

## Wind Turbine Design Codes: Eine Validierung von alaska/Wind mit BLADED, FAST und FLEX5



**Institut für Mechatronik:** M. Taubert, S. Clauß, H. Freudenberg,  
Dr.-Ing. A. Keil, M. März

**Nordex Energy GmbH:** Dr.-Ing. W. Moser

**TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG:** Dr. rer. nat. H.O. Wulf

Chemnitz, April 2011

Institut für Mechatronik e.V.  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz

Telefon: 0371 531-19690  
Telefax: 0371 531-19699

E-Mail: [ifm@ifm-chemnitz.de](mailto:ifm@ifm-chemnitz.de)  
<http://www.ifm-chemnitz.de>

Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für  
den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Förderkennzeichen: AZ 0327681

**Inhalt**

1	Allgemeines zum Validierungsbericht.....	3
2	Die verwendeten Programme.....	3
3	Das Simulationsmodell der Referenzmaschine .....	5
3.1	Das Strukturmodell der Anlage.....	5
3.2	Die Aerodynamik des Blattmodells .....	6
3.3	Die verwendeten Sensoren .....	9
4	Strukturlastfälle der Referenzmaschine .....	10
4.1	Vorgabe einer Solldrehzahl am Generator / Lastfall LC S1 .....	10
4.2	Vorgabe einer Sollbewegung am Pitchantrieb / Lastfall LC S2 .....	13
4.3	Vorgabe einer Sollbewegung am Yawantrieb / Lastfall LC S3 .....	14
4.4	Lineare Analyse elastisches Blattmodell / Lastfall LC S4.....	16
4.5	Lineare Analyse elastisches Turmmodell / Lastfall LC S5 .....	18
5	Aerodynamiklastfälle der Referenzmaschine.....	20
5.1	Geparkte Anlage / Lastfall LC 1.....	20
5.2	Hochlauf mit variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC 4 .....	22
5.3	Hochlauf auf Solldrehzahl bei variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC 4_1 .....	23
5.4	Hochlauf auf Solldrehzahl mit konstanter Schräganströmung / Lastfall LC 11 .....	24
5.5	Windstoß auf die geparkte Anlage mit elastischen Rotorblättern / Lastfall LC E1 ...	26
5.6	Hochlauf auf Solldrehzahl mit variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC E4_1 .....	31
5.7	Turbulenter Wind auf die geparkte Anlage / Lastfall LC ET1 .....	34
5.8	Simulation mit turbulentem Wind / Lastfall LC T2 .....	38
5.9	Simulation mit turbulentem Wind / Lastfall LC ET2.....	40
5.10	Windstoß auf die geparkte Anlage mit elastischem Turmmodell / Lastfall LC E15..	44
5.11	Zeitlich veränderlicher Anströmwinkel, Dynamic Stall / Lastfall LC 15 .....	46
5.12	Vergleich Turmschattenmodell / Lastfall LC TS1 .....	48
6	Turbulenzfeldsimulation.....	49
6.1	Vergleich synthetischer Windfelder für das Kaimal Spektrum / Lastfall LC T1 .....	50

7	Rechenzeitvergleich .....	51
8	Zusammenfassung.....	52
A	Anhang.....	53
A 1	Beschreibung der Lastfallnotation .....	53
A 2	Übersicht der Validierungslastfälle .....	54
A 3	Übersicht zu den Programmfunktionalitäten .....	63
	Literaturverzeichnis .....	64

## 1 Allgemeines zum Validierungsbericht

Das Institut für Mechatronik in Chemnitz bearbeitet Themen zur Simulation der Dynamik technischer Systeme und entwickelt dazu das Mehrkörpersimulationswerkzeug alaska. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bereitstellung von Softwarelösungen zur Komplettsimulation von Windkraftanlagen. In Zusammenarbeit mit der Nordex Energy GmbH entstand das Modul alaska/Wind. alaska/Wind beinhaltet Methoden und Werkzeuge zur Bestimmung von aerodynamischen Lasten und Strukturlasten auf Windkraftanlagen mit Hilfe des Mehrkörpersimulationswerkzeuges alaska.

Die Mehrzahl der Auslegungs- und Zertifizierungsrechnungen wird gegenwärtig mit Hilfe branchenspezifischer Werkzeuge wie z.B. BLADED, FAST und FLEX5 durchgeführt. Diese Tools wurden über Jahre mit Hilfe von Vergleichsrechnungen und Messergebnissen validiert, sind von Zertifizierungsstellen zugelassen und gelten als Industriestandards. Der Fokus dieses Validierungsberichtes liegt auf dem Tool-zu-Tool-Vergleich von alaska/Wind mit den genannten Werkzeugen.

Das Dokument stellt die verwendeten Tools vor, beschreibt das Modell der zur Validierung verwendeten Referenzanlage, dokumentiert wichtige Vergleichslastfälle und deren Ergebnisse und zeigt Unterschiede in den Simulationsergebnissen sowie mögliche Ursachen auf. Der Anhang enthält eine Dokumentation zu allen Vergleichslastfällen. Diese gruppieren sich in Lastfälle zur Validierung der Aerodynamikmethoden und des Strukturmodells der Anlage mit und ohne aerodynamische Lasten. In diesem Bericht werden nur ausgewählte Lastfälle aus den verschiedenen Lastfallgruppen dargestellt. Die Darstellung aller Simulationsergebnisse ist in [1] zu finden.

An dieser Stelle möchten wir uns ganz herzlich bei Herrn Moser von der Firma Nordex sowie bei Herrn Wulf vom TÜV Nord bedanken. Ihre intensive Mitarbeit bei der Definition von Lastfällen, dem Abgleich der Modelle sowie der Bereitstellung von Simulationsergebnissen und deren Auswertung hat uns erst in die Lage versetzt, diese grundlegende und umfangreiche Validierung von alaska/Wind durchführen zu können.

Der Validierungsprozess wurde im Rahmen des Projektes „Modellbasierte Entwicklung von Windenergieanlagen - MBE-Wind“ durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert.

## 2 Die verwendeten Programme

In diesem Kapitel werden die Programme vorgestellt, mit denen alaska/Wind verglichen wurde. Dabei wird neben einer allgemeinen Beschreibung der Tools auch auf Besonderheiten bzw. Einschränkungen, der in ihnen verwendeten Modelle, eingegangen. Diese Einschränkungen hatten mitunter einige Anpassungen zur Folge, um einheitliche vergleichbare Modelle zu erhalten.

**Tabelle 1: Die für die Validierung verwendeten Programme**

<b>Tool</b>	<b>Version</b>	<b>Anwender</b>
alaska	6.0, alaska/Wind	IfM, Nordex, TÜV
BLADED	V3.82 / V4.0	TÜV

FAST	7.0, AeroDyn 13.0	IfM, TÜV
FLEX5 / Nordex	2.2.0	Nordex

### **alaska/Wind**

alaska ist ein kommerzielles Simulationswerkzeug zur Analyse, Synthese und Optimierung mechatronischer Systeme auf der Basis starrer und flexibler Mehrkörperstrukturen. Es wird am Institut für Mechatronik in Chemnitz entwickelt und ist aktuell in der Version 6.0 erhältlich. alaska/Wind ist eine Modellbibliothek zur Modellierung von Windkraftanlagen mit dem Mehrkörpersimulationswerkzeug alaska. Mit Hilfe von alaska/Wind können Windkraftanlagen mit horizontalem Triebstrang in beliebiger Struktur und Modelltiefe modelliert und simuliert werden. Dabei sind dem Umfang des Strukturmodells bzgl. Freiheitsgrad und Modellierungstiefe, aufgrund des benutzten Mehrkörpersystems, quasi keine Grenzen gesetzt. Die Modellfunktionalität kann um extern definierte Modellkomponenten durch Nutzung vorhandener Interfaces z.B. Matlab/Simulink, Real-Time Workshop sowie User-DLL's erweitert werden. Neben spezifischen Modellelementen wie z.B. Blätter und Turm, realisiert alaska/Wind auch die Berechnung der aerodynamischen Kräfte. Der Aerodynamik-Modul beinhaltet Blattelementverfahren [9], [10], Dynamic-Inflow-Modelle [2], [9], [10] und Dynamic-Stall-Modelle [3], [4]. Es stehen sowohl die in FLEX5 als auch die in der AeroDyn-Bibliothek [10] enthaltenen Verfahren in alaska/Wind zur Verfügung. Blatt und Turm werden in alaska als flexibler Körper mit Hilfe eines modalen Ansatzes modelliert. In den Rotorblättern wird infolge der Rotation der Nabe der Einfluss der Blattversteifung (geometric stiffening) sowie die damit verbundene Erhöhung der Eigenfrequenz berücksichtigt.

### **BLADED**

BLADED ist ein branchenspezifisches Werkzeug zur Modellierung und Simulation verschiedener Windkraftanlagentypen. Es besteht aus einer Sammlung verschiedener Programme, die unter einer gemeinsamen Oberfläche zusammengefasst sind. BLADED wird von GL Garrad Hassan entwickelt und ist ein vom Germanischen Lloyd zertifiziertes Programm. Aufgrund der zugeschnittenen Anwendung hat das Strukturmodell der Windkraftanlage eine begrenzte Anzahl von Freiheitsgraden. BLADED verwendet wie alaska/Wind eine eigene Implementierung der Windkraftberechnung. Bei der Modellierung der Aerodynamik des Referenzblattes traten Unterschiede im Vergleich zu den anderen getesteten Werkzeugen auf. Hier mussten einige manuelle Anpassungen vorgenommen werden, um eine übereinstimmende Blattmodellierung zu erhalten. Weiterführende Erläuterungen zu den verschiedenen Blattmodellen und erforderlichen Anpassungen enthält Abschnitt 3.2.

### **FAST**

FAST [5] ist eine Software zur Simulation von Windkraftanlagen mit horizontalem Rotor ohne grafische Benutzeroberfläche. Es wurde von der Oregon State University und der University of Utah für das National Wind Technology Center (NWTC) entwickelt. FAST wird auf der Internetseite des NWTC als kostenloser Download inklusive seines Quellcodes bereitgestellt. FAST enthält ähnlich wie BLADED ein vordefiniertes Strukturmodell mit einer begrenzten Anzahl von Freiheitsgraden ohne Möglichkeit der Erweiterung. Wie in alaska/Wind und BLADED lassen sich auch in FAST Turm und Blätter mit Hilfe eines modalen Ansatzes beschreiben. In FAST wird für die Berechnung der aerodynamischen Kräfte die AeroDyn-Bibliothek [6] verwendet. AeroDyn beinhaltet ein Blattelementverfahren [10] sowie ein Dynamic-Inflow-Modell [2], [10] für die Modellierung des induzierten Windfeldes und ein Dynamic-

Stall-Modell [3] für die Modellierung des dynamischen Strömungsabrisses am Rotorblatt. FAST ist ein vom Germanischen Lloyd [7] zertifiziertes Programm.

## FLEX5

FLEX5 ist ähnlich wie FAST ein Kommandozeilenprogramm zur Simulation von Windkraftanlagen mit horizontalem Rotor. Es wurde an der Technical University of Denmark entwickelt und ist ähnlich wie FAST mit Quellcode erhältlich. Der maximale Freiheitsgrad des Strukturmodells der Windkraftanlage ist 28. Auch FLEX5 stellt neben dem Hauptprogramm noch einige Zusatzprogramme für Pre- und Postprocessing bereit. Aufgrund einer fehlenden Dokumentation gestaltet sich die Einarbeitung und Benutzung in FLEX5 im Vergleich zu den anderen Tools als recht aufwendig. Ein weiteres Problem ist, dass FLEX5 nicht zentral gewartet und vertrieben wird. So sind im Laufe der Zeit sehr viele anwenderspezifische Versionen entstanden, die zudem modellspezifisch zugeschnitten wurden. Durch die Verschmelzung von Modell-Code und Modell-Beschreibung ist der Aufwand für die Verwaltung sehr groß und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen gestaltet sich schwierig.

## 3 Das Simulationsmodell der Referenzmaschine

Als Vergleichsrundlage wird im Weiteren eine Referenzmaschine definiert. Als Referenzmaschine für den Validierungsprozess dient eine modifizierte Anlage der Firma Nordex vom Typ N90. Die N90 ist eine drehzahlvariable pitchgeregelt Anlage mit einer Nennleistung von 2.5 MW.

Zunächst liegt der Schwerpunkt auf der Validierung des Aerodynamikmoduls von alaska/Wind. Deshalb werden geometrische Einflüsse weitestgehend eliminiert, d.h. Konuswinkel, Tiltwinkel und Blatt-Vorbiegung sind null und damit gegenüber der Originalanlage verändert. Diese idealisierten Bedingungen ermöglichen die Abkopplung von geometrischen Einflüssen auf die Windkraftberechnung.

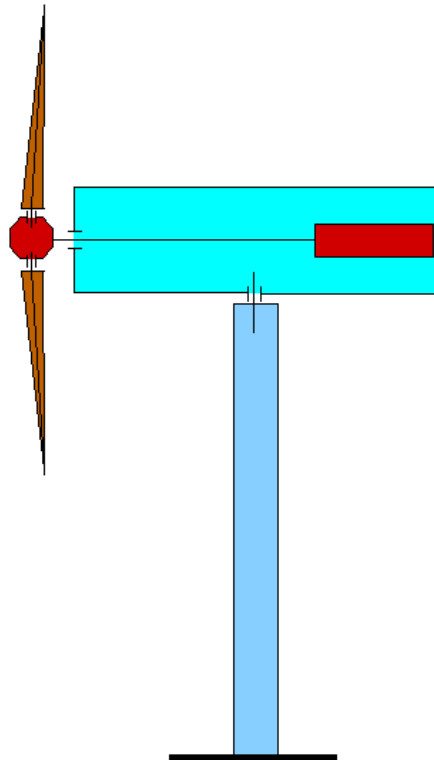
**Tabelle 2: Hauptabmessungen des Referenzmodells**

Rotordurchmesser	90 m
Anzahl der Blätter	3
Nabenhöhe	78.5 m
Turmhöhe	77 m
Tiltwinkel	0 °
Konuswinkel	0 °
Getriebeübersetzung	71.8

### 3.1 Das Strukturmodell der Anlage

Um den Einfluss des Strukturmodells bei der Validierung der aerodynamischen Kräfte gering zu halten, wurde ein sehr einfaches Starrkörpermodell der Referenzanlage realisiert. Es besteht aus sieben starren Körpern (drei Blätter, Nabe, Gondel, Turm, Generator), fünf Drehgelenken (Pitch-, Yaw-, Hauptlager) und einer starren Verbindung zum Fundament. Das Modell

ist auf fünf Drehfreiheitsgrade beschränkt und berücksichtigt keine Bauteilelastizitäten. Diese Modellkonfiguration wurde in allen verwendeten Programmen umgesetzt und validiert. Im Kapitel 4 ist eine ausführliche Darstellung der Validierung des Strukturmodells der Anlage zu finden. Dabei zeigt sich, dass die auf Windkraftanlagen zugeschnittenen Werkzeuge Vereinfachungen gegenüber dem allgemeinen Mehrkörperansatz in der Modellbeschreibung vornehmen. Das hat zu Folge, dass einige dynamische Effekte im Strukturmodell unberücksichtigt bleiben.



**Abb. 1 Strukturmodell der Anlage**

Der überwiegende Teil der Vergleichsrechnungen wurde mit der hier beschriebenen Modellkonfiguration durchgeführt. In den Fällen, in denen Änderungen am Strukturmodell vorgenommen wurden, sind diese konkret beschrieben.

### **3.2 Die Aerodynamik des Blattmodells**

Die Validierung der Aerodynamik setzt ein vergleichbares Blattmodell voraus. Im Rahmen dieses Kapitels soll auf die Unterschiede und damit verbundene notwendige Anpassungen der Blattmodelle in den verwendeten Programmen eingegangen werden.

Die grundlegende Beschreibung eines Rotorblattmodells erfolgt unabhängig vom verwendeten Tool sehr ähnlich. Dabei wird ein Rotorblatt mit Hilfe einer bestimmten Anzahl von Blattsegmenten diskretisiert. Die das Blatt geometrisch, physikalisch und aerodynamisch beschreibenden Parameter werden jeweils am Rand eines Blattsegmentes angegeben. Die folgende Abbildung zeigt die Blattmodellierung mit Hilfe der alaska/Wind Workbench, einem Werkzeug zur Erstellung, Bedienung und Verwaltung von alaska/Wind Simulationsmodellen.

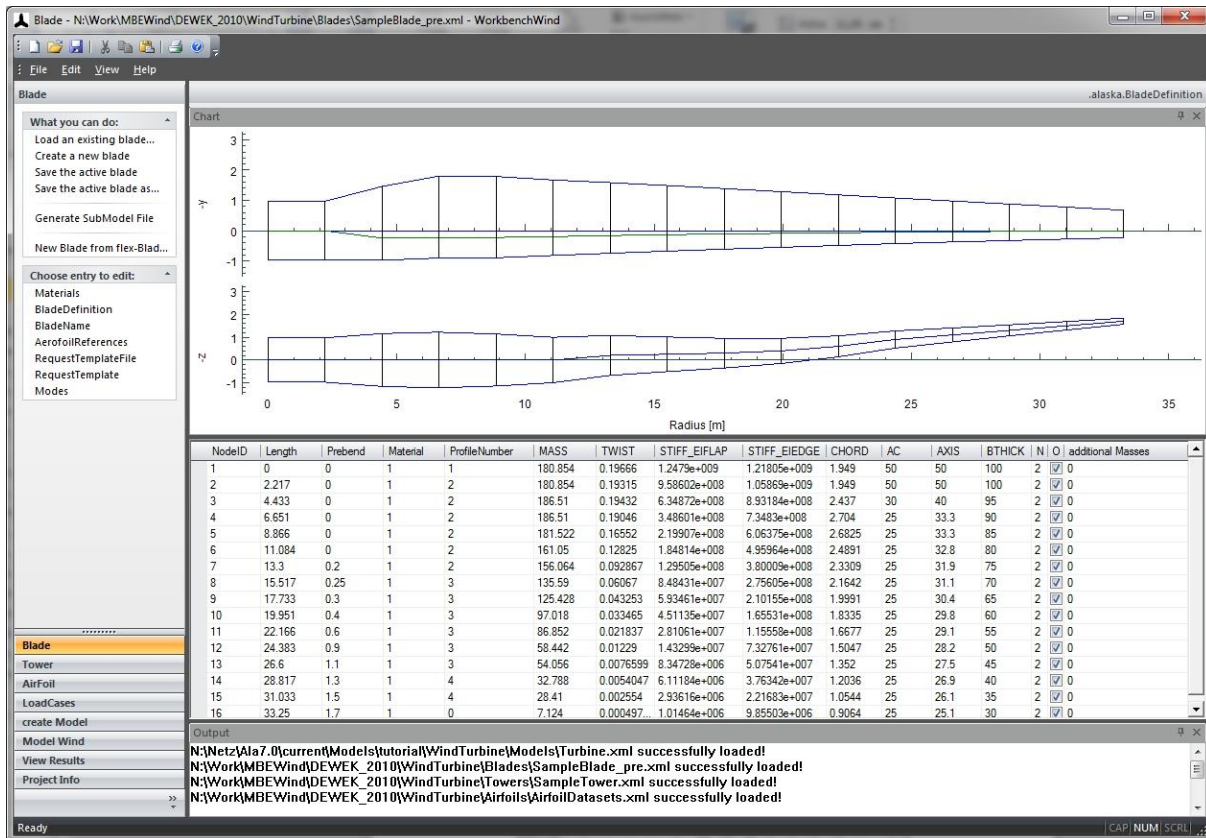


Abb. 2 Blattmodellierung mit der alaska/Wind Workbench

In der verwendeten Version von FAST war es nicht möglich, eine Blattvorbiegung zu realisieren. Deshalb wurde das Blatt der Referenzanlage ohne eine Vorbiegung modelliert. In alaska und FAST erfolgt die Windkraftberechnung über diskrete Einzelkräfte, die in der Mitte eines jeden Blattsegmentes eingepreßt werden. Die für die Kraftberechnung an dieser Stelle benötigten geometrischen und aerodynamischen Parameter werden durch lineare Interpolation zwischen linkem und rechtem Rand des Blattsegmentes gewonnen. Die resultierende aerodynamische Kraft wird unter der Annahme bestimmt, dass die Parameter konstant über dem Blattsegment sind. Das trifft so auch auf die physikalischen Eigenschaften zu. Damit ist der Verlauf der Blattparameter abschnittsweise konstant und weist entsprechend Sprünge an den Segmentgrenzen auf.

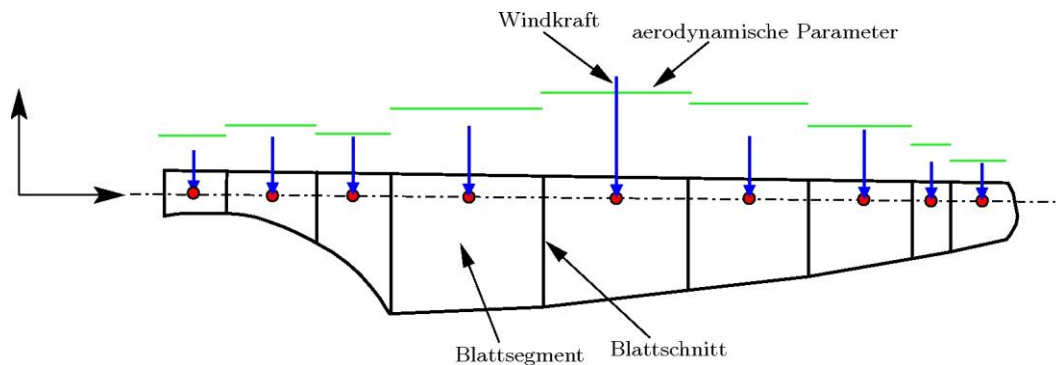
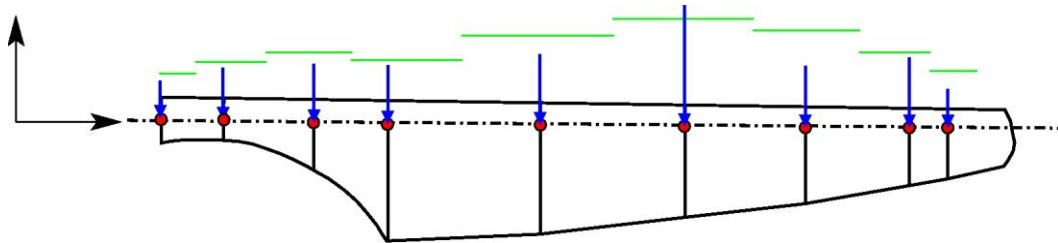


Abb. 3 Blattmodell in alaska und FAST

In FLEX5 wird die Windkraftberechnung auch über diskrete Einzelkräfte realisiert. Jedoch erfolgt im Unterschied zu alaska und FAST die Berechnung der aerodynamischen Kräfte an den Rändern der Blattsegmente. Dies hat den Vorteil, dass die angegebenen Blattparameter

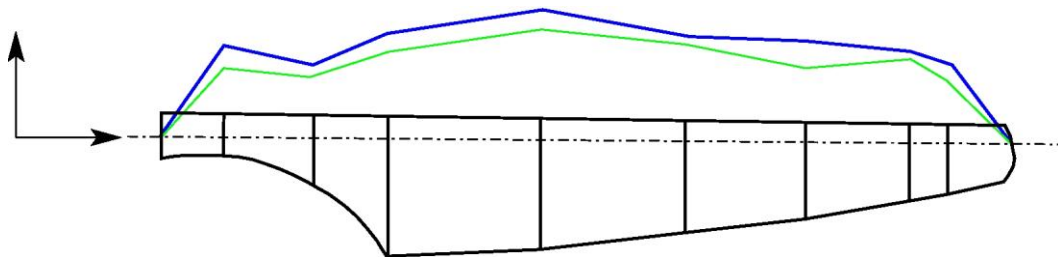


ohne Interpolation direkt verwendet werden können. Um an den Blatträndern eine diskrete Windkraft berechnen zu können, werden die Blattparameter als konstant mit der jeweils halben Segmentlänge nach links und rechts angenommen. Das Blattmodell von FLEX5 ist damit auch abschnittsweise konstant, wobei die Sprünge in der Mitte des Blattsegmentes auftreten.



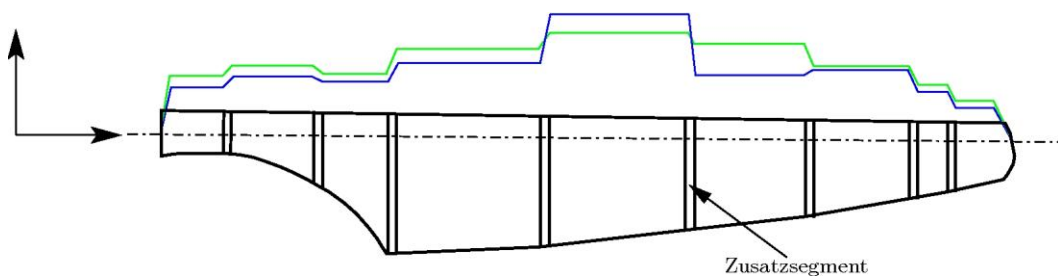
**Abb. 4 Blattmodell in FLEX5**

Im BLADED erfolgt die Windkraftberechnung kontinuierlich als Kraft pro Länge. Dazu werden die diskreten Blattparameter zwischen den Schnitten linear interpoliert. Der Vorteil liegt in einem stetigen Verlauf der Blatteigenschaften sowie der Blattkräfte.



**Abb. 5 Blattmodell in BLADED**

Bei ersten einfachen Vergleichsrechnungen sowohl am stehenden als auch am drehenden Rotor zeigten sich Abweichungen in den Ergebnissen zwischen BLADED und den Tools die mit diskreten Einzelkräften rechnen. Für die Validierung war es notwendig, diese aus der Art der Modellierung stammenden Abweichungen zu minimieren. Entsprechend wurde die Blattbeschreibung der Referenzanlage in BLADED so angepasst, dass die Parameter über die Blattsegmente konstant sind. Dazu wurde an den bestehenden Segmentgrenzen jeweils ein kleines Zusatzsegment eingeführt. Die Länge der Zusatzsegmente wurde mit 10 cm sehr klein gewählt, so dass ein äquivalentes Blattmodell mit abschnittsweise konstantem Verlauf der Blattparameter entstand. Die in BLADED angebotene Split-Funktionalität konnte für dieses Problem nicht verwendet werden, da sie nicht für alle verfügbaren geometrischen Größen funktioniert. In BLADED wird an der Blattwurzel und der Blattspitze die Windkraft automatisch auf null gesetzt. Die anderen Tools verwenden eine Methode zur Berücksichtigung von Verlusten an der Nabe sowie der Blattspitze. Um den Einfluss der Verluste im BLADED-Modell relativ gering zu halten, wurden die Blattränder entsprechend fein diskretisiert.



**Abb. 6 abschnittsweise konstantes Blattmodell in BLADED**

**Tabelle 3: Vergleich von Ergebnisgrößen (LC 1) für unterschiedliche BLADED Blattmodelle**

	<b>Rotor torque</b>	<b>Rotor thrust force</b>	<b>Pitching moment</b>	<b>Blade 1 out-of-plane</b>	<b>Blade 1 in-plane mo-</b>
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
cont. Blade	36.05	12.2	-0.565	-82.4	11.25
disc. Blade	36.8	12.7	-0.558	-83.1	11.46
rel. Error	-2.1 %	-4.6 %	1.2 %	-0.8 %	-1.8 %

**Tabelle 4: Vergleich von Ergebnisgrößen (LC 5\_1) für unterschiedliche BLADED Blattmodelle**

	<b>Rotor torque</b>	<b>Rotor thrust force</b>	<b>Pitching moment</b>	<b>Blade 1 out-of-plane</b>	<b>Blade 1 in-plane mo-</b>
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
cont. Blade	600.69	208.49	6.39	-1992.8	191.32
disc. Blade	606.91	209.45	6.48	-1994.1	193.11
rel. Error	-1.03 %	-0.46 %	-1.43 %	-0.06 %	-0.93 %

In der Tabelle 3 und der Tabelle 4 sind für die Lastfälle LC 1 und LC 5\_1 die Ergebnisse für eine kontinuierliche bzw. quasi diskrete Windkraftberechnung in BLADED gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Abweichungen bei sich drehendem Rotor (LC 5\_1) weniger signifikant sind. Die abschnittsweise konstante Definition des Blattmodells hat neben dem Einfluss auf die Windkraftberechnung auch Einfluss auf das Strukturmodell des Blattes. So konnte die Massen- und Steifigkeitsverteilung wie in den anderen Werkzeugen, abschnittsweise konstant beschrieben werden.

### 3.3 Die verwendeten Sensoren

Die Validierung von Struktur- und Rotoraerodynamik erfolgte überwiegend mit Hilfe von Zeitreihen der meist anlagenspezifischen Strukturgrößen. Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung und Beschreibung der verwendeten Sensorgrößen.

**Tabelle 5: Darstellung der verwendeten Sensorgrößen**

<b>Name</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Einheit</b>
MZN	Schnittmoment an der Hauptwelle, Rotormoment	kNm
FZN	Rotorschub entlang der Hauptwelle	kN
MXB1	Pitchmoment von Rotorblatt1 im nabenfesten Blattwurzelkoordinatensystem	kNm

MYB1	Schlagmoment von Rotorblatt 1 im nabenfesten Blattwurzelkoordinatensystem	kNm
MZB1	Schwenkmoment von Rotorblatt 1 im nabenfesten Blattwurzelkoordinatensystem	kNm
Yaw Mx	Yaw-Moment am Yaw-Antrieb	kNm
Yaw My	Schnittmoment um die Pitch-Achse des Yaw-Gelenkes im turmfesten Turmkopfkoordinatensystem	kNm
Yaw Mz	Schnittmoment um die Roll-Achse des Yaw-Gelenkes im turmfesten Turmkopfkoordinatensystem	kNm
VNAV	Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe	m/s
NRot	Rotordrehzahl	U/min
Tip flapwise deflection	Verformung der Blattspitze in Schlagrichtung, dargestellt im blattfesten Blattwurzelkoordinatensystem	m
Tip edgewise deflection	Verformung der Blattspitze in Schwenkrichtung, dargestellt im blattfesten Blattwurzelkoordinatensystem	m

#### 4 Strukturlastfälle der Referenzmaschine

Auf der Grundlage des Strukturmodells und mit Hilfe der dafür zur Verfügung stehenden Sensoren wie z.B. Rotordrehzahl, Rotormoment oder Blattschnittkräfte und -momente, erfolgt im Kapitel 5 die Validierung der aerodynamischen Methoden. Es ist vorab deshalb unabdingbar, ein einheitliches validiertes Strukturmodell für die im Vergleich verwendeten Tools bereitzustellen. Neben dem Abgleich der Masseparameter der verschiedenen Modellkomponenten liegt das Augenmerk auf den mechanischen Modellen und ihrer Systemantworten. Hier wird über den Vergleich der verschiedenen Reaktionskräfte und -momente das jeweilige Anlagenmodell validiert und auf Unterschiede, Annahmen und Vereinfachungen näher eingegangen. Für alle Lastfälle wurde die Windkraftberechnung deaktiviert und definierte Sollbewegungen vorgegeben. Eine Einführung in die Klassifizierung sowie die verwendete Notation der Lastfälle enthält Anhang A 1.

##### 4.1 Vorgabe einer Solldrehzahl am Generator / Lastfall LC S1

Für den Lastfall LC S1 wurde das Modell auf den Drehfreiheitsgrad des Rotors beschränkt. Der Generator soll als Motor fungieren, den Rotor auf eine vorgegebene Drehzahl beschleunigen und diese danach konstant halten. Überprüft werden die Reaktionsmomente an der Blattwurzel, das Schnittmoment an der Hauptwelle und das erforderliche Antriebsmoment am Generator/Motor. Das erforderliche Antriebsmoment zur Drehzahlregelung wird mit einem PI-Regler realisiert. Dieser wurde in einer BLADED-DLL (discon.dll) umgesetzt, da neben BLADED auch alaska/Wind und FAST das BLADED-Reglerinterface unterstützen. FLEX5 unterstützt kein externes Reglerinterface, so dass hier die Implementierung direkt im Quellcode von FLEX5 erfolgte.

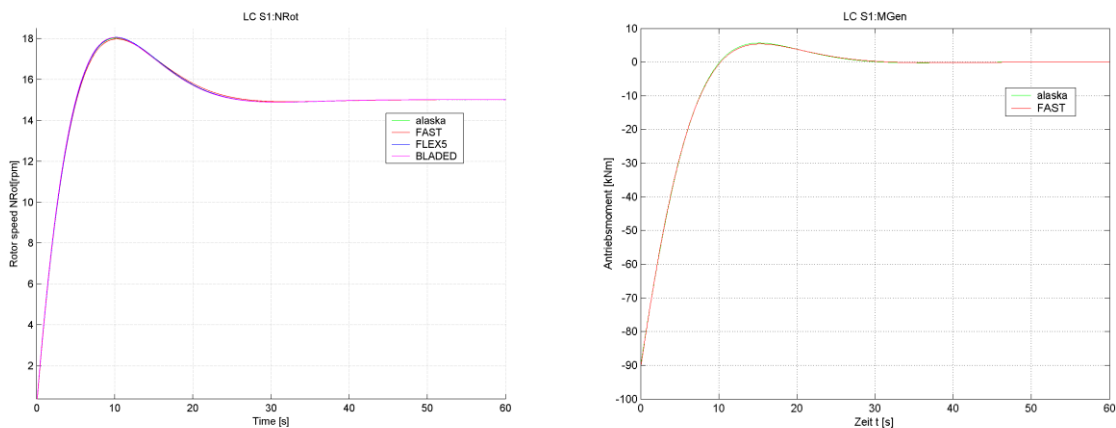


Abb. 7 Rotordrehzahl und Antriebsmoment am Generator

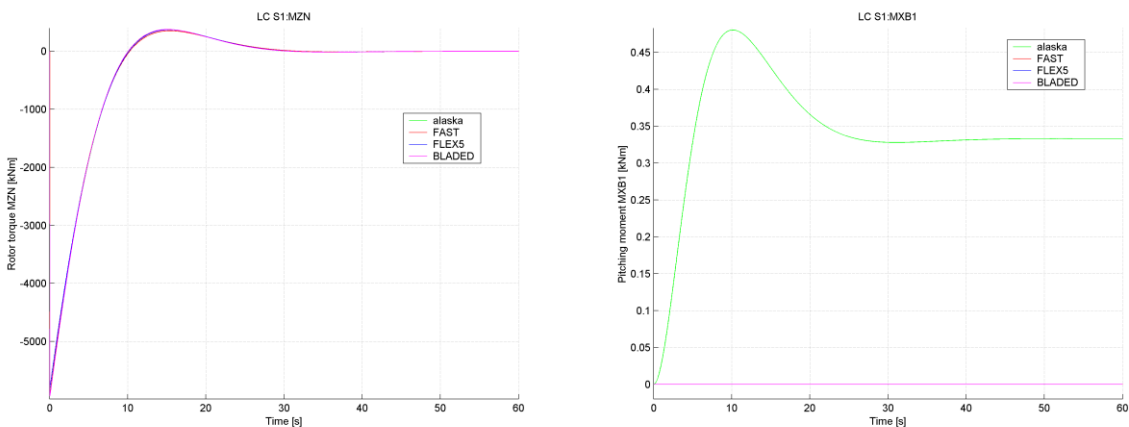


Abb. 8 Schnittmoment an der Hauptwelle und Pitchmoment am Rotorblatt 1

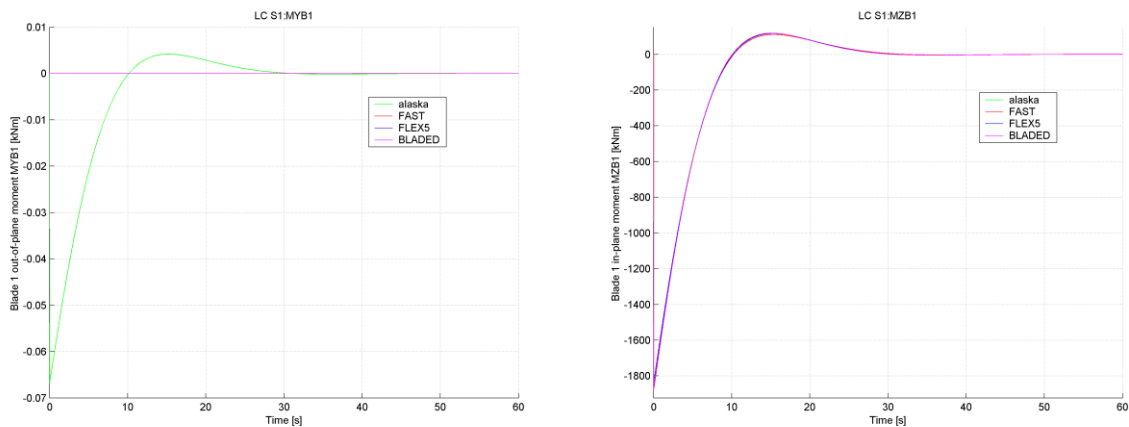
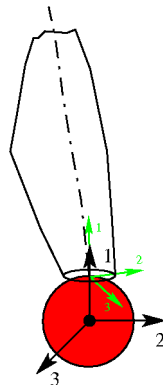


Abb. 9 Schlagmoment und Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

Der Drehzahlverlauf des Rotors zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für das Referenzmodell in den genannten Tools. Mit Hilfe des Lastfalls LC S1 konnte das Gesamtträgheitsmoment des Antriebsstranges überprüft werden. Als Vergleichsgröße diente das angeforderte Antriebsmoment am Generator/Motor. Die dennoch geringen Abweichungen sind hier auf Unterschiede in den Trägheitsmomenten der verschiedenen Blattmodelle bezüglich der Rotorachse zurückzuführen. Die Werkzeuge verwenden etwas unterschiedliche Interpolations-

methoden für die Massenparameter der Blattsegmente, so dass entsprechende Abweichungen entstehen können. Intensiver soll im Folgenden auf die Unterschiede des Pitchmomentes und des Schlagmomentes an der Blattwurzel eingegangen werden. Hier liefert alaska auch Reaktionsmomente an den entsprechenden Sensoren im Pitchgelenk. Diese Unterschiede entstehen aufgrund der Vernachlässigung der Deviationsmomente in den Blattmodellen von BLADED, FAST und FLEX5. Die Schnitte des für die Referenzanlage verwendeten Blattes sind um die Blattlängsachse verdreht (Twist-Winkel). Deshalb fallen für einen Pitchwinkel von  $0^\circ$  die Achsen 2 und 3 des Gelenkkoordinatensystems nicht mit den Hauptträgheitsachsen des Blattquerschnittes zusammen. Das folgende Minimalbeispiel soll dazu dienen den Sachverhalt an Hand der Bewegungsgleichung nachzuvollziehen. Das Modell besteht aus zwei starren Körpern. Dabei stellt Körper 1 den gesamten Triebstrang einer Windkraftanlage dar und Körper 2 beschreibt ein starres Blatt, das mit Hilfe eines starren Gelenks am Triebstrang befestigt ist.



**Abb. 10 Minimalmodell Rotor mit Blatt**

Ausgehend vom Drallsatz

$$M = J\dot{\omega} + \tilde{\omega}J\omega$$

kann für das an der Rotorachse befestigte Koordinatensystem die Bewegungsgleichung

$$M = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 & 0 \\ 0 & J_{22} & J_{23} \\ 0 & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & 0 \\ \omega_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{11} & 0 & 0 \\ 0 & J_{22} & J_{23} \\ 0 & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_3 \end{bmatrix}$$

formuliert werden. Zusammengefasst ergibt sich der Momentenvektor

$$M = \begin{bmatrix} -J_{23} \cdot \omega_3^2 \\ J_{23} \cdot \dot{\omega}_3 \\ J_{33} \cdot \dot{\omega}_3 \end{bmatrix}.$$

An diesem lassen sich nun verschiedene Effekte und Unterschiede der Ergebnisse studieren. Der Ausdruck  $J_{33} \cdot \dot{\omega}_3$  beschreibt das erforderliche Antriebsmoment um die Rotorlängsachse. Das Antriebsmoment ist linear abhängig von der Rotorbeschleunigung und wird zu null wenn die Beschleunigung am Rotor null wird. Dieses Verhalten ist so auch in Abb. 7 Rotordrehzahl und Antriebsmoment am Generator zu erkennen. Der Ausdruck  $-J_{23} \cdot \omega_3^2$  beschreibt das erforderliche Zwangsmoment um die 1-Achse des starren Gelenkes. Dies entspricht im Anlagenmodell dem sogenannten Pitchmoment. Das Pitchmoment hängt quad-

ratisch von der Rotordrehzahl und linear vom Deviationsmoment des Blattes gegenüber der Rotorachse ab. Da das Pitchmoment von der Rotordrehzahl abhängt, entsteht auch im stationären Betrieb einer Windkraftanlage ein Pitchmoment wenn keine Windkräfte berücksichtigt werden. Werden die Deviationsmomente des Blattes gegenüber der Rotorachse vernachlässigt und greifen keine äußeren Kräfte am Blatt an, dann bleibt das Pitchmoment null. Da das Blatt gegenüber der Nabe drehbar gelagert ist, ändern sich die Deviationsmomente gegenüber der Rotorachse in Abhängigkeit vom Pitchwinkel. Fällt eine Hauptachse des Blattquerschnittes mit der Rotorachse zusammen, dann sind die Deviationsmomente null und das Pitchmoment entsprechend auch. Der Ausdruck  $J_{23} \cdot \dot{\omega}_3$  beschreibt das erforderliche Zwangsmoment um die 2-Achse des Pitchgelenkes. Dies entspricht im Anlagenmodell dem sogenannten Schlagmoment. Das Schlagmoment ändert sich linear mit der Rotorbeschleunigung und ist wie das Pitchmoment vom Deviationsmoment des Blattes abhängig. Zu beachten ist, dass die dargestellten Ergebnisse in den Sensoren für Pitch- und Schlagmoment den Reaktionsmomenten entsprechen. Die Vorzeichen sind deshalb gegenüber dem hier angegebenen Momentenvektor  $M$  vertauscht. Der Strukturlastfall LC S1 zeigt infolge der Vereinfachungen einige Unterschiede zwischen den fest implementierten Modellgleichungen wie sie in BLADED, FAST und FLEX5 verwendet werden und dem frei modellierbaren Mehrkörpermodell in alaska. Der Einfluss der Trägheitskräfte auf Pitch- und Schlagmoment ist gegenüber den Windkräften gering, so dass diese Vereinfachung keinen großen Fehler darstellt. Für die Windkraftvalidierung wurde darauf verzichtet, im alaska-Blattmodell die Deviationsmomente zu entfernen. Da der überwiegende Teil der Lastfälle den stationären Betrieb betrifft, ist die Abweichung im Pitchmoment konstant. Es ergibt sich dadurch eine bessere Möglichkeit, den Einfluss von Windkräften und Trägheitskräften auf den Pitchantrieb zu bewerten.

#### 4.2 Vorgabe einer Sollbewegung am Pitchantrieb / Lastfall LC S2

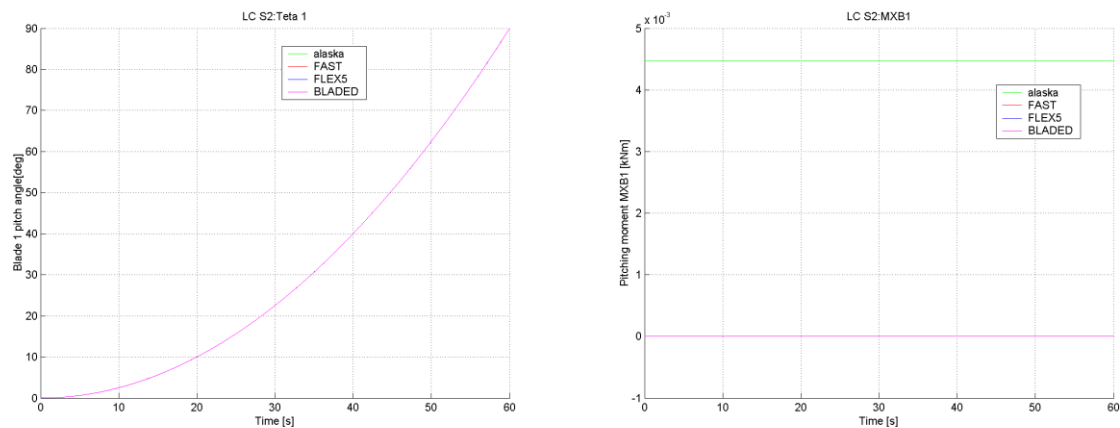
Im Lastfall LC S2 wurde das Referenzmodell auf den Drehfreiheitsgrad am Pitchgelenk beschränkt. Ziel war die Überprüfung des Hauptträgheitsmomentes entlang der Blattlängsachse. Dazu wurde mit Hilfe des Pitchantriebes eine Sollbewegung vorgegeben und das erforderliche Antriebsmoment ausgewertet. Die Sollvorgabe für den Pitchwinkel wurde so umgesetzt, dass sich bei konstanter Pitchbeschleunigung im simulierten Zeitraum von 60 Sekunden der Pitchwinkel um  $90^\circ$  ändert. Die konsistenten Vorgaben für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung haben folgende Form:

$$\varphi = \frac{\pi}{7200} \cdot t^2$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\pi}{3600} \cdot t$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{\pi}{3600}$$

Für die Tools FAST und alaska wurde die Pitchregelung über eine BLADED-DLL (discon.dll) realisiert und bei FLEX5 direkt im Quellcode umgesetzt. Das BLADED-Reglerinterface von alaska/Wind sorgt dafür, dass aus dem angeforderten Pitchwinkel der BLADED-DLL die konsistente Geschwindigkeit und Beschleunigung zur Verfügung gestellt wird. Diese Größen sind erforderlich, da die Vorgabe des Pitchwinkels über eine entsprechende Zwangsbedingung im Pitchgelenk umgesetzt wird.



**Abb. 11 Pitchwinkel und Pitchmoment am Rotorblatt 1**

Der Strukturlastfall LC S2 zeigt, dass in den Modellen von BLADED, FAST und FLEX5 keine Dynamik aus der Blattverstellung berücksichtigt wird. Das bedeutet, dass in diesen Tools der Pitchwinkel nur quasi statisch geändert wird und dynamische Rückwirkungen im Modell unberücksichtigt bleiben. Das Pitchmoment berücksichtigt so nur die äußeren Windkräfte. Da für den Lastfall LC S2 die Windkräfte deaktiviert wurden, bleiben die Pitchmomente entsprechend null. Für den stationären Betrieb und bei kleinen Verstellgeschwindigkeiten ist diese Vereinfachung sicherlich zulässig. Bei der Auslegung und Entwicklung von Einzel-Pitchantrieben mit großen Verstellgeschwindigkeiten, sollte die Dynamik aus der Blattverstellung jedoch berücksichtigt werden. Hier sind vollständige Mehrkörpermodelle den vereinfachten Modellen vorzuziehen.

### 4.3 Vorgabe einer Sollbewegung am Yawantrieb / Lastfall LC S3

Im Lastfall LC S3 wurde nur für den Drehfreiheitsgrad im Yawgelenk eine Bewegung vorgegeben. Ziel war die Überprüfung der drei Reaktionsmomente (yaw, pitch, roll) am Yawgelenk infolge einer konstanten Yawbeschleunigung um die Turmlängsachse. Dazu wurde mit Hilfe des Yawantriebes eine Sollbewegung vorgegeben und das erforderliche Antriebsmoment ausgewertet. Die Yawregelung wurde identisch zu Lastfall LC S2 umgesetzt. Die konsistenten Vorgaben für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Yawregelung haben die folgende Form:

$$\varphi = \frac{\pi}{7200} \cdot t^2$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\pi}{3600} \cdot t$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{\pi}{3600}$$

Für die Tools FAST und alaska wurde die Yawregelung über eine BLADED-DLL (discon.dll) realisiert und bei FLEX5 direkt im Quellcode umgesetzt. Das BLADED-Reglerinterface von alaska/Wind sorgt dafür, dass aus der angeforderten Yawgeschwindigkeit die konsistente Lage und Beschleunigung zur Verfügung gestellt wird. Für die Yawregelung in FAST reicht die konsistente Vorgabe von Lage und Geschwindigkeit aus. Dieses wird ähnlich zu alaska mit Hilfe des BLADED-Reglerinterfaces von FAST realisiert. In der Umsetzung der Sollbewegung am Yawantrieb unterscheiden sich die Modelle von alaska und FAST jedoch etwas. Bei alaska wird die Sollbewegung in Form einer kinematischen Steuerung realisiert und in FAST durch die Vorgabe eines Yawantriebsmomentes mit Hilfe eines Aktuators. Dieser wird als ein Feder-Dämpfer-Element modelliert, der das erforderliche Antriebsmoment aus dem Soll-Ist-Vergleich von Yawwinkel und Yawwinkelgeschwindigkeit bereitstellt.

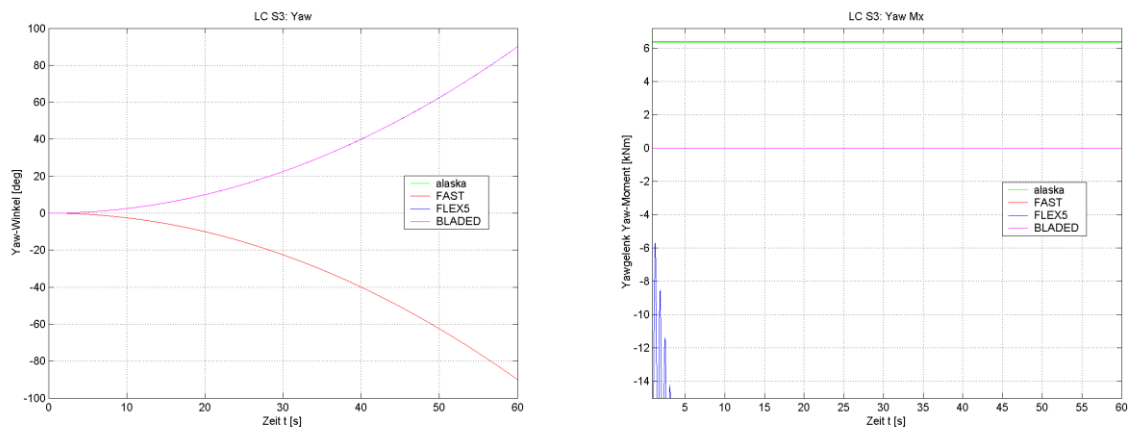


Abb. 12 Yaw-Winkel und Yaw-Moment am Yaw-Antrieb

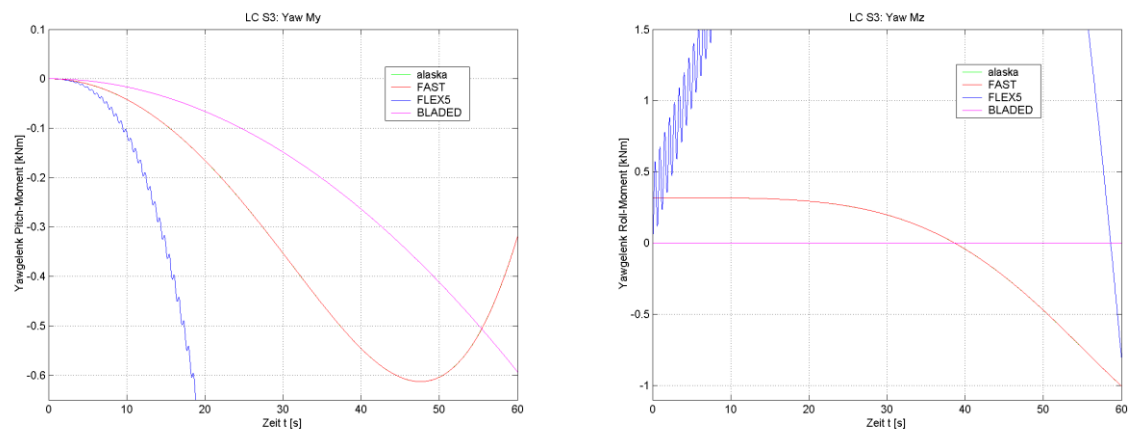


Abb. 13 Schnittmomente am Yawgelenk für Pitch- und Roll-Achse

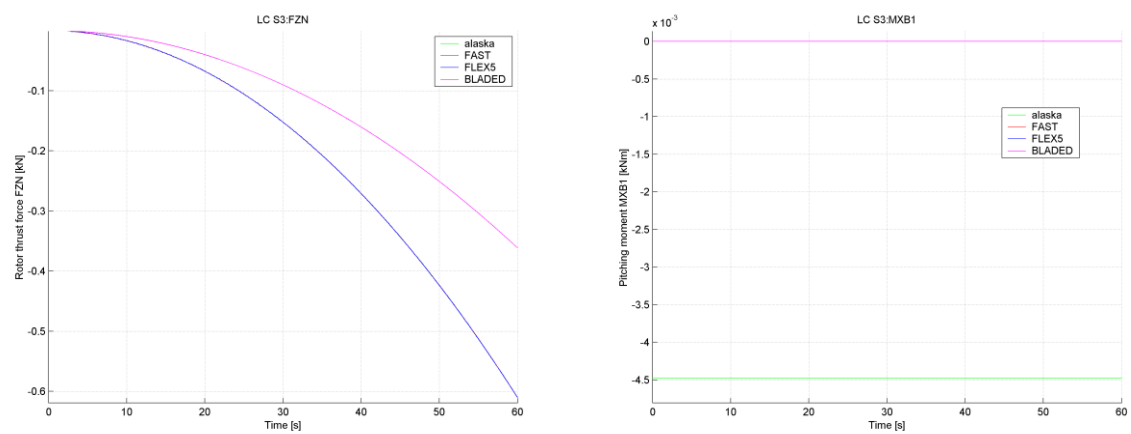
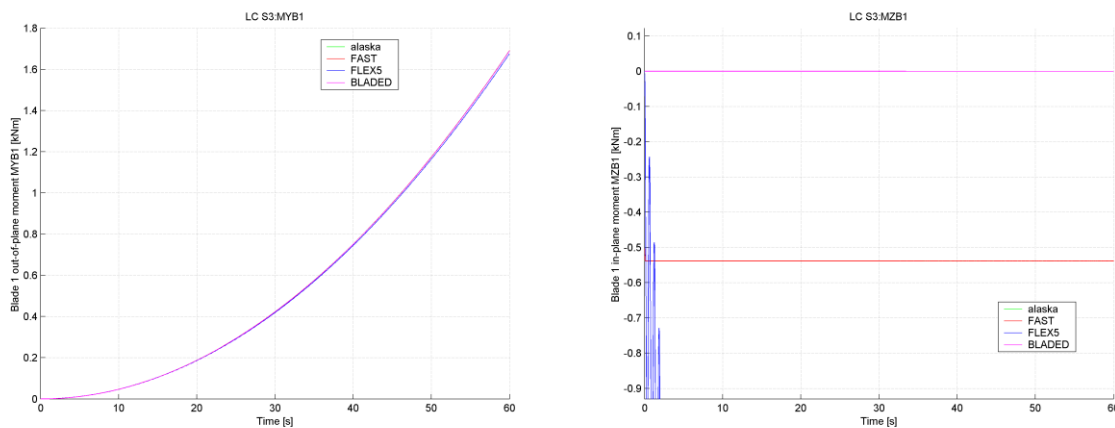


Abb. 14 Rotorschub an der Hauptwelle und Pitchmoment am Rotorblatt 1





**Abb. 15 Schlagmoment und Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**

Der Strukturlastfall LC S3 zeigt, dass in den Modellen von BLADED und FLEX5 die Yawbeschleunigung unberücksichtigt bleibt. In den Modellen von alaska und FAST wird die Dynamik infolge der Yawverstellung vollständig berücksichtigt. Das heißt, sowohl die aus der Yawgeschwindigkeit als auch der Yawbeschleunigung entstehenden Trägheitskräfte werden abgebildet. Deutlich wird das, durch die sehr gute Übereinstimmung der Schnittmomente am Yawgelenk zwischen alaska und FAST. Die Ursache für die erhebliche Drift einzelner FLEX5 Ergebnisse konnte nicht geklärt werden. Die Vernachlässigung der Yawdynamik hat natürlich unmittelbar Einfluss auf andere Strukturlasten wie z.B. die Schnittmomente an der Blattwurzel. Einheitlich wird von allen Modellen der Einfluss der Yawgeschwindigkeit auf damit verbundene Reaktionsmomente (Rotorschub, Schlagmoment) an der Blattwurzel abgebildet. Das Rotorblatt 1 steht für den Lastfall LC S3 parallel zur Turmlängsachse. Damit entspricht die Beschleunigung im Pitchgelenk der im Yawgelenk. Das Pitchmoment für Rotorblatt 1 ist somit identisch zu Lastfall LC S2. Da es im Lastfall LC S3 jedoch als Reaktionsmoment wirkt, ist das Vorzeichen negativ. Mit Hilfe des Lastfalls LC S3 konnte gezeigt werden, dass BLADED und FLEX5 die Yawdynamik und damit verbundene Kräfte und Momente auf ihr Strukturmodell vernachlässigen. Die Modelle von alaska und FAST zeigen eine gute Übereinstimmung des Yaw-Antriebsmomentes wenn die entsprechenden Masseparameter gut übereinstimmen.

#### 4.4 Lineare Analyse elastisches Blattmodell / Lastfall LC S4

Mit Hilfe des Lastfalls LC S4 werden Eigenfrequenzen und Eigenformen des elastischen Referenzblattes zwischen alaska, BLADED, FAST und FLEX5 verglichen. Der Abgleich des Systemverhaltens der elastischen Blattmodelle ist Grundvoraussetzung für deren Verwendung. alaska, BLADED, FAST und FLEX5 verwenden eine modale Beschreibung für elastische Blätter. Jedoch gibt es einige Unterschiede in den Modellen, auf die im Weiteren kurz eingegangen werden soll.

Wie in der hybriden Mehrkörpersimulation üblich, werden auch in alaska flexible Strukturen mit Hilfe sogenannter flexibler Körper abgebildet. Die dafür notwendige modale Beschreibung (Eigenmoden, modale Massen- und Steifigkeitsmatrix) kann unter Anwendung modaler Reduktionsmethoden aus FE-Programmen oder dem Balken-FE-Programm ala/Flex erzeugt werden. In den flexiblen Strukturen besteht immer eine vollständige Kopplung der modalen Koordinaten mit allen vorhandenen Knotenfreiheitsgraden des modalreduzierten FE-Modells. Je nach abgebildeter Struktureigenschaft des Blatt FE-Modells, entstehen so im Allgemeinen Blattmodelle mit gekoppelten Moden (z.B. Biegung und Torsion). Die modale Beschreibung wird bzgl. des Blattkoordinatensystems angegeben. Eine Interpolation von Moden infolge unterschiedlicher Pitchwinkel ist damit nicht notwendig. Die Anzahl der in alaska verwendete-

ten Moden kann vom Anwender frei gewählt werden. Es können lineare und auch quadratische Ansätze berücksichtigt werden. Damit sind nichtlineare Effekte wie z.B. geometric stiffening der Rotorblätter modellierbar.

Im Gegensatz zu alaska können in BLADED, FAST und FLEX5 jeweils nur reine Biegemoden (Out-of-plane und In-plane-Moden) berücksichtigt werden. Das bedeutet, über die modale Beschreibung ist die Kopplung der modalen Koordinate zu jeweils nur einem ausgewählten Freiheitsgrad (Out-of-plane oder In-plane) möglich. Infolge der fehlenden Kopplung sind die Blattdeformationen unabhängig voneinander. Effekte die sich aus der Überlagerung verschiedener Blattdeformationen ergeben, können von diesen Modellen nicht abgebildet werden. Mit Hilfe der Biegemoden sowie der bereitgestellten Masse- und Steifigkeitsverteilung werden modale Blattmodelle (modale Massen-, Steifigkeits- u. Dämpfungsmatrix) generiert. Die Generierung der Blattmoden erfolgt in BLADED und FAST auf Basis von Balken-FE-Modellen. In BLADED ist ein FE-Modell eines kompletten Anlagenmodells fest integriert. Dieses wird über die Blatt- und Turm Daten vom Nutzer parametrisiert. Das Referenzsystem des FE-Modells liegt dabei auf der Rotorachse. Die Beschreibung des modalen Blattmodells erfolgt mit Hilfe der aus dem FE-Modell gewonnen Rotormoden bezüglich des Rotorreferenzsystems. Damit wird bei Änderung des Pitchwinkels während der Simulation eine Interpolation von Rotormoden für verschiedene Pitchwinkel notwendig.

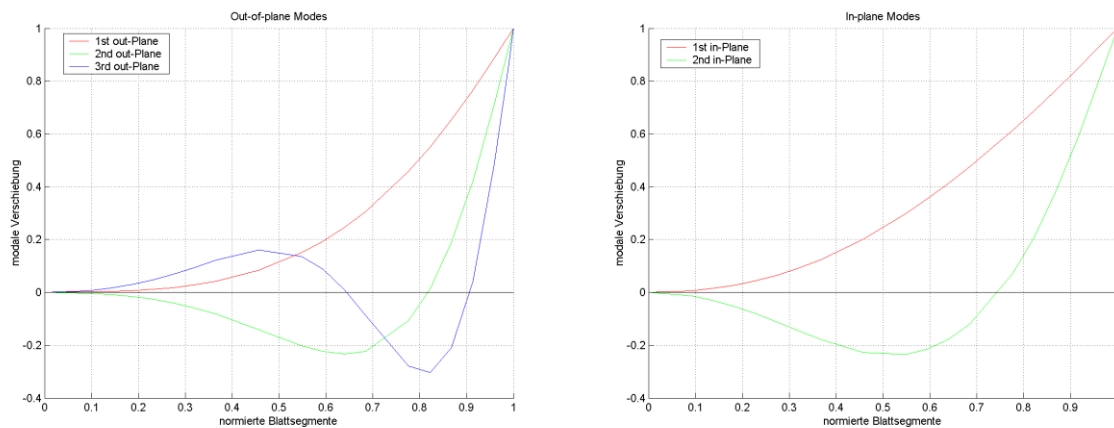
In FAST werden die Blattbiegemoden mit Hilfe von Polynomansätzen parametrisiert. Für deren Berechnung steht unter anderem das Tool BModes [8] zur Verfügung. Darin wird ähnlich wie in ala/Flex bzw. in BLADED mit Hilfe der Blattbeschreibung aus Balkenelementen ein FE-Modell erstellt.

In FLEX5 wird vorab aus konstanten Balkenabschnitten ein diskretes Rotorblattmodell gebildet. Durch eine von-Mises-Iteration [9] werden die Eigenfrequenzen und Eigenmoden des Balkenmodells bestimmt. Die Eigenmoden werden dann verwendet um daraus ein modal reduziertes Blattmodell zu generieren.

Die Umsetzung des Referenzblattmodells erfolgte wie oben beschrieben als Balken-FE-Modell in ala/Flex, BLADED und BModes sowie als diskretes Balkenmodell in FLEX5. Nachfolgend werden die Ergebnisse für ausgewählte Blatteigenfrequenzen und Eigenmoden dieser Modelle angegeben. Um mit BLADED vergleichbare Blattfrequenzen zu generieren, wurde das FE-Rotormodell geparkt.

**Tabelle 6: Vergleich von Blatteigenfrequenzen, erzeugt mit ala/Flex, BModes, FLEX5 u. BLADED**

Mode Number	Mode Type	Frequency (Hz)			BLADED
		ala/Flex	BModes	FLEX5	
1	Out-of-plane mode	0.7427	0.7427	0.741	0.743
2	In-plane mode	1.3505	1.351	1.3532	1.351
3	Out-of-plane mode	2.0497	2.0501	2.0385	2.051
4	Out-of-plane mode	4.3868	4.3884	-	4.39
5	In-plane mode	4.7927	4.7987	4.8061	4.8



**Abb. 16 modale Verschiebungen eines elastischen Rotorblattes**

Die Balken-FE-Modelle des elastischen Referenzblattes zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den verwendeten Tools. Mit Hilfe der generierten modalen Beschreibungen wurden die Blattmodelle in den einzelnen Tools umgesetzt. In FAST ist die Anzahl der modalen Koordinaten eines Blattmodells auf drei beschränkt. Dabei beschreiben zwei Moden die Biegung aus der Rotorebene (flapwise) und ein Mode die Biegung in der Rotorebene (edgewise). Die im Folgenden angegebenen Blatteigenfrequenzen wurden mit Hilfe linearer Systemanalyse für das Gesamtanlagenmodell mit einem geparkten Rotor bestimmt. Die lineare Systemanalyse diente dabei dem Nachweis der korrekten modelltechnischen Umsetzung der FE-Blattmodelle als modalreduzierte Blattmodelle im entsprechenden Gesamtmodell. Bei BLADED und FLEX5 standen die Softwarekomponenten zur linearen Systemanalyse nicht zur Verfügung. Der Nachweis über das Systemverhalten dieser Blattmodelle erfolgt mit Hilfe eines Ausschwingversuches im Abschnitt 5.5.

**Tabelle 7: Blatteigenfrequenzen bestimmt mit linearer Systemanalyse**

Mode Number	Mode Type	Frequency (Hz)	
		alaska	FAST
1	Out-of-plane mode	0.7439	0.7466
2	In-plane mode	1.3505	1.3558
3	Out-of-plane mode	2.0439	2.1644

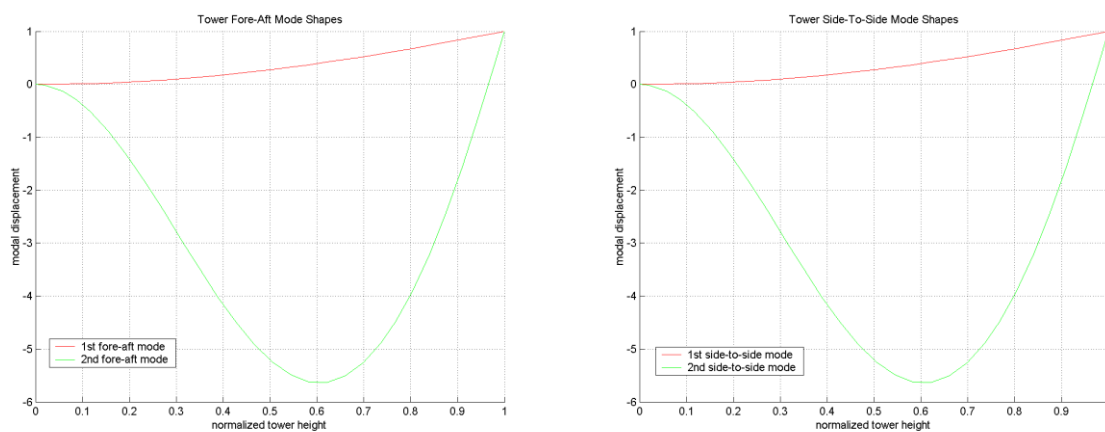
#### 4.5 Lineare Analyse elastisches Turmmodell / Lastfall LC S5

Mit Hilfe des Lastfalls LC S5 werden Eigenfrequenzen und Eigenformen des elastischen Turmreferenzmodells zwischen alaska, BLADED, FAST und FLEX5 verglichen. Die Abbildung eines elastischen Turmmodells im Gesamtanlagenmodell erfolgt identisch zum Blattmodell auch als modal reduziertes Modell. Die Erzeugung der dafür erforderlichen Turmmoden wurde, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, als Balken-FE-Modell in ala/Flex, BLADED und BModes sowie als diskretes Balkenmodell in FLEX5 ausgeführt. Zu beachten ist, dass es Unterschiede im Aufbau der zur modalen Reduktion verwendeten FE-Turmmodelle gibt. In ala/Flex, BModes und FLEX5 kann die Anlage als zusätzliche Punktmasse auf dem Turmkopf berücksichtigt werden. In BLADED wird zur Bestimmung der Blatt- und Turmmoden ein komplettes FE-Modell aus Rotor und Turm generiert. Aufgrund dieses Gesamtmodellansatz-

zes ergibt sich im BLADED-Modell eine der Anlage entsprechend realistischere Verteilung von Masse und Massenträgheitsmomenten. Dieser unterschiedliche Modellaufbau führt zu den Abweichungen der in der folgenden Tabelle dargestellten Eigenfrequenzen der Turmmodelle.

**Tabelle 8: Vergleich von Turmfrequenzen, erzeugt mit ala/Flex, BModes, FLEX5 u. BLADED**

Mode Number	Mode Type	Frequency (Hz)			
		ala/Flex	BModes	FLEX5	BLADED
1	fore-aft mode	0.377	0.377	0.366	0.369
2	side-to-side mode	0.377	0.377	0.366	0.366
3	fore-aft mode	3.375	3.384	3.119	2.467
4	side-to-side mode	3.375	3.384	3.119	2.12



**Abb. 17 modale Verschiebungen des elastischen Turmreferenzmodells**

Ähnlich wie in Abschnitt 4.4 wurde hier die Möglichkeit der linearen Systemanalyse genutzt, um die korrekte modelltechnische Umsetzung der FE-Turmmodelle als modalreduzierte Turmmodelle im entsprechenden Gesamtmodell zu überprüfen.

**Tabelle 9: Turmeigenfrequenzen Gesamtanlagenmodell bestimmt mit linearer Systemanalyse**

Mode Number	Mode Type	Frequency (Hz)	
		alaska	FAST
1	fore-aft mode	0.371	0.369
2	side-to-side mode	0.368	0.366
3	fore-aft mode	3.006	2.721
4	side-to-side mode	2.811	2.448

Es ist gut zu erkennen, dass sich die Turmeigenfrequenzen des elastischen Turmmodells im Gesamtanlagenmodell verschieben. Das liegt an der schon erwähnten veränderten Masseverteilung zwischen Gesamtanlagenmodell und einzelner Turmkopfmasse des FE-Modells. Die Turmeigenfrequenzen von alaska und FAST zeigen hier eine bessere Übereinstimmung im Vergleich mit dem BLADED FE-Modell. An dieser Stelle soll auf den Abschnitt 5.10 verwiesen werden. Dort erfolgt eine Überprüfung des Systemverhaltens der Turmmodelle mit Hilfe eines Ausschwingversuches der Gesamtanlage.

## 5 Aerodynamiklastfälle der Referenzmaschine

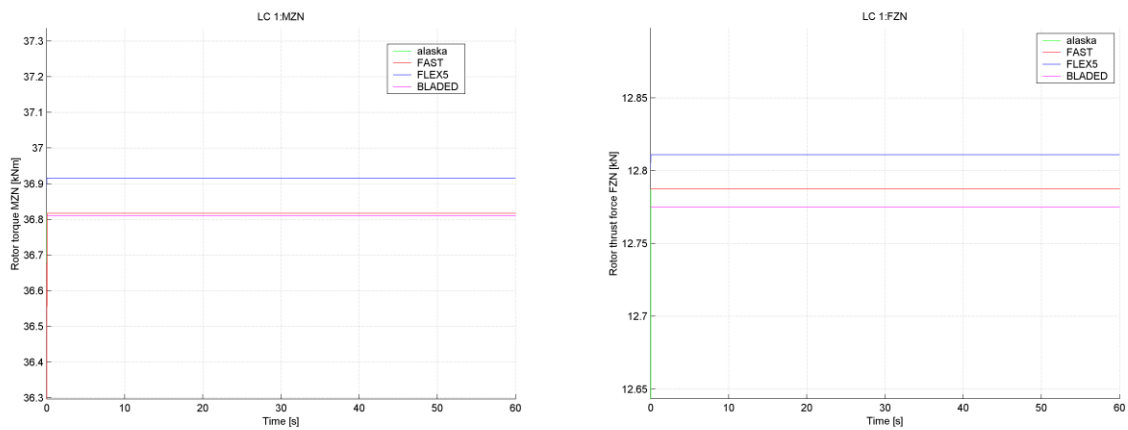
Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Validierung der Rotor-aerodynamik. Dabei wurden die Lastfälle und entsprechende Simulationsbedingungen weitestgehend so gewählt, dass die verschiedenen aerodynamischen Effekte getrennt voneinander überprüft werden konnten. Die Simulationsrechnungen wurden mit dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen starren Anlagenmodell durchgeführt. Die eigentliche Validierung erfolgte über den Vergleich von Zeitreihen ausgewählter Sensoren. Eine Übersicht sowie Beschreibung der verwendeten Sensoren befindet sich in Abschnitt 3.3.

Aerodynamiklastfälle in denen flexible Strukturen im Anlagenmodell verwendet wurden, sind gesondert gekennzeichnet. Eine Beschreibung der Lastfälle sowie der verwendeten Notation enthält der Anhang A 1.

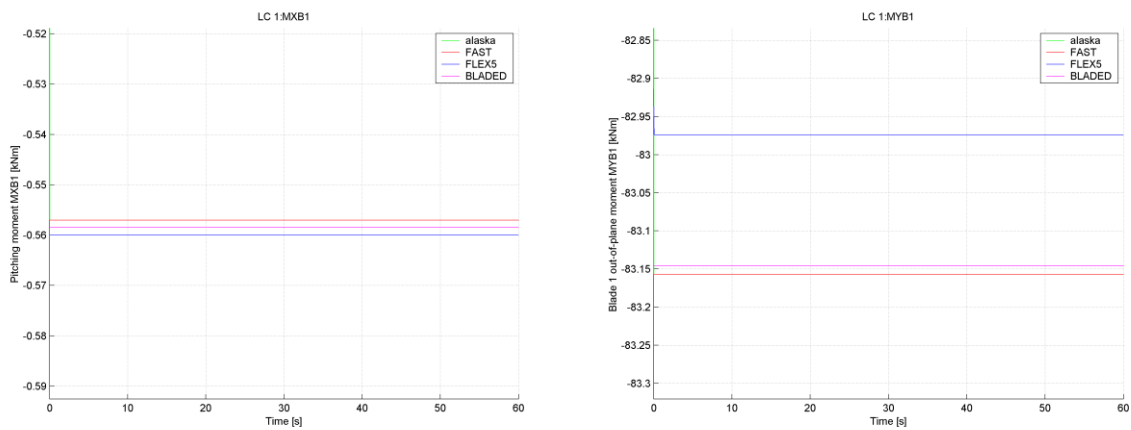
Für die Berechnung der aerodynamischen Kräfte und Momente an den diskreten Blattschnitten werden die aus Blattbewegung und Windgeschwindigkeit resultierende Anströmgeschwindigkeit und der Anströmwinkel benötigt. Die rotierenden Rotorblätter beeinflussen die freie Windgeschwindigkeit in der Umgebung der Windkraftanlage. Dieser Effekt, der als induzierter Wind (Wake) bezeichnet wird, wird mit Hilfe von Blattelementverfahren [9], [10] oder Dynamik-Inflow-Modellen [9], [10] bei der Berechnung von Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel berücksichtigt. Gegenstand der im Rahmen dieser Validierung durchgeführten Vergleichsrechnungen sind die Blattelementverfahren.

### 5.1 Geparkte Anlage / Lastfall LC 1

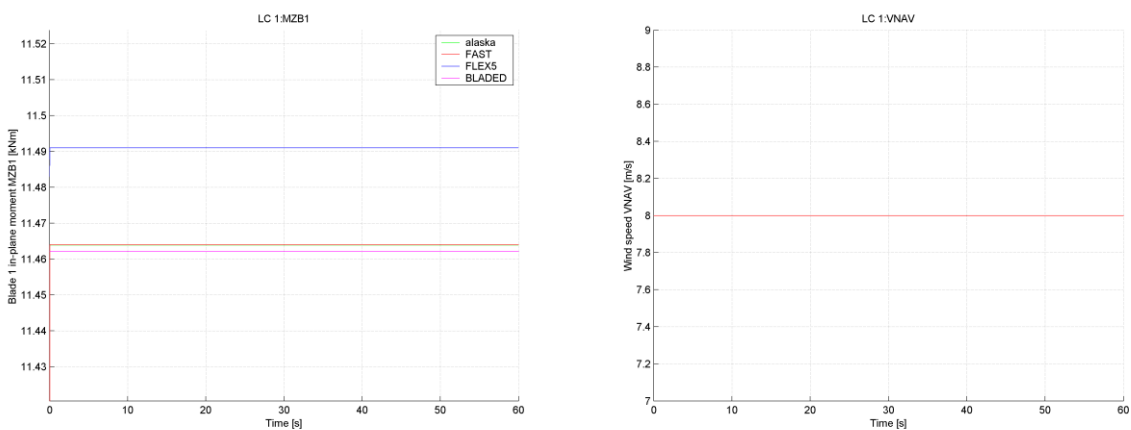
Der Lastfall LC 1 beschreibt eine geparkte Anlage. Das Rotorblatt 1 steht parallel zur Turmachse und zeigt mit der Blattspitze in Richtung Turmfuß. Für den Lastfall LC 1 wurden alle Modellfreiheitsgrade gesperrt, Die Windgeschwindigkeit ist konstant. Dieser Lastfall dient in erster Linie der Validierung der aerodynamischen Blattmodelle. Der Einfluss der Rotordrehung auf das aerodynamische Verhalten ist in diesem Lastfall eliminiert. Die aerodynamischen Kräfte sind nur abhängig von der Geometrie der modellierten Blattsegmente, ihrer aerodynamischen Kenngrößen sowie der vorliegenden Anströmbedingungen. Im Abschnitt 3.2 wird detaillierter auf die Unterschiede der Blattaerodynamikmodelle eingegangen. Dort werden außerdem weitere Details zu Anpassungen der Blattmodelle beschrieben, die notwendig sind, um vergleichbare aerodynamische Kräfte zu erhalten.



**Abb. 18 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle**



**Abb. 19 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**



**Abb. 20 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1, Windgeschwindigkeit**

Der Lastfall LC 1 zeigt mit einem maximalen relativen Fehler von 0.2 % für das Hauptwellenschnittmoment eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den getesteten Werkzeugen. Die Blattmodelle liefern für einen stehenden Rotor vergleichbare aerodynamische Kräfte.

### 5.2 Hochlauf mit variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC 4

Der Lastfall LC 4 beschreibt die Beschleunigung der Referenzmaschine von null auf ca. 40 U/min am Rotor.

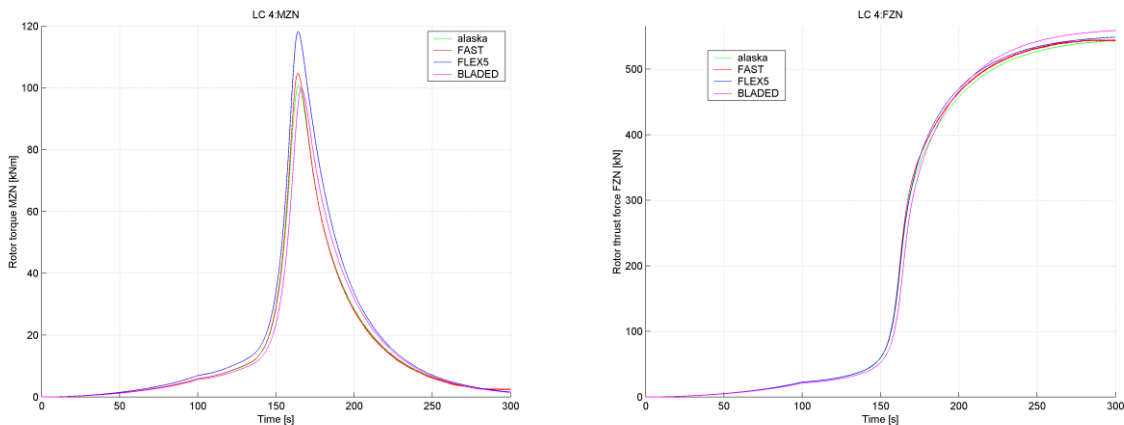


Abb. 21 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle

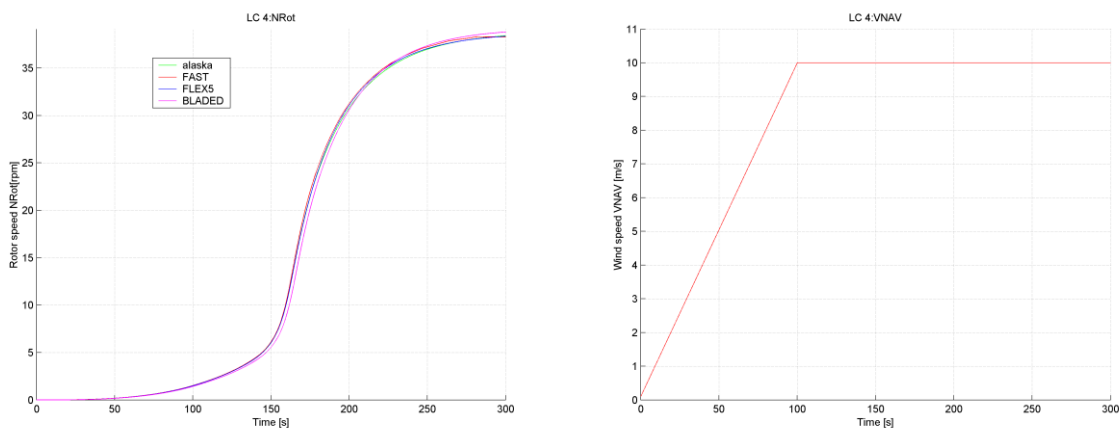


Abb. 22 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

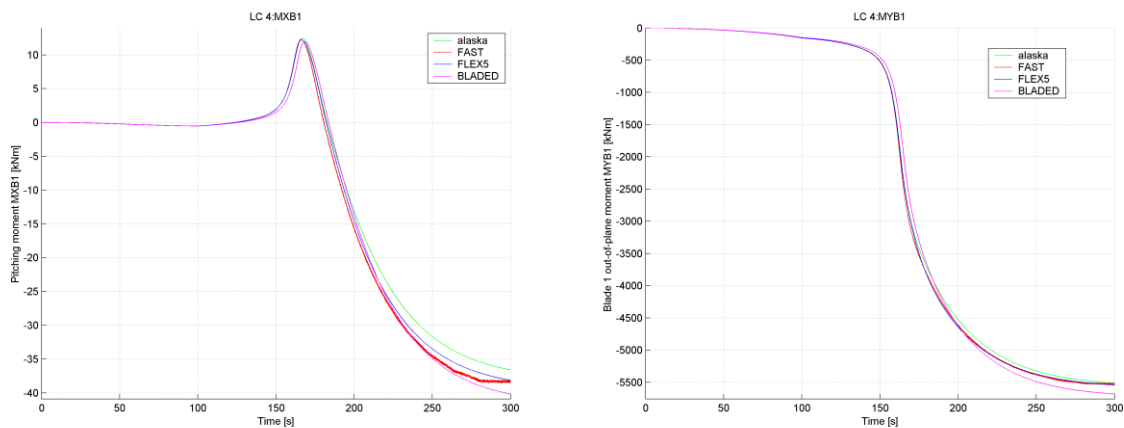
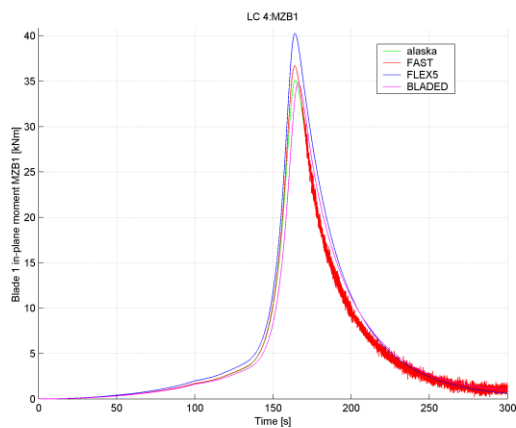


Abb. 23 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

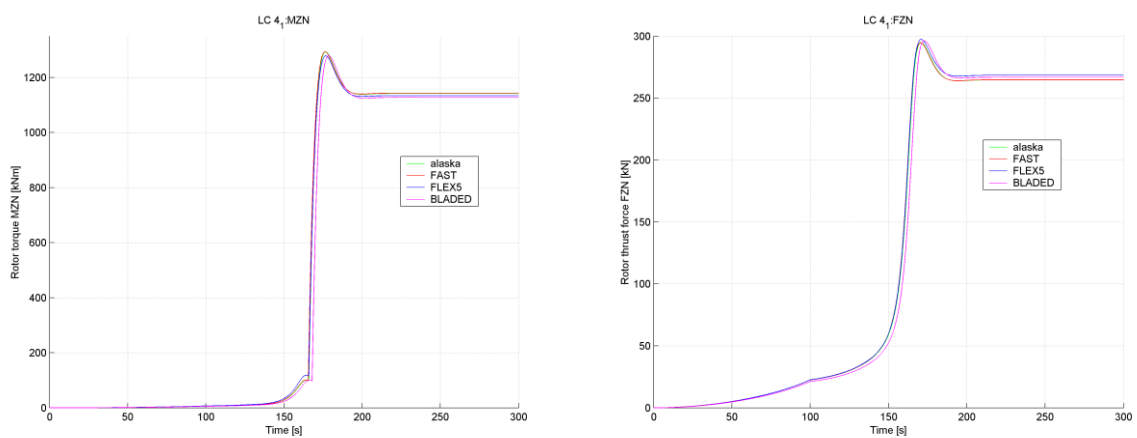


**Abb. 24 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**

Zu beachten ist, dass der Rotor frei dreht und kein Generatormoment anliegt. Das gemessene Hauptwellenschnittmoment entspricht deshalb nur dem Produkt aus Trägheitsmoment des Generators und aktueller Generatorbeschleunigung. Bei Auswertung der Ergebnisse fällt auf, dass bei FLEX5 eine starke Überhöhung im Hauptwellenschnittmoment am Punkt optimaler Leistung auftritt. Ursache könnte hier die Art der Berechnung der Blattelementmethode sein. In FLEX5 erfolgt die Berechnung eines aerodynamischen Gleichgewichtes der Windkräfte iterativ über mehrere Zeitschritte hinweg. Gut kann man den mit steigender Rotordrehzahl zunehmenden Einfluss der Blattdeviationsmomente auf das Pitchmoment sehen. Eine detailliertere Darstellung zu den Ursachen der Abweichungen von alaska gegenüber BLADED, FAST und FLEX5 enthält Abschnitt 4.1.

### 5.3 Hochlauf auf Solldrehzahl bei variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC 4\_1

Der Lastfall LC 4\_1 entspricht dem Lastfall LC 4 mit der Einschränkung, dass bei Erreichen einer Solldrehzahl diese über das Generatormoment stationär gehalten wird. Das erforderliche Lastmoment des Generators (PI-Drehzahlregler) ist ein äquivalentes Maß für die aerodynamischen Kräfte am Rotor. Die toolspezifischen Implementierungen der Aerodynamik lassen sich so frei von dynamischen Einflüssen des Strukturmodells vergleichen. Auch zeitliche Verzögerungen bei der Windkraftberechnung werden dadurch eliminiert.



**Abb. 25 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle**



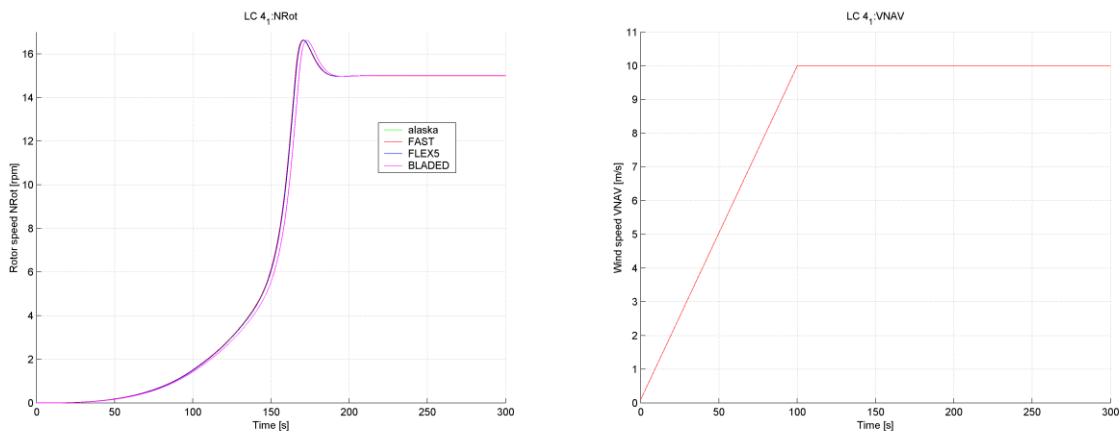


Abb. 26 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

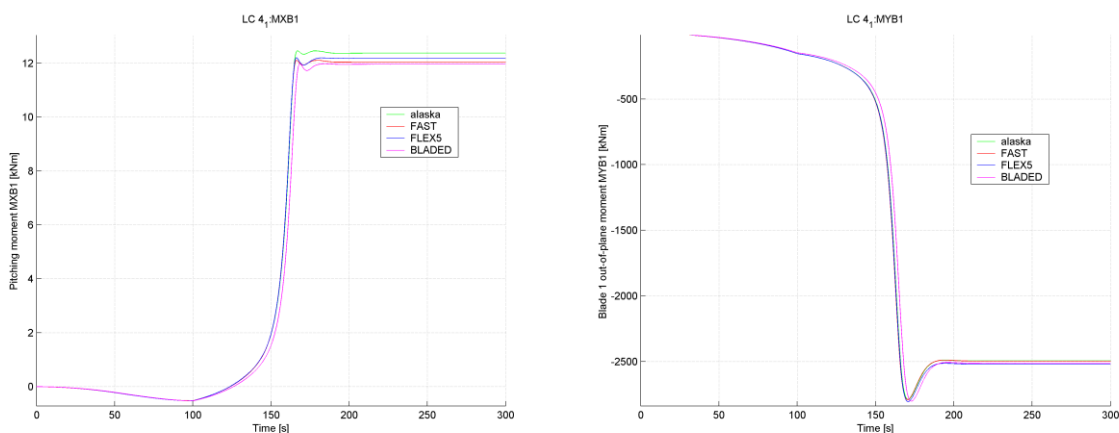


Abb. 27 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

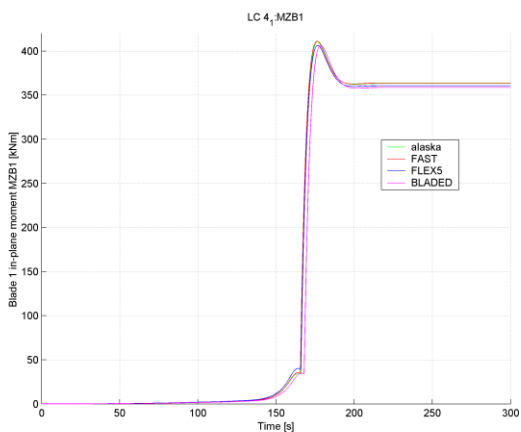


Abb. 28 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

### 5.4 Hochlauf auf Solldrehzahl mit konstanter Schräganströmung / Lastfall LC 11

Im Lastfall LC 11 wird der Hochlauf der Referenzanlage bei konstanter Windgeschwindigkeit von 8 m/s und einer konstanter Schräganströmung von 40° modelliert. Mit Erreichen der Solldrehzahl wird diese über das Generatormoment stationär gehalten. Das erforderliche Lastmoment des Generators (PI-Drehzahlregler) ist ein äquivalentes Maß für die aerodyna-

mischen Kräfte am Rotor. Ziel ist der Vergleich der in den verschiedenen Tools umgesetzten Schräganströmungskorrektur und deren Auswirkung auf das Rotormoment.

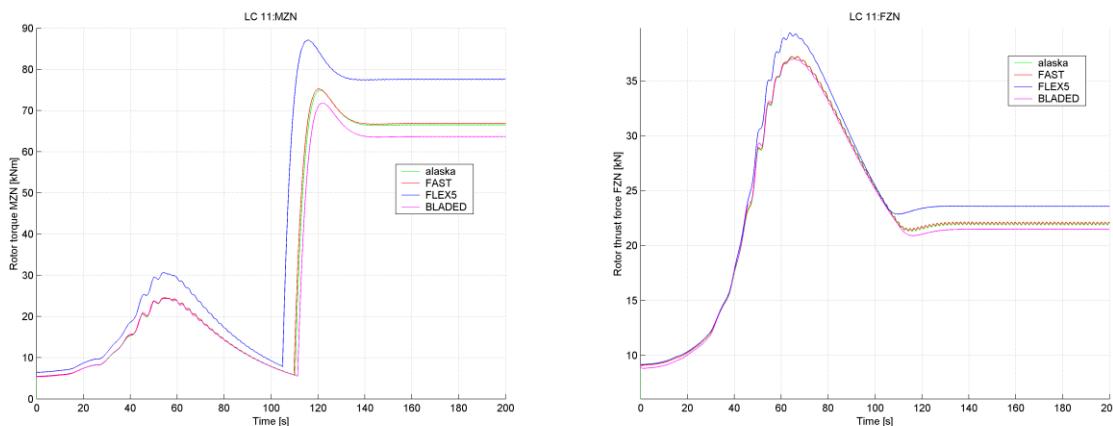


Abb. 29 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle

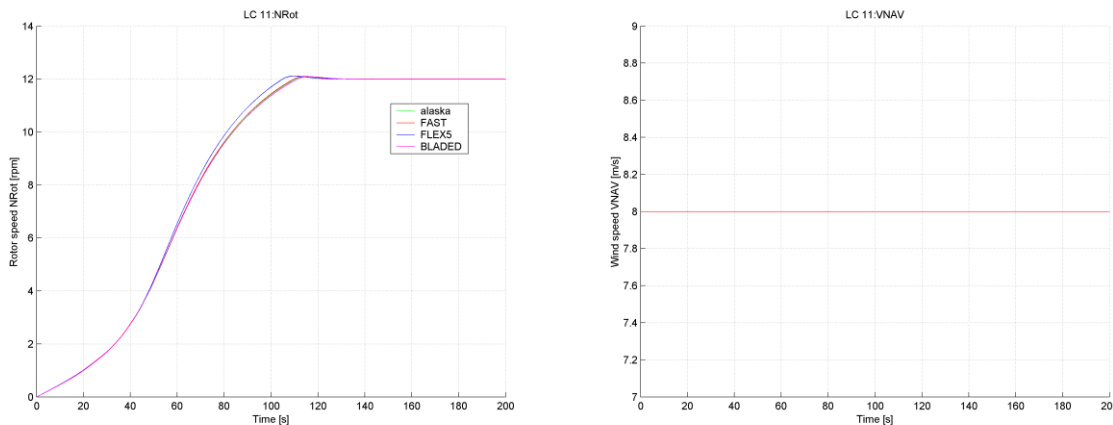


Abb. 30 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

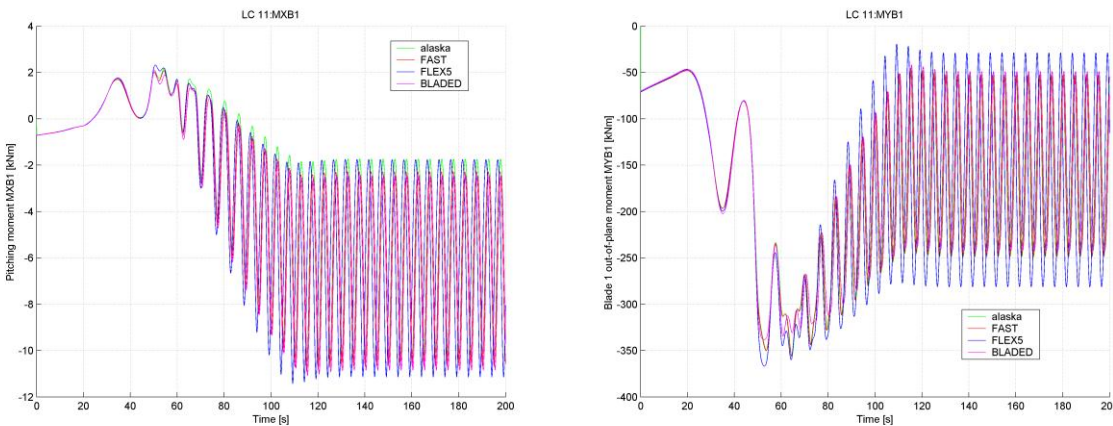
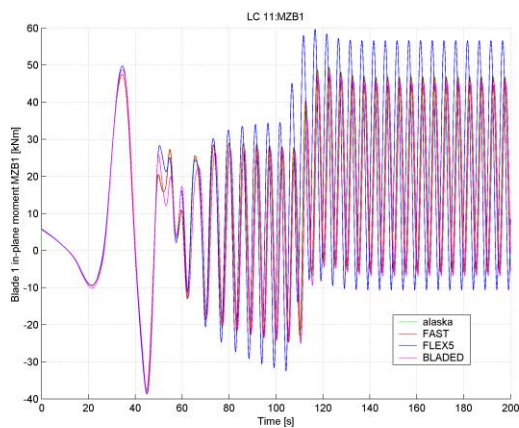


Abb. 31 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

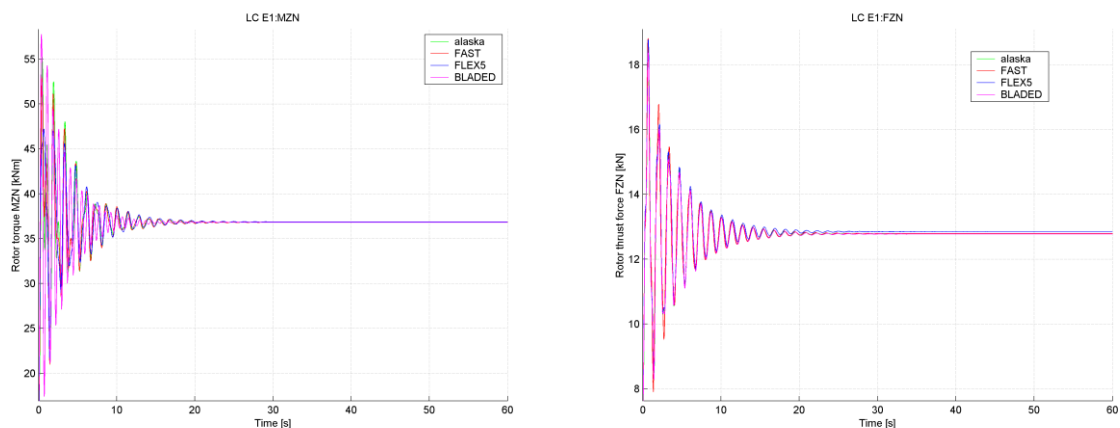


**Abb. 32 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**

Die Ergebnisse zeigen, dass in FLEX5 ein zu alaska, BLADED und FAST abweichendes Modell der Schräganströmungskorrektur verwendet wird. Detailliertere Beschreibungen zu Modellen der Schräganströmungskorrektur, wie sie in Blattelementverfahren verwendet werden, sind in [9] und [10] enthalten.

### 5.5 Windstoß auf die geparkte Anlage mit elastischen Rotorblättern / Lastfall LC E1

Das Anlagenmodell ist für die Simulation geparkt und mit Ausnahme des elastischen Blattmodells sind alle Freiheitsgrade gesperrt. Auf die Möglichkeiten der Beschreibung von elastischen Blättern wurde in Abschnitt 4.4 näher eingegangen. Das Blattmodell wurde, entsprechend der maximal möglichen Anzahl von drei modalen Koordinaten in FAST, für alle Tools einheitlich umgesetzt. Mit Hilfe von Lastfall LC S4 erfolgte die Validierung der elastischen Blattmodelle. Zu Beginn der Simulation ändert sich die Windgeschwindigkeit sprunghaft von 0 m/s auf 8 m/s. Die dargestellten Abbildungen zeigen die Ergebnisse für den Einschwingvorgang infolge der Anregung von Blattschwingungen.



**Abb. 33 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle**

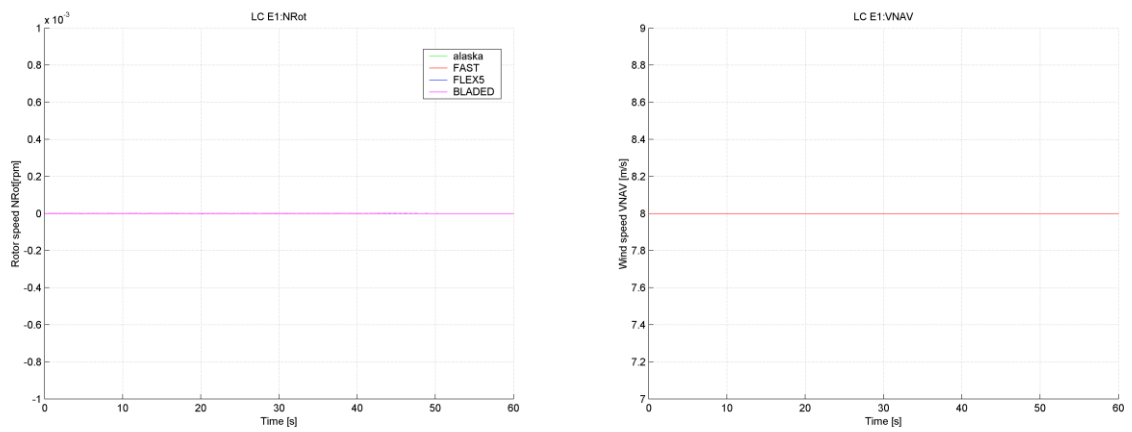


Abb. 34 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

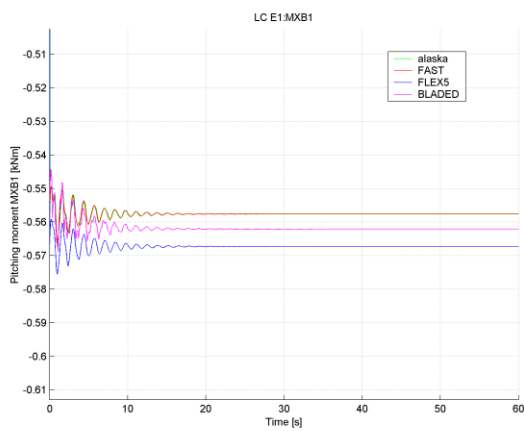


Abb. 35 Pitchmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt1

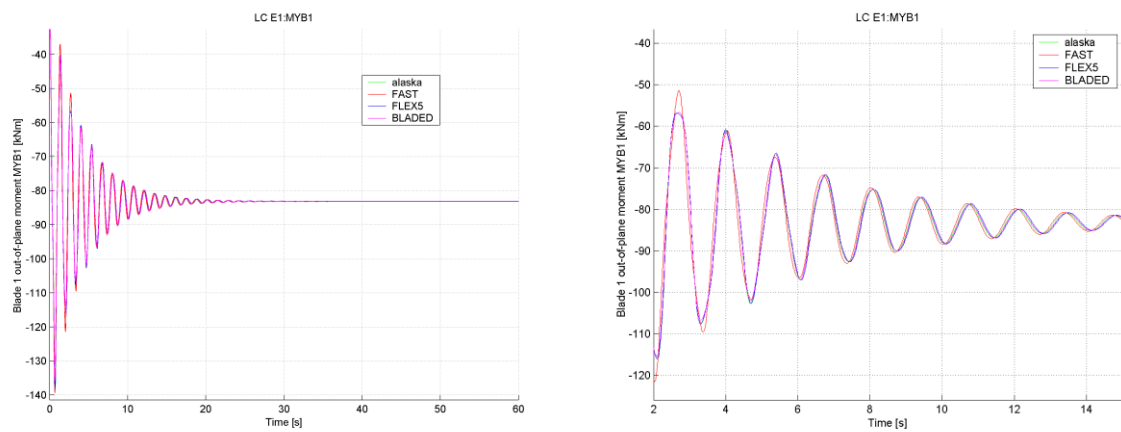


Abb. 36 Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt1

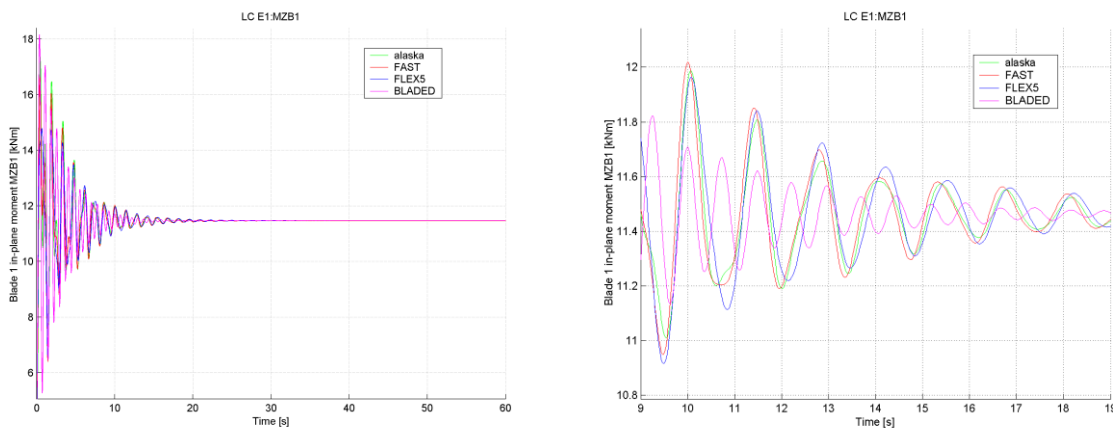


Abb. 37 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

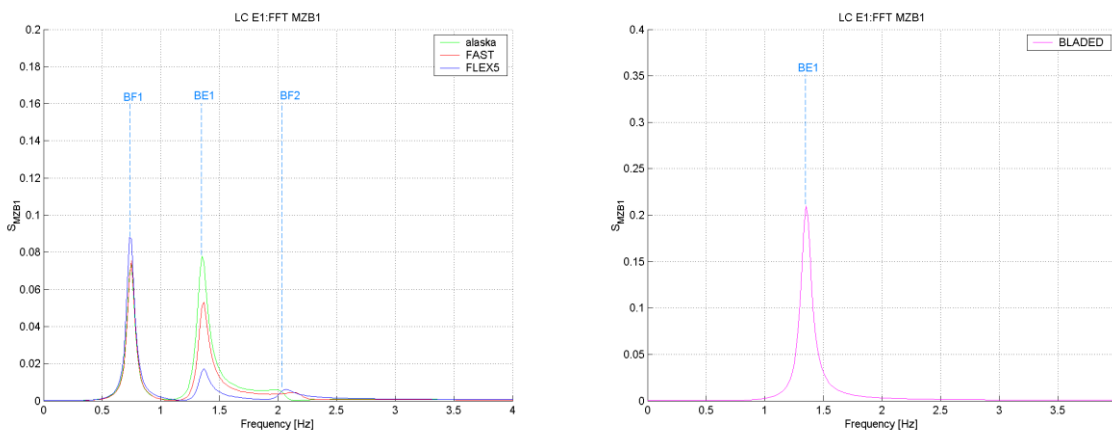


Abb. 38 Amplitudenspektrum des Schwenkmomentes an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

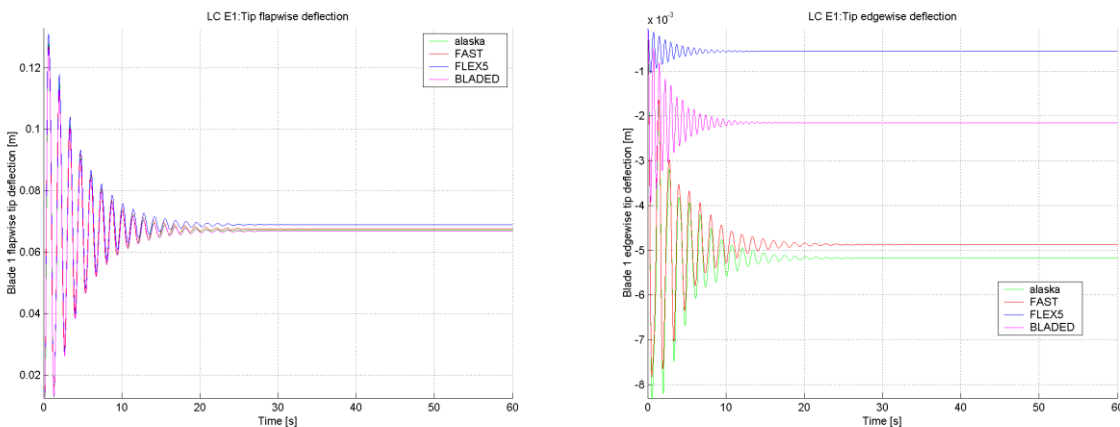


Abb. 39 Blattbiegung an der Blattspitze aus und in der Rotorebene

Die Rotorblätter waren für den Lastfall LC E1 zum Beginn der Simulation in einer unverformten entspannten Lage. Die Blätter werden infolge der schlagartig wirkenden Windkräfte zu Schwingungen angeregt. Diese sind nach ca. 20 s abgeklungen. Die sich einstellenden stationären Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Ergebnissen aus Lastfall LC 1 überein. In den Abbildungen Abb. 36 und Abb. 37 für Schlag- und Schwenkmoment erkennt man, dass die Blattmodelle ein vergleichbares Systemverhalten zeigen. Es stimmen die Blattfrequenzen

sowie die Amplituden sehr gut überein. Abweichungen gibt es nur im Ergebnis von BLADED für das Schwenkmoment. Die Ursache ist in der fehlenden Kopplung der Blattmoden im BLADED Modell zu suchen. Das wird in der Darstellung des Amplitudenspektrums (vgl. Abb. 38) für das Blattschwenkmoment deutlich. Hier wird im BLADED Blattmodell nur die erste In-plane Frequenz angeregt.

In Abschnitt 4.4 wird auf die unterschiedliche Beschreibung der modalen Blattmodelle und die damit verbundenen Einschränkungen und ihre Auswirkungen auf das Systemverhalten eingegangen. In Verbindung mit den hier vorliegenden Simulationsergebnissen scheint sich nun ein Widerspruch, die Kopplung der Blattmoden bei FAST und FLEX5 betreffend, zu ergeben. In FAST werden die modalen Ansätze auf jedes Blattsegment bezogen und die entstehenden Knotenverschiebungen über den Strukturwinkeln auf das Blattsystem umgerechnet. Damit erfolgt trotz fehlender Kopplung der Moden eine Art geometrische Kopplung der Out-of-plane und In-plane Verschiebung des Blattmodells. Die Folge sind z.B. Anregungen mit Out-of-plane Frequenzen im Schwenkmoment an der Blattwurzel (vgl. Abb. 1).

Für das Schlagmoment Abb. 36 sind die zwei Out-of-plane Frequenzen dominierend, so dass der Einfluss der fehlenden Kopplung mit dem In-plane Mode nicht sichtbar wird. Da die Blatteigenfrequenzen (vgl. Tabelle 6) sowohl in Out-of-plane als auch in In-plane Richtung sehr gut übereinstimmen, kann eine fehlerhafte Parametrisierung der Masse- und Steifigkeitsgrößen der Blattmodelle ausgeschlossen werden.

Während die Blattdurchbiegung in flapwise Richtung sehr gut übereinstimmt, gibt es in edgewise Richtung eine gute Übereinstimmung nur zwischen den Blattmodellen von alaska und FAST. Dies ist insofern verwunderlich, da die stationären Ergebnisse für das Schwenkmoment (vgl. Abb. 37) übereinstimmen. In diesem Lastfall steht der Rotor, so dass die sich einstellenden Schwenkmomente relativ klein sind. Das führt zu entsprechend kleinen Blattdeformationen in edgewise Richtung, die Differenzen können dabei durchaus durch numerische Effekte verursacht sein.

Kurz vor Abschluss dieses Validierungsberichtes stand die neue Multibody Dynamics V4 Version von BLADED zur Verfügung. In dieser Version sind nach Angabe des Herstellers GL Garrad Hassan die Blattmoden gekoppelt und die Beschreibung erfolgt wie bei alaska, FAST und FLEX5 jetzt auch bzgl. des Blattkoordinatensystems. Das bedeutet eine zum alaska Blattmodell äquivalente Beschreibung. An dieser Stelle soll die Möglichkeit genutzt werden, die MKS-Blattmodelle von alaska und BLADED zu validieren und mögliche Ursachen für die dargestellten Abweichungen im Lastfall LC E1 zu finden. Im Folgenden wird eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von BLADED V3.82 und V4 für den Lastfall LC E1 vorgenommen. Für die Verwendung des Anlagenmodells wurde in der neuen BLADED Version das Blattmodell von Rotormoden auf Blattmoden umgestellt. Identisch zu dem alaska Blattmodell werden die Blattmoden nun mit aufsteigender Frequenz angegeben, da eine Zuordnung über eine Vorzugsrichtung (z.B. In-plane, Out-of-plane, ...) aufgrund der modalen Kopplung aller 6 Freiheitsgrade nicht möglich ist.

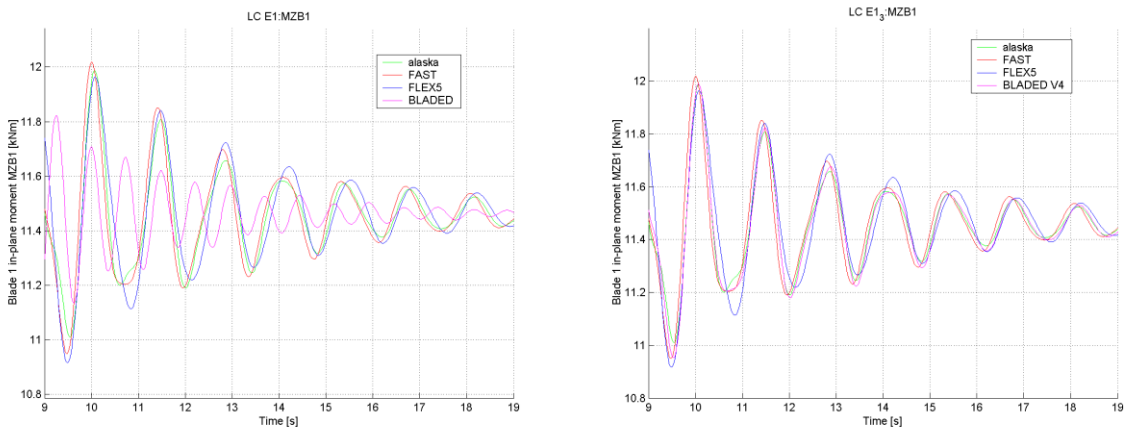


Abb. 40 Vergleich des Schwenkmomentes für BLADED V3.82 und BLADED V4

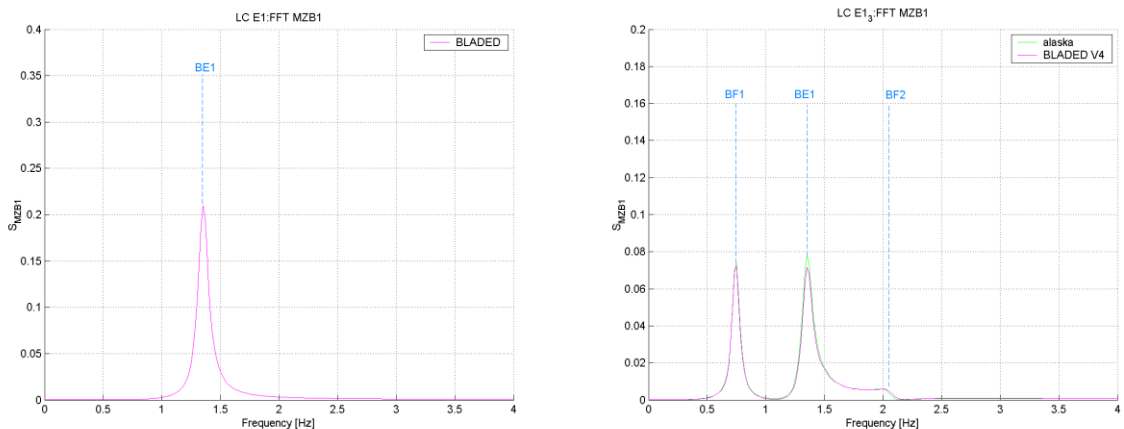


Abb. 41 Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4

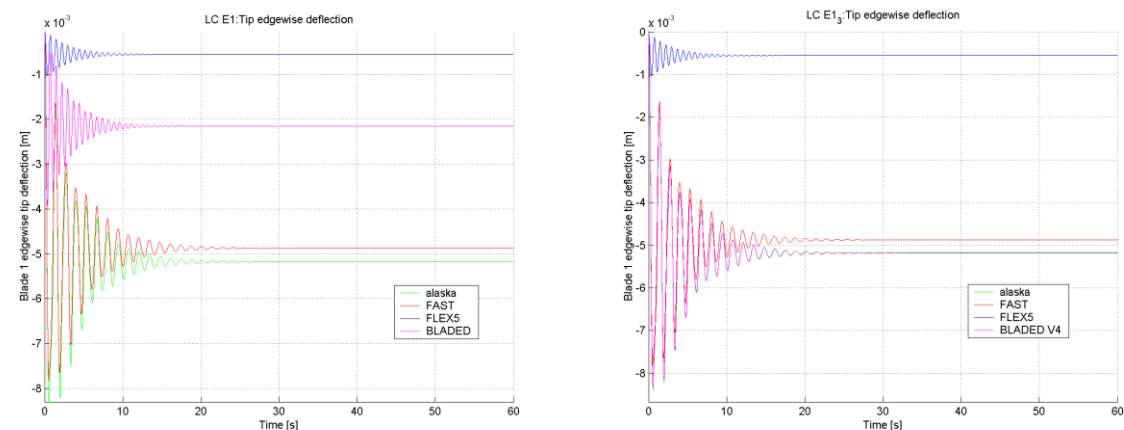


Abb. 42 Vergleich Blattbiegung an der Blattspitze für BLADED V3.82 und BLADED V4

Die Veränderungen am modalen Blattmodell in BLADED V4 haben zur Folge, dass die Ergebnisse nun sehr gut mit alaska, FAST und FLEX5 übereinstimmen. Die Ursache der Abweichungen im Schwenkmoment und der edgewise Blattbiegung sind hauptsächlich in dem verwendeten BLADED Blattmodell der Version V3.82 zu suchen. In der Abbildung Abb. 41 erkennt man sehr gut, dass infolge der gekoppelten Blattmoden im In-plane orientierten Schwenkmoment jetzt auch Anregungen von Out-of-plane Frequenzen enthalten sind.

### 5.6 Hochlauf auf Solldrehzahl mit variabler Windgeschwindigkeit / Lastfall LC E4\_1

Der Lastfall LC E4\_1 entspricht dem Lastfall LC 4\_1 mit dem Unterschied, dass das Blattmodell elastisch abgebildet wurde. Dabei wurde äquivalent zu Lastfall LC E1 das Blattmodell durch 3 modale Koordinaten beschrieben. Die Validierung der elastischen Blattmodelle erfolgte mit Hilfe von Lastfall LC S4.

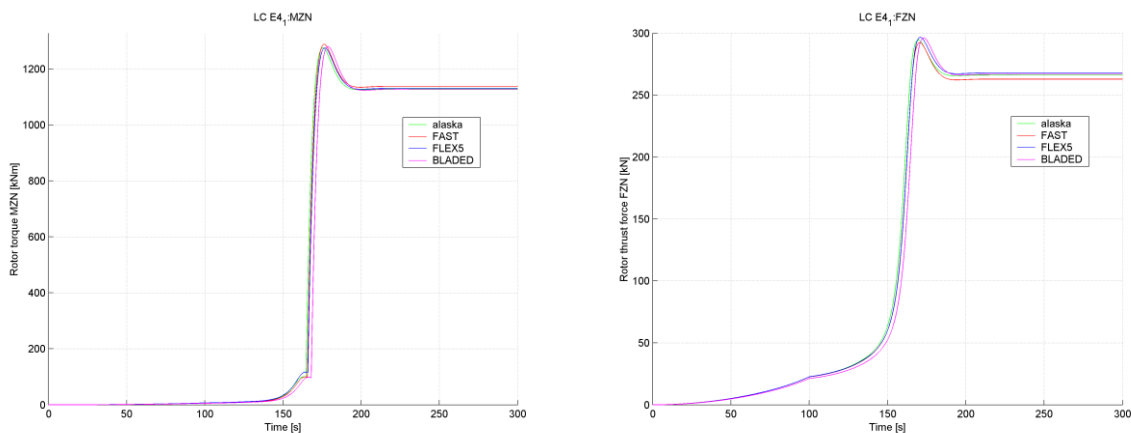


Abb. 43 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle

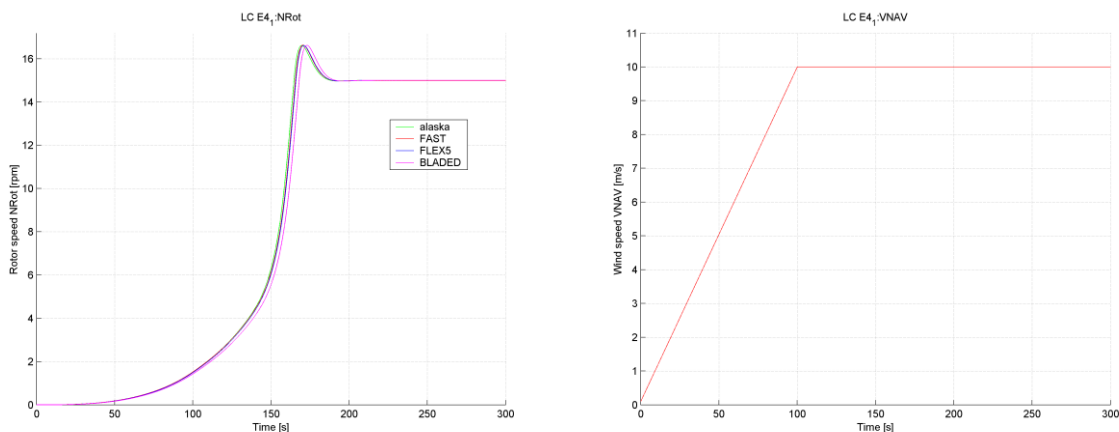


Abb. 44 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

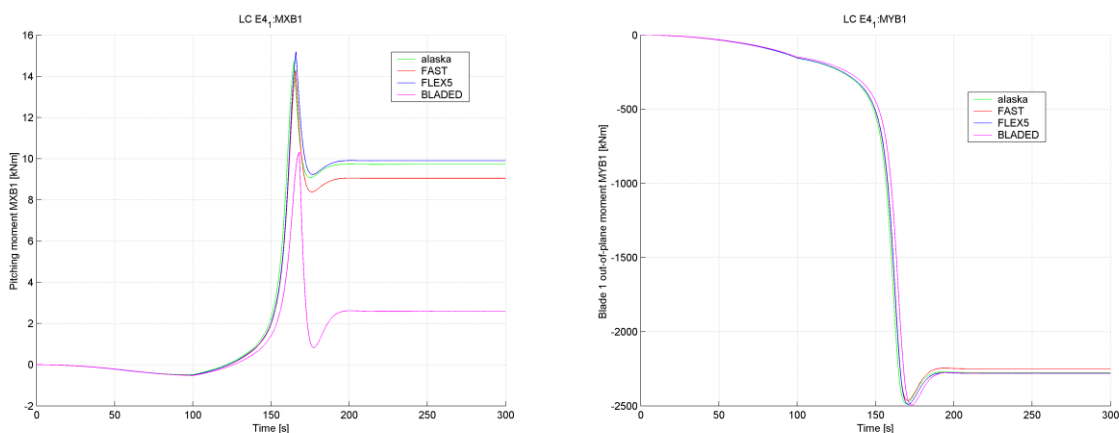


Abb. 45 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1



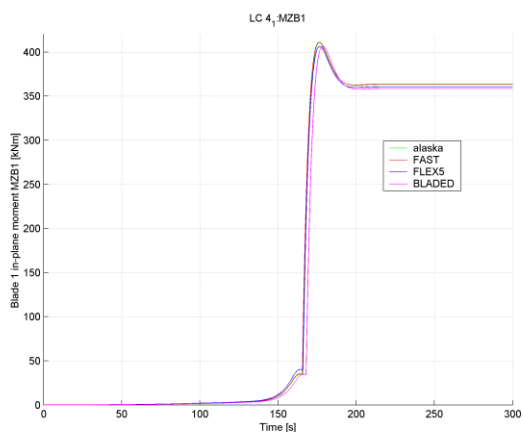


Abb. 46 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

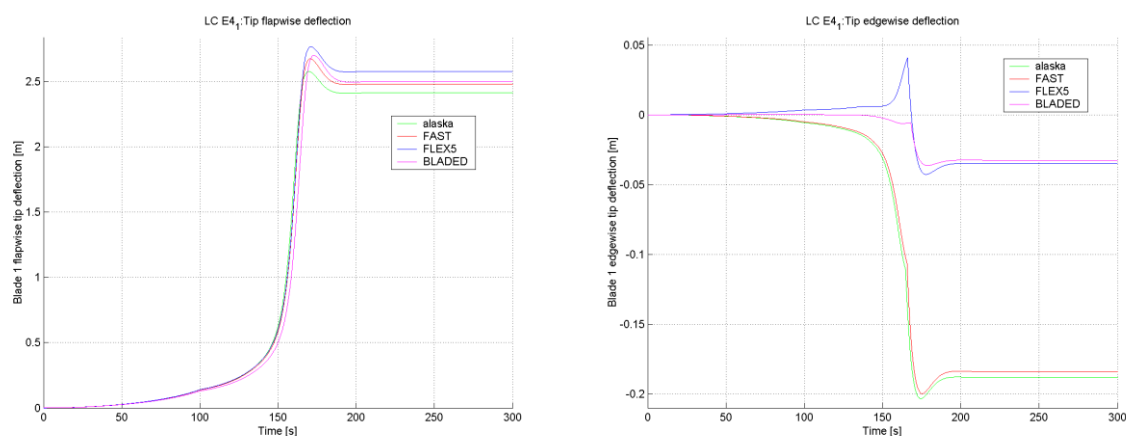
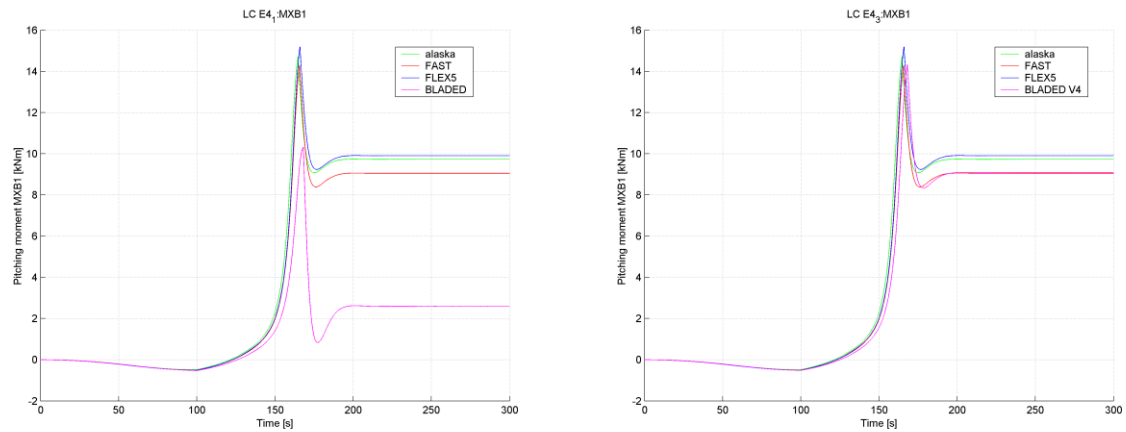


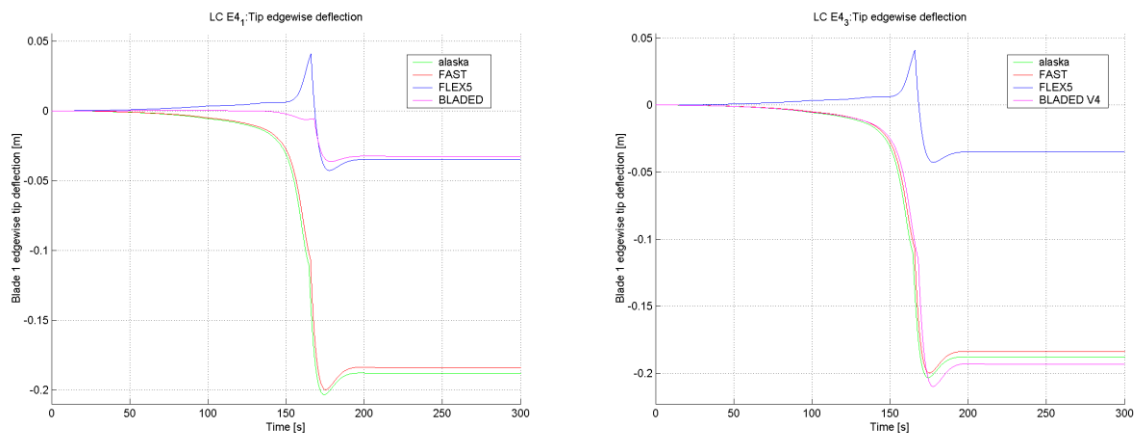
Abb. 47 Blattbiegung an der Blattspitze aus und in der Rotorebene

Das prinzipielle Systemverhalten der Anlagenmodelle mit elastischen Blättern gleicht dem Verhalten von Lastfall LC 4\_1 mit starren Blättern. Der Einfluss der elastischen Blätter ist vor allem an den Ergebnisgrößen Pitchmoment und Schwenkmoment zu erkennen. Hier wirkt sich die Verwendung des elastischen Blattmodells reduzierend auf die Maximalwerte im stationären Betrieb aus. Während sich die relativen Abweichungen zwischen den einzelnen Ergebnisgrößen auf dem Niveau des Modells der starren Maschine bewegen, ist das Pitchmoment bei BLADED um ca. 70% geringer im Vergleich zu den anderen Werkzeugen. Ähnlich wie in Lastfall LC E1 zeigt sich auch hier eine große Abweichung (80%) im Ergebnis der Blattbiegung in edgewise Richtung bei BLADED und FLEX5. Wie in Abschnitt 4.4 bereits ausgeführt, sind in BLADED V3.82 die Blattmoden ungekoppelt und die Beschreibung erfolgt im Rotorkoordinatensystem. Da bei Lastfall LC E4\_1 der Pitchwinkel konstant auf  $0^\circ$  gehalten wurde, ist eine Interpolation der Rotormoden in BLADED nicht erforderlich, so dass dies als mögliche Ursache für die Abweichung der Blattbiegung in edgewise Richtung ausgeschlossen werden kann.

Ähnlich wie Abschnitt 5.5 wird nachfolgend eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von BLADED V3.82 und V4 für den Lastfall LC E4\_1 vorgenommen.



**Abb. 48 Vergleich des Pitchmomentes für BLADED V3.82 und BLADED V4**



**Abb. 49 Vergleich der Blattbiegung in der Rotorebene für BLADED V3.82 und BLADED V4**

Das veränderte modale Blattmodell in BLADED V4 hat zur Folge, dass die Ergebnisse nun sehr gut mit alaska und FAST übereinstimmen. Für die Ursache der Abweichung des Pitchmomentes in BLADED V3.82 konnte im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen keine Erklärung gefunden werden. Auch für die abweichenden Ergebnisse von FLEX5 sind die Ursachen bisher unbekannt. Denkbar sind Fehler in der geometrischen Transformation der Ergebnisse, da bei Blättern ohne Strukturwistwinkel keine Abweichungen in der edgewise Blattbiegung vorliegen.

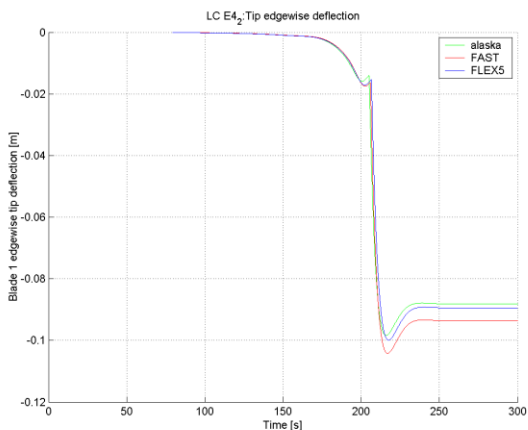


Abb. 50 Vergleich der Blattbiegung in der Rotorebene für das Blattmodell ohne Twistwinkel

### 5.7 Turbulenter Wind auf die geparkte Anlage / Lastfall LC ET1

Ziel des Lastfalls LC ET1 ist es, die Reaktion der elastischen Blattmodelle auf Anregungen in Folge von turbulentem Wind zu untersuchen. Das Anlagenmodell ist geparkt und mit Ausnahme des elastischen Blattmodells sind alle Modellfreiheitsgrade gesperrt. Das elastische Blattmodell wird durch zwei Out-of-plane Moden sowie einen In-plane Mode abgebildet. Der für die Simulation erforderliche turbulente Wind wurde mit Hilfe des Windfeldgenerators TurbSim [11] nach dem Spektrum von Kaimal (IEC, Turbulenzklasse A) generiert. TurbSim erlaubt die Generierung von BLADED-Style Turbulenzdateien die sowohl von alaska als auch FAST gelesen werden können. Im Gegensatz zu alaska, BLADED und FAST verwendet FLEX5 kein Rechteckgitter sondern ein Kreisgitter zur Windfeldbeschreibung. Deshalb wurde mit Hilfe von Vindsim7, einem Windfeldgenerator für FLEX5, auf Basis des Kaimalspektrums ein separates Windfeld erstellt. Eine Validierung der verwendeten synthetischen Windfelder erfolgt in Abschnitt 6.1. Die folgenden Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse.

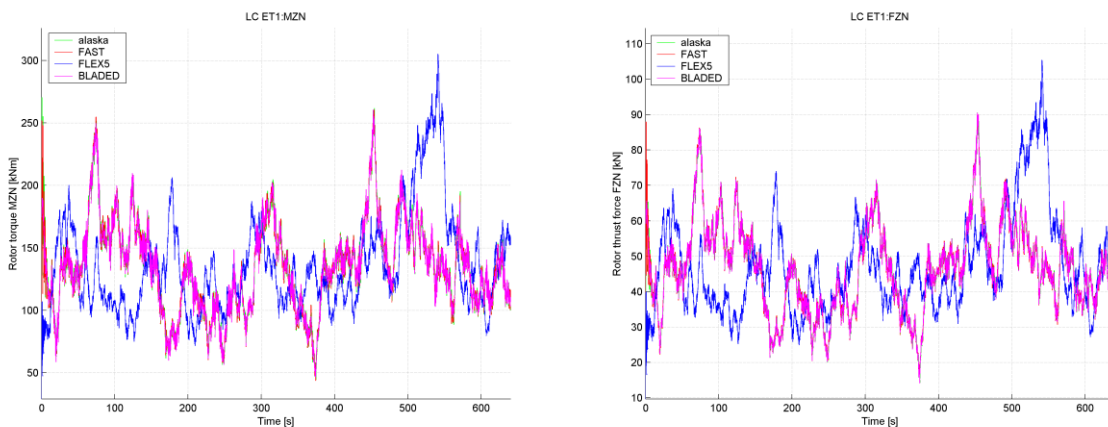
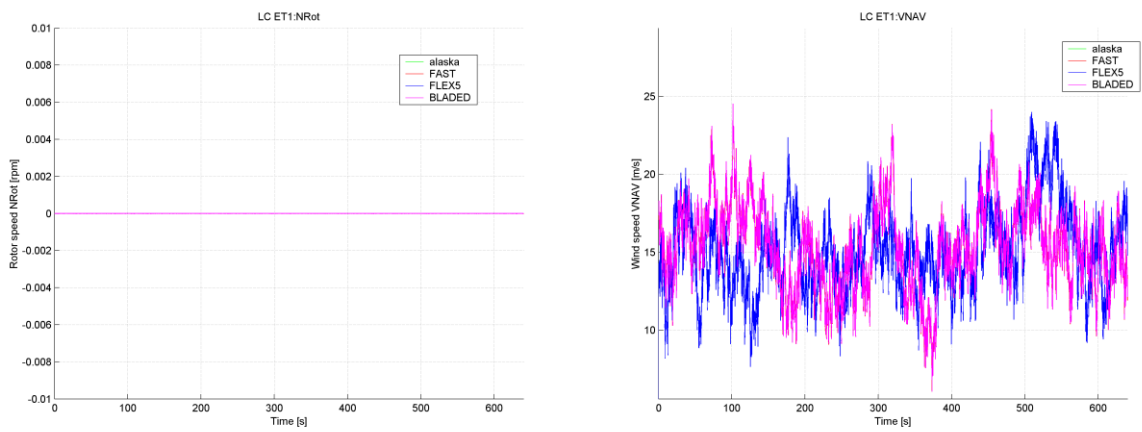
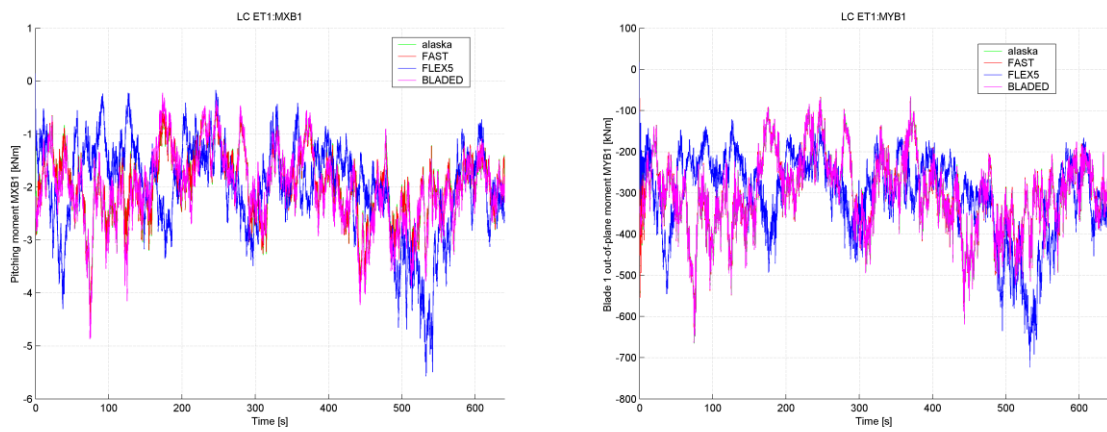


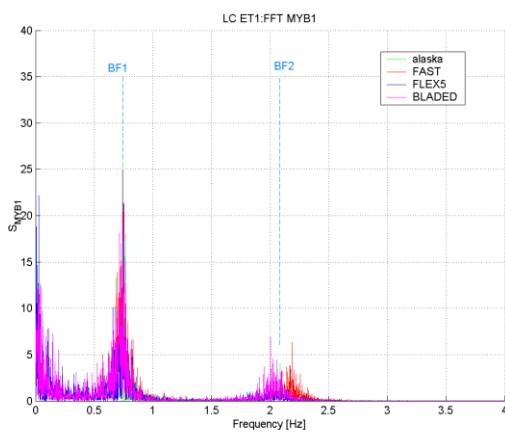
Abb. 51 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle



**Abb. 52 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit**



**Abb. 53 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**



**Abb. 54 Amplitudenspektrum des Schlagmomentes an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**

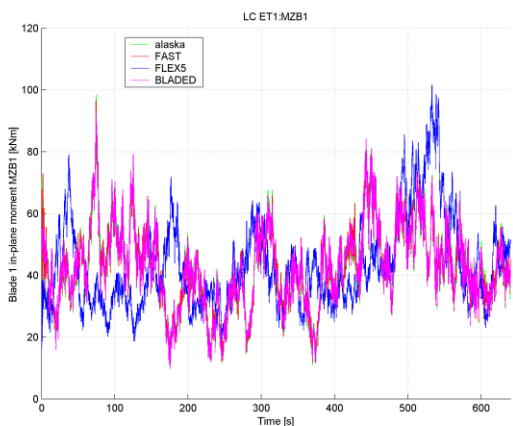


Abb. 55 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

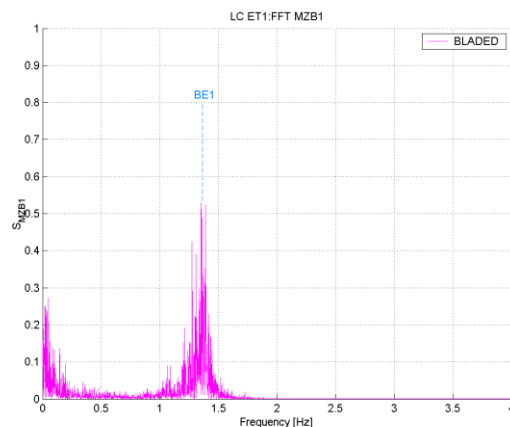
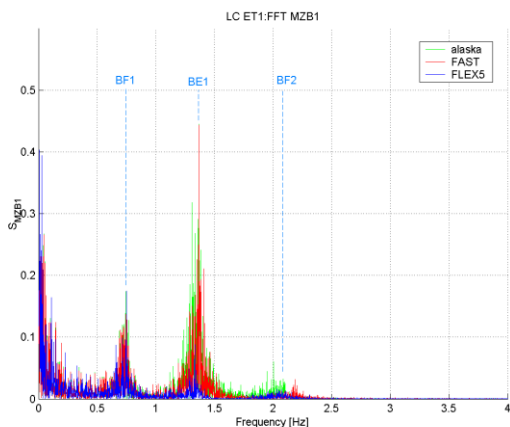


Abb. 56 Amplitudenspektrum des Schwenkmomentes an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

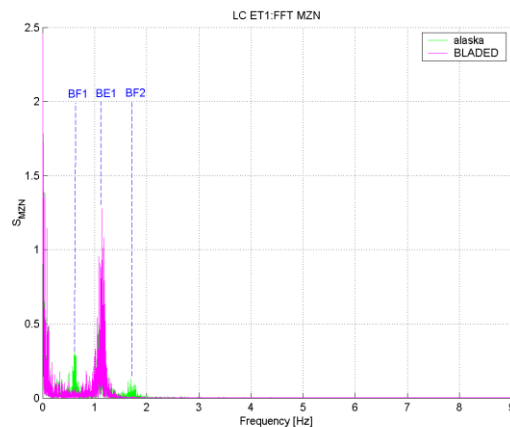
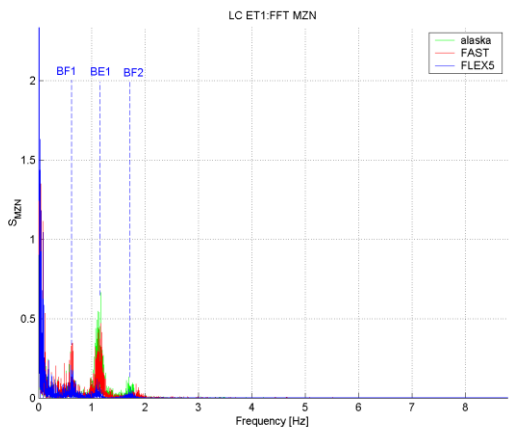


Abb. 57 Amplitudenspektrum des Schnittmomentes an der Hauptwelle

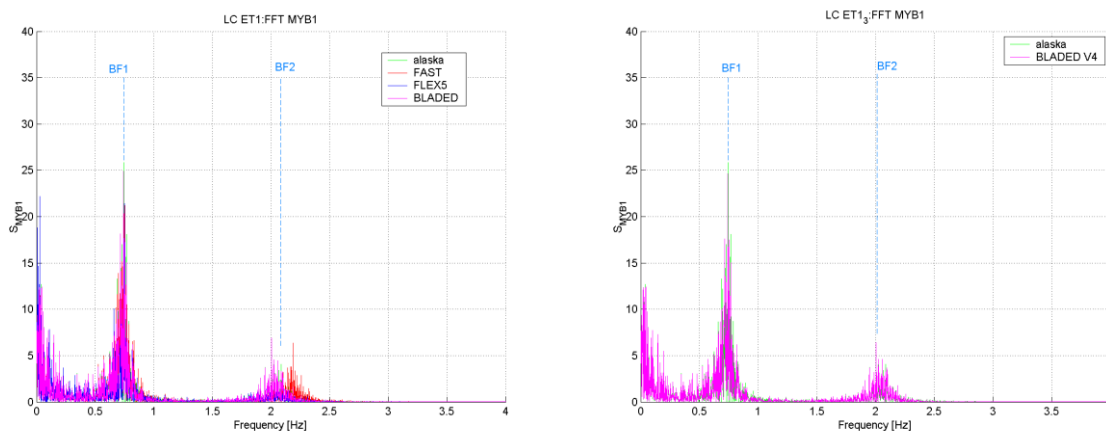
Die allgemein gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse für Lastfälle mit stehendem Rotor konnte auch bei Simulation mit turbulentem Wind erreicht werden. Da für die Simulation im FLEX5 Modell ein eigenes Turbulenzfeld erforderlich war, ergeben sich hier Unterschiede im Zeitverlauf im Vergleich zu alaska, BLADED und FAST. Um die Reaktion der elastischen Blattmodelle auf Anregungen aus dem turbulenten Wind vergleichen zu können, wurden Amplitudenspektren für die Blatteinspannmomente und das Hauptwellenmoment

berechnet. Dabei wird der schon in den Abschnitten 5.5 und 5.6 beschriebene Effekt der fehlenden Kopplung der In-plane und Out-of-plane Blattmoden im BLADED Modell sichtbar. Die fehlende Anregung von Blattfrequenzen durch den turbulenten Wind im Schwenkmoment (vgl. Abb. 56) wirkt sich entsprechend im Rotormoment (vgl. Abb. 57) aus. Hier werden Biegeeigenfrequenzen nicht als Anregung auf den Triebstrang übertragen. Da ein einheitliches Windfeld für alaska, BLADED und FAST verwendet wurde, kann die mögliche fehlende Anregung im Wind als Ursache ausgeschlossen werden.

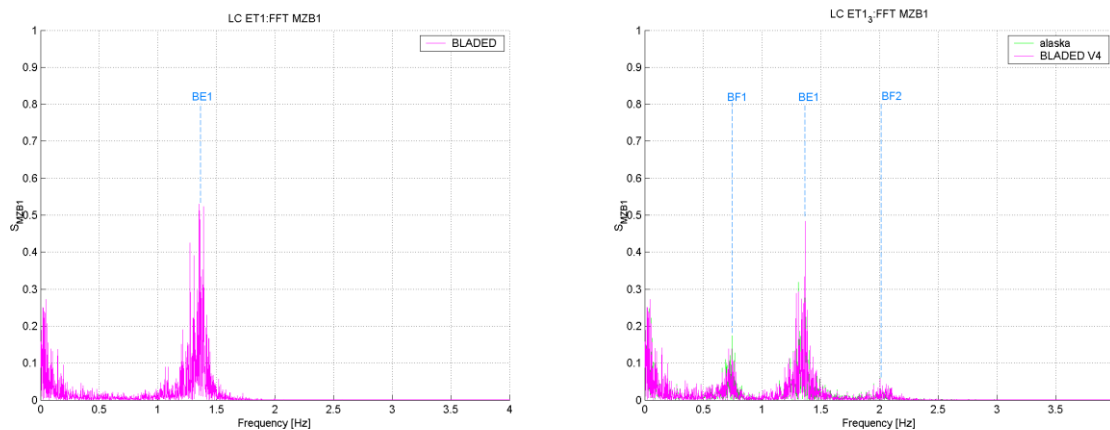
Weiterhin ist zu erkennen, dass die Amplitude der edgewise Frequenz (BE1) im FLEX5 Modell um den Faktor 2 kleiner ist im Vergleich zu alaska und FAST. Hier ist die Ursache sowohl im Blattmodell als auch in der Windfeldbeschreibung zu suchen. Im Abschnitt 6.1 wurde eine Validierung des verwendeten Windfeldes vorgenommen. Aufgrund der unterschiedlichen Gitterbeschreibung wurde jeweils nur der Startpunkt verglichen. Unterschiede in der Kohärenzfunktion für alle Gitterpunkte lassen sich so jedoch nicht ausschließen. Untersuchungen über den Einfluss der Gitterform auf die Interpolation der freien Windgeschwindigkeit wurden zum Beispiel von Thomsen [12] durchgeführt.

Mit Hilfe der Lastfälle LC E1 und LC E4\_1 wurde gezeigt, dass es gerade in der Blattbiegung in edgewise Richtung (vgl. Abb. 47) Abweichungen gibt. Die dort dargestellten Unterschiede im elastischen Blattmodell sind auch als eine Ursache der hier festgestellten Abweichung im Amplitudenspektrum zu nennen. Die Modelle von alaska und FAST zeigen eine gute Übereinstimmung.

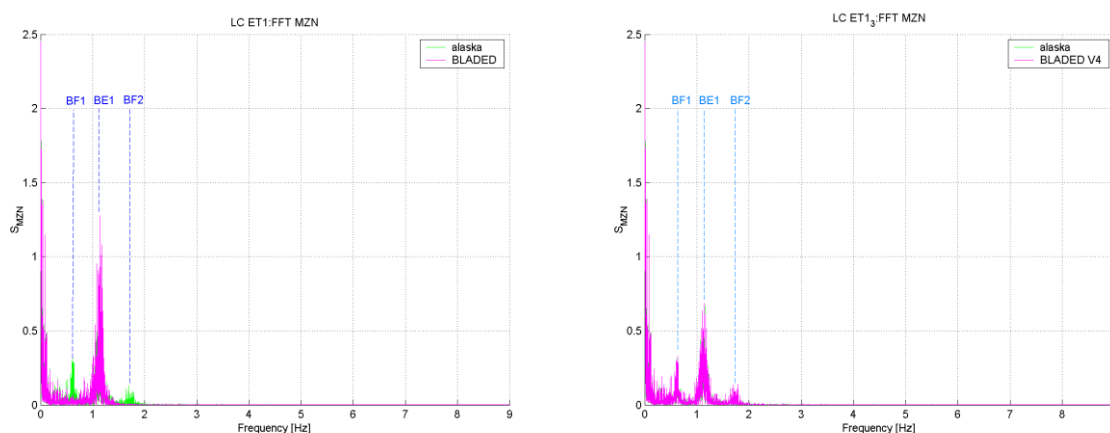
Wie in den vorangegangenen Abschnitten erfolgt im Weiteren eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse von BLADED V3.82 und V4 für den Lastfall LC ET1.



**Abb. 58 Vergleich Amplitudenspektrum Schlagmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4**



**Abb. 59 Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4**



**Abb. 60 Vergleich Amplitudenspektrum Schnittmoment an der Hauptwelle für BLADED V3.82 und BLADED V4**

Auf die Unterschiede in den Blattmodellen von BLADED V3.82 und BLADED V4 sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf die Ergebnisse, wurde in den vorangegangenen Abschnitten schon detailliert eingegangen. Die Simulationsergebnisse von BLADED V4 zeigen für die Anregung mit turbulentem Wind eine sehr gute Übereinstimmung mit alaska. Ähnlich wie in Abschnitt 5.5 werden auch durch den turbulenten Wind gekoppelte Blattschwingungen angeregt. Da für alaska, BLADED und FAST ein identisches Windfeld verwendet wurde, stimmen die Amplituden der zum Vergleich erzeugten Spektren sehr gut überein.

## 5.8 Simulation mit turbulentem Wind / Lastfall LC T2

Nachdem im Lastfall LC ET1 die Anlage geparkt war, wurde im Lastfall LC T2 ein Simulationslauf mit turbulentem Wind durchgeführt. Mit dem Ziel, das Spektrum des erzeugten turbulenten Windes mit Hilfe des Amplitudenspektrums des Hauptwellenmomentes zu validieren, wurde ein komplett starres Anlagenmodell verwendet. Damit kann trotz unterschiedlicher Windfeldbeschreibung überprüft werden, ob die Windspektren übereinstimmen. Um während der Simulation eine realistische stationäre Rotordrehzahl zu erreichen, wurde ein konstanter Pitchwinkel von  $30^\circ$  eingestellt. Bei Verwendung von turbulentem Wind gibt es in BLADED keine Möglichkeit, die der Simulation vorgeschaltete Gleichgewichtsrechnung zu umgehen. Deshalb wurde für alle Modelle eine Anfangsgeschwindigkeit von ca. 11 U/min am Rotor eingestellt.

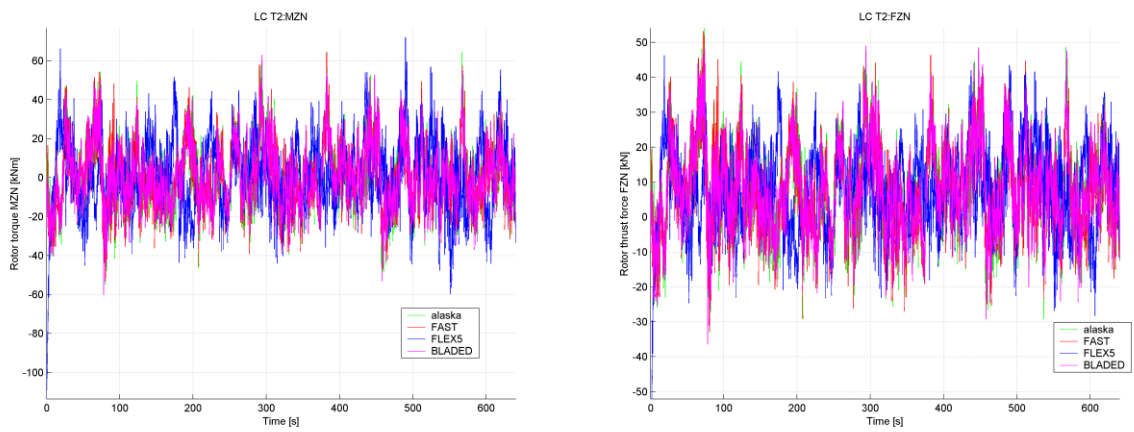


Abb. 61 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle

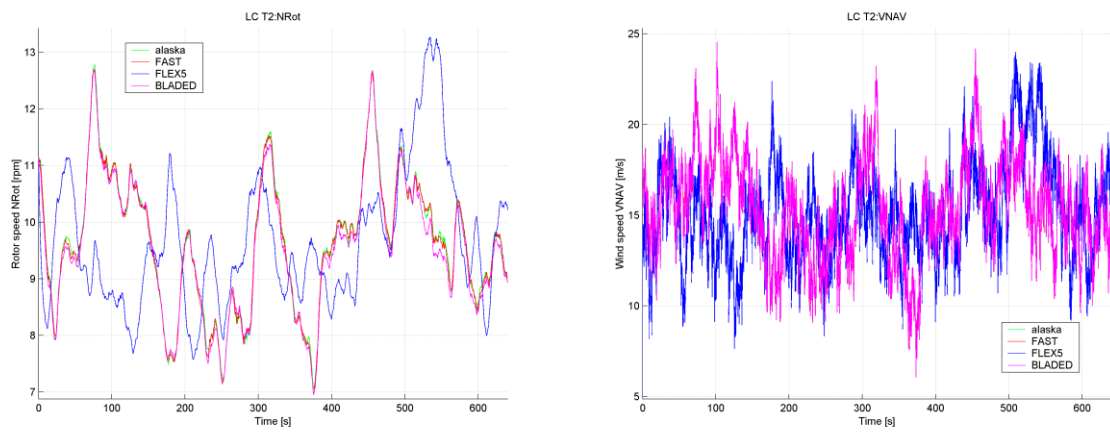


Abb. 62 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

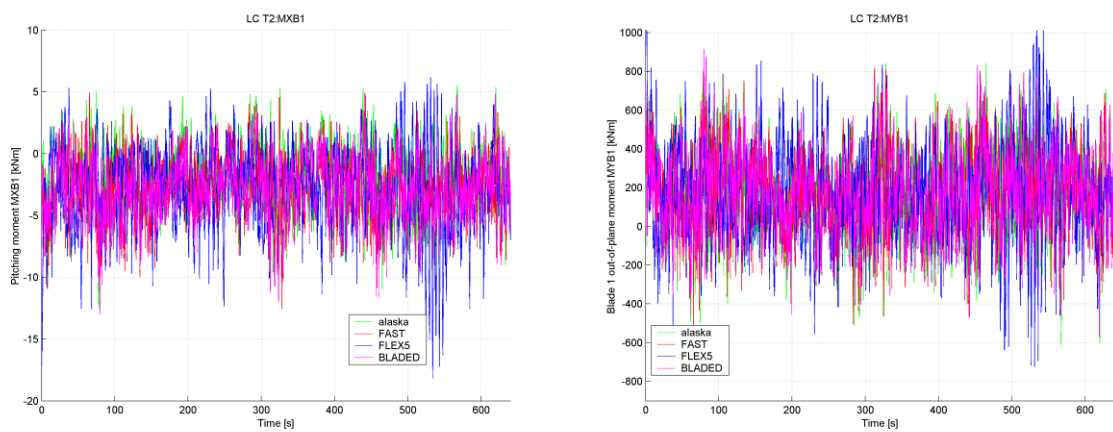
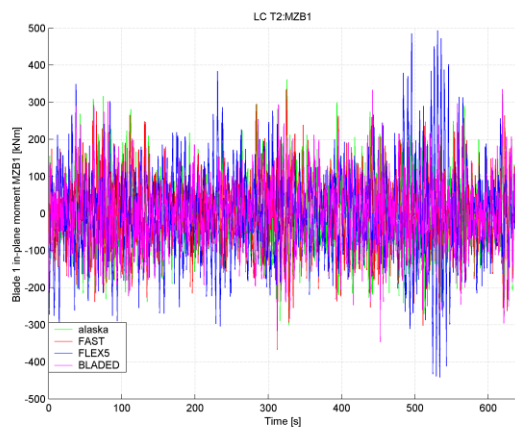
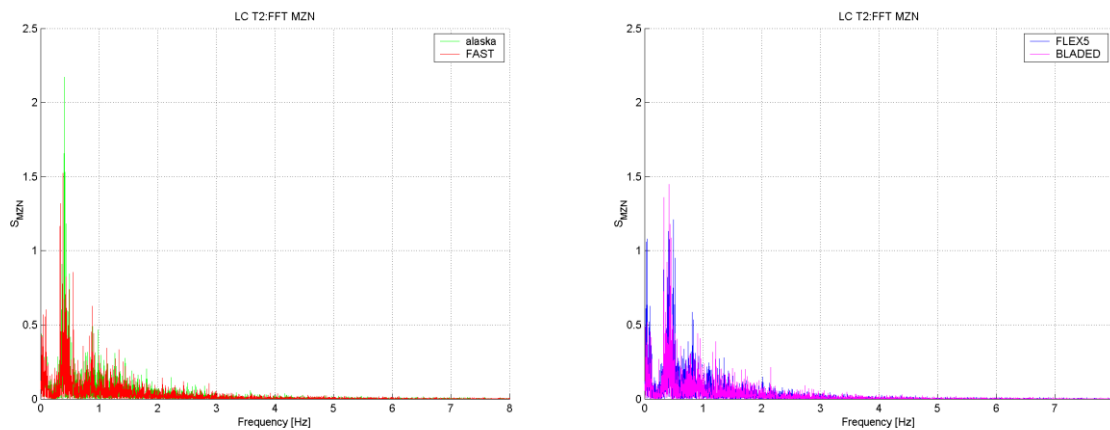


Abb. 63 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1





**Abb. 64 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1**



**Abb. 65 Amplitudenspektrum des Schnittmomentes an der Hauptwelle**

Der Lastfall LC T2 zeigt eine gute Übereinstimmung im Amplitudenspektrum des Hauptwellenmomentes für den Bereich von 0-5 Hz. Damit konnte gezeigt werden, dass trotz der unterschiedlichen Windfeldbeschreibung ein vergleichbares Spektrum vorliegt.

## 5.9 Simulation mit turbulentem Wind / Lastfall LC ET2

Nachdem mit Hilfe von Lastfall LC T2 das Spektrum des Windfeldes an einem starren Anlagenmodell validiert wurde, wird mit Lastfall LC ET2 eine elastische Anlage simuliert. Das Ziel ist dabei die Untersuchung des Systemverhaltens der Anlagenmodelle mit elastischen Blättern bei Anregung durch turbulenten Wind. Die charakterisierenden Lastfallparameter der Simulation von Lastfall LC ET2 sind identisch zu Lastfall LC T2. Nachfolgend werden die Ergebnisse dargestellt.

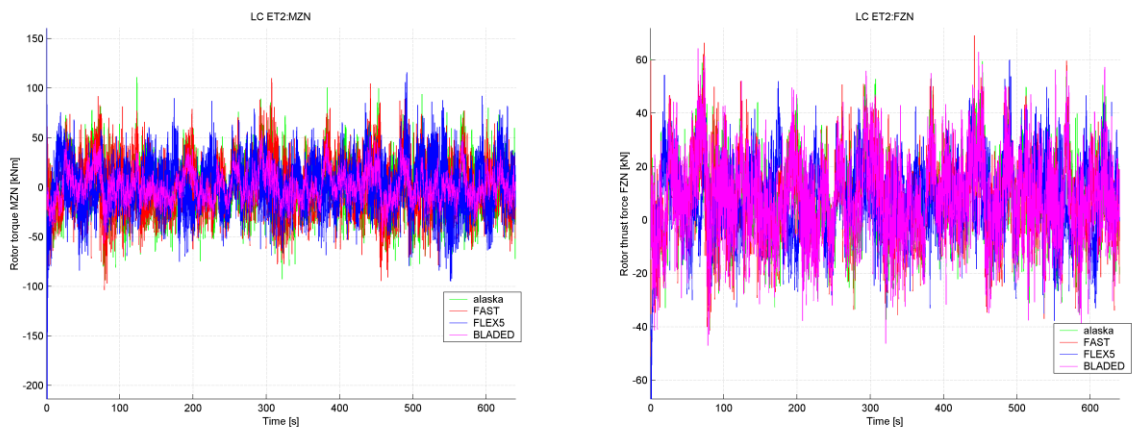


Abb. 66 Schnittmoment und Rotorschub an der Hauptwelle

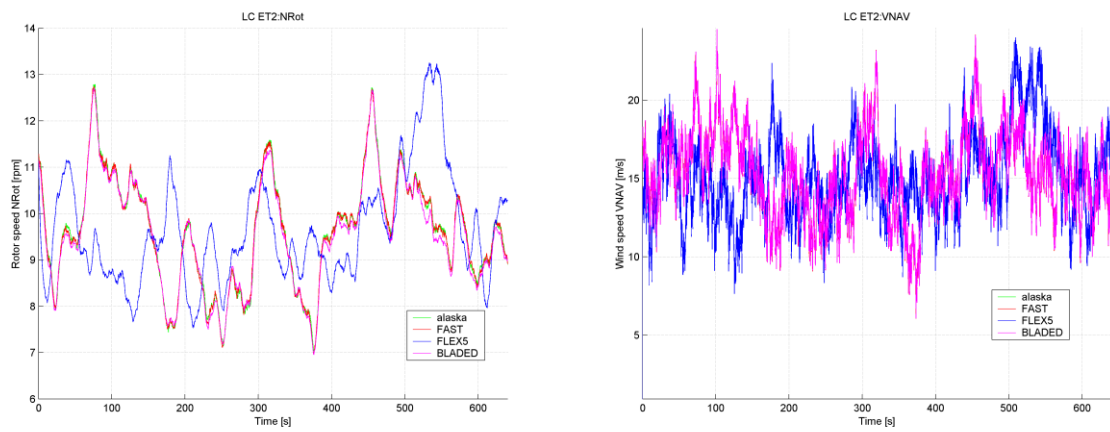


Abb. 67 Rotordrehzahl und Windgeschwindigkeit

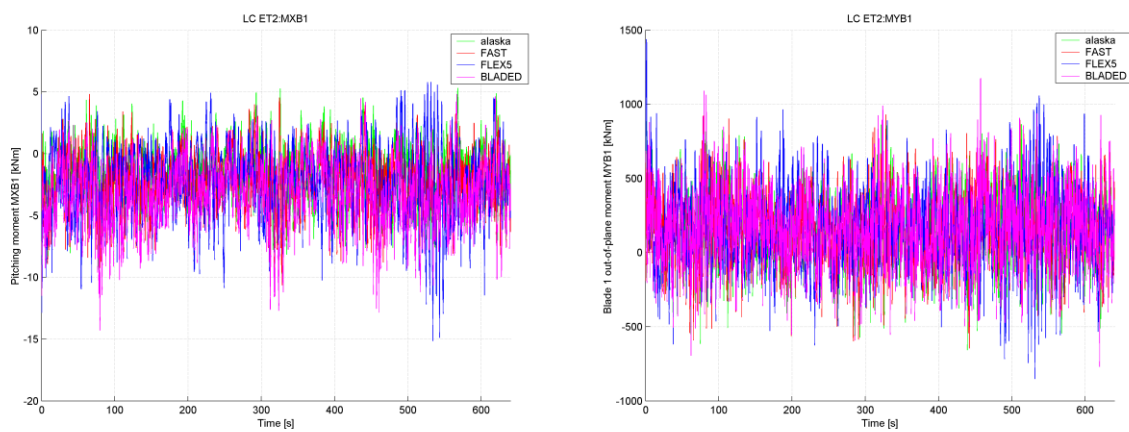


Abb. 68 Pitchmoment und Schlagmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

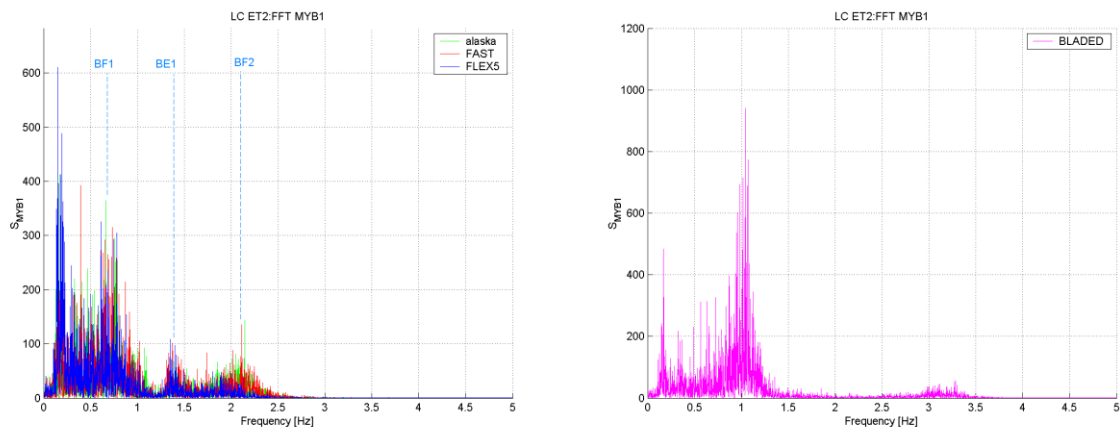


Abb. 69 Amplitudenspektrum des Schlagmomentes an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

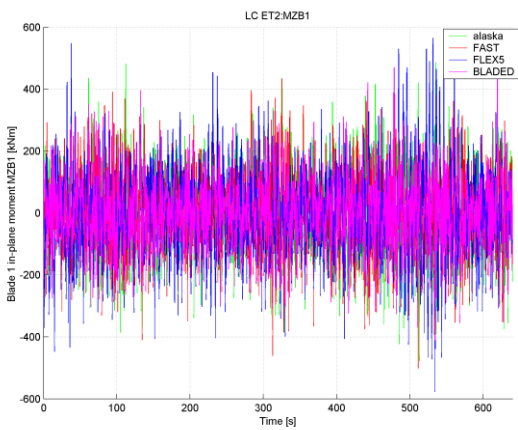


Abb. 70 Schwenkmoment an der Blattwurzel von Rotorblatt 1

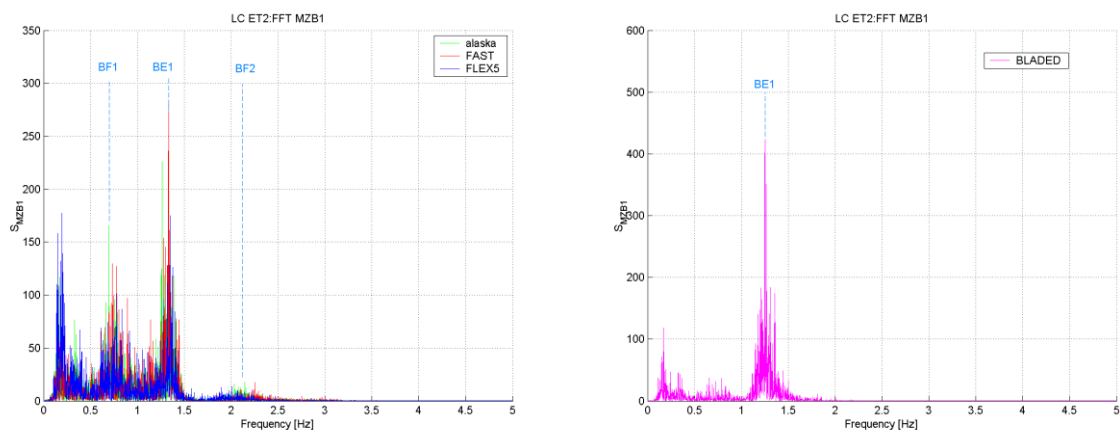
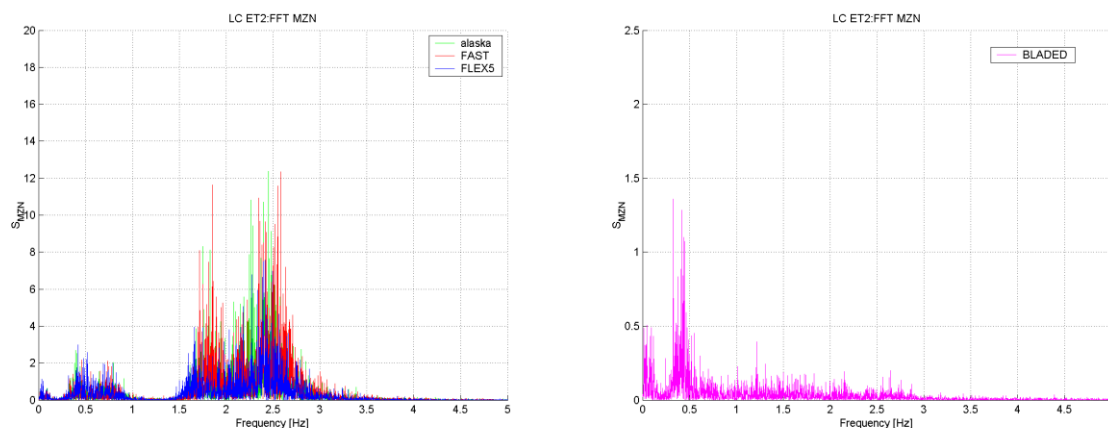


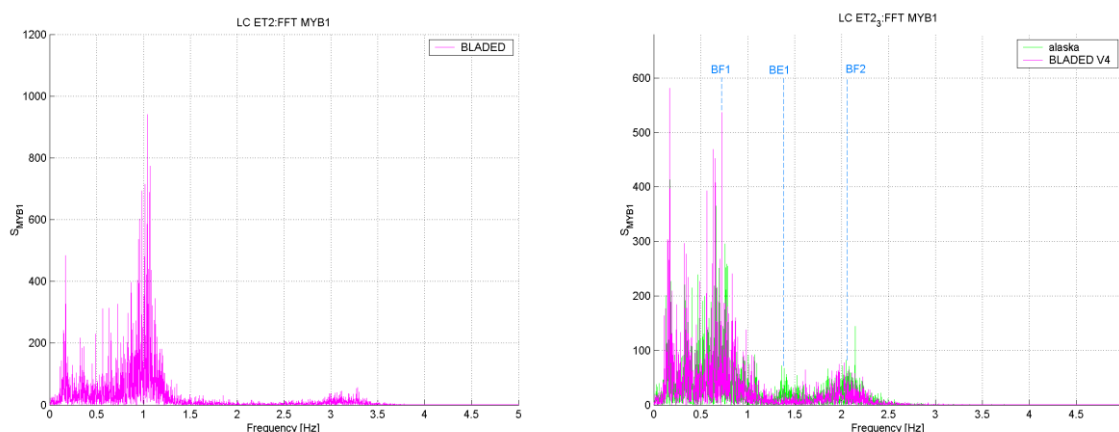
Abb. 71 Amplitudenspektrum des Schwenkmomentes an der Blattwurzel von Rotorblatt 1



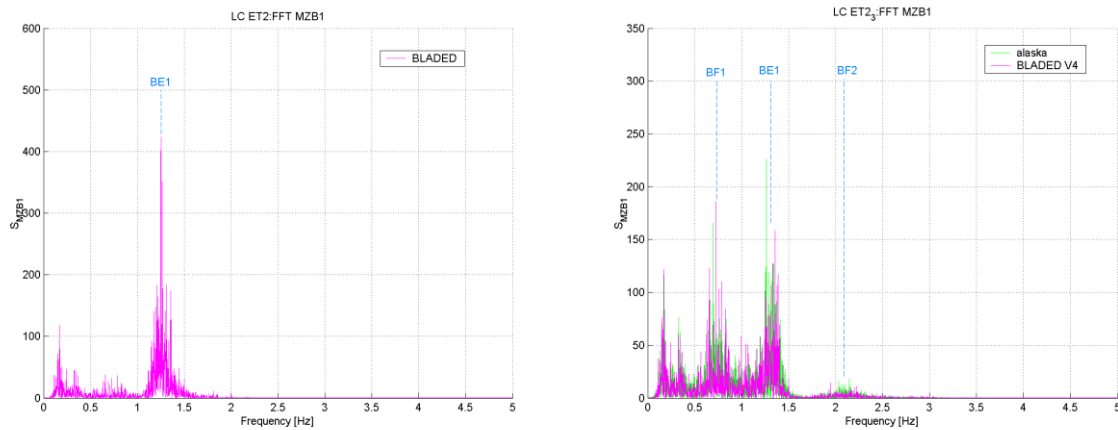
**Abb. 72 Amplitudenspektrum des Schnittmomentes an der Hauptwelle**

Die Zeitreihen der Simulationsergebnisse zeigen für den drehenden Rotor unter Einwirkung von turbulentem Wind eine gute Übereinstimmung. Während für die Beispiele mit stehendem Rotor im Amplitudenspektrum des Schlagmomentes vor allem die Out-of-plane Frequenzen dominierten, kann jetzt für den drehenden Rotor auch die In-plane Frequenz (vgl. Abb. 69) verifiziert werden. Im Amplitudenspektrum des Schlagmomentes der BLADED Simulationsrechnung dominieren Frequenzen, die nicht direkt den Blatteigenfrequenzen zuordenbar sind. Während die Modelle von alaska, FAST und FLEX5 ein vergleichbares Spektrum für das Hauptwellenmoment bei drehendem Rotor liefern, weicht das BLADED Modell davon erkennbar ab. Die fehlende Anregung von Blatteigenfrequenzen erzeugt ein entsprechend anderes Verhalten bezüglich des Triebstranges.

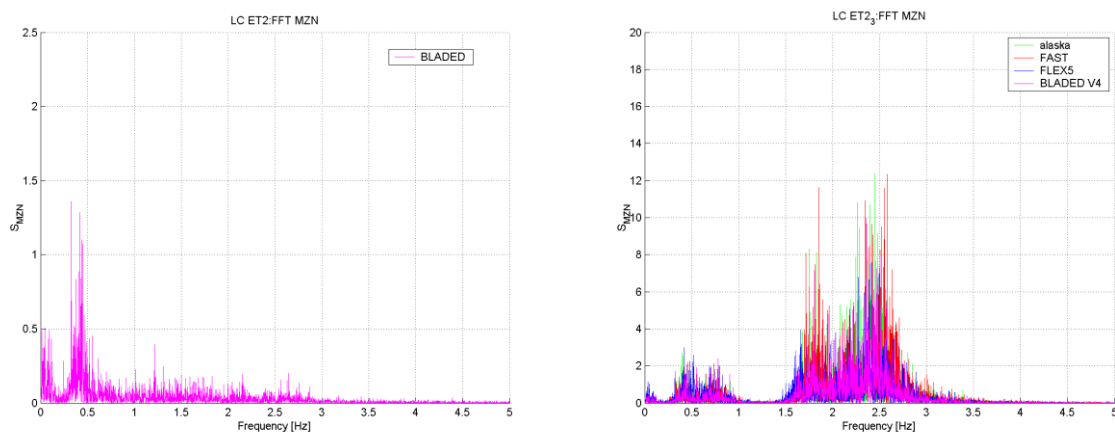
Auch an dieser Stelle soll mit dem Vergleich der Ergebnisse aus BLADED V3.82 und BLADED V4 die Möglichkeit genutzt werden, den Einfluss der unterschiedlichen Blattmodelle auf das Systemverhalten des Anlagenmodells darzustellen.



**Abb. 73 Vergleich Amplitudenspektrum Schlagmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4**



**Abb. 74 Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4**



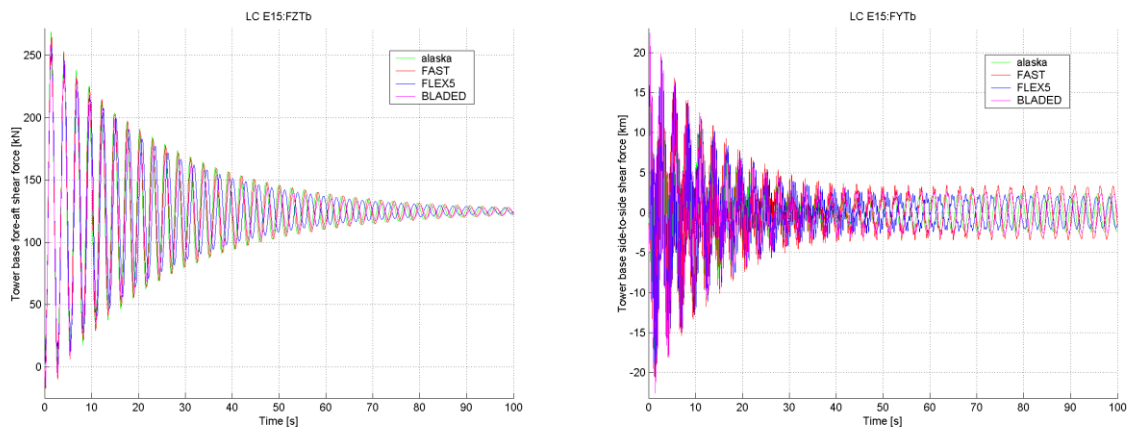
**Abb. 75 Vergleich Amplitudenspektrum Schnittmoment an der Hauptwelle für BLADED V3.82 und BLADED V4**

Die Simulationsergebnisse zeigen bei Verwendung von BLADED V4 für die Anregung mit turbulentem Wind bei einem drehenden Rotor eine sehr gute Übereinstimmung mit alaska, FAST und FLEX5.

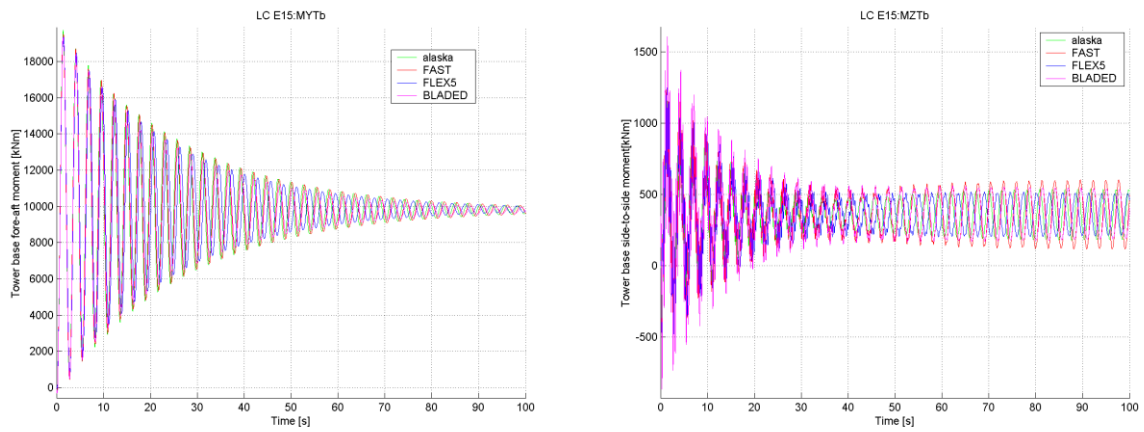
### 5.10 Windstoß auf die geparkte Anlage mit elastischem Turmmodell / Lastfall LC E15

Der Lastfall LC E15 dient dem Vergleich der Turmeigenfrequenzen des modalen Referenzturmmodells im Gesamtanlagenmodell sowie der Überprüfung von Turmfußkräften und Turmfußmomenten. Auf die Möglichkeiten der Beschreibung von elastischen Turmmodellen wurde in Abschnitt 4.5 näher eingegangen. Der Referenzturm wurde im Anlagenmodell durch 4 modale Koordinaten abgebildet. Das ist die maximal mögliche Anzahl modaler Koordinaten für die Beschreibung eines flexiblen Turmmodells in FAST und FLEX5.

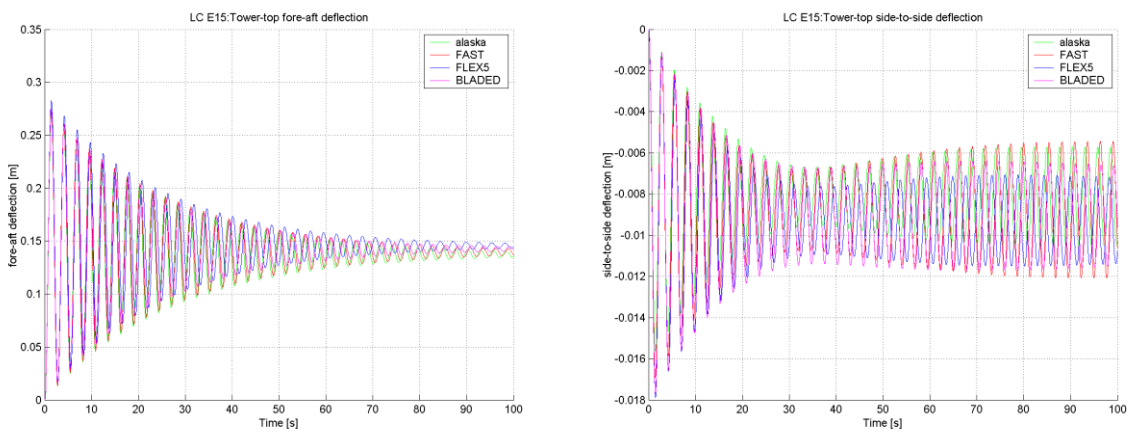
Das Anlagenmodell ist für die Simulation geparkt und mit Ausnahme der Turmfreiheitsgrade sind alle Freiheitsgrade gesperrt. Zu Beginn der Simulation wird mit Hilfe eines Windstoßes auf 25 m/s der Turm zu Schwingungen angeregt. Nachfolgend werden die Ergebnisse für diesen Einschwingvorgang am Turmfuß dargestellt.



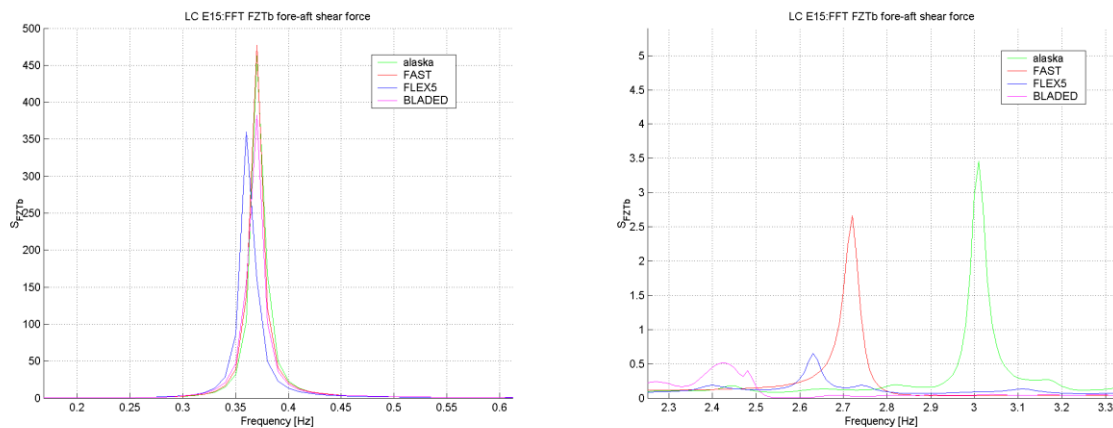
**Abb. 76 Schnittkräfte am Turmfuß**



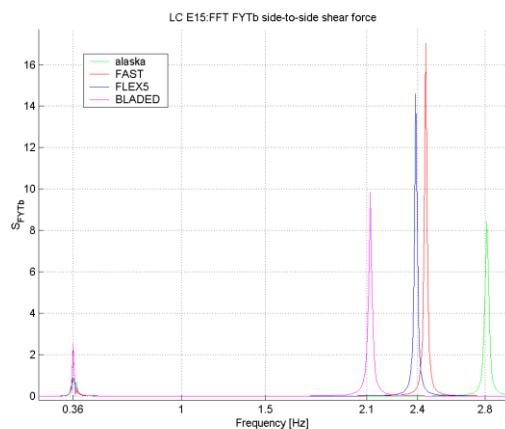
**Abb. 77 Schnittmomente am Turmfuß**



**Abb. 78 Turmkopfbewegung fore-aft und side-to-side**



**Abb. 79 Amplitudenspektrum der Schnittkraft fore-aft am Turmfuß**



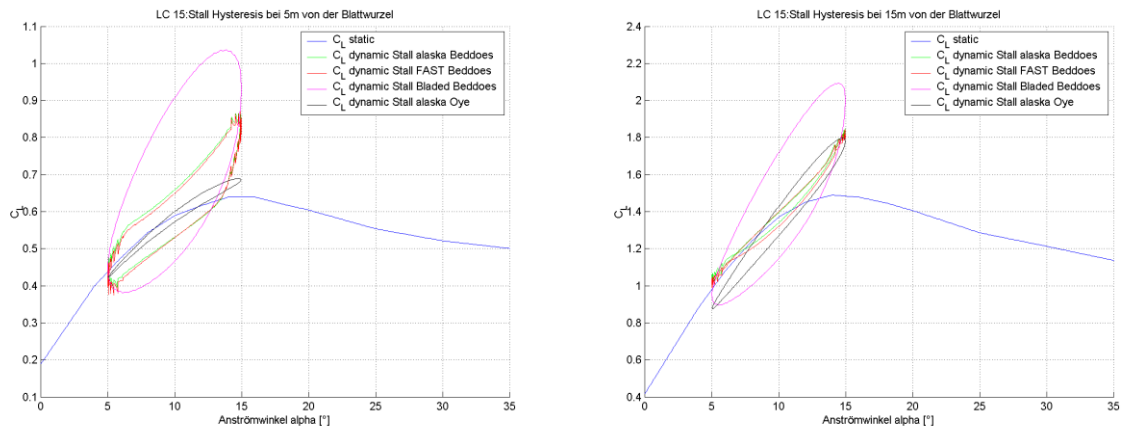
**Abb. 80 Amplitudenspektrum der Schnittkraft side-to-side am Turmfuß**

Die Ergebnisse zeigen für den Mittelwert der Turmfußkräfte und -momente sowie für das Abklingverhalten eine sehr gute Übereinstimmung. Während die jeweils ersten Turmeigenfrequenzen in fore-aft und side-to-side Richtung eine gute Übereinstimmung zeigen, gibt es bei der zweiten Turmeigenfrequenz eine gewisse Streuung. Diese Abweichungen traten so auch schon in den Ergebnissen der linearen Analyse des Gesamtmodells (vgl. Tabelle 9) auf. Da jedoch für das elastische Turmmodell mit Kopfpunktmasse eine sehr gute Übereinstimmung der Turmeigenfrequenzen (vgl. Tabelle 8) festgestellt wurde, ist die Ursache wohl im Gesamtanlagenmodell zu suchen. Für das BLADED-Modell stimmen die mit Hilfe der FFT bestimmten Turmeigenfrequenzen sehr gut mit den Werten des BLADED FE-Modells überein.

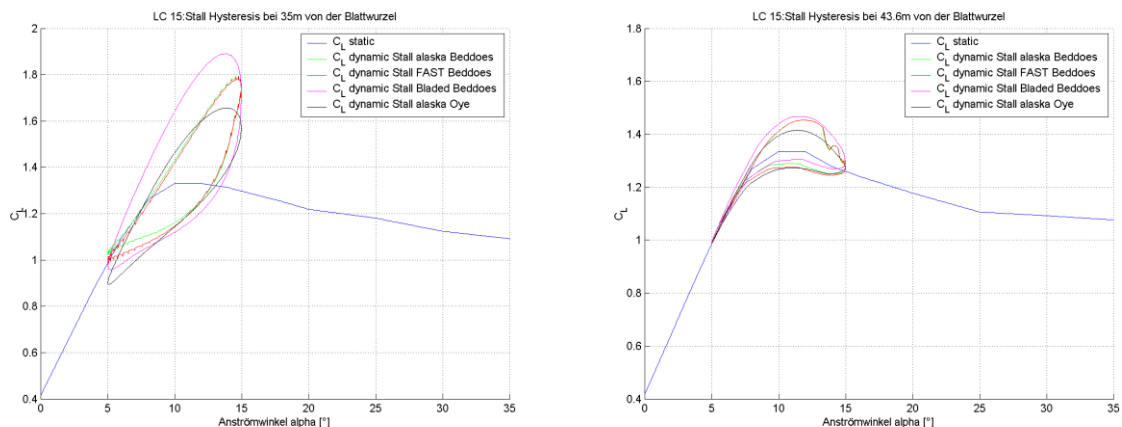
### 5.11 Zeitlich veränderlicher Anströmwinkel, Dynamic Stall / Lastfall LC 15

Der Lastfall LC 15 dient dem Vergleich der Dynamic Stall-Modelle der hier getesteten Werkzeuge. In BLADED und FAST werden Modelle nach der Theorie von Beddoes und Leishmann [3] verwendet. FLEX5 bietet ein Modell nach der Theorie von Stig Øye [4] und in alaska/Wind sind beide Modelle verfügbar. Um den Effekt des dynamischen Strömungsabrisses am Rotorblatt unabhängig von anderen aerodynamischen Effekten untersuchen zu können, wurde folgende Testumgebung realisiert. Der Rotor der Referenzanlage ist geparkt. Das Rotorblatt 1 steht parallel zur Turmachse und zeigt mit der Blattspitze in Richtung Turmfuß. Der Pitchwinkel ist  $90^\circ$ , so dass die Blattprofilsehne senkrecht zur Rotorebene steht.

Das verwendete Rotorblatt ist ungetwistet. Aufgrund des gewählten Modellaufbaus entspricht der Winkel zwischen Hauptwindrichtung und Blattprofilsehne dem Anströmwinkel an jeder Blattstation. Mit Hilfe der zeitlichen Änderung der Windrichtung (Wind-Yaw) in einem Zyklus von 2 Hz wird eine zeitliche Änderung des Anströmwinkels erreicht. Die verschiedenen Dynamic Stall-Modelle berücksichtigen den Einfluss der Anströmwinkeländerung auf den jeweiligen  $C_L$ -Wert der Blattstation.



**Abb. 81** Verlauf statischer und dynamischer  $C_L$ -Kennlinie für Blattsschnitte bei 5 m und 15 m



**Abb. 82** Verlauf statischer und dynamischer  $C_L$ -Kennlinie für Blattsschnitte bei 35 m und 43.6 m

Die dargestellten Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der dynamischen  $C_L$ -Kennlinien für das Referenzblatt in alaska und FAST. Ursachen für die Abweichungen der vom BLADED Stall-Modell erzeugten Hysteresekurven konnten nicht eindeutig gefunden werden. Eine Vermutung ist die Art der Parametrisierung des Beddoes und Leishmann Stall Modells. In FAST und alaska sind Modellparameter, die sich aus der statischen  $C_L$ -Kennlinie ergeben (Zero lift angle of attack,  $C_n$  slope for zero lift, ...), vom Nutzer bei der aerodynamischen Blattbeschreibung mit anzugeben. In BLADED werden diese Parameter intern berechnet. Eine externe Vorgabe durch den Nutzer ist nicht möglich. Auch die spätere Ausgabe der von BLADED bestimmten Parameterwerte wird nicht unterstützt. Damit konnte nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass die Modellparameter übereinstimmen.

Der Vergleich der Ergebnisse bei deaktiviertem Stall-Modell ergab für alle Tools die identischen statischen  $C_L$ -Kennlinien. Fehler in der aerodynamischen Beschreibung der Blattmo-



delle können damit ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse des Stig Øye Stall-Modells wurden nur zum Vergleich mit aufgenommen. Dieses Modell hat als Basis gleichfalls die statische  $C_L$ -Kennlinie. Jedoch unterscheidet es sich in der mathematischen Beschreibung [4].

### 5.12 Vergleich Turmschattenmodell / Lastfall LC TS1

Infolge des Vorstaueffectes kommt es im Bereich des Turmes zu einer Störung der freien Windgeschwindigkeit. Dabei nimmt die Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Turm ab und an den Rändern zu. Dieser Effekt kann mit Hilfe eines entsprechenden Turmschattenmodells abgebildet werden. Mit Hilfe des Lastfalls LC TS\_1 werden die Turmschattenmodelle verglichen. Dabei wird an einem stehenden Rotor der Azimutwinkel variiert und für ausgewählte Blattstationen die Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung verglichen. Grundlage für alle Turmschattenmodelle bildet die Potentialströmung um einen Zylinder.

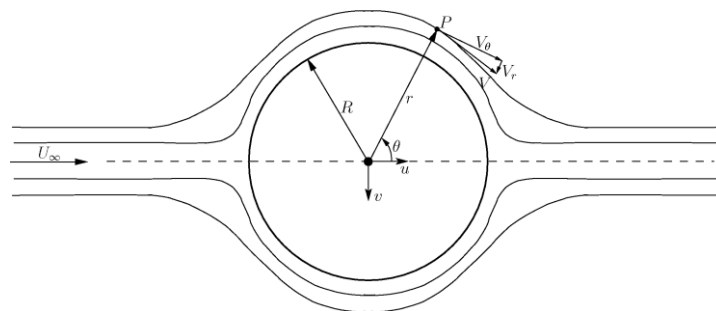


Abb. 83 Potentialströmung um einen Zylinder

In Polarkoordinaten kann für die radiale und tangential Geschwindigkeitskomponente folgendes angegeben werden.

$$V_r = U_\infty \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos(\theta)$$

$$V_\theta = -U_\infty \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin(\theta)$$

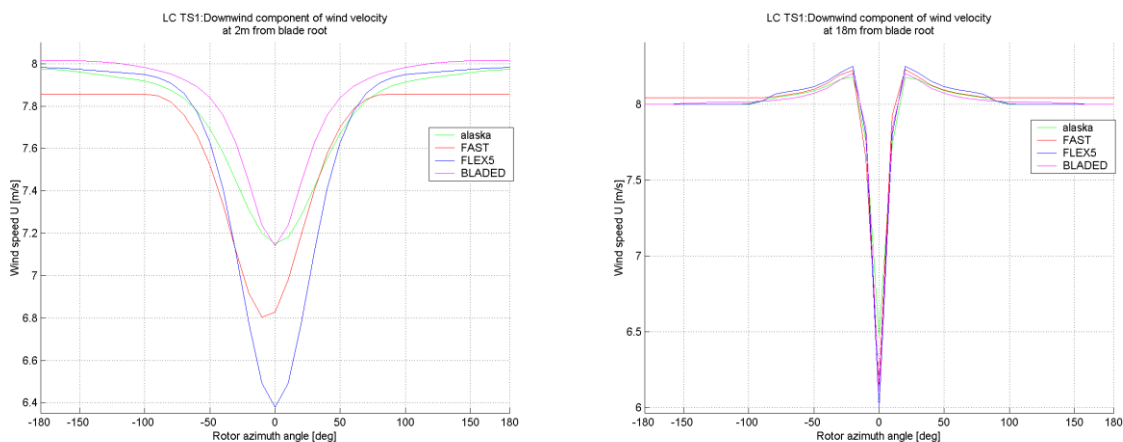
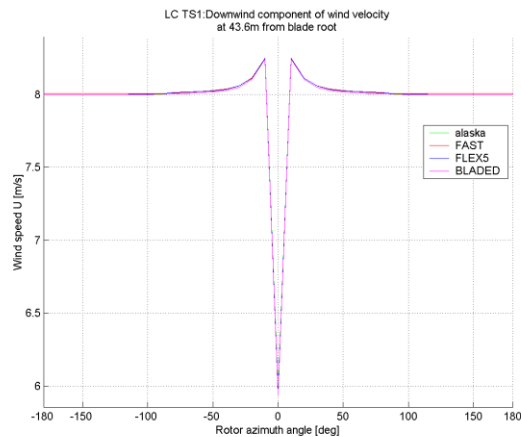


Abb. 84 Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung bei 2 m und 18 m von der Blattwurzel



**Abb. 85 Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung bei 43.6 m von der Blattwurzel**

An den außen liegenden Blattstationen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der freien Windgeschwindigkeit. In Richtung Blattwurzel entstehen zunehmend Abweichungen in den Ergebnissen. Die Ursache ist in der Methode der Korrektur des Potentialströmungsmodells des Zylinders zu suchen. Dies gilt in der oben angegebenen Form nur für den unendlichen Zylinder. In Richtung Turmkopf ist nun eine Korrektur erforderlich die berücksichtigt, dass der Turm eine endliche Höhe besitzt. Dabei verwenden die Werkzeuge unterschiedliche Methoden, die in der Folge zu den hier dargestellten Abweichungen führen.

## 6 Turbulenzfeldsimulation

Für die Simulation eines Anlagenmodells mit turbulentem Wind muss ein entsprechendes 3D-Windfeld vorliegen. Dies kann aus Messungen stammen oder mit Hilfe sogenannter Windfeldsimulatoren generiert werden. Im Weiteren sollen die Ergebnisse der verschiedenen Windfeldsimulatoren, die auf dem gleichen stochastischen Modell (IEC Kaimal, Turbulenzklasse A) beruhen, verglichen werden.

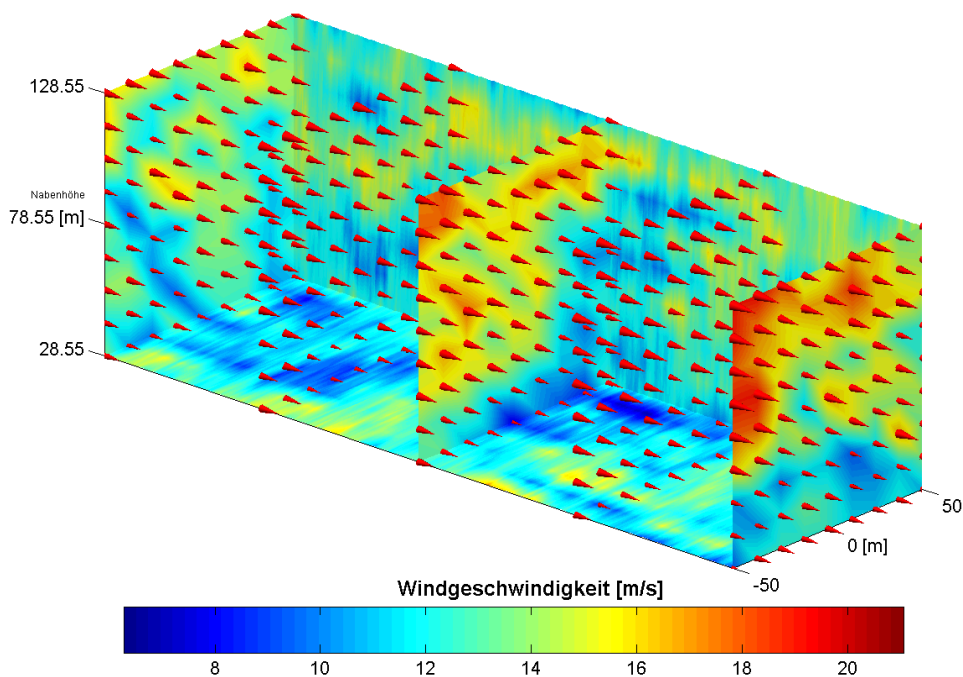


Abb. 86 Beispiel für ein Windfeld erzeugt mit WindSim

### 6.1 Vergleich synthetischer Windfelder für das Kaimal Spektrum / Lastfall LC T1

Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf des Frequenzspektrums des synthetischen Windfeldes für einen ausgewählten Gitterpunkt. Als Gitterpunkt wurde jeweils der Punkt verwendet, der den Startpunkt für das Modell darstellt. Damit wird sichergestellt, dass sich das Ausgangsspektrum nach Kaimal direkt im Ergebnis wiederfinden lässt. Mit der Beschränkung auf einen ausgewählten Gitterpunkt spielt es auch keine Rolle, dass Vindsim7 (FLEX5) ein Kreisgitter erzeugt während die anderen Windfeldsimulatoren ein Rechteckgitter generieren.

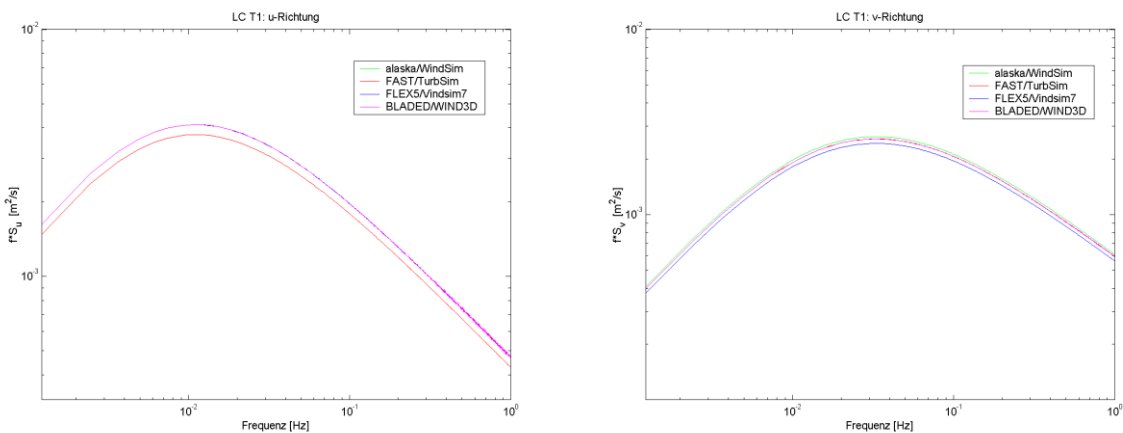
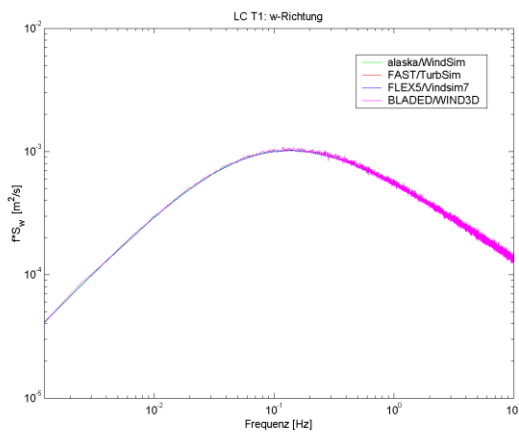


Abb. 87 Geschwindigkeitsspektren für u-, v-Richtung



**Abb. 88 Geschwindigkeitsspektrum für w-Richtung**

Die Abbildungen zeigen eine gute Übereinstimmung der Spektren für die drei verschiedenen Windgeschwindigkeitskomponenten. Bei entsprechend richtiger Parametrisierung ist es möglich, turbulenten Wind mit gleichen stochastischen Eigenschaften zu generieren.

## 7 Rechenzeitvergleich

Um eine quantitative Einordnung bzgl. der Rechenzeit bei Lastsimulation mit dem MKS-Tool alaska vornehmen zu können, wurde für ausgewählte Lastfälle die CPU-Zeit erfasst. Der Rechenzeitvergleich erfolgte auf einer HP Workstation mit einem Doppelkernprozessor mit 2 GHz und 8 GB RAM. Die Lastsimulation wurde für alaska, FAST und FLEX5 ohne grafische Benutzeroberfläche als Konsolenanwendung ausgeführt. Für BLADED gibt es aktuell keine Konsolenanwendung. Die CPU-Zeiten konnten für die BLADED Simulationen deshalb nur unter Verwendung der Benutzeroberfläche erfasst werden. Sie sind damit nicht sehr aussagekräftig und wurden nur der Vollständigkeit halber angegeben!

**Tabelle 10: CPU-Zeit Vergleich für ausgewählte Lastfälle**

LC Id	Simulationszeit [s]	CPU - Zeit [s]			
		alaska	BLADED 3.82 / 4	FAST	FLEX5
5	300	30.4	104 / 156	13.7	13.9
ET1	640	84.9	170 / 216	33.6	30.5
ET2	640	106	223 / 387	33.8	31.3
T2	640	62.2	224 / 331	31.2	30.5

Beim Rechenzeitvergleich zeigen sich die erwarteten Vorzüge der zugeschnittenen Werkzeuge. Infolge der fest implementierten Modellgleichungen ist zu Beginn der Simulation nur deren Parametrisierung notwendig und sämtliche Resultate werden fest vordefiniert im Code berechnet. Demgegenüber werden in alaska die Modellgleichungen für das frei modellierbare Strukturmodell in jedem Rechenschritt numerisch generiert und die im Modell frei definierbaren Resultate interpretativ berechnet. Weiterhin bringen die in Abschnitt 4 angegebenen Modellvereinfachungen wie zum Beispiel die Vernachlässigung von Trägheitstermen und die fehlende modale Kopplung in den flexiblen Strukturen Einsparungen in der Rechenzeit. Das zeigt unter anderem der Vergleich von Lastfall LC T2 und LC ET2 sehr deutlich. Hier ist der Einfluss auf die Rechenzeit bei Verwendung flexibler Strukturen in den zugeschnittenen Werkzeugen gering im Unterschied zu der Erhöhung von ca. 20% in alaska.

Was den Vergleich der Performance betrifft, so sind die zugeschnittenen Werkzeuge einem allgemeinen MKS-Tool überlegen. Beide Methoden haben ihre Berechtigung und sind je nach Anwendungsfall bzw. Problemstellung entsprechend auszuwählen.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurde die Bibliothek alaska/Wind umfassend mit Hilfe von Vergleichsrechnungen anerkannter Tools wie BLADED, FAST und FLEX5 getestet. Grundlage des Tool-zu-Tool-Vergleiches bildete ein einheitliches Maschinenmodell einer modifizierten Anlage der Firma Nordex vom Typ N90. Die Studie zeigt eine sehr gute Übereinstimmung bei den aerodynamischen Lasten mit kleineren Abweichungen bei einzelnen aerodynamischen Effekten wie z.B. dem dynamischen Strömungsabriss oder der Schräganströmung. Die Ursachen der Abweichungen liegen in den unterschiedlichen verwendeten Theorien. Erwartete Differenzen gibt es in den strukturdynamischen Eigenschaften des Anlagenmodells. Hier treten Unterschiede, bei der Berücksichtigung von Strukturkräften infolge von Vereinfachungen in den fest implementierten Modellgleichungen (BLADED, FAST, FLEX5) im Vergleich zu dem frei modellierbaren Mehrkörpermodell in alaska, auf. Sind die Unterschiede bei einem starren Anlagenmodell im stationären Betrieb noch recht gering, so gibt es bei Verwendung von elastischen Strukturen doch teilweise erhebliche Abweichungen. Deren Ursache liegt überwiegend an der Umsetzung der modalen Blattmodelle. Während in alaska alle 6 Blattfreiheitsgrade durch die modale Blattbeschreibung berücksichtigt werden, finden in BLADED, FAST und FLEX5 nur Biegefreiheitsgrade Berücksichtigung.

Zum Abschluss des Validierungsberichtes, bestand die Möglichkeit die neue Multibody Dynamics V4 Version von BLADED zu nutzen. Dabei zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen im strukturdynamischen Verhalten der MKS-Blattmodelle von alaska und BLADED V4.

Die Validierung zeigt die Eignung des Mehrkörpersimulationswerkzeuges alaska und der Bibliothek alaska/Wind für die Lastberechnung von Windkraftanlagen mit horizontalem Triebstrang. Die mit alaska/Wind ermittelten Lasten können für aktuelle Zertifizierungsrechnungen verwendet werden. Gerade bei der Entwicklung neuer Konzepte, z.B. zur aktiven Schwingungsdämpfung, ist die Verwendung von frei modellierbaren Mehrkörpermodellen zu empfehlen. Deren Vorteil liegt in der Möglichkeit der detaillierteren Umsetzung des Strukturmodells und den damit bestimmbaren Systemantworten.

## A Anhang

### A 1 Beschreibung der Lastfallnotation

Bezeichnung für Lastfall ID des Lastfalls

**Abb. 89 Lastfallnotation**

Die Abbildung zeigt das für die Validierung verwendete Beschreibungsformat der Lastfälle. Dabei kennzeichnet LC allgemein den Lastfall und ID charakterisiert die zugehörige Lastfallgruppe. Auf der Grundlage der Eigenschaften des Anlagenmodells, der Aerodynamikmethoden und der aktuellen Umgebungsbedingungen erfolgt eine Einteilung der Lastfälle in acht verschiedene Lastfallgruppen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Lastfallgruppen wird im Abschnitt A 2 vorgenommen. In der Lastfall-ID werden neben einer fortlaufenden Nummerierung auch Buchstaben verwendet. Deren Bedeutung erklärt die folgende Übersicht.

**Tabelle 11: Übersicht zur Bedeutung verwendeter ID-Bezeichner**

ID-Buchstabe	Beschreibung
	starres Anlagenmodell, Lastfälle aus den Lastfallgruppen I, II, III, IV
E	Anlagenmodell mit elastischen Blättern oder Turm, Lastfälle aus der Lastfallgruppe I Elastic
S	Lastfälle mit deaktivierter Windkraftberechnung, Lastfälle aus der Lastfallgruppe I Structure

ET	Anlagenmodell mit elastischen Blättern oder Turm unter turbulentem Wind, Lastfälle aus der Lastfallgruppe I ElasticTurb
----	---

## A 2 Übersicht der Validierungslastfälle

Tabelle 12: Lastfalldefinition LCGroup I Structure

LC Id	Turbine Model											Simulation Control	
	Aerodynamic Forces	Linearized Model	Gravity	Rotor DOF	Blade DOF 2 Flap, 1 Edge	Tower DOF 2 side-to-side 2 fore-aft	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	Time Step	T <sub>total</sub>
	on/off	on/off	on/off	on/off	on/off	on/off	controlled/ fixed	controlled/ fixed	[rpm]	on/off	[rpm]	[s]	[s]
S1	off	off	off	on	off	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	0.02	60
S2	off	off	off	off	off	off	controlled	fixed, 0°	0	off	-	0.02	60
S3	off	off	off	off	off	off	fixed, 0°	controlled	0	off	-	0.02	60
S4	off	on	off	off	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	-	0.02	0
S5	off	on	off	off	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	-	0.02	0

Die Lastfälle aus LCGroup I Structure dienen der Validierung des Strukturmodells der Referenzanlage für die verwendeten Tools. Dabei liegt das Augenmerk auf dem Abgleich von Masseparametern der verschiedenen Modellkomponenten sowie der Validierung der elastischen Blatt- und Turmmodelle. Zusätzlich werden mögliche Vereinfachungen im mechanischen Modell und deren Auswirkung auf Ergebnisgrößen untersucht.

**Tabelle 13: Lastfalldefinition LCGroup I**

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model						Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	$v_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	controlled/ fixed	controlled/ fixed	[rpm]	on/off	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	8	0°	off	0.02	60
3	EqI	None	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	var 1	0°	off	0.02	100
4	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	var 1	0°	off	0.02	300
5	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	8	0°	off	0.02	300
7	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	8	off	var 3	0°	off	0.02	500
8	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	8	off	var 4	0°	off	0.02	350

Die Lastfälle aus LCGroup I simulieren die starre Referenzanlage mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten bei arretiertem und freiem Rotor.

**Tabelle 14: Lastfalldefinition LCGroup II**

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model						Wind			Simulation Control		
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	$v_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	controlled/ fixed	controlled/ fixed	[rpm]	on/off	[rpm]	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
4_1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	var 1	0°	off	0.02	300
5_1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	8	0°	off	0.02	300
7_1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	8	on	15	var 3	0°	off	0.02	500
8_1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	8	on	15	var 4	0°	off	0.02	350



In LCGroup II werden die Lastfälle 4-8 aus LCGroup I mit einer stationären Rotordrehzahl simuliert. Dabei beschleunigt die Anlage auf die ausgewählte Soll-drehzahl (Demanded Rotor Speed) und wird mit Erreichen dieser durch den Generator (PI-Drehzahlregler) stationär gehalten. Das erforderliche Lastmoment des Generators ist ein äquivalentes Maß für die aerodynamischen Kräfte am Rotor. Die verschiedenen Methoden der Aerodynamik lassen sich so frei von dynamischen Einflüssen des Strukturmodells vergleichen.

Tabelle 15: Lastfallddefinition LCGroup III

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	$v_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	controlled/fixed	controlled/fixed	[rpm]	on/off	[rpm]	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
9	EqI	None	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 10°	fixed, 0°	0	off	-	8	20°	off	0.02	60
10	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	12	8	20°	off	0.02	200
11	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	12	8	40°	off	0.02	200
12	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	6	8	60°	off	0.02	200
13	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	1	8	80°	off	0.02	200
14	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	off	-	8	var1	off	0.02	320

Mit Hilfe der Lastfälle aus LCGroup III wird die Schräganströmungskorrektur validiert. Es wird verglichen, welchen Einfluss eine konstante bzw. variable Schräganströmung auf den Rotor hat und wie dieser Effekt von den verschiedenen Tools berücksichtigt wird.

Tabelle 16: Lastfalldefinition LCGroup IV

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model						Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	$V_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	controlled/ fixed	controlled/ fixed	[rpm]	on/off	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
15	EqI	Bed	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 90°	fixed, 0°	0	off	60	var1	off	0.001	6
15_1	EqI	Oye	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 90°	fixed, 0°	0	off	60	var1	off	0.001	6
16	EqI	Bed	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 90°	fixed, 0°	0	off	60	var2	off	0.001	6
16_1	EqI	Oye	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 90°	fixed, 0°	0	off	60	var2	off	0.001	6

Mit Hilfe der Lastfälle aus LCGroup IV wird der Effekt des dynamischen Strömungsabrisses am Rotorblatt untersucht. Verglichen werden die Ergebnisse des Beddoes-Leishmann [3] und des Stig Øye [4] Stall Modells für die verschiedenen Tools. Die dafür notwendige schnelle zeitliche Änderung des Anströmwinkels wird durch eine Windrichtungsänderung (YawErr) bei arretiertem Rotor realisiert. Verglichen werden die sich ergebenden dynamischen CL-Kennlinien für ausgewählte Blattstationen.

Tabelle 17: Lastfalldefinition LCGroup I Elastic

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model										Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Blade DOF 2 Flap, 1 Edge	Tower DOF 2 side-to-side 2 fore-aft	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	$v_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$	
	Eq/ GDW	None/ Bed/Oye	on/ off	on/ off	None/ Log/Exp	[s]	on/off	on/off	on/off	on/off	controlled/ fixed	controlled/ fixed	[rpm]	on/off	[rpm]	const/ var [m/s]	const/ var	[on/off]	[s]	[s]	
E1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	off	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	-	8	0°	off	0.02	300	
E3	Eq	None	on	off	None	0.02	off	off	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	-	var1	0°	off	0.02	300	
E4_1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	var2	0°	off	0.02	300	
E5_1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	8	0°	off	0.02	300	
E7_1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	on	off	fixed, 0°	fixed, 0°	8	on	15	var3	0°	off	0.02	500	
E8_1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	on	off	fixed, 10°	fixed, 0°	8	on	15	var4	0°	off	0.02	350	
E15	Eq	None	on	off	None	0.02	off	off	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	-	var5	0°	off	0.02	100	

In LCGroup I Elastic werden die Lastfälle aus LCGroup II mit einem elastischen Blattmodell oder einem elastischen Turmmodell simuliert. Untersucht wird der Einfluss auf das Gesamtsystemverhalten bei Verwendung elastischer Strukturen.

Tabelle 18: Lastfalldefinition LCGroup I Turb

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Blade DOF 2 Flap, 1 Edge	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	V <sub>Hub</sub>	YawErr	Turbulence	Time Step	T <sub>total</sub>
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	on/off	controlled/fixed	controlled/fixed	[rpm]	on/off	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
ET1	EqI	None	on	off	None	0.02	off	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	var1	0°	on	0.02	640
T2	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	off	fixed, 30°	fixed, 0°	11	off	var1	0°	on	0.02	640
ET2	EqI	None	on	off	None	0.02	off	on	on	fixed, 30°	fixed, 0°	11	off	var1	0°	on	0.02	640

In LCGroup I Turb wird das Gesamtsystemverhalten bei Simulation mit turbulentem Wind untersucht.

Tabelle 19: Lastfalldefinition LCGroup I TurbSim

LC Id	Aerodynamics											Simulation Control	
	Turbulence Model	Mean Wind Speed	Turbulence Intensity	Wind Shear	Grid Width	Grid Height	Reference Height	Hub Height	Grid Points vertical	Grid Points horizontal	Turbulence Seed	Time Step	T <sub>total</sub>
		[m/s]	[%]	[on/off]	[m]	[m]	[m]	[m]				[s]	[s]
T1	Kaimal	15	18	off	100	100	78.55	78.55	9	9	13	0.05	819.2

Der Lastfall LC T1 aus LCGroup I TurbSim dient dem Vergleich der Windfeldsimulatoren WindSim, TurbSim, Vindsim7 und WIND3D. Für den Vergleich wurde das Kaimal Spektrum simuliert. Die dafür notwendigen Modellparameter sind im Lastfall LC T1 angegeben.

Tabelle 20: Lastfalldefinition LCGroup I TS

LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Rotor Azimuth	Generator / Motor	$v_{Hub}$	YawErr	Turbulence	Time Step	$T_{total}$
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	controlled/fixed	controlled/fixed	[rpm]		on/off	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
TS1	EqI	None	on	on	None	0.02	off	off	fixed, 0°	fixed, 0°	0	0° - 360°	off	8	0°	off	0.02	2

Mit Hilfe des Lastfalls LC TS1 aus LCGroup I TS werden die Turmschattenmodelle verglichen. Dabei wird an einem stehenden Rotor der Rotor-Azimuthwinkel variiert und für ausgewählte Blattstationen die Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung verglichen.

**Tabelle 21: Übersicht zur Bedeutung verwendeter Modell- und Lastfallbezeichnungen**

	Bezeichnung	Bedeutung
<b>Aerodynamics</b>	Wake Modell	beschreibt das verwendete Modell zur Berechnung des induzierten Windfeldes, EqI ... Blattelementmethode "Equilibrium Wake" GDW ... Dynamik-Inflow-Modell
	Dynamic Stall	beschreibt das verwendete Modell zur Berücksichtigung des dynamischen Strömungsabrisses am Rotorblatt None ... dynamischer Stall deaktiviert Bed ... Modell nach Beddoes-Leishmann Oye ... Modell nach Stig Oye
	Tip Loss Modell	Modell zur Korrektur der Windgeschwindigkeit an der Blattspitze, alaska/Wind verwendet ein Modell nach Prandtl das bei Verwendung einer Blattelementmethode immer aktiv ist
	Tower Shadow	Potentialströmungsmodell, berücksichtigt die Änderung der freien Windgeschwindigkeit in Folge des Vorstau-effektes am Turm
	Wind Shear Modell	Modell zur Berücksichtigung eines Windgradienten None ... kein höhenabhängiges Windprofile, Windgeschwindigkeit über dem Anlagenbereich konstant Log ... logarithmisches Windprofile wird verwendet Exp ... exponentielles Windprofile wird berücksichtigt
	Eval Time Step	äquidistante Zeitschrittweite für diskrete Windkraftberechnung
<b>Wind</b>	$v_{Hub}$	Geschwindigkeit auf Nabenhöhe const ... konstanter Wert var ... variabler Wert der über eine Zeitreihe eingelesen wird
	YawErr	Gierfehler, d.h. Schräganströmung const ... konstanter Winkel für die Schräganströmung var ... variabler Winkel für die Schräganströmung aus einer Zeitreihe eingelesen
	Turbulence	Turbulenz on ... der mittleren Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird turbulenter Wind überlagert off ... Simulation ohne turbulenten Wind

<b>Turbine Model</b>	Gravity	Berücksichtigung der Schwerkraft im Anlagenmodell
	Rotor DOF	Rotor off ... arretiert on ... frei drehbar
	Blade DOF	flexibles Blattmodell off ... starres Blatt on ... flexibles Blatt, 3 modale Koordinaten (2 flap- , 1 edgewise Mode)
	Tower DOF	flexibles Turmmodell off ... starrer Turm on ... flexibler Turm, 4 modale Koordinaten (2 fore-aft , 2 side-to-side Moden)
	Pitch	Pitchaktuator fixed ... fixiert auf konstanten Winkel controlled ... durch Regler gesteuert
	Yaw	Yawaktuator fixed ... fixiert auf konstanten Winkel controlled ... durch Regler gesteuert
	Rotor IC	Anfangsgeschwindigkeit am Rotor
	Generator / Motor	Modell eines Generators oder Motors am Abtrieb. Befindet sich die Anlage im Motorbetrieb, dann fungiert der Motor als Drehzahlregler und stellt die geforderte Rotordrehzahl ein.
	Demanded Rotor Speed	Sollgeschwindigkeit am Rotor Wird verwendet wenn die Anlage im Motorbetrieb läuft. Es gibt dabei zwei mögliche Modi. Die Anlage wird direkt vom Motor auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt oder mit Erreichen der Sollgeschwindigkeit auf dieser gehalten.
	<b>Simulation Control</b>	Time Step
Ttotal		Simulationszeit

### A 3 Übersicht zu den Programmfunktionalitäten

Tabelle 22: Matrix der Programmfeatures

Simulation Codes		alaska/Wind	BLADED	FAST	FLEX5
Simulation Control	Simulation im Zeitbereich	x	x	x	x
	Integratorauswahl	x			
	Schrittweitensteuerung	x	x	x	x
	linearisiertes Modell	x	x	x	?
	Batch-Betrieb	x	x	x	x
Aerodynamik	Blattelementmethode	x	x	x	x
	Dynamic-Inflow-Modelle	x	x	x	x
	axiale u. tangentielle Induktion	x	x	x	x
	Dynamik Stall Modell	x	x	x	x
	Wind Shear Modell	x	x	x	x
	Tower Shadow	x	x	x	x
	Nabenverluste		x	x	?
	Blattspitzenverluste	x	x	x	x
Strukturmodell	begrenzte Anzahl von Modellfreiheitsgraden		x	x	x
	modellierbares Mehrkörpermodell	x			
	2 oder 3 Blätter pro Nabe	x	x	x	x
	flexible Blätter	x	x	x	x
	flexibler Turm	x	x	x	x
Blattmodell	modale Beschreibung	x	x	x	x
	wahlweise flexibel oder starr	x	x	x	x
	Dynamic Stiffening Effekt	x	x	x	x
	modale Kopplung aller 6 Freiheitsgrade	x			
	Zusatzmassen	x	x	x	x
Turmmodell	modale Beschreibung	x	x	x	x
	wahlweise flexibel oder starr	x	x	x	x



	Luftwiderstand	x	x	x	x
	Wasserwiderstand	x	x	x	x
	Zusatzmassen	x	x	x	x
Antriebsstrangmodell	optional mit oder ohne Torsionsfreiheitsgrad	x	x	x	x
	flexible langsame und schnelle Welle	x	x	x	x
	Mehrkörpermodell (beliebig modellierbare Triebstrangstruktur)	x			
	optional flexible oder starre Getriebelagerung	x	x		
	Bremsenmodell	x	x	x	x
Anlagen- steuerung	DLL Regler-Interface	x	x	x	
	Matlab Simulink-Interface	x		x	
	Matlab Real Time Workshop-Interface	x			

## Literaturverzeichnis

[1] Moser, W., Taubert, M., Wulf, H.O.: Ergebnisse Validierungsrechnung alaska/Wind mit BLADED, FAST und FLEX5, Institut für Mechatronik, Chemnitz April 2011, Online im Internet:

URL: [http://www.ifm-chemnitz.de/produkte-html/alaWind\\_Downloads.html](http://www.ifm-chemnitz.de/produkte-html/alaWind_Downloads.html)

[Stand 2011-29-04]

[2] Suzuki, A.: Application of Dynamic Inflow Theory to Wind Turbine Rotors (Dissertation), Department of Mechanical Engineering, University of Utah, Salt Lake City 2000

[3] Beddoes, T.S., Leishmann, J.G.: A Semi-Empirical Model for Dynamic Stall, Journal of the American Helicopter Society, July 1989

[4] Øye, S.: Dynamic Stall simulated as time lag of separation by Stig Øye, Department of Fluid Mechanics Technical University of Denmark

[5] NWTTC Design Codes (FAST by Jason Jonkman, Ph.D.), Online im Internet:

URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/> [Stand 2010-05-11]

[6] NWTTC Design Codes (AeroDyn by Dr. David J. Laino), Online im Internet:

URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn/> [Stand 2010-31-03]

[7] Manjock, A., Design Codes FAST and ADAMS for Load Calculations of Onshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Hamburg Mai 2005

[8] NWTC Design Codes (BModes by Gunjit Bir), Online im Internet:

URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/bmodes> [Stand 2008-20-03]

[9] Hansen, M.O.L.: Aerodynamics of Wind Turbines Application (Second Edition), Earthscan in the UK, London 2008

[10] Moriarty, P.J., Hansen, A.C.: AeroDyn Theory Manual, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden Colorado 2005

[11] NWTC Design Codes (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman), Online im Internet:

URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim> [Stand 2011-03-02]

[12] Thomsen, K., Comparison of Rectangular and Polar Turbulence Formats, Risø National Laboratory, Dänemark Dezember 2005