation in Abbildung 38 dargestellt. Dabei wird die Windgeschwindigkeit schrittweise erhöht und die Reaktion der Windenergieanlage auf jeden dieser Windgeschwindigkeitswechsel beobachtet. Die Simulationsergebnisse der OWLib zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten aus [9]. Sowohl die Leistungsabgabe als auch der Blatteinstellwinkel liegen sehr nah an den Referenzdaten.

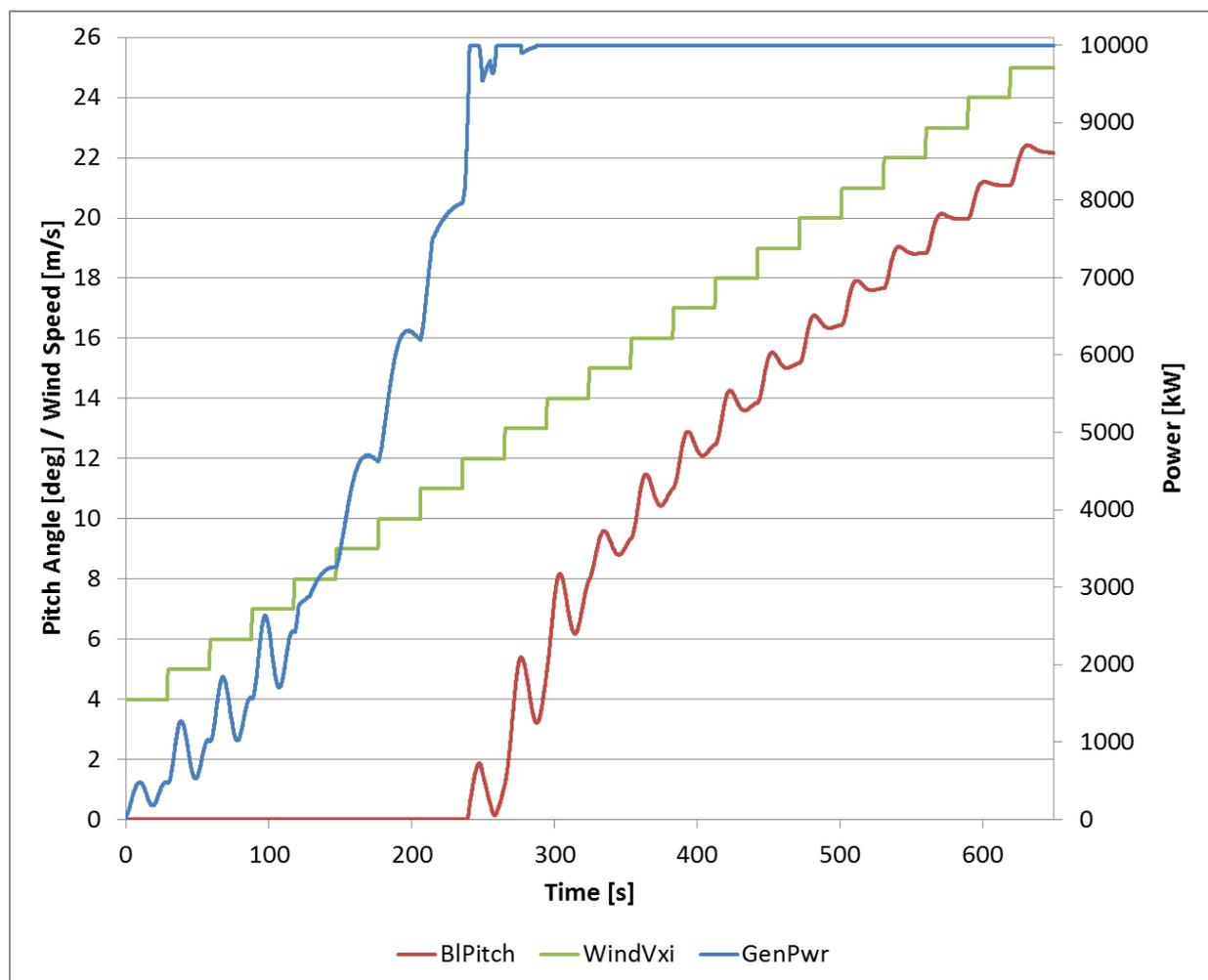


Abbildung 38: Steady-State-Response Simulation.

Der Unterschied im Blatteinstellwinkel bei kleinen Windgeschwindigkeiten zu Beginn der Simulation ist damit zu erklären, dass diese Werte mittels einer Textdatei vom Regler eingelesen und umgesetzt werden und diese Datei bei der Simulation der OWLib nicht verwendet wurde. Abgesehen davon zeigt die OWLib eine gute Übereinstimmung in der Abgabeleistung und im Blatteinstellwinkel, was eine grundsätzliche Eignung für die Lastsimulation annehmen lässt.

IEC Design Load Case 1.2

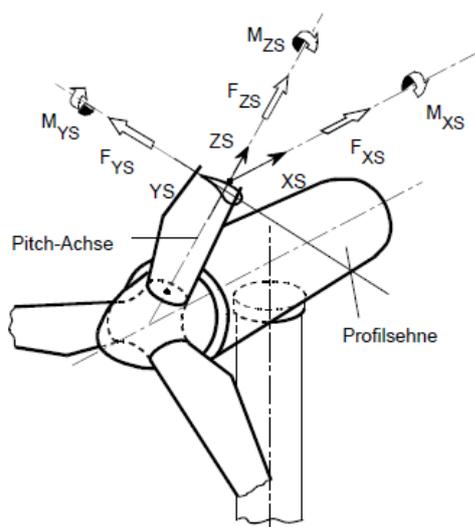
Es werden die Ergebnisse der Lastsimulation nach IEC [11] Lastfall 1.2 (Fatigue) für die DTU 10MW RWT [9] vorgestellt, die mit der OneWind Modelica Library erzeugt wurden. Weiterhin werden diese Ergebnisse mit den Daten aus der Spezifikation der DTU 10MW RWT [9] verglichen.

Koordinatensysteme

Das Koordinatensystem der OneWind Modelica Bibliothek ist mit dem GL [18] Koordinatensystem identisch.

Das Sehnenkoordinatensystem ist in Abbildung 39 dargestellt und wurde gewählt, um die Ergebnisgrößen an der Blattwurzel (M_x , M_y) mit den Daten aus der Spezifikation der DTU 10MW RWT [9] vergleichen zu können (Flapwise, Edgewise). Dabei entspricht M_x dem Edgewise-Biegemoment an der Blattwurzel und M_y dem Flapwise-Biegemoment an der Blattwurzel.

In GL [18] heißt es dazu näher: das Sehnenkoordinatensystem hat seinen Ursprung im Schnittpunkt der jeweiligen Profelsehne und der Achse der Blattwinkelverstellung (Pitch-Achse). Es rotiert mit dem Rotor und der lokalen Blattwinkelverstellung.

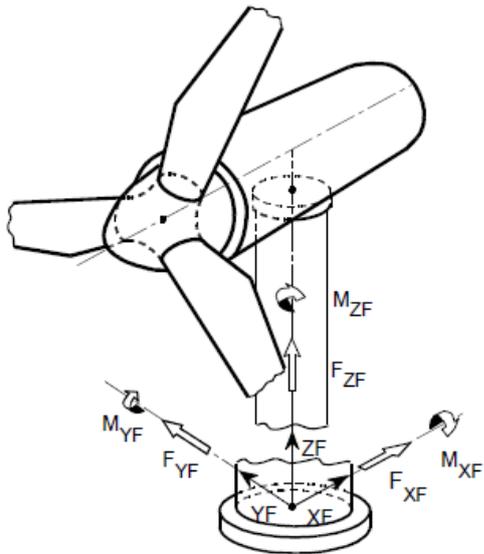


- YS in Richtung der Profelsehne, zeigt zur Profilhinterkante
- ZS in Richtung der Achse der Blattwinkelverstellung (Pitch-Achse) des Rotorblatts
- XS senkrecht zur Profelsehne, so dass XS, YS, ZS rechtsdrehend sind

Abbildung 39: Sehnenkoordinatensystem im Blatt [18].

Das Turmkoordinatensystem ist in Abbildung 40 dargestellt und GL [18] entnommen. Darin hat das Turmkoordinatensystem seinen Ursprung im Schnittpunkt Turmachse-Oberkante Fundament und rotiert nicht mit der Gondel.

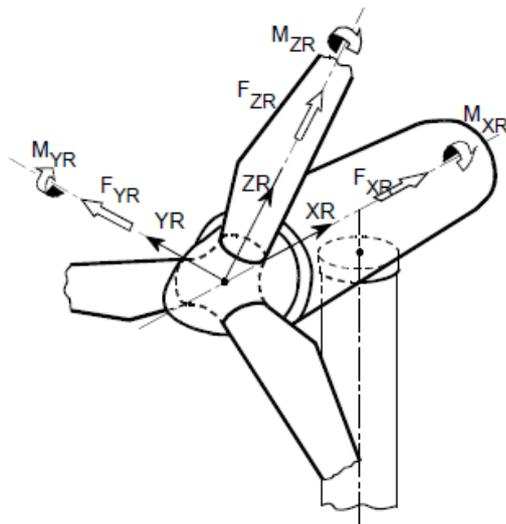
Zum Vergleich mit den Daten in DTU 10MW RWT sind hier M_x und M_y von Interesse. M_x entspricht dem *Side-Side*-Biegemoment und M_y dem *Fore-Aft*-Biegemoment.



XF horizontal
 ZF vertikal aufwärts in Richtung der Turmachse
 YF horizontal seitwärts, so dass XF, YF, ZF
 rechtsdrehend sind

Abbildung 40: Koordinatensystem im Turmfuß [18].

Das Rotorkoordinatensystem ist in Abbildung 41 dargestellt und rotiert mit dem Rotor. Der Ursprung kann an einem beliebigen Punkt entlang der Rotationsachse liegen.



XR in Richtung der Rotorachse
 ZR radial, ausgerichtet auf Rotorblatt 1
 und vertikal zu XR
 YR vertikal zu XR, so dass XR, YR, ZR
 rechtsdrehend sind

Abbildung 41: Rotorkoordinatensystem [18].

Simulationsmodell und Simulationseinstellungen

Der Aufbau des Simulationsmodells ist gleich dem Aufbau der DTU 10MW RWT im vorhergehenden Abschnitt. Die Simulationseinstellungen wurden basierend auf Erfahrungswerten vorgenommen und unterscheiden sich nicht von den „default“ Einstellungen, die in der Lastensimulation mit Modelica verwendet werden.

Einstellungen des Modells:

- Moden Rotorblatt: 8
- Moden Turm: 10
- Dynamic Stall: ein
- Dynamic Wake: ein
- Triebstrangflexibilität: ein
- Turmschatten: ein
- Windscherung: ein
- Upflow-Winkel: 8 deg von unten

Einstellung des Integrators:

- Algorithmus: Runge-Kutta 4. Ordnung
- Integrationsschrittweite: 10 ms
- Ausgabeschrittweite: 50 ms
- Simulationszeit: 700 s (100s Vorsimulation + 600s Simulation mit stochastischem Wind)

Einstellung des Reglers:

Der Regler ist entsprechend des Hawc2 Modells der DTU 10MW RWT Revision 1 eingestellt. Die Triebstrangdämpfung ist aktiviert, der Parameter 38 berechnet sich aus maximalem Generatormoment und der ersten frei-frei Torsionseigenfrequenz des Triebstrangs mit der Gleichung $15.6e6 \text{ Nm} / (2 \cdot \pi \cdot 1.85 \text{ Hz})$.

Umgebungsbedingungen

Allgemeine Daten der Windenergieanlage enthält Tabelle 5. Darauf basierend werden die Parameter für die Erzeugung der generischen Windfelder abgeleitet.

Turbine Parameters	Value	Unit
Rated Power	10000	kW
Rotor Diameter	178,3	m
Hub Height	119	m/s
Reference Windspeed	50	m/s
Reference Turb. Int.	0,16	-
Cut-in wind speed	4	m/s
Rated wind speed	11,4	m/s
Cut-out wind speed	25	m/s
Drive train concept	medium speed	-
Control concept	variable speed, cpc	-
Turbine availability	1	-

Tabelle 5: Allgemeine Daten der Windenergieanlage.

Die Parameter zur Erzeugung der Weibull-Verteilung für die Windgeschwindigkeiten sind entsprechend der IEC [11] bestimmt und in Tabelle 6 enthalten.

General Wind Parameters	Value	Unit
Wind shear exponent alpha (NWP)	0,2	
Wind shear exponent alpha (EWM)	0,11	
Upflow angle	8	deg
rho air	1,225	kg/m ³
Weibull scale parameter C	11,28	m/s
Weibull form parameter k	2	-
V_e50	70	m/s
V_e1	56	m/s
V_50	50	m/s
V_1	40	m/s
V_Ave	10	m/s
Tl for extreme wind models	0,11	

Tabelle 6: Generelle Windparameter.

Die Parameter des generischen Windfeldes nach der Sandia-Methode unter Verwendung des Kaimal-Spektrums sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Turbulent Wind Parameters	
Spectrum	Kaimal
Parameters	$x_{Lu} = 340.2$ m, $x_{Lv} = 113.4$ m, $x_{Lw} = 27.72$ m; Coherency scale parameter = 340.2 m, Coherence decay constant = 12
Turbulence Intensity	values calculated according to IEC (IEC-61400-1-ed3 2005, 6.3.1.3, equation (11))
Lateral and transverse	Lateral and transverse TI are 0.8 and 0.5 of the longitudinal TI

Tabelle 7: Parameter des turbulenten Windes.

Die Erzeugung der Windfelder wird mit NREL TurbSim [19] durchgeführt.

Lastfalltabelle

Die Lastfalltabelle basiert auf der IEC-61400-1-ed3 [11]. Es werden insgesamt 66 Simulationen zur Bestimmung der Betriebsfestigkeit mit dem DLC für Normalbetrieb (DLC 1.1 Betriebsfestigkeit) durchgeführt.

Fatigue: DLC 1.1		
Operating conditions	Power Production	
Wind conditions	Normal Turbulence Model (NTM)	
Filename	V [m/s]	Long. TI [%]
DLC11_05_y_s	5	29,92
DLC11_07_y_s	7	24,80
DLC11_09_y_s	9	21,96
DLC11_11_y_s	11	20,15
DLC11_13_y_s	13	18,89
DLC11_15_y_s	15	17,97
DLC11_17_y_s	17	17,27
DLC11_19_y_s	19	16,72
DLC11_21_y_s	21	16,27
DLC11_23_y_s	23	15,90
DLC11_25_y_s	25	15,58
Wind comments	Kaimal spectrum for turbulent wind with length scales $x_{Lu} = 340.2$ m, $x_{Lv} = 113.4$ m, $x_{Lw} = 27.72$ m; Coherency scale parameter = 340.2 m, Coherence decay constant = 12 Lateral and vertical TI are 0.8 and 0.5 of the longitudinal TI s = a, b, c, d, e, f - 6 wind seed combinations $\alpha = 0.2$ - power law exponent Upflow angle of 8 deg y = -10, 0, +10 deg - wind direction Combinations: num_bins * yaw * seeds = 11 * 6, with 2 yaw errors for each wind velocity (DTU-10MW-Spec: " 33 load cases ... per each turbulence	
Others	Turbine availability of 100 % Fatigue weighting: Weibull with C = 11.28 and k = 2 Equivalent load cycles with 0,01585 Hz (see below)	
Simulations no	66	
Simulation time	100 s + 600 s	

Lasten

Der Betriebsfestigkeitslastfall DLC 1.1 wurde insgesamt über 10-mal simuliert. An dieser Stelle sollen 6 Simulationen vorgestellt werden. Die Unterschiede sind in Tabelle 8 enthalten.

Simulationsszenario	Beschreibung
DTU	Referenzdaten aus [9]
Mo 1	Erste Simulation
Mo 2	Starres Modell

Mo 3	Konstantes Drehmoment
Mo 4	Triebstrangdämpfung
Mo 5	Angepasstes Regelungsinterface (finale Betriebsfestigkeitslasten)

Tabelle 8: DLC-Szenarien.

Das Postprocessing wird mit der Software MLife von NREL [20] durchgeführt. Die Software führt das Rainflow-Counting durch und bestimmt die Betriebsfestigkeitslasten, passend zu einer festgelegten äquivalenten Frequenz und Lebensdauer, sowie die Extremlasten. Die Parameter von MLife sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Parameter	Wert
Betriebszeit [Jahren]	20
Äquivalente Frequenz [Hz]	0.01585
Weibull-Formparameter	2
Weibull-Skalenparameter	11,28
Wöhlersteigung Rotorblatt	10
Wöhlersteigung Turm und Nabe	3

Tabelle 9: MLife Parameter.

Ein Vergleich der Weibull-Verteilung, basierend auf den Daten aus dem Report zur DTU 10 MW RWT und für Modelica auf den Daten aus Tabelle 9, ist in Abbildung 42 zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass die Weibull-Verteilungen voneinander abweichen. Es ist zu erkennen, dass für die DTU eine höhere Wahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeiten oberhalb von 11 m/s vorliegt, was bedeutet, dass die Betriebszeit in diesem Windgeschwindigkeitsbereich für die DTU höher ist als für die Auswertung von Modelica mit MLife.

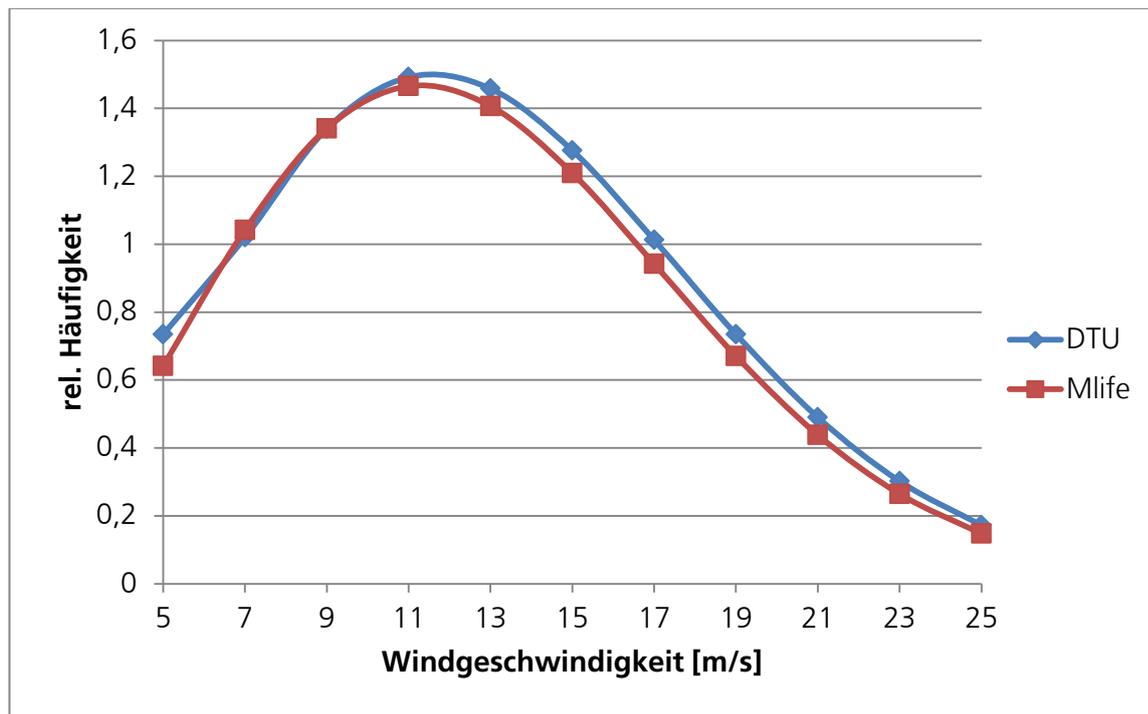


Abbildung 42: Vergleich der Weibull-Verteilungen.

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Simulationsszenarien zusammengestellt.

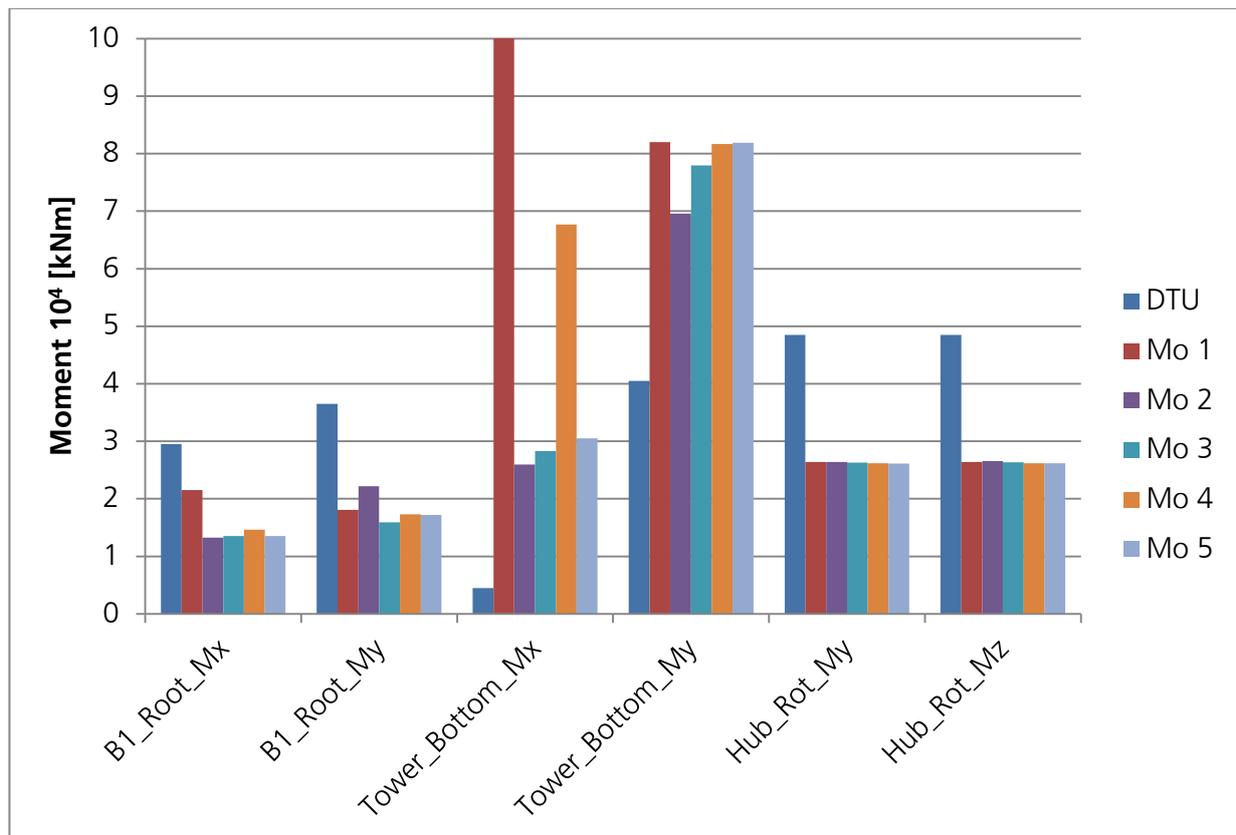


Abbildung 43: Ergebnisse der DLC 1.2 Simulationen.

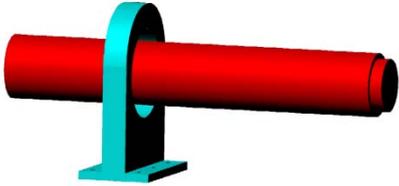
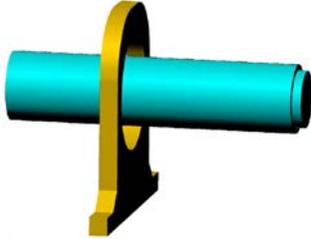
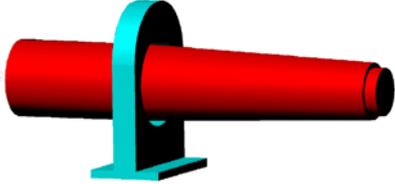
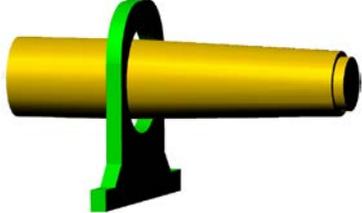
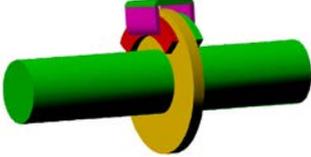
Das erste Simulationsszenario in Modelica Mo 1 zeigt im Vergleich zum Referenzdatensatz DTU ein deutlich größeres Side-Side Biegemoment am Turmfuß. Im Rahmen der darauf folgenden Simulationsszenarien Mo 2 bis Mo 5 konnte das Reglerinterface zwischen Modelica und dem DTU-Controller als Ursache identifiziert werden. Wie Mo 5 zeigt, konnte das Problem erfolgreich behoben werden.

Grundsätzlich zeigen die (finalen) Ergebnisse in Modelica niedrigere Lasten an der Blattwurzel (B1_Root_Mx und B1_Root_My) und an der rotierenden Nabe (Hub_Rot_My und Hub_Rot_Mz). Dagegen sind die Lasten am Turmfuß (Tower_Bottom_Mx und Tower_Bottom_My) in Modelica deutlich größer. Allerdings sind die Lasten aus Modelica insgesamt plausibler als die Lasten von der DTU. Das wird besonders an den Lasten Hub_Rot_My und Tower_Bottom_My deutlich, wobei Tower_Bottom_My bei der DTU gegen jede Erwartung niedriger ist als Hub_Rot_My.

1.3.6. Austauschbare Systemkomponentenmodelle (FMUs)

DLR ADAMS Library

Die austauschbaren Systemkomponentenmodelle für Wellen, Getriebe, Brake, Generator, Pitch-Aktuator und Antriebstrang sind unten abgebildet. Die Komponenten existieren als FMUs in der Bibliothek und sind leicht veränderbar. Die Komponenten wurden in Bezug auf 5MW und 10MW Windkraftanlagenspezifikationen in ADAMS entworfen. Um die Komponenten auszuführen, muss ADAMS auf dem Zielgerät installiert sein.

5MW Spezifikation	10MW Spezifikation
 <p data-bbox="248 1010 715 1039">Niedergeschwindigkeitswelle-Hauptlager</p>	 <p data-bbox="855 1010 1366 1039">Niedergeschwindigkeitswelle mit Hauptlager</p>
 <p data-bbox="242 1301 721 1375">Stumpfs Niedergeschwindigkeitswelle mit Hauptlager</p>	 <p data-bbox="871 1301 1350 1375">Stumpfs Niedergeschwindigkeitswelle mit Hauptlager</p>
 <p data-bbox="323 1518 639 1547">Hochgeschwindigkeitswelle</p>	 <p data-bbox="954 1518 1270 1547">Hochgeschwindigkeitswelle</p>
 <p data-bbox="256 1749 708 1778">Hochgeschwindigkeitswelle mit Bremse</p>	

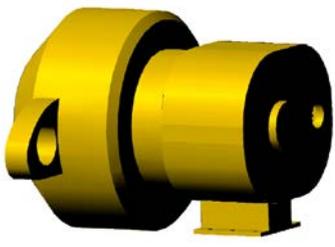
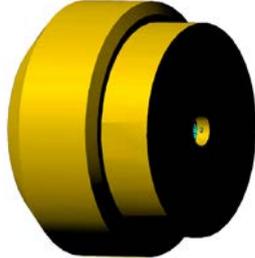
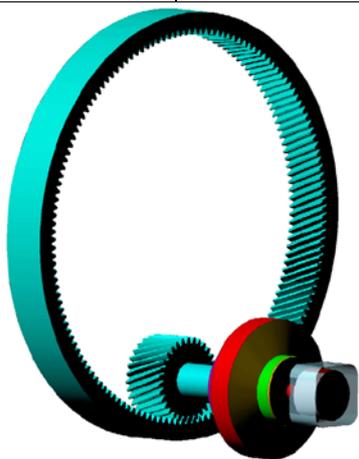
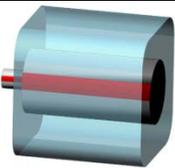
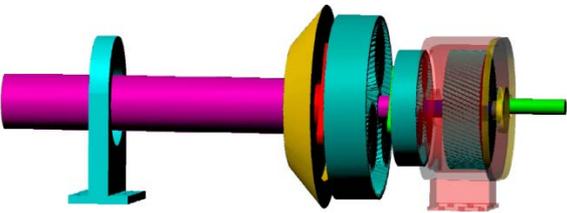
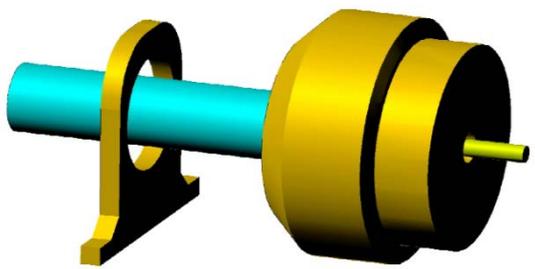
 <p>Getriebe</p>	 <p>Getriebe</p>
 <p>Pitch-Aktuator (5MW und 10MW)</p>	
 <p>Generator (5MW und 10MW)</p>	
 <p>Antriebsstrang (5MW)</p>	 <p>Antriebsstrang (10MW)</p>

Tabelle 10: Komponentenbibliothek

Die Drehgeschwindigkeiten des jeweiligen Antriebsstrangs sind im Folgenden dargestellt.

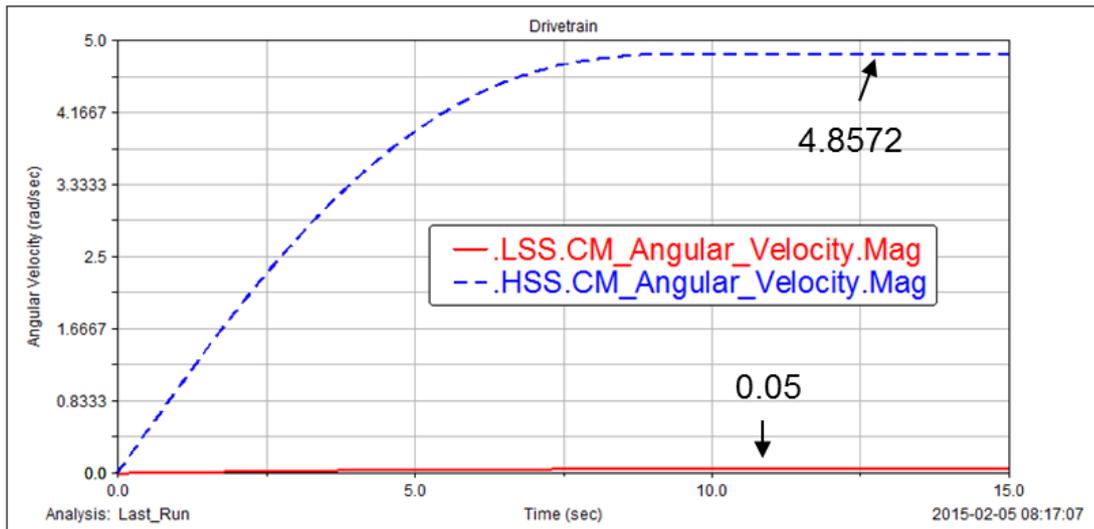


Abbildung 44: Drehgeschwindigkeit beim 5MW Antriebsstrang (Übersetzung 1:97,144)

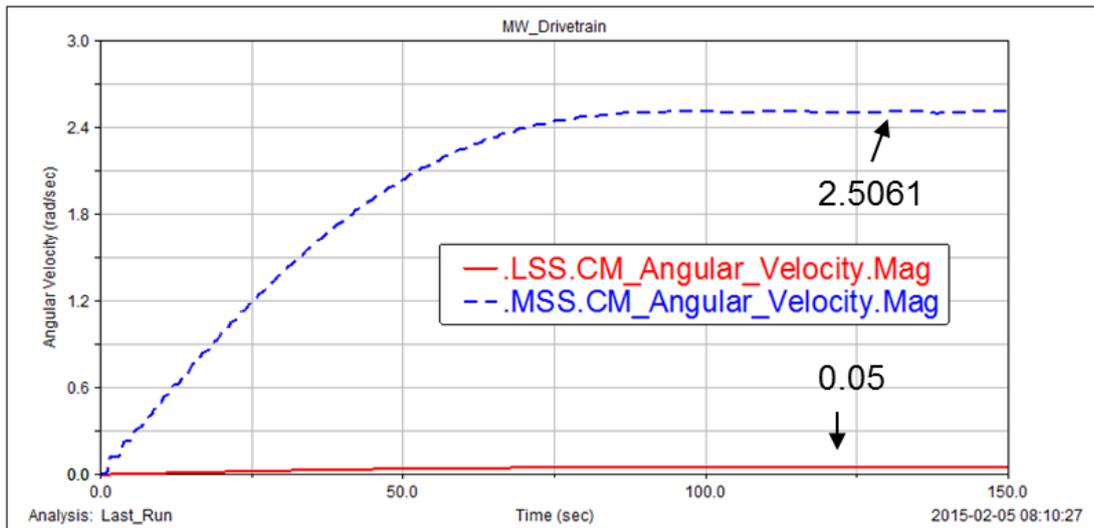


Abbildung 45: Drehgeschwindigkeit beim 10MW Antriebsstrang (Übersetzung 1:50,122)

OneWind Modelica Library

Der Export von Komponentenmodellen der OneWind Modelica Library wurde erfolgreich durchgeführt. Es wurde eine FMU des Fundaments und des elektrischen Generators erzeugt.

FMU des Fundamentmodells

Die präsentierte FMU enthält ein Modell für die Fundament-Simulation. Das Modell besteht aus einem dreidimensionalen, linearen Feder-Dämpfer-Element, das den Boden und einen starren Körper für die Fundamentmasse darstellt. Nachfolgend wird ein Überblick über den Modellaufbau, das Koordinatensystem sowie alle notwendigen Parameter für die Simulation gegeben. Weiterhin werden die FMU-Exporteinstellungen in Dymola und Schnittstellenvariablen dargestellt.

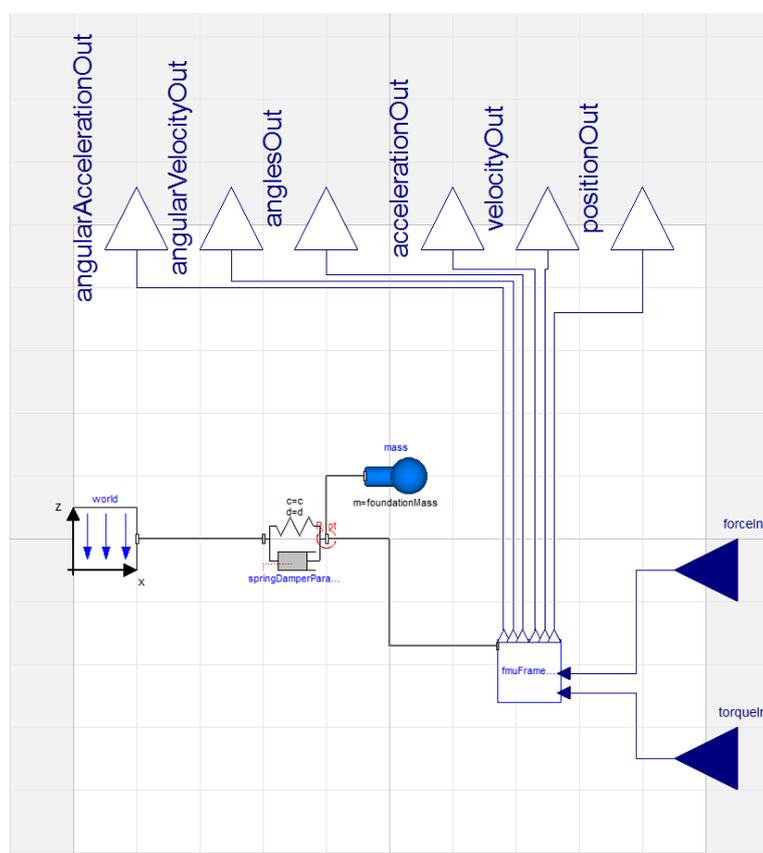


Abbildung 46: Interface variables and internal model layout.

Der Modellaufbau ist in Abbildung 46 dargestellt. Das lineare Feder-Dämpfer-Element ist mit dem Referenz-Koordinatensystem an seinem linken, sog. Floating-Frame-Anschluss verbunden. Das Referenzkoordinatensystem stellt Nullposition und Nulldrehung dar. Ferner werden die Schwerkrafttrichtung und deren Wert definiert. Der rechte Floating-Frame-Anschluss der Feder ist mit einer Adapterklasse (Abbildung 47) und einem starren Körper verbunden. Die Adapterklasse wurde erstellt, um die Anforderungen der FMU-Schnittstelle zu erfüllen. Diese trennt alle Informatio-

nen vom Floating-Frame-Anschluss auf einzelne, kausale Signale, die in der FMU-Schnittstelle verwendet werden können. Der starre Körper stellt die Grundmasse und Trägheit dar.

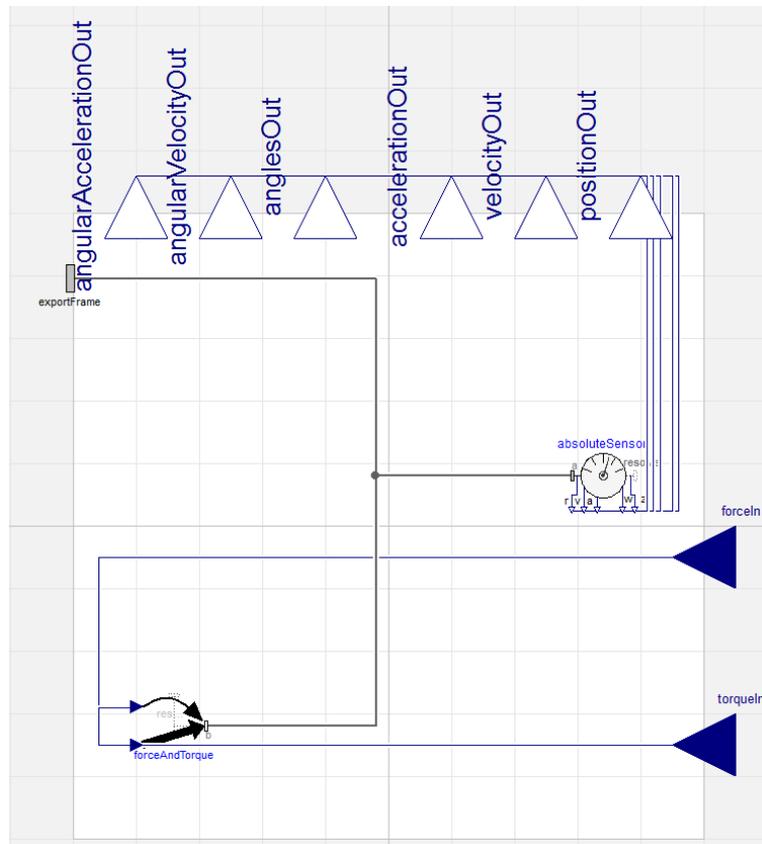


Abbildung 47: Floating frame of reference to causal signals adapter.

Die Parameter des Modells sind in Tabelle 11 enthalten.

Parameter	SI-Unit	Description
r_0CM_1_	m	x-direction of vector from frame_a to center of mass of foundation mass, resolved in frame_a
r_0CM_2_	m	y-direction of vector from frame_a to center of mass of foundation mass, resolved in frame_a
r_0CM_3_	m	z-direction of vector from frame_a to center of mass of foundation mass, resolved in frame_a
foundationMass	kg	Mass of foundation
I_011	kg*m ²	(1,1) element of inertia tensor of foundation mass
I_022	kg*m ²	(2,2) element of inertia tensor of foundation mass
I_033	kg*m ²	(3,3) element of inertia tensor of foundation mass

I_021	kg*m ²	(2,1) element of inertia tensor of foundation mass
I_031	kg*m ²	(3,1) element of inertia tensor of foundation mass
I_032	kg*m ²	(3,2) element of inertia tensor of foundation mass
massOfAttachedStructure	kg	Overall mass of the attached structure and foundation for initial displacement calculation
c_0trans_1_	N/m	Soil spring constant in x-direction
c_0trans_2_	N/m	Soil spring constant in y-direction
c_0trans_3_	N/m	Soil spring constant in z-direction
d_0trans_1_	Ns/m	Soil damping constant in x-direction
d_0trans_2_	Ns/m	Soil damping constant in y-direction
d_0trans_3_	Ns/m	Soil damping constant in z-direction
s_0unstretched_1_	m	Unstretched spring length in x-direction
s_0unstretched_2_	m	Unstretched spring length in y-direction
s_0unstretched_3_	m	Unstretched spring length in z-direction
c_0rot_1_	Nm/rad	Soil spring constant around x-axis
c_0rot_2_	Nm/rad	Soil spring constant around y-axis
c_0rot_3_	Nm/rad	Soil spring constant around z-axis
d_0rot_1_	Nms/rad	Soil damping constant around x-axis
d_0rot_2_	Nms/rad	Soil damping constant around y-axis
d_0rot_3_	Nms/rad	Soil damping constant around z-axis
phi_0rel0_1_	deg	Unstretched spring angle around x-axis
phi_0rel0_2_	deg	Unstretched spring angle around y-axis
phi_0rel0_3_	deg	Unstretched spring angle around z-axis

Tabelle 11: Parameter der FMU des Fundamentmodells.

Das Koordinatensystem ist mit dem Turmfußkoordinatensystem aus 0 identisch. Die FMU-Schnittstelle besteht aus den in Tabelle 12 dargestellten Variablen. Sie besteht aus 6 Eingangs- und 18 Ausgangsvariablen.

Input	SI-Unit	Description
forceln_1_	N	External force in x-direction
forceln_2_	N	External force in y-direction

forceln_3_	N	External force in z-direction
torqueln_1_	Nm	External moment around x-axis
torqueln_2_	Nm	External moment around y-axis
torqueln_3_	Nm	External moment around z-axis

Outputs

positionOut_1_	m	Translational movement in x-direction
positionOut_2_	m	Translational movement in y-direction
positionOut_3_	m	Translational movement in z-direction
velocityOut_1_	m/s	Velocity in x-direction
velocityOut_2_	m/s	Velocity in y-direction
velocityOut_3_	m/s	Velocity in z-direction
accelerationOut_1_	m/s ²	Acceleration in x-direction
accelerationOut_2_	m/s ²	Acceleration in y-direction
accelerationOut_3_	m/s ²	Acceleration in z-direction
anglesOut_1_	rad	Rotation angle around x-axis
anglesOut_2_	rad	Rotation angle around y-axis
anglesOut_3_	rad	Rotation angle around z-axis
angularVelocityOut_1_	rad /s	Angular velocity around x-axis
angularVelocityOut_2_	rad /s	Angular velocity around y-axis
angularVelocityOut_3_	rad /s	Angular velocity around z-axis
angularAccelerationOut_1_	rad /s ²	Angular acceleration around x-axis
angularAccelerationOut_2_	rad /s ²	Angular acceleration around y-axis
angularAccelerationOut_3_	rad /s ²	Angular acceleration around z-axis

Tabelle 12: FMU Interface Variablen.

Die FMU-Export-Einstellung in Dymola⁵ sind wie folgt:

- Als FMI-Version wurde sowohl 1.0 (OWLib-Foundation_FMIv1.0) als auch 2.0 (OWLib-Foundation_FMIv2.0) gewählt

⁵ Dymola 2016, <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/>

- Der Typ der FMU ist auf Modellaustausch und Co-Simulation eingestellt
- Der eingebettete Solver für Co-Simulation ist der Sundials Ccode
- Die FMU enthält 32-Bit- und 64-Bit-Binärdateien

Dieses Setup soll die höchste Kompatibilität mit anderen Simulationsumgebungen bieten.

Nach erfolgreichem Export der FMU wurde diese mittels Dymola importiert und einer Reihe von Tests unterzogen, um die korrekte Funktionsweise zu überprüfen und deren Ergebnisse als Referenz für das Verhalten der FMU in anderen Tools dienen. Im ersten Test wird der Krafteingang der FMU einer unidirektionalen Kraft von 1 kN in negativer z-Richtung ausgesetzt. Die FMU-Kommunikationsschrittgröße beträgt 0,002 s. Die Verschiebung ist in Abbildung 48 zu sehen.

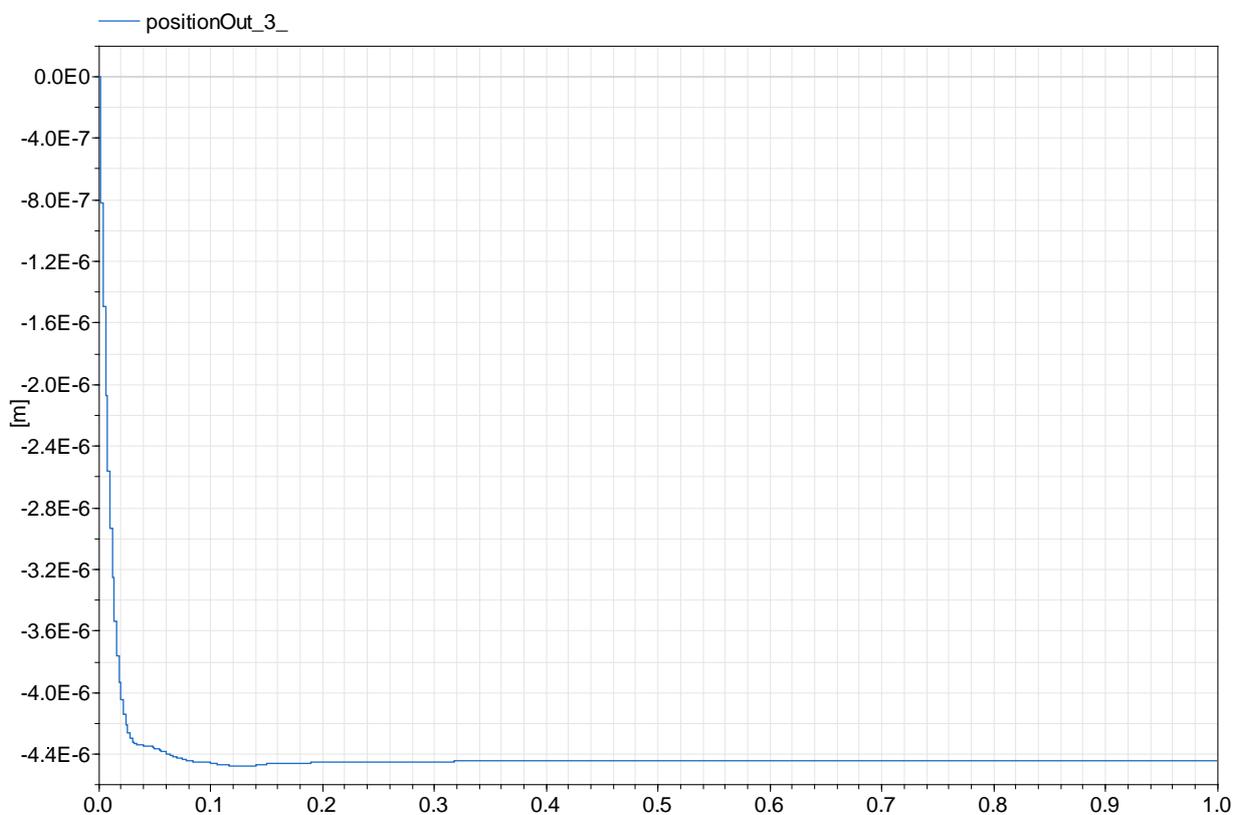


Abbildung 48: Verschiebung in z - Richtung bei unidirektionaler Belastung.

Im zweiten Test ist das Fundamentmodell an ein 2,5-MW-Windturbinenmodell angeschlossen. Ein Hochlaufscenario mit konstanter Windgeschwindigkeit wird simuliert. Die anfängliche Rotorgeschwindigkeit ist Null. Die Turbine beschleunigt bis zur Nenndrehzahl, ab der die Rotordrehzahl von der Pitch-Regelung begrenzt wird. In Abbildung 49 ist die Rotordrehzahl, die Verschiebung in x- ("positionOut_1_"), y- ("positionOut_2_") und z-Richtung ("positionOut_3_") zu sehen.

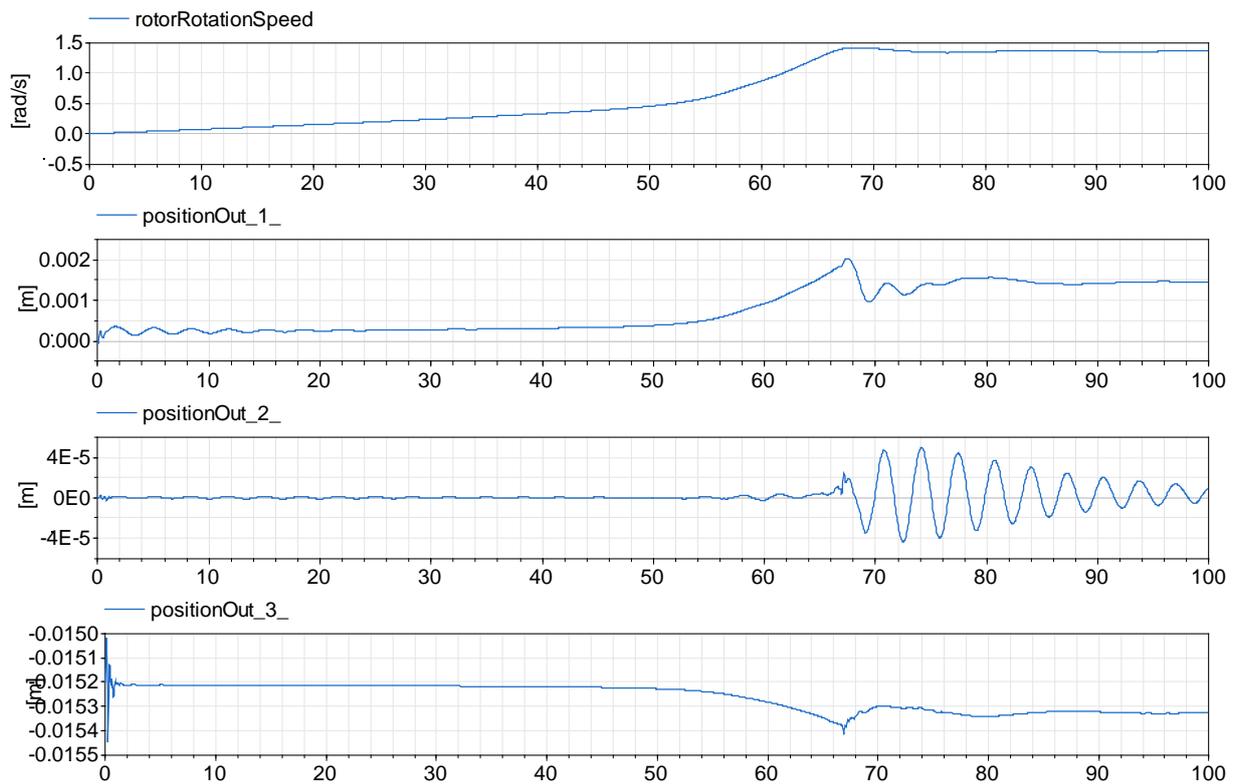


Abbildung 49: Rotor-Drehzahl und Fundamentverschiebung bei Hochlauf einer Windkraftanlage.

FMU des Generatormodells

Die präsentierte FMU enthält ein Modell zur Simulation des mechanischen Teils eines elektrischen Generators. Das Modell besteht aus einem Aktuator, der das Generatormoment und die Trägheit der Generatorwelle darstellt. Nachfolgend wird ein Überblick über den Modellaufbau, das Koordinatensystem sowie alle notwendigen Parameter für die Simulation gegeben. Weiterhin werden die FMU-Exporteinstellungen in Dymola und Schnittstellenvariablen dargestellt.

Das Modelllayout ist in Abbildung 50 dargestellt. Der Aktuator des Drehmoments "actuatorVarSpeed" erhält das erforderliche Drehmoment vom Regelungsanschluss "generatorSubBus". Das Drehmoment wird als Gegenmoment für das Rotormoment angewendet. Der Drehmomentantrieb treibt ebenfalls die Trägheit der schnellen Welle an. Der Anschluss "Flansch" ist die Schnittstelle zum Anschluss an den Antriebsstrang. Das Reaktionsmoment des Generators wird durch den "Stütz" -Anschluss abgestützt, der mit dem Antriebsstrang verbunden ist. Der Rotationsfreiheitsgrad liegt um die Rotorachse.

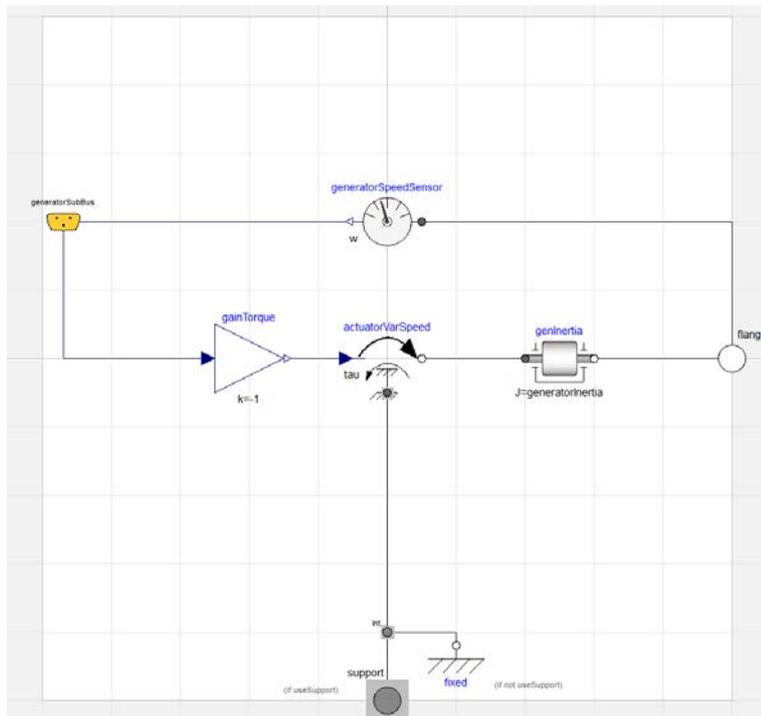


Abbildung 50: Aufbau des elektrischen Generatormodells.

Die genannten Schnittstellen werden in einzelne kausale Schnittstellenvariablen getrennt. Der daraus resultierende Modellaufbau ist in Abbildung 51 zu sehen. Die kausalen Schnittstellenvariablen sind notwendig, um die Anforderungen an die FMU zu erfüllen. Weiterhin ist diese Schnittstelle auf fortgeschrittenere Generatormodelle anwendbar, die auch den elektrischen Teil des Generators berücksichtigen.

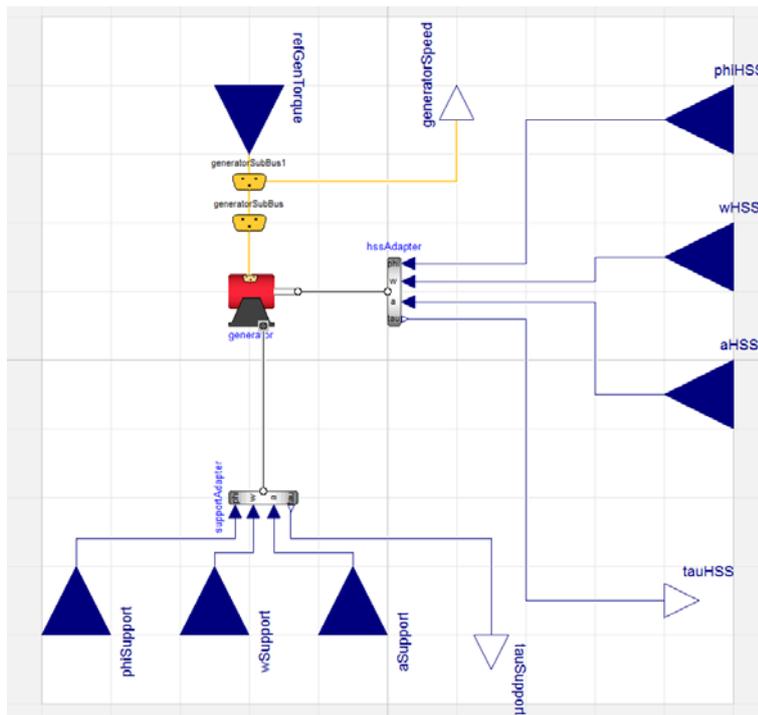


Abbildung 51: Schnittstellenvariablen und internes Modellaufbau.

Die Parameter des Modells sind in Tabelle 13 enthalten.

Parameter	SI-Unit	Description
initialGeneratorSpeed	rad/s	Initial generator high speed shaft speed around z- axis
InitialHSSAngle	rad	Initial position angle of high speed shaft around z-axis
generatorEfficiencyFactor	-	Generator efficiency factor
generatorInertia	Kg*m ²	Generator inertia about high speed shaft

Tabelle 13: Parameter der FMU des Generatormodells.

Das Koordinatensystem ist mit dem Rotorkoordinatensystem aus 0 identisch. Das externe Interface der FMU besteht aus den in Tabelle 14 dargestellten Variablen. Sie besteht aus 7 Eingangs- und 3 Ausgangsvariablen.

Input	SI-Unit	Description
phiHSS	rad	High speed shaft rotation angle
wHSS	rad/s	High speed shaft angular velocity
aHSS	rad/s ²	High speed shaft angular acceleration
refGenTorque	Nm	Reference generator torque from control system

phiSupport	rad	Generator support angle
wSupport	rad/s	Generator support angular velocity
aSupport	rad/s^2	Generator support angular acceleration

Outputs

generatorSpeed	rad/s	Measured generator high speed shaft angular velocity
tauHSS	Nm	Torque at generator high speed shaft
tauSupport	Nm	Torque at generator support

Tabelle 14: Beschreibung der FMU-Schnittstellenvariablen.

Die Exporteinstellungen der FMU sind identisch mit den Einstellungen, die für die FMU des Fundamentmodells verwendet wurden. Nach erfolgreichem Export der FMU wurde diese mittels Dymola importiert und einem Test unterzogen, um die korrekte Funktionsweise zu überprüfen und deren Ergebnisse als Referenz für das Verhalten der FMU in anderen Tools dienen.

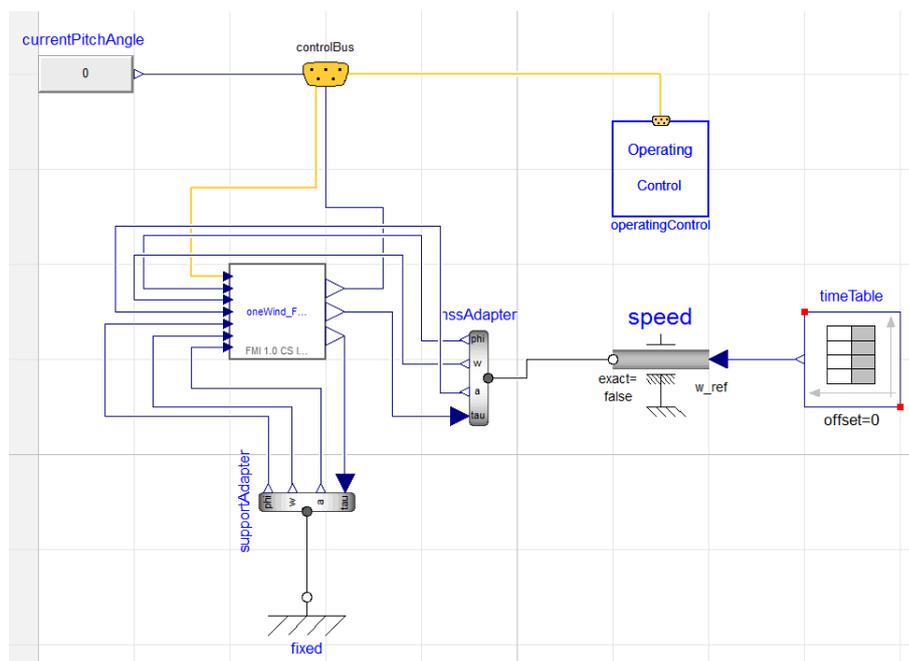


Abbildung 52: Aufbau des FMU-Testmodells.

Der Testfall ist in Abbildung 52 dargestellt. Die FMU ist einem vordefinierten Drehzahlverlauf des Generators ausgesetzt, die in Abbildung 53 dargestellt ist. Diese Drehgeschwindigkeit wird intern gemessen und über die Ausgangsvariable "generatorSpeed" an die Betriebsführung übergeben. Die Betriebsführung basiert auf dem Steuerungsmodell nach [1]. Es berechnet das erforderliche Drehmoment während Einschalt-, Teillast-, Nenn- und Überdrehzahlbetrieb. Das Drehmoment wird dann im Generatormodell eingestellt, um das erforderliche Gegenmoment auf das Ro-

tormoment zu erzeugen. Abbildung 53 zeigt den Eingang "refGenTorque" und die Ausgangsgröße "tauHSS".

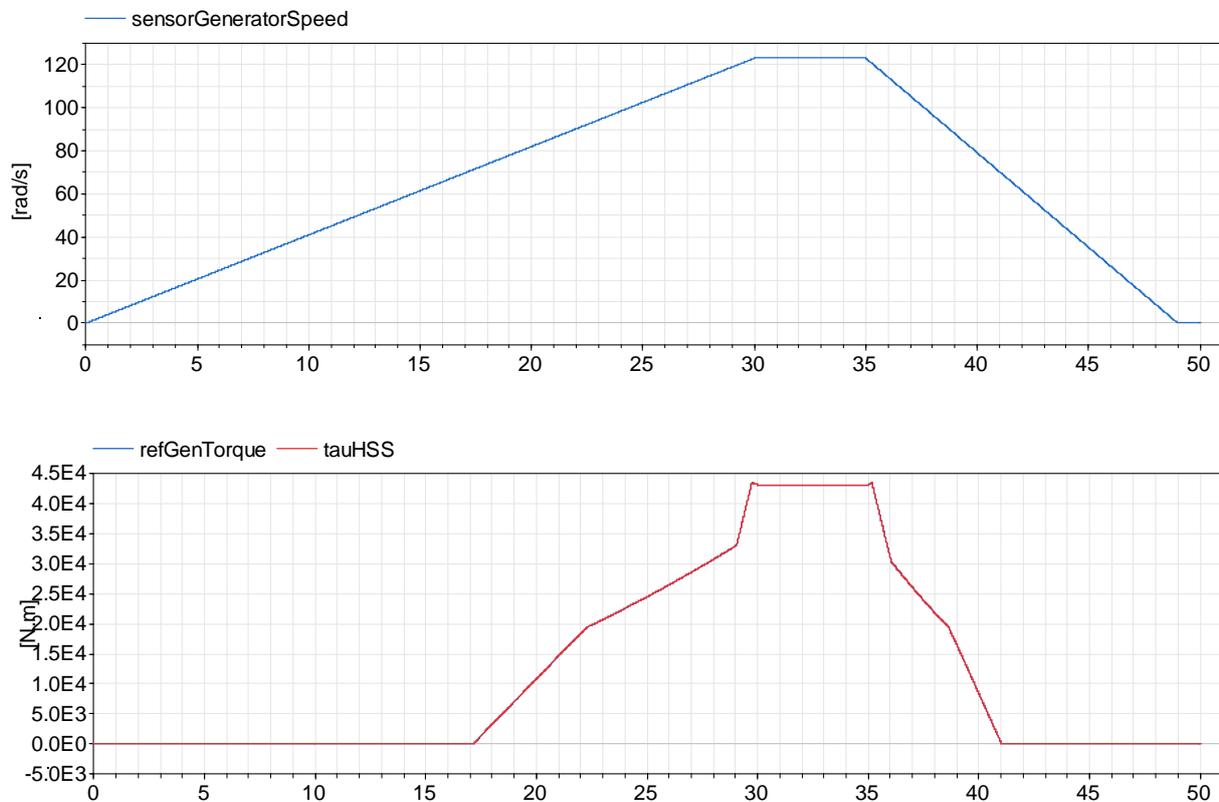


Abbildung 53: Generator Geschwindigkeit Kurve und Reaktionsmoment.

Beide FMUs wurden auf die DLR-Teamsite hochgeladen und den Kollegen vom DLR zur Verfügung gestellt.

1.4. Basissoftware und Simulationsergebnisse (AP3-4)

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der Arbeitspakete AP3 und AP4 zusammen. Zunächst wird beschrieben, wie aus einer allgemeinen Turbinenbeschreibung die Eingangsdateien für die spezifischen Simulationstools generiert werden. Danach werden die verfügbaren Simulation workflows mit den jeweils integrierten Werkzeugen und den resultierenden Simulationsergebnissen dargestellt.

1.4.1. Ingenieur Design Daten (IDD) zur Turbinenbeschreibung

Die IDD Genesis Grammatik, die Mittels Xtext definiert wurde, ermöglicht es einheitliche Eingabeparameter zu definieren, um daraus Eingabedateien für unterschiedliche Simulationstools zu generieren. Das vorliegende Kapitel behandelt den aktuellen Stand der Grammatik und eine beispielhafte Verwendung des Datenmodells.

Die Parameternamen wurden so gewählt, dass sie auf alle im Rahmen des Projektes zu unterstützenden Simulationstools angewendet werden können. Die Tabelle im Anhang gibt einen Überblick über alle bisher implementierten Parameter mit Angabe des Datentyps, der Einheit, der Beschreibung und des Tools bzw. des Generators, der diesen Parameter verwendet.

Der Aufbau des IDD folgt der klassischen WEA. Das Klassendiagramm ist in der Abbildung 54 dargestellt.

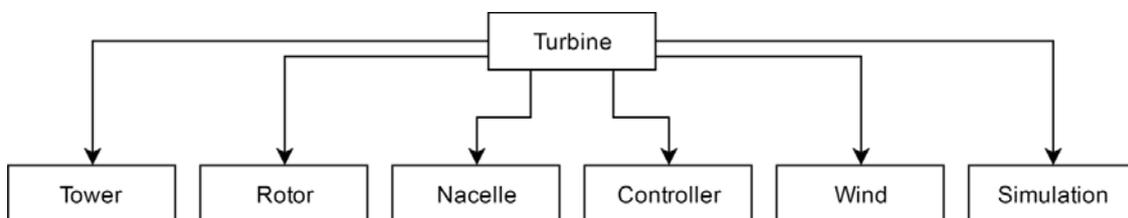


Abbildung 54: Klassendiagramm Turbine

Wie zu sehen, setzt sich eine Turbine aus den sechs Unterkomponenten Tower, Rotor, Nacelle, Controller und Wind zusammen. Diese wiederum enthalten mehrere untergeordnete Schichten von Unterelementen, die im Folgenden erläutert werden sollen.

Das Klassendiagramm des Turms ist in der Abbildung 55 dargestellt.

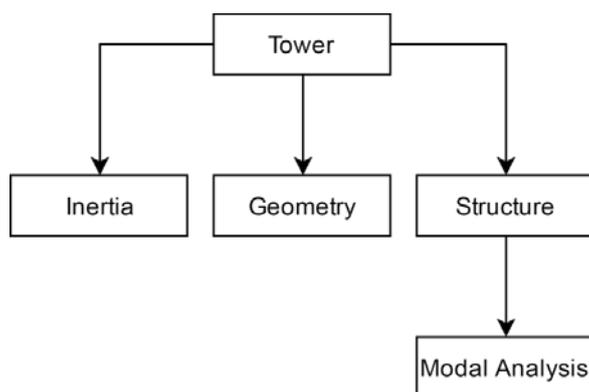


Abbildung 55: Klassendiagramm Tower

Wie zu sehen, enthält dieser die Unterkomponenten Inertia (dt. Trägheit), Geometry (dt. Geometrie) und Structure (dt. Struktur), wobei letztere wiederum die Modal Analysis (dt. Modalanalyse) instanziiert.

Das Klassendiagramm des Rotors in Abbildung 56 zu sehen.

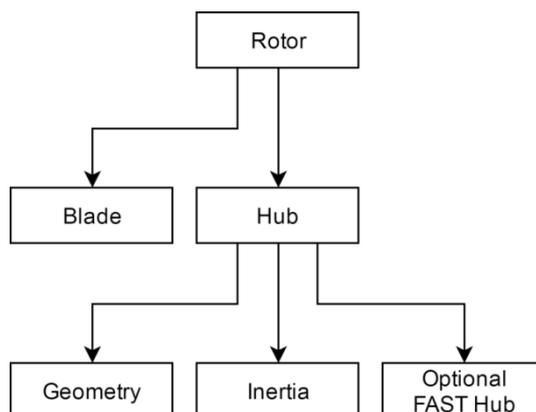


Abbildung 56: Klassendiagramm Rotor

Die zwei Unterkomponenten sind das Rotorblatt und der Hub. Letzterer enthält, wie auch der Tower, eine Unterklasse für die Geometrie und die Trägheit. Darüber hinaus kann bei Bedarf die Klasse Optional FAST Hub instanziiert werden, die optionale Parameter bereitstellt, die lediglich Einfluss auf den in FAST definierten Hub haben.

Das Klassendiagramm des Rotorblatts ist in Abbildung 57 dargestellt.

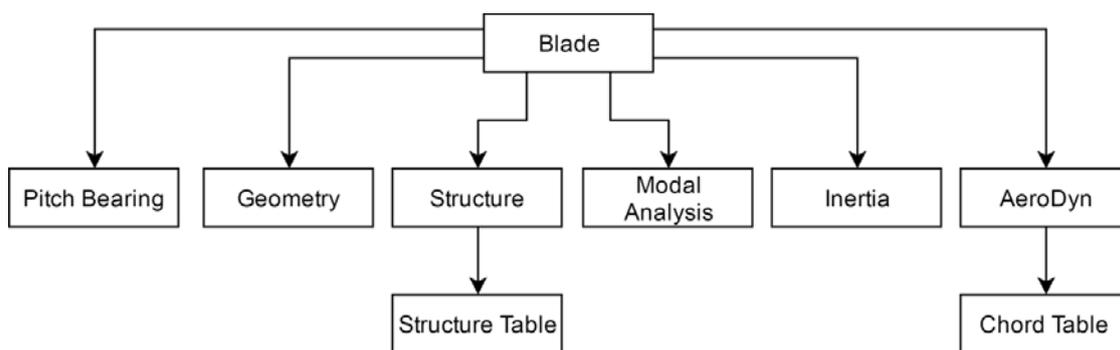


Abbildung 57: Klassendiagramm Blade

Das Rotorblatt setzt sich auf Grund seiner Komplexität aus mehr Unterkomponenten zusammen, als die übrigen WEA-Komponenten. Zu diesen zählen nämlich das Pitch Bearing (dt. Einstellwinkel-Lagerung), die Geometrie, Struktur, Trägheit, Modalanalyse und eine Unterkomponente für die Aerodynamik, die wiederum übersichtshalber eine Chord Table instanziiert. Die Struktur des Blattes wird innerhalb einer umfangreichen Strukturtable, welche wiederum eine Unterkomponente der Struktur-Klasse ist, definiert.

Relativ umfangreich ist auch der Aufbau der Nacelle. Das Klassendiagramm ist in der Abbildung 58 dargestellt.

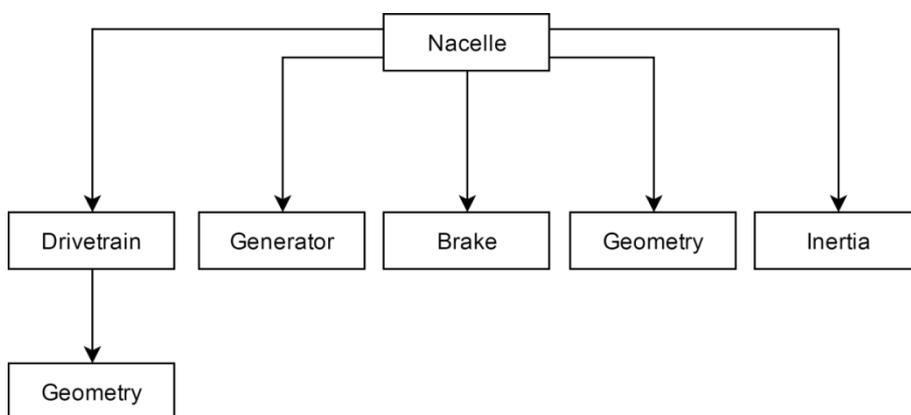


Abbildung 58: Klassendiagramm Nacelle

Sie enthält alle aus der WEA bekannten Unterkomponenten, nämlich den Antrieb, den Generator, die Bremse, und wiederum eine Klasse für die Geometrie und Trägheit. Der Antrieb wird in einer Unterklasse Geometrie genau definiert.

Das Klassendiagramm des Controllers ist in Abbildung 59 dargestellt.

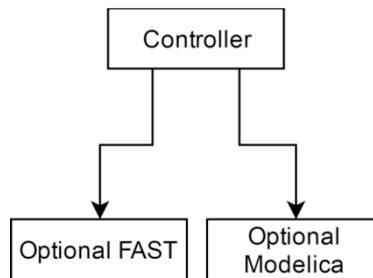


Abbildung 59: Klassendiagramm Controller

Dieser kennt lediglich die beiden Unterkomponenten Optional FAST und Optional Modelica. Dies liegt daran, dass ein Controller nur von diesen beiden Simulationstools verwendet wird und deren Parameter derart simulationsspezifisch sind, dass eine allgemeine, toolübergreifende Definition im IDD nicht möglich ist.

Das Klassendiagramm des Windes ist in Abbildung 60 dargestellt.

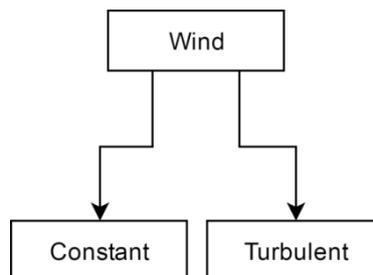


Abbildung 60: Klassendiagramm Wind

Auch diese kennt nur zwei Unterkomponenten, nämlich eine für den konstanten und eine für den turbulenten Wind. Damit sind alle Elemente des IDDs definiert und erläutert.

Der OneWind-Editor verfügt über eine Batch-Funktion. Diese bietet die Möglichkeit den Editor, ohne das direkte Öffnen der GUI, für die Generierung von Inputdateien zu nutzen. Dadurch kann er innerhalb externer Workflows jeglicher Art eingesetzt werden. Dazu zählt auch das im Rahmen von WindMUSE eingesetzte RCE, welches weiter oben erläutert wurde.

1.4.2. OneWind Editor und –Generator

OneWind stellt einen Editor zur Verfügung, der die Erstellung und Veränderung des IDDs erlaubt. Ein Screenshot der Benutzeroberfläche ist in Abbildung 61 dargestellt.

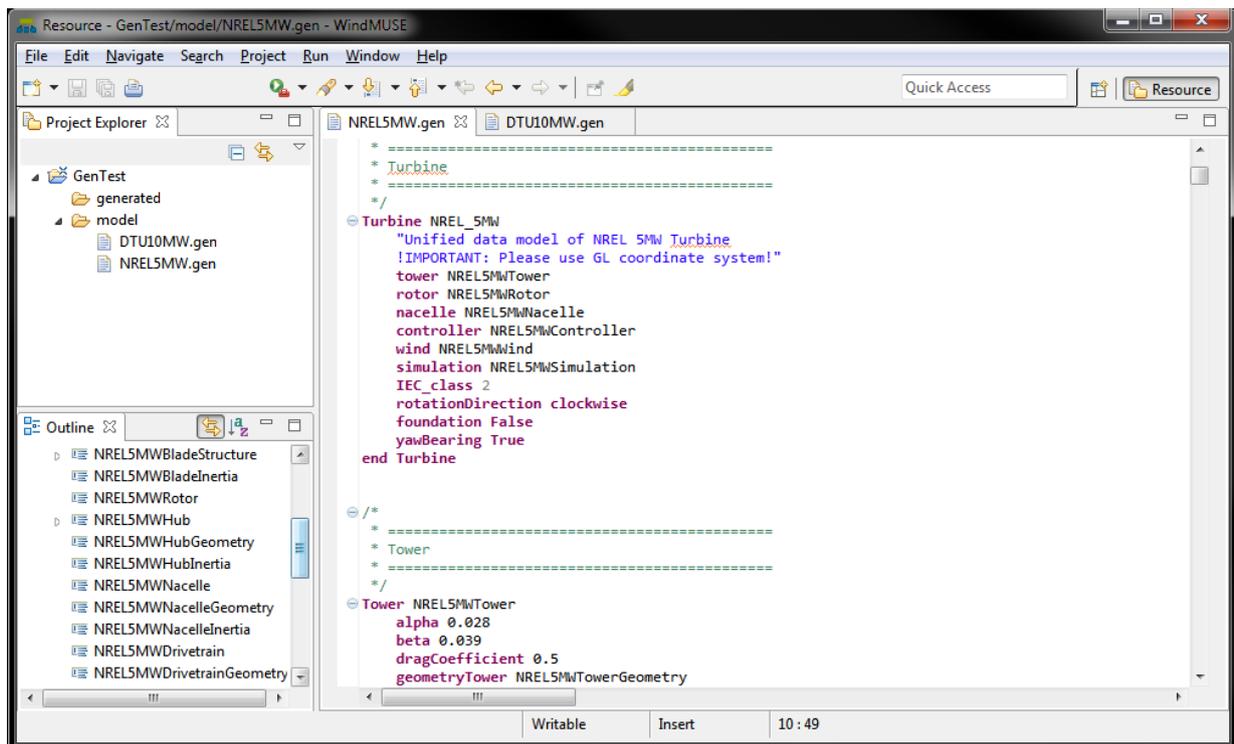


Abbildung 61: OneWind-Editor Benutzeroberfläche

Der Editor basiert auf Eclipse RCP (Rich Client Platform). Diese Integrationsplattform für Entwicklungswerkzeuge wurde ursprünglich von IBM entwickelt und ist zurzeit die am meisten genutzte Java IDE, Open Source und derzeit unter Weiterentwicklung der Eclipse Foundation. Das Ziel von RCE ist die Unabhängigkeit, mit besonderem Augenmerk auf nichtkommerzielle Einrichtungen und Organisationen. Bei Rich Clients handelt es sich i.d.R. um Desktop-Applikationen, die über eine Rich-UI (Rich User Interface) verfügen, also grafische Editoren, ohne feste Grenzen. Diese können offline verwendet werden, um mit lokalen Daten, wie in dem Fall dem IDD, zu arbeiten. RCP ist ein mächtiges Rahmenwerkzeug zum Entwickeln von Rich Client Applikationen. Der komplette Source Code ist verfügbar und steht unter der Eclipse Public Licence. Wie in der Abbildung 62: Aufbau RCP zu sehen, ist der Runtime Kernel ein fester und notwendiger Bestandteil einer RCP Anwendung. Dieser kann dann durch beliebig viele Plugins erweitert werden, wodurch eine eigene Entwicklungsumgebung auf Basis von Eclipse entsteht.

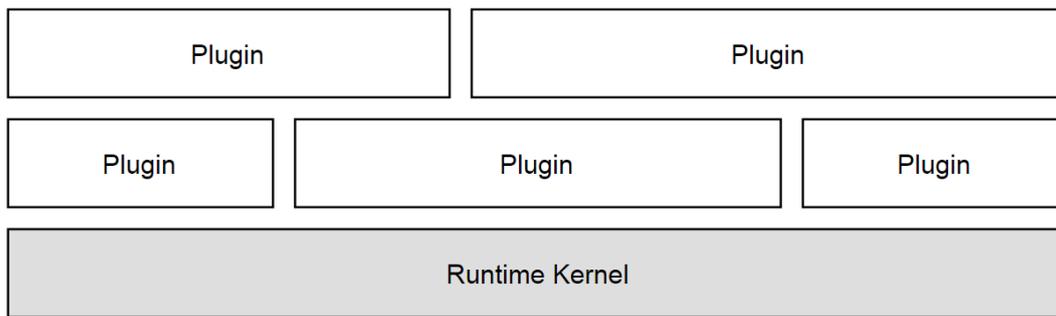


Abbildung 62: Aufbau RCP

Plugins sind dabei die Basiskomponenten, die Abhängigkeiten zu anderen Plugins enthalten. Das aus mehreren Plugins bestehende Produkt ist das finale Resultat der RCP-Entwicklung. Bei dem OneWind-Editor handelt es sich ebenfalls um eine RCP-Anwendung.

Für die Definition der domänenspezifischen Sprache (DSL) des IDD kam Xtext zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein Open Source Framework für die Entwicklung von Programmiersprachen sowie domänenspezifischen Sprachen. Es ist Teil des Eclipse Modeling Frameworks. Im Gegensatz zu normalen Parsergeneratoren wird bei Xtext nicht nur ein Parser generiert, sondern auch ein EMF Metamodell (ein Klassenmodell für den abstrakten Syntaxbaum) und ein in Eclipse integrierter Texteditor sowie die notwendige Infrastruktur für die Implementierung einer modernen Entwicklungsumgebung für die entwickelte Sprache bereitgestellt. Beim letzten Punkt handelt es sich um die bereits erläuterte RCP Applikation.

Xtext verwendet einen MWE2 Workflow um die Sprache zu konfigurieren. Wird der Workflow ausgeführt, so wird der Parser und das Metamodell generiert. Weiterhin werden Klassen- und Methodenrumpfe erzeugt, um verschiedene Compiler- und IDE-Konzepte zu implementieren. Daneben unterstützt der generierte Editor unterschiedliche, auf die domänenspezifische Sprache bezogenen Funktionen des Basis-Syntax-Highlighting. Dieses kann sowohl syntaktisch als auch semantisch angepasst/verfeinert werden. Es sind keine Grenzen bezüglich Farben, Schriftarten, Textdekorationen gesetzt. Das aus Eclipse bekannte Feature der Autoformatierung von Quelltext wurde ebenfalls für die DSL des IDD implementiert. Xtext stellt hierfür eine API bereit. Darüber hinaus verfügt der Editor über eine Outline View. Diese zeigt alle Elemente der WEA an und ist auch mit der geöffneten Datei verknüpft, sodass der Cursor mit einem Klick auf ein Element im Outline zu der entsprechenden Stelle im Text springt. Die Ansicht ist in Abbildung 63 dargestellt.

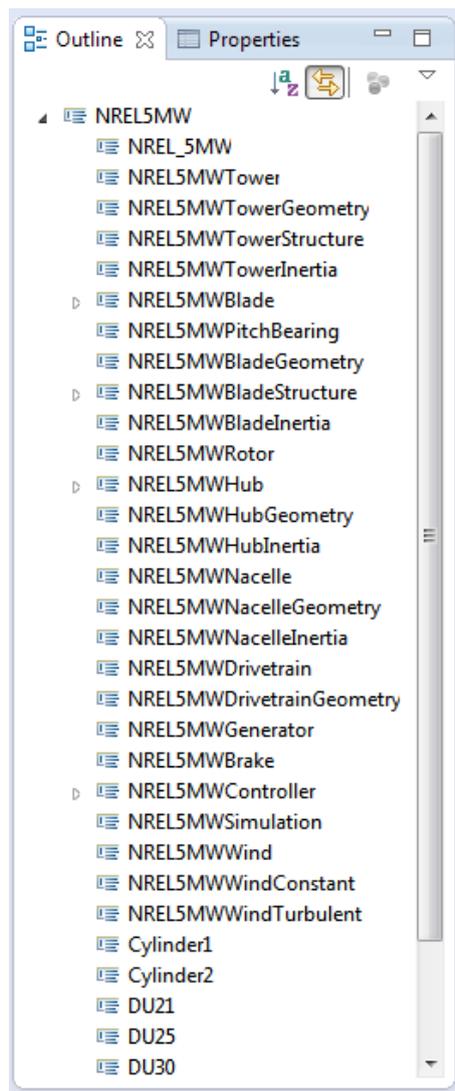


Abbildung 63: OneWind-Editor Outline View

Der OneWind-Editor unterstützt die in Abbildung 64 dargestellten Tools. Dazu zählen FAST, SIMPACK, Modelica und die Generierung von Windfeld/Turbsim Daten.

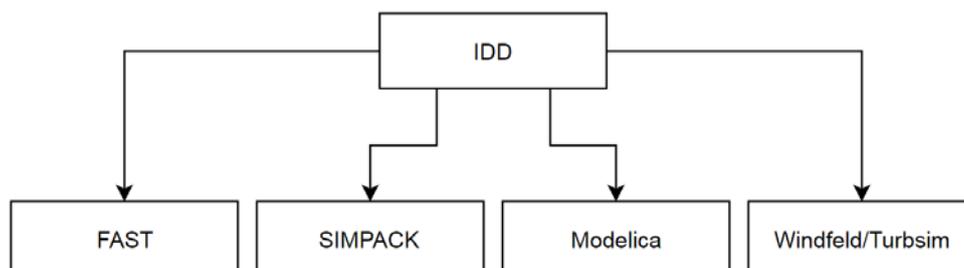


Abbildung 64: Vom IDD unterstützte Simulationstools

Die Generatoren, die ausgehend von den im IDD definierten Elementen und Parametern, Inputdateien für die oben genannten Simulationstools generieren, wurden mit Xtend implementiert. Dabei handelt es sich um eine Programmiersprache für die Java Virtual Machine. Syntaktisch und semantisch hat Xtend seine Wurzeln in der Programmiersprache Java. Im Vordergrund stehen allerdings eine kompaktere Syntax und zusätzliche Funktionalität wie Typinferenz, Extension-Methoden und Operatorüberladung. Xtend ist primär objektorientiert, ermöglicht aber auch funktionale Programmierung, z. B. durch Lambda-Ausdrücke. Xtend ist statisch getypt und benutzt das Typsystem von Java ohne Änderungen. Es wird auf Java-Code kompiliert und integriert sich daher nahtlos mit existierenden Java-Bibliotheken, in dem Falle auch EMF und RCP.

Anlegen eines neuen Projekts

Ein neues Projekt kann durch *File > New > Project > Project* erstellt werden. Dieses wird anschließend im *Project Explorer* angezeigt. Innerhalb des soeben erzeugten Projekts, wird im Kontextmenü des Projektordners mit *New > Folder* übersichtshalber ein Unterverzeichnis *model* für das Modell und ein Unterverzeichnis *generated* für die generierten Inputdateien erstellt.

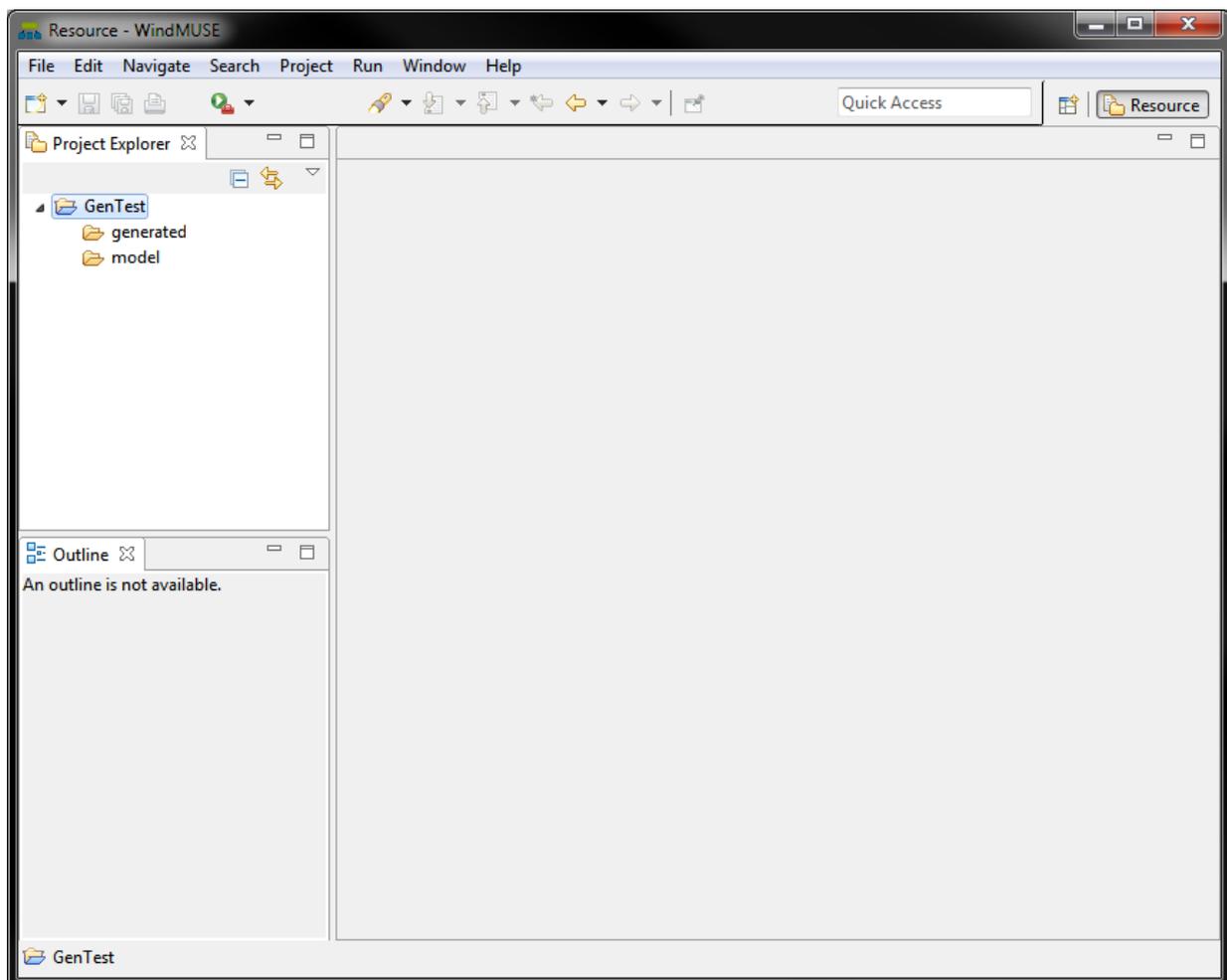


Abbildung 65: Beispielprojekt innerhalb der WindMUSE IDE

Innerhalb des Verzeichnisses *model* wird durch *Kontextmenü > New > Other... > File* eine Datei mit der Endung **.gen* angelegt.

Es erscheint ein Pop-Up-Fenster, welches fragt, ob die Xtext nature, also die durch die Entwickler definierte domänenspezifische Sprache, die dem Editor zu Grunde liegt, mit dem angelegten Projekt assoziiert werden soll. Um die Funktionalität zu gewährleisten, wird die Frage mit *Yes* beantwortet. Analog dazu können beliebig viele Modelle angelegt werden.

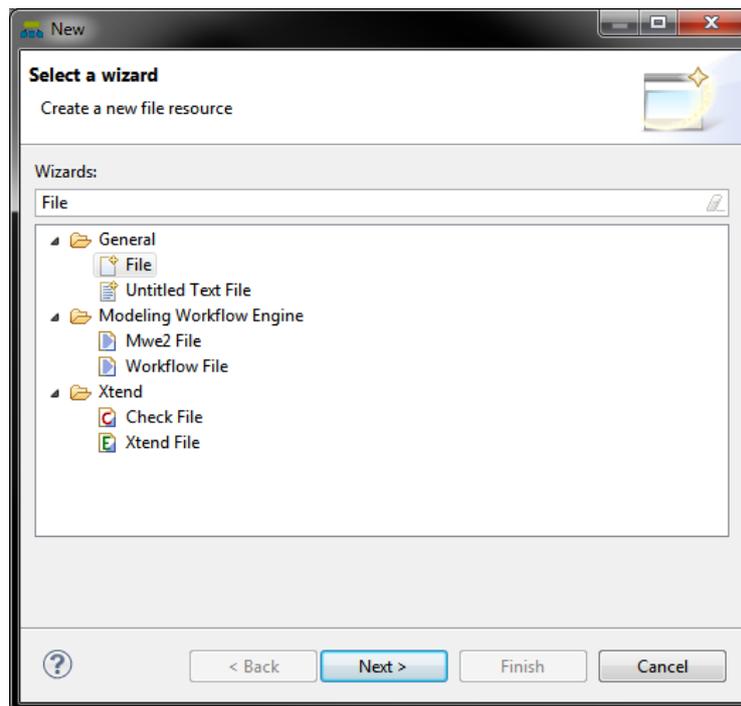


Abbildung 66: Anlegen einer neuen Datei innerhalb der WindMUSE IDE

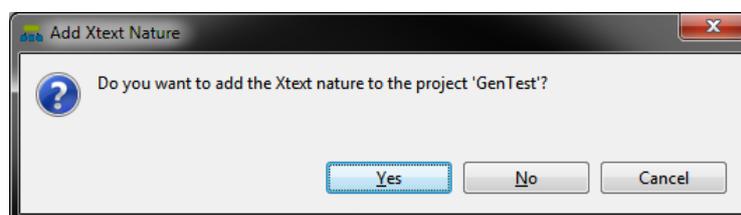


Abbildung 67: Pop-Up-Fenster für das Assoziieren der Xtext Nature mit dem bestehenden Projekt innerhalb der WindMUSE IDE

Definition des Datenmodells

Innerhalb der neu angelegten Datei sowie optional weiteren *.gen-Dateien, definiert man das Datenmodell mit den o.g. Parametern, das als Grundlage für die Generierung der Inputdateien dienen soll. Hierzu kann die Autovervollständigung durch *Strg* + *Leertaste* verwendet werden.

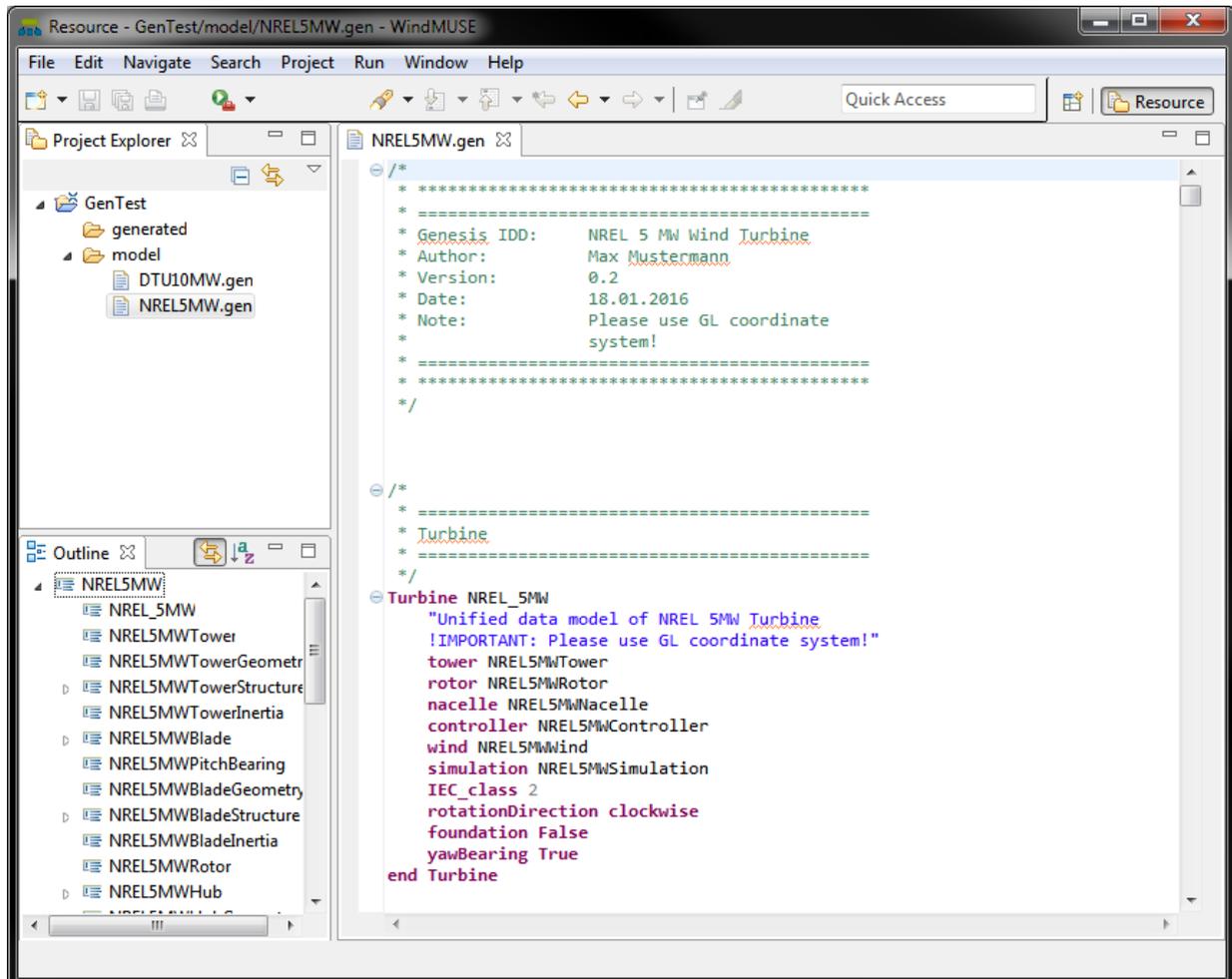


Abbildung 68: Definiertes Datenmodell innerhalb der WindMUSE IDE

Generierung der Inputdateien am Beispiel von Modelica

Um aus dem Datenmodell Inputdateien für Modelica zu generieren öffnet man das Kontextmenü der Hauptdatei, in der die Turbine definiert wurde. In dem vorliegenden Beispiel handelt es sich um die zuvor angelegte Datei *NREL5MW.gen*.

Anschließend wird als Ziel-Simulationstool Modelica ausgewählt. Im sich öffnenden Fenster hat man die Möglichkeit das Zielverzeichnis auszuwählen. Im Rahmen dieses Beispiels wird das Verzeichnis *generated* ausgewählt.

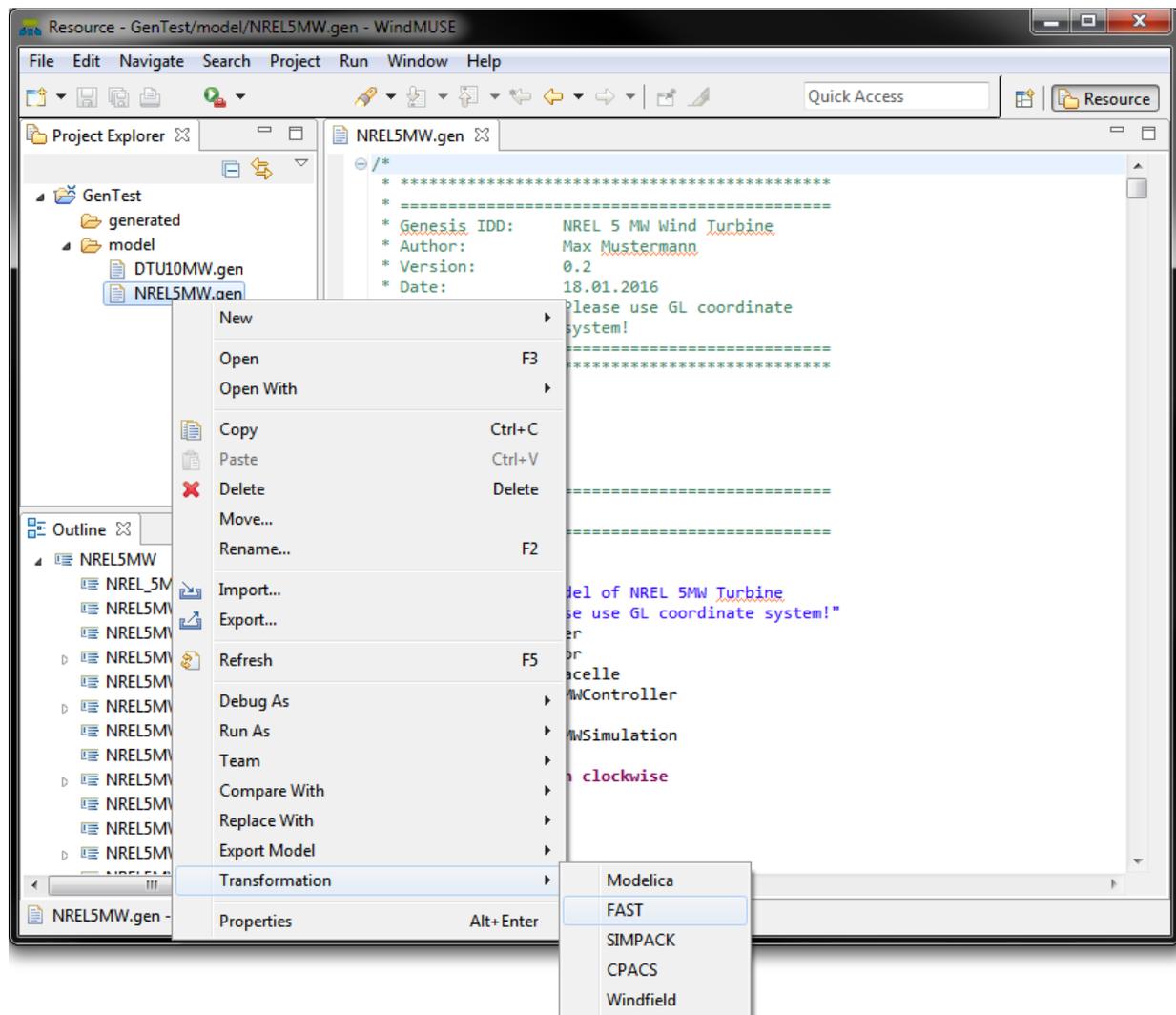


Abbildung 69: Transformation zu Modelica innerhalb der WindMUSE IDE

Die generierten Inputdateien wurden nun in das Unterverzeichnis *generated*, welches zuvor innerhalb des Projekts *GenTest* angelegt wurde, generiert. Die Generierung von Inputdateien für andere vom IDD unterstützte Tools erfolgt analog.

Simulation der generierten Inputdateien

Man hat zwei Möglichkeiten die Simulation durchzuführen. Zum einen kann im Transformationsprozess, im Tab Simulation, eine direkte Simulation durchgeführt werden, nachdem die Transformation abgeschlossen ist. Zum anderen kann man manuell zum Transformationsverzeichnis navigieren und die **.sim*-Datei mit Dymola öffnen.

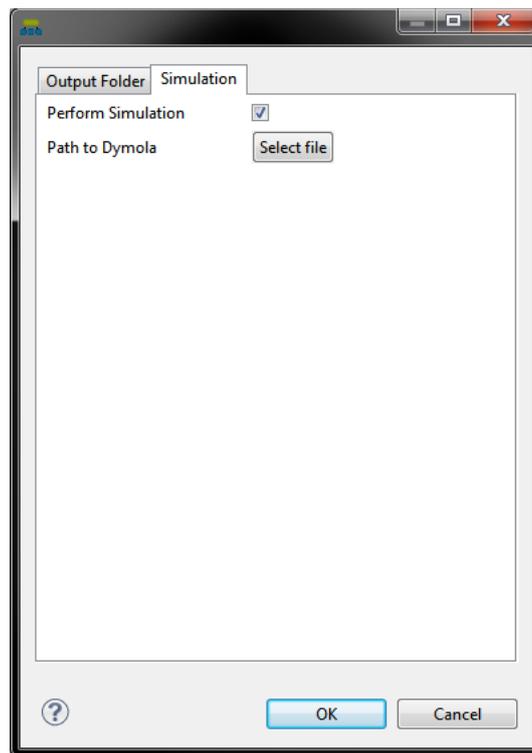


Abbildung 70: Simulation innerhalb der WindMUSE IDE

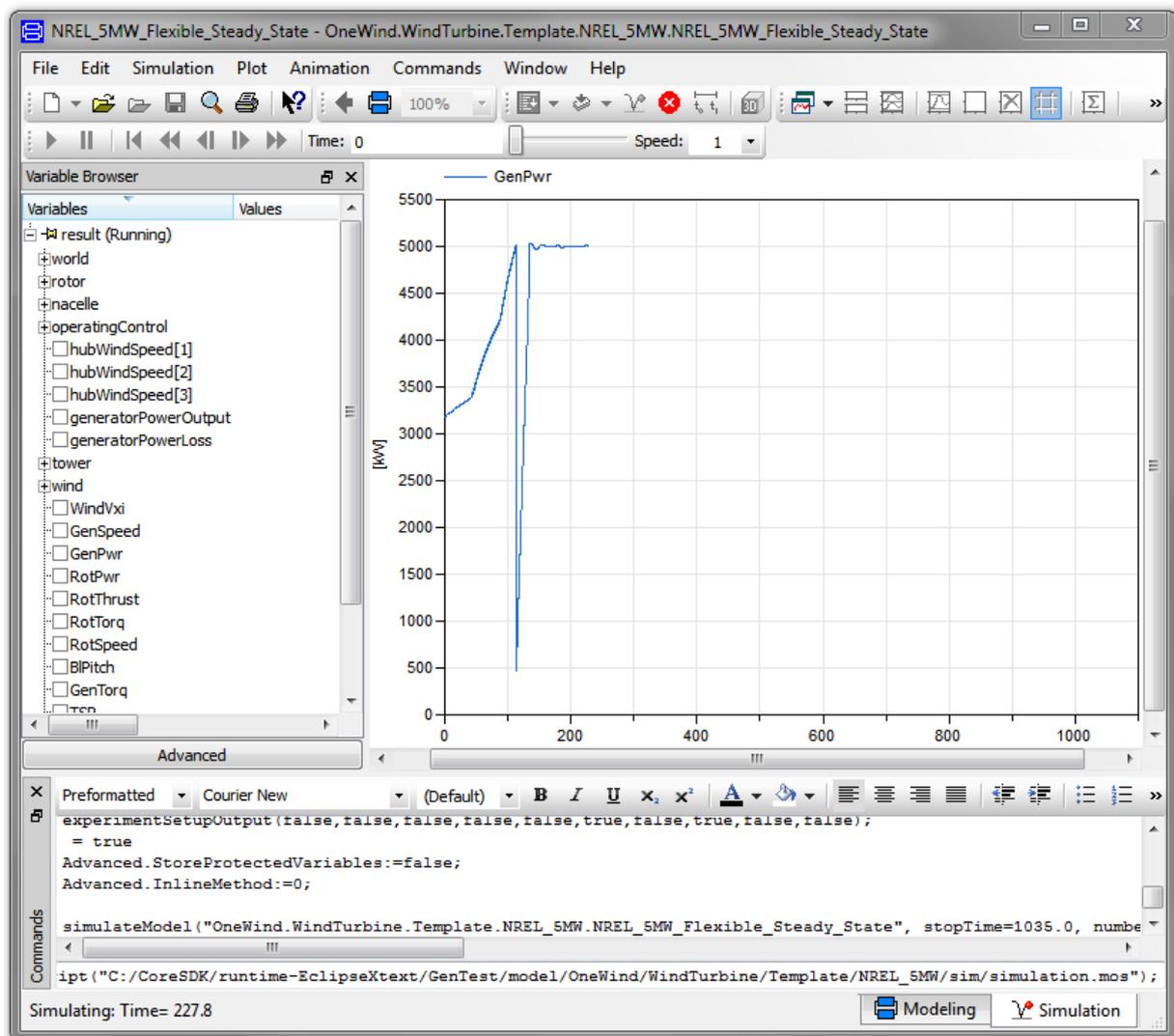


Abbildung 71: Simulation des generierten Modelica Modells in Dymola

WindMUSE IDE im Batch Modus

Neben der Möglichkeit Inputdateien innerhalb des WindMuSE-Editors zu generieren, wurde eine Möglichkeit geschaffen, den Editor im Batch-Modus zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass dessen Funktionalität innerhalb eines automatisierten Workflows, wie beispielsweise RCE, genutzt werden kann.

Für die Verwendung des Editors im Batch-Modus, müssen die entsprechenden Übergabeparameter, die dem Editor beim Aufruf übergeben werden, bekannt sein.

Parameter	Bedeutung
-application	Name des Packages, welches aufgerufen werden soll. Lautet immer <code>on.windmuse.application.windmuse</code> .

-consoleLog	Konsolenlog anzeigen.
-noExit	Anwendung nach dem Simulationsvorgang nicht beenden.
-noSplash	Den Splash Screen des Editors nicht anzeigen.
-i	Pfad zum IDD-Modell (*.gen-Datei).
-o	Verzeichnis, in welches die Inputdatei/en generiert werden soll/en.
-l	Name des Simulationstools (Möglichkeiten: fast, modelica, simpack).
-p	Pfad zur Properties-Datei (enthält simulationsspezifische Parameter).

Tabelle 15: Übergabeparameter für das Starten des WindMUSE IDE Batch-Modus

Der vollständige Batch-Befehl für Modelica sieht wie beispielsweise folgt aus:

```
WindMUSE.exe -application on.windmuse.application.windmuse -consolelog -noExit -noSplash -i Beispieldateien\NREL5MW.gen -o Beispieldateien\result -l modelica -p Beispieldateien\modelica.properties
```

Analog dazu werden die Batch-Befehle für die restlichen Tools aufgebaut.

1.4.3. Remote Component Environment (RCE)

Wie in Teil 1 Kap. 4.4 bereits beschrieben, ist RCE ein im DLR entwickeltes Simulationsframework zur automatisierten Ausführung von verteilten Simulationen. Die grafische Repräsentation eines Simulationsworkflows durch den integrierten Workflow-Editor erhöht die Transparenz und Nachvollziehbarkeit für das gesamte Team. Durch die Automatisierung der Simulationsworkflows, können Simulationsergebnisse jederzeit reproduziert und deren Entstehung nachvollzogen werden. RCE ist als Open-Source Software frei verfügbar und bildet die Basis der WindMUSE-Simulationsumgebung.

Über RCE kann nun der erste grundlegende Simulationsworkflow geladen und ausgeführt werden. Dazu sind folgende 3 Schritte notwendig:

- 1) Herunterladen und Entpacken von RCE (Version 7.1.5 wurde genutzt)
- 2) Herunterladen der Tool-Konfigurationen von FAST und OneWindGen vom WindMUSE-Server und Kopieren dieser ins RCE-Profilverzeichnis
- 3) Öffnen des RCE-Projekts „WindMUSE“ auf dem WindMUSE-Server

Abbildung 72 zeigt RCE nach der Integration aller bereits in WindMUSE verwendbaren Tool-Konfigurationen und nach Öffnen des RCE-Projekts „WindMUSE“.

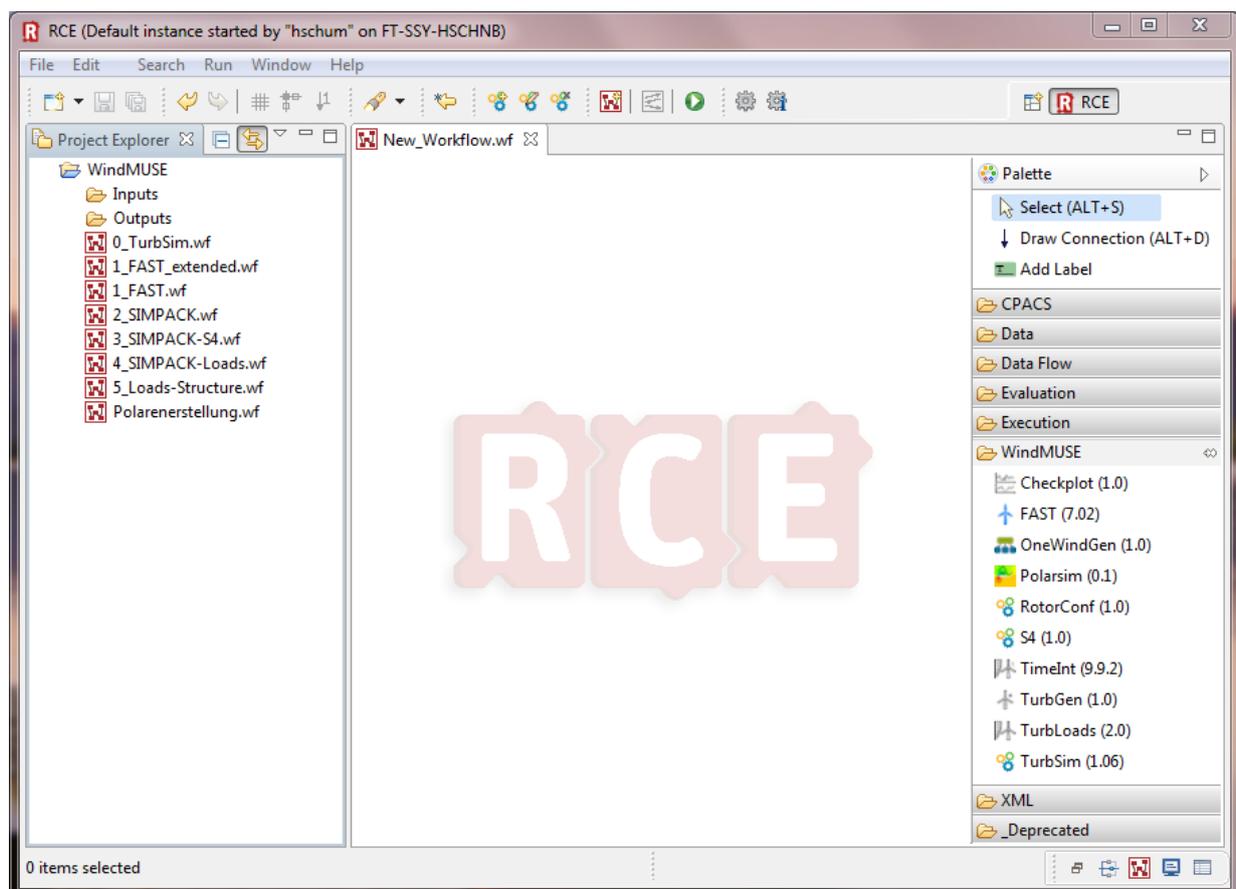


Abbildung 72: RCE mit integrierten Tool-Konfigurationen und geöffnetem Projekt "WindMUSE"

Simulationsworkflow *FAST*

Nach Laden des WindMUSE-Projekts, kann der erste grundlegende Simulationsworkflow im RCE-Workflow-Editor geöffnet werden. Abbildung 73 zeigt den Simulationsworkflow *FAST*. In diesem Workflow werden zunächst das oben erwähnte IDD-Datenmodell (*IDD_file*) und ein Parameter mit dem Namen des Simulationswerkzeugs (*output_tool*) eingelesen. Beides wird an den OneWind-Generator übergeben. Dieser erzeugt abhängig vom Parameter *output_tool* die Eingabedateien für das zu verwendende Simulationswerkzeug. In diesem Fall für das Werkzeug *FAST* von NREL (siehe Teil 1 Kap. 4.4). Die Eingabedateien werden durch das Python-Script *FileDispatch* so umbenannt, wie es der Aufruf des Simulationswerkzeugs erwartet. Es wird auch eine einfache Winddatei mit nicht-turbulentem Wind erzeugt, die alternativ durch eine andere Datei vom WindMUSE-Server ersetzt werden kann. In Tabelle 1 sind alle verfügbaren Winddateien bzw. –bedingungen aufgelistet.

Nun wird das Simulationswerkzeug (*FAST*) durch RCE gestartet und überwacht. Das Simulationsergebnis wird in Form einer Datei an das Python-Script *Smoother* übergeben, welches hier die Ergebnisdatenreihen über ein vorgegebenes Zeitintervall etwas glättet, da andernfalls aufgrund des hier verwendeten einfachen NREL Reglers, unrealistische kleine Sprünge in den Plots entstünden. Schließlich wird die leicht modifizierte Ergebnisdatei an ein weiteres Python-Script *Plotter* übergeben, welches die Plots der Ergebnisse erstellt. Dabei können die Ergebnisse einerseits gegenüber der Windgeschwindigkeit (*Wind speed*) geplottet werden bzw. diese zur Basis haben, und andererseits gegenüber der Simulationszeit (*Time*).

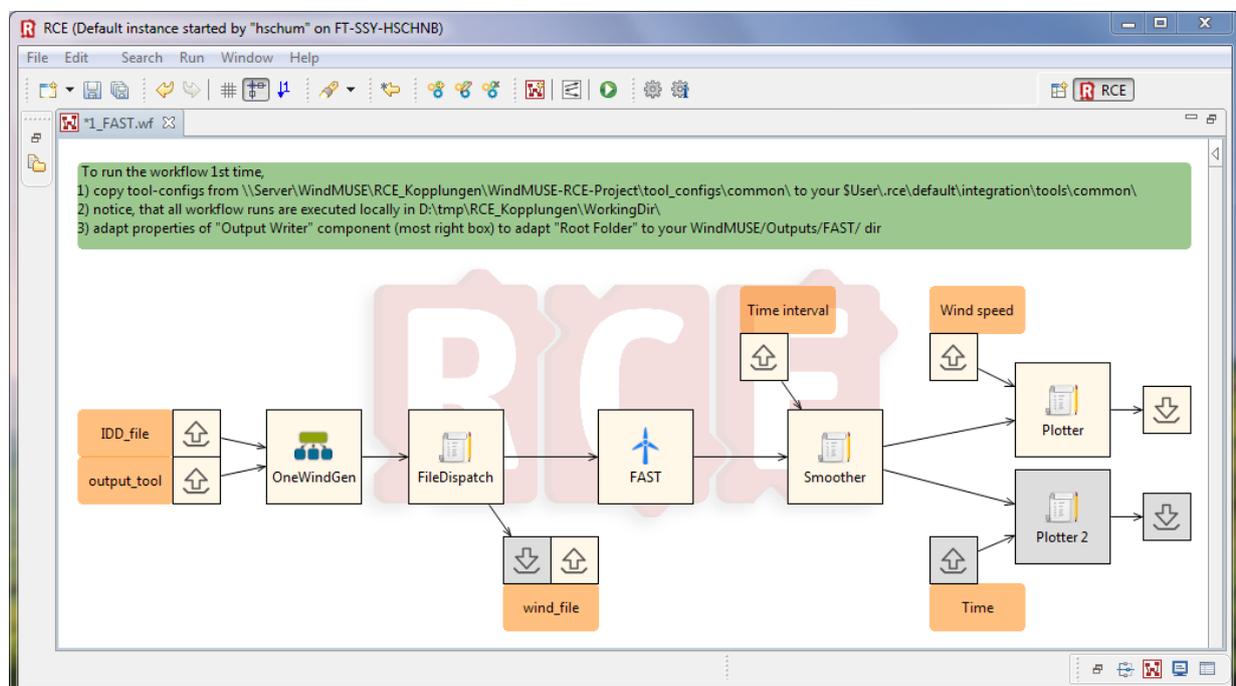


Abbildung 73: Simulationsworkflow *FAST* in RCE

Verifikation der Simulationsergebnisse

Um sicherzustellen, dass durch die Verwendung der allgemeinen Turbinenbeschreibung, des Eingabengenerators und des RCE Workflowmanagements keine Verfälschungen der Simulationsergebnisse entstehen, wurde die Simulation entsprechend der veröffentlichten Informationen von NREL [1] aufgesetzt. Dabei wurde die bereits genannte NREL-Turbine mit 5 MW Leistung, einer Turmhöhe von knapp 90 m und einer Blattlänge von 61,5 m abgebildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 74 dargestellt und entsprechen denen von NREL. Links ist für eine steigende Windgeschwindigkeit u.a. eine steigende Generatorleistung (GenPwr) bis zu 5 MW zu erkennen. Ab einer Windgeschwindigkeit von 11,4 m/s setzt wie erwartet die Pitch-Verstellung der Rotorblätter ein und beschränkt ein weiteres Ansteigen der Rotationsgeschwindigkeit. Auf der rechten Seite werden u.a. die Verbiegungen der Blattspitze und des Turmes dargestellt. Die Blattspitze verbiegt sich demnach um bis zu 6,5 m (OoPDefl1, Out-of-Plane Deflection) und der Turm um bis zu 0,5 m (TTDspFA).

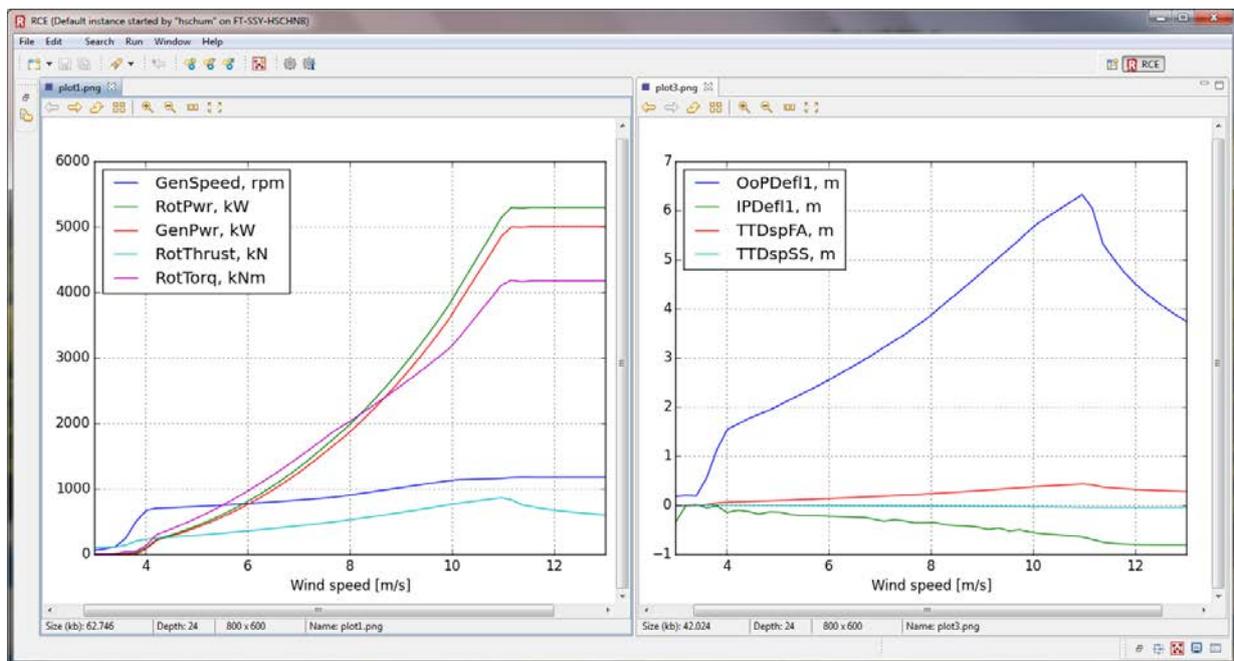


Abbildung 74: Ergebnisplots des Simulationsworkflows *FAST* entsprechen den NREL Ergebnissen

1.4.4. TurbGen und TurbLoads

TurbGen ist ein in Python geschriebener Generator für aeroelastische Simulationsmodelle von Windturbinen mit horizontaler Rotorachse, welcher im Wesentlichen auf Simpack, Ansys und Aerodyn basiert. Der Modellgenerator wurde mit dem vorrangigen Ziel entwickelt, die generierten Modelle nach der automatischen Erzeugung unmittelbar einer Lastenanalyse unterziehen zu können.

Zur Simulation einer Windturbinen im Rahmen einer Lastenanalyse sind grundsätzlich drei Hauptkomponenten erforderlich. Man benötigt jeweils eine Beschreibung der Struktur, der Aerodynamik und schließlich des Regelungssystems. In dieser Weise sind auch die von TurbGen generierten Modelle strukturiert, vergleiche Abbildung 75. Die Hauptkomponenten beinhalten wiederum eigene spezifische Substrukturen bzw. Modellkomponenten. Dies ist in besonderem Ausmaß bei der Struktur der Fall. Sie gliedert sich in die drei Substrukturen *SupportStructure*, *Nacelle* und *Rotor*, welche ebenfalls wieder untergliedert sind, wie auf der rechten Seite von Abbildung 75 dargestellt ist. Durch eine modulare Modellierungsstruktur ist es möglich, alle Komponenten ganz einfach per Drag & Drop durch neue Komponenten-Modelle zu ersetzen. Händische Anpassungen sind nicht mehr nötig. Auf diese Weise sind die von TurbGen generierten Modelle sehr einfach anzupassen, ohne dass tiefere Modellierungskennnisse erforderlich wären.

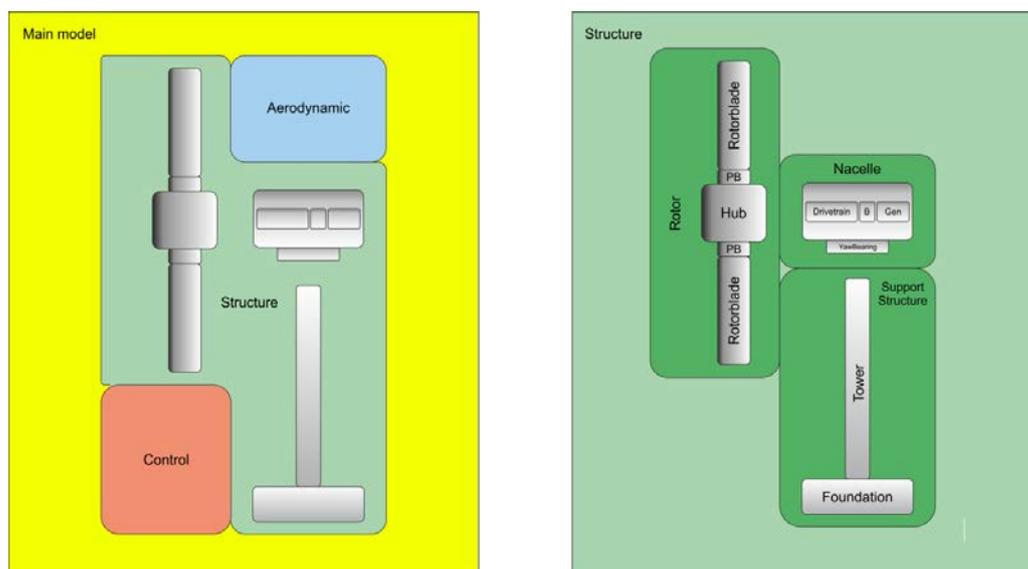


Abbildung 75 Allgemeine Strukturierung des Gesamtmodells (links) sowie der Struktur (rechts)

Die Beschreibung der Modellgeometrie dient als Grundlage für die gesamte Modellbeschreibung. Hierbei werden die charakteristischen Größen der globalen Anlagengeometrie sowie die Koordinatensysteme der starren und flexiblen Strukturen definiert. Die Geometrien der von TurbGen generierten Modelle weisen eine Reihe verschiedener charakteristischer Punkten auf, durch deren Vorgabe man einen Anlagenentwurf bis zu einem gewissen Grad spezifizieren kann. Diese Punkte, die jeweils die Vorgabe für einen Lee- bzw. Luvläufer enthalten, werden in Abbildung 76

schematisch dargestellt. Alle Winkel sind positiv abgebildet. Aus den charakteristischen Punkten lassen sich anschließend charakteristische Abstände und Winkel definieren. Neben den in der Abbildung dargestellten Konfigurationen können auch Punkte bei einer gelenkigen Nabe definiert werden.

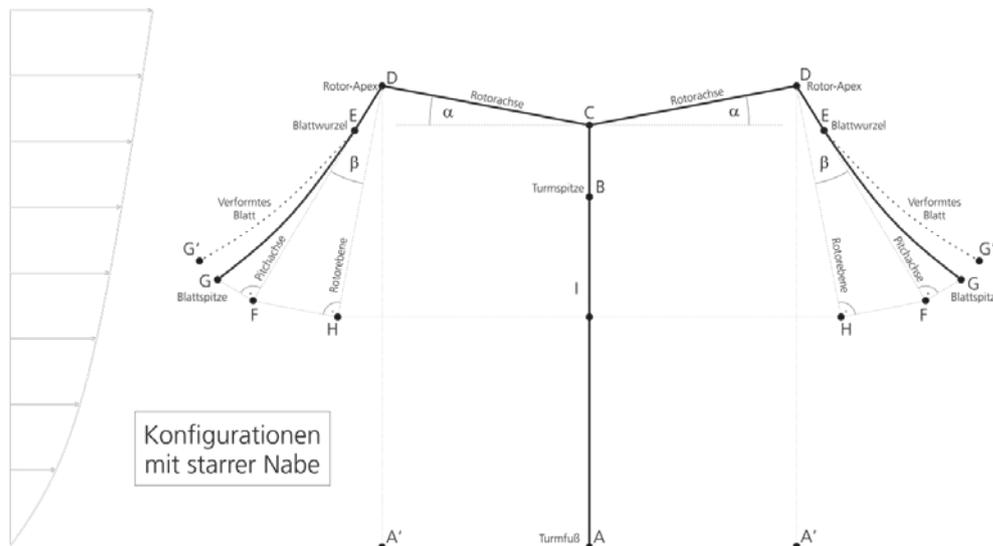


Abbildung 76 Globale Geometriedefinition für Konfigurationen mit starrer Nabe (links Luv- und rechts Leeläufer, jeweils nur ein Blatt dargestellt)

Ein von TurbGen erzeugtes Turbinenmodell weist neben den flexiblen Freiheitsgraden noch einige Freiheitsgrade der rein starren Struktur auf. Dies sind im Wesentlichen die Pitch-Freiheitsgrade, der Gier-Freiheitsgrad und schließlich die Rotation des Rotors. Die erzeugten Modelle sind Mehrkörpermodelle mit starren und flexiblen Elementen, wobei letztere auf modal reduzierte FE-Balkenmodelle basieren, welche wiederum in Ansys aufgebaut werden. Die Kopplung mit der Aerodynamik geschieht über das NREL Tool Aerodyn V13, hinter dem sich die klassische Blatt-Elemente-Impuls-Methode verbirgt.

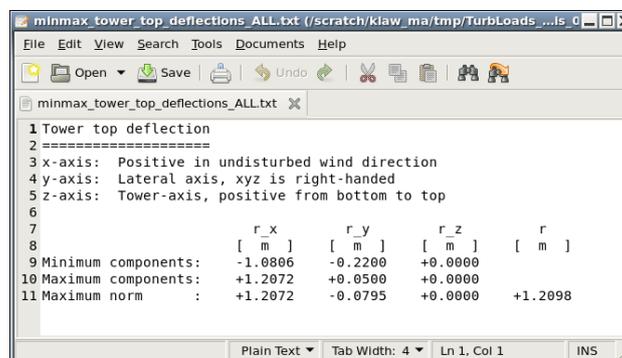
TurbGen verfügt über diverse Schnittstellen. So ist es etwa möglich, kompliziertere Rotorblatt-Modelle im CPACS Format einzulesen und zu verwenden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, FMU-Komponenten einzubinden. Dies ermöglicht es, Teilkomponenten des Gesamtmodells, etwa den Triebstrang oder den Pitch-Aktuator, extern detailliert aufzubauen und diese anschließend über das FMI-Interface in das Gesamtmodell zu integrieren, um sie anschließend in der Lastanalyse mitsimulieren zu können.

TurbLoads ist ein im Wesentlichen aus Python-Skripten bestehendes Tool, welches der Lastanalyse von Windturbinen-Modellen dient. Das Programm ist darauf zugeschnitten, Turbinenmodelle zu untersuchen, die von TurbGen generiert wurden, und sollte stets in dieser Kombination verwendet werden. Die Idee ist, zunächst ein Turbinenmodell mit TurbGen zu erzeugen, und dieses anschließend mit TurbLoads im Hinblick auf die zu erwartenden Lasten zu analysieren.

Das Programm besteht dabei im Wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden alle notwendigen Simulationen (welche stets mit Simpack durchgeführt werden) vorbereitet und durchgeführt. Hierrunter fällt etwa die Ableitung aller sich ergebenden Simulationsszenarien, die Bereitstellung aller benötigten Windfelder, die Aufbereitung der spezifischen Simulationsmodelle sowie schließlich die Ausführung der verschiedenen Zeitintegrationen. Im zweiten Teil werden die sich ergebenden Ergebnisdateien ausgewertet.

Das zentrale Konzept der Auswertung ist eine Gruppierung der vielen SubLoadCases. Die unterste Gruppe ist der einzelne SubLoadCase selbst, also eine einzelne Ergebnisdatei. Auf der nächsten Stufe werden alle SubLoadCases zusammengefasst, die zu einem LoadCase gehören. Auf der dritten und letzten Stufe schließlich, befinden sich alle SubLoadCases der betrachteten Analyse. In jeder Stufe wird nach dem minimalen und maximalen aufgetretenen Wert gesucht. Auf diese Art und Weise werden alle Auswertungen in TurbLoads vorgenommen. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in gleicher Weise. Es gibt jeweils Ergebnisdateien für den einzelnen SubLoadCase, es gibt solche für die LoadCases, und schließlich für die Gesamtanalyse.

Insgesamt wird diese Auswertemethode auf fünf Parameter angewandt: Schnittlasten an Turmfuß und –kopf sowie der Blattwurzel, Fatigue auf Grund der Schnittlasten, Knotenlasten am Rotorblatt, Turmfreigang und die Kinematik des Turmkopfes. Die einzelnen Ergebnisse werden je nach Parameter per Textausgabe (Abbildung 77) bzw. Grafik (Abbildung 78) dem Anwender zur Verfügung gestellt.



```
1 Tower top deflection
2 =====
3 x-axis: Positive in undisturbed wind direction
4 y-axis: Lateral axis, xyz is right-handed
5 z-axis: Tower-axis, positive from bottom to top
6
7
8           r_x      r_y      r_z      r
9 Minimum components:  [-1.0806  -0.2200  +0.0000  ]
10 Maximum components: [ +1.2072   +0.0500  +0.0000  ]
11 Maximum norm      :  +1.2072   -0.0795   +0.0000   +1.2098
```

Abbildung 77 Textausgabe zur Auswertung der kinematischen Vektoren

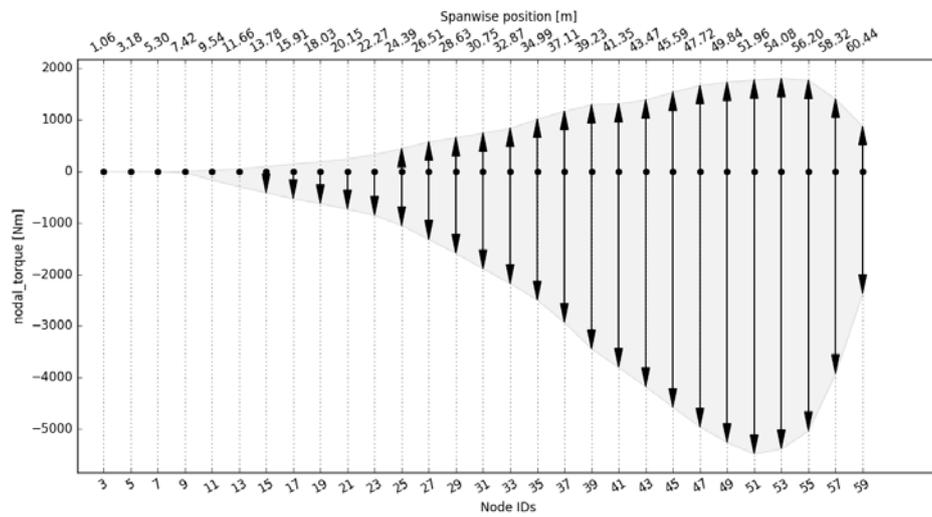


Abbildung 78 Grafik zur Darstellung des ermittelten Schnittlastverlaufs

1.4.5. Rotorsimulationstool S4

Projekthalt in WindMuSE war die Anpassung des bestehenden Rotorsimulationstools S4 an die Herausforderungen einer Windkraftanlagensimulation. So wurde die für Hubschrauberrotoren gültige Beschränkung von S4, nur mit konstanten Drehzahlen arbeiten zu können aufgehoben, da Windkraftanlagen mit variabler Rotationsgeschwindigkeit betrieben werden. Außerdem wurde das Einlesen von Windfelddaten, die in standardmäßig genutzten Dateiformaten vorliegen, ermöglicht. Darüberhinaus wurde S4 dahingehend modifiziert, dass der Einfluss des Turmvorbaus sowie der Bewegung der Rotornabe auf die Anströmung der Blattelemente berücksichtigt werden kann. Im Zuge einer allgemeinen Umstellung der Software-Architektur wurde der Betrieb von S4 ohne Nutzereingaben zur Laufzeit eingeführt und damit die Möglichkeit der Einbindung in RCE geschaffen.

Durch die Nutzung unkorrigierter 2D-Polaren der Profile und Berücksichtigung aller modellierten, das Profilverhalten beeinflussenden Effekte zur Laufzeit wird ein realistischeres aerodynamisches Verhalten, vor allem auch während des Anlaufvorganges, erwartet.

Zeitkontinuierliche und Drehzahlvariable Simulation

Bei den bisherigen Rotoren handelte es sich um Hubschrauberrotoren, die immer mit konstanter Drehzahl simuliert wurden. Das bisherige Simulationsergebnis beinhaltete lediglich die Beschreibung des Rotorverhaltens über eine Rotorumdrehung. Durch die zeitkontinuierliche Simulation werden die Ergebnisse für definierte Zeitreihen erstellt. Um die zeitkontinuierliche Simulation von Rotoren von Windenergieanlagen in S4 zu ermöglichen, waren umfangreiche Anpassungen und Erweiterungen in der Programmstruktur notwendig. Die Umstrukturierung ist weiterführend dafür notwendig, dass variable Rotordrehzahlen mit S4 simuliert werden können. Im nächsten Schritt können dann zeitabhängige Windfelder auf den Rotor aufgeprägt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Schritte kurz vorgestellt.

Änderung der referenzierten Variablen

Bisher wurden alle dimensionslosen Parameter auf die aktuelle Rotordrehfrequenz „Omega“ bezogen. Bei stehendem Rotor, würden dann Fehler entstehen, da durch Null dividiert wird. In allen Rotoren wurde daher eine Referenzdrehfrequenz „Omega_REF“ definiert, auf die die entsprechenden Parameter bezogen werden. Die neue Referenzierung der Simulationsgrößen ermöglicht die Simulation einer Drehfrequenz von Null (Ausnahme: Simulationen mit der S4-internen Strukturmechanik). Allerdings wird dadurch die Aussagekraft dimensionsloser Werte gegebenenfalls verzerrt. Die Größe Omega_Ref wird weiterführend auch für die Berechnung der Dauer eines Zeitschrittes verwendet. Die Dauer eines Simulationsschrittes ist gleich der azimutalen Schrittweite durch die Rotordrehfrequenz.

Aufzeichnung der Simulationsgrößen

Bei der zeitkontinuierlichen Simulation werden neue Größen eingeführt, die global zur Verfügung stehen. Die neuen S4-Variablen

- Time_Now (Simulationszeit)
- Step_Now (Zahl der durchgeführten Simulationsschritte)
- HalfStep_Now (Zahl der durchgeführten Runge-Kutta-Halbschritte)
- Psi_Blade1_Now (Azimutalwinkel des ersten Rotorblattes)
- Omega_Now (Drehzahl)
- OmegaP_Now (Rotationsbeschleunigung)
- Rev_Now (Zahl der vollen Umdrehungen des Rotors bis zum aktuellen Zeitschritt)

beschreiben den aktuellen Simulations- und Rotorzustand. Zusätzlich werden die vorherigen Werte von einigen Variablen zwischengespeichert, was durch die Endung „_Last“ kenntlich gemacht wird.

Randbedingungen für die Simulation mit variabler Drehzahl

Die bisher angesprochen Anpassungen ermöglichen lediglich eine zeitkontinuierliche Simulation mit konstanter Drehzahl. Um nun mit einer über der Zeit variablen Drehfrequenz zu simulieren müssen folgende Bedingungen der Simulationsumgebung erfüllt sein:

- Variable Drehzahl ist in S4 nur mit Simpack möglich. S4 alleine würde die Rotationsträgheit nicht berücksichtigen.
- In S4 muss Mehrblattrechnung ausgewählt sein, da die einzelnen Rotorblätter an den gleichen azimutalen Positionen unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten aufweisen können.
- Im Simpack-Modell muss definiert werden, wie sich die Drehfrequenz ergibt. Bei Windturbinen ergibt sich die Drehzahl aus dem Gleichgewicht von Aerodynamik, Rotorträgheit und Generator.
- Der Abwind muss zu jedem Zeitschritt neu gerechnet werden.
- Herkömmliche S4-Jobs können ggf. nur eingeschränkt genutzt werden, da diese immer die Auswertung einer vollständigen Rotorumdrehung verlangen, die bei konstanter Drehfrequenz durchgeführt wurde. Anpassungen um diese Einschränkung zu umgehen wurden bisher nicht durchgeführt.

Modifikation des Programmablaufs

Die Modifikation des Programmablaufs für die Simulation mit variabler Drehzahl besteht aus drei wesentlichen Änderungen. Zum einen musste eine neue Routine eingeführt werden, die vor den Aufruf der Zeitschrittrechnung geschaltet wurde. Diese neue Routine wird „S4Sim“ genannt. Die S4Sim ruft die Zeitschrittrechnung für einen einzigen Zeitschritt bzw. Ganzschritt auf. Nach diesem Zeitschritt überprüft die S4Sim, ob das Simulationsende erreicht wurde. Sobald das Ende

erreicht wurde, wird wieder das Hauptmenü aufgerufen, in dem der Benutzer einen neuen „Job“ auswählen kann (z.B. S4 beenden). Die S4Sim wird nur dann aufgerufen wenn der Job 4 „Simulate over a given amount of time“ aktiviert wird. Ansonsten wird die Zeitschrittrechnung direkt aufgerufen.

Bevor die S4Sim aufgerufen werden kann müssen die veränderlichen Simulationsparameter in einer vorgeschalteten Routine initialisiert werden. Diese setzt die Startwerte der neu eingeführten und im letzten Abschnitt aufgeführten Simulationsgrößen. Zusätzlich erfolgt eine Abfrage, ob mit variabler Rotordrehfrequenz simuliert werden soll, wenn S4 im interaktiven Modus betrieben wird. Des Weiteren wird kontrolliert, ob die Mehrblattberechnung und ein geeigneter Abwind aktiviert sind.

Die dritte wesentliche Änderung ist die Einführung einiger Update-Routinen, die den Rotorstatus nach jedem Halb bzw. Vollschritt aktualisieren. Dabei ist allerdings das gewählte Schrittverfahren zu berücksichtigen:

- 1 Step Verfahren: Die S4Step wird einmal für einen Vollschritt aufgerufen
- 2 Step Verfahren: Die S4Step wird zweimal für einen Vollschritt aufgerufen
- 4 Step Verfahren oder auch Runge Kutta Gill Verfahren. Nur für S4_Stand-Alone
 - (1) S4Step
 - (2) Aktualisierung der Zeit um einen Halbschritt, S4Step
 - (3) Erneutes aufrufen der S4Step bei gleichbleibendem Zeitpunkt
 - (4) Aktualisierung der Zeit zur Beendigung des Vollschrittes, S4Step

Während des Updatevorganges werden zwei wesentliche Dinge durchgeführt. Zunächst werden die Größen, die den Status der Simulation beschreiben (Nummer des Halbschrittes, Aktuelle Zeit, aktuelle Rotorposition) bestimmt. Danach werden alle Größen, die von der Zeit abhängen aktualisiert. Als Beispiel ist hier die Rotordrehfrequenz zu nennen. Ändert sich diese Größe, muss auch die Blattspitzengeschwindigkeit „U“ in jedem Zeitschritt aktualisiert werden. Es gibt aber noch weitere Größen, die sich über die Zeit verändern können.

Kopplung von S4 mit SIMPACK

S4 dient im Rahmen der Kopplung als reines aerodynamisches Berechnungstool, vergleichbar mit Aerodyn in der SIMPACK-Umgebung. Im Gegensatz zu Aerodyn wird S4 nicht als vom Benutzer definiertes Kraftelement in SIMPACK integriert. Stattdessen wird die sog. CoSim-Schnittstelle von SIMPACK verwendet, die Datenübertragung erfolgt dabei über das sog. IPC Interface (TCP/IP-Protokoll). Für die Simulation von Hubschrauberrotoren wurde die Schnittstelle bereits für einige Anwendungen verifiziert [25].

Bei der S4-SIMPACK-Simulation handelt es sich um eine sog. harte Kopplung, d.h. Daten werden zu jedem diskreten Zeitschritt zwischen beiden Programmen übertragen. S4 übergibt dabei die aerodynamischen Kräfte und Momenten an den diskreten aerodynamischen Aufpunkten an SIMPACK und erhält deren Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigen sowohl rotatorisch als auch translatorisch. Nach momentanem Stand handelt S4 dabei als Master. Zwar wird die CoSim-

Schnittstelle von SIMPACK zur Datenübertragung über das TCP/IP-Protokoll verwendet, streng genommen handelt es sich aber um keine Co-Simulation, da nur der SIMPACK-Löser verwendet wird (bei einer Co-Simulation werden die Löser beider Programme parallel genutzt). In Abbildung 79 ist der Ablauf einer typischen Trimmrechnung einer Hubschraubersimulation zur Veranschaulichung der harten Kopplung dargestellt: S4 errechnet an jedem Zeitschritt die Kräfte und Momente (\mathbf{f}) und übergibt sie an SIMPACK, das die Bewegungsgleichungen löst und die neuen Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (\mathbf{x}) an S4 übergibt. Nach einem Umlauf werden die gemittelten Gesamtkräfte ins stehende System übertragen (FCT) und nach Abgleich mit den Sollwerten ggf. neue Steuereingaben ermittelt.

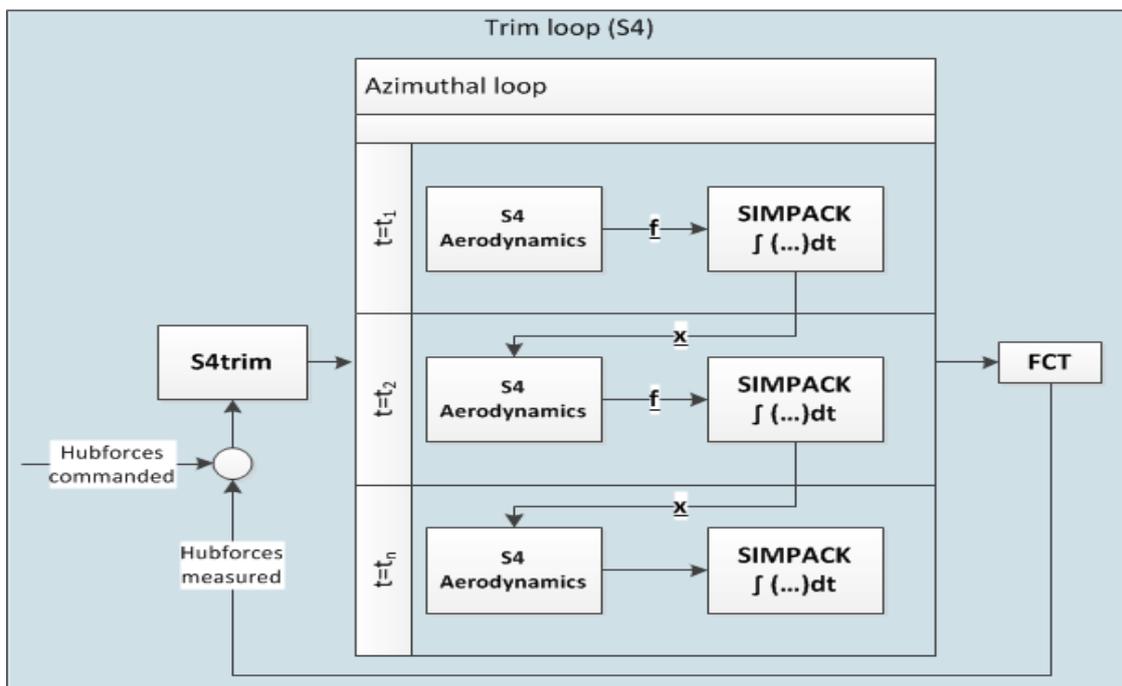


Abbildung 79: Schematische Darstellung einer Trimmrechnung

Schnittstelle

Für die Nutzung der SIMPACK-Modelle in der Kopplung muss man diese mit der Kopplungsschnittstelle für S4 ausstatten. Dies betrifft keine Änderungen in der strukturdynamischen Modellierung, sondern bezieht sich auf zusätzliche SIMPACK-spezifische Elemente wie z.B. y-outputs und u-inputs zur Datenübertragung über die CoSim-Schnittstelle, Sensoren zur Messung der Blattbewegung oder Kraftelemente, die die in S4 ermittelten aerodynamischen Kräfte und Momente repräsentieren. Da die manuelle Erstellung dieser Schnittstelle sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist, wurde mit Hilfe der in SIMPACK integrierten Programmiersprache QtScript ein Skript erstellt, welches die Erstellung dieser Schnittstelle automatisiert. Dieses Skript wird über die ausführbare Datei Rotor_Configurator.exe aufgerufen. Da sich im Laufe des Projektes der Aufbau der SIMPACK-Modelle, mit denen gekoppelt wurde, mehrfach änderte, musste auch der Rotor_Configurator anfangs mehrfach angepasst werden. Um diese Anpassungen unnötig zu ma-

chen, wurde ein Schnittstellendokument aufgesetzt, in dem Standardbenennungen und Koordinatensystemausrichtungen für wichtige Modellelemente festgelegt wurden.

Auf der Seite von S4 müssen folgende Dateien im gleichen Pfad wie die s4.exe liegen: S4.INP, S4_WEA.DAT und runcosim.bat. Die S4.INP ist die Haupteingabedatei. Wichtig sind in dieser vor allem die Angabe der Rotor-Kennziffer und die Eingabe unter dem Punkt Blattdynamik (2 entspricht hier der Kopplung mit SIMPACK). Außerdem werden in dieser Datei die Drehzahl (bei Simulation mit fester Drehzahl) und die Windgeschwindigkeit festgelegt. In der S4_WEA.DAT können für Windenergieanlagen relevante Daten eingegeben werden. In der runcosim.bat muss der Pfad zu der jeweiligen SIMPACK Installation gesetzt sowie die SIMPACK-Datei für die Kopplung angegeben werden.

Ergebnisse der Kopplung für die NREL 5MW Anlage

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von gekoppelten S4-SIMPACK-Rechnungen mit der NREL 5MW Referenzturbinen vorgestellt und mit den von NREL veröffentlichten Ergebnissen verglichen. Anschließend wird ein Vergleich mit Rechnungen unter Nutzung der SIMPACK-Struktur und der aerodynamischen Beschreibung durch AeroDyn gezeigt. Dazu wurden Windgeschwindigkeiten von 3 bis 25 m/s mit einer Schrittweite von 1 m/s berücksichtigt. Die gezeigten Ergebnisse wurden noch mit der S4-Version ohne Drehzahlvariabilität erstellt. Für die gekoppelten Rechnungen wurde daher die Drehzahl ebenso wie der Blatteinstellwinkel von S4 vorgegeben und die im SIMPACK-Modell vorhandenen Regler ausgeschaltet. Durch die feste Vorgabe der Drehzahl am Rotor ist ebenfalls die Nutzung des Generatormodells in SIMPACK nicht möglich. Folglich werden in diesem Abschnitt keine Ergebnisse für Generatorleistung, Generatorleistung und Generatordrehmoment präsentiert.

Periodisch wirkende Anregungen durch die Schwerkraft führen dazu, dass auch im eingeschwungenen Zustand der Anlage noch Schwankungen in interessierenden Ausgangsgrößen auftreten. Wo dies der Fall ist, werden die Mittelwerte der eingeschwungenen Lösung verwendet. Für den Rechenfall von 3 m/s konnte keine stationäre Lösung gefunden werden, da die Abwindbeschreibung in S4 zwischen dem Windmühlenstadium und dem Wirbelringstadium wechselte und daher sich dauerhaft ändernde Abwindgeschwindigkeiten berechnete. In den dargestellten Ergebnissen fehlt folglich der erste Datenpunkt für die gekoppelten S4-SIMPACK-Rechnungen.

Vergleich mit den NREL-Ergebnissen

In Abbildung 80 werden die Ergebnisse für Rotorleistung, Rotorschub und Drehmoment am Rotorkopf über der Windgeschwindigkeit gezeigt. Die jeweilige Einheit der Daten ist der Legende zu entnehmen. Im nicht einstellwinkelgeregelten Bereich bis zur Windgeschwindigkeit von 11 m/s wird von der S4-Aerodynamik ein erhöhtes Drehmoment und folglich auch eine höhere Leistung berechnet. Der Schub stimmt in diesem Bereich sehr gut überein. Im Bereich hoher Windgeschwindigkeiten wird auf die Rotorleistung getrimmt. Daher stimmen diese und das Drehmoment genau mit den NREL-Daten überein. Im Schub tritt eine etwa konstante Abweichung von -3% auf.

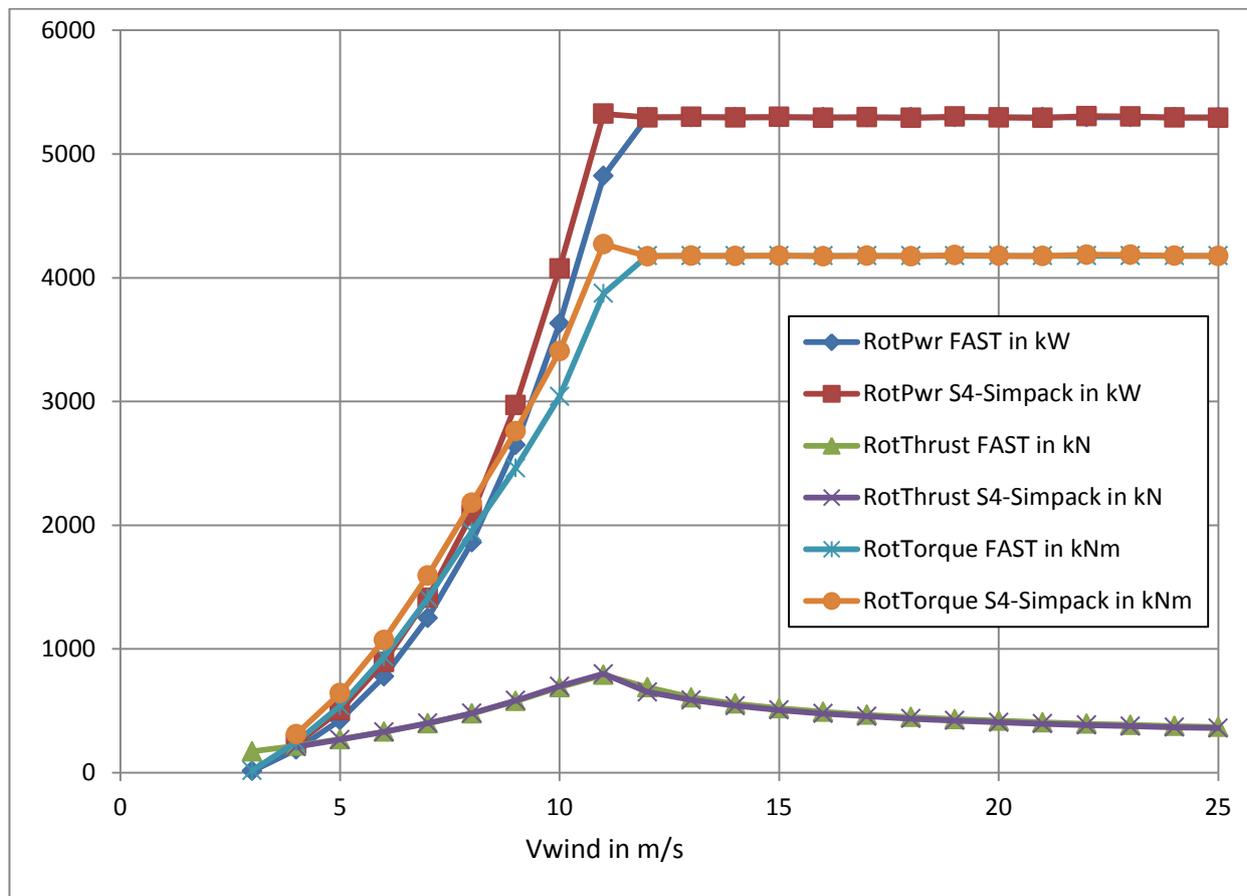


Abbildung 80: Vergleich von Leistung, Schub und Drehmoment zwischen FAST und S4-SIMPACK

In Abbildung 81 sind die Blatteinstellwinkel über der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Zu höheren Geschwindigkeiten nimmt die Abweichung zu, wobei der in S4-SIMPACK benötigte Winkel geringer ist.

Abbildung 82 zeigt die Blattspitzenauslenkungen aus der Rotorebene und in der Rotorebene sowie die Auslenkungen der Turmspitze. Die Auslenkung der Turmspitze zur Seite ist bei beiden Simulationsumgebungen vernachlässigbar. In Rotorachsrichtung liegen die Abweichungen der Auslenkungen im Geschwindigkeitsbereich bis 11 m/s bei 7,5%. Darüber liegen sie konstant unter 3,5%.

Die Blattspitzenauslenkungen in beide Richtungen weisen für zunehmende Windgeschwindigkeiten immer höhere Abweichungen auf, wobei die relativen Abweichungen korrelieren.

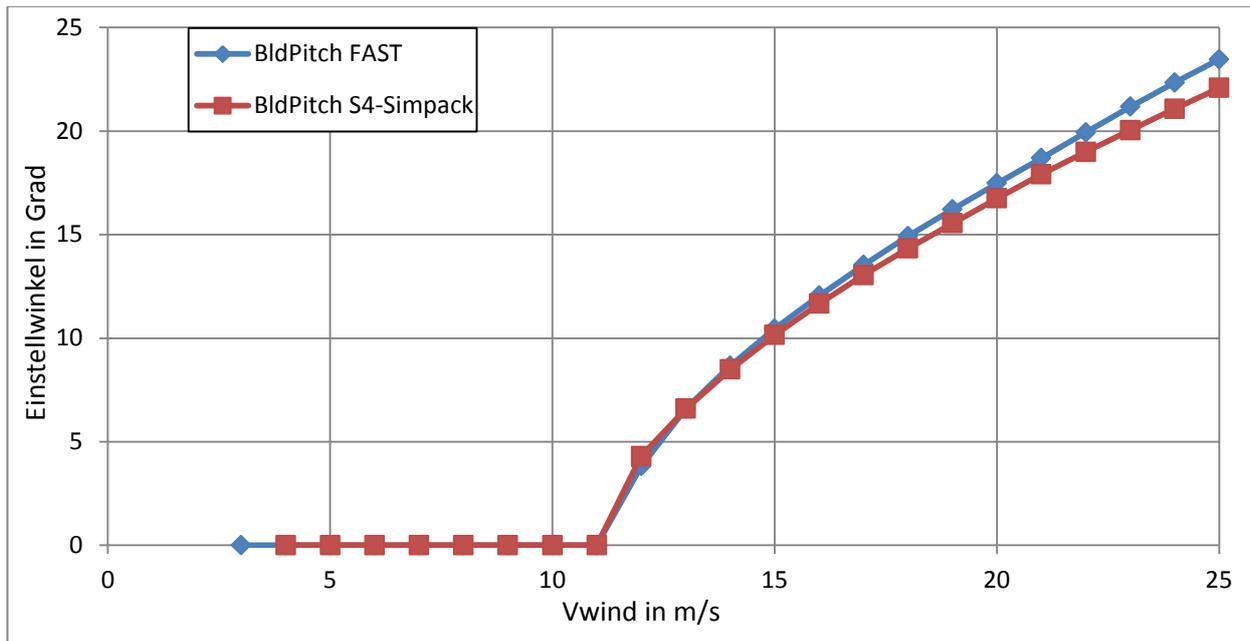


Abbildung 81: Vergleich der Blatteinstellwinkel zwischen FAST und S4-SIMPACK

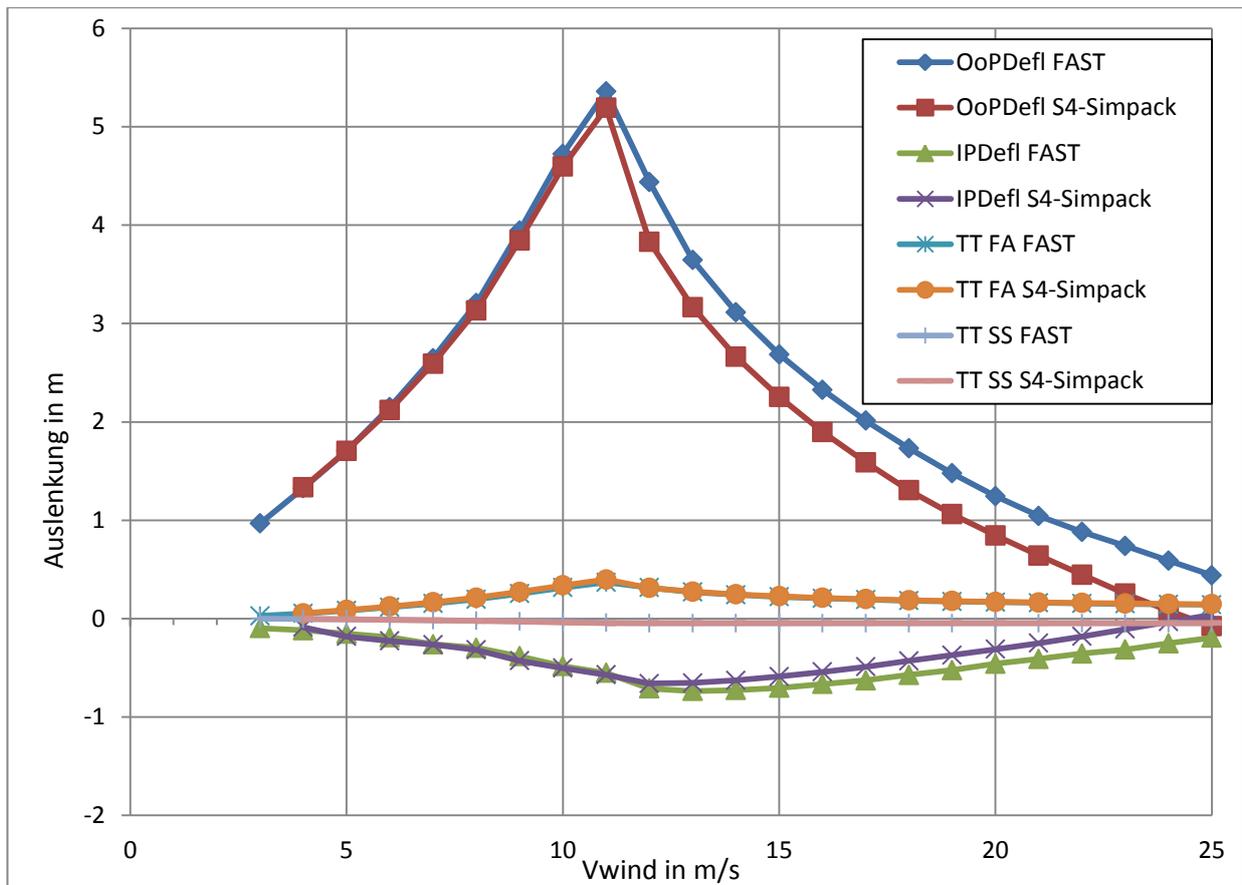


Abbildung 82: Vergleich der Blattspitzen- und Turmauslenkungen zwischen FAST und S4-SIMPACK

Vergleich mit den SIMPACK-AeroDyn-Ergebnissen

Die in Abbildung 80 aus dem letzten Abschnitt gezeigten Ausgangsgrößen stimmen bei Berechnung in FAST und mit SIMPACK-AeroDyn sehr gut überein, weshalb eine Darstellung dieses Diagramms keine neuen Erkenntnisse liefern würde. Allerdings wurde bei den Rechnungen in SIMPACK ebenfalls ein geringerer Einstellwinkel zum Erreichen der Nennleistung benötigt, wie in Abbildung 83 gezeigt ist. Das lässt sich damit erklären, dass durch die Beschreibung der Strukturmechanik in SIMPACK im Vergleich zum FAST-Modell der Torsionsfreiheitsgrad freigegeben ist. Dadurch kommt es zu einer Verdrillung des Blattes und damit zu höheren Einstellwinkeln an den Blattelementen. Für eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s beispielsweise sind an der Blattwurzel 16,75 Grad Einstellwinkel eingesteuert und am letzten aerodynamischen Element entsteht ein Einstellwinkel von 18,5 Grad. Damit ist der Einstellwinkel dort ein Grad größer als bei den FAST-Rechnungen. Durch die elastische Verformung des Blattes ist daher ein geringerer Winkel an der Blattwurzel nötig.

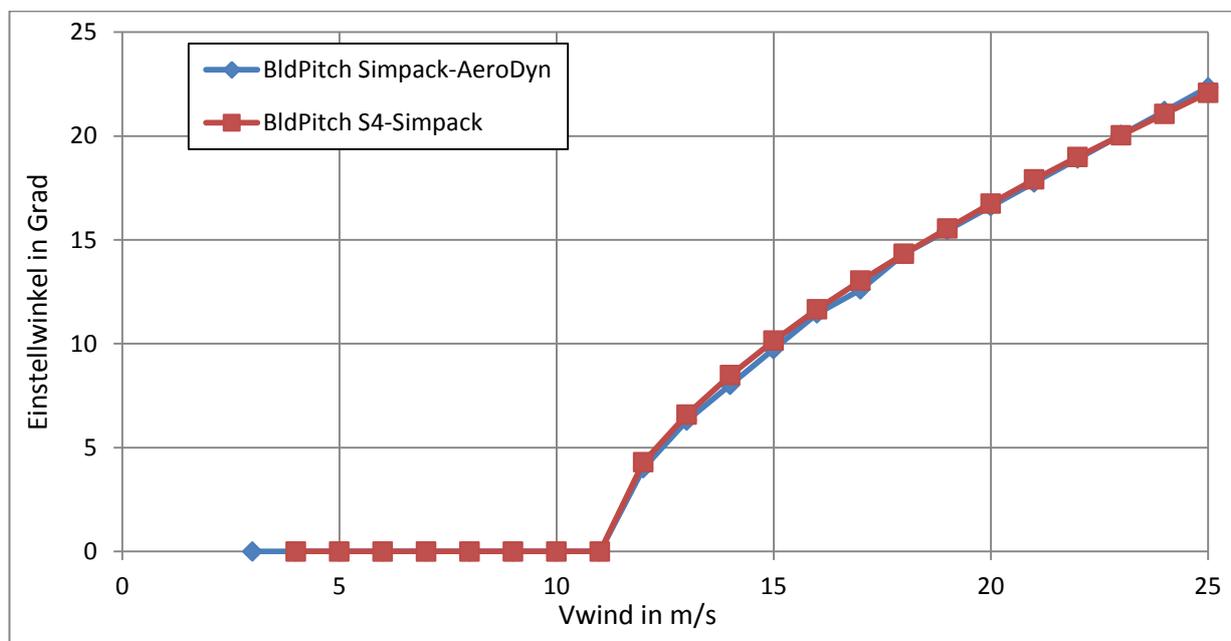


Abbildung 83: Vergleich der Blatteinstellwinkel zwischen SIMPACK-AeroDyn und S4-SIMPACK

Die Auslenkungen der Turmspitze in Abbildung 84 stimmen wie auch schon beim Vergleich mit den FAST-Rechnungen sehr gut überein. In der Schlagauslenkung bzw. der Auslenkung aus der Rotorebene heraus ist im Bereich bis 11 m/s eine noch bessere Übereinstimmung als mit den FAST-Ergebnissen erkennbar. Bei höheren Geschwindigkeiten treten größere Abweichungen auf, wobei die Abweichungen allerdings kleiner sind als im Vergleich zu FAST-Rechnungen und zu höheren Geschwindigkeiten auch wieder abnehmen.

Im Verlauf der Auslenkung der Blattspitze in der Rotorebene treten nicht nur größere Abweichungen des Wertes, sondern auch im qualitativen Verlauf auf. So ist die Auslenkung bei den S4-SIMPACK-Rechnungen für alle Windgeschwindigkeiten negativ, mit der größten Auslenkung bei

12 m/s. Dieser Verlauf ist auch das Ergebnis von Rechnungen mit FAST. In den SIMPACK-AeroDyn-Rechnungen hingegen sind die Auslenkungen im Bereich unterhalb der Nennleistung leicht positiv und wechseln danach das Vorzeichen, sodass die größte Auslenkung bei 15 m/s auftritt. Für hohe Windgeschwindigkeiten gleichen sich die Auslenkungen wieder an. Hier ist anzumerken, dass die S4-SIMPACK-Rechnungen mit einer anderen .fbi-Datei zur Beschreibung der Information des flexiblen Blattes durchgeführt wurden als für SIMPACK-AeroDyn. Für die letztgenannte Variante wurde die fbi-Datei mit Hilfe des SIMPACK-eigenen Rotorblade Generators erstellt. Da bezüglich der Zuverlässigkeit dieses Tools Zweifel bestanden und laut einer Ausgabe des SIMPACK-Lösers keine Zentrifugallasten in der erstellten Datei vorhanden waren, wurde eine zweite Datei mit Hilfe von ANSYS generiert. Für die Erzeugung der hier präsentierten Ergebnisse mit S4-SIMPACK wurde diese Datei verwendet. Bei Nutzung der ursprünglichen Datei in den gekoppelten Rechnungen tritt ebenfalls im Bereich niedriger Geschwindigkeiten eine positive Auslenkung der Blattspitze in der Rotorebene auf.

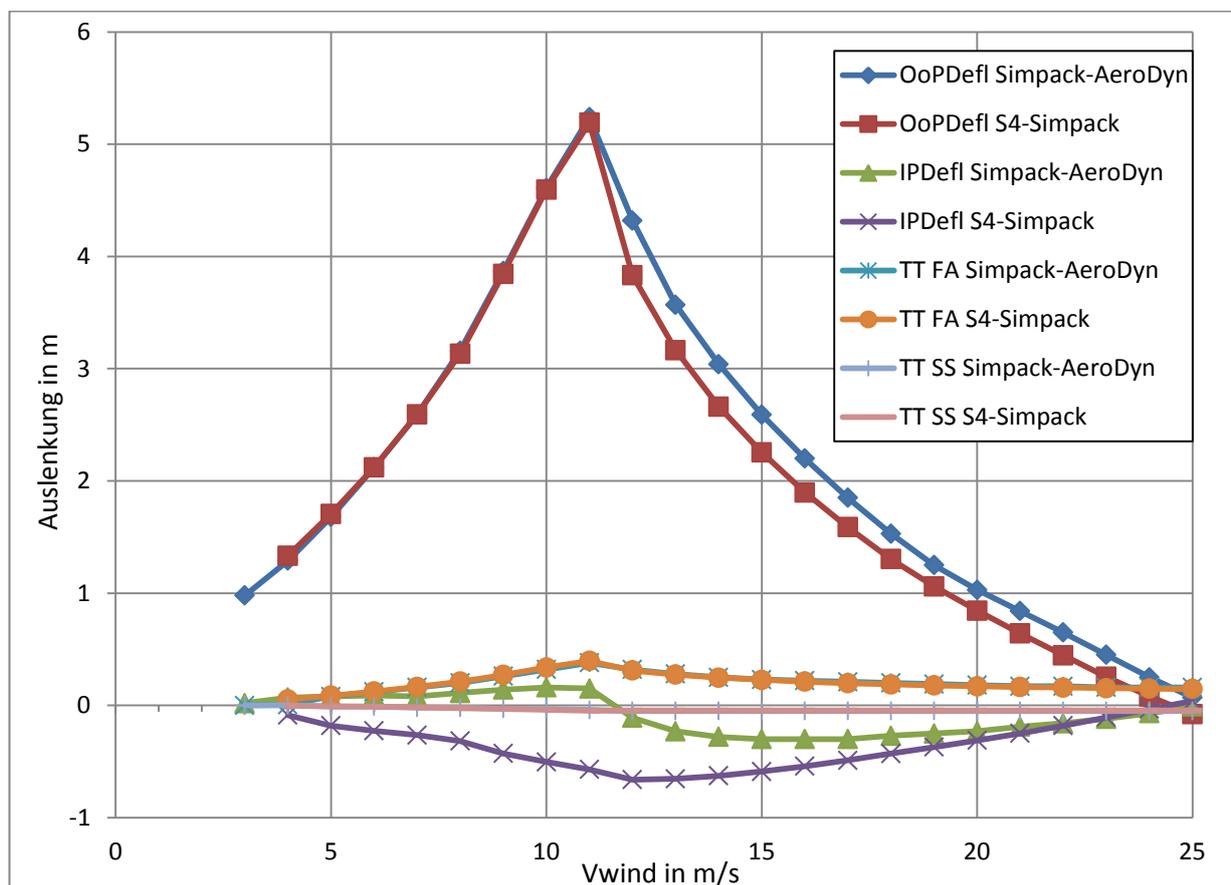


Abbildung 84: Vergleich der Blattspitzen- und Turmauslenkungen zwischen SIMPACK-AeroDyn und S4-SIMPACK

Simulationsworkflow SIMPACK-S4

Der SIMPACK-S4 RCE Workflow erlaubt die parallele Ausführung einer SIMPACK-AeroDyn- und einer SIMPACK-S4-Simulation mit vorheriger Erstellung des zugehörigen Windturbinenmodells. In Abbildung 85 ist die grafische Repräsentation des Workflows in der RCE GUI gezeigt. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf Eingabedaten und Ausgabe des Workflows sowie die verwendeten Tools eingegangen.

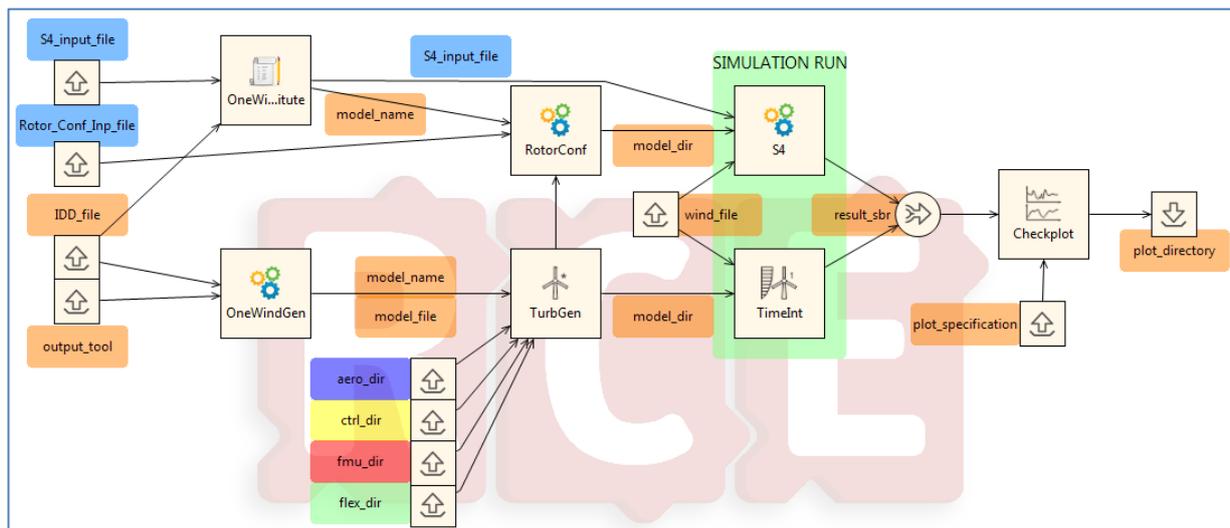


Abbildung 85: SIMPACK-S4 Workflow in RCE

Eingabedaten

Die nur für die Simulation mit S4 benötigten Eingabedateien sind in Abbildung 85 blau gekennzeichnet. Bei der ersten Datei handelt es sich um eine Referenz-Eingabedatei S4_input_file, in der Simulationsparameter für S4 festgelegt werden. Die zweite Eingabedatei, in der Abbildung als Rotor_Conf_Inp_file bezeichnet, ist die Konfigurationsdatei für das SIMPACK Skript Rotor_Configurator.

Das Tool OneWindGen benötigt die Eingabedaten IDD_file und output_tool. Das IDD_file ist das im Laufe des Projektes festgelegte Ingenieursdatenformat und enthält Informationen über die zu erstellende Anlage. Mit dem zweiten Input gibt man OneWindGen an, für welches Ziel-Tool der Generator die erforderlichen Dateien erstellen soll.

Der im unteren Teil von Abbildung 85 zu sehende Block von Eingabe-Ordern wird für die Erstellung des SIMPACK-Modells mit TurbGen benötigt.

Etwa in der Mitte der Workflow-Darstellung ist die Eingabedatei wind_file zu sehen. Diese Datei ist optionaler Input für die beiden nachfolgenden Tools. Wenn keine Datei mit Winddaten angegeben wird, werden die in der S4- bzw. Aerodyn-Eingabedatei angegebenen Standardwerte genutzt.

Mit der Eingabedatei `plot_specification` wird ein Projekt des SIMPACK-Auswertetools SIMPACK-Post übergeben. In der Datei sind Informationen über die in den Diagrammen darzustellenden Ergebniskanäle der SIMPACK-Rechnung abgelegt.

Ausgabe

Die Ausgabe des workflows besteht aus zwei Ordnern, die in Abbildung 85 mit `plot_directory` bezeichnet sind. In diesen Ordnern liegen die Ausdrücke der Diagramme mit den wichtigsten Informationen zum Zeitverhalten der Windenergieanlage, die man vorher in der `plot_specification` festgelegt hat. Diese Diagramme werden für beide Simulationsläufe erstellt.

Verwendete Tools

Das erste verwendete Werkzeug ist der OneWind Generator. Dieser erzeugt mit Hilfe der IDD die Eingabedaten für das gewünschte Ziel-tool. Die möglichen Konfigurationen sind in Abschnitt 1.4.2 zu finden. Im Falle dieses Workflows werden die Daten für SIMPACK erzeugt.

Das nachgeschaltete Tool TurbGen erzeugt mit Hilfe von Python- und SIMPACK-Skripten das SIMPACK-Modell der Windenergieanlage. Details zu den abbildbaren Modellvarianten und den Nutzungsvoraussetzungen sind auf Anfrage verfügbar.

Das so erzeugte Modell wird zum einen an die Zeitintegration in SIMPACK weitergereicht, in Abbildung 85 mit `TimeInt` bezeichnet. Andererseits findet eine Übergabe des erzeugten Modells an den Rotor_Configurator statt. Bei diesem handelt es sich ebenfalls um ein SIMPACK-Skript, das auf Grundlage vordefinierter Schnittstellendefinition die Aerodynamik-Schnittstelle für die Co-Simulation von S4 mit SIMPACK erstellt. Die Definition der Schnittstelle ist auf Anfrage verfügbar. Im Vorfeld der Ausführung des SIMPACK-Skripts wird die vorgefertigte Eingabedatei `Rotor_Conf_Inp_file` an die erstellte Konfiguration angepasst. Das mit der Schnittstelle ausgestattete Modell wird an die S4-Rechnung weitergegeben.

Im Block `OneWindSubstitute`, in der grafischen Repräsentation des Workflows oben links dargestellt, wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Generierung der Eingabedateien für S4 aus dem IDD mit Hilfe des OneWindGen noch nicht umgesetzt ist. Daher wird hier eine vorgefertigte Haupteingabedatei für S4 an die ausgewählte Konfiguration angepasst. Der momentan integrierte Funktionsumfang umfasst die Wählbarkeit der aerodynamischen Blattbeschreibung der NREL- oder DTU-Anlage sowie die Wählbarkeit der Blattanzahl und Anzahl der aerodynamischen Aufpunkte. Außerdem sind alle Änderungen im SIMPACK-Modell, die die aerodynamische Konfiguration der einzelnen Blätter nicht ändern, automatisch über die Änderung des angekoppelten MBS-Modells berücksichtigt. Die angepasste Eingabedatei wird an den S4-Block weitergereicht.

Im S4-Block wird eine S4-Rechnung gestartet, die wiederum die Co-Simulation mit dem übergebenen SIMPACK-Modell aufruft. Es kann entweder ein in der S4-Haupteingabedatei eingetragener konstanter Wind genutzt werden, oder die Windinformationen aus einem optional übergebenen Windfile ausgelesen werden. Eine Übersicht der unterstützten Dateiformate und deren Aufbau ist auf Anfrage erhältlich.

Die von SIMPACK erstellte, binäre Ergebnisdatei wird nach Abschluss der SIMPACK-AeroDyn- und der SIMPACK-S4-Rechnung an das Tool Checkplot weitergeleitet. In diesem werden, basierend auf der Spezifikation der zu erstellenden Diagramme in der `plot_specification`, Ausdrücke der interessierenden Zeitverläufe angefertigt und in einem Ergebnisordner abgelegt.

1.4.6. CFD-Kopplung zwischen TAU und S4

Ein Ziel des Projektes WindMUSE war die Fluid-Struktur-gekoppelte Simulation von Windenergieanlagen unter Berücksichtigung der aeroelastischen Verformung sowie der Trimmung. Dazu sollte eine Schnittstelle zwischen dem Rotoräeromechanikcode S4 und dem kompressiblen CFD-Code (Computational Fluid Dynamics) TAU etabliert werden. Im Folgenden wird zunächst die Schnittstelle beschrieben und anschließend die Validierung sowie die Anwendung an der Windenergieanlage aufgezeigt.

1.4.6.1. Beschreibung der Schnittstelle TAU-S4

Am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik (AS) existiert für den Strömungslöser TAU bereits eine lose Fluid-Struktur-Trim-Kopplung zu anderen Rotoräeromechanikcodes wie z.B. HOST und GHOST. Dafür ist in TAU bereits eine einheitliche Schnittstelle zum Datenaustausch angelegt worden, auf der die Kopplung zu S4 aufbaut.

Bedingt durch die Architektur der Kopplung wurde die Schnittstelle als weiteres Rotoräeromechanik-Plugin in die Kopplung integriert. Aktuell ist für S4 keine direkte Speicherschnittstelle vorgesehen, sodass alle Daten mit der Kopplung über eine Datei ausgetauscht werden müssen. Als Datenformat wurde XML ausgewählt. Es ist menschenlesbar und kann dadurch besser auf Fehler überprüft werden. Darüber hinaus kann man in der XML-Datei dieselbe Hierarchie ablegen wie die Elemente aus den Bewegungsknoten in TAU. Dadurch erhöht sich die Übersichtlichkeit und es besteht in Zukunft die Möglichkeit, mehrere Rotoren gleichzeitig zu berücksichtigen.

Kopplungsmethodik und –prozedur

Bei der Methodik der Kopplung handelt es sich um eine schwache periodische Kopplung. Das bedeutet, dass die Informationen der Lasten, der Deformation und der Steuerwinkeln nach mindestens einer vollständigen Umdrehung getauscht werden. Dabei sollte es sich um einen periodisch eingeschwungenen Zustand, sowohl auf Aerodynamik- als auch auf Rotoräeromechanikseite, handeln. Die getauschten Daten beinhalten Informationen der kompletten Rotorkreisscheibe in Azimut- und Spannweitenrichtung. Das bedeutet, dass die Daten aus mehreren physikalischen Zeitschritten zusammengesetzt werden.

Die Kopplung wird mit einem initialen Trimm von S4 begonnen. Zuvor muss sichergestellt sein, dass in beiden Kopplungspartnern die gleichen Einstellungen bezüglich Flug-/ Anströmzustand und Diskretisierung getroffen werden. Voneinander abweichende Einstellungen werden in der aktuellen Version der Kopplung nicht abgefangen und können zu Fehlfunktionen führen. Der initiale Trimm beruht allein auf dem in S4 integrierten Aerodynamikmodul. Daraufhin werden die Informationen der Steuerwinkel und Deformation über die XML-Datei an das Kopplungsmodul von TAU übergeben. In TAU wird das bestehende Rotorblattnetz, das in seinem unverformten Zustand vorliegt, entsprechend der Informationen von S4 (Steuerwinkel und Deformationen) deformiert. Die Steuerwinkel werden in der aktuellen Implementierung als Netzdeformation und nicht als Starrkörperbewegung des Chimeranetzes aufgeprägt. Mit dem deformierten Rotornetz wird eine CFD Rechnung gestartet und die Lasten bestimmt. Das XML-Format, in dem zuvor die

Steuerwinkel und Deformationen übergeben wurden, wird ebenfalls zur Übergabe der CFD-Lasten zurück an S4 benutzt.

In S4 werden die Lasten aus der CFD Rechnung eingelesen und dazu benutzt, die Lasten aus dem S4-internen Aerodynamikmodul zu korrigieren. Dies erfolgt mit Hilfe des sogenannten „Delta-Airloads-Approach“. Dabei wird zu den CFD-Lasten des Zeitschritts $n-1$ die Differenz der S4-Lasten von zwei Zeitschritten (n und $n-1$) addiert. In Formeln wird das folgendermaßen ausgedrückt.

$$F_{S4}^n(\Psi) = F_{2D}^n(\Psi) + F_{CFD}^{n-1}(\Psi) - F_{2D}^{n-1}(\Psi)$$

F_{CFD} : Lasten aus CFD-Aerodynamik

F_{2D} : Lasten aus S4-Aerodynamik

n : Kopplungsschritt

Wenn die Differenz zweier aufeinander folgender Lasten der S4-internen Aerodynamik gleich null ist, gilt die Kopplung als auskonvergiert.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta F^n(\Psi) = F_{2D}^n(\Psi) - F_{2D}^{n-1}(\Psi) = 0$$

Demnach beruhen im auskonvergierten Zustand die von S4 zur Trimmung und Deformation benutzten Lasten ausschließlich auf den Daten der CFD.

$$F_{S4}(\Psi) = F_{CFD}(\Psi)$$

Dateninhalt der Kopplung

Die grundsätzlichen Informationen, die bei der Kopplung ausgetauscht werden müssen, sind die Deformation, die Steuerwinkel und die Lasten (siehe Abbildung 86). In den Daten der Deformation sind die Bewegungen aufgrund der Steuerwinkel schon berücksichtigt. Somit stehen die Steuerwinkel zwar als Ausgabe in der Kopfzeile, werden jedoch auf der Seite des Strömungslösers nicht mehr eingelesen. Die Deformation besteht aus einem Vektor mit drei Lagewinkeln, wobei der Vektor und die Lagewinkel bezüglich des rotierenden Rotormastsystems beschrieben werden. Verbindet man die Spitzen aller Vektoren, so erhält man die deformierte $t/4$ -Linie. Der Vektor beschreibt somit direkt die Lage der deformierten $t/4$ -Punkte und nicht den Verschiebungsvektor bzgl. der Fertigungskontur.

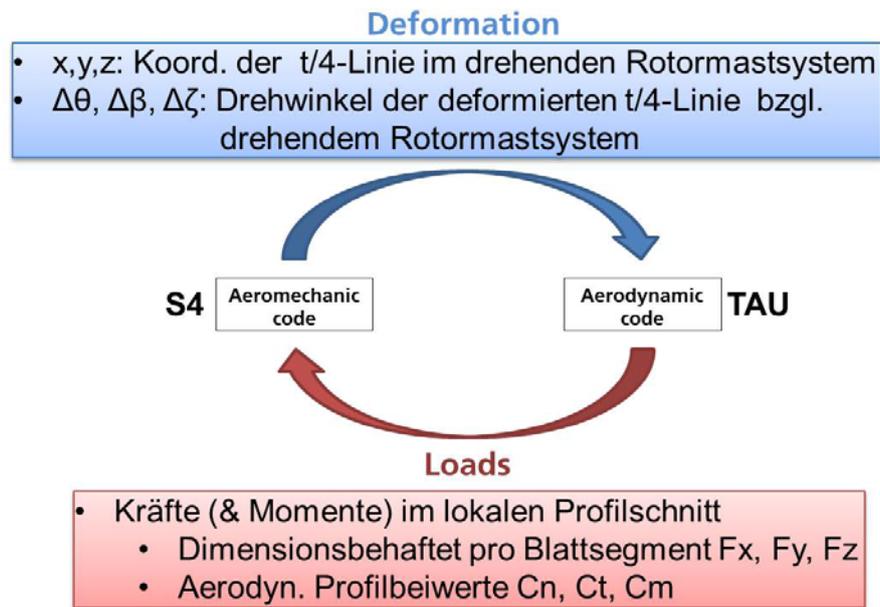


Abbildung 86: Austausch der wesentlichen Daten zwischen dem Aeromechanikcode S4 und dem Strömungslöser TAU

Für die Lasten werden sechs Größen von TAU an S4 zurückgegeben. Alle Lasten beziehen sich auf das Koordinatensystem des lokalen Profilschnittes und werden pro Profilschnitt angegeben. Die Kräfte F_x, F_y und F_z sind dimensionsbehaftet in der Einheit Newton angegeben. Von S4 werden allerdings nur die dimensionslosen Profilbeiwerte C_n, C_t und C_m (Profilnormalkraft-, Profiltangentialkraft- und Profilmomentenbeiwert) eingelesen.

$$C_n = \frac{dF_z / dr}{q_0 * c(r)}$$

$$C_t = \frac{dF_y / dr}{q_0 * c(r)}$$

$$C_m = \frac{dM_{x_{0,25}} / dr}{q_0 * c^2(r)}$$

Der Staudruck q_0 wird mit der Schallgeschwindigkeit a_0^2 und der Dichte ρ_0 gebildet.

$$q_0 = \frac{\rho_0}{2} * a_0^2$$

Das Entdimensionalisieren setzt auf CFD-Seite die Kenntnis der Profiltiefe ($c(r)$) des jeweiligen radialen Rotorblattsegmentes dr voraus, die aus dem CFD-Netz nicht hervorgeht und extern eingelesen werden muss. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit von Fehlern und behindert einen automatischen Prozess. Aus diesem Grund werden neben den Profilbeiwerten (C_n, C_t und C_m) auch die dimensionsbehafteten Lasten F_x, F_y und F_z ausgegeben. Der Inhalt der XML-Datei ist im Anhang B dargestellt.

1.4.6.2. Validierung der Schnittstelle mit Hubschrauber im Sinkflug (HART-II)

Als Testfall wurde der sogenannte „Baseline“-Testfall aus der HART-II Messkampagne ausgewählt. Hierbei handelt es sich um einen langsamen Sinkflug mit geringer Vorwärtsgeschwindigkeit. Dieses Setup wurde ausgewählt, weil es in beiden Abteilungen (FT und AS) die entsprechende Erfahrung und hinreichend genaue experimentelle Daten gibt. In den folgenden zwei Unterabschnitten wird die alte und die neue Implementierung der Kopplung erläutert. In der neuen Implementierung wurde ein Fehler im Nickmoment korrigiert. Da die Zeit nicht ausgereicht hat, alle Rechnungen mit der neuen Implementierung zu wiederholen, sind der Vollständigkeit halber die Ergebnisse der alten Implementierung in diesem Bericht noch erhalten. Die Schlussfolgerung aus diesen Ergebnissen hat jedoch mit Vorsicht zu erfolgen.

Numerisches Setup der Strömungssimulation (TAU)

Für die Strömungssimulation mit TAU wird auf ein bestehendes Netz von A. Länger [26] zurückgegriffen, da auf diesem Netz bereits mehrere erfolgreiche, gekoppelte Simulationen des HART-II-Testfalls durchgeführt wurden. Dieses wurde in Pointwise generiert und besteht aus vier Hexaeder-Netzen für die Rotorblätter sowie einem Hintergrundnetz. Das Hintergrundnetz besteht aus gemischten Elementen mit einem verfeinerten Hexaederbereich in der Rotorkreisebene. Das Netz besitzt insgesamt rund 14,25 Millionen Punkte wobei 9,65 Millionen Punkte auf das Hintergrundnetz entfallen und sich die verbleibenden 4,6 Millionen Punkte gleichmäßig auf die Rotor-netze aufteilen.

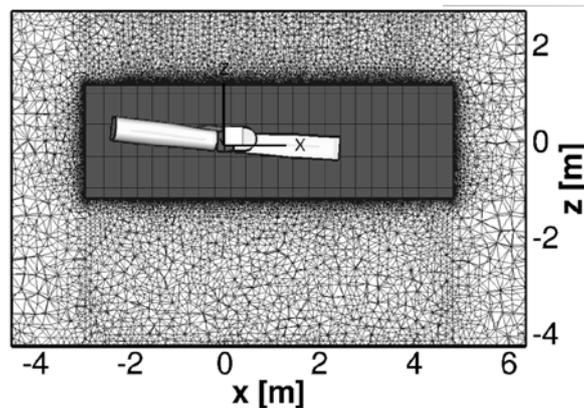


Abbildung 87: HART-II Rechennetz von A. Länger

Die groben numerischen Parameter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zentrales Schema
- Skalare Dissipation
- 3-stufiges Runge-Kutta Schema
- CFL-Zahl 0.8
- Mehrgitterzyklus 2v

- Turbulenzmodell Wilcox-kw
- K-w Limiter: Schwarz

Die Parameter wurden bewusst aus der Simulationen von A. Länger übernommen, um bei einem Vergleich der Ergebnisse den Einfluss des Netzes sowie der numerischen Parameter auszuschließen zu können.

Da die hohe Punktzahl und das Verfahren an sich für einen hohen Zeitaufwand sorgen, wurde parallel zu dem oben beschriebenen Rechnetz ein zweites gröberes Netz erstellt. Dieses beinhaltet 2,4 Millionen Punkte. Hiermit ist es möglich, in kürzerer Zeit mehr Kopplungsiterationen durchzuführen und die generelle Konvergenz des Kopplungsverfahrens zu untersuchen.

Ergebnisse mit alter Implementierung

Nach abgeschlossener Integration des S4-Plugins in die Kopplung wurde die Übertragung der berechneten Deformation aus S4 in das Rechnetz von TAU überprüft. In Abbildung 88 ist dazu die deformierte Blattoberfläche (grüne Sphären) und die Viertellinie (schwarz) dargestellt. Letztere wird direkt aus S4 eingelesen und unverändert in die Strömungssimulation übergeben. Im Gegensatz dazu wird die deformierte Oberfläche anhand der Daten aus S4 berechnet. Als Plausibilitätstest wurde die Deformation in das Rechnetz übertragen, anschließend die Oberflächennetze an den radialen Positionen aus S4 geschnitten und die Viertellinie anhand der Nasen- und der Endleiste für jeden Schnitt berechnet (Kreise in Magenta).

Green spheres: CFD surface points
 Black cubes: S4 quarterchord points
 Magenta circles: CFD quarterchord points

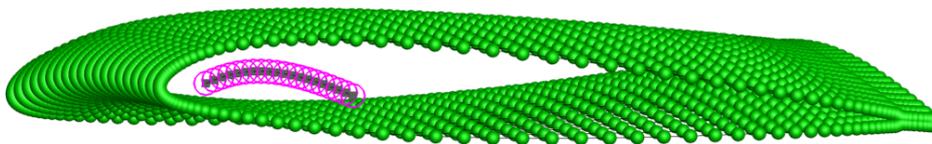



Abbildung 88: Vergleich deformierte CFD Oberfläche (grün), S4 Viertellinie (schwarz), CFD Viertellinie (Magenta)

Die Viertellinie aus TAU sowie diejenige aus S4 sind identisch. Zusätzlich wurden - hier nicht dargestellt - für jeden Schnitt der sektionale Anstellwinkel bestimmt und mit den Daten aus S4 verglichen. Auch hier traten keine Unterschiede auf. Daher wurde mit der Simulation begonnen.

Aus der Erfahrung mit Kopplungen zu anderen Aeromechanikcodes ist es ratsam, zu Beginn mindestens drei volle Umdrehungen mit dem initialen Trimm und der initialen Deformation zu rechnen. Hierbei wird der CFD ermöglicht, einen Nachlauf auszubilden und die induzierten Geschwindigkeiten in der Rotorebene genauer wiederzugeben. Danach wurde jeweils im Abstand von einer Umdrehung gekoppelt.

Feines Netz

In Abbildung 89 sind die Steuerwinkel zu jeder Trimmeriteration angegeben. Bei der dritten Iteration ist ein Bedienfehler der Kopplung eingetreten. Dabei wurden anstatt der CFD-Daten der letzten Iteration die der vorletzten Iteration übergeben. Darum hat sich in den Steuerwinkeln der dritten Iteration ein kleines Plateau eingestellt. Zwischen der fünften und der sechsten Iteration wurde ein weiterer Fehler in der Ausgabe der Lasten aus TAU behoben. Zuvor waren die Lasten in der Rotorebene (x- und y-Achse) vertauscht gewesen. Die Trimmung hat daraufhin unverzüglich mit einer Korrektur der Steuerwinkel geantwortet. In der sechsten Iteration liegen die zyklischen Winkel in guter Übereinstimmung auf dem Experiment. Der kollektive Steuerwinkel bleibt jedoch um $2,7^\circ$ unter dem experimentellen Wert. Die Kopplung ist zwar noch nicht konvergiert, es ist allerdings nicht mehr zu erwarten, dass der kollektive Winkel um einen derart großen Betrag anwächst. Um die Konvergenz eindeutig beurteilen zu können, muss noch einige Male gekoppelt werden, denn die Änderungen der Steuerwinkel haben die induzierten Geschwindigkeiten in der Rotorkreisebene verändert. Und diese müssen erst aus der Kreisscheibe nach hinten konvektiert werden.

In Abbildung 90 ist der dimensionslose Auftriebsbeiwert über dem Umlauf aufgetragen. Rechnungen mit gleichem Netz und gleichen numerischen Einstellungen, allerdings mit einem anderen Aeromechanikcode (HOST von Airbus Helicopters), haben etwas schlechtere Ergebnisse geliefert. Insbesondere der Bereich des vorlaufenden Blattes bei $20^\circ < \Psi < 120^\circ$, in dem BVI (Blattwirbelinteraktion) auftritt, ist mit S4 gut aufgelöst. Die vorseilenden Rotorblätter erzeugen Wirbel, die auf das nachlaufende Rotorblatt aufschlagen und dabei Druckschwankungen erzeugen. Man kann erkennen, dass die Frequenz des C_n geringer als im Experiment ist. Das liegt daran, dass die numerische Lösung mehr Dissipation als das Experiment hat und dadurch die Wirbelkerne aufgeweitet werden. Dementsprechend sinken die Amplitude und die Frequenz. Des Weiteren wird die ansteigende Flanke des C_n bei $\Psi \approx 200^\circ$ gut wiedergegeben. So lange die Netzauflösung nicht deutlich gesteigert wird, kann man im rücklaufenden Bereich $280^\circ < \Psi < 340^\circ$ keine besseren Ergebnisse erwarten. Erfahrungsgemäß liegt das C_n der CFD dort tiefer und weist weniger BVI auf.

Nach der Rechnung hat sich herausgestellt, dass in der alten Implementierung ein Fehler in der Lastenübergabe vorhanden war, der während der Rechnung nicht korrigiert wurde. Das Nickmoment hat ein falsches Vorzeichen und sorgt für ein Aufnicken des Rotorblattes, das zur Blattspitze größer wird. Im Vergleich zur neuen Implementierung ist der Nickwinkel an der Blattspitze um ca. 2° größer. Dies sorgt für eine Auftriebserhöhung an der Blattspitze und gleichzeitig auch für einen stärkeren Blattspitzenwirbel. Dies ist der Grund dafür, dass der BVI in Abbildung 90 so gut getroffen wird. Das Aufnicken der Blattspitze führt im Trimmer zu einer Reduzierung des kollektiven Einstellwinkels um den Gesamtauftrieb zu halten und sorgt daher für die große Abweichung wie in Abbildung 89 zu sehen ist.

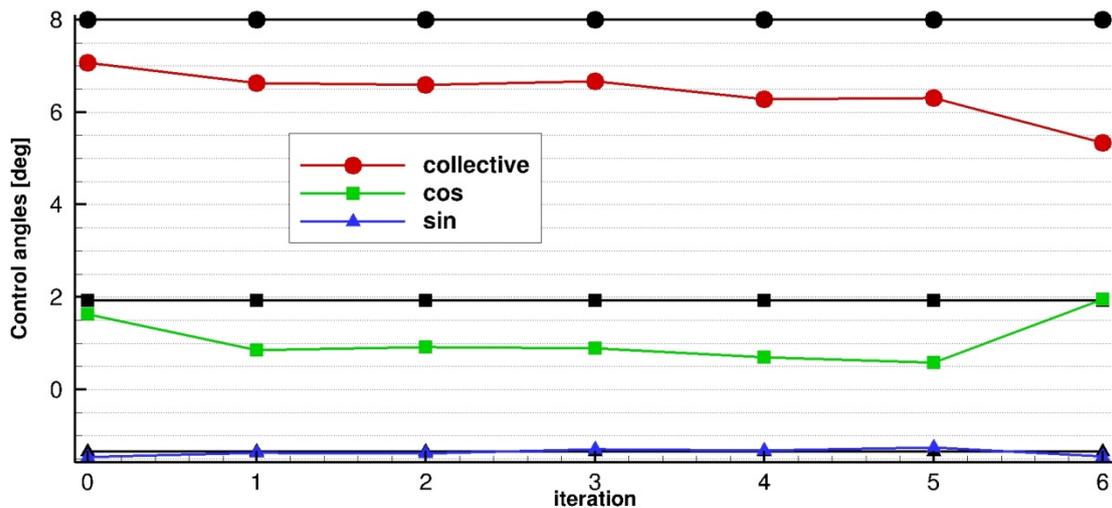


Abbildung 89: Alte Implementierung: Steuerwinkel für jede Kopplungsiteration. Werte aus Experiment in schwarz.

Abbildung 91 zeigt einen Vergleich der Bewegung der Rotorblattspitze aus S4 zu der Bewegung aus dem Experiment. In rot sind mehrere Verläufe dargestellt, weil die Fertigungstoleranzen der Rotorblätter zu unterschiedlichen Blattbewegungen führen. Die Bewegung aus S4 liegt zwar nicht komplett im Toleranzbereich der vier Blätter, weist allerdings dieselbe Charakteristik auf.

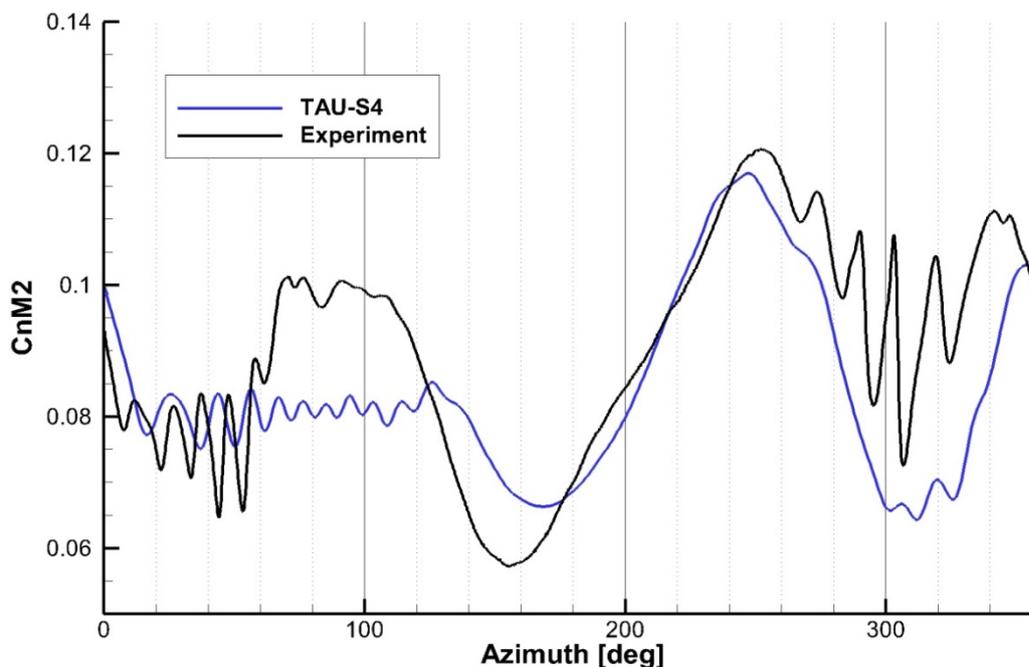


Abbildung 90: Alte Implementierung: Dimensionsloser Auftriebsbeiwert bei $r/R=0,87$ über den Umlauf der letzten Trimmeriteration

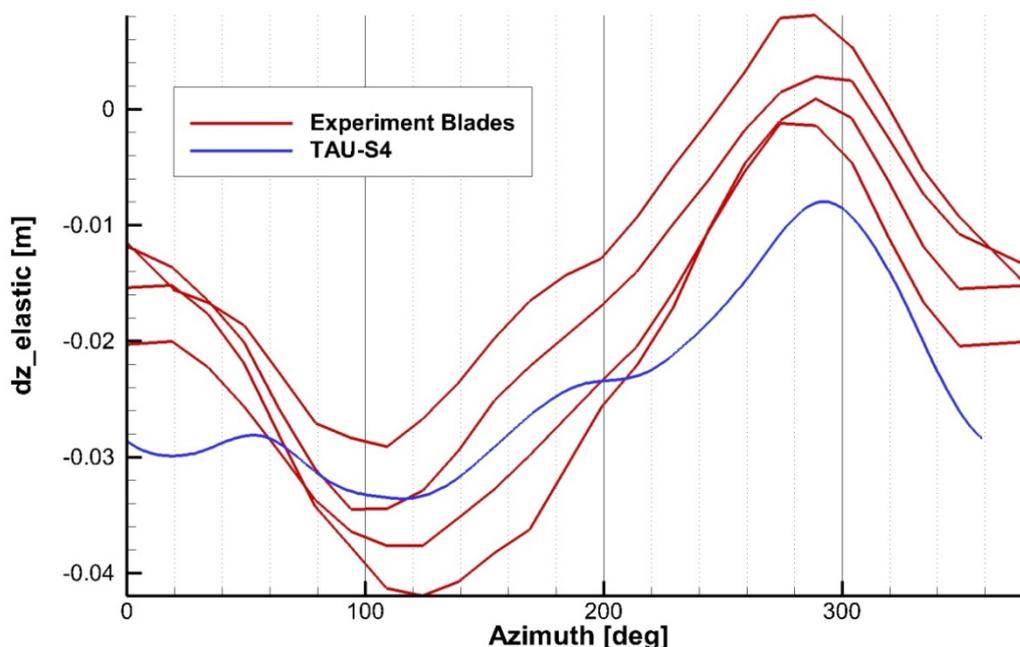


Abbildung 91: Alte Implementierung: Elastische vertikale Deformation der Blattspitze relativ zum starren Blatt mit eingebautem Vorkonus

Grobes Netz

Wie bereits erwähnt, dient diese Rechnung mit dem groben Netz nicht der Berechnung genauer Lasten sondern dient der schnellen Überprüfung des generellen Verhaltens der Kopplung. Dieses ist in Abbildung 92 dargestellt und umfasst 13 Kopplungsiterationen. Zwischen der siebten und der achten Iteration wurde der gleiche Fehler im Lasttransfer behoben wie bei der Rechnung des feinen Netzes (Vertauschung der Lasten in der Rotorebene, x- und y-Achse). Die Reaktion der Trimmung ist ähnlich zu Abbildung 89. Der Cosinusanteil nähert sich dem Experiment, wohingegen der kollektive Steuerwinkel weiter vom Experiment abweicht. Die Abweichung des kollektiven Steuerwinkels resultiert aus dem fehlerhaften Nickmoment wie oben bereits angemerkt. Alle Steuerwinkel befinden sich auf einer Ebene, auf der allerdings jeder ein wenig schwingt. Vor der Fehlerkorrektur kann man bereits ab der dritten Iteration eine Konvergenz erkennen. Nach der Korrektur zeichnet sich bis zur 13. Iteration noch keine Konvergenz ab. Unter Umständen könnte das an der Fehlerkorrektur liegen und der Tatsache, dass die Kopplung normal weiter betrieben wurde ohne neu zu starten. Dabei könnten Fehler im „Delta-Airlloads Approach“ des Trimmalgorithmus provoziert worden sein.

Die Bewegung der Blattspitze in Abbildung 93 hat eine ähnliche Charakteristik wie beim feinen Netz (vgl. Abbildung 91) und ist ebenso nicht komplett innerhalb der experimentellen Abweichungen.

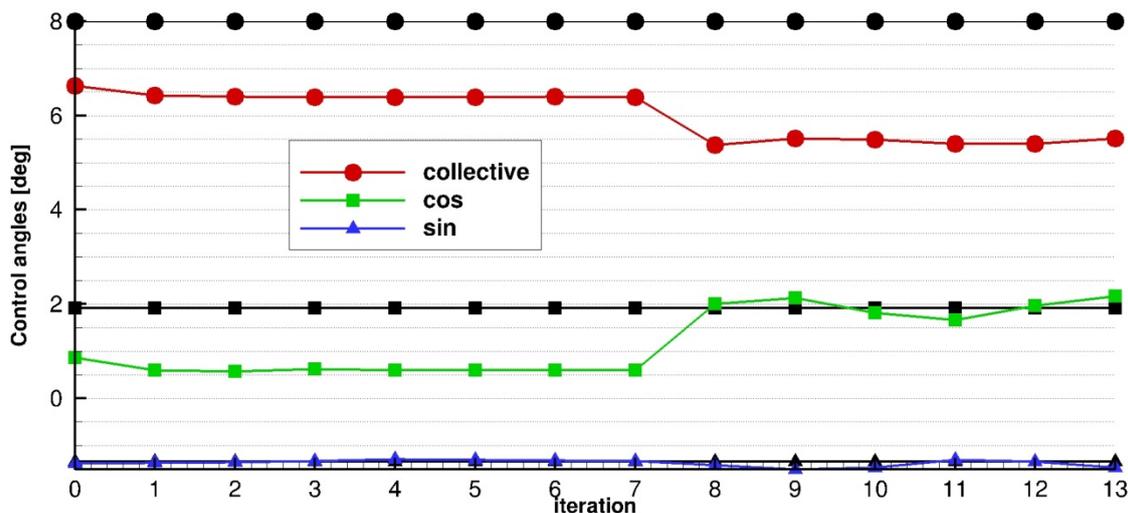


Abbildung 92: Alte Implementierung: Steuerwinkel für jede Kopplungsiteration

Der Verlauf des dimensionslosen Auftriebs in Abbildung 94 ist nicht so nah am Experiment wie beim feinen Netz. Allerdings wird die grobe Charakteristik wiedergegeben. Auf der vorlaufenden Seite sieht man sogar die Auswirkungen des BVLs. Diese sind jedoch in der Frequenz und Amplitude deutlich geringer. Bei $\Psi \approx 160^\circ$ ist deutliche Abweichung zum Experiment zu erkennen.

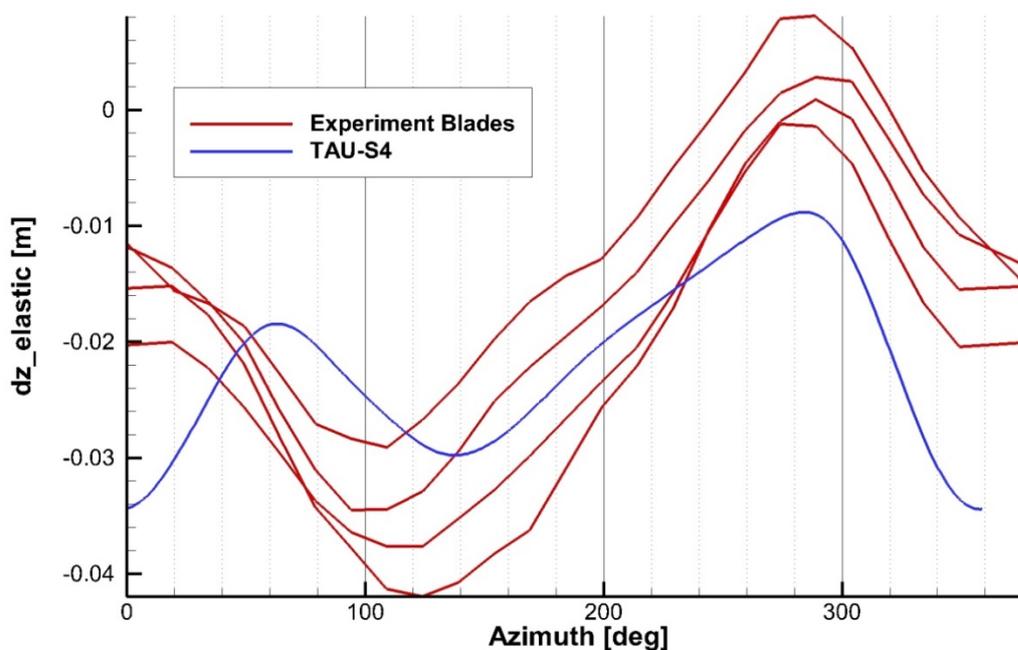


Abbildung 93: Alte Implementierung: Elastische vertikale Deformation der Blattspitze relativ zum starren Blatt mit eingebautem Vorkonus

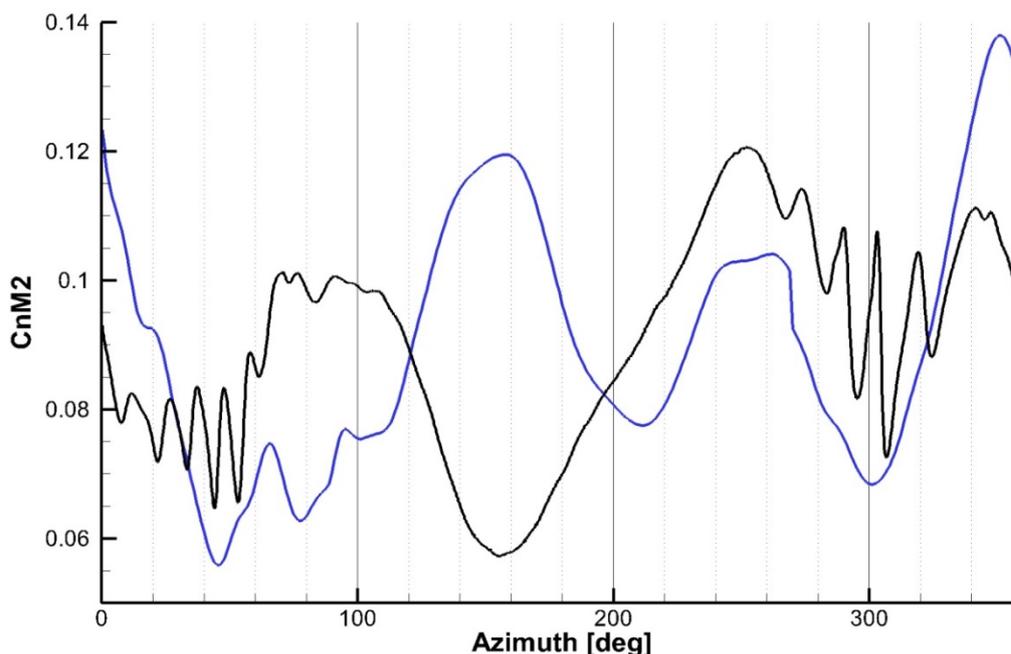


Abbildung 94: Alte Implementierung: Dimensionsloser Auftriebsbeiwert bei $r/R=0,87$ über den Umlauf der letzten Trimmeriteration

Trimmgrößen und Lasten am Rotorkopf

In Tabelle 16 sind die Lasten und Trimmziele für beide HART-II Rechnungen dargestellt. Es handelt sich dabei um die integralen Lasten aller vier Rotorblätter am Rotorkopf im nichtrotierenden Mastsystem. Da die Lasten mit einer Frequenz von $4/\text{ref}$ schwanken, sind in Tabelle 16 die gemittelten Werte über eine Umdrehung angegeben. Der Hubschrauber wird von S4 auf die drei Komponenten F_z , M_x und M_y getrimmt.

Zunächst fällt auf, dass sich die Lasten trotz des großen Unterschieds in der Punktzahl zwischen beiden Rechnungen nur unwesentlich unterscheiden. Auf die Größen, die nicht getrimmt werden, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Der Schub ist mit 1,2% Abweichung bei der groben Rechnung und 2,5% in der feinen Rechnung hinreichend genau eingestellt worden. Dies ist insofern ungewöhnlich, weil der kollektive Steuerwinkel ca. $2,7^\circ$ kleiner als beim Experiment ist. Wenn die Rotorblätter konsequent entsprechend der angegebenen Steuerwinkel im CFD-Netz eingestellt worden wären, müsste der Auftrieb deutlich kleiner sein. Man darf dabei nicht vergessen, dass es sich bei beiden Rechnungen um einen noch nicht vollständig konvergierten Zustand handelt. Die Abweichungen der Momente M_x und M_y vom Trimmziel sind bei beiden Rechnungen ungewöhnlich hoch. An dieser Stelle fehlt die Erfahrung um mit Sicherheit zu sagen, dass es außerhalb der Toleranz ist. Wenn man berücksichtigt, dass die Amplitude der Momente pro Umlauf bei ± 500 Nm liegt, relativiert sich der Fehler.

Last	Grobes Netz	Feines Netz	Ziel
F_x [N]	-33.36	-34.30	---
F_y [N]	-33.27	-31.73	---
F_z [N]	-3262.62	-3220.31	-3300
M_x [Nm]	-39.54	-11.60	20
M_y [Nm]	-163.19	-173.63	-20
M_z [Nm]	197.19	214.41	---

Tabelle 16: Alte Implementierung: Trimmgrößen und –ziele. X in Flugrichtung, Y in Flugrichtung rechts, Z nach unten

Fehleranalyse

Die Auswertung der HART-II Rechnungen auf dem feinen und dem groben Netz hat gezeigt, dass es Widersprüche in den Ergebnissen gibt. So ist der kollektive Anstellwinkel mit einer Abweichung von $> 2,5^\circ$ außerhalb des zulässigen Toleranzbereichs. Hinzu kommt, dass die Differenz zwischen dem Trimmziel und den am Rotorkopf gemessenen Kräften ungewöhnlich hoch ist.

Eine genauere Untersuchung der Probleme hat einen Vorzeichenfehler des Nickmoments in der XML-Datei aufgezeigt. Dadurch reduzierte sich die elastische Torsion am Rotorblatt und ein kleinerer kollektiver Anstellwinkel ist nötig um den gleichen Auftrieb zu produzieren. Der Fehler wurde behoben, sodass alle nachfolgenden Ergebnisse auf der neuen Implementierung mit korrektem Nickmoment basieren.

Ergebnisse mit neuer Implementierung

Bei der neuen Implementierung der Kopplung handelt es sich im Wesentlichen um die gleiche Version wie im letzten Abschnitt. Im Gegensatz dazu wurde allerdings der Fehler im Nickmoment korrigiert. Die Einstellungen des numerischen Setups sind gleich geblieben. Zur Bestimmung der Lösungsqualität werden Vergleichsdaten von A. Länger [26] mit der TAU-HOST Kopplung gezeigt. An dieser Stelle wird explizit darauf hingewiesen, dass das CFD-Netz von Länger mehr Punkte hat und eine andere Topologie aufweist als das im Folgenden genutzte grobe Netz. HOST ist ein Aeromechanikcode und hat in den Simulationen von Länger die gleiche Aufgabe wie S4.

Grobes Netz

Mit der neuen Implementierung kam es aus zeitlichen Gründen nur zur Berechnung von vier Kopplungssimulationen. Darum lässt sich nicht endgültig feststellen, ob die Kopplung auf einen festen Zustand konvergiert. Aus Abbildung 95 ist jedoch ersichtlich, dass kein starker Gradient mehr in den Steuerwinkeln vorhanden ist und die Werte auf einem Niveau schwanken. Der Cosinus- und Sinusanteil liegt nicht so dicht am Experiment wie bei der alten Implementierung. Dafür ist die Abweichung des kollektiven Einstellwinkels zum Experiment geringer. Dies liegt daran, dass die elastische Torsion des Rotorblatts mit dem korrigierten Nickmoment größer ist und dadurch ein höherer Einstellwinkel zur Erzeugung desselben Schubes notwendig ist.

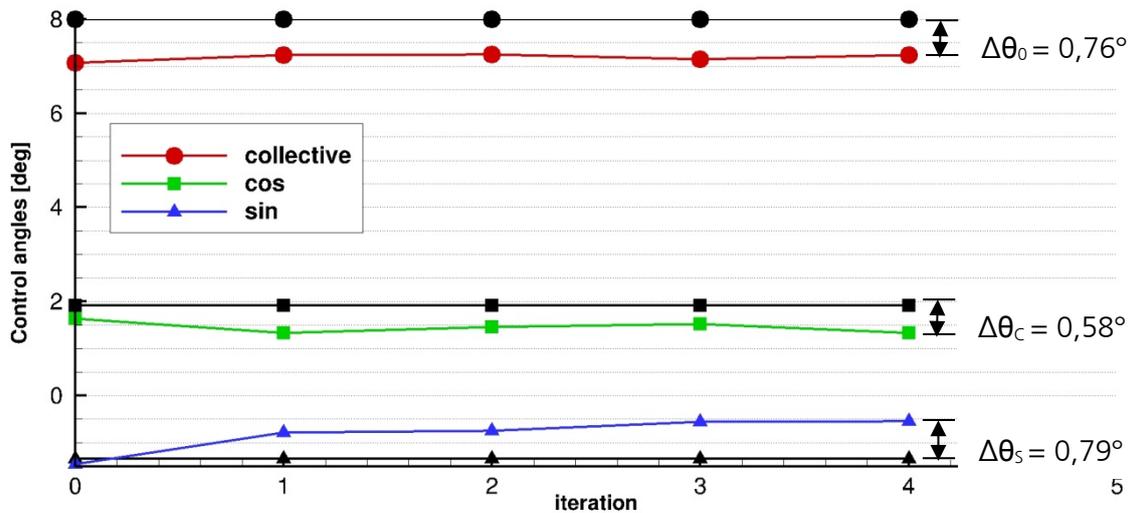


Abbildung 95: Neue Implementierung: Steuerwinkel für jede Kopplungsiteration

Steuerwinkel	Experiment [°]	Δ TAU-S4 – Exp. [°]	Δ TAU-HOST – Exp. [°]
θ_0	8,00	-0,76	-0,36
θ_s	-1,34	-0,58	-0,25
θ_c	1,92	+0,79	+0,77

Tabelle 17: Vergleich der Steuerwinkel mit Kopplung TAU-HOST aus Länger [26]

Im Vergleich zur TAU-HOST Kopplung ist die Abweichung der Steuerwinkel θ_0 und θ_s vom Experiment bei TAU-S4 doppelt so groß, wohingegen der Fehler bei θ_c gleich groß ist (siehe Tabelle 17). Bedenkt man, dass das CFD-Netz der TAU-HOST Kopplung sechsmal so viele Punkte hat wie das Netz der TAU-S4 Rechnung, dann sind die Ergebnisse von TAU-S4 hinreichend genau.

Abbildung 96 zeigt die elastische Deformation der Blattspitze. Im Bereich des vorlaufenden Rotorblatts bei $50^\circ < \Psi < 200^\circ$ stimmt die Deformation mit dem Mittel der vier Blätter aus dem Experiment überein. Für die restlichen Azimutbereiche kann ein ähnlicher Verlauf wie im Experiment beobachtet werden, allerdings mit einem Versatz nach unten. Im Vergleich zur alten Implementierung (Abbildung 93) lässt sich eine kollektive Verschiebung nach unten feststellen. Die Form des Verlaufs ist jedoch ähnlich.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von TAU-HOST und TAU-S4 zeigt eine gleichwertige Güte. Während S4-TAU im Azimutbereich $50^\circ < \Psi < 200^\circ$ näher am Experiment liegt, passt im übrigen Bereich TAU-HOST besser zum Experiment.

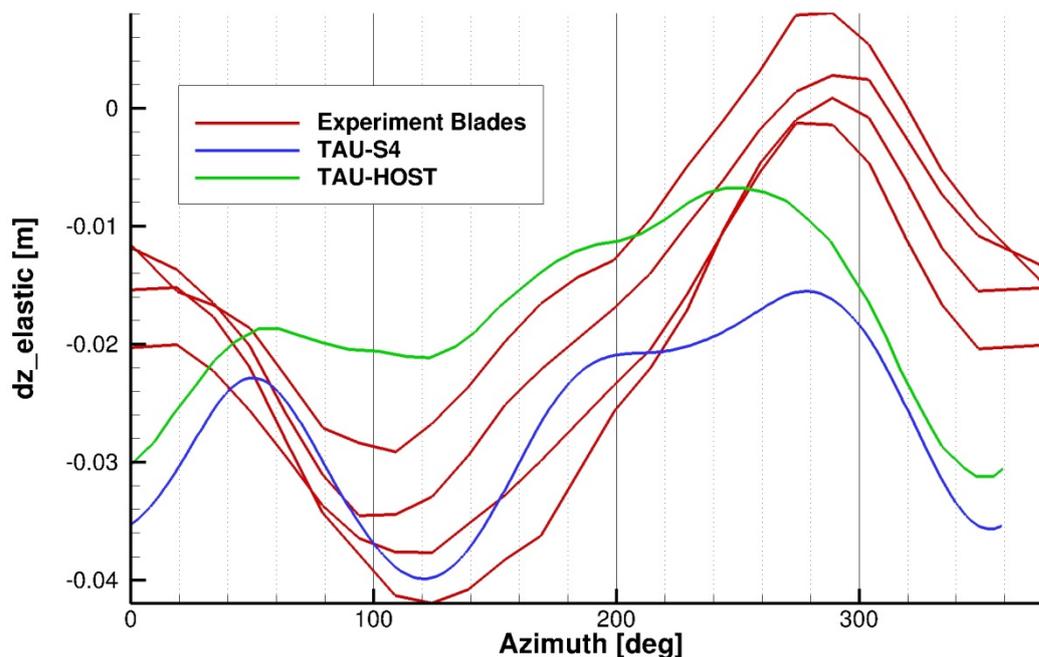


Abbildung 96: Neue Implementierung: Elastische vertikale Deformation der Blattspitze relativ zum starren Blatt mit eingebautem Vorkonus

Der dimensionslose Auftriebsbeiwert mit der neuen Implementierung besitzt die wesentlichen Charakteristika des Experiments. Die Maxima sind etwas phasenverzögert und überschätzt. Bei $\Psi = 50^\circ$ fällt dies besonders auf. Weiterhin ist zu erkennen, dass TAU-S4 in Abbildung 97 weniger höherfrequente Schwankungen zeigt als die alte Implementierung in Abbildung 94. Vermutlich hat das zwei Ursachen. Aufgrund der stärkeren Verwindung des Rotorblatts bei der neuen Implementierung produziert die Blattspitze weniger Auftrieb und setzt deshalb schwächere Wirbel ab. Der zweite Grund könnte ein anderer Abstand des Rotorblatts zu den Wirbeln sein. Da die Blattspitze bei der neuen Implementierung tiefer dreht, könnten die Wirbel schneller aus dem Einflussbereich der Blätter transportiert werden.

Im Bereich von $120^\circ < \Psi < 300^\circ$ weist das Ergebnis von TAU-S4 im Vergleich zu TAU-HOST einen Phasenversatz auf. Andererseits liegen ab $\Psi = 270^\circ$ die Lasten näher am Experiment als bei TAU-HOST.

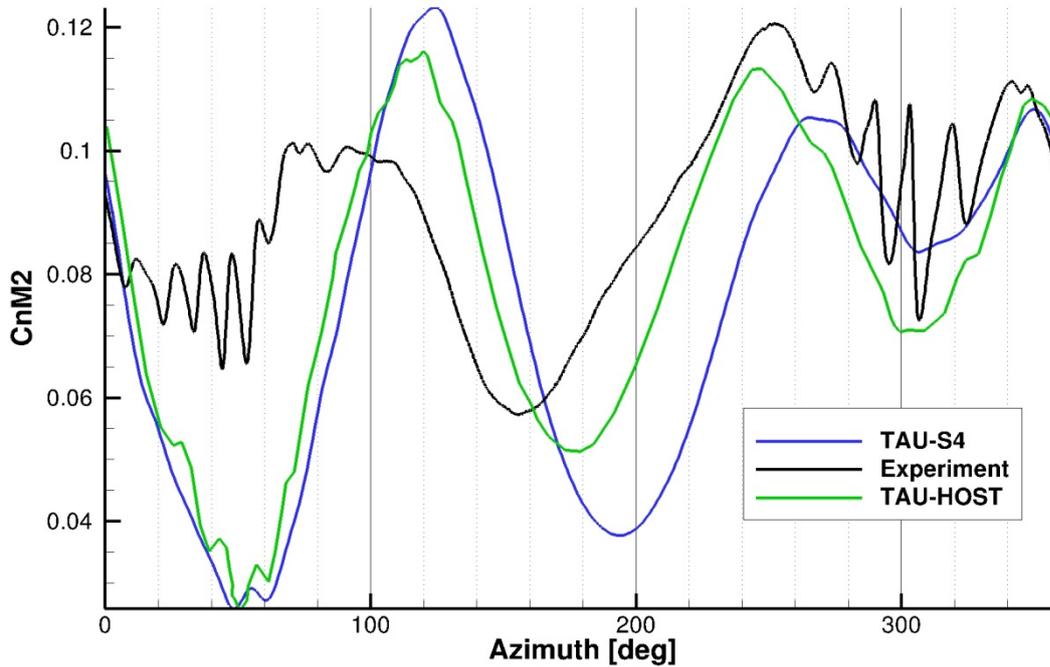


Abbildung 97: Neue Implementierung: Dimensionsloser Auftriebsbeiwert bei $r/R=0,87$ über den Umlauf der letzten Trimmeriteration Trimmgrößen und Lasten am Rotorkopf

Trimmgrößen und Lasten am Rotorkopf

In Tabelle 18 sind die integralen Lasten im nichtrotierenden Koordinatensystem am Rotormast dargestellt. Im Vergleich zur alten Implementierung (Tabelle 16) zeigen die Momente M_x und M_y mit der neuen Implementierung eine geringere Abweichung zum Experiment. Allerdings liegt der Schub nun ca. 4,5% unter dem Trimmziel.

Last	Grobes Netz	Ziel
F_x [N]	-47.14	---
F_y [N]	-22.33	---
F_z [N]	-3131.51	-3300
M_x [Nm]	53.55	20
M_y [Nm]	60.13	-20
M_z [Nm]	193.51	---

Tabelle 18: Neue Implementierung: Trimmgrößen und –ziele. X in Flugrichtung, Y in Flugrichtung rechts, Z nach unten

1.4.6.3. Anwendung der Kopplung für eine Windkraftanlage

Bei der Windkraftanlage handelt es sich um die NREL 5MW Anlage. Da diese Anlage am häufigsten im Zusammenhang mit Fluid-Struktur-Kopplung genannt wird und einige wenige Referenzrechnungen zur Verfügung stehen, wurde dieser Typ zur Validierung ausgewählt.

Numerisches Setup der Strömungssimulation (TAU)

Die Anlage wurde gegenüber der Spezifikation in der Hinsicht vereinfacht, dass für die Fluid-Struktur-Kopplung zunächst nur der isolierte Rotor ohne Spinner betrachtet wird. Der mit $2,5^\circ$ Vorkonus- und 5° Schaftneigungswinkel geneigte Rotor wird mit $11,4 \text{ m/s}$ angeströmt. Außerdem wurde der Einstellwinkel an der Rotorblattwurzel bei 0° festgehalten. Für diese Anströmbedingung haben Yu und Kwon numerische Vergleichsrechnungen veröffentlicht [27].

Bei dem Netz handelt es sich um ein strukturiertes Hintergrundnetz mit 3 Mio. Hexaedern, die zum Rotor hin gleichmäßig verdichtet sind (vgl. Abbildung 98). Die Rotorblätter werden mittels Chimera-Technik und jeweils 200.000 weitestgehend strukturierten Elementen aufgebaut. Die Diskretisierung ist ähnlich grob wie bei dem groben HART-II Netz. Aufgrund der geringen Konvektionsgeschwindigkeiten bei Windkraftanlagen und der dadurch erforderlichen langen Rechenzeit eignet sich solch ein schlankes Setup.

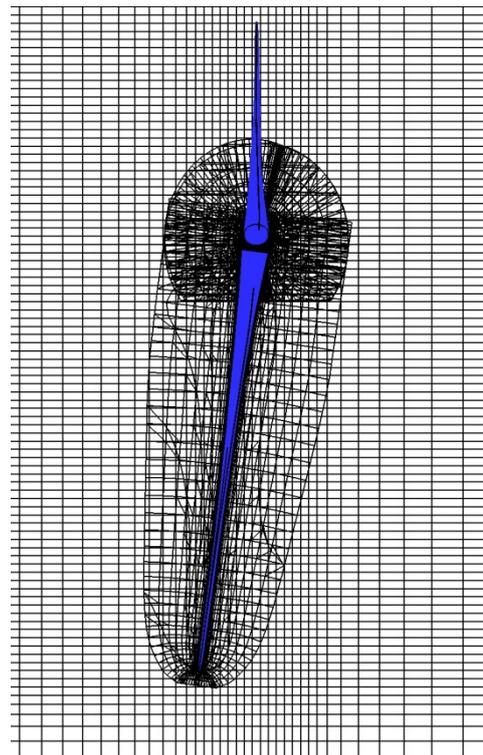
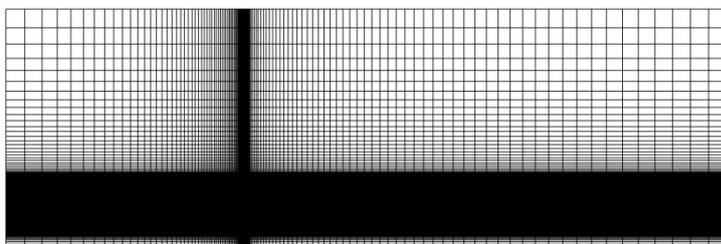


Abbildung 98: Strukturiertes Hintergrundnetz und strukturiertes Kindnetz um das Rotorblatt

Die wichtigsten numerischen Parameter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zentrales Schema
- Matrix Dissipation

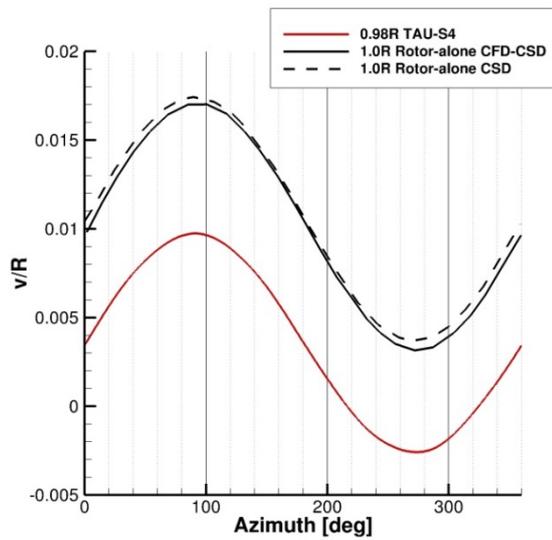
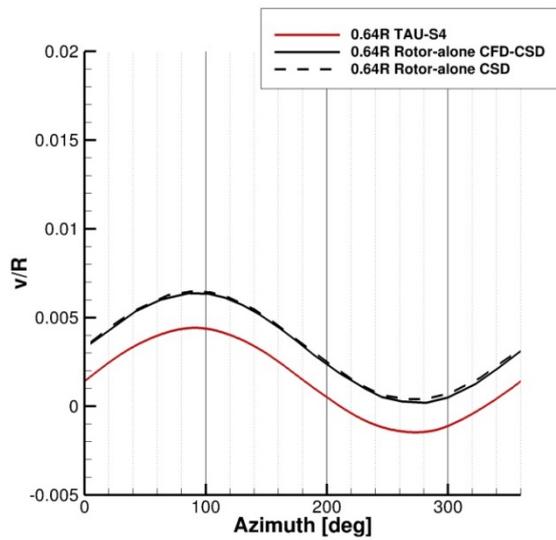
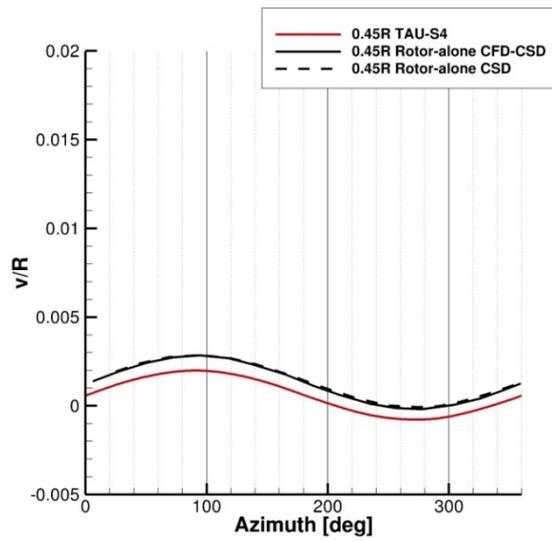
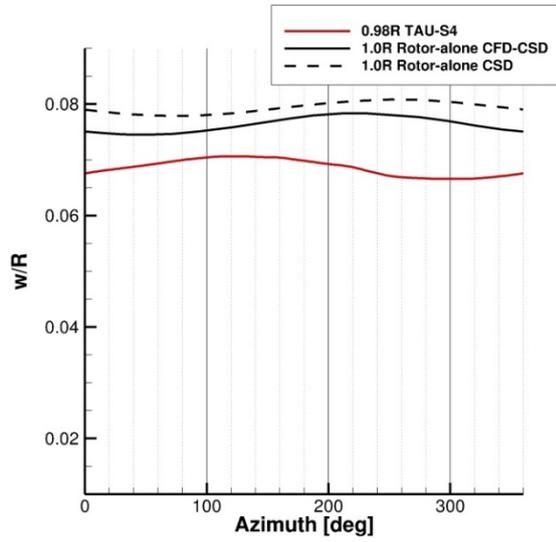
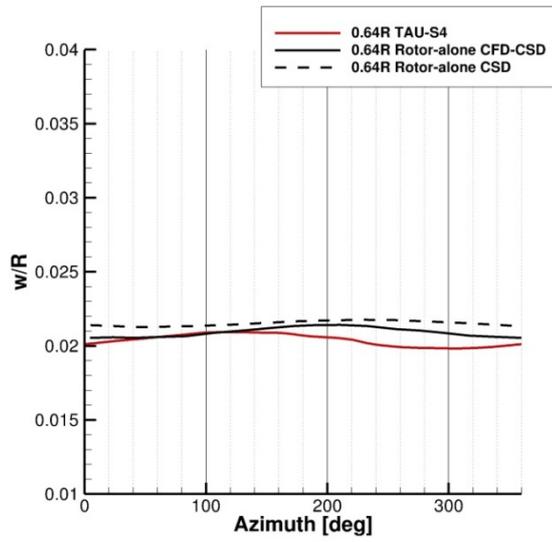
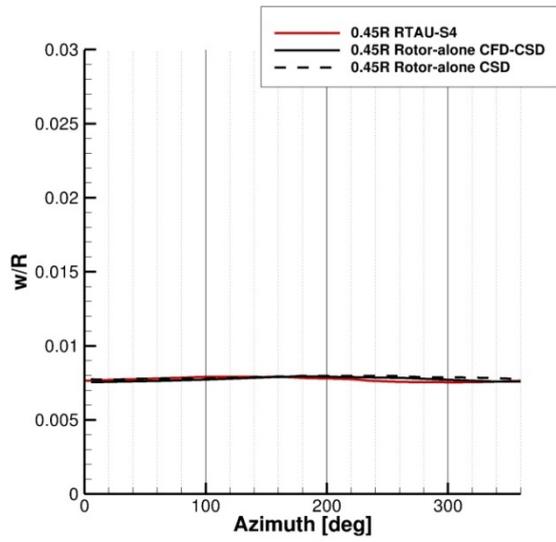
- LUSGS Schema
- CFL = 15
- Mehrgitterzyklus 2v
- Turbulenzmodell: Menter-SST
- K-w Limiter: Schwarz

Ergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen Abbildung 99 sind die elastischen Deformationen der TAU-S4 Kopplung des zweiten Trimmings und der Referenzrechnung [27] angegeben. Bei der „Rotor-alone CSD“ Rechnung handelt es sich um die Kopplung einer BEMT Aerodynamik mit einem Strukturcode. Die Schlag- und die Schwenkdeformation sind jeweils mit dem Blattradius entdimensionalisiert. Die Schlagdeformation der S4-TAU Kopplung fällt durchweg etwas kleiner aus als bei der Referenzrechnung. An der Blattspitze kann die größte Differenz zur Referenz beobachtet werden. Das liegt daran, dass in der S4-TAU Simulation aufgrund des groben Netzes eine Ablösung über weite Bereiche des Radius vorherrscht. Weiterhin fällt auf, dass die Referenzrechnung über den Blattradius einen Phasenversatz aufweist. Die Blattspitze hat ihre maximale Schlagauslenkung ca. 20° nach dem inneren und mittleren radialen Schnitt. Dies kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht nachvollzogen werden, sodass die Schlagdeformation von S4-TAU unter Berücksichtigung der Ablösung als sinnvoller angesehen wird.

Bei der Schwenkdeformation befinden sich alle radialen Schnitte in der gleichen Phase mit der Referenzrechnung. Allerdings ist der Mittelwert an jedem radialen Schnitt um ca. 50% kleiner als bei der Referenzrechnung. Aus der Literatur ist bekannt, dass der wesentliche Einflussfaktor auf die Schwenkbewegung die Schwerkraft ist. Da die Phase und die Amplitude von S4-TAU und von der Referenz gleich sind, ist davon auszugehen, dass sowohl die Masse als auch die Steifigkeit in S4 korrekt sind. Die Abweichung der mittleren Schwenkauslenkung ist wahrscheinlich auf die Ablösung zurückzuführen. Dadurch wird weniger Vortrieb am Rotorblatt erzeugt und die Durchbiegung in Drehrichtung fällt kleiner aus.

Die Torsion ist an jedem radialen Schnitt kleiner als bei der Referenz. Während beim Referenzfall die elastische Torsion an der Blattspitze Werte bis zu $-3,7^\circ$ annimmt, berechnet die S4-TAU Kopplung einen positiven Deformationswinkel. Dieser beträgt etwa $+0,2^\circ$ und ist nahezu konstant über den Azimut. In der Literatur zur Fluid-Struktur Kopplung der NREL 5MW Anlage wird die elastische Torsion meistens nicht erwähnt. Eine nichtwissenschaftliche Quelle hat das Rotorblatt als so torsionssteif bezeichnet, dass die elastische Torsion vernachlässigbar sei. Zudem haben Vergleichsrechnungen mit S4-AeroDyn und S4-SimPack ähnlich kleine Torsionswinkel wie die der S4-TAU Kopplung ergeben.



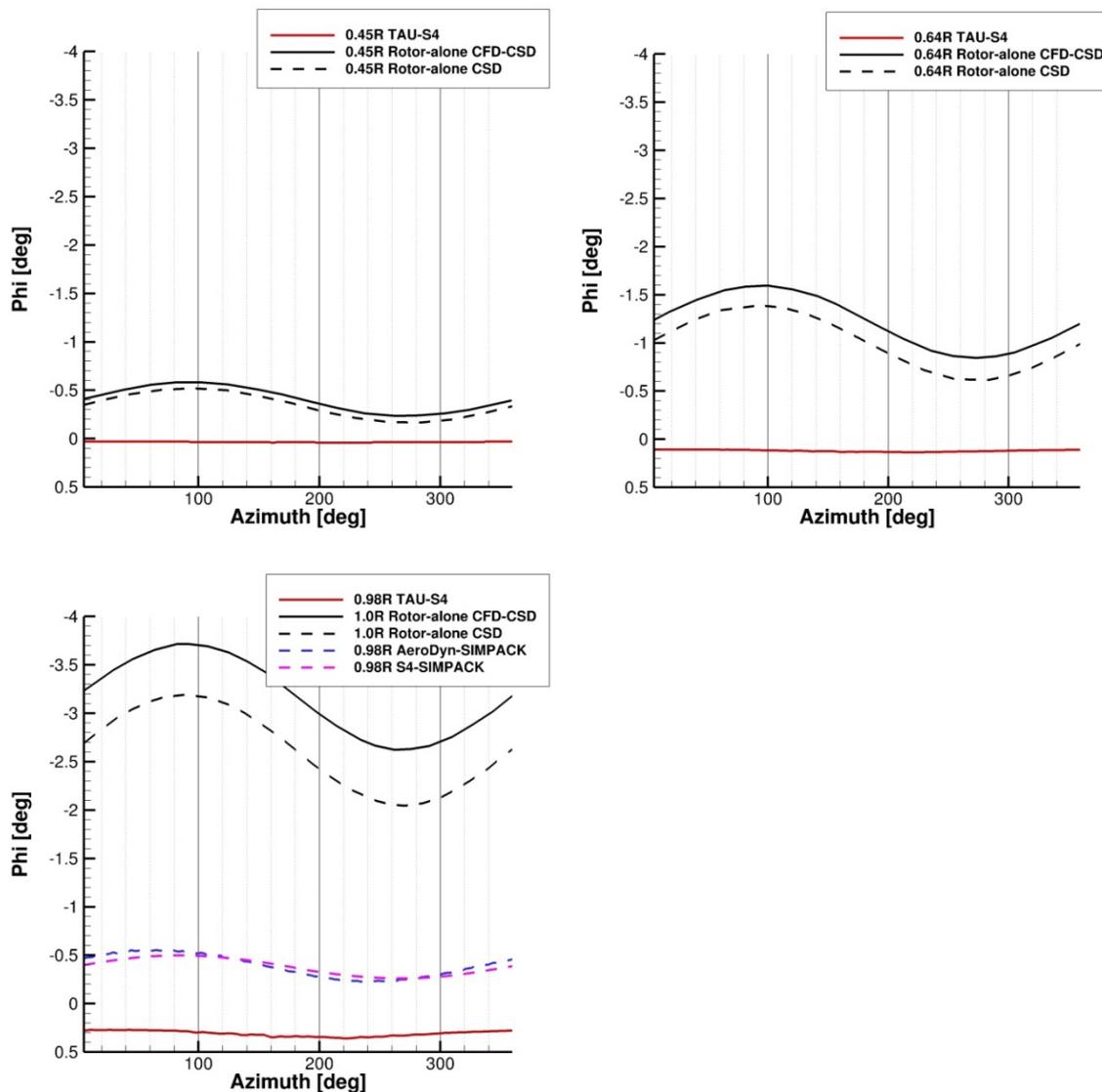
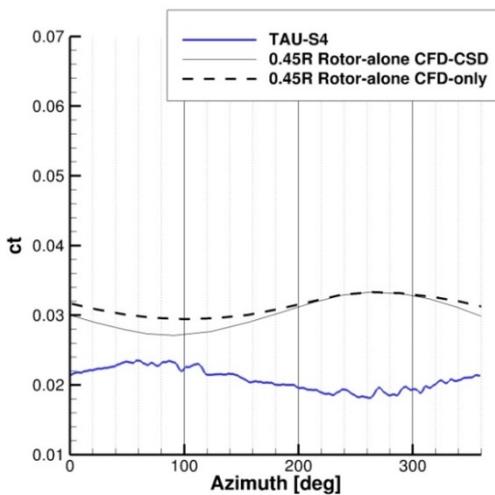
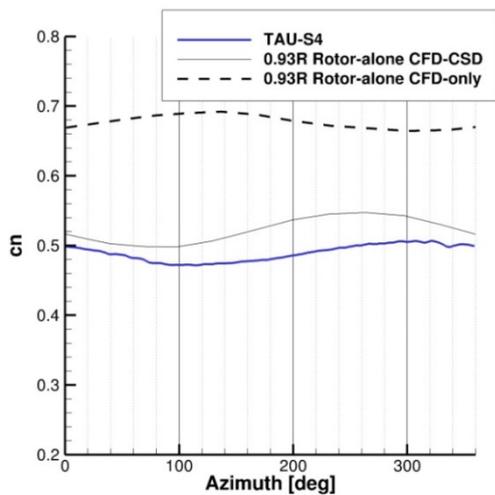
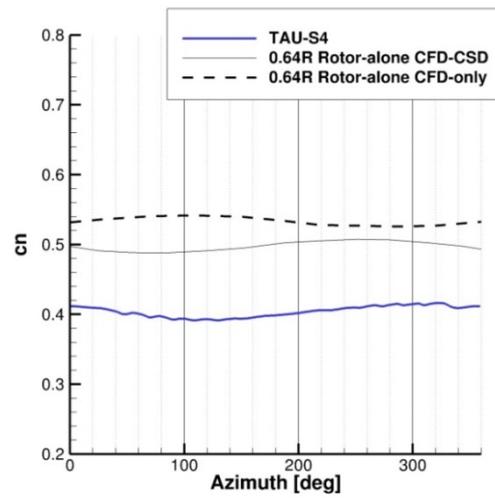
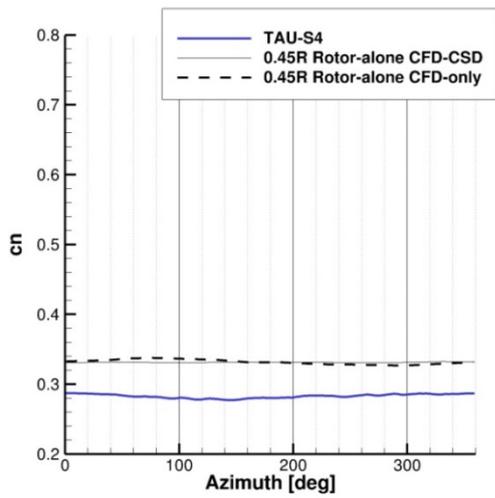


Abbildung 99: Deformationen in Schlag- (w/R), Schwenk- (v/R) und Torsionsrichtung (Φ) an den radialen Stützstellen $r/R=0,45$, $r/R=0,64$ und $r/R=1,0$ über den kompletten Umlaufwinkel.

Die Lasten werden ebenfalls mit Werten aus der Literatur von Yu und Kwon verglichen. Bei der „Rotor-alone CFD-only“ handelt es sich um eine CFD Rechnung mit starren Rotorblättern. Die Lasten in Profilnormalenrichtung, die von der S4-TAU-Kopplung berechnet wurden, sind zwar an jedem Schnitt etwas geringer als bei der Referenzrechnung, dafür phasengleich. Auch bei der Tangentialkraftkomponente präsentiert die S4-TAU-Kopplung am mittleren und inneren Schnitt einen geringeren Wert. Hinzu kommt, dass der Tangentialkraftbeiwert eine Phasenverschiebung von $110^\circ - 180^\circ$ im Vergleich zur Referenz aufweist. Aus der Feldlösung von TAU geht hervor, dass auf dem Rotorblatt über einen sehr weiten Bereich bis nahe der Rotorblattspitze eine Ablösung vorhanden ist. Diese sorgt sowohl bei der Normal- als auch bei der Tangentialkraft für den

Einbruch der Kraftbeiwerte. In den aerodynamischen Kraftbeiwerten macht sich die Ablösung durch kleine hochfrequente Schwingungen über den Umlaufwinkel bemerkbar. Bei jeder Schwankung findet ein Ablösevorgang mit anschließendem Wiederanlegen statt. Der Nickmomentenbeiwert an allen drei Schnitten ist ca. halb so groß wie bei der Referenz, wohingegen die Amplitude der Schwingungen so klein ist, dass deren Phasenversatz ohne Bedeutung ist.



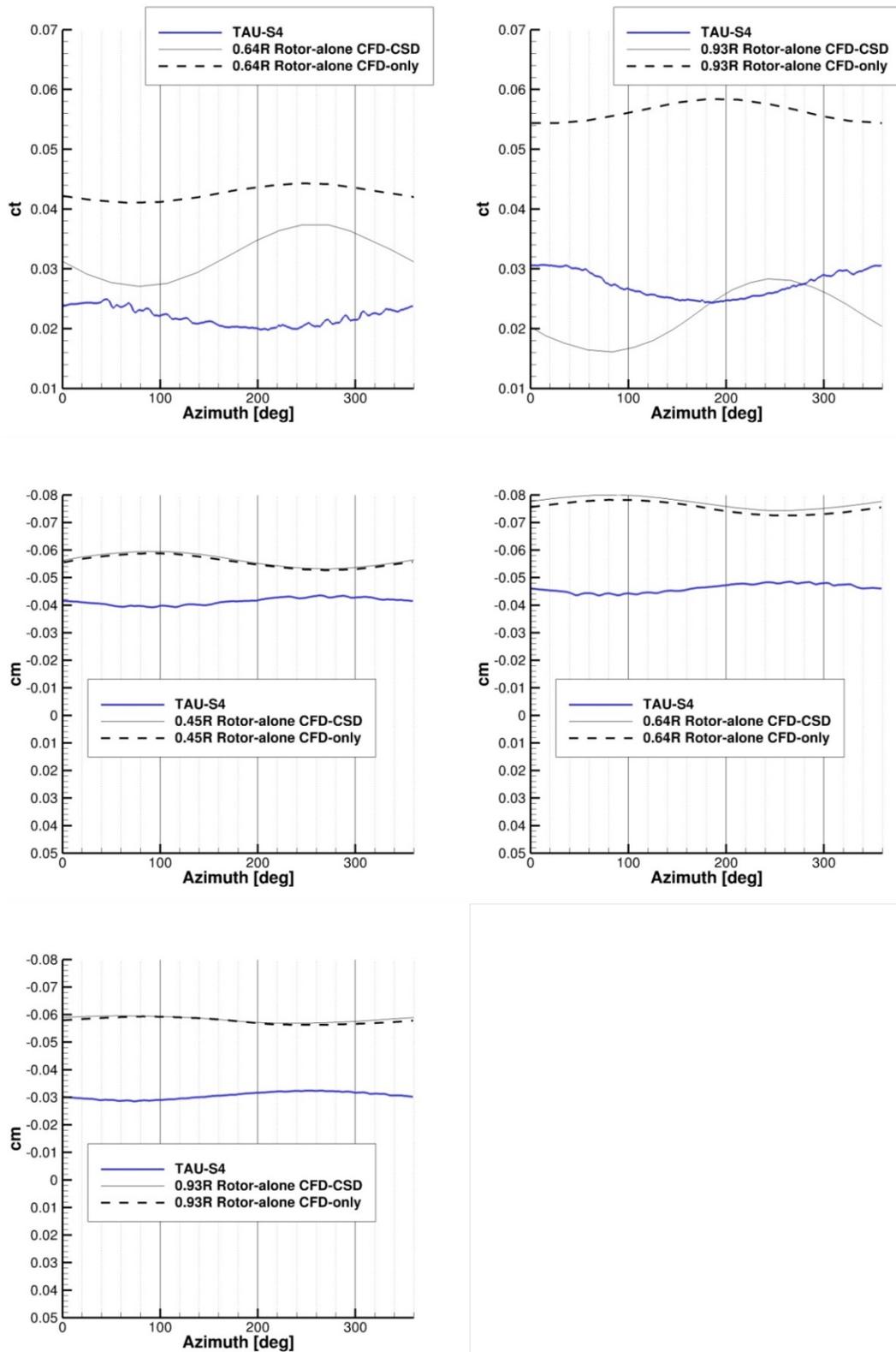


Abbildung 100: Lasten in Profilnormal- (C_n) und Profiltangentialrichtung (C_t) sowie Nickmoment (C_m) an den radialen Stützstellen $r/R=0,45$, $r/R=0,64$ und $r/R=0,93$ über den kompletten Umlaufwinkel.

Betrachtet man die Kräfte aus der CFD Rechnung zusammen mit der aeroelastischen Verformung, so kommt man zu nachfolgender logischer Argumentationskette. Durch die Ablösung über einen großflächigen Bereich entlang des Rotorblatts brechen sowohl der Auftrieb als auch der Widerstand am Rotorblatt ein. Dementsprechend kleiner fällt die Durchbiegung des Rotorblatts in Schlagrichtung und die mittlere Deformation in Schwenkrichtung aus. Das Nickmoment am Rotorblatt ist aufgrund der Ablösung reduziert. Man kann ablesen, dass das Nickmoment durchschnittlich halb so groß wie bei der Referenz ist. Die elastische Torsion ist jedoch noch viel geringer als halb so groß. Ähnlich sieht es beim dynamischen Verhalten der Torsion aus. Obwohl die Amplituden des Nickmoments bei der S4-TAU- und der Referenzrechnung gleich groß sind, ist die dynamische Torsionsantwort in der Referenzrechnung um ein Vielfaches höher als bei der S4-TAU Rechnung. Daraus kann geschlossen werden, dass die elastische Torsion aus der Referenz unverhältnismäßig hoch ist und nicht zur Validierung genutzt werden sollte. Der höhere Anstellwinkel von bis zu $3,9^\circ$ der S4-TAU Rechnung im Vergleich zur Referenz hat wiederum zur Folge, dass der jeweilige Profilschnitt näher am Strömungsabriss betrieben wird und der Auftrieb und der Vortrieb am Rotorblatt einbrechen.

Die Tatsache, dass das Rotorblatt aufnickt, obwohl das Nickmoment am Profil negativ ist, liegt vermutlich an der Positionierung der Profilschnitte in Profiltiefenrichtung. Da die $t/4$ -Linie nicht gerade ist, kommt es zur einer auftriebsabhängigen Torsion am Rotorblatt.

1.4.7. Strukturentwurfsumgebung DELiS

Die Software DELiS (Design Environment for Lightweight Structures) wurde innerhalb des Projektes WindMUSE genutzt, um detaillierte Strukturmodelle zu generieren und innerhalb eines automatisierten Frameworks zu dimensionieren. Die Basisgeometrie wird dabei aus einer XML-Schema-Datei abgeleitet (CPACS), siehe Abbildung 101. Innerhalb dieses Datensatzes werden im Wesentlichen folgende Informationen bereitgestellt

- die äußere aerodynamische Hülle,
- die Lage der Holme,
- Material- und Laminatdefinitionen,
- Last- und Lasteinleitungsdefinitionen,
- Informationen zur Strukturmodellgenerierung in Form eines Finite-Elemente-Modells.

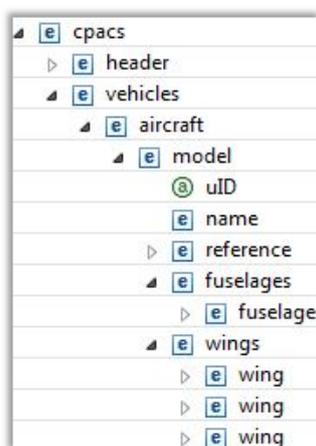


Abbildung 101 Beispielstruktur eines CPACS Datensatzes

Mit Hilfe der Software DELiS werden diese Daten interpretiert. Es wird ein Python Objektmodell erstellt, welches dann für die Erstellung von Strukturmodellen und / oder die Erzeugung von Metadaten für die Dimensionierung verwendet werden kann.

Abbildung 102 stellt das DELiS-Objektmodell schematisch dar. Die Struktur orientiert sich dabei am CPACS Datensatz. Da dieser ursprünglich für die Luftfahrt entwickelt wurde, können Komponenten aus dem Flugzeugentwurf verwendet werden. Die Informationen des Pythonobjektmodells werden genutzt, um ein finite Elemente Modell automatisiert zu erstellen. Dieses Modell wird genutzt, um lokale Spannungen und Verformungen der Struktur zu berechnen. Es werden hierzu Schalenelementen genutzt. Neben dem Finite-Elemente-Modell, werden den Komponenten des Objektmodells Metadaten zugewiesen. Diese Metadaten beinhalten alle Informationen, welche für die Dimensionierung notwendig sind.

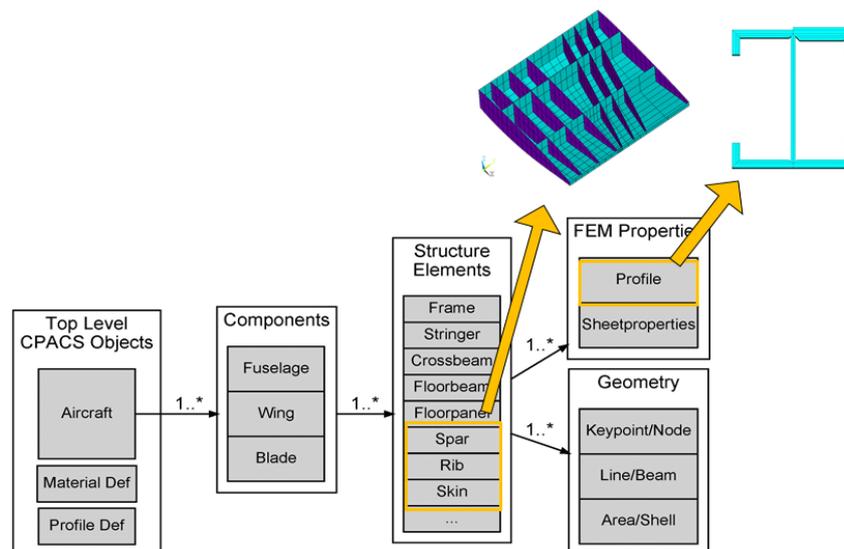


Abbildung 102 DELiS-Objektmodell

DELiS wurde innerhalb des Projektes weiterentwickelt. So wurde eine modale Reduktion des Rotorblattmodells integriert. Dieses reduzierte Modell wird der Lastenanalyse bereitgestellt. Innerhalb des Projektes wurden Schnittstellen zur Lastenanalyse implementiert und für Analysen verschiedener Rotorblattdesigns genutzt. Hierzu wurden eine Reihe von Publikationen und Abschlussarbeiten generiert.

1.4.8. Hardware-in-the-Loop Demonstration

1.4.8.1. SIMPACK

Die Hardware-in-the-Loop-Simulation zeigt die Echtzeit-Fähigkeit der im WindMUSE-Projekt entwickelten Windturbinen-Software. Sie besteht aus einem Software-Teil, der das Verhalten der Windenergieanlage abbildet, und einem Hardwareteil, der aus einem skalierten Getriebe und zwei Motoren besteht (ein Motor, repräsentiert den Hub, der andere den Generator). Getriebe und Motoren sind mit zwei Wellen (für niedrige und hohe Geschwindigkeit) verbunden. Dies ist in der Abbildung 103 dargestellt.

Die Simulationssoftware SIMPACK wurde für die Ausführung des Windturbinenmodells auf einem Realtime-Computer (Concurrent Redhawk Machine) installiert. Dieser kommuniziert mit der Hardware über einen dSPACE-Computer. Den vollständigen Aufbau und den Kommunikationsablauf zwischen der Hardware und den Softwarekomponenten zeigt die Abbildung 104.

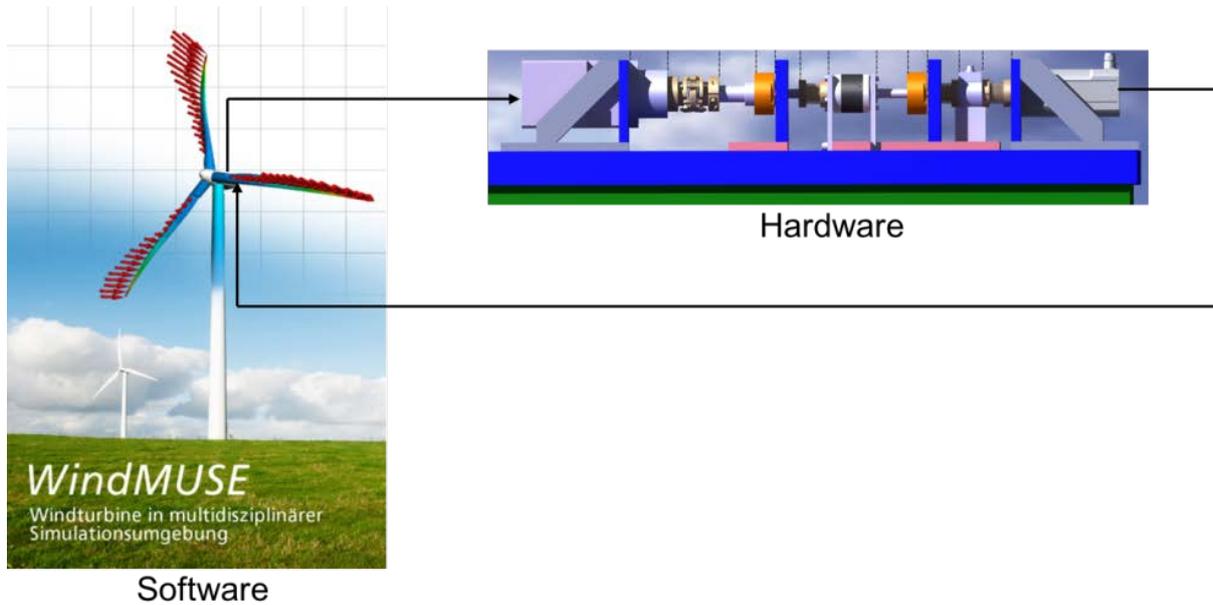


Abbildung 103: Schematische Übersicht über die Hardware-in-the-Loop Echtzeitsimulation

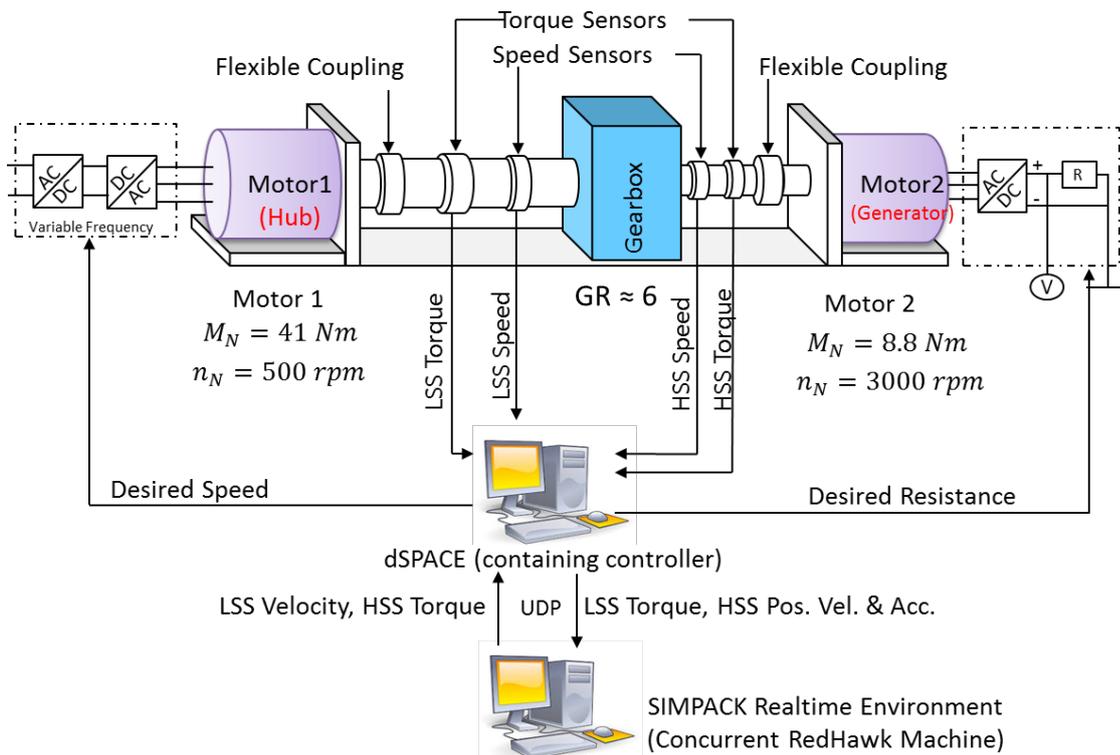


Abbildung 104: Vollständiger Aufbau der Echtzeitsimulation

Auf der linken Seite in Abbildung 104 (d.h. Motor1) wird die Hardware durch die Winkelgeschwindigkeit von der dSPACE-Umgebung angetrieben, während die Hardware das Drehmoment und die Geschwindigkeit der niedrigen Drehzahl zurückführt. Auf der rechten Seite (d.h. Motor2) speist die Hardware die Winkelgeschwindigkeit und das Drehmoment der Hochgeschwindigkeitswelle, während sie das gewünschte Widerstandssignal empfängt, um ein Rückkopplungsreaktionsdrehmoment zur Hardware zu senden. Die Drehmoment- und Drehzahlsignale der Wellen werden zur Überwachung und Steuerung in die dSPACE-Software eingespeist. Der dSPACE- und auch der Concurrent-Redhawk-Rechner kommunizieren dabei über eine UDP-Schnittstelle. Der Concurrent-Rechner sendet die gewünschte Geschwindigkeit der Hochgeschwindigkeitswelle (HSS) an die dSPACE-Umgebung, während dSPACE das Drehmoment der Niedriggeschwindigkeitswelle (LSS), die HSS-Position, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung zurückgibt.

Die Simulation verlief erwartungsgemäß. Die Geschwindigkeiten und Drehmomente der LSS- und HSS-Wellen nahmen mit zunehmender Windgeschwindigkeit zu. Mit Erhöhung des Einstellwinkels der Rotorblätter in der Software, nahmen Drehmoment und die Geschwindigkeitszunahme, messbar über die Hardware, entsprechend ab.

1.4.8.2. OneWind Modelica Library

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Echtzeitfähigkeit der OneWind® Modelica Bibliothek dargestellt. Nach einer Vorstellung der Simulationsmodelle werden die ermittelten Ergebnisse vorgestellt und ein Vergleich von Simulationsergebnissen durchgeführt.

Im Auslegungs- und Zertifizierungsprozess von Windenergieanlagen und ihren Komponenten sind voll-gekoppelte aeroelastische Simulationen, wie sie mit der OneWind® Modelica Bibliothek durchgeführt werden können, ein unverzichtbares Mittel. Auf diese Weise können die zu ertragenden Lasten der Teilkomponenten vorhergesagt und die Betriebsfähigkeit der Windenergieanlage über die angestrebte Lebensdauer von 20 Jahren sichergestellt werden.

Trotz moderner Simulationsmethoden sind Hardware-Tests mit realen Komponenten allerdings unumgänglich. Die hierfür notwendigen Prüfeinrichtungen sowie die Durchführung von Versuchen erfordern jedoch insbesondere bei den für Windenergieanlagen typischen Großkomponenten meist einen hohen finanziellen und logistischen Aufwand. Aus diesem Grund kann eine Kombination von Simulationsmodellen mit spezifischen Prüfeinrichtungen für Einzelkomponenten in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung ein wirksames Mittel sein, um die technischen Anforderungen sowie die Komplexität von Hardware-Tests zu reduzieren. Zudem kann über die Kopplung von Prüfstand und Simulationsmodell leicht eine Vielzahl unterschiedlicher Variationen des Versuchsaufbaus untersucht werden, indem jeweils nur das Simulationsmodell modifiziert wird.

Zur Kopplung von Simulationsmodell und Prüfstand ist es zwingend erforderlich, dass das verwendete Simulationsmodell in Echtzeit berechnet werden kann, damit zu jedem Zeitpunkt ein Signaltransfer zwischen den Aktuatoren und Sensoren des Prüfstands sowie den Ein- und Ausgängen des Simulationsmodells gewährleistet bleibt. Kommt es in der Berechnung zu Verzögerungen, fehlen unter Umständen wichtige Signale an die Prüfstandsaktuatoren und es kann im schlimmsten Fall zur Schädigung von Prüfling oder Prüfeinrichtung kommen.

Für die Echtzeitsimulation und die Kommunikation mit einer Prüfeinrichtung sind spezielle HiL-Simulatoren verfügbar. Dies sind Rechner, welche neben den benötigten Kommunikationsschnittstellen zu Aktuatoren und Sensoren auch über eine entsprechende Hardware verfügen, um die Echtzeitbedingungen der jeweiligen Anwendung zu erfüllen. Im Rahmen des Tasks wurde die Kompatibilität der OneWind® Modelica Bibliothek mit Echtzeitsimulatoren von Beckhoff, Bachmann und Opal-RT untersucht. Am Beispiel von Opal-RT wird hier die Simulation der OneWind® Modelica Bibliothek auf der Echtzeit-Hardware beschrieben.

Aufbau der Echtzeitumgebung

Zur Kommunikation mit dem Echtzeitsimulator wird die Software RT-LAB [21] genutzt. Über diese kann ein Modell für die Echtzeithardware kompiliert und auf diese übertragen werden. RT-LAB ist voll kompatibel mit MATLAB/Simulink. Modelle können auf diese Weise in einer wissenschaftlich etablierten Modellierungsumgebung aufgesetzt und vorbereitet werden.

Zur Simulation der in der OneWind® Modelica Bibliothek hinterlegten Modelle wird am Fraunhofer IWES die Software Dymola der Firma Dassault Systems⁶ genutzt. Keiner der untersuchten Echtzeit-Rechner bietet die Möglichkeit, Modelle in Modelica direkt zu simulieren. Aus diesem Grund kann für RT-LAB ein „Umweg“ über Simulink gemacht werden. Dymola bietet eine Schnittstelle zu MATLAB/Simulink, die verschiedene Arten der Kommunikation zwischen den beiden Tools zulässt. Für den hier betrachteten Fall maßgeblich ist die Möglichkeit, mithilfe des sog. DymolaBlock ein in Dymola kompiliertes Modelica-Modell als S-Function in ein Simulink-Modell einzubinden. Das Simulink-Modell kann anschließend für den Echtzeitrechner kompiliert und auf diesem ausgeführt werden. Abbildung 105 veranschaulicht das Zusammenwirken der unterschiedlichen Software-Tools. Innerhalb des Modelica-Modells müssen die Ein- und Ausgänge des Systems eindeutig gekennzeichnet sein, damit der in Abbildung DYMOLABLOCK dargestellte DymolaBlock innerhalb des Simulink-Modells mit den anderen Komponenten verknüpft werden kann.

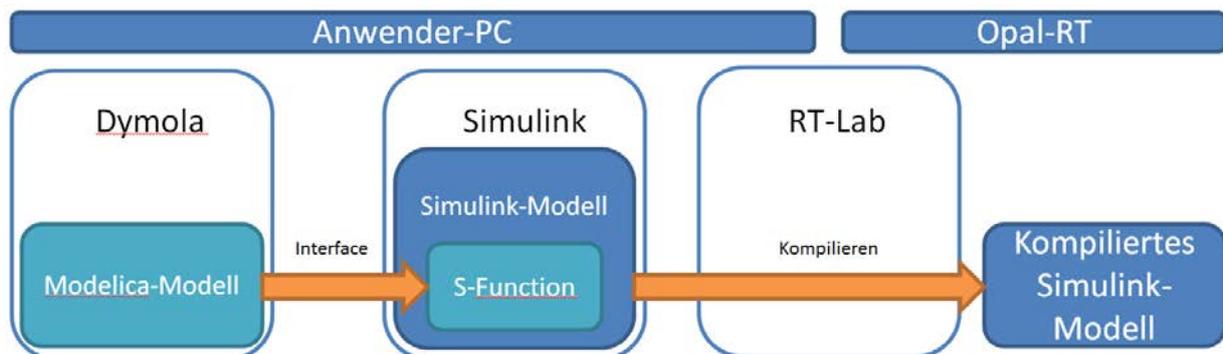


Abbildung 105: Schematische Darstellung der Kopplung der einzelnen Software-Tools und des Aufbaus der Simulationsmodelle. Die Software RT-Lab dient als Schnittstelle zwischen dem Anwender-PC und dem Echtzeitrechner Opal-RT.

Das für den OpalRT-Echtzeitrechner erstellte Simulink-Modell muss in zwei Submodelle aufgeteilt werden, wie in Abbildung 106 dargestellt. Submodell `sm_plant` beinhaltet dabei das eigentliche Simulationsmodell, das auf dem Echtzeitrechner ausgeführt werden soll. Wie in Abbildung 107 zu sehen, besteht es für den hier betrachteten Anwendungsfall im Wesentlichen aus dem DymolaBlock, über den das Modelica-Modell in Simulink berechnet werden kann. Zur Überwachung und Visualisierung der Ergebnisse wird das Submodell `sc_scope` genutzt. Dieses wird über MATLAB/Simulink automatisch parallel auf dem Steuerungsrechner gestartet und kommuniziert über das Netzwerk mit der Echtzeithardware. In `sc_scope` sind üblicherweise einfache Simulink-Bausteine zur Visualisierung von Größen und/oder zum Post-Processing hinterlegt.

⁶ Dymola 2018, <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/>

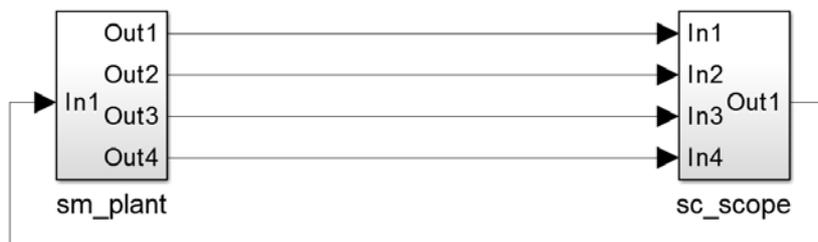


Abbildung 106: Aufbau des Simulink-Modells mit den zwei Submodellen sm_plant und sm_scope.

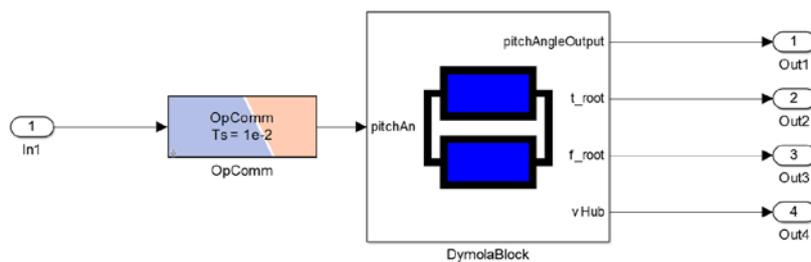


Abbildung 107: Aufbau des Submodells sm_plant.

Aufbau des Simulationsmodells

Angelehnt an den Einsatz für die HiL-Simulation im IWES-eigenen Gondelprüfstand DyNaLab bildet das Simulationsmodell in den untersuchten Szenarien den Rotor einer Windenergieanlage ab. Dies bedeutet, dass der Wind, die aerodynamischen Kräfte auf den Rotor sowie die Strukturmechanik der Rotorblätter im Simulationsmodell auf der echtzeitfähigen Hardware berechnet werden. Die Schnittstelle für den Betrieb im mit dem Prüfstand gekoppelten HiL-System stellt in diesem Fall die Hauptwelle der WEA dar. Die in der Simulation ermittelten Schnittkräfte und -momente könnten im gekoppelten Betrieb unmittelbar als Lasten am Rotoranschlussflansch aufgeprägt werden.

Das Simulationsmodell des Rotors besteht aus drei flexiblen Rotorblättern, welche mit einer starren Nabe verbunden sind. Die flexiblen Blätter sind als modal reduzierte Balkenelemente realisiert, wobei in der Simulation 10 Schwingungsmoden pro Blatt berücksichtigt werden. Jedes Blatt ist mit 17 aerodynamischen Lastelementen verbunden, die entlang des Blatts angeordnet sind. Diese Lastelemente berechnen die durch die Aerodynamik eingprägten Kräfte sowie das Pitchmoment in der Rotorebene. Die berechneten Kräfte werden an diskreten Punkten an das flexible Strukturmodell übergeben, in welchem anschließend die dynamische Reaktion des Rotorblatts berechnet wird und die angreifenden Kräfte an der Blattwurzel auf die Nabe übertragen werden. Die Aerodynamik wird mit der Blatt-Element-Impuls-Methode (Blade Element Momentum, BEM) bestimmt. Der dynamische Nachlauf (dynamic wake) wird nach dem Modell von Oye berücksichtigt. Weiterhin werden in der BEM Korrekturen zur Berücksichtigung der Naben- und Blattspitzenverluste, für die Schräganströmung sowie die Relaxation der Induktionsfaktoren verwendet. Auf eine instationäre dynamische Stall-Korrektur wird im Rahmen dieser Simulationen verzichtet. Bei eingeschalteter Stall-Korrektur versagt die Schnittstelle zwischen Dymola und Simulink und das Mo-

dell kann nicht als S-Function in Simulink eingebunden werden. Aus diesem Grund kann das Modell momentan bei eingeschalteter dynamischer Stall-Korrektur nicht für die Echtzeit-Hardware kompiliert werden. An einer Lösung dieses Problems wird gearbeitet.

Der modellierte Rotor basiert auf den Daten der NREL 5MW Referenz-Windenergieanlage [1]. Abbildung 108 zeigt eine mit Dymola erstellte 3D-Visualisierung des verwendeten Modells sowie die angreifenden aerodynamischen Kräfte an den einzelnen Blattelementen.

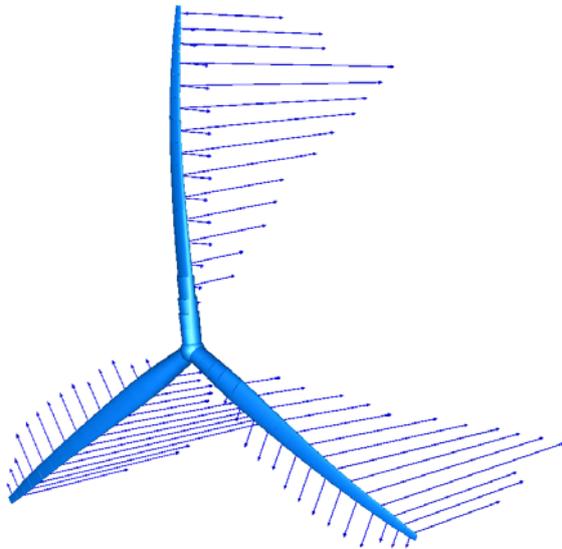


Abbildung 108: 3D-Visualisierung des Rotormodells sowie der angreifenden aerodynamischen Kräfte.

Die auf der Echtzeit-Hardware Opal-RT berechneten Simulationsergebnisse werden mit Daten verglichen, die in der normalen Simulationsumgebung auf einem PC mithilfe der OneWind® Modelica Bibliothek mit Dymola ermittelt wurden. So kann die korrekte Umsetzung des Simulationsmodells auf der Echtzeit-Hardware verifiziert werden. In allen folgenden Abbildungen stellen die durchgezogenen Linien die mit Dymola ermittelten Referenzergebnisse dar. Die gestrichelten Linien sind die mit Opal-RT ermittelten Ergebnisse. Im Rahmen dieser Untersuchung werden drei unterschiedliche Simulationsszenarien betrachtet und im Folgenden vorgestellt. Für alle Simulationen in Dymola werden die folgenden Simulationsparameter verwendet:

- Simulationszeit: 120s
- Lösungsalgorithmus: Runge-Kutta 4. Ordnung
- Integrationsschrittweite: 10 ms
- Ausgabeschrittweite: 10 ms
- Toleranz: 0.0001

Für das Simulink-Modell zur Berechnung auf Opal-RT werden entsprechende analoge Werte ausgewählt:

- Simulationszeit: unbegrenzt (da Echtzeit-Simulation, manueller Stopp nach 120 s)
- Lösungsalgorithmus: Runge-Kutta 4. Ordnung

- Integrationsschrittweite: 10 ms

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse auf unterschiedlichen Systemen werden im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen die Blattwurzellasten von Rotorblatt 1 verglichen, also die Schnittkräfte und –momente an der Schnittstelle zwischen Rotorblatt und Nabe. Rotorblatt 1 ist das Blatt, welches zu Beginn der Simulation senkrecht nach oben zeigt.

Simulationsszenario 1: Konstanter Wind, konstante Drehzahl

Es wird eine konstante Anströmung ohne Windscherung mit einer Windgeschwindigkeit von 11,4 m/s betrachtet. Der Rotor wird ideal von vorn senkrecht zur Rotorebene angeströmt, wobei der Wind in exakt horizontaler Richtung angenommen wird (d.h. keine vertikale Strömungskomponente). Die Rotorachse ist nicht gegenüber der Horizontalen geneigt. Der Rotor wird mit einer konstanten Drehzahl von 9 rpm angetrieben. Alle Blätter sind auf einen Blatteinstellwinkel von 0° eingestellt.

Abbildung 109 zeigt den zeitlichen Verlauf der Schnittkräfte an der Blattwurzel von Rotorblatt 1, welches zu Beginn der Simulation nach oben gerichtet ist. Es sind jeweils die Referenzergebnisse aus Dymola (durchgezogene Linie) und die Ergebnisse des Echtzeitsimulators (gestrichelte Linie) gegenübergestellt.

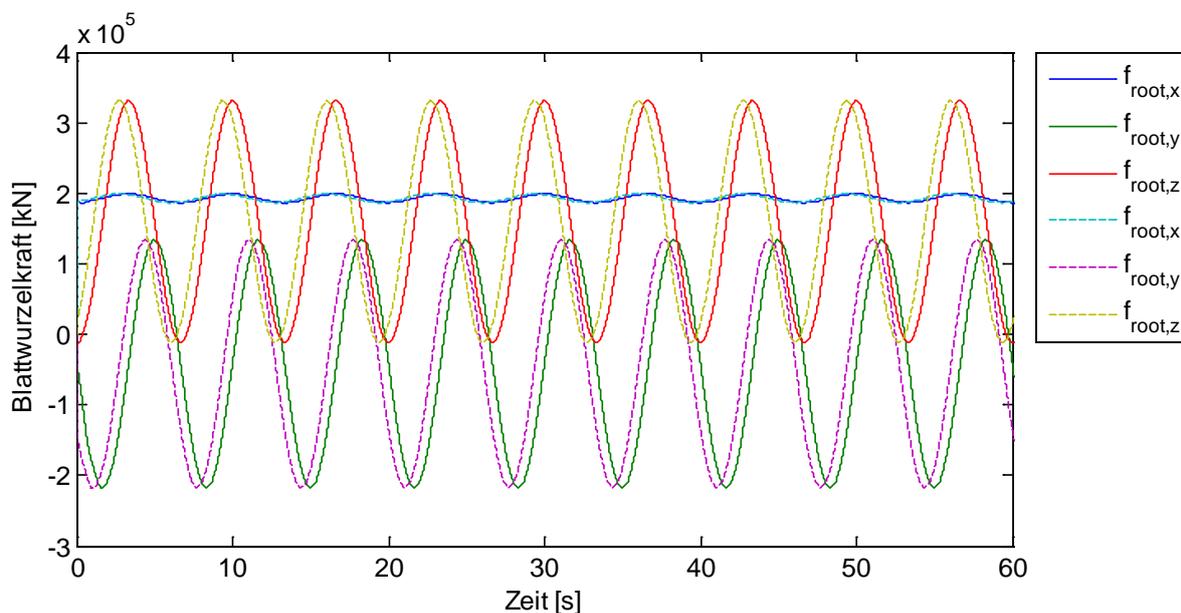


Abbildung 109: Blattwurzelkräfte für Simulationsszenario 1. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Auffällig ist der konstante zeitliche Versatz von etwa 1 s zwischen den Ergebnissen des Echtzeitsimulators und den am PC mit Dymola erstellten Referenzergebnissen. Dieser ist auf eine unterschiedliche Initialisierung auf der Echtzeithardware im Vergleich zur Simulation auf einem üblichen Rechner zurückzuführen. Wird das in Simulink eingebettete Modelica-Modell auf einem

Standard-Rechner über Simulink berechnet, ist kein solcher zeitlicher Versatz zwischen Simulink und Dymola zu beobachten.

Abgesehen vom zeitlichen Versatz sind die zeitlichen Verläufe der Schnittkräfte in der Blattwurzel beinahe deckungsgleich. Die Abweichungen bewegen sich im Rahmen der zu erwartenden numerischen Simulationsungenauigkeit, welche durch die verschiedenen Lösungsverfahren bedingt sind.

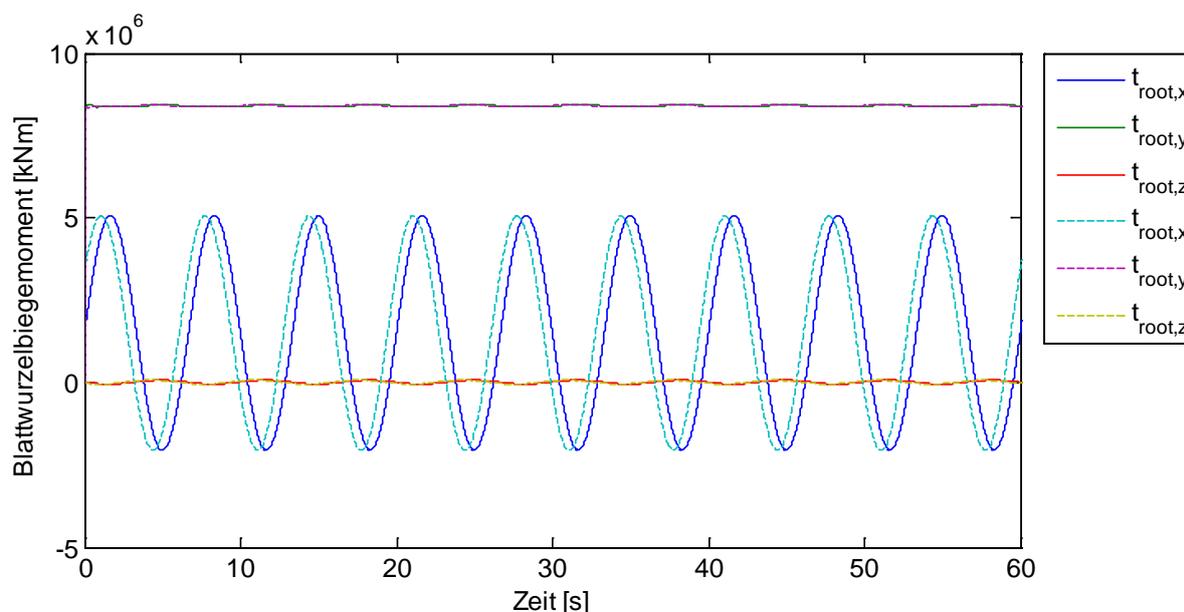


Abbildung 110: Blattwurzelbiegemomente für Simulationsszenario 1. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Abbildung 110 zeigt den Verlauf der Schnittmomente in der Blattwurzel von Rotorblatt 1. Auch hier ist, abgesehen von der zeitlichen Verschiebung, eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse zu erkennen. Da die Schwingungsamplituden der Komponenten in y- und z-Richtung deutlich kleiner sind, sind zur besseren Übersicht unten die Verläufe von $t_{\text{root},y}$ und $t_{\text{root},z}$ einzeln angegeben.

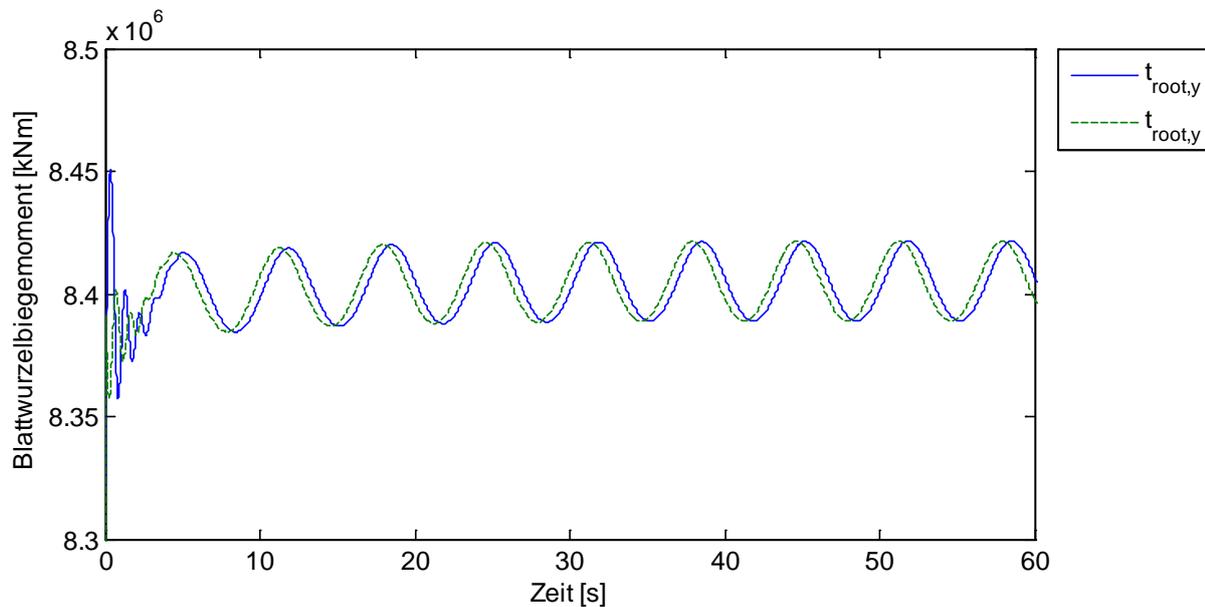


Abbildung 111: y-Komponente des Blattwurzelbiegemoments für Simulationsszenario 1. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

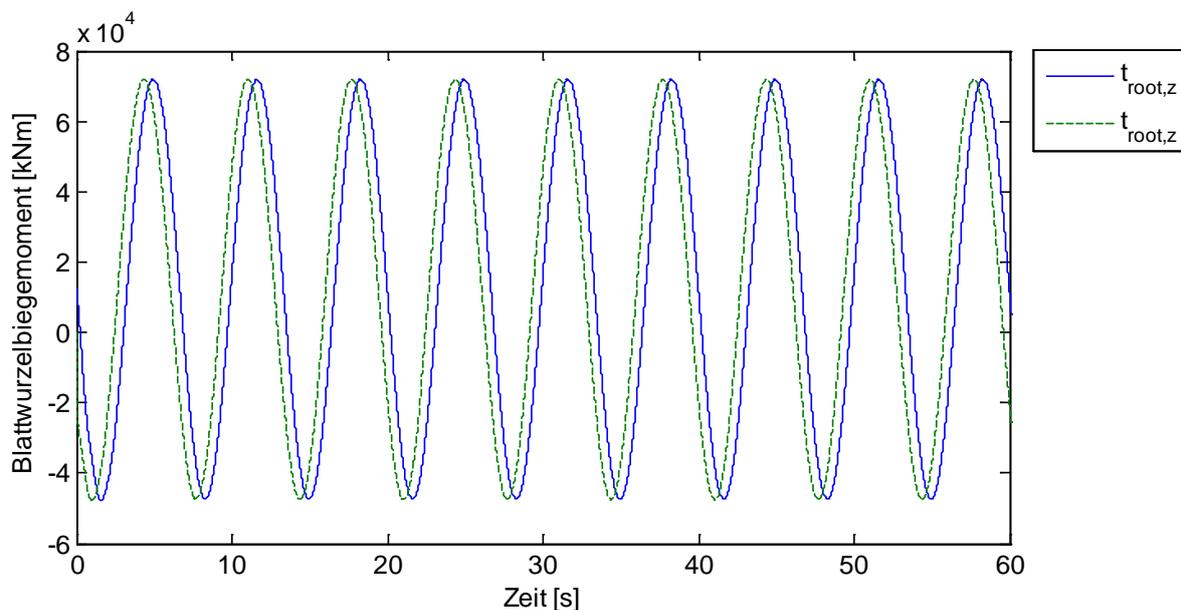


Abbildung 112: z-Komponente des Blattwurzelbiegemoments für Simulationsszenario 1. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Auch die in den Abbildungen Abbildung 111 und Abbildung 112 vergrößert dargestellten zeitlichen Verläufe des Blattwurzelbiegemoments um die y- bzw. die z-Achse bestätigen die bisher gefundenen Ergebnisse. Erneut ist bis auf den zeitlichen Versatz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Echtzeit- und den Referenzergebnissen zu erkennen.

Simulationsszenario 2: Turbulenter Wind, konstante Drehzahl

In einem zweiten Simulationsszenario wird eine Anströmung des Rotormodells mit turbulentem Wind betrachtet. Die Winddaten werden aus einer externen ASCII-Datei im TurbSim-Format eingelesen. Der turbulente Wind erhöht die Komplexität der Simulation. Gleichzeitig kann durch das Einlesen einer externen Winddatei grundsätzlich die Kompatibilität der Schnittstelle zwischen Dymola und externen Dateien bei der Anwendung auf der Echtzeithardware bestätigt werden. Die Hauptwindrichtung liegt wie in Simulationsszenario 1 ideal senkrecht zur Rotorebene. Zusätzlich wird im turbulenten Windfeld eine Windscherung mit einem Exponenten von 0,2 nach IEC berücksichtigt. Der Rotor wird mit einer konstanten Drehzahl von 9rpm angetrieben. Alle Blätter sind auf einen Blatteinstellwinkel von 0° eingestellt.

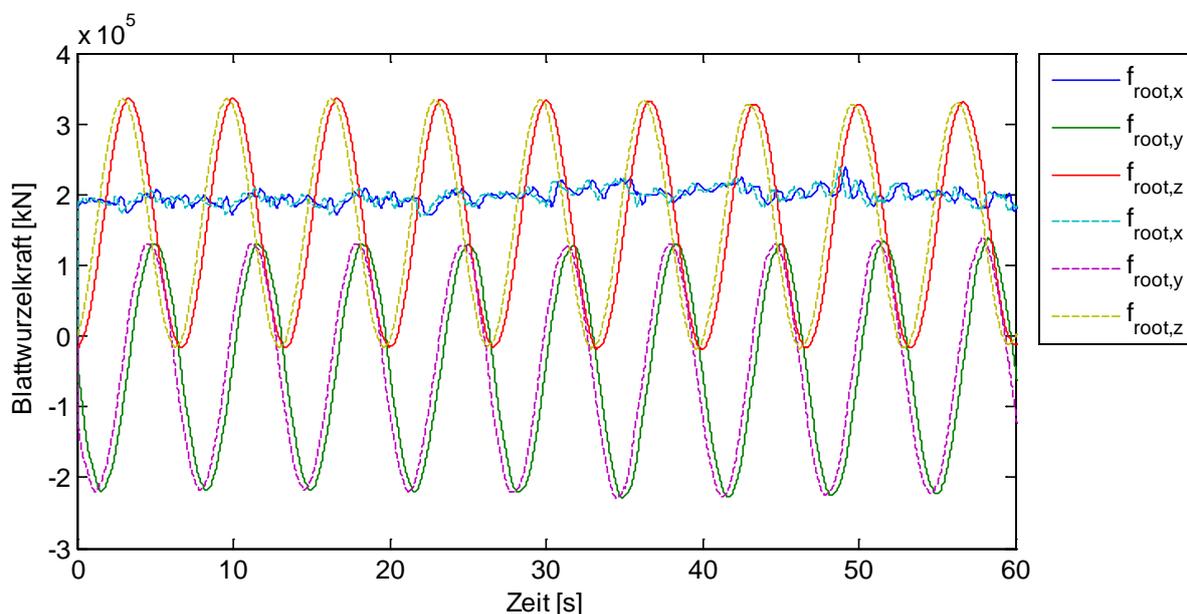


Abbildung 113: Blattwurzelkräfte für Simulationsszenario 2. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Abbildung 113 zeigt eine Übersicht der Blattwurzelschnittkräfte für Rotorblatt 1. Die Auswirkungen der turbulenten Anströmung sind gut in der x-Komponente der Kraft zu erkennen, welche die Schubkraft in Windrichtung darstellt. Sie ist zur besseren Übersicht vergrößert in Abbildung 114 dargestellt.

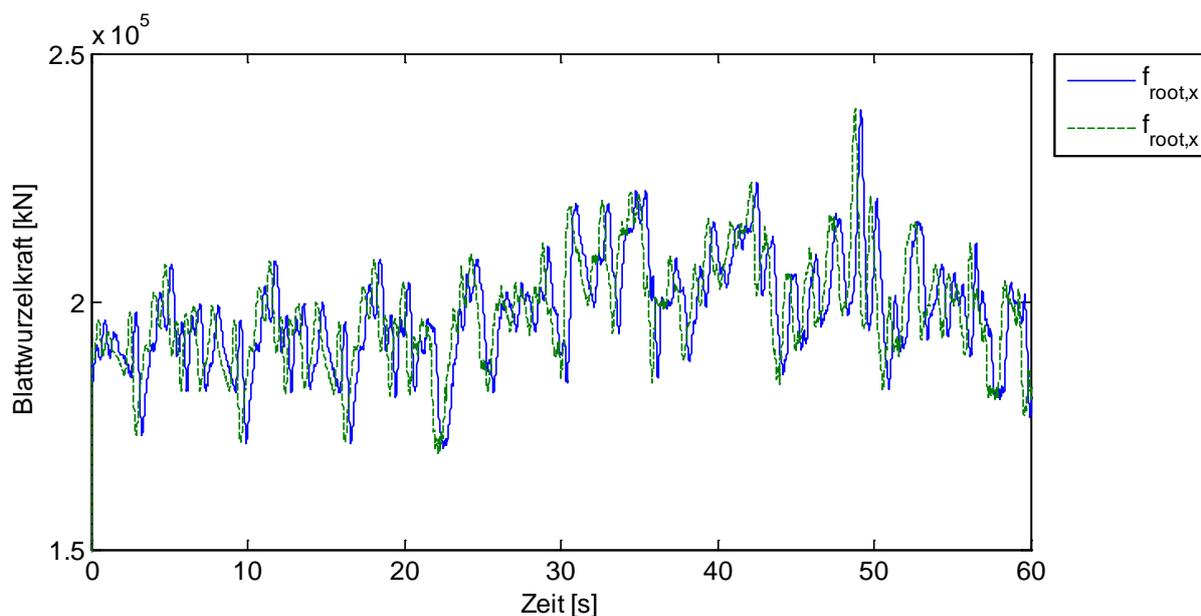


Abbildung 114: x-Komponente der Blattwurzelkraft für Simulationsszenario 2. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Die Ergebnisse zeigen auch für turbulenten Wind eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzergebnissen aus Dymola. Erneut ist der bereits beschriebene zeitliche Versatz zwischen den Ergebnissen zu erkennen.

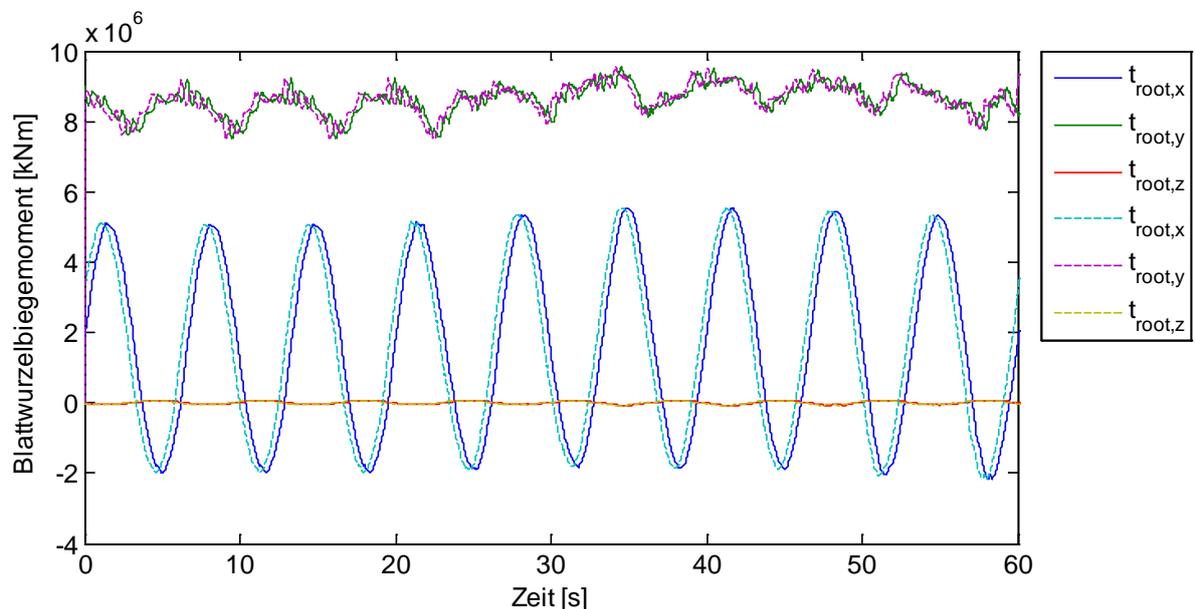


Abbildung 115: Blattwurzelbiegemomente für Simulationsszenario 2. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Für die Blattwurzelbiegemomente ergibt sich ein analoges Bild. Sie sind für alle Koordinatenrichtungen in Abbildung 115 sowie vergrößert für die y-Komponente in Abbildung 116 dargestellt.

Bis auf die zeitliche Verschiebung besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Referenzergebnissen sowie den mit der Echtzeithardware ermittelten Daten.

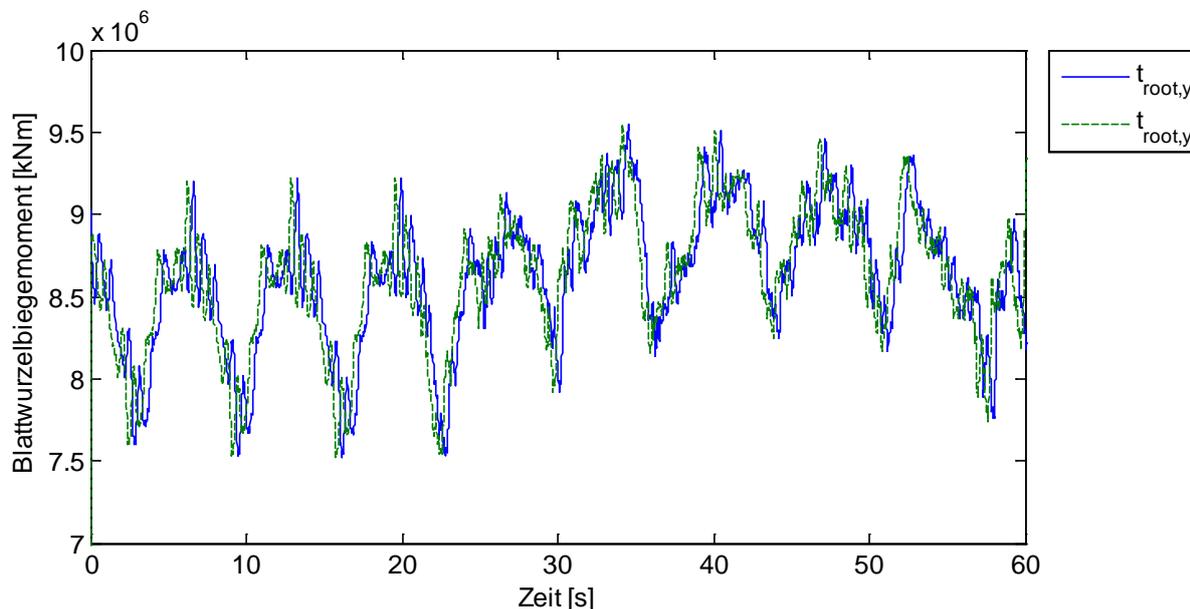


Abbildung 116: y-Komponente der Blattwurzelbiegemomente für Simulationsszenario 2. Durchgezogene Linie: Referenzergebnisse (Dymola), Gestrichelte Linie: Echtzeitsimulation (Opal-RT).

Zusammenfassung

Im Rahmen von Arbeitspaket 2.7.6 wurde die OneWind® Modelica Bibliothek erweitert, um Echtzeitfähigkeit zu erlangen. Die Echtzeitfähigkeit wurde für Systeme von Bachmann, Beckhoff und Opal-RT untersucht. Zur Erstellung eines echtzeitfähigen Simulationsmodells für Opal-RT auf Basis der OneWind® Modelica Bibliothek ist ein Umweg über eine weitere Software nötig, da keine direkte Schnittstelle zwischen dem Echtzeitsystem sowie Modelica bzw. Dymola besteht. Das Simulationsmodell aus der OneWind® Modelica Bibliothek muss daher via Dymola als S-Function in ein Simulink-Modell eingebunden werden. Das so erstellte Simulink-Modell kann anschließend auf der Echtzeit-Hardware Opal-RT ausgeführt werden.

Im Rahmen des Arbeitspakets 2.7.6 wurde ein Rotormodell unter unterschiedlichen Windbedingungen auf der Echtzeithardware simuliert. Dieses könnte in der Zukunft für die Kopplung mit dem IWES Gondelprüfstand DyNaLab verwendet werden. Dabei wurde auch die Einbindung externer Winddateien erfolgreich umgesetzt. Ein analoges Vorgehen zur Einbindung externer Dateien kann auch für die Kommunikation mit externen Regler-DLLs genutzt werden.

Die mit der Echtzeithardware berechneten Simulationsergebnisse weisen einen fast identischen zeitlichen Verlauf wie die mit Dymola erstellten Referenzergebnisse auf. Jedoch ist eine charakteristische Zeitverschiebung von rund 1s im Vergleich zur Referenz auffällig. Für Hardware-in-the-Loop-Tests mit der OneWind® Modelica Bibliothek sollte dies bei der Planung von Testszenarien berücksichtigt werden.

1.5. Ergebnisse der Anwendungsdemonstration (AP5)

1.5.1. Lastregelung

Einbindung des Reglers ins SIMPACK-modell

Der für die Lastregelung entwickelte Regler wurde in Matlab-Simulink ausgelegt und lag daher als Simulink-modell vor, das über die SIMAT-Schnittstelle an das SIMPACK-Modell angeschlossen wurde. Die Auslegung des Reglers ist in [24] dokumentiert.

Bei der Kopplung mit Matlab-Simulink wird die TCP/IP-Schnittstelle von SIMPACK genutzt, die auch für die Cosimulation mit S4 benötigt wird. Daher musste für die gleichzeitige Nutzung des Reglers und S4 der Regler direkt in das SIMPACK Modell integriert werden.

Zuerst wurde dafür die Erstellung des Reglers als Bladed-Style-DLL anvisiert, weil der Regler damit einfacher mit dem Standardregler der DTU ausgetauscht werden könnte. Durch Probleme bei der Code-Generierung konnte dieser Ansatz allerdings nicht erfolgreich umgesetzt werden. Der Grund war, dass für die Bladed-Style-DLL ein Interface-Wrapper um den automatisch generierten Code geschrieben werden musste und die benötigten Variablen im automatisch generierten Code nicht einfach auffindbar waren.

Schließlich wurde der Regler über das MatSIM-DLL-Interface eingebunden. Der Vorteil dabei war, dass die übergebenen Werte frei wählbar waren und einfach aus dem Simulink-Modell übernommen werden konnten. Als Nachteil ergab sich, dass durch die Nutzung einer anderen Reglerschnittstelle das SIMPACK-Modell geändert werden musste. Durch die zusätzlich vom Regler benötigten Messgrößen hätte das Modell allerdings ohnehin angepasst werden müssen. Bei den zusätzlich benötigten Messgrößen handelt es sich im Einzelnen um die Beschleunigung der Gondel in Windrichtung, den Rotorwinkel und die Momente am Blattanschluss in Schlagrichtung.

Beispiellastfälle

Im folgenden Abschnitt soll anhand zweier beispielhafter Lastfallszenarien das Potential des Lastreglers verdeutlicht werden. Dafür werden für jeden untersuchten Lastfall jeweils eine Rechnung mit dem Standard-Regler der DTU und Aerodyn, eine Rechnung mit dem Lastenregler – abgekürzt mit IPC – und Aerodyn, und eine Rechnung mit dem IPC-Regler und S4 verglichen. Die gerechneten Kombinationen sind in Tabelle 19 noch einmal zusammengefasst.

	Regler		Aerodynamik		$\overline{V}_{wind} = 15 \text{ m/s}$	
	DTU	IPC	AeroDyn	S4	20 Grad schräg	turbulent
1	X		X		X	
2		X	X		X	
3		X		X	X	

4	X		X			X
5		X	X			X
6		X		X		X

Tabelle 19: Übersicht der verglichenen Simulationsszenarien

Schräganströmung

Die hier gezeigten Ergebnisse wurden mit einem zeitlich konstanten Windfeld erzeugt, das eine Windgeschwindigkeit von 15 m/s auf Nabenhöhe besitzt. Über den Umlauf der Turbine entstehen periodische Anströmoeffizienten durch die Berücksichtigung der Bodengrenzschicht und einer Schräganströmung von 20 Grad. Es werden Ergebnisse für den quasistationären Zustand der Anlage bei Nenndrehzahl gezeigt.

Durch den hauptsächlich einfach periodischen Anteil der Anströmung wird eine Steuerbewegung ähnlich einer zyklischen Steuerung des Einstellwinkels erzeugt, während der Einstellwinkel mit dem Standardregler annähernd konstant bleibt. Dies kann in Abbildung 117 nachvollzogen werden. Darin sind die schwarze Kurve der Einstellwinkel bei Nutzung des Standardreglers (der für alle Blätter gleich ist) und die anderen Kurven die Einstellwinkel aller Blätter bei Nutzung der Einzelblattsteuerung. Bei beiden Simulationen wurde die Aerodynamik mit AeroDyn berechnet.

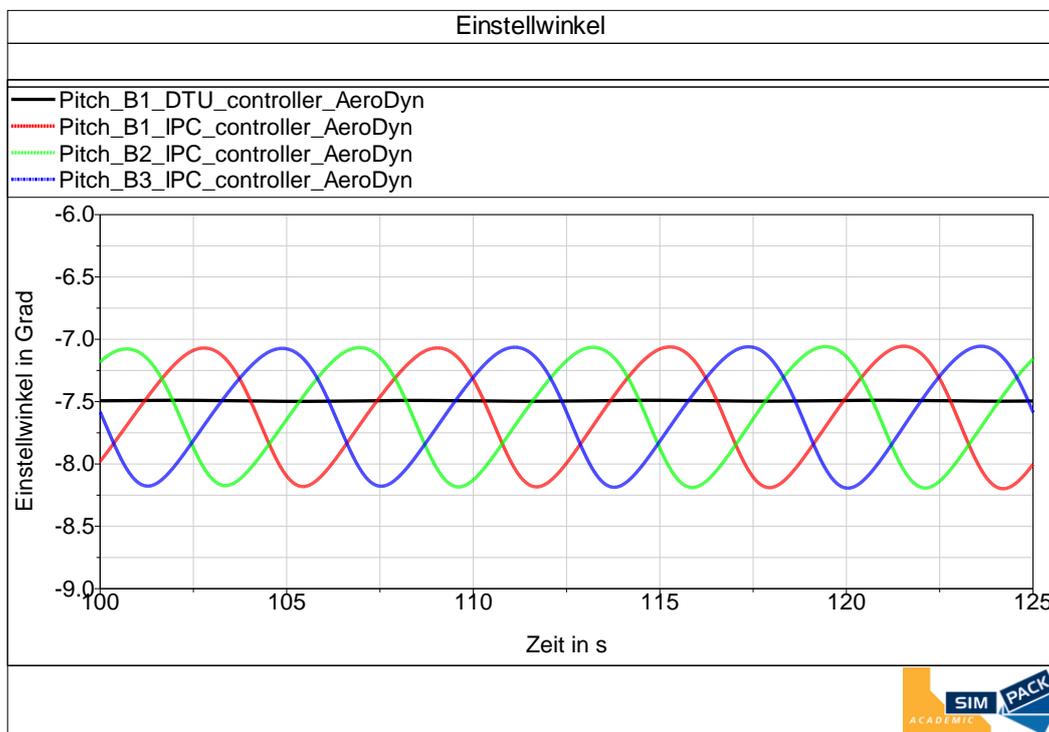


Abbildung 117: Einstellwinkel der drei Blätter mit IPC Regler und Schräganströmung

In Abbildung 118 und Abbildung 119 ist der Effekt der Einzelblattsteuerung auf die Belastungen der Blätter am Blattanschluss gezeigt. In den beiden Diagrammen ist jeweils in schwarz der Zeit-

verlauf bei Nutzung des Standardreglers und Aerodyn dargestellt. In rot ist das Ergebnis bei Nutzung des IPC-Reglers und Aerodyn, in blau bei Nutzung des IPC-Reglers und S4 gezeigt. Bei der Einstellwinkelsteuerung fällt auf, dass die Amplitude des periodischen Steuerwinkelanteils zwischen Aerodyn und S4 sehr gut übereinstimmt. Der Mittelwert des Einstellwinkels weicht allerdings um mehr als ein Grad ab und die Steuerbewegung weißt mit S4 höherharmonische Anteile auf.

In Abbildung 119 wurde der statische Anteil der Blattwurzelbelastung entfernt, um die Größe der für die Materialermüdung verantwortlichen Wechselbelastung besser vergleichen zu können. Im Zusammenspiel von S4 und dem IPC-Regler kann eine Reduktion der Wechselbelastung um 29 % erreicht werden. Durch die Einzelblattsteuerung wird auch die hauptsächlich auftretende Frequenz der Schwingungen verdoppelt. Da Faserverbundwerkstoffe kein ausgeprägtes Ermüdungsverhalten aufweisen, führt eine Verringerung der Belastungsamplitude zu einer stärkeren Erhöhung der Lebensdauer als die Erhöhung der Amplitude zu deren Verringerung führt. Die Simulation von SIMPACK-Aerodyn mit dem IPC-Regler sagt sogar eine Verringerung der Schlagmomenten-Amplitude um 57 % voraus.

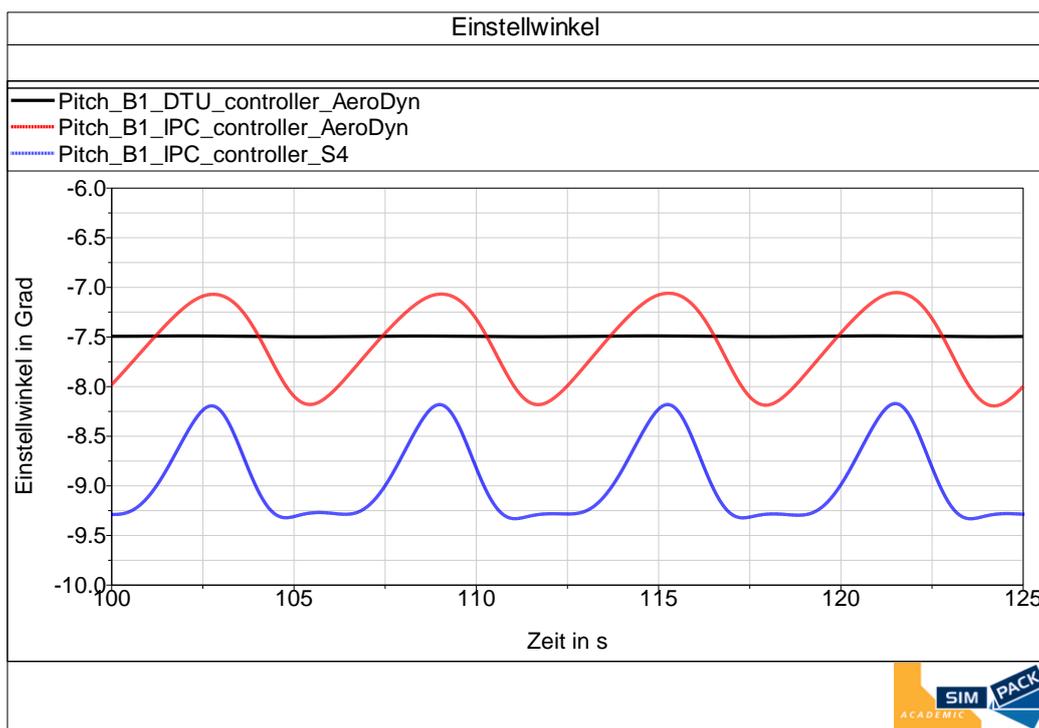


Abbildung 118: Vergleich des Einstellwinkels an Blatt 1 bei Schräganströmung

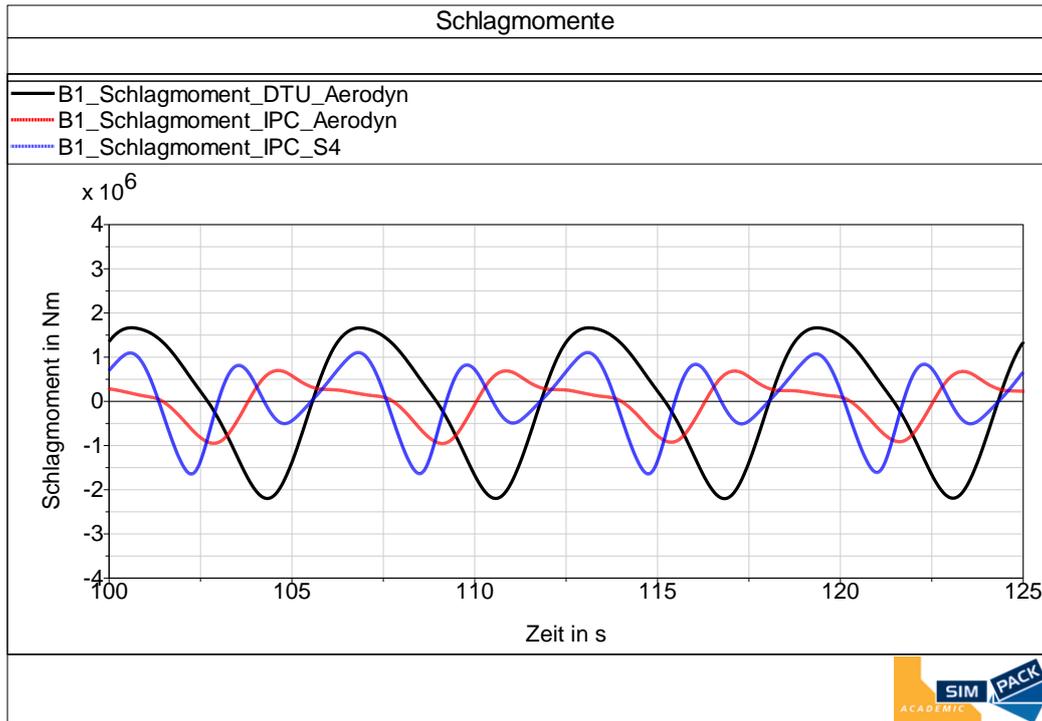


Abbildung 119: Vergleich der Schlagmomenten-Wechselbelastung am Anschluss von Blatt 1 bei Schräganströmung

Turbulente Anströmung

Um einen möglichst einheitlichen Ausgangszustand für die Untersuchung zu haben, wurde bei diesem Lastfall für das Hochdrehen der Anlage ein konstanter Wind genutzt. Danach wird ein turbulentes Windfeld genutzt, das in Abbildung 120 über die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe über der Zeit visualisiert ist.

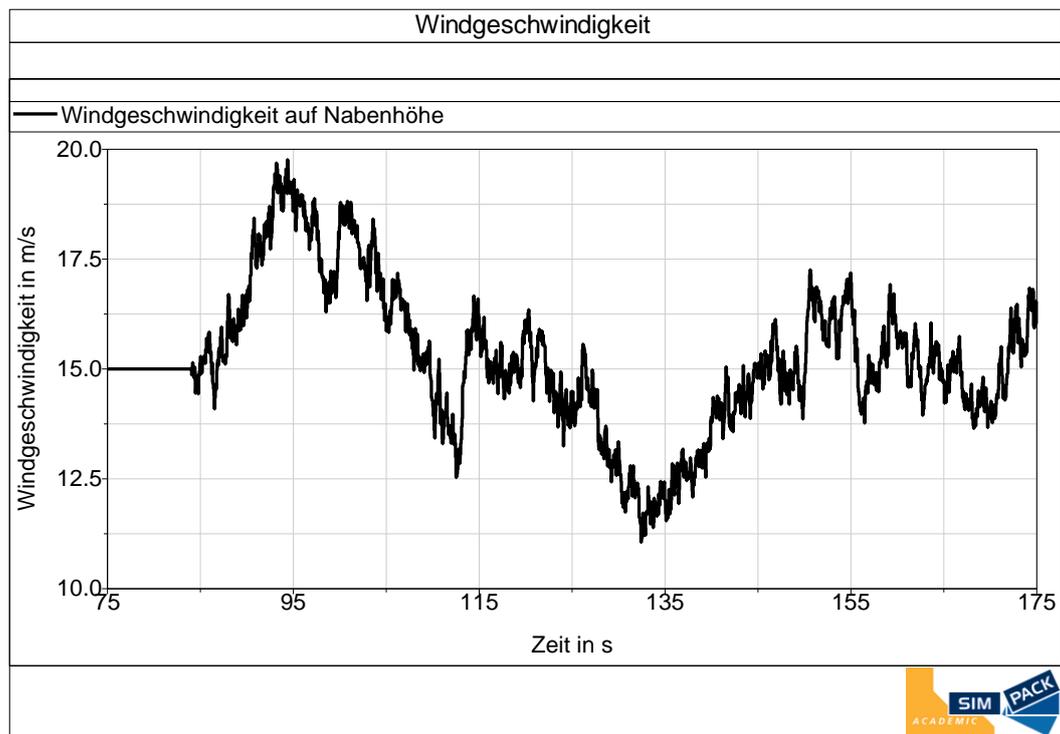


Abbildung 120: Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe bei turbulentem Wind

Der Einfluss des IPC-Reglers auf die Drehzahlhaltung ist in Abbildung 121 gezeigt. Unabhängig von der genutzten Aerodynamik kann die Variation der Drehzahl deutlich reduziert werden. Mit dem Standardregler liegen die maximalen Drehzahlabweichungen im untersuchten Zeitraum bei 15 %, während sie mit der Einzelblattsteuerung auf 7 % sinken.

Aus Abbildung 122 ist ersichtlich, dass im Falle turbulenten Windes im Vergleich zum im vorherigen Abschnitt gezeigten Einstellwinkelverlauf eine deutlich hochfrequenterere Steuerung stattfindet. Die Wechselbelastung an der Blattwurzel kann dadurch allerdings nicht signifikant verringert werden, wie in Abbildung 123 zu sehen ist.

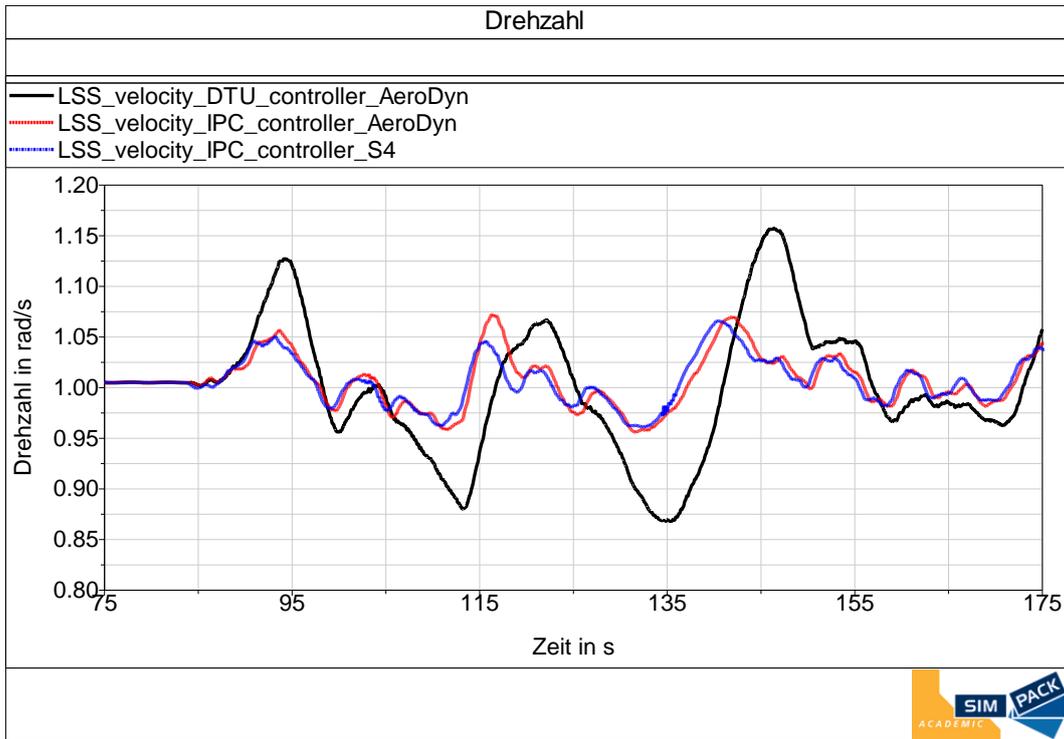


Abbildung 121: Vergleich der Rotordrehzahl bei turbulentem Wind

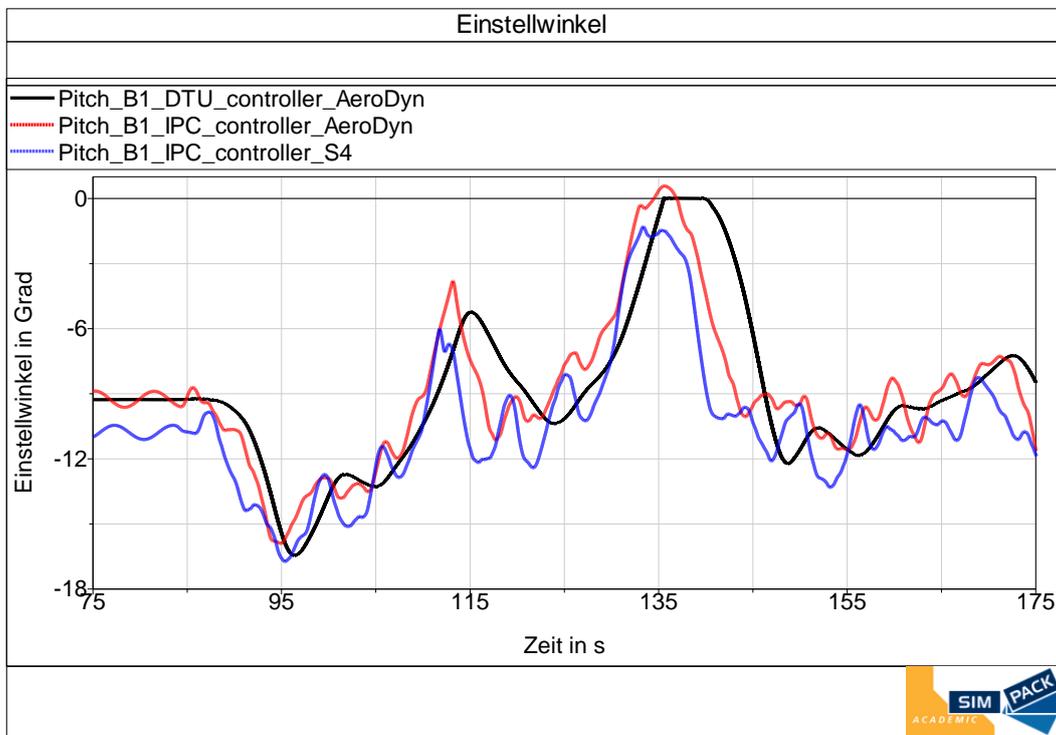


Abbildung 122: Vergleich des Einstellwinkels an Blatt 1 bei turbulentem Wind

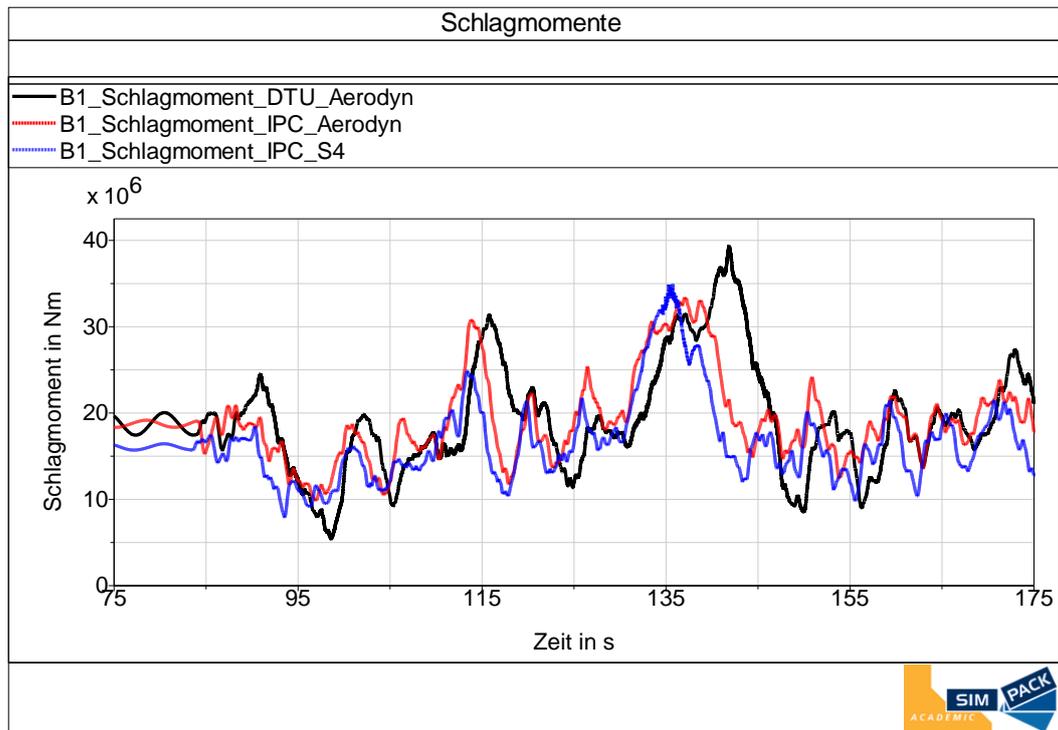


Abbildung 123: Vergleich der Schlagmomente am Blattanschluss von Blatt 1 bei turbulentem Wind

1.5.2. Lastanalyse und Blattstruktur

Im Rahmen von WindMuSE wurde mithilfe des Modellgenerators TurbGen, dem Lastentool TurbLoads und dem Strukturoptimierer DELiS eine Simulationskette zur Minimierung der Rotorblatt-Masse aufgebaut. Ausgehend von einem initialen Blattentwurf wird ein Simulationsmodell einer Windkraftanlage generiert, anschließend einer Lastenanalyse unterzogen, und schließlich - basierend auf den ermittelten Lasten - hinsichtlich der Blattmasse optimiert. Dieser Vorgang wird solange iteriert, bis die Änderung der Blattmasse zwischen den Ergebnissen zweier aufeinander folgender Durchläufe unter einen vorgegebenen Schwellwert fällt.

Die Lastenkette wurde im Zuge der Arbeiten in der RCE-Umgebung abgebildet. Zum Start der Kette ist ein Modell einer Windkraftanlage samt Blatt-Design erforderlich, welches auf das Eingabeformat von TurbGen projiziert werden muss. Zudem müssen die betrachteten Design-Lastfälle spezifiziert werden, die zur Ermittlung der Lasten simuliert werden sollen. Einen ersten groben Überblick über die Kette liefert die nachstehende Abbildung.

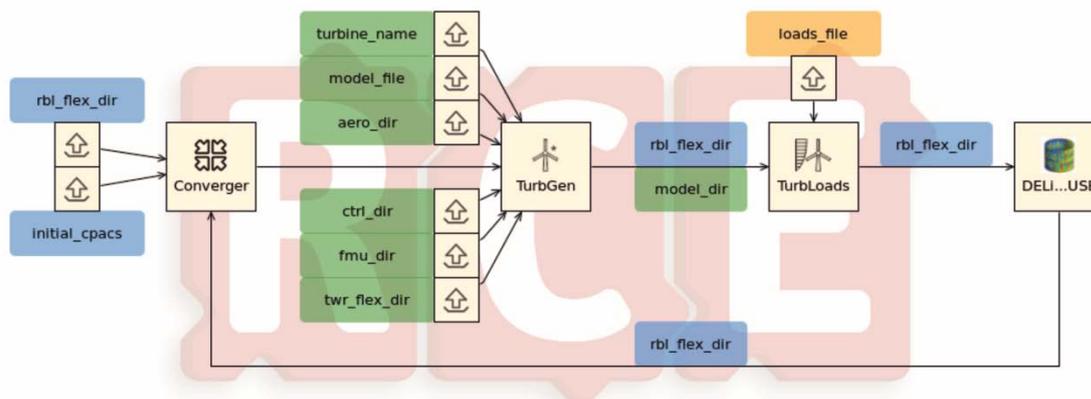


Abbildung 124: Simulationsworkflow „Loads-Structure“ bildet die Lastenkette in RCE ab

Der sogenannte Converger ist ein Standard-Block aus der internen RCE-Bibliothek. Er stellt zum einen den Startpunkt der Iteration dar, und bewertet zum anderen die Massenänderung zwischen zwei (oder bei entsprechender Einstellung auch mehr) aufeinander folgenden Durchläufen. Darüber hinaus dient er in der aufgebauten Kette als Durchreicher verschiedener Daten.

Der TurbGen-Block führt im Wesentlichen den Modellgenerator TurbGen aus. Dieser verwendet dabei stets die gleichen Eingabedaten mit Ausnahme des Ordners mit den Struktur-Definitions-Dateien für das Rotorblatt (`rbl_flex_dir`), welcher in jedem Durchlauf von DELiS modifiziert wird. Nach dem Modellaufbau werden der Ordner mit dem generierten Modell (`model_dir`), sowie der verwendete Ordner mit den Struktur-Definitions-Dateien (`rbl_flex_dir`) ausgegeben.

Der TurbLoads-Block kapselt die Lastenanalyse, die mittels TurbLoads ausgeführt wird. Zentral für die Lastenanalyse ist die .loads-Datei (`loads_file`), in der die zu rechnenden Lastfälle definiert sind. Neben dieser einzelnen Definitionsdatei erhält dieser Block vom Turbinengenerator zusätzlich das generierte Modell, welches in der Lastenanalyse untersucht werden soll (`model_dir`), sowie den für die Modellgenerierung verwendeten Ordner mit der Strukturdefinition des Rotorblatts

(rbl_flex_dir). Nach Abschluss der Lastanalyse werden die Lasten in die CPACS-Datei, also eine XML-Datei geschrieben, und anschließend gemeinsam mit dem rbl_flex_dir an den Strukturoptimierer DELiS weitergegeben. Der Ordner rbl_flex_dir wird dabei nur aus dem Grund weitergegeben, damit DELiS nach einem Durchlauf die neuen Strukturdateien in diesen Ordner hineinschreiben kann. Die dabei unveränderten Dateien werden später wieder bei Aufbau des neuen Modells benötigt.

Mit Hilfe von RCE wird ein CPACS-Datensatz an den DELiS-Block übergeben. Dieser Datensatz enthält die Lasten, welche an im Vorfeld definierten Knotenpunkten wirken. Die Knoten werden über das dynamic aircraft model (DAM) im CPACS definiert. Die Definition der dynamicAircraft-ModelPoints findet dabei über kartesische Koordinaten statt. Die Zahl der DAM Punkte und der die Länge des Lastvektors müssen identisch sein.

Nachdem der CPACS-Datensatz transferiert worden ist, wird der DELiS Prozess angestoßen, das Modell dimensioniert und eine modale Reduktion wird durchgeführt. Das modal reduzierte Rotorblattmodell wird dann wieder an den Lastenprozess übergeben.

Blattstruktur (DELiS)

In diesem Abschnitt wird der Dimensionierungsprozess mit effektiven Laminaten mit der Referenz der DTU verglichen. In einem weiteren Schritt werden die Dimensionierungsannahmen geprüft und deren Einfluss auf die Ergebnisse der Dimensionierung untersucht. Aufgrund der Einfachheit der DTU Modelle wird hier nur die Maximaldehnung in Rotorradiusrichtung als Kriterium zugelassen. Querkontraktionseffekte werden vernachlässigt, was zu Problemen bei der Bewertung der eigentlichen Belastungsverteilung führen kann [4].

Vergleich der Ergebnisse der Dimensionierung mit dem Referenzrotor

Der Vergleich der Gesamtmasse zwischen dem DELiS Prozess und dem DTU Rotor ist in Tabelle 20 und zeigt eine geringere Abweichung. Hierbei wurde als Dimensionierungskriterium die maximale Dehnung in x-Richtung mit Kennwerten der DTU verwendet.

	DTU [t]	DELiS [t]
Masse	42	41

Tabelle 20 Vergleich der Gesamtmasse zwischen der DTU und DELiS

Bei der Betrachtung der Eigenfrequenzen ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen, siehe Tabelle 21. Die Reihenfolge der Eigenformen ist dabei identisch.

Eigenfrequenz	DTU [Hz]	DELiS [Hz]
1	0.61	0.2676
2	0.93	0.32760
3	1.74	0.85272
4	2.76	1.7216
5	3.57	1.9635

Tabelle 21 Vergleich der Eigenfrequenzen zwischen der DTU und DELiS

Bewertung der Dimensionierungskriterien

Es wurden verschiedene Dimensionierungskriterien in der gleichen Kette mit dem gleichen Modell angewandt. Im dargestellten Modell sind das zulässige Dehnungswerte in x-, bzw. y-Richtung, sowie zulässige Werte zur Vermeidung von struktureller Instabilität (Beulenversagen). Diese Werte sind im Falle der Dehnungswerte Materialkenngrößen. Im Falle von Beulversagen sind es Vergleiche mit analytischen Abschätzungsverfahren.

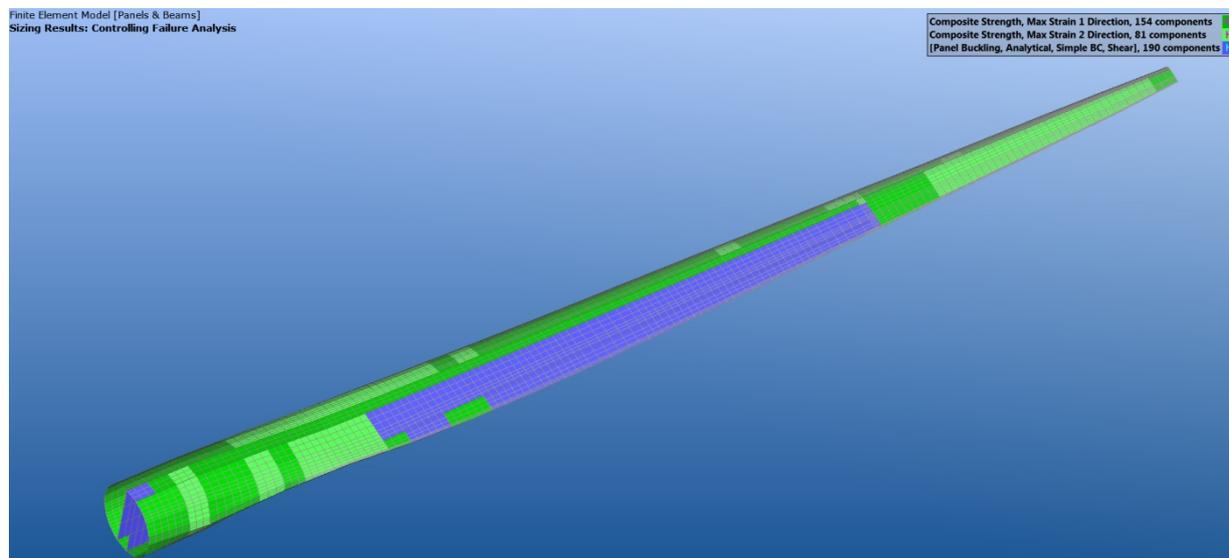


Abbildung 125 Darstellung des dimensionierenden Kriteriums

In Abbildung 125 sind die dimensionierenden Kriterien für die verschiedenen Regionen dargestellt. Man kann erkennen, dass bei der Hinzunahme der Querdehnung (max strain 2 direction) als Dimensionierungskriterium, dieses Kriterium einen substanziellen Einfluss hat. Die Masse des Rotors steigt hierdurch auf 50.1 t an.

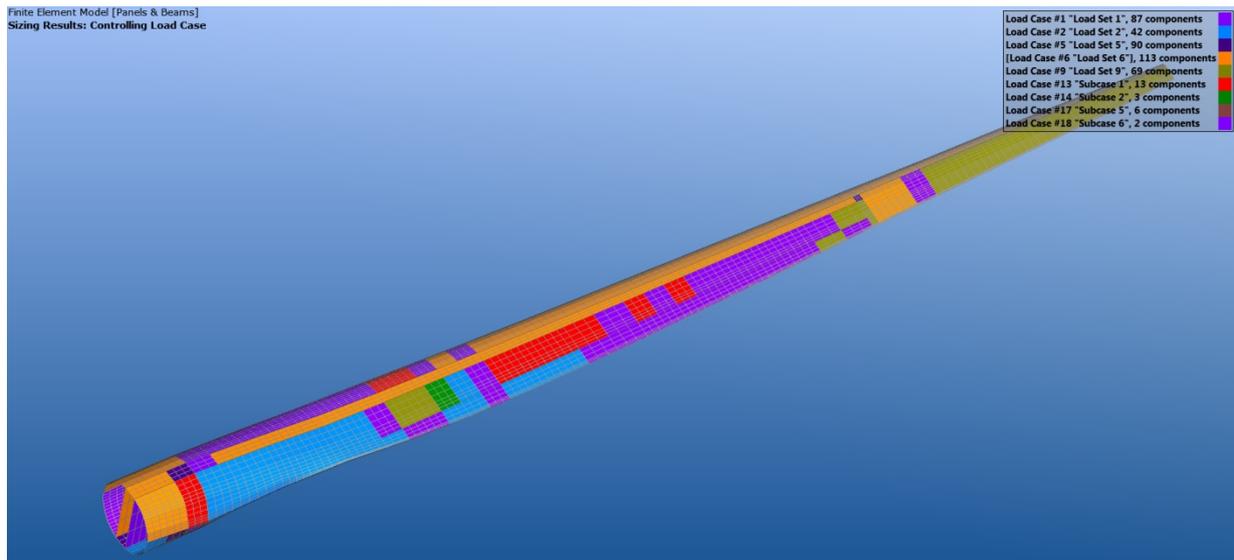


Abbildung 126 Dimensionierende Lastfälle

Abbildung 126 zeigt die dimensionierenden Lastfälle. Im vorderen Hinterkantenbereich wirkt sich der Lastfall 2 und das ϵ_{22} Kriterium aus. Um den Effekt darzulegen, wird die DELiS Referenz mit 41 t Gewicht analysiert. Hier wird eine Finite-Elemente-Analyse durchgeführt und die maximale Dehnung in 11 und 22-Richtung darzustellen. Es ist dabei zu beachten, dass im Finite-Elemente-Modell die globale y-Richtung der 11-Richtung und die globale x-Richtung der 22-Richtung im Dimensionierungsprogramm entspricht.

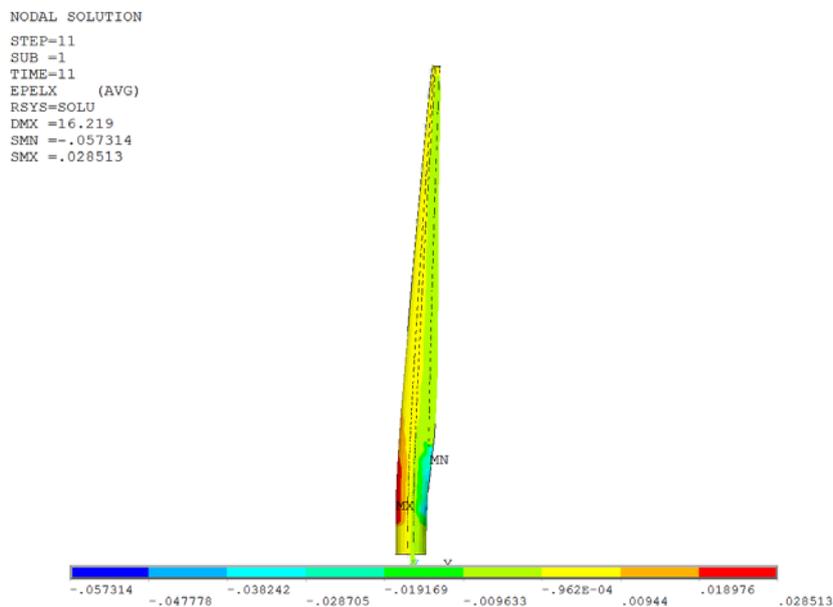


Abbildung 127 Dehnungen in 11-Richtung in Elementkoordinaten

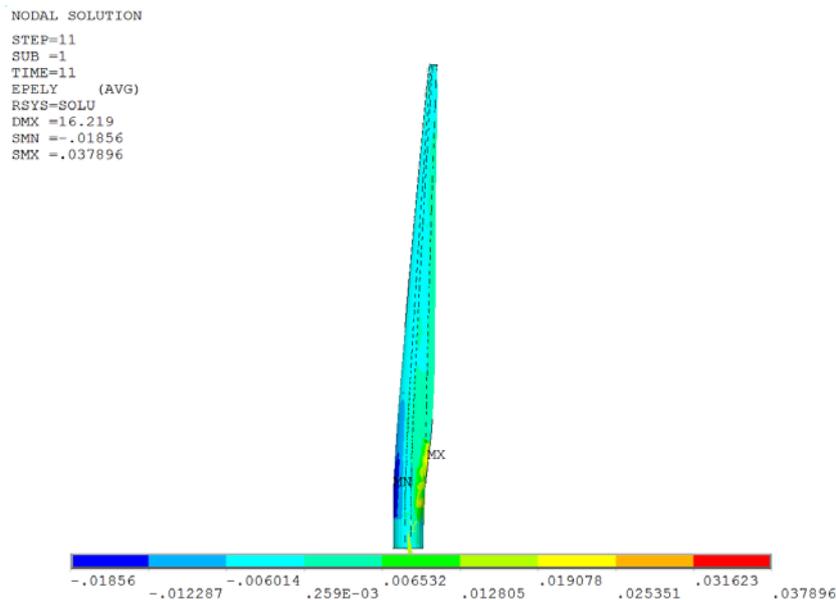


Abbildung 128 Dehnungen in 22-Richtung in Elementkoordinaten

Abbildung 127 und Abbildung 128 stellen jeweils die Dehnungen in 11- und 22-Richtung dar. Dargestellt sind die Dehnungen im bereits dimensionierten Rotor, wo nur die 11-Dehnung als Kriterium verwendet worden ist. Es ist zu erkennen, dass im Bereich der Hinterkante die Dehnungen die Werte für die 22-Richtung höher sind als die erlaubten 2.1% kritischen Dehnungen. Es ist anzumerken, dass der Wert auch in einigen Bereichen der 11-Richtung nicht exakt erfüllt wird, da die Konvergenz noch nicht vollständig erreicht worden ist.

Dennoch zeigt das Beispiel, dass eine Reduktion der Vordimensionierung auf nur die 11-Hauptkomponente, wie es bei balkenbasierten Dimensionierungswerkzeugen modellbedingt der Fall ist, zu Problemen führen kann.

Es wurden weitere Analysen mit verschiedenen Dimensionierungskriterien durchgeführt. Die Masenergebnisse sind in Tabelle 22 dargestellt. Die Qualität der Ergebnisse muss mittels einer Validierung geprüft werden.

Kriterium	Masse [t]
ϵ_{11} , Simple Shear	42
ϵ_{11} , ϵ_{12} , ϵ_{22} , Simple Shear	61
ϵ_{11} , ϵ_{22} , Simple Shear	50
ϵ_{11} , Energy Solution	109

Tabelle 22 Einfluss von Dimensionierungskriterien

In Abbildung 129 ist eine alternative Bauweise dargestellt. Diese wurde im Projekt analysiert, um den Effekt einer geometrisch induzierten Biege-Torsionskopplung auf das Strukturverhalten und die Dimensionierung zu studieren. Die Biege-Torsionskopplung soll dabei die lokale Belastung der

Struktur reduzieren. Das geschieht zum einen, da sich das Rotorblatt bei einer Böe aus dem Wind dreht. Zum anderen werden die Spannungen in den jeweiligen Richtungen durch eine Lastumlagerung besser ausgenutzt.

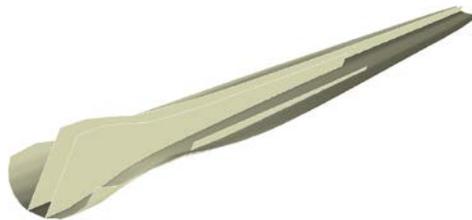


Abbildung 129: Alternative Holmbauweise

Hierbei konnten die Wechselwirkungen zwischen Deformation, Lasten und Masse aus der Dimensionierung plausibel dargestellt werden. Die geänderten Massen und Eigenfrequenzen zeigen die Notwendigkeit einer integrierten Strukturauslegung in einer globalen Auslegungskette.

Für die Bewertung des Designs wurden die gleichen Dimensionierungskriterien verwendet wie für die Ergebnisse in Tabelle 20. Der Lastenprozess wurde nicht geändert. Die Ergebnisse der Vordimensionierung sind in Tabelle 23 und Tabelle 24 zu sehen. Der Rotor ist nach der Vordimensionierung leichter. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Rotor aufgrund der Biege-Torsionskopplung höhere ε_{12} Beanspruchungen erfährt. Da diese in der Vordimensionierung der Lastenkette nicht als Kriterium aktiviert sind, wird diese stärkere Beanspruchung eventuell nicht richtig bewertet.

	DTU [t]	DELiS neues Design[t]
Masse	42	37

Tabelle 23 Massenvergleich der Bauweisen nach der Vordimensionierung

Die Eigenfrequenzen liegen unterhalb der Eigenfrequenzen des Referenzblattes.

Eigenfrequenz	DTU [Hz]	DELiS altes Design [Hz]	DELiS neues Design[Hz]
1	0.61	0.2676	0.30735
2	0.93	0.32760	0.36545
3	1.74	0.85272	0.85368
4	2.76	1.7216	1.4180
5	3.57	1.9635	1.9146

Tabelle 24 Eigenfrequenzvergleich der Bauweisen nach der Vordimensionierung

Bei der Dimensionierung mit VErSO ergibt sich im Gegensatz zur Vorauslegung eine höhere Masse als im Referenzdesign. Die Ursache ist die Berücksichtigung von Energiemethoden bei der Beulanalyse. Tabelle 25 zeigt die Masse im Vergleich zur Referenz.

	Referenz [t]	DELiS neues Design[t]	VErSO neues Design [t]
Masse	42	37	47

Tabelle 25 Massenvergleich der Bauweisen

Abbildung 130 zeigt die kritischen Fehlerkriterien und es ist klar zu erkennen, dass die Beulanalyse (Blau) das treibende Kriterium ist. Speziell bei der erzwungenen Biege-Torsion-Kopplung ergeben sich viele Lastkombinationen, die nur durch Energiemethoden abgebildet werden. Dadurch erhöht sich die Masse im Vergleich zur Annahme von schubdominiertem Beulen.

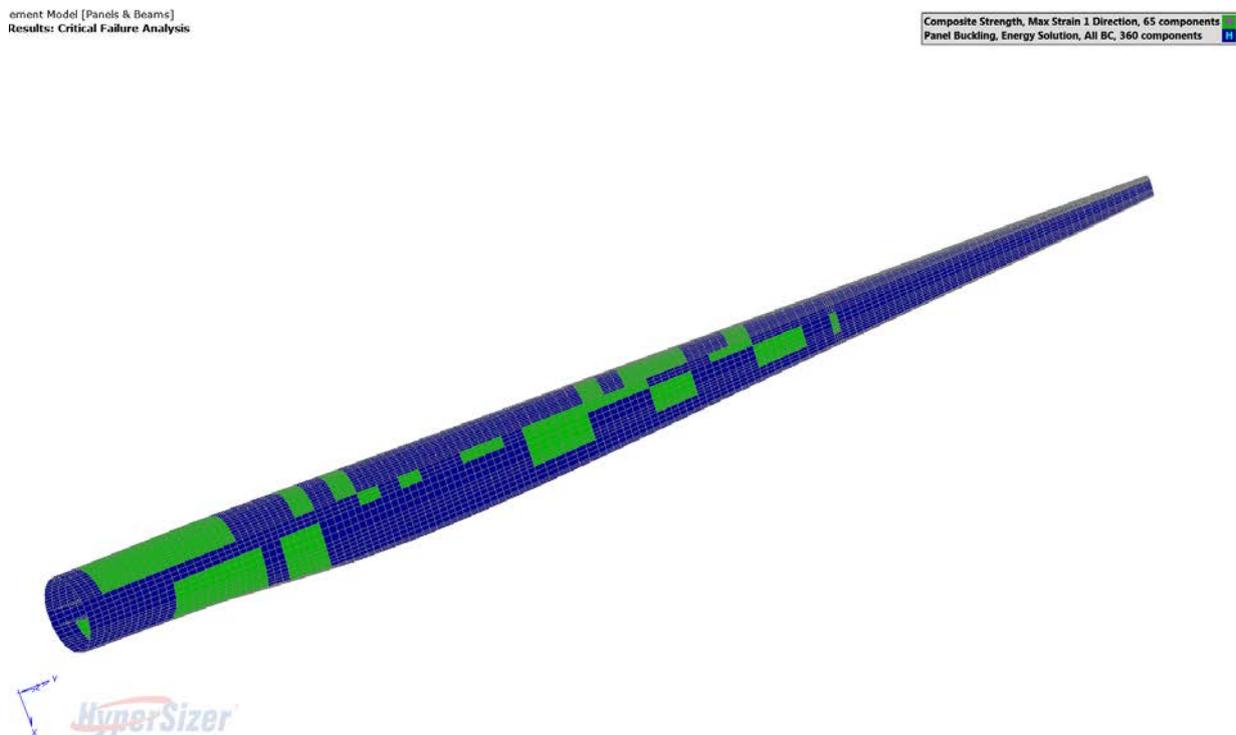


Abbildung 130: Fehlerkriterium neues Design VErSO

Durch unterschiedliche Massen ergeben sich auch Unterschiede in den Eigenfrequenzen, welche in Tabelle 26 abgebildet sind.

Eigenfrequenz	DTU [Hz]	DELiS neues Design[Hz]	VErSO neues design [Hz]
1	0.61	0.30735	0.37
2	0.93	0.36545	0.57
3	1.74	0.85368	1.42
4	2.76	1.4180	2.79
5	3.57	1.9146	3.03

Tabelle 26 Eigenfrequenzvergleich der Bauweisen nach erweiterter Dimensionierung

Für eine finale Bewertung der Bauweise müssen noch zusätzliche Analysen erfolgen. Eine Betrachtung aller Lastfälle, im Gegensatz zur verwendeten Methode der Maximallasten, würde vermutlich bereits zu einer Reduktion der Masse führen. Solche Untersuchungen erfordern jedoch wesentlich mehr Rechenaufwand.

1.6. Referenzen

- [1] J. Jonkman et al.: Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL Technical Report TP-500-38060, Feb. 2009
Online: http://mhk.pnnl.gov/wiki/images/b/bb/Jonkman_et_al_2009.pdf
- [2] J. Jonkman, W. Musial: "Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA, Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment", Technical Report NREL/TP-5000-48191, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA, 2010
Online: <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/48191.pdf>
- [3] J. Jonkman et al.: "Offshore Code Comparison Collaboration within IEA Wind Annex XXIII: Phase II Results Regarding Monopile Foundationing" <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42471.pdf>
- [4] OC3-Benchmark Exercise of Aero-elastic Offshore Wind Turbine Codes http://iopscience.iop.org/1742-6596/75/1/012071/pdf/jpconf7_75_012071.pdf
- [5] J. Jonkman et al.: "Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4), Phase I – Results of Coupled Simulations of an Offshore Wind Turbine with Jacket Support Structure", Conference Paper NREL/CP-5000-54124, National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA, 2012 Online: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54124.pdf>
- [6] Larsen: Turbulence for the IEA Annex 30 OC4 project
Online: [http://ftp.risoe.dk/pub/pfv/tjul/ris%F8-3206\(en\)-turbulence-jan2013.pdf](http://ftp.risoe.dk/pub/pfv/tjul/ris%F8-3206(en)-turbulence-jan2013.pdf)
- [7] OC4 Download der Winddateien, Online: <http://ftp.risoe.dk/pub/pfv/tjul/>
- [8] Hansen: Basic DTU Wind Energy controller Online: [http://orbit.dtu.dk/en/publications/basic-dtu-wind-energy-controller\(ff8123f8-55d2-4907-af7f-2fa139987c33\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/basic-dtu-wind-energy-controller(ff8123f8-55d2-4907-af7f-2fa139987c33).html)
- [9] Bak et al., Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine, DTU Wind Energy Report-I-0092 Online: <http://dtu-10mw-rwt.vindenergi.dtu.dk>
- [10] Vorpahl, F., Popko, W.: Description of the Load Cases and Output Sensors to be Simulated in the OC4 Project under IEA Wind Annex 30 [http://www.ieawind.org/task_30/Publications/Vorpahl,%20Popko%20\(2013\)%20-%20OC4%20Load%20Cases%20Description.pdf](http://www.ieawind.org/task_30/Publications/Vorpahl,%20Popko%20(2013)%20-%20OC4%20Load%20Cases%20Description.pdf)
- [11] IEC 61400-1: Wind turbines – Part 1: Design requirements, 3rd ed., 2005
- [12] <https://www.ieawind.org/taskWebSites.html>
- [13] J. M. Jonkman und M. L. Buhl, „FAST User's Guide“, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2005.
- [14] Garrad Hassan & Partners Ltd., „Bladed User Manual“, Garrad Hassan & Partners Ltd., Bristol, 2010.
- [15] M. Strobel, F. Vorpahl, C. Hillmann, X. Gu, A. Zuga und U. Wihlfahrt, The OnWind Modelica Library for Offshore Wind Turbines - Implementation and first results, Bremerhaven.
- [16] P. Thomas, X. Gu, R. Samlaus, C. Hillmann und U. Wihlfahrt, The OneWind Modelica Library for Wind Turbine Simulation with flexible Structure - Modal Reduction Method in Modelica, Bremerhaven, 2014.

- [17] M. Leimeister, P. Thomas, The OneWind Modleica Library for Floating Offshore Wind Turbine Simulation with flexible Structures, 12th International Modelica Conference, Prague, 2017.
- [18] GL, Guideline for the Certification of Wind Turbines, Hamburg: Germanischer Lloyd, 2010.
- [19] B. Jonkman, „TurbSim User's Guide,“ National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.
- [20] J. G. J. Hayman and M. Buhl, „MLife User's Guide,“ National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012.
- [21] Opal RT. RT-LAB Version 11.0 User Guide. Montreal : s.n., 2015.
- [22] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR technical note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- [23] Prandtl, L., 1944: Führer durch die Strömungslehre, Vieweg & Sohn, 384 pp.
- [24] Hoffmann A. F. and Weiß F. A., 2016: Controller design for wind turbine load reduction via multiobjective parameter synthesis. The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016); J. Physics Conf. Ser. 753
- [25] J. Hofmann, L. Krause, M. Mindt, M. Graser und S. Surrey, 2014: „Rotor Simulation and Multi Body Systems: Coupling of Helicopter Aerodynamics with SIMPACK“ in Deutscher Luft und Raumfahrtkongress, Augsburg.
- [26] A. Länger, 2014: „Validation of TAU-HOST coupling chain with HART-II test cases,“ Braunschweig.
- [27] D. O. Yu, O. J. Kwon, 2013: “A coupled CFD-CSD Method for Predicting HAWT Rotor Blade Performance”, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 07 – 10.01.2013, Grapevine, Texas
- [28] P. Fuglsang, I. Antoniou, D. Kristian S. und H. A. Madsen, 1998: „Wind Tunnel Tests of the FFA-W3-241, FFA-W3-301 and NACA 63-430 Airfoils,“ Roskilde.
- [29] Shaw, R. H. and Schumann, U., 1992: Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest, Bound. Layer Meteor., 61, 47-64.

2. Übersicht zahlenmäßiger Nachweis

Im Folgenden ist der zahlenmäßige Nachweis tabellarisch aufgelistet. Kostenart und Position entsprechen denen im Zuwendungsbescheid. Die tatsächlich entstandenen Kosten sind für die Personalkosten gesondert aufgeteilt. Die Verwendung der Mittel ist in der Spalte *Erläuterung* kurz dargestellt. Weiterhin werden zu jeder Position diejenigen Kapitel im Schlussbericht zugeordnet, in denen die entsprechenden Arbeitsergebnisse beschrieben sind. Seitens des Projektteams wurden keine Missverhältnisse festgestellt.

Kostenart	Position (lt. AZK)	Entstandene Kosten in €	Aufteilung in € (ca.)	Erläuterung	Zugehöriges Kap. im Schlussbericht
Material	0813	1.862,71		Ausbau Hardware-Prüfstand zur HiL-Echtzeitdemo	1.4.8
FE-Fremdleist.	0823	0,00			
Personalkosten	0837	3.307.958,50			
			200.000,00	Winddaten	1.3.1
			300.000,00	Polare und CFD-Kopplung	1.3.2, 1.4.6
			900.000,00	Profilaerodyn., Weiterent- wickl. S4 Rotorsim., Echtzeit- demo	1.3.3, 1.4.5, 1.4.6, 1.4.8
			300.000,00	Strukturdaten, Blatt- dimensionierung	1.3.4, 1.4.7, 1.5
			400.000,00	Turbinenmodelle, Turb- Gen/Loads	1.3.5, 1.4.4, 1.5
			800.000,00	Komponentenmodelle, HiL- Echtzeit-Demo, Projektltg.	1.3.6, 1.4.8, 1.2
			400.000,00	RCE und Workflow-Support	1.4.3, 1.5
Reisekosten	0838	16.954,56		Proj.treffen und Konferenzen	
Anlagenkosten	0847	0,00			
Sonst. unmittelb. Vorhabenkosten	0850	56.794,21		Tool-Schulungen, SW- Lizenzen	
Kosten inner- betr. Leistungen	0856	20.601,78		Hochleistungsrechner CFD	1.3.2, 1.4.6
Summe:		3.404.171,76			

Tabelle 27: Zahlenmäßiger Nachweis des Verbundpartners DLR

3. Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Grundsätzlich bilden die Personalkosten die wesentliche Kostenursache. Da die Qualität der Simulationsergebnisse stark von der Qualität der Eingabedaten abhängt, waren entsprechende Experten für Meteorologie, Aerodynamik und Strukturmechanik im Projekt einzubinden. So waren für die Kapitel 1.3.1-1.3.4 je ein Mitarbeiter tätig, jedoch nur bis zu 75% Auslastung.

Zwei weitere Mitarbeiter entwickelten das Rotorsimulationstool S4 weiter (Kap. 1.4.5) und unterstützten bei der CFD-Kopplung (Kap. 1.4.6) sowie der Echtzeitdemonstration (Kap. 1.4.8). Für die Entwicklung und Validierung des Werkzeugs S4 sind bereits viele Jahre an Hubschrauber-Erfahrung und -Ressourcen eingeflossen. Diese nun für die Windenergie nutzbar zu machen, was ein Hauptziel des Projekts war, bedeutete eine Weiterentwicklung der Software hinsichtlich variabler Drehzahl, dynamischer Windfelder, Turmvorstau und bewegter Nabe. Weiterhin sind für die Verwendung von S4 Profilpolaren in sehr guter Qualität und ohne logische Fehler notwendig. Solche Polaren waren bislang nicht verfügbar und sind mittels aufwändiger CFD-Rechnungen auf Hochleistungsrechnern erstmals erzeugt und veröffentlicht worden. Auf diese Weise können mit S4 nun mehr aerodynamische Effekte genauer abgebildet werden, als es mit dem weit verbreiteten Werkzeug AeroDyn möglich wäre.

Ein weiterer Mitarbeiter sorgte für die detaillierte Modellierung beider Referenzturbinen im kommerziellen Mehrkörpersystem SIMPACK (Kap. 1.3.5). Dabei konnte, unterstützt durch sorgfältige Modularisierung, eine Automatisierung der Modellerstellung erreicht werden (Werkzeug TurbGen, Kap. 1.4.4). Somit lassen sich nun unterschiedliche Turbinenkonfigurationen über Parameter einstellen und automatisiert simulieren. Ein weiteres entwickeltes Werkzeug sorgt für die automatisierte Lastanalyse (TurbLoads).

Zwei weitere Mitarbeiter erledigten die Modellierung der Systemkomponentenbibliothek (Kap. 1.3.6), die Echtzeit-Demonstration (Kap. 1.4.8) und das Gesamtprojektmanagement. Die Bibliothek enthält wiederverwendbare Komponentenmodelle, deren Unabhängigkeit von Simulationswerkzeugen durch Verwendung des Standards *Functional Mockup Interface* gesichert wurde. Die Echtzeitfähigkeit wurde durch eine beispielhafte Integration einer Hardware (herunterskaliertes Getriebe) über einen dafür modifizierten Prüfstand demonstriert (Hardware-in-the-Loop Simulation).

Schließlich unterstützte ein Mitarbeiter bei der Verwendung und Weiterentwicklung des DLR Integrationsframeworks RCE zum Management von Simulationsworkflows (Kap. 1.4.3). Hier wurden 5 Simulationsworkflows unter Verwendung unterschiedlicher Werkzeuge in ein einheitliches Managementwerkzeug integriert. Ein Simulationsworkflow demonstriert z.B., wie die Ergebnisse der automatisierten Lastanalyse in die automatisierte Blattstrukturdimensionierung (Kap. 1.4.7) einfließen, die wiederum die Blatt- und Turbinenlasten beeinflussen, und schließlich konvergieren (Kap. 1.5.2). Ein anderer Anwendungsfall demonstriert, wie eine alternative Lastregelung die Blattlasten zum Vorteil der Blattstruktur reduzieren kann (Kap. 1.5.1).

Insgesamt war der Personaleinsatz angemessen, ansonsten hätten nicht alle der o.g. Arbeiten ausgeführt werden können, was zu einem unvollständigen Projektergebnis geführt hätte.

4. Voraussichtlicher Nutzen

Die erarbeitete Simulationsumgebung erlaubt eine ganzheitliche und realitätsnahe Abbildung von Windturbinen und deren Teilsystemen. Somit können die Auswirkungen neuer Teilsystemtechnologien (z.B. alternative Blätter, Regler, Aktuatoren, Getriebe oder Generatoren) auf das Gesamtsystem rein simulativ oder auch mit realen Hardwarekomponenten (z.B. Steuergeräten) analysiert werden. Insbesondere sind z.B. Vorhersagen von auftretenden Lasten im Betrieb von hoher Relevanz. Die Simulationsergebnisse werden auch zur Vorbereitung von realen Tests auf der DLR Forschungsplattform Windenergie verwendet. Damit kann das DLR als Dienstleister für wissenschaftliche, gesellschaftliche (z.B. bei Gutachten) und industrielle Fragestellungen auftreten und die Verzahnung von Wissenschaft und Industrie fördern sowie Transferchancen verbessern.

Mit Hilfe der DLR Forschungsplattform Windenergie können die bestehenden Modelle gegenüber Messdaten validiert und somit in Ihrer Güte fortlaufend verbessert werden. Dies ermöglicht neue Forschungspotentiale zu identifizieren und die Erkenntnisse und Erfahrungen im Bereich der Windenergie stetig auszubauen. Dadurch wird die Wettbewerbsfähigkeit gesichert und die Attraktivität für Industrieprojekte erhöht und erhalten.

In rein wissenschaftlicher Hinsicht präsentiert sich das DLR in der entsprechenden Community durch Veröffentlichungen. Z.B. werden in den Veröffentlichungen [2]-[4] alternative Blattstrukturen bzgl. ihres Leichtbaupotenzials bewertet. Durch ein hohes Maß an Flexibilität, Manipulierbarkeit und Transparenz, bildet die WindMUSE-Umgebung eine nachvollziehbare und reproduzierbare Experimentierbasis für weitere wissenschaftliche Fragestellungen und Projekte mit Verwertungsperspektiven.

Zusammenfassend sind hier nochmal kurz die besonderen Merkmale der WindMUSE-Umgebung dargestellt:

- Einheitliche, d.h. werkzeunabhängige Beschreibungssprache für Windturbinen (Kap. 1.4.1)
- Abbildung der Meteorologie inkl. konvektiver Grenzschicht und Low-level Jets zur Berücksichtigung von z.B. Gebirgshängen und Wäldern (Kap. 1.3.1)
- 360° Profilpolaren, mit CFD ermittelt, höherwertige Abb. der phys. Strömung (Kap. 1.3.2)
- Automatisierte Erstellung eines Mehrkörpermodells der Windturbine (Kap. 1.4.4)
- Komponentenmodellbibliothek, flexibel verwendbar durch FMI-Standard (Kap. 1.3.5)
- Transparente Simulationsworkflows mit Integrationsfähigkeit beliebiger Tools (Kap. 1.4.3)
- Schneller, validierter Aerodynamik-Code mit mehreren Abwindmodellen und berechneten Querströmeffekten (Kap. 1.4.5)
- Automatisierte Blattstrukturdimensionierung über Schalenmodell gekoppelt mit automatisierter Lastenrechnung (Kap. 1.5.2)

5. Fortschritt an anderen Stellen

Andere Stellen lassen sich grundsätzlich kategorisieren in Organisationen mit wissenschaftlichem, industriellem und vielleicht auch behördlichem Charakter. Letztere beinhalten dabei z.B. Akkreditierungsstellen wie DNV GL, mit deren Hilfe Windturbinen zertifiziert werden können. Die Simulationsumgebungen rein industrieller Organisationen sind in der Regel proprietär, sodass deren Fortschritt hier nicht berücksichtigt werden konnte. Die bekanntesten Simulationstools der großen Forschungsorganisationen NREL und DTU sind FAST und HAWC2. Als Marktführer für Simulationssoftware zur Turbinenzertifizierung gilt Bladed von DNV GL.

Da die WindMUSE-Umgebung grundsätzlich auf dem offenen DLR Integrationsframework RCE basiert, wodurch sich beliebige Simulationstools einbinden lassen, ist ein Vergleich hier nicht zielführend. Beispielsweise wurde im Projekt gezeigt, wie sich FAST einbinden und innerhalb der WindMUSE-Umgebung ausführen lässt. Einzig auf Ebene der Modellgüte lassen sich Vergleiche anstellen und diese wurden auch innerhalb WindMUSE per Code-zu-Code-Vergleich mit Ergebnissen entsprechender internationaler Forschungsprojekte (OC3 und OC4) gemacht. Jedoch fehlte all diesen Resultaten die Validierung aufgrund von Messdaten, wodurch die Bedeutung einer realen Forschungsplattform Windenergie, wie sie im DLR aufgebaut wird, hervorgehoben wird.

6. Veröffentlichungen

- [1] Hoffmann A. F. and Weiß F. A., 2016: *Controller design for wind turbine load reduction via multiobjective parameter synthesis*. The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016); J. Physics Conf. Ser. 753
- [2] Vadlamani S. and Willberg C., 2016: *Global-local modelling approach for the investigation of adhesive bonding in structures*. NAFEMS India Conference, August 29-31 2106, Bangalore, India
- [3] Dähne S. and Willberg C., 2015: *Parametric model generation and automated sizing process for the analysis of wind turbine blades*. DEWEK 2015 - 12th German Wind Energy Conference, Mai 19- 20, Bremen, Germany
- [4] Willberg C. and Heinecke F., 2014: *Parametrische Multi-skalen Modellierung für Klebschichten im Gesamtentwurf von Windrotorblättern*. Kolloquium Forschungsverbund Windenergie FVWE 2014, Braunschweig
- [5] Englberger A. and Dörnbrack A., 2016: *The impact of neutral boundary layer turbulence on wind turbine wakes: A numerical modelling study*, Bound. Layer Meteorol., in press; doi:10.1007/s10546-016-0208-z
- [6] Englberger A. and Dörnbrack A., 2017: *The impact of the diurnal cycle of the atmospheric boundary layer on physical variables relevant for wind energy applications*, Subm. to Bound. Layer Meteorol.
- [7] Schröttle J. , Z. Piotrowski, T. Gerz, A. Englberger and A. Dörnbrack 2016: *Wind turbine wakes in forest and neutral plane wall boundary layer large-eddy simulations*. The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2016); J. Physics Conf. Ser. 753, 1-10. doi:10.1088/1742-6596/753/3/032058
- [8] Poster: Leimeister et al., 2016: *Design Optimization and Upscaling of a Semi-Submersible Floating Platform*. Wind Europe Summit 2016, Hamburg
- [9] In Vorbereitung: Heilers, G. 2017: *RANS Computation of 360° Polars for Wind Turbine Airfoils*. Wind Energy Science Conference 2017

Anhang A

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über alle bisher im Datenmodell IDD (siehe Kapitel 1.4.1) implementierten Parameter mit Angabe des Datentyps, der Einheit, der Beschreibung und des Tools bzw. des Generators, der diesen Parameter verwendet. Dabei werden folgende Kürzel für folgende Tools verwendet: *F=FAST*, *S=SIMPACT*, *W=Windfeld/TurbSim* und *M=Modelica*.

Turbinen Kom- ponente / Pa- rameter	Datentyp	Einheit	Beschreibung	Tool
Turbine				
tower	Tower	-	Turm.	F, S, M
rotor	Rotor	-	Rotor.	F, S, M
nacelle	Nacelle	-	Gondel.	F, S, M
controller	Controller	-	Regler.	F, M
wind	Wind	-	Wind.	F, S, M, W
simulation	Simulation	-	Simulationseinstellungen.	F, M, S
IEC_class	INT	-		S
rotationDirec- tion	STRING	-	Rotationsrichtung des Rotors.	S
foundation	BOOL	-	Verwendung eines Fundament-Modells	S
yawBearing	BOOL	-	Verwendung eines Gierlager-Modells	S
Tower				
alpha	DOUBLE	-	Rayleigh damping alpha coefficient	M
beta	DOUBLE	-	Rayleigh damping beta	M
dragCoefficient	DOUBLE	-	Aerodynamic drag coefficient, min = 0	M
geometryTower	Geometry	-	Turmgeometrie.	F
structure	TowerStructure	-	Turmstruktur	F, S, M
inertia	Inertia	-	Turmträgheit.	
Blade				
bladeLength	DOUBLE	m	Blattlänge.	
pitchBearing	PitchBearing	-	Definition des Pitchlagers	S

alpha	DOUBLE			
beta	DOUBLE			
geometryBlade	Geometry	-	Blattgeometrie.	
structure	BladeStructure	-	Blattstruktur	F, S, M
modalAnalysis	ModalAnalysis	-		
inertia	Inertia	-	Blatttr�agheit.	
aeroDyn	AeroDyn	-		F, M
Pitch Bearing				
dGamma	DOUBLE	Ns	Dämpfung des Pitchlaers	S
a0	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
a1	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
a2	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
b0	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
b1	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
b2	DOUBLE	-	Koeffizient in der Übertragungsfunktion des Pitch- S aktuators	
Rotor				
numberOfBlades	INT	-	Anzahl der Rotorblätter.	F, S, M
blades	Blade	-	Rotorblatt.	F, S M
hub	Hub	-	Nabe.	F, S, M, W
geometryRotor	Geometry	-	Rotorgeometrie.	
Hub				
geometryHub	Geometry	-	Nabengeometrie.	F, S, M, W
inertia	Inertia	-	Nabentr�agheit.	F, S, M
Nacelle				
tower2Shaft	DOUBLE	m	Abstand Turmkopf zur Rotorachse entlang der	F, S

			Turmachse	
drivetrain	Drivetrain	-	Antriebsstrang.	F, S, M
generator	Generator	-	Generator.	F, S, M
geometryNacelle	Geometry	-	Generatorgeometrie.	F, S, M
inertia	Inertia	-	Generatorträgheit.	F, S, M
Drivetrain				
gearBoxRatio	DOUBLE	-	Ratio for the drivetrain gear box	F, S, M
yawBearing	DOUBLE	m	Distance along Shaft from Yaw Axis to Main Bearing, xyz, tilted	M
shaftSpringConstant	DOUBLE	Nm/rad	Drive-shaft torsional spring constant	F, S, M
shaftDampingConstant	DOUBLE	Nms/rad	Drive-shaft torsional damping constant	F, S, M
geometryDrivetrain	Geometry	-	Triebstranggeometrie.	F, S
Generator				
generatorInertia	DOUBLE	kgm ²	Generatorträgheit.	F, S
efficiency	DOUBLE	%	Generatoreffizienz.	F, S, M
Brake				
t	DOUBLE	s	Zeitkonstante in der Übertragungsfunktion	S
k	DOUBLE	-	Verstärkungskonstante in der Übertragungsfunktion	S
MaxBrakeTorque	DOUBLE	Nm	Maximales Bremsmoment	S
Wind				
windConstant	WindConstant	-	Konstanter Wind.	F
windTurbulent	WindTurbulent	-	Turbulenter Wind.	S, W
V_wind_cutin	DOUBLE	m/s	Cutin-Windgeschwindigkeit der Anlage	S
V_wind_cutout	DOUBLE	m/s	Cutout-Windgeschwindigkeit der Anlage	S
V_rotor_cutin	DOUBLE	rad/s	Rotordrehzahl bei Cutin-Windgeschwindigkeit	S
V_rotorRated	DOUBLE	rad/s	Rotordrehzahl bei Cutout-Windgeschwindigkeit	S

WindContant				
simTime	INT		Simulationszeit für den Wind.	
timeStep	INT	s	Zeitschritt für den Wind.	F
rampStart	INT			F
rampEnd	INT			F
uMin	DOUBLE	m/s		F
uMax	DOUBLE	m/s		F
WindTurbulent				
turbModel	STRING	-		W
ti	STRING	-		W
iec_windtype	STRING	-		W
dx	INT	-		W
uRef	DOUBLE	m/s	Referenzwindgeschwindigkeit	S, W
simTime	INT	s	Simulationszeit für den turbulenten Wind-	W
gridScale	INT	m		W
timescale	INT	-		
AeroDyn				
chordTableRow	ChordTable	-		F, M
ChordTable				
rNodes	DOUBLE	-		F, M
chord	DOUBLE			F, M
distAC	DOUBLE	m		M
BladeStructure				
lines	BladeStructure- Line	-	Eine Zeile der Blattstrukturtabelle, die alle Parame- terwerte für einen Blattabschnitt enthält.	F, M
bladeModalAna- lysis	BladeModalAna- lysis	-	Modaldaten des Blatts	S
TowerStructure				
lines	TowerStructure- Line	-	Eine Zeile der Turmstrukturtabelle, die alle Parame- terwerte für einen Turmabschnitt enthält.	F, M

towerModalAnalysis	TowerModalAnalysis	-	Modaldaten des Turms	F, S
--------------------	--------------------	---	----------------------	------

ModalAnalysis

maxFreq	DOUBLE		Maximale Frequenz der betrachteten Moden	S
numberOfModes	INT	-		F
massScale	DOUBLE	-	Skalierungsfaktor der Massenmatrix	S
stiffScale	DOUBLE	-	Skalierungsfaktor der Steifigkeitsmatrix	S
boundaryCondition	BoundaryCondition	-		
index	INT	-		
dampingCritical	DOUBLE	%	Kritische Dämpfung	F, S
rayleighAlpha	DOUBLE	-		
rayleighBeta	DOUBLE	-		

BladeStructure- Line

zRef	DOUBLE			F, M
xRef	DOUBLE			F
yRef	DOUBLE			F
gammaRef	DOUBLE			F
elements	Airfoil	-		F, M
mu	DOUBLE			F
ea	DOUBLE			
elxx	DOUBLE			F
elyy	DOUBLE			F
gammaSTIFF	DOUBLE			F
jxx	DOUBLE			F, M
jyy	DOUBLE			F, M
gammaINNER	DOUBLE			
git	DOUBLE			
kx	DOUBLE			

ky	DOUBLE		
xec	DOUBLE		
yec	DOUBLE		
xsc	DOUBLE		
ysc	DOUBLE		
xcm	DOUBLE		
ycm	DOUBLE		
thickness	DOUBLE	%	Thickness of airfoil section expressed as a percent- M age of the chord
TowerStructure- Line			
zRef	DOUBLE		M
xRef	DOUBLE		
yRef	DOUBLE		
gammaRef	DOUBLE		
elements	Airfoil	-	
mu	DOUBLE		F
ea	DOUBLE		F
elxx	DOUBLE		F
elyy	DOUBLE		F
gammaSTIFF	DOUBLE		
jxx	DOUBLE		F
jyy	DOUBLE		F
gammaINER	DOUBLE		
git	DOUBLE		F
kx	DOUBLE		
ky	DOUBLE		
xec	DOUBLE		
yec	DOUBLE		
xsc	DOUBLE		

y _{sc}	DOUBLE			
x _{cm}	DOUBLE			F
y _{cm}	DOUBLE			F
diameter	DOUBLE	m	Tower diameter	M
wallThickness	DOUBLE	m	Tower wall tickness	M
Element				
start	INT	-	Elementanfang.	
end	INT	-	Elementende.	
airfoil	Airfoil	-		
WindTimeStep				
timeStep	DOUBLE		Zeitschritt für den Wind.	
windSpeed	DOUBLE	m/s	Windgeschwindigkeit.	
windDirection	DOUBLE		Windrichtung.	
verticalSpeed	DOUBLE	m/s	Vertikale Windgeschwindigkeit.	
horizontalShear	DOUBLE		Horizontale Windgeschwindigkeit.	
verticalShear	DOUBLE			
linVShear	DOUBLE			
gustSpeed	DOUBLE	m/s		
OptFASTRotor				
TeetDefl	DOUBLE	°		F
NacYaw	DOUBLE	°		F
RotSpeed	DOUBLE	rpm	Rotorgeschwindigkeit.	F
TTDspFA	DOUBLE	m		F
TTDspSS	DOUBLE	m		F
TipRad	DOUBLE			
PSpnElN	INT	-		F
UndSling	DOUBLE	m		F
HubCM	DOUBLE	m		F
TeetMod	INT	-		F
TeetDmpP	DOUBLE	°		F

TeetDmp	DOUBLE	Nm/(rad/s)		F
TeetCDmp	DOUBLE	Nm		F
TeetSStP	DOUBLE	°		F
TeetHStP	DOUBLE	°		F
TeetSSSp	DOUBLE	Nm/rad		F
TeetHSSp	DOUBLE	NM/rad		F
Airfoil				
anglesOfAttack	DOUBLE	°		F
liftCoefficients	DOUBLE			F
dragCoefficients	DOUBLE			F
pitchCoefficients	DOUBLE			F
Controller				
fixedType	ControllerFixedType	-		F
initialPitchAngle	DOUBLE	°	Initialer Pitchwinkel.	F
OptFASTController	OptFASTController	-	Optionale Reglerparameter für FAST.	F
OptOWLibController	OptOWLibController	-	Optionale Reglerparameter für Modelica.	M
OptFASTController				F
PCMode	INT	-	Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from Simulink/Labview} (switch)	
BlPitchF1	DOUBLE	°	Blade 1 final pitch for pitch maneuvers	F
BlPitchF2	DOUBLE	°		F
BlPitchF3	DOUBLE	°		F
TPitManS1	DOUBLE	s	Time to start override pitch maneuver for blade 1	F

			and end standard pitch control	
TPitManS2	DOUBLE	s		F
TPitManS3	DOUBLE	s		F
TPitManE1	DOUBLE	s	Time at which override pitch maneuver for blade 1 reaches final pitch	F
TPitManE2	DOUBLE	s		F
TPitManE3	DOUBLE	s		F
YCMODE	INT	-	Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink/Labview} (switch)	F
TYCon	DOUBLE	-	Time to enable active yaw control (s) [unused when YCMODE=0]	F
TYawManS	DOUBLE	s	Time to start override yaw maneuver and end standard yaw control	F
TYawManE	DOUBLE	s	Time at which override yaw maneuver reaches final yaw angle	F
NacYawF	DOUBLE	deg	Final yaw angle for yaw maneuvers	F
VSContrl	INT	-	Variable-speed control mode {0: none, 1: simple VS, 2: user-defined from routine UserVSCont, 3: user-defined from Simulink/Labview} (switch)	F
VS_RtGnSp	DOUBLE	rpm	Rated generator speed for simple variable-speed generator control (HSS side) (rpm) [used only when VSContrl=1]	F
VS_RtTq	DOUBLE	Nm	Rated generator torque/constant generator torque in Region 3 for simple variable-speed generator control (HSS side) (N-m) [used only when VSContrl=1]	F
VS_Rgn2K	DOUBLE	Nm/rpm ²	Generator torque constant in Region 2 for simple variable-speed generator control (HSS side) (N-m/rpm ²) [used only when VSContrl=1]	F
VS_SlPc	DOUBLE	%	Rated generator slip percentage in Region 2 1/2 for simple variable-speed generator control (%) [used only when VSContrl=1]	F
GenTiStr	BOOL	flag	Method to start the generator {T: timed using	F

			TimGenOn, F: generator speed using SpdGenOn} (flag)	
GenTiStp	BOOL	flag	Method to stop the generator (T: timed using TimGenOf, F: when generator power = 0) (flag)	F
SpdGenOn	DOUBLE	rpm	Generator speed to turn on the generator for a startup (HSS speed) [used only when GenTiStr=False]	F
TimGenOn	DOUBLE	s	Time to turn on the generator for a startup [used only when GenTiStr=True]	F
TimGenOf	DOUBLE	s	Time to turn off the generator [used only when GenTiStp=True]	F
GenModel	INT	-	Generator model {1: simple, 2: Thevenin, 3: user-defined from routine UserGen} (switch) [used only when VSContrl=0]	F
HSSBrMode	INT	-	HSS brake model {1: simple, 2: user-defined from routine UserHSSBr, 3: user-defined from Labview} (switch)	F
THSSBrDp	DOUBLE	s	Time to initiate deployment of the HSS brake	F
TiDynBrk	DOUBLE	s	Time to initiate deployment of the dynamic generator brake [CURRENTLY IGNORED]	F
TTpBrDp1	DOUBLE	s	Time to initiate deployment of tip brake 1	F
TTpBrDp2	DOUBLE	s		F
TTpBrDp3	DOUBLE	s		F
TBDepISp1	DOUBLE	rpm	Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 1	F
TBDepISp2	DOUBLE	rpm		F
TBDepISp3	DOUBLE	rpm		F
OptOwLibController				
OperatingControlDataXXidlingStartPosition	DOUBLE	-	Turbine in idling position at start	M
OperatingCon-	DOUBLE	rad	Pitch angle for parking or idling	M

trolDataXXidlingPitchAngle				
OperatingControlDataXXtimeStartUp	DOUBLE	s	Time for start up, going from idling into power production	M
OperatingControlDataXXtimeShutDown	DOUBLE	s	Time at which shut down should be initiated	M
OperatingControlDataXXemergencyShutDown	DOUBLE	boolean	Emergency shut down: true, normal shut down	M
OperatingControlDataXXbrakeActivationRotationSpeed	DOUBLE	rad/s	Rotor rotation speed below which the brake will be active during shutdown	M
MainControlDataXXratedElectricalPower	DOUBLE	W	Rated electrical power (including losses)	M
MainControlDataXXgeneratorEfficiencyFactor	DOUBLE	-	Generator efficiency factor (efficiency/100, mech to el.)	M
MainControlDataXXratedGeneratorSpeed	DOUBLE	rad/s	Rated generator speed	M
PitchControlDataXXminimumPitchAngle	DOUBLE	rad	Minimum pitch angle	M
PitchControlDataXXmaximumPitchAngle	DOUBLE	rad	Maximum pitch angle	M
PitchControlDataXXmaximumPitchSpeed	DOUBLE	rad/s	Maximum pitch speed	M

PitchControl- DataXXmaximum- PitchSpee- dEmergency	DOUBLE	rad/s	Maximum pitch speed for emergency stop	M
PitchControl- DataXXsample- TimePitchCon- trol	DOUBLE	s	Controler sample time	M
PitchControl- DataXXproporti- onalGainFactor	DOUBLE	s	Proportional gain factor at rated pitch	M
PitchControl- DataXXintegral- GainFactor	DOUBLE	-	Intergral gain factor at rated pitch	M
PitchControl- DataXXpit- chAngleDoub- ledSensitivity	DOUBLE	rad	Pitch angle where pitch sensitivity has doubled from value at rated pitch (0), for calculation of gain correction factor	M
TorqueControl- DataXXcutInGe- neratorSpeed	DOUBLE	rad/s	Cut-in generator speed between region 1 and 1.5 M	
TorqueControl- DataXXoptimal- TipSpeedRatio- GeneratorSpeed	DOUBLE	rad/s	Optimal tip-speed ratio generator speed between region 1.5 and 2	M
TorqueControl- DataXXoptimal- TipSpeedRatio- TorqueConstant	DOUBLE	Nms ² /rad ²	Proportionality torque factor in region 2 (optimal tip speed region)	M
TorqueControl- DataXXtransiti- onalRegionGene- ratorSlipFactor	DOUBLE	-	Transitional generator slip factor in region 2.5 (transitional region between 2 and 3)	M
TorqueControl- DataXXtransiti- onalRatedGene- ratorSpeedFac-	DOUBLE	-	Transitional generator speed factor of rated generator speed between 2.5 and 3	M

tor				
TorqueControl- DataXXconstant- PowerRegionMa- ximumTorqueFac- tor	DOUBLE	-	Maximum torque factor of rated torque in Region M 3 (constant power region)	M
TorqueControl- DataXXconstant- PowerRegionMi- nimumPitchAngle	DOUBLE	-	Minimum pitch angle for computing torque in Region 3 (constant power region)	M
TorqueControl- DataXXmaximum- TorqueRate	DOUBLE	Nm/s	Absolute maximum torque rate	M
TorqueControl- DataXXsampleGe- neratorTor- queControl	DOUBLE	s	Controler sample time	M
Geometry				
length	DOUBLE	m	Länge.	
height	DOUBLE	m	Höhe.	F, W
heightOffset	DOUBLE	m		
radius	DOUBLE	m	Radius.	F, S, M
gamma0	DOUBLE	deg	Einstellwinkel des Blattes	S
bladeRootDiame- ter	DOUBLE	m		
towerBaseDiame- ter	DOUBLE	m		
towerTopDiame- ter	DOUBLE	m		
tiltAngle	DOUBLE		Winkel der Rotorachse gegenüber der Horizontal- ebene	F, S, M
overhang	DOUBLE	m	Abstand vom Schnittpunkt der Turmachse mit der Rotorachse bis zum Nabenzentrum entlang der Rotorachse	F, S

coneAngle	DOUBLE	deg	Konuswinkel der Blätter	F, S, M
delta3	DOUBLE			
Simulation				
fastSimProperties	STRING	-	Pfad zu der .properties-Datei, die die Simulationsparameter für FAST enthält. Irrelevant im Batch-Betrieb von OneWindGen, wird dort durch Aufrufparameter ersetzt.	F
modelicaSimProperties	STRING	-	Pfad zu der .properties-Datei, die die Simulationsparameter für Modelica enthält. Irrelevant im Batch-Betrieb von OneWindGen, wird dort durch Aufrufparameter ersetzt.	M
simpackSimProperties	STRING	-	Pfad zu der .properties-Datei, die die Simulationsparameter für SIMPACK enthält. Irrelevant im Batch-Betrieb von OneWindGen, wird dort durch Aufrufparameter ersetzt.	S
Inertia				
mass	DOUBLE	kg	Masse	F, S, M
nacelleYawInertia	DOUBLE	kgm ²		F, M
hubInertia	DOUBLE	kgm ²		F, M
xCM	DOUBLE	m	Schwerpunktskoordinate	F, S, M
yCM	DOUBLE	m	Schwerpunktskoordinate	F, M, S
zCM	DOUBLE	m	Schwerpunktskoordinate	F, S
iXX	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
iYY	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
iZZ	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
iXY	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
iXZ	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
iYZ	DOUBLE	kgm ²	Eintrag im Trägheitstensor	S
Material				
E	DOUBLE			
G	DOUBLE			

rho	DOUBLE
-----	--------

AdjustmentFactors

xMode1	DOUBLE
--------	--------

yMode1	DOUBLE
--------	--------

xMode2	DOUBLE
--------	--------

yMode2	DOUBLE
--------	--------

mass	DOUBLE
------	--------

xStiffness	DOUBLE
------------	--------

yStiffness	DOUBLE
------------	--------

DampingFactors

xMode1	DOUBLE
--------	--------

yMode1	DOUBLE
--------	--------

xMode2	DOUBLE
--------	--------

yMode2	DOUBLE
--------	--------

Anhang B

Der Inhalt der XML-Datei zur CFD-Kopplung zwischen TAU und S4 (Kap, 1.4.6) besteht aus zwei Bereichen. In der Kopfzeile werden allgemeine Informationen abgelegt, während der untere Teil Daten eines spezifischen Rotors enthält (vgl. Abbildung 131). Die Einheiten und Koordinatensysteme werden in den „tag“ Feldern der einzelnen Datenblöcke angegeben.

Kopfzeile

- Air Speed
- Air Density
- Air Temperature
- Air Static Pressure
- Speed of Sound
- Shaft Tilt Angle
- Rotor Speed of Rotation
- Rotor Radius
- Radius Blade Attachment
- Radius of Zero Twist
- Blade Precone Angle
- Collective at Blade Root
- Cyclic Control Cos
- Cyclic Control Sin
- Basic Rotor Information (e.g. “hingeless”)
- Main Coordinate System
- Transformation Order

Rotorspezifische Daten

- Number of Blades
- Bladeinformation
 - Azimuthal Steps
 - Number of Blade Elements
 - Control Angle
 - Control Angle Velocity
 - Control Angle Acceleration
 - Azimuthal Discretization
 - Bladeelementinformation
 - Radial Position
 - Radial Velocity
 - Radial Acceleration
 - Lag Position

- Lag Velocity
- Lag Acceleration
- Flap Position
- Flap Velocity
- Flap Acceleration
- Local Pitch Angle
- Local Pitch Angle Velocity
- Local Pitch Angle Acceleration
- Local Flap Angle
- Local Flap Angle Velocity
- Local Flap Angle Acceleration
- Local Lag Angle
- Local Lag Angle Velocity
- Local Lag Angle Acceleration
- Normal Aerodynamic Coefficient c_n
- Tangential Aerodynamic Coefficient c_t
- Moment Aerodynamic Coefficient c_m
- Radial Force f_x
- Tangential Force f_y
- Normal Force f_z

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel WindMUSE Schlussbericht - Windturbine in multidisziplinärer Simulationsumgebung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] [Schumann, Holger] [Akoto, Leonel] [Dähne, Sascha] [Gatter, Alexander] [Heilers, Gerrit] [Klawonn, Alexander] [Kohl, Eugen] [Mindt, Maximilian] [Seebach, Oliver] [Sobotta, Dorit] [Thomas, Philipp] [Wagner, Johannes] [Willberg, Christian]	5. Abschlussdatum des Vorhabens März 2017
	6. Veröffentlichungsdatum November 2017
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig: Institut für Flugsystemtechnik, Institut für Aeroelastik, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Institut für Aerodynamik, Institut für Physik der Atmosphäre, Simulations- und Softwaretechnik), (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Institutsteil Nordwest, Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution Geplant
	10. Förderkennzeichen 0325683A
	11. Seitenzahl 170
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 29
	14. Tabellen 27
	15. Abbildungen 130
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Reale Tests von Windenergieanlagen sind, aufgrund der großen Komponentenabmessungen und wegen der benötigten Extremlasten durch Wind oder Stromnetz, sehr aufwändig. Die Simulation ist ein notwendiges Hilfsmittel bei der Analyse von Windenergieanlagen. Die Güte dieser Analyse hängt stark von der Güte der verwendeten Simulationsmodelle und deren multidisziplinärer Interaktionsfähigkeit ab. Ziel des Projekts WindMUSE war, die langjährigen Erfahrungen beider Verbundpartner, DLR und Fraunhofer IWES, bezüglich hochgenauer multidisziplinärer Modellierung in einem Optimum zu bündeln. Das DLR brachte Methoden, Modelle und Werkzeuge aus der Luftfahrt bezüglich der Abbildung von Wind, atmosphärischer Grenzschicht, Rotor-aerodynamik und –aeroelastik, Strukturdynamik und Systemtechnik mit ein und das Fraunhofer IWES brachte langjährige Erfahrungen aus der Entwicklung des Simulationsframeworks OneWind® ein. Entstanden ist eine flexible Simulationsumgebung mit einer werkzeuginabhängigen Beschreibungssprache für Windturbinen, einem Modellgenerator zur Mehrkörpersimulation, einer Komponentenbibliothek mit standardisiertem Functional Mock-up Interface (FMI), der Integrationsfähigkeit weiterer Simulationstools und mehreren transparenten Beispielworkflows. Die Modellbibliothek bildet neben dem flexiblen Turm und Rotor die Meteorologie inkl. konvektiver Grenzschicht, CFD-berechnete 360° Profilpolaren, Abwind- und Querströmeffekte sowie den kompletten Antriebsstrang ab. Es wurde gezeigt, dass sich die WindMUSE-Umgebung eignet, eine Blattstrukturdimensionierung mit der Lastrechnung automatisiert zu koppeln, einen alternativen Regler zu testen und reale Hardware im Echtzeitbetrieb zu integrieren. Damit eignet sich die Umgebung auch als Vorbereitung für Realversuche auf der DLR Forschungsplattform Windenergie, mit deren Hilfe künftig die verwendeten Modelle gegenüber Messdaten validiert und z.B. bzgl. elektrischer Komponenten erweitert werden können.	
19. Schlagwörter Windenergieanlage, Mehrkörpersimulation, DTU 10MW, Rotordynamik, Profilpolaren, Strukturdimensionierung, Turbulence, Large-Eddy-Simulation, Integrated Data Model, SIMPACK, Modelica, Functional Mock-up Interface, Remote Component Environment (RCE), OneWind	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Planned	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title WindMUSE Schlussbericht - Windturbine in multidisziplinärer Simulationsumgebung	
4. author(s) (family name, first name(s)) [Schumann, Holger] [Akoto, Leonel] [Dähne, Sascha] [Gatter, Alexander] [Heilers, Gerrit] [Klawonn, Alexander] [Kohl, Eugen] [Mindt, Maximilian] [Seebach, Oliver] [Sobotta, Dorit] [Thomas, Philipp] [Wagner, Johannes] [Willberg, Christian]	5. end of project March 2017 6. publication date November 2017 7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig: Institut für Flugsystemtechnik, Institut für Aeroelastik, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Institut für Aerodynamik, Institut für Physik der Atmosphäre, Simulations- und Softwaretechnik), (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Institutsteil Nordwest, Am Seedeich 45, 27572 Bremerhaven)	9. originator's report no. Planned 10. reference no. 0325683A 11. no. of pages 170
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 29 14. no. of tables 27 15. no. of figures 130
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>Real tests of wind turbines are very expensive, due to the large component dimensions and the required extreme loads from wind or electricity network. Simulation is a necessary aid in the analysis of wind turbines. The quality of the analysis depends heavily on the quality of the simulation models used and their multidisciplinary interaction ability.</p> <p>The aim of the WindMUSE project was to combine the many years of experience of the two partners, DLR and Fraunhofer IWES, to create a high precision multidisciplinary modeling approach. The DLR brought methods, models and tools from aviation representing the wind, atmospheric boundary layer, rotor aerodynamics and aeroelasticity, structural dynamics and system technology and the Fraunhofer IWES brought many years of experience from the development of the simulation framework OneWind®.</p> <p>The result is a flexible simulation environment with a tool-independent description language for wind turbines, a model generator for multi-body simulation, a component library with a standardized Functional Mock-up Interface (FMI), the capability to integrate further simulation tools and several transparent example workflows. In addition to the flexible tower and rotor, the model library also includes meteorology including a convective boundary layer, CFD-calculated 360° profile polars, downwash and cross-flow effects, and the complete powertrain.</p> <p>The WindMUSE environment has shown its ability to automate the coupling between blade structure sizing and load calculation, to test an alternative controller, and to integrate real-time hardware. Thus, the environment is also suitable as a preparation for real-life tests on the DLR research platform for wind energy, which will enable the models to be validated against measured data and to be extended by electrical components.</p>	
19. keywords Wind turbine, Multi-body Simulation, DTU 10MW, Rotor dynamics, Profile polars, Structural sizing, Turbulence, Large-Eddy-Simulation, Integrated Data Model, SIMPACK, Modelica, Functional Mock-up Interface, Remote Component Environment (RCE), OneWind	
20. publisher Technische Informationsbibliothek (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover	21. price