

Ergebnisse Validierungsrechnung alaska/Wind mit BLADED, FAST und FLEX5



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



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

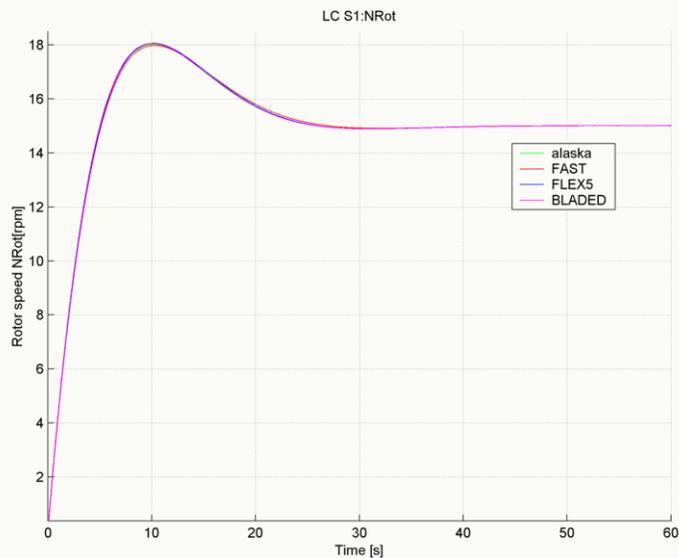
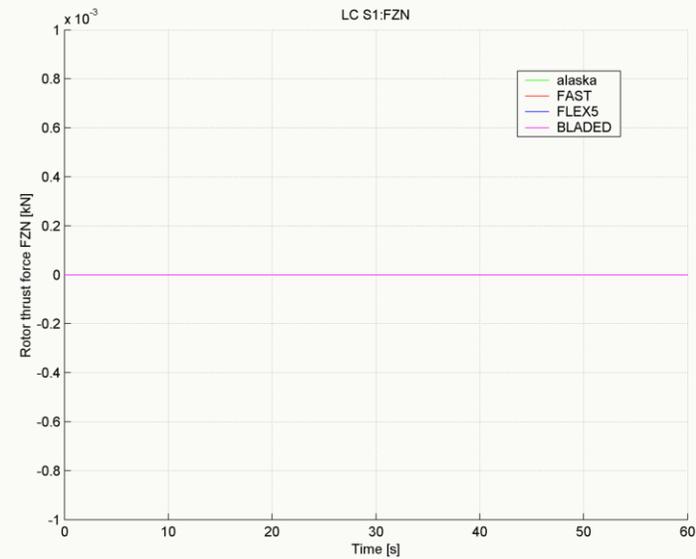
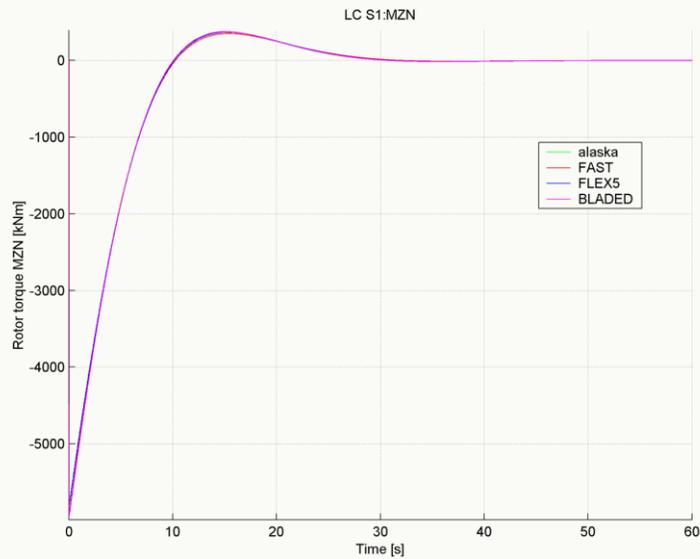
www.ifm-chemnitz.de

- Windkraft deaktiviert

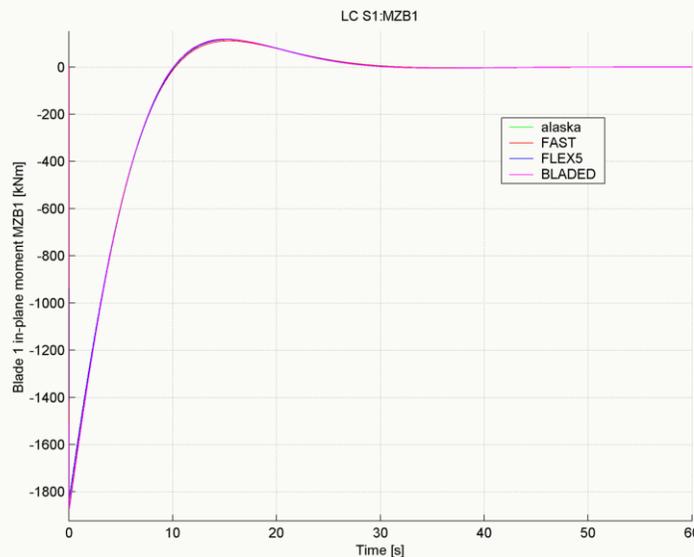
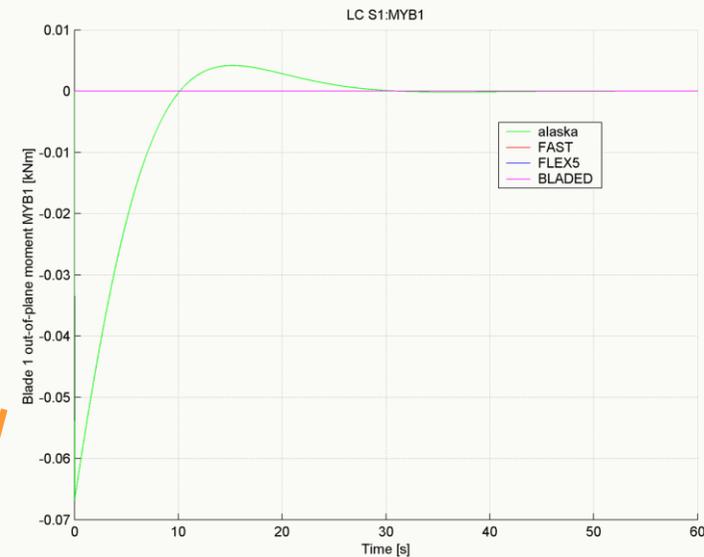
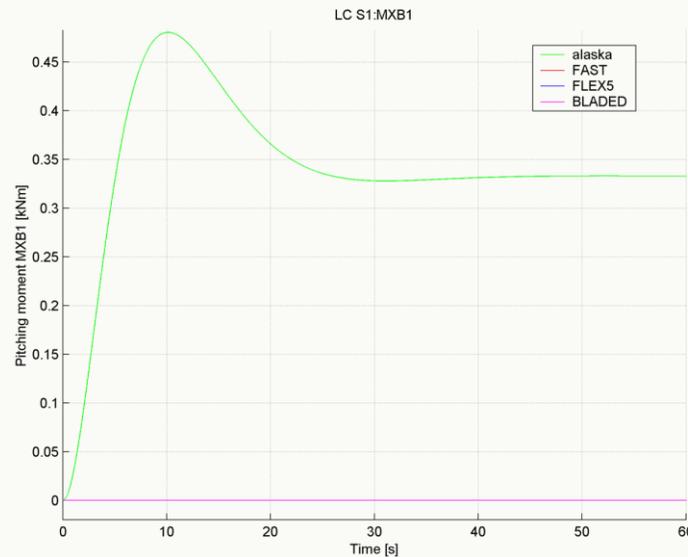
LCGroup I_Structure Strukturlastfälle

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 _{total}
	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

LCGroup I_Structure dient der Validierung des Strukturmodells. Mit Hilfe der Lastfälle S1-S3 werden die Masseparameter des Strukturmodells überprüft. Dazu wird abwechselnd an jedem Gelenk (Rotor, Pitch, Yaw) eine Sollbewegung vorgegeben und die dafür notwendigen Zwangsmomente sowie Reaktionsmomente verglichen. Die Vorgabe der Sollbewegung erfolgt über eine Regler-DLL im BLADED-Format die auch von alaska und FAST unterstützt wird. Für FLEX5 werden die Reglermodelle direkt im Quellcode umgesetzt. Mit Hilfe der Lastfälle S4 und S5 werden die elastischen Blattmodelle des Referenzblattes bzw. die elastischen Turmmodelle des Referenzturmes validiert.



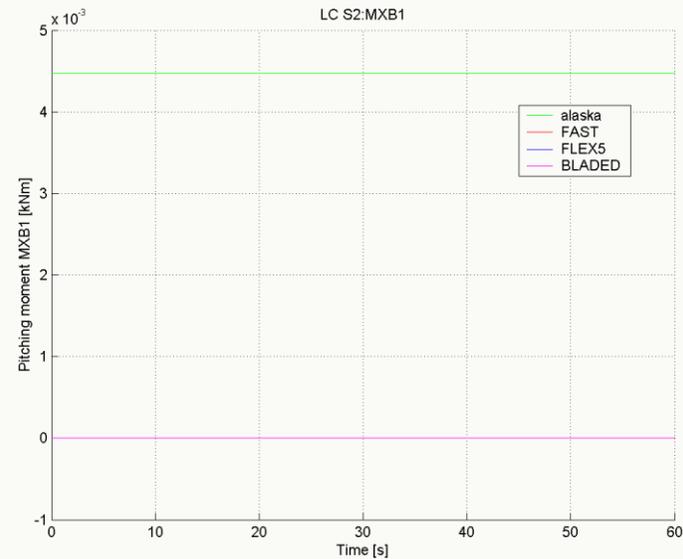
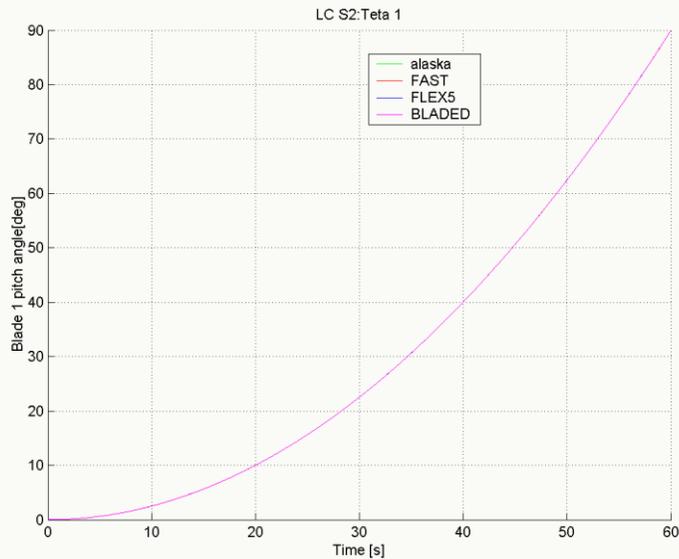
- Generator fungiert als Motor, über einen PI-Drehzahlregler wird die Rotordrehzahl von 0 auf 15 U/min eingestellt
- Im Anlagenmodell ist nur der Drehfreiheitsgrad des Rotors aktiviert



- **Abweichung von Schlag- und Pitchmoment**
- **Ursache sind Unterschiede im Strukturmodell des Blattes**
- **Vernachlässigung der Deviationsmomente an der Blattwurzel bei BLADED, FAST und FLEX5**
- **das Blatt ist in sich verdreht so dass bei 0° Pitchwinkel keine der Querschnittshauptachsen parallel zur Rotorachse liegt, es entstehen Deviationsmomente (J_{23}, J_{32}) an der Blattwurzel**

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

$$M = \begin{bmatrix} -J_{23} \cdot \omega_3^2 \\ J_{23} \cdot \dot{\omega}_3 \\ J_{33} \cdot \dot{\omega}_3 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{- Pitchmoment} \\ \text{- Schlagmoment} \\ \text{- Schwenkmoment} \end{array}$$

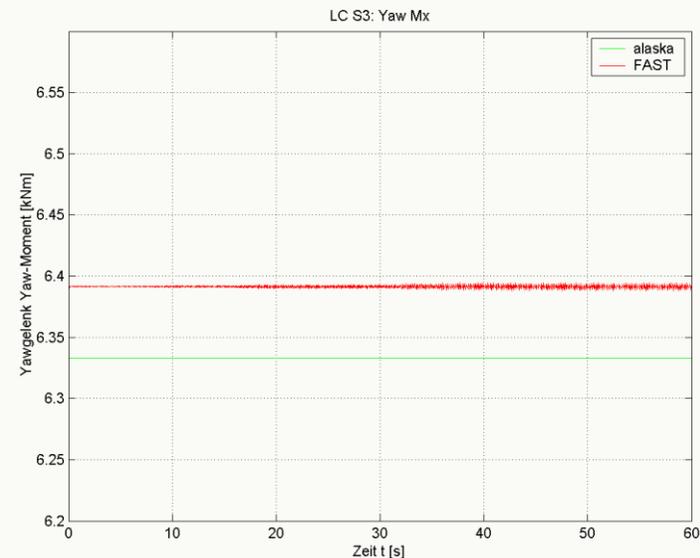
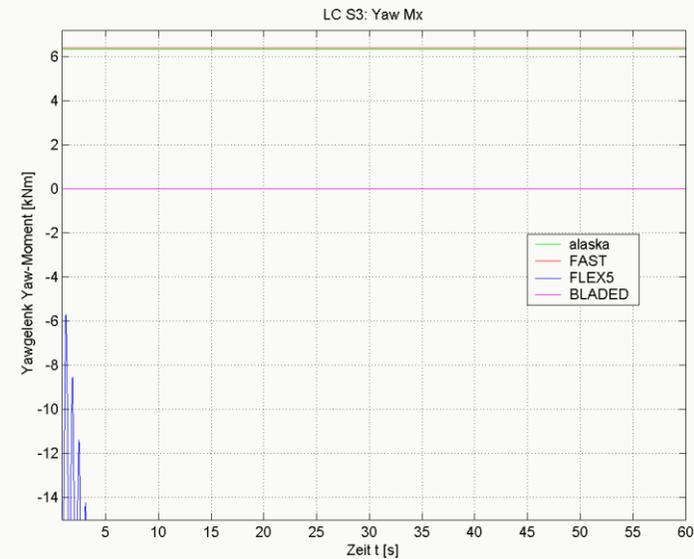
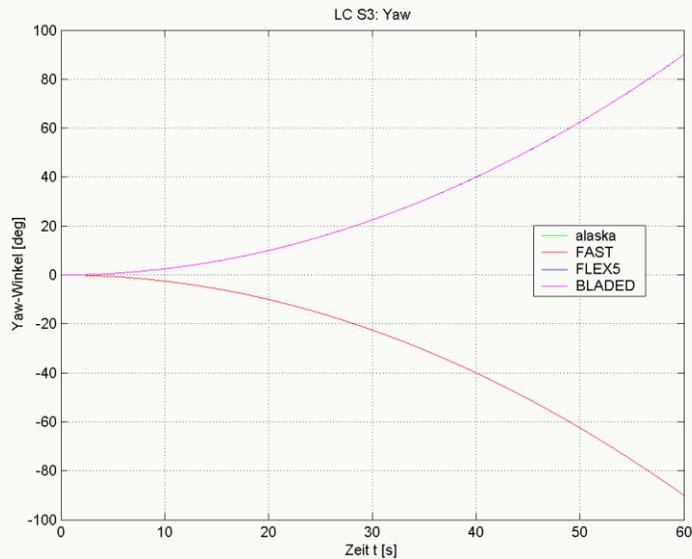


Im Lastfall LC_S2 wurde das Modell auf den Torsionsfreiheitsgrad am Pitchgelenk beschränkt. Ziel war die Überprüfung des Hauptträgheitsmomentes entlang der Blattlängsachse. Die Pitchsvorgabe wurde so umgesetzt, dass für den simulierten Zeitraum von 60 Sekunden der Pitchwinkel sich um 90° änderte und die Pitchbeschleunigung konstant blieb.

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

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

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

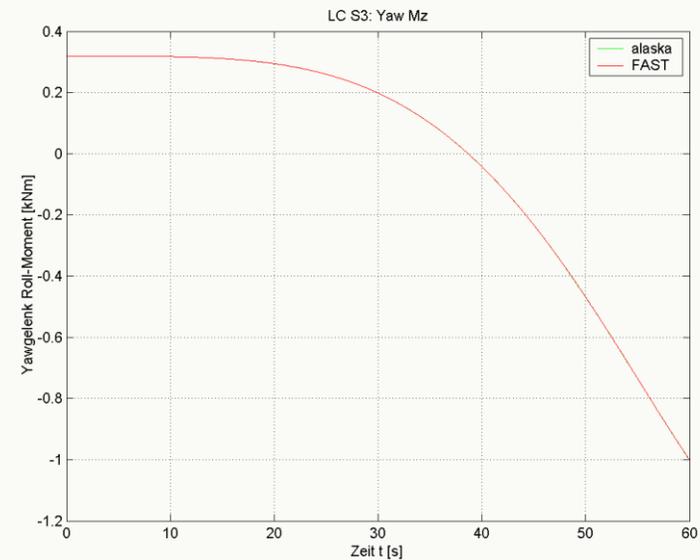
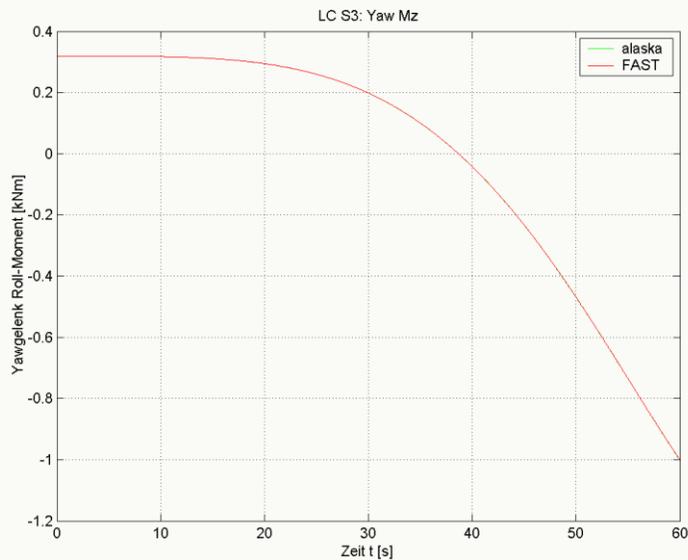
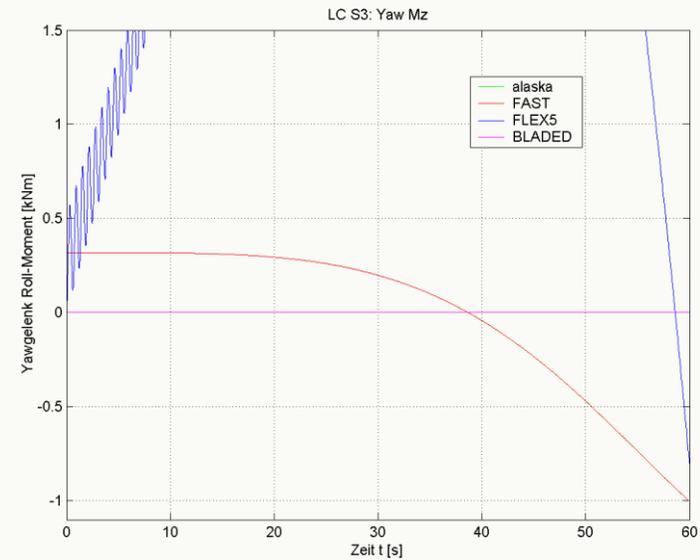
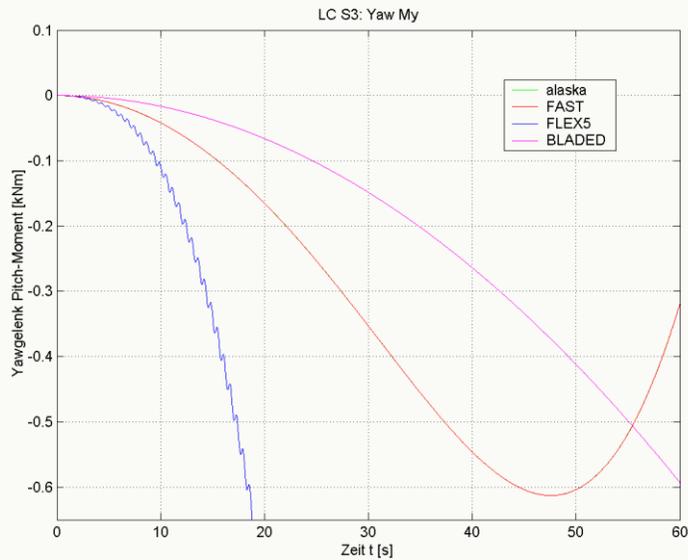


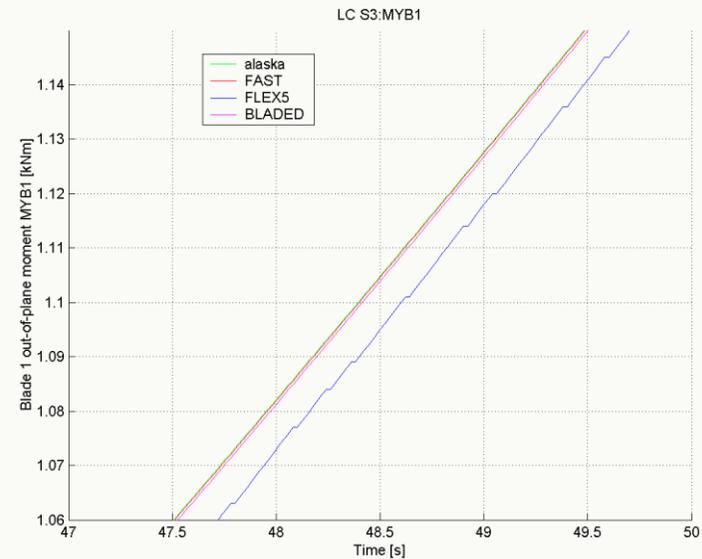
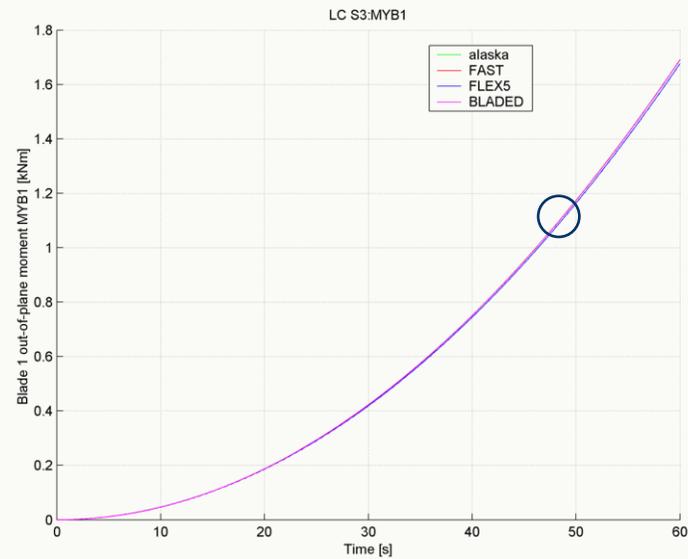
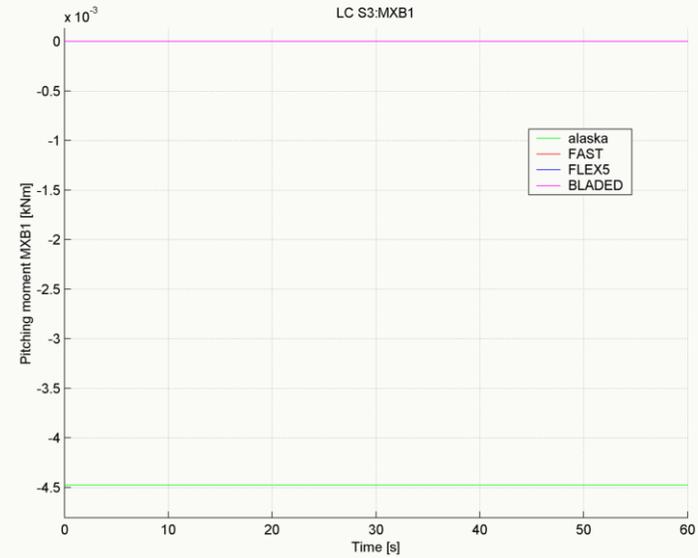
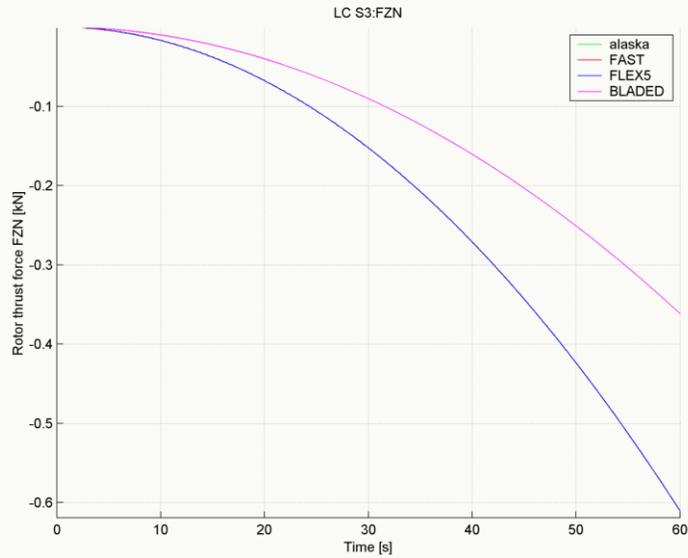
Im Lastfall LC_S3 wurde das Modell auf den Torsionsfreiheitsgrad am Yawgelenk beschränkt. Ziel war die Überprüfung der drei Reaktionsmomente (Yaw, Pitch, Roll) am Yawgelenk in Folge einer konstanten Yawbeschleunigung um die Turmlängsachse. Die Yawregelung wurde identisch zu Lastfall LC_S2 umgesetzt. Die konsistenten Vorgaben für Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Yawregelung haben die folgende Form.

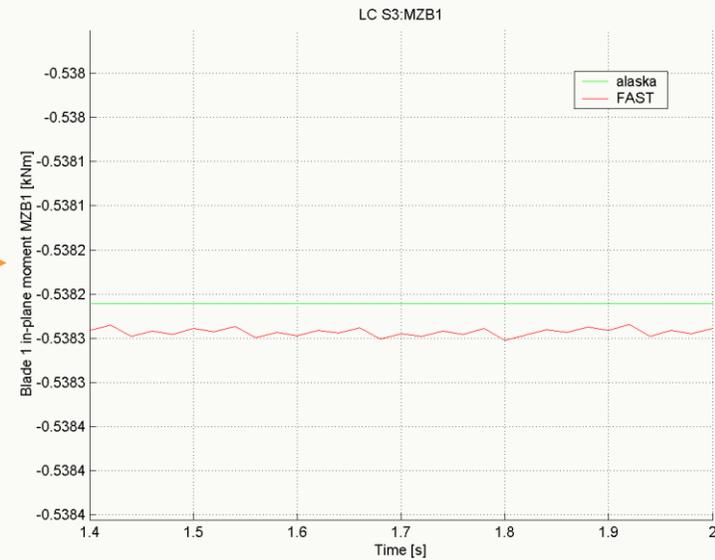
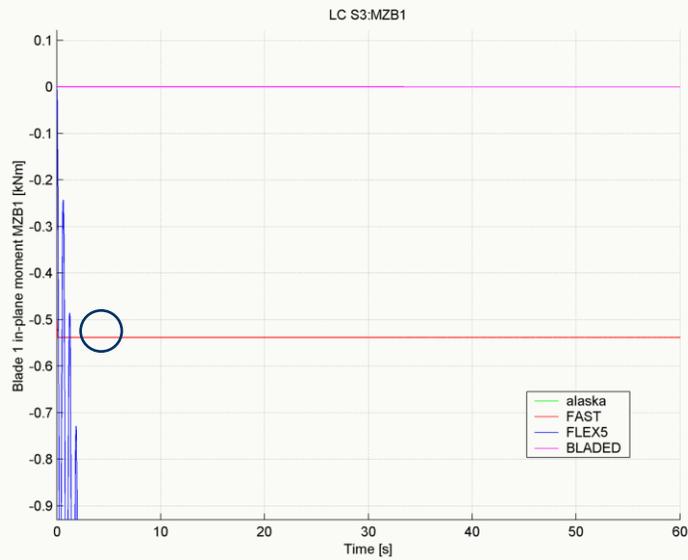
$$\varphi = \frac{\pi}{7200} \cdot t^2$$

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

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







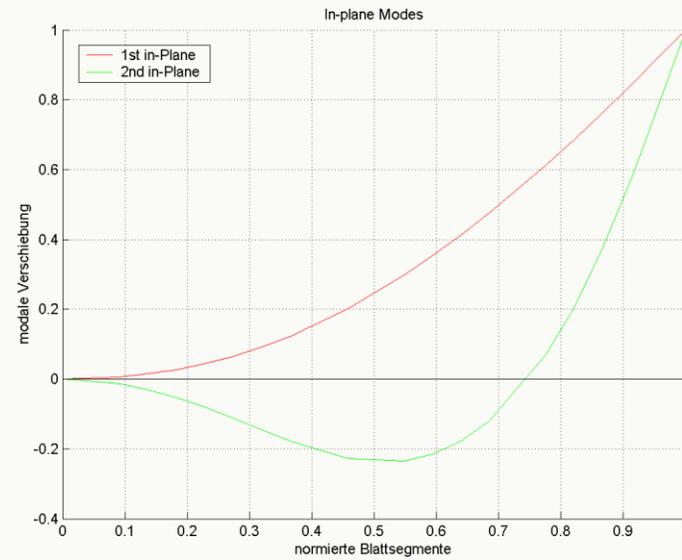
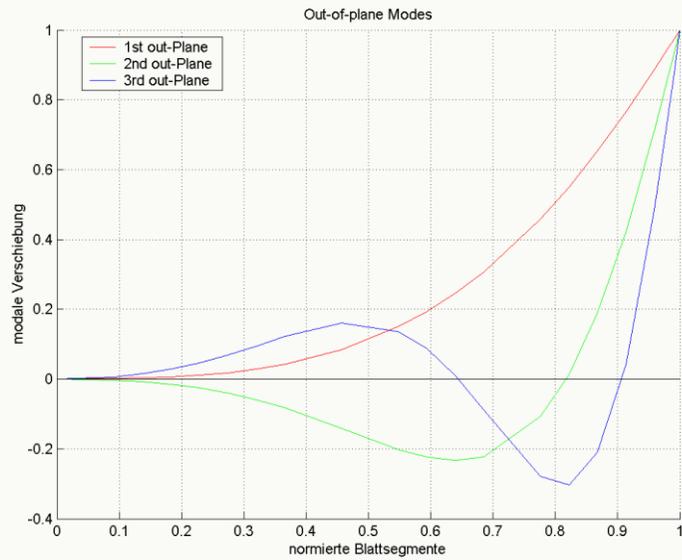
Mit Hilfe des Lastfalls LC S4 sollen Eigenfrequenzen und Eigenformen eines elastischen Referenzblattes zwischen alaska, BLADED, FAST und FLEX5 verglichen werden. alaska, FAST und BLADED verwenden Balken-FE-Modelle um daraus Moden zu generieren. Diese Moden werden verwendet um ein modal reduziertes Blattmodell zu erstellen. In FAST und BLADED ist die Anzahl der Moden begrenzt. Auch können nur reine Biegemoden berücksichtigt werden. In FLEX5 wird aus konstanten Balkenabschnitten ein diskretes Blattmodell generiert und daraus durch eine Iterationsvorschrift [2] die Moden bestimmt. In dem modal reduzierten Blattmodell können auch nur reine Biegemoden in begrenzter Anzahl berücksichtigt werden.

Vergleich der Eigenfrequenzen

- Die Eigenfrequenzen bzw. Eigenformen stammen aus den FE-Modellen und wurden für die Modalreduktion von den jeweiligen Programmen (ala/Flex, BModes, FLEX5, BLADED) zur Verfügung gestellt.

Mode Number	Mode Type	Frequency (Hz)			
		ala/Flex	BModes	FLEX5	BLADED
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

modale Verschiebungen des Referenzblattmodells



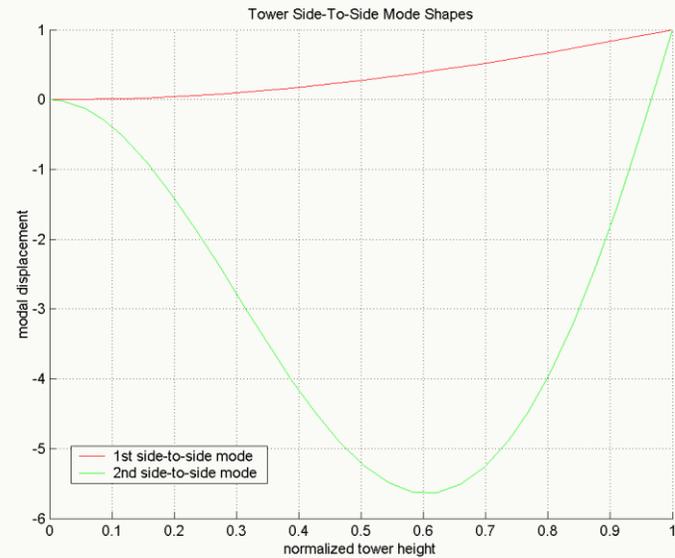
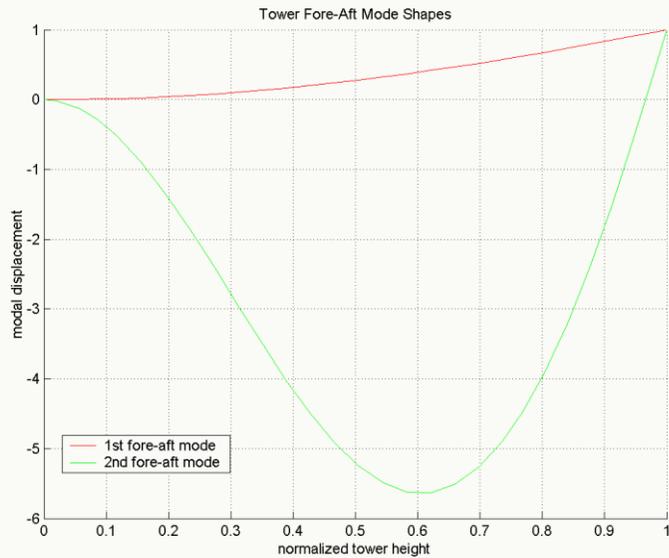
Mit Hilfe des Lastfalls LC S5 sollen Eigenfrequenzen und Eigenformen des elastischen Referenzturms zwischen alaska, BLADED, FAST und FLEX5 verglichen werden. alaska, FAST und BLADED verwenden Balken-FE-Modelle um daraus Moden zu generieren. Diese Moden werden verwendet um ein modal reduziertes Turmmodell zu erstellen. In FAST und BLADED ist die Anzahl der Moden begrenzt. Auch können nur reine Biegemoden berücksichtigt werden. In FLEX5 wird aus konstanten Balkenabschnitten ein diskretes Turmmodell generiert und daraus durch eine Iterationsvorschrift [2] die Moden bestimmt. In dem modal reduzierten Turmmodell können auch nur reine Biegemoden in begrenzter Anzahl berücksichtigt werden.

Vergleich der Eigenfrequenzen

- Die Eigenfrequenzen bzw. Eigenformen stammen aus den FE-Modellen und wurden für die Modalreduktion von den jeweiligen Programmen (ala/Flex, BModes, FLEX5, BLADED) zur Verfügung gestellt.

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

modale Verschiebungen des Referenzturmmodells

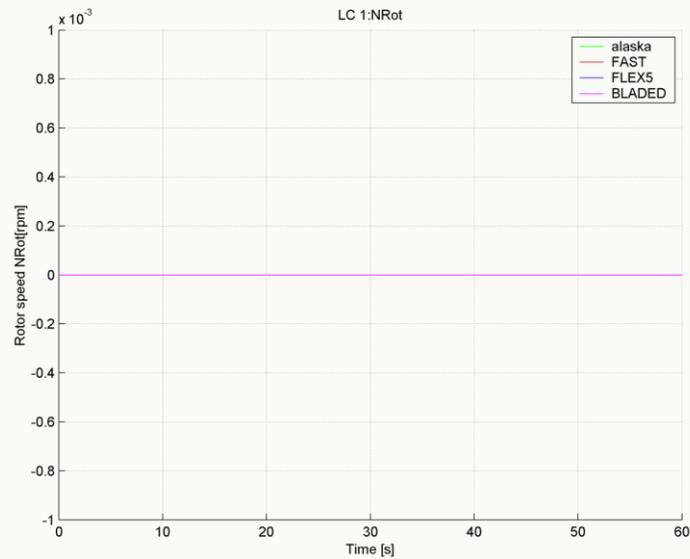
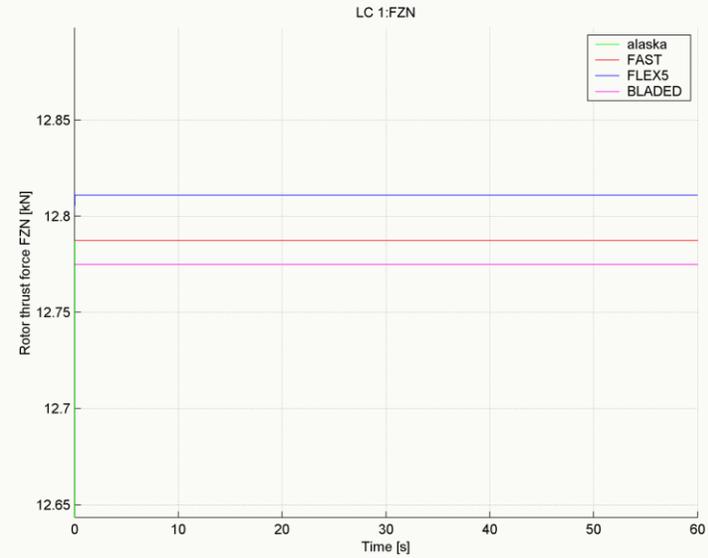
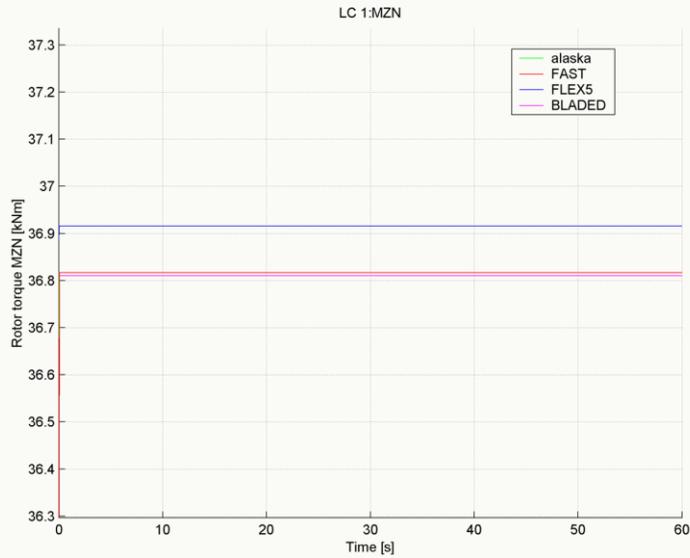


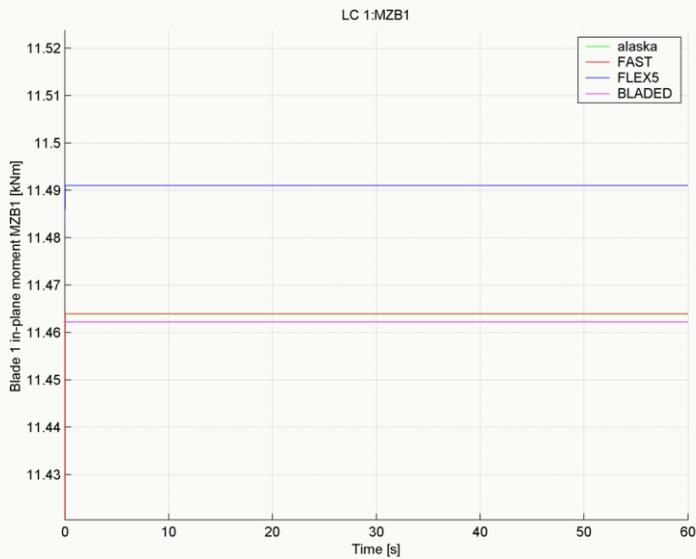
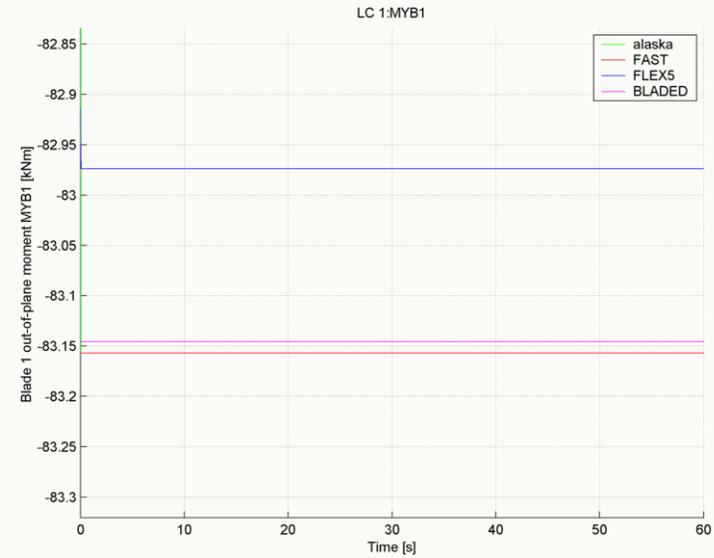
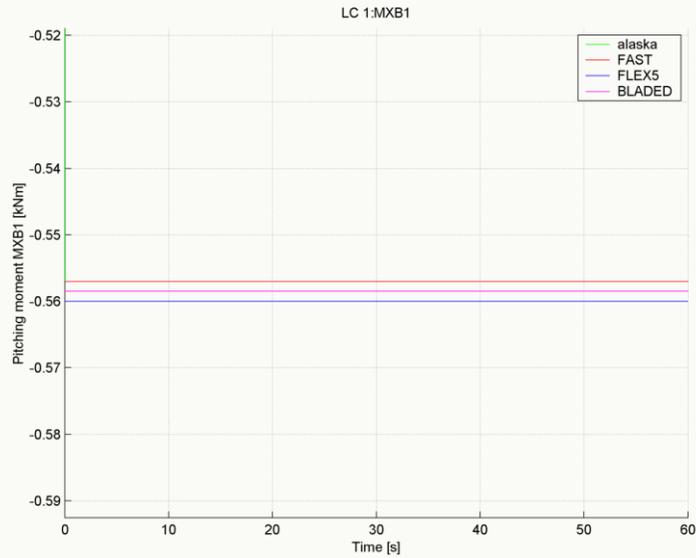
- kein Windshear
- kein Turmschatten
- keine tangentielle Induktion
- starres Anlagenmodell

LCGroup I

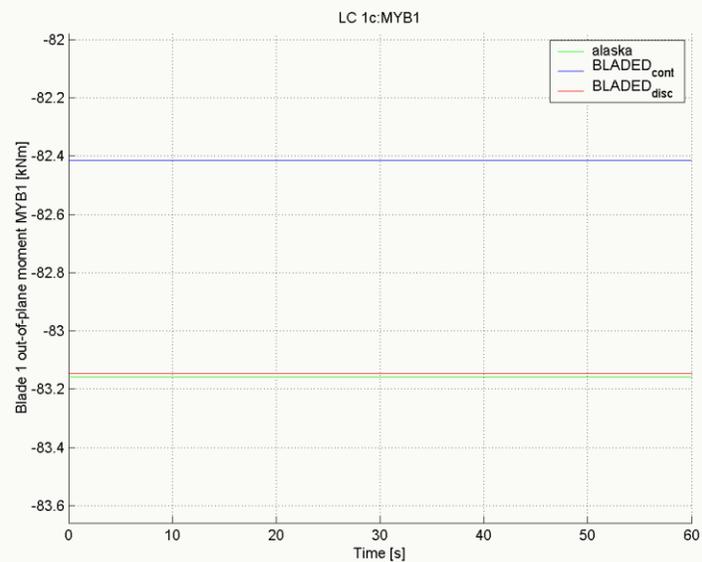
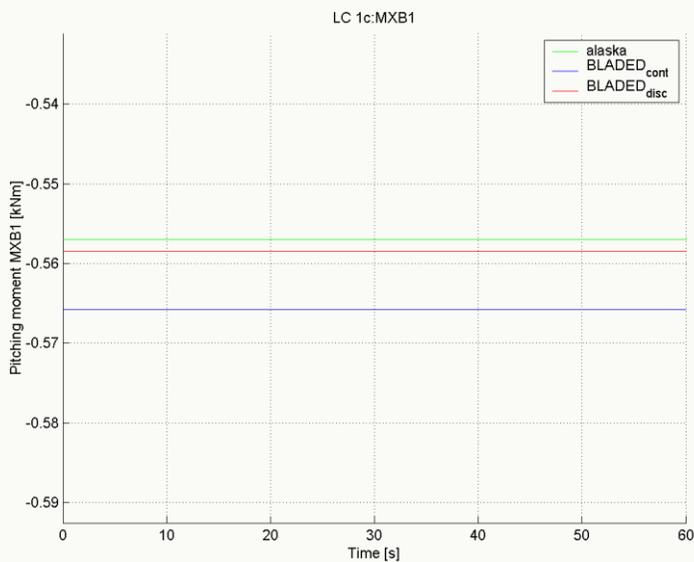
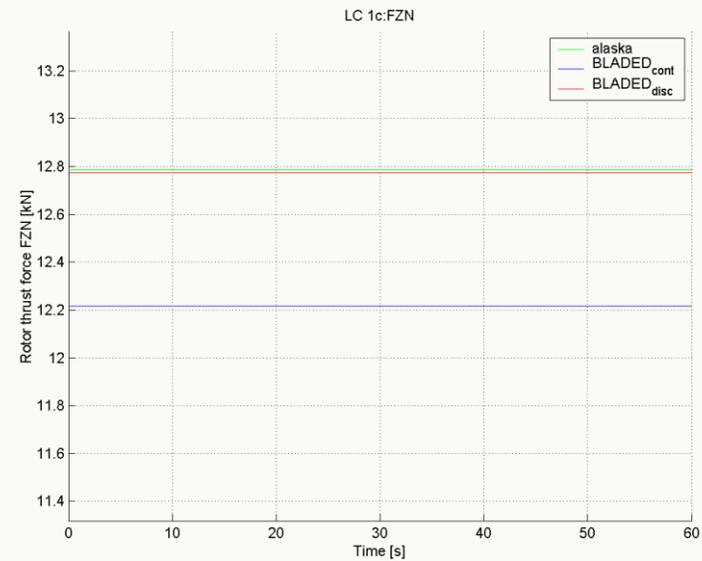
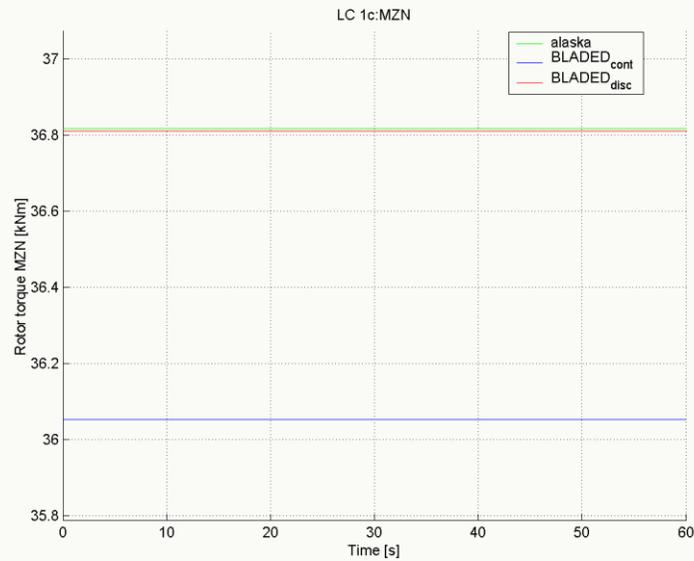
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model						Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	v_{Hub}	YawErr	Turbulence	Time Step	T_{total}
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[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

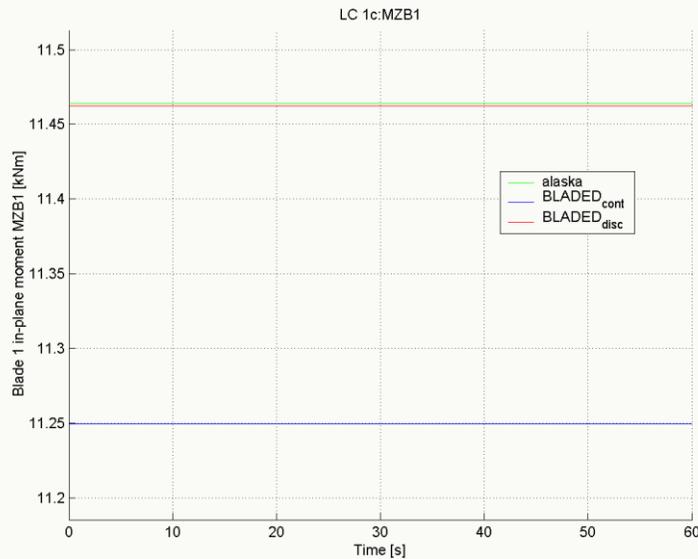
Die Lastfälle aus LCGroup I dienen der Validierung der Blattaerodynamik sowie der axialen Induktion die in alaska/Wind durch eine Equilibrium-Methode sowie eine GDW-Methode abgebildet werden kann. Der Lastfall 1 beschreibt einen geparkten Rotor. Mit Hilfe dieses Lastfalles wird das Basismodell der Blattaerodynamik von alaska/Wind validiert. Die Lastfälle 4-8 simulieren den Hochlauf der Referenzanlage (starres Modell) unter verschiedenen Bedingungen. Der Antriebsstrang dreht frei und ohne Last, da der Generator deaktiviert wurde.





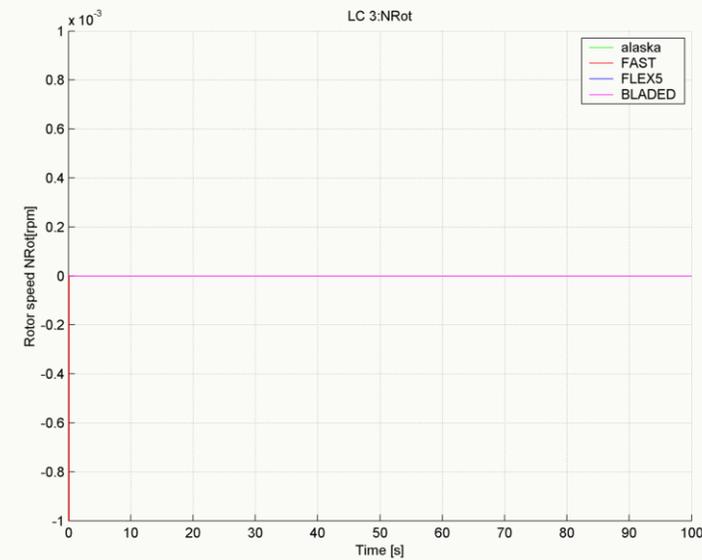
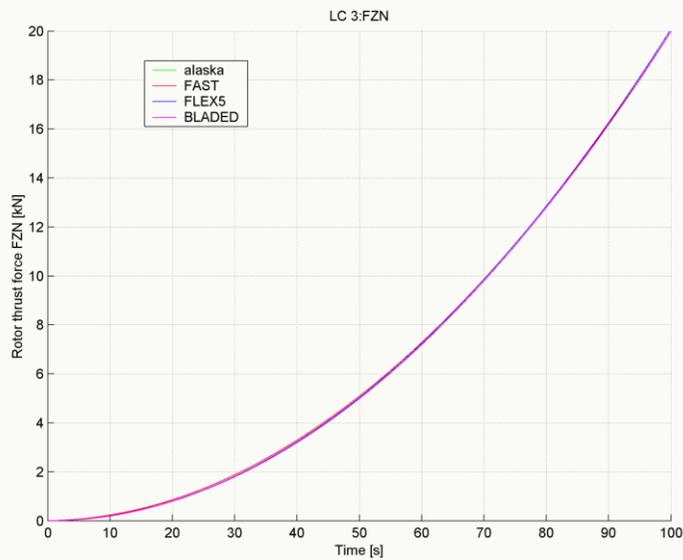
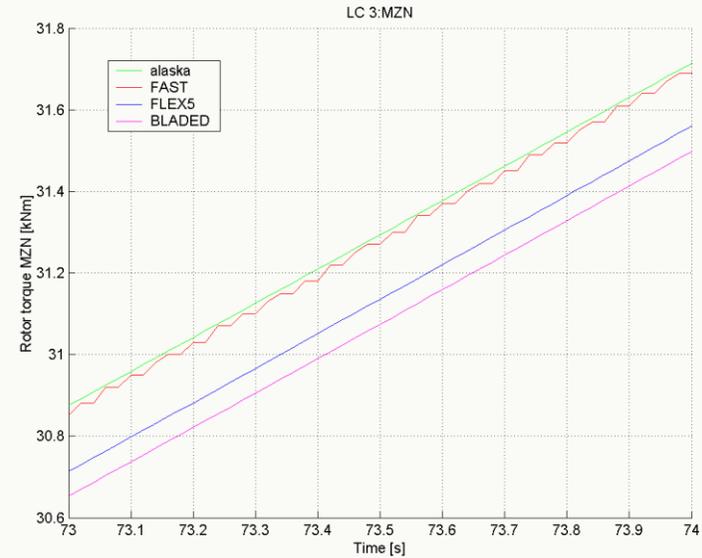
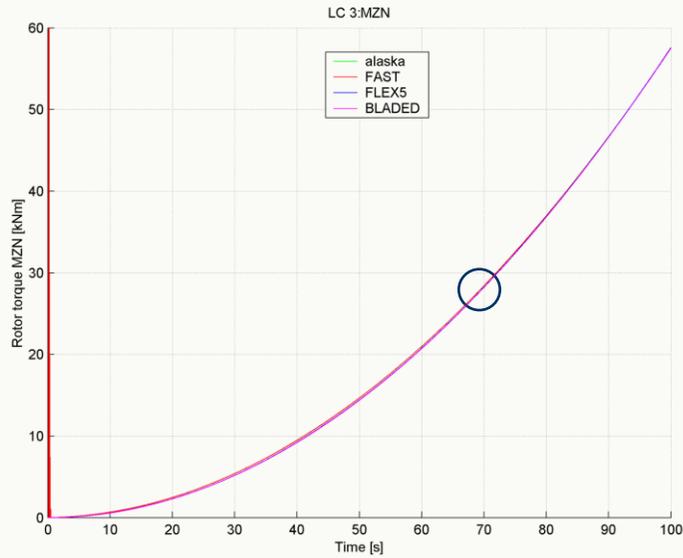
- sehr gute Übereinstimmung
- validiertes Blattmodell für stehenden Rotor

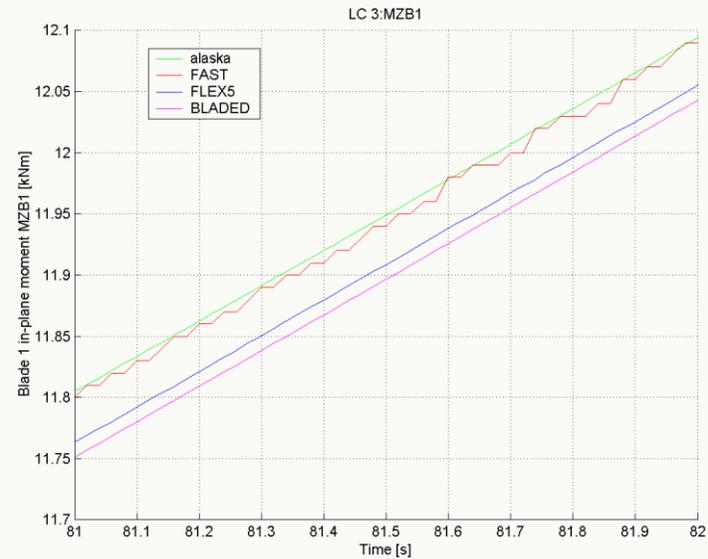
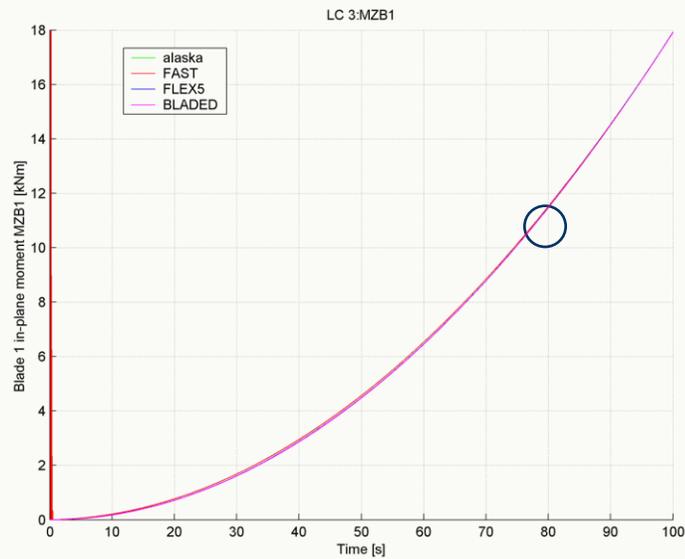
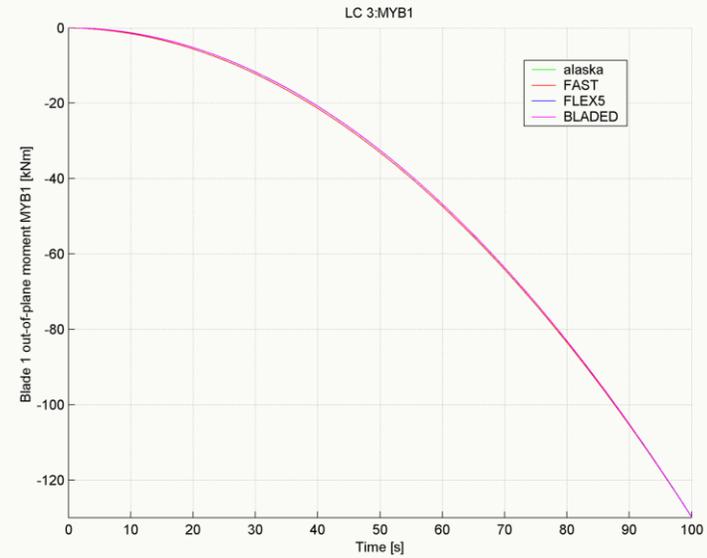
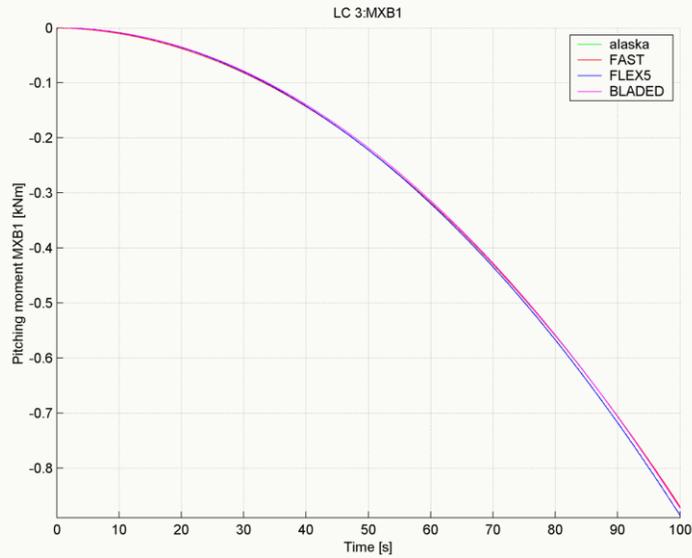


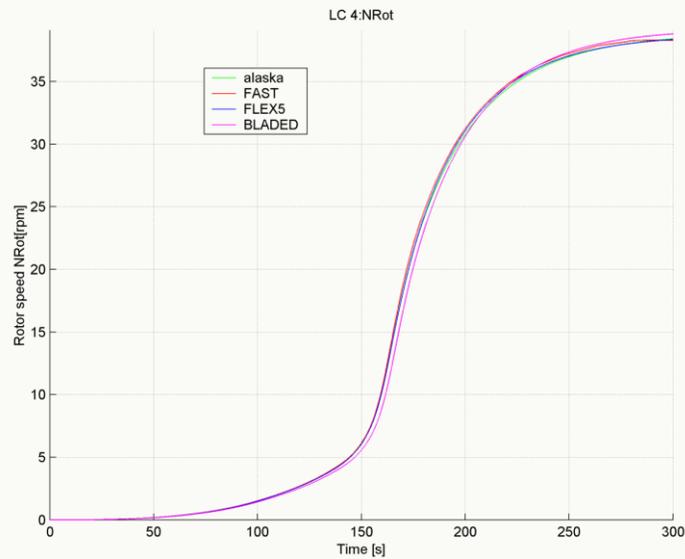
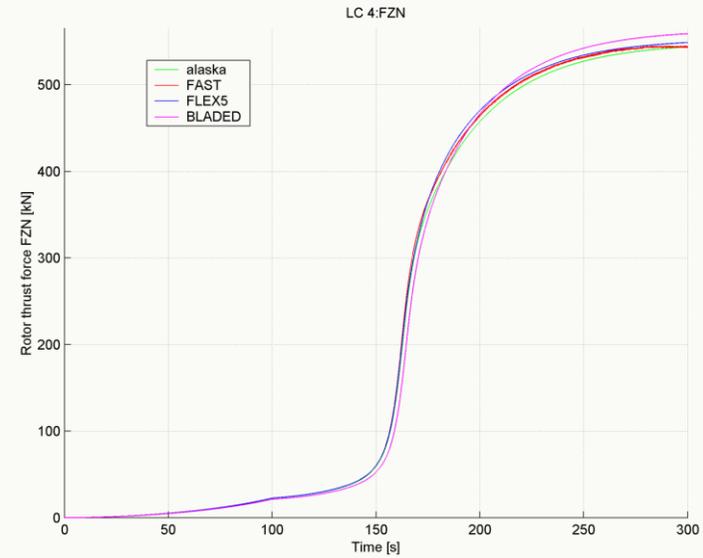
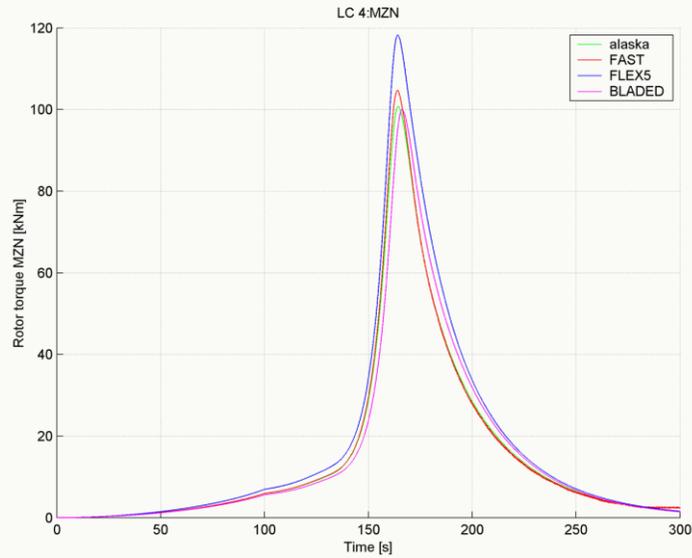


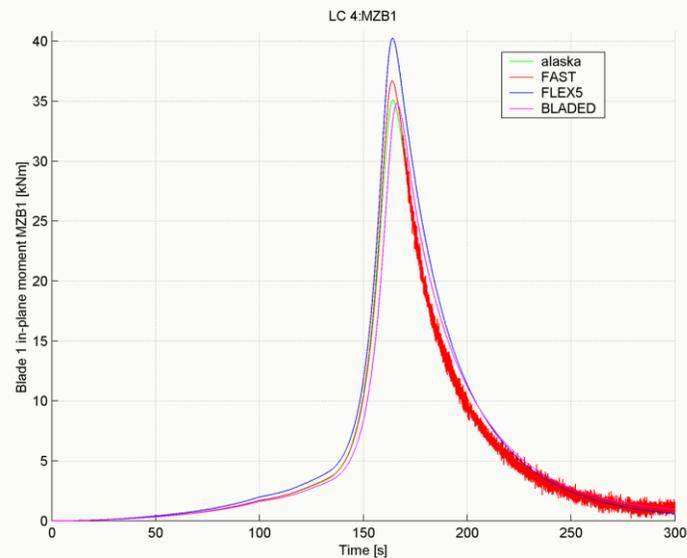
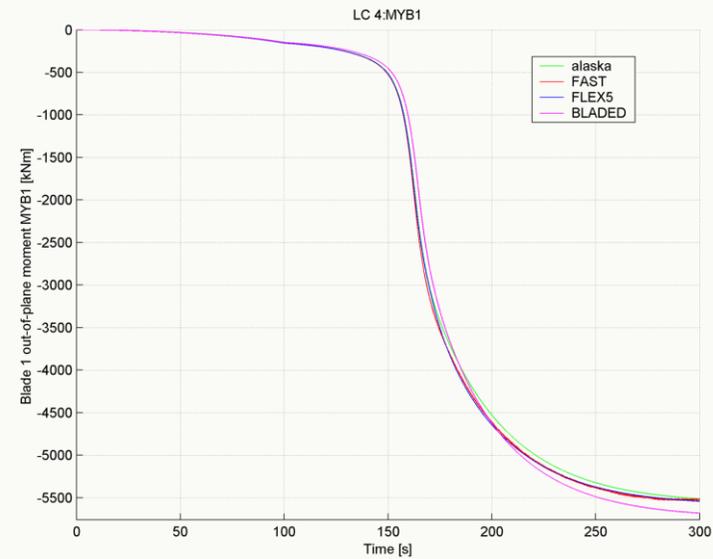
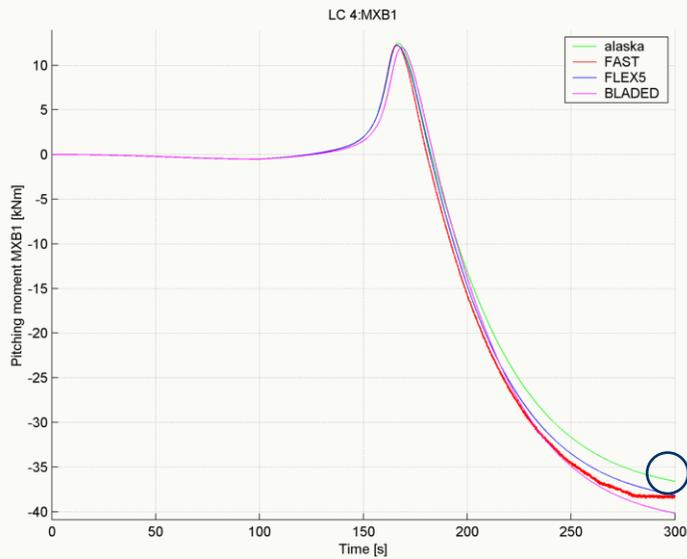
Im BLADED erfolgt die Windkraftberechnung kontinuierlich als Kraft pro Länge. Dazu werden die diskreten Blattparameter zwischen den Schnitten linear beschrieben. Der Vorteil liegt in einem stetigen Verlauf der Blatteigenschaften sowie der Blattkräfte. In alaska, FAST und FLEX5 erfolgt die Berechnung der aerodynamischen Kräfte diskret. Dazu werden die Parameter als abschnittsweise konstant angenommen. Um in BLADED ein ähnliches Verhalten zu bekommen, 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. Der Vergleich zeigt hier die Ergebnisse des BLADED-Standardblattes mit einem angepassten Blattmodell.

	Rotor torque	Rotor thrust force	Pitching moment	Blade 1 out-of-plane moment	Blade 1 in-plane moment
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
const. 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 %



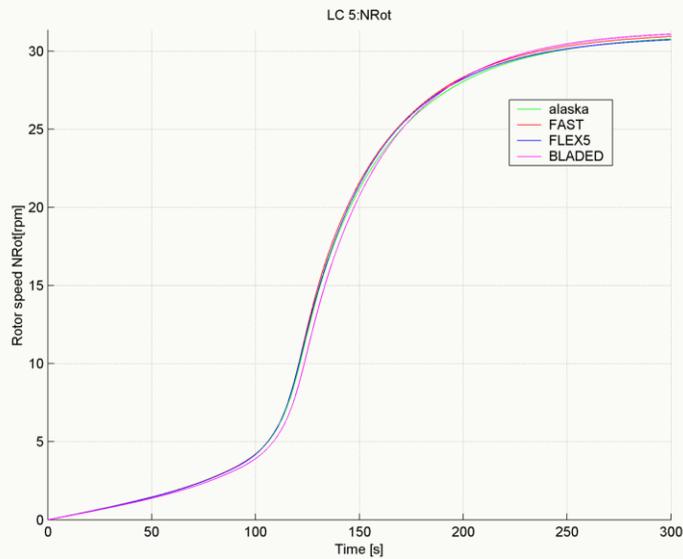
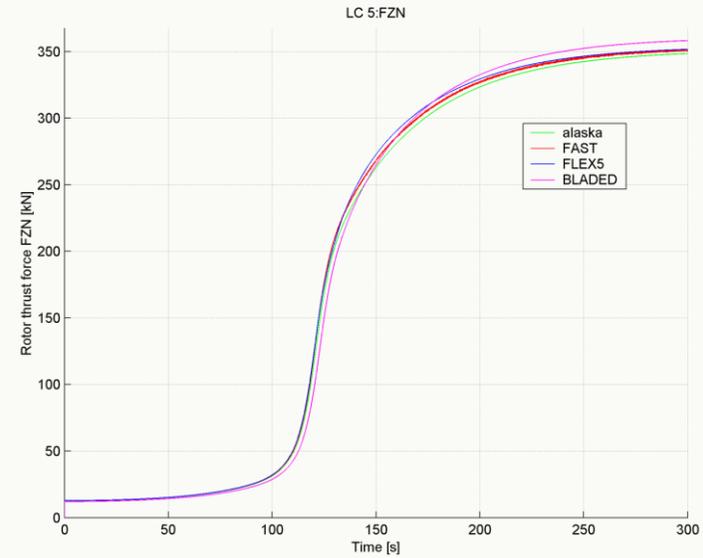
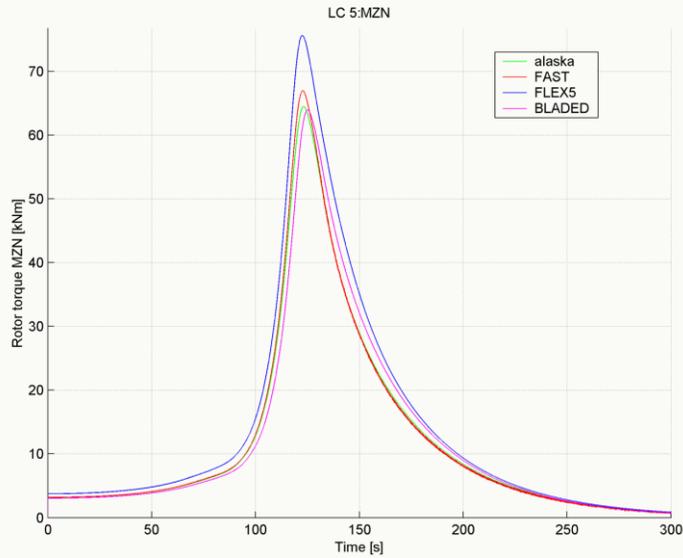


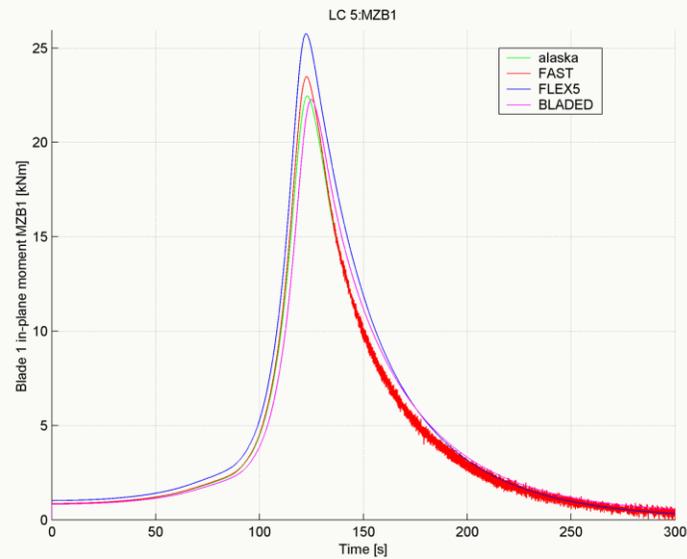
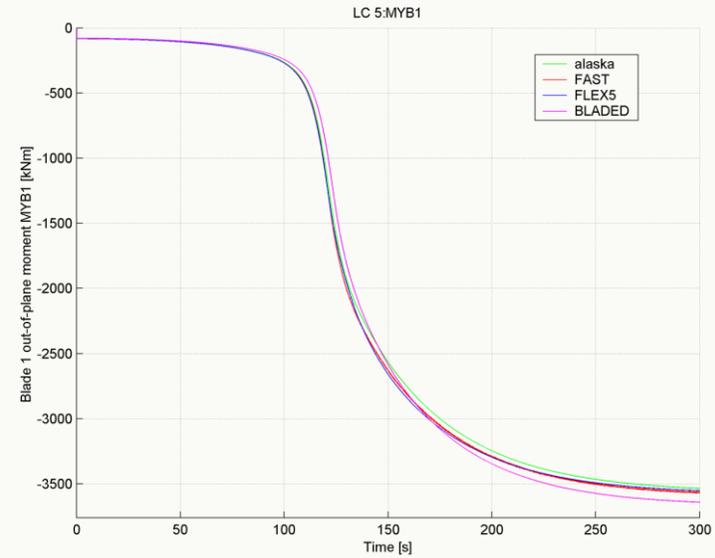
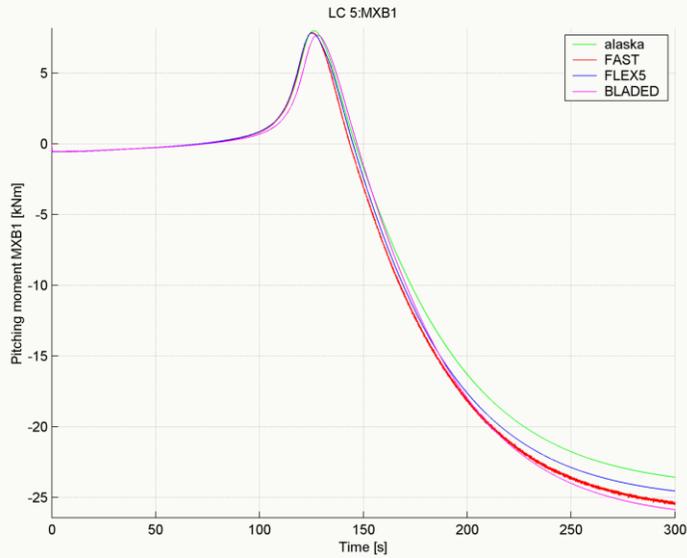


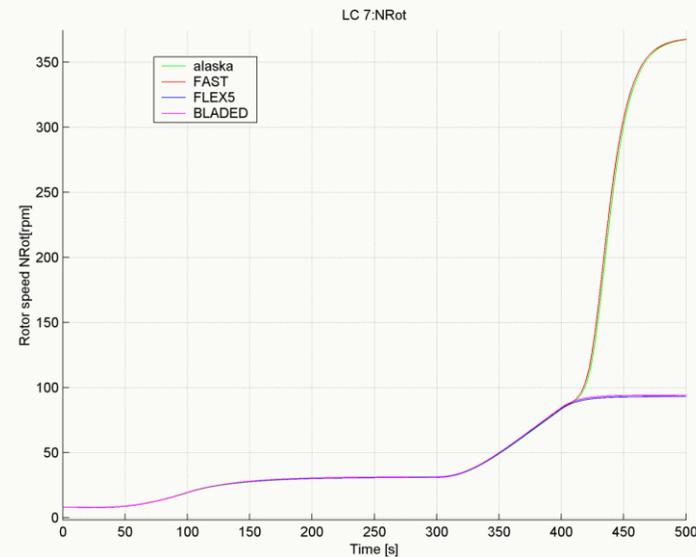
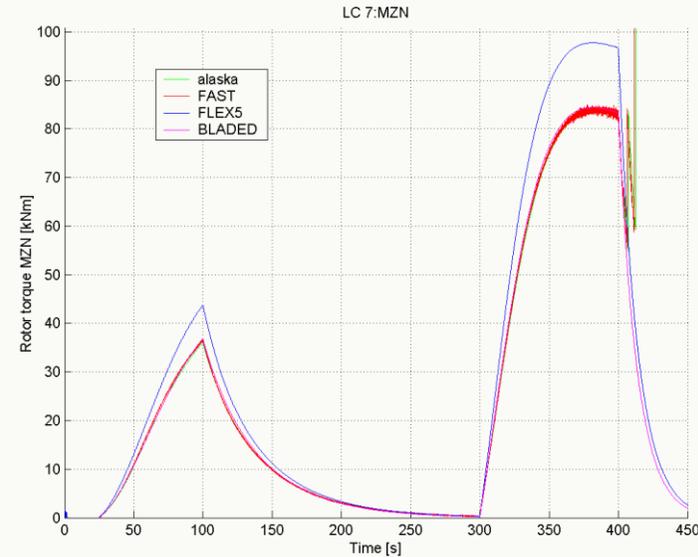
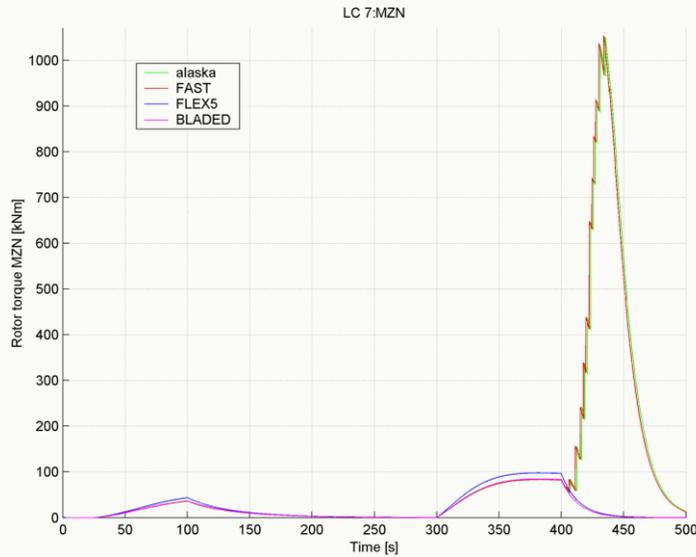


- **Abweichung im alaska-Pitchmoment mit steigender Rotordrehzahl**
 - Ursache liegt in der Vernachlässigung der Deviationsmomente des Rotorblattes bei BLADED, FAST und FLEX5
 - vgl. LC S1

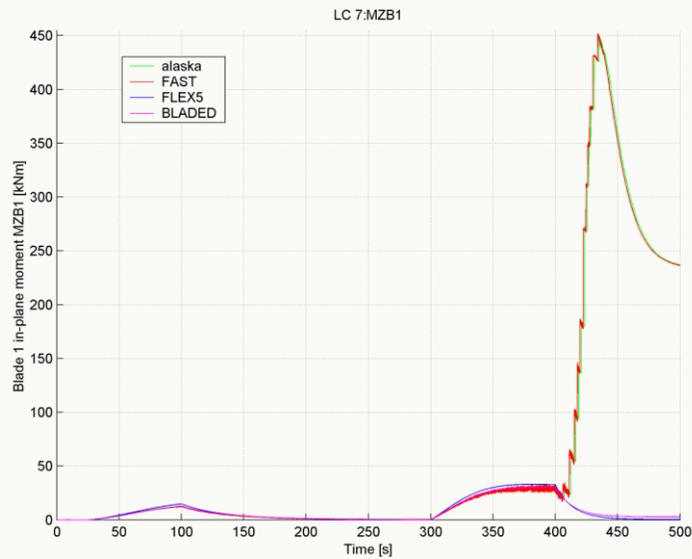
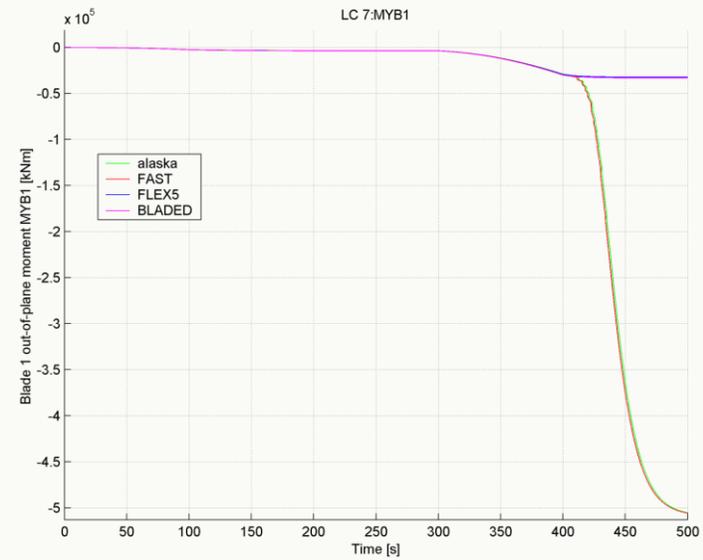
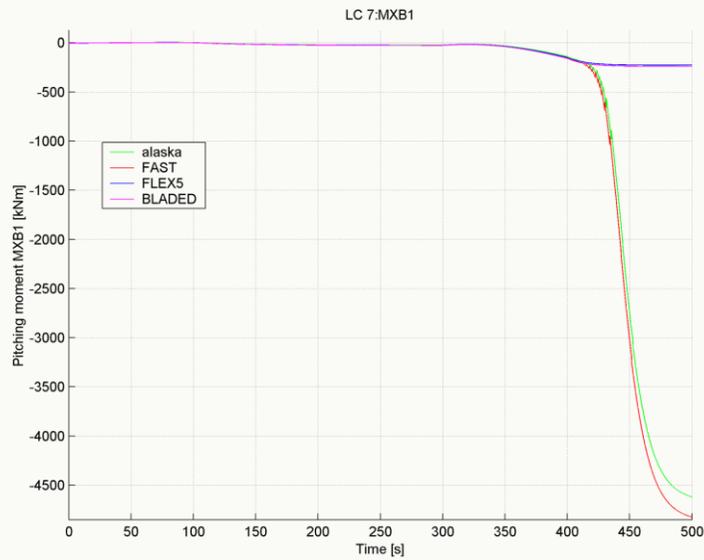
- **Überhöhung des Antriebsmomentes bei FLEX5 an dem Punkt optimaler Leistungsausbeute**

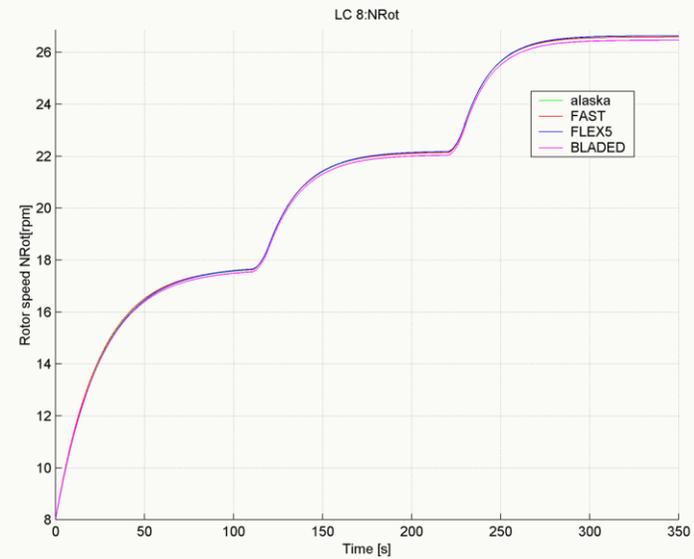
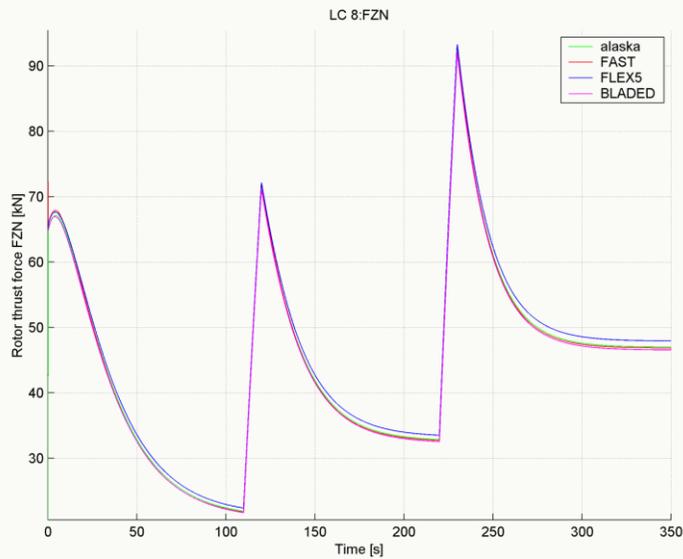
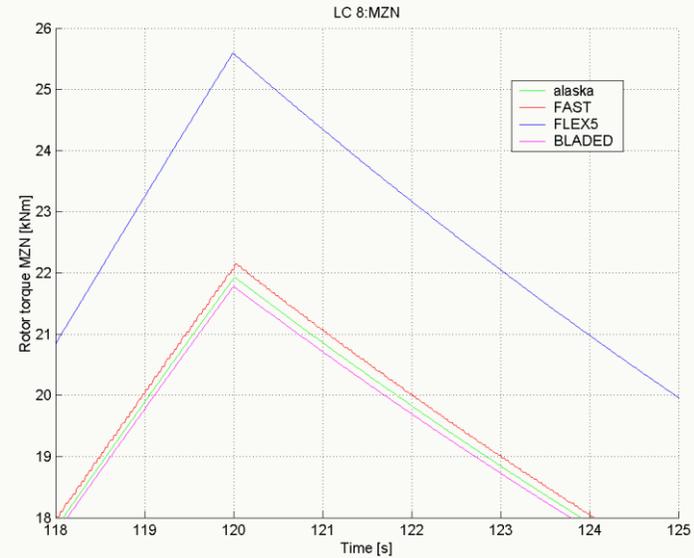
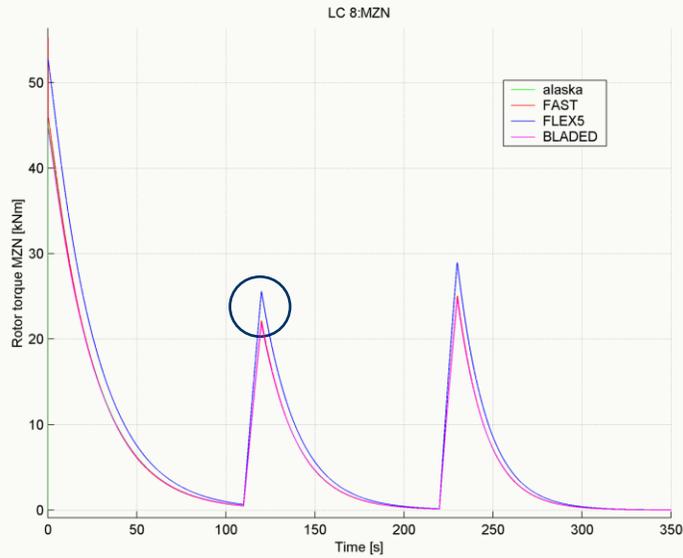


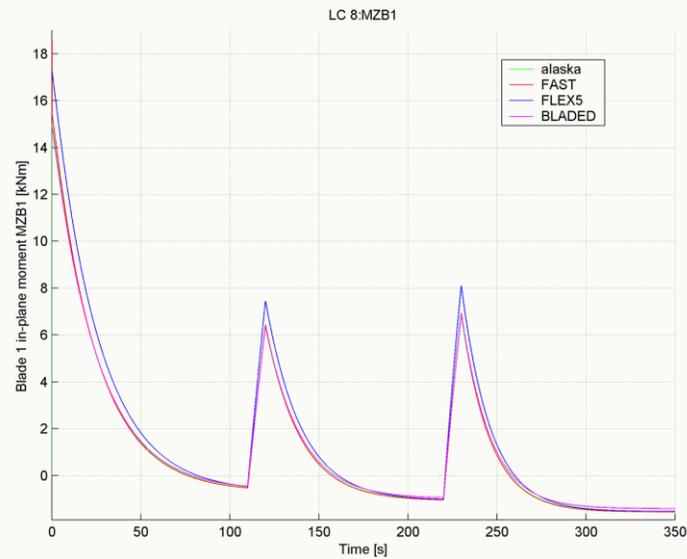
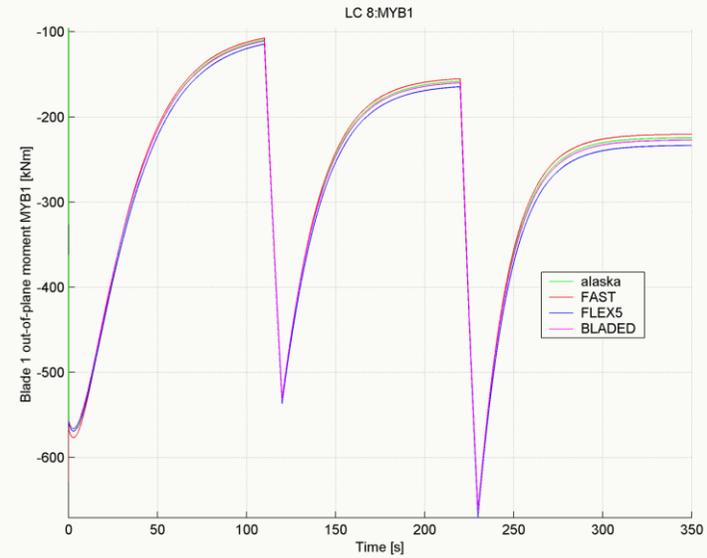
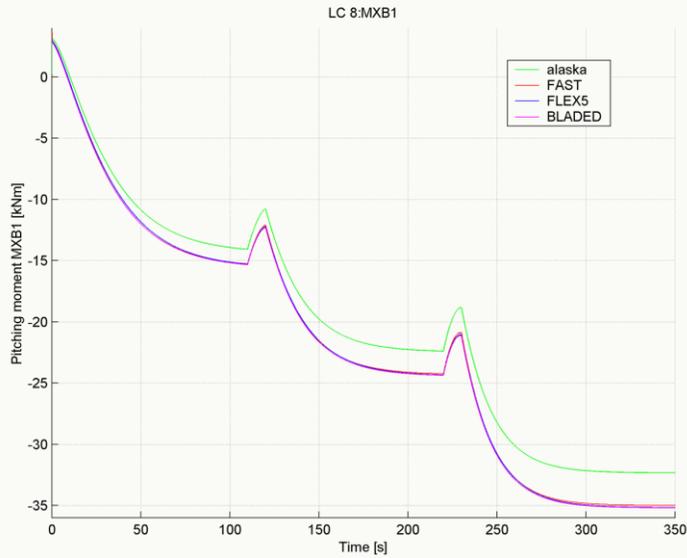




- mit Erreichen der Grenzen der Equilibrium Methode stark unterschiedliches Verhalten
- Überhöhung des Antriebsmomentes in Flex5 (Ursache Windkraftberechnung, Interpolation der aerodynamischen Blattbeiwerte?)





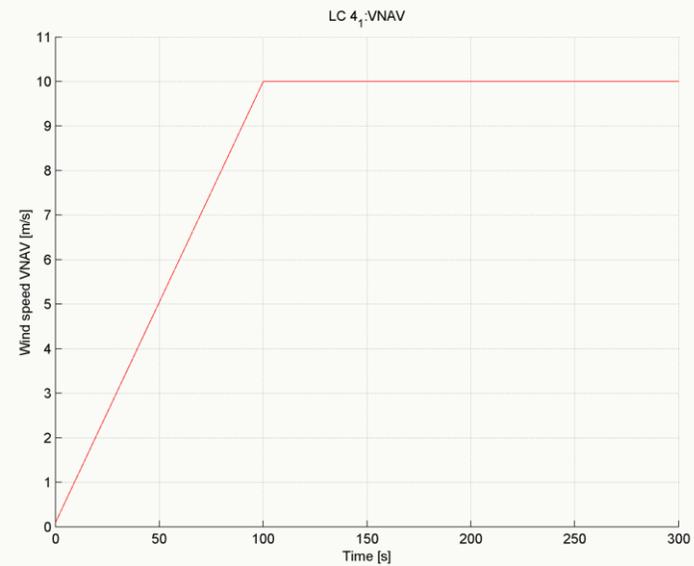
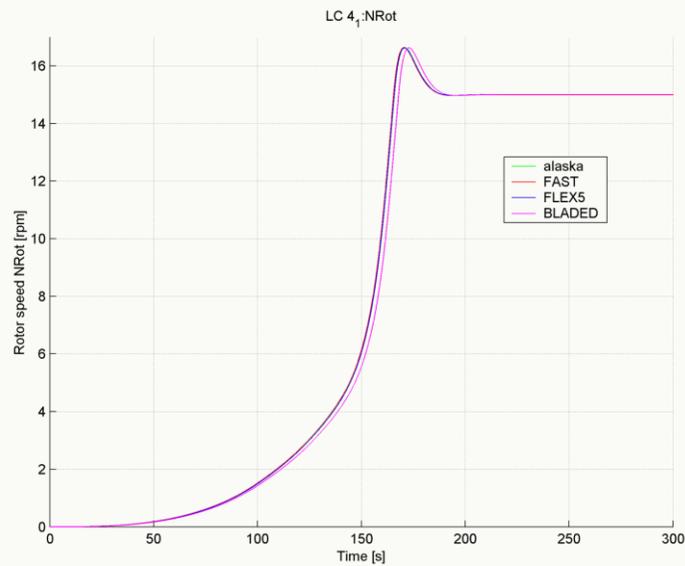
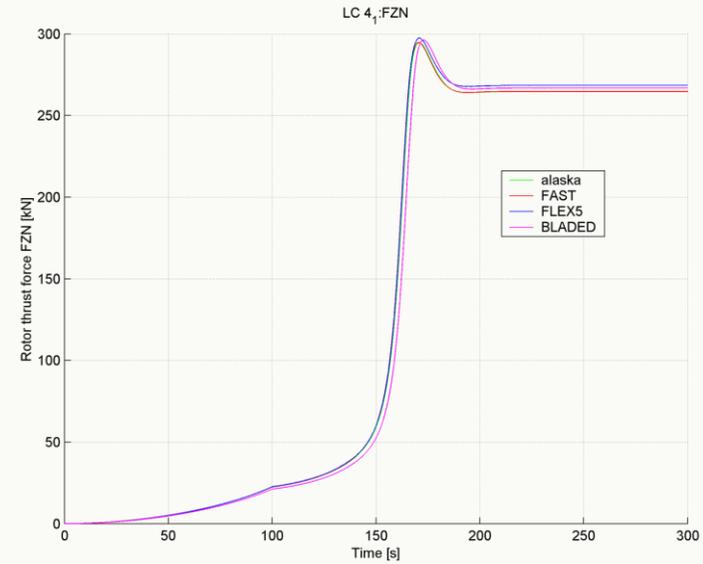
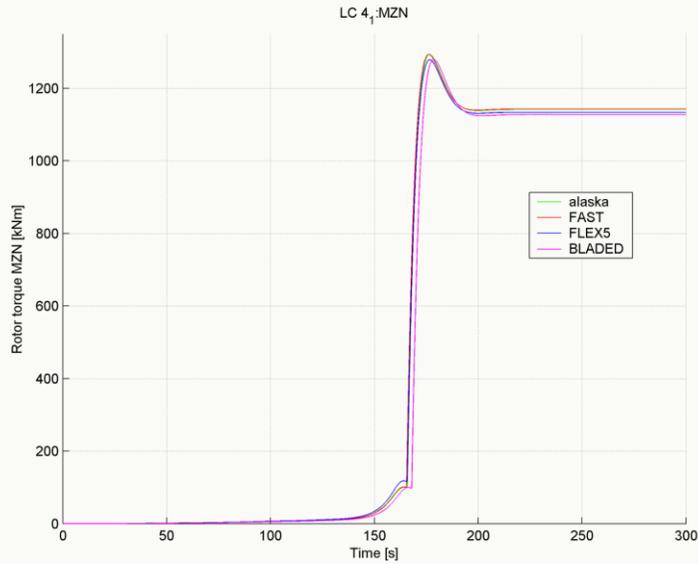


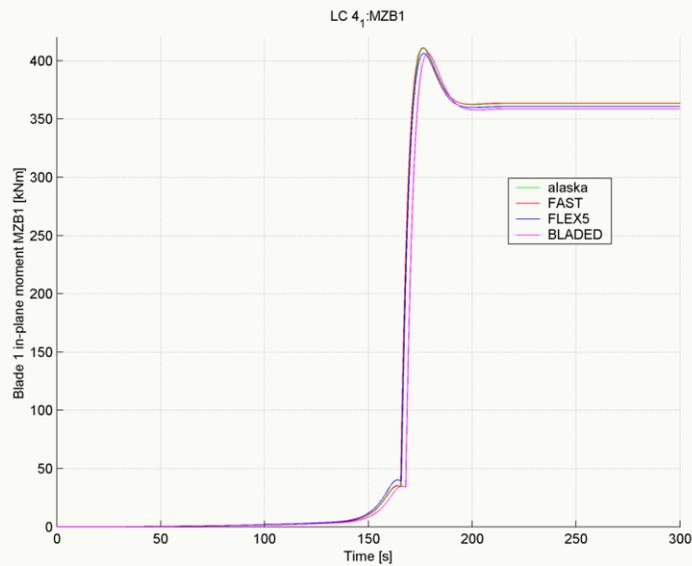
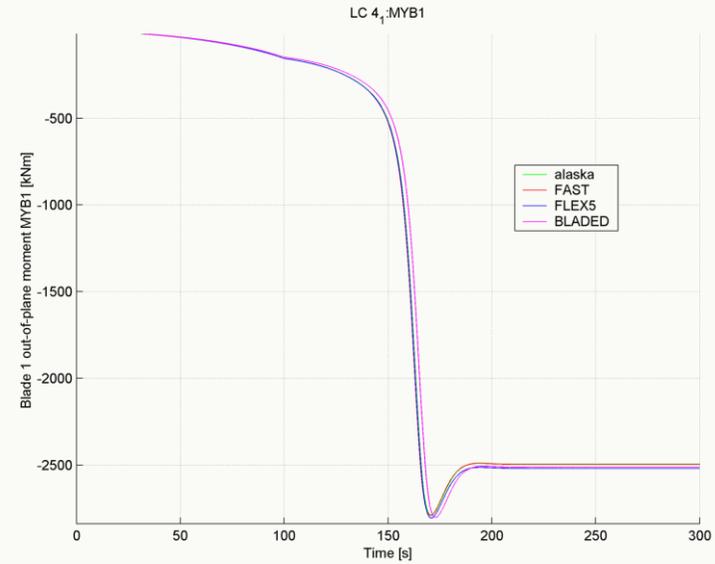
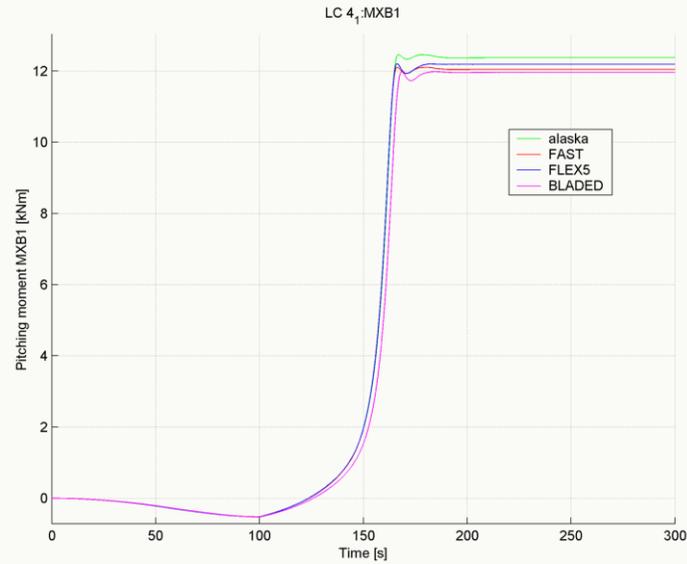
- kein Windshear
- kein Turmschatten
- keine tangentielle Induktion
- starres Anlagenmodell

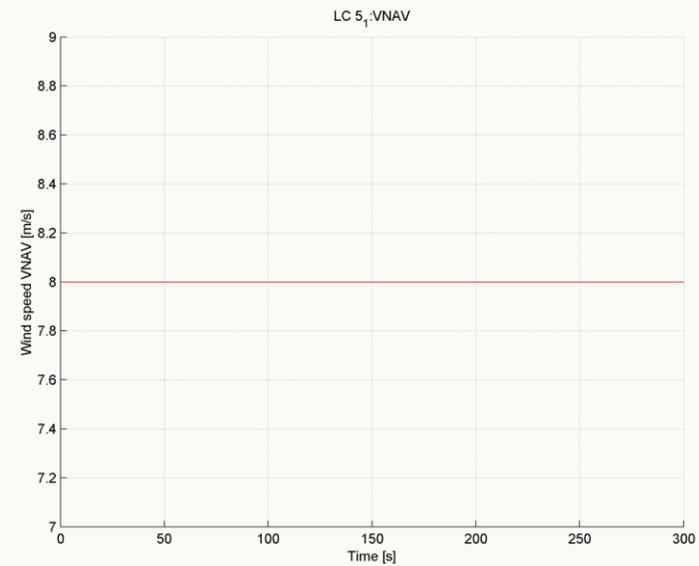
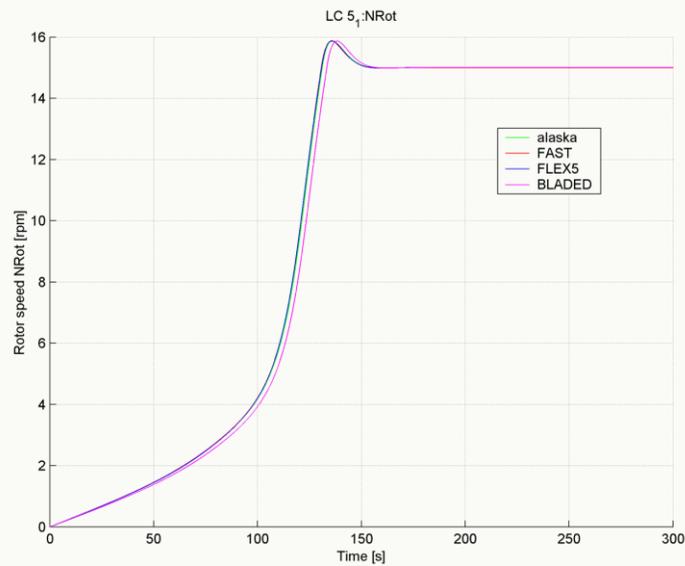
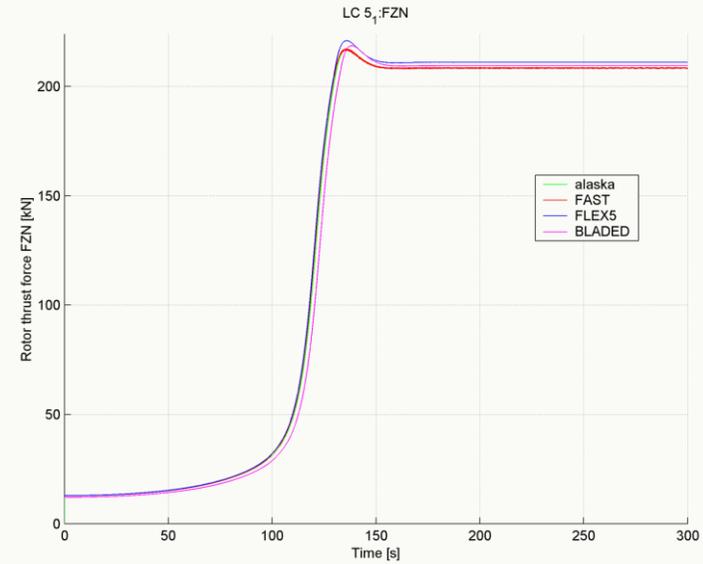
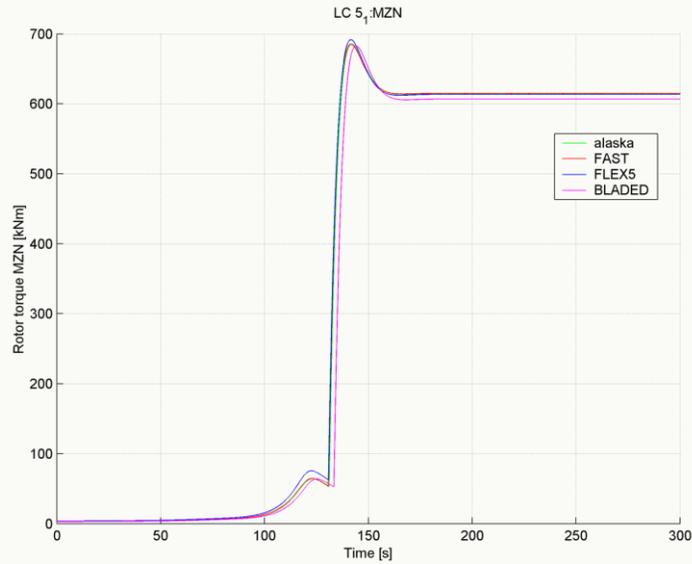
LCGroup II

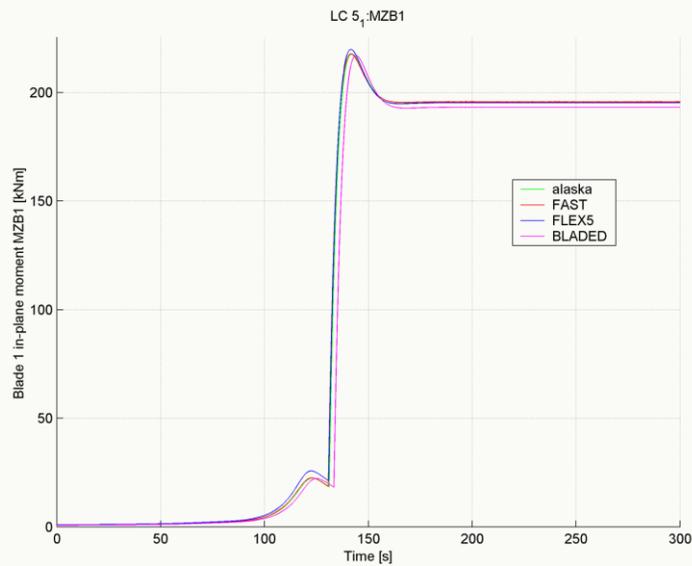
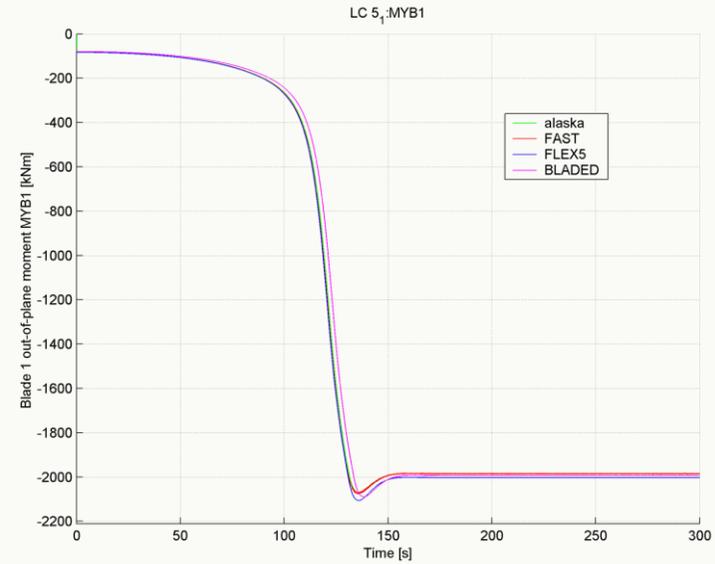
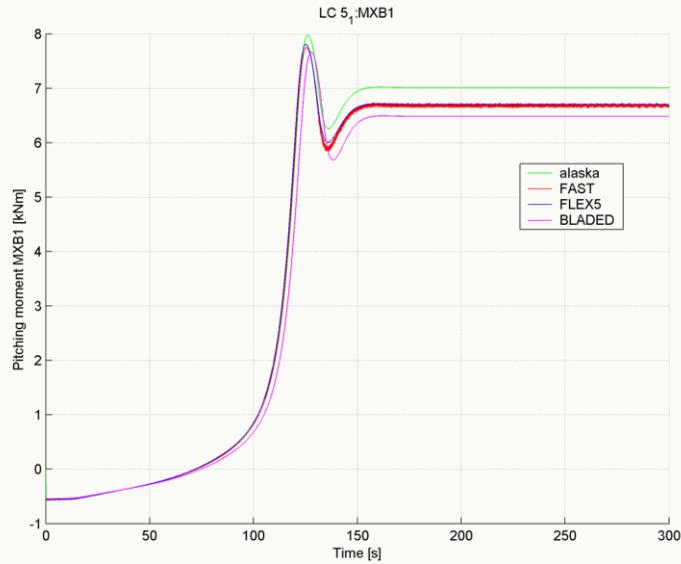
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	V_{hub}	YawErr	Turbulence	Time Step	T_{total}
	Eql/ GDW	None/ Bed/Oye	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	Eql	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	var 1	0°	off	0,02	300
5_1	Eql	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	15	8	0°	off	0,02	300
7_1	Eql	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	8	on	15	var 3	0°	off	0,02	500
8_1	Eql	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	8	on	15	var 4	0°	off	0,02	350

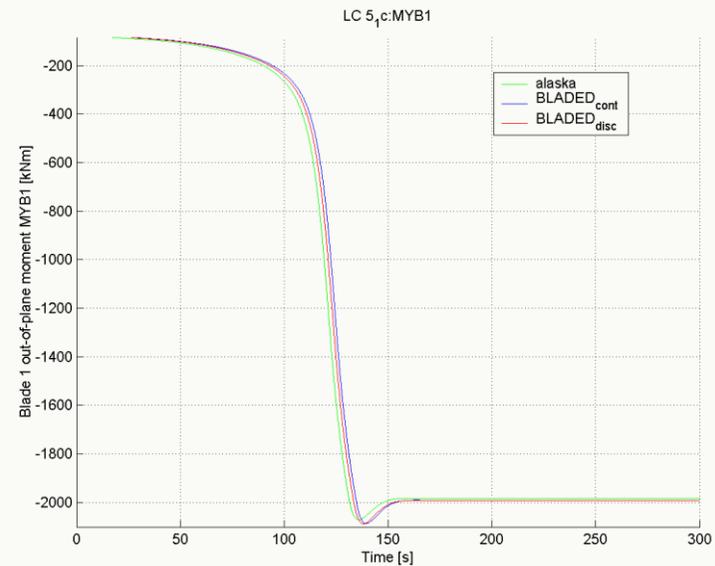
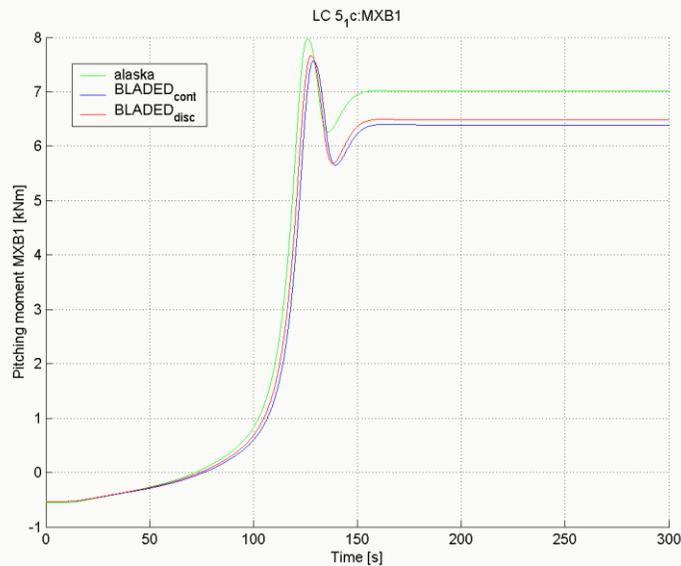
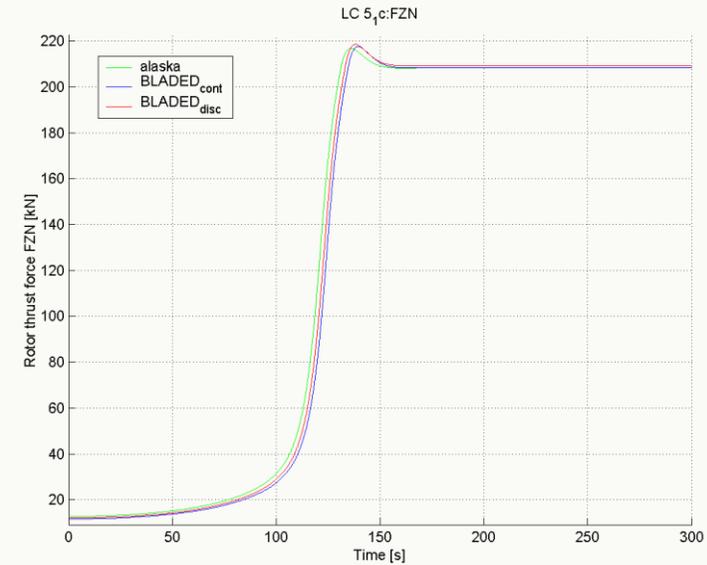
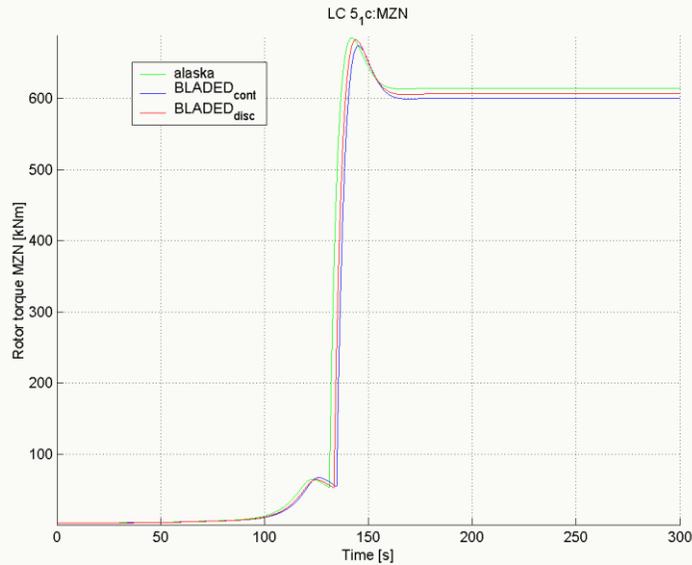
In LCGroup II werden die Lastfälle 4-8 aus LCGroup I mit einer stationären Rotordrehzahl simuliert. Das Anlagenmodell beschleunigt auf die ausgewählte Rotordrehzahl und wird dann durch einen PID-Drehzahlregler auf der Solldrehzahl gehalten. Der Regler übernimmt die Funktion eines Motors und bringt im stationären Fall ein äquivalentes Gegenmoment zu den aerodynamischen Kräften am Rotor auf.

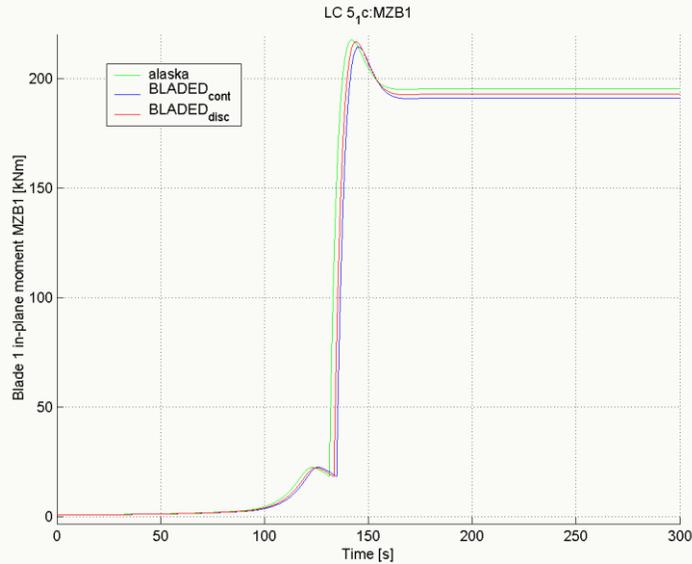




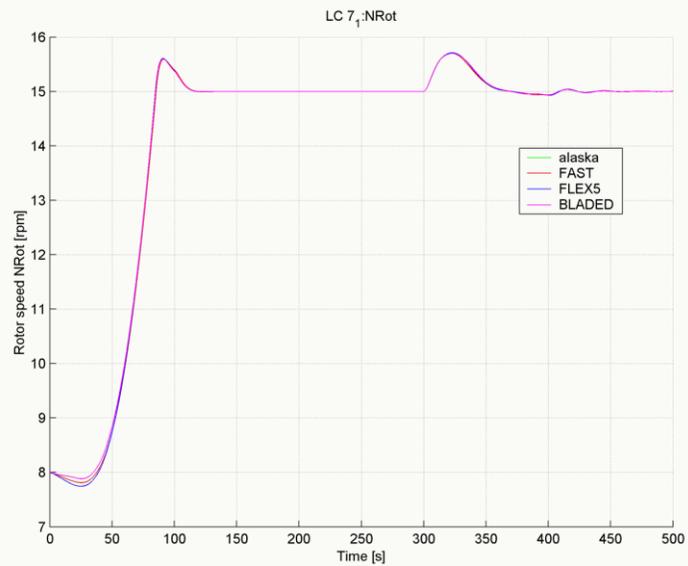


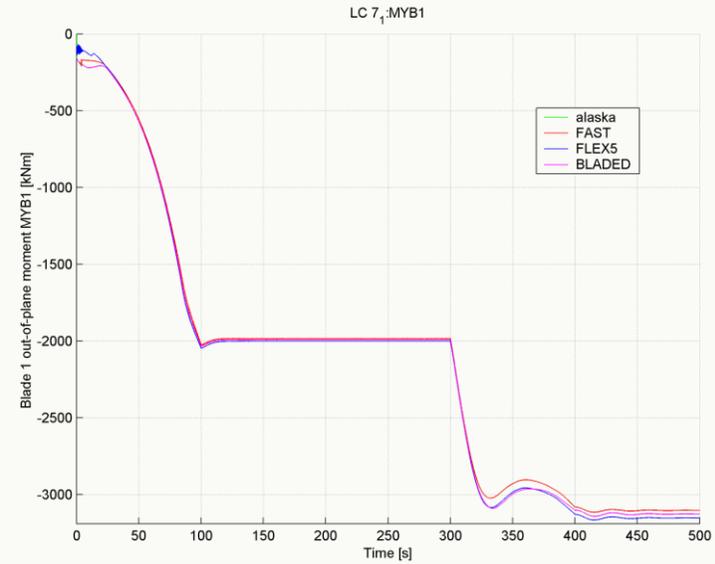
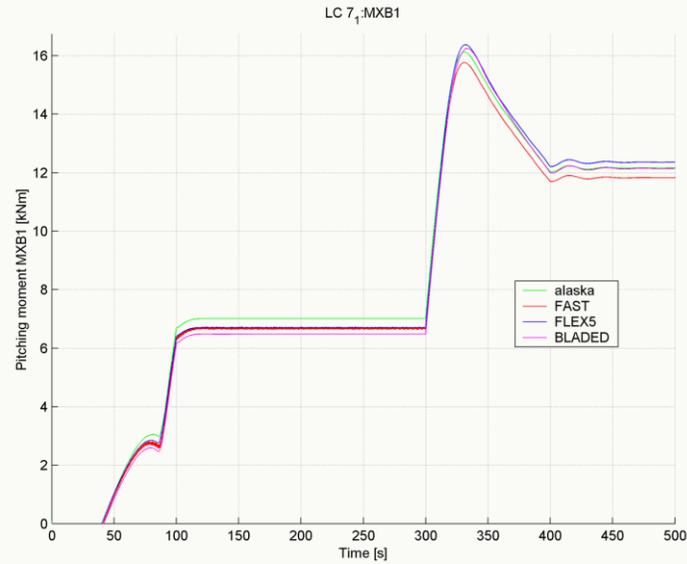


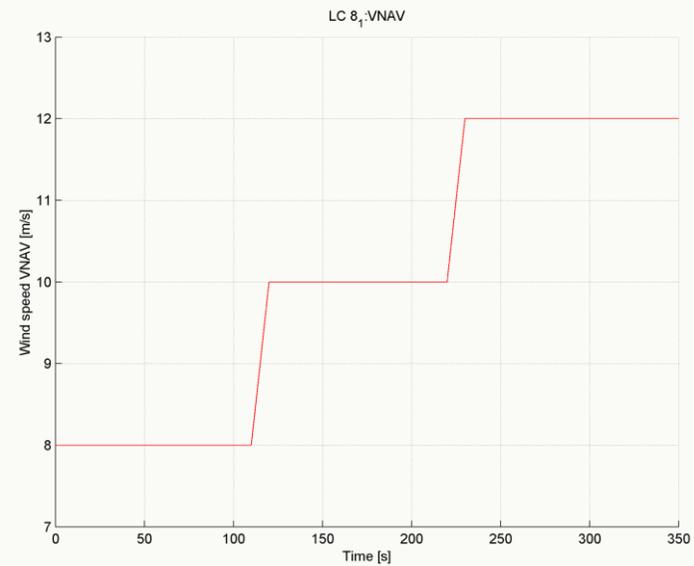
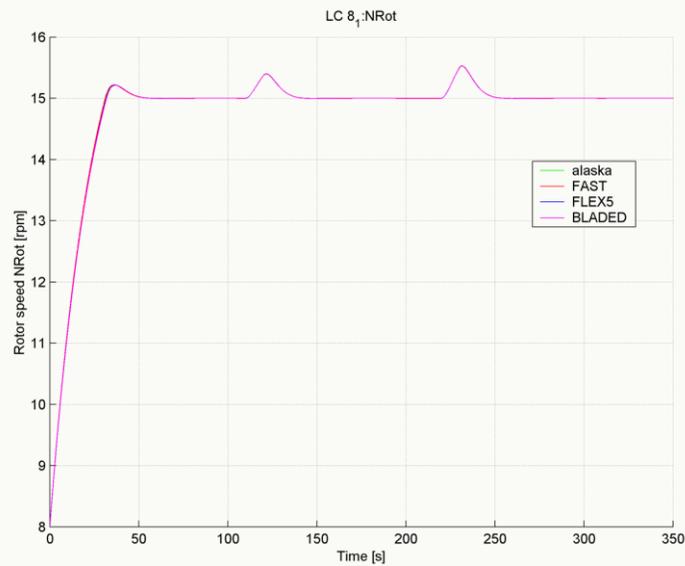
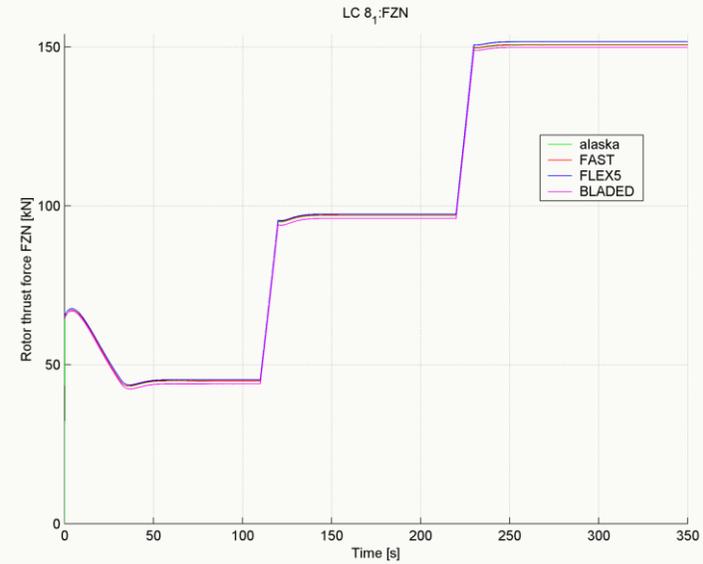
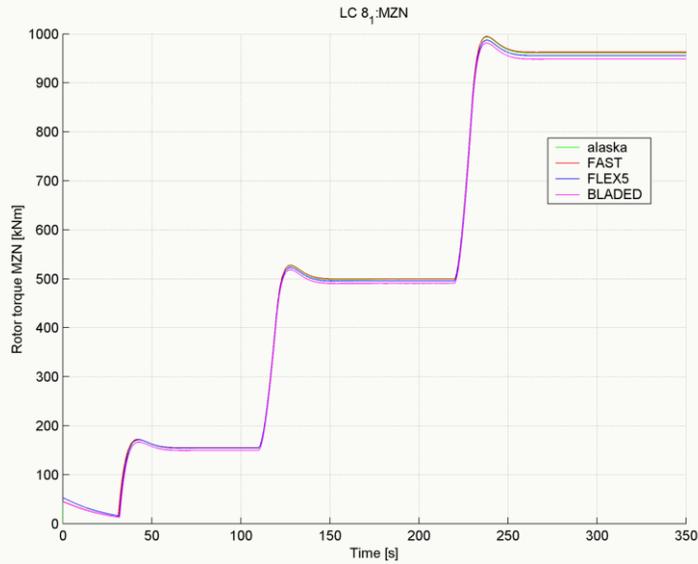


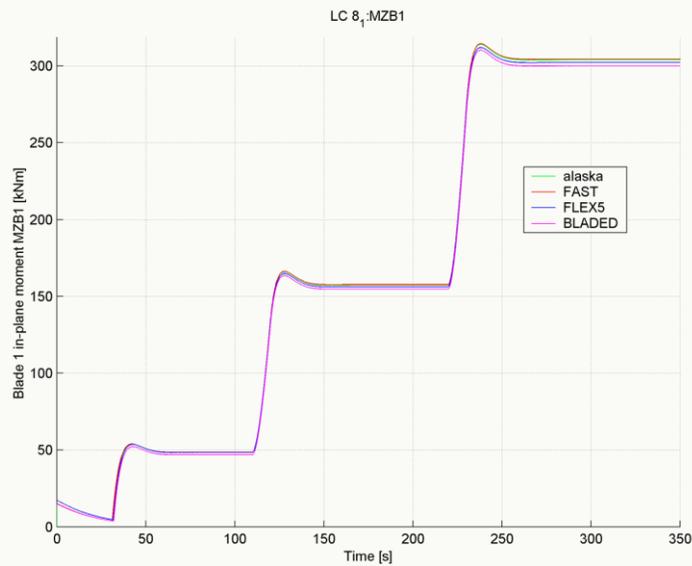
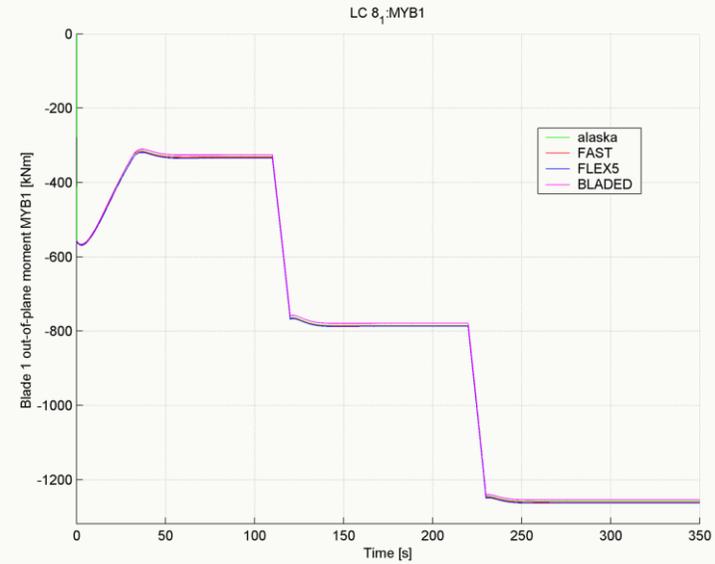
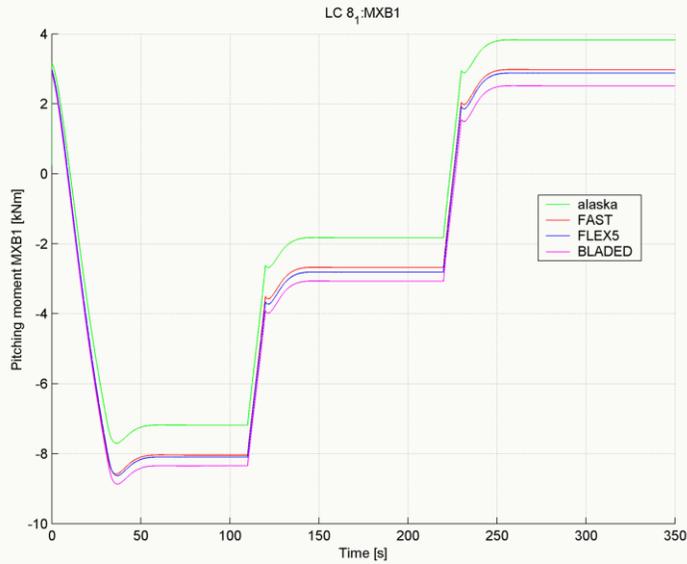


	Rotor torque	Rotor thrust force	Pitching moment	Blade 1 out-of-plane moment	Blade 1 in-plane moment
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
const. Blade	600.69	208.49	6.39	-1992.8	191.32
disc. Blade	606.91	209.45	6.48	-1994.1	193.11
rel. Error	-1.03 %	-0.46 %	-1.43 %	-0.06 %	-0.93 %







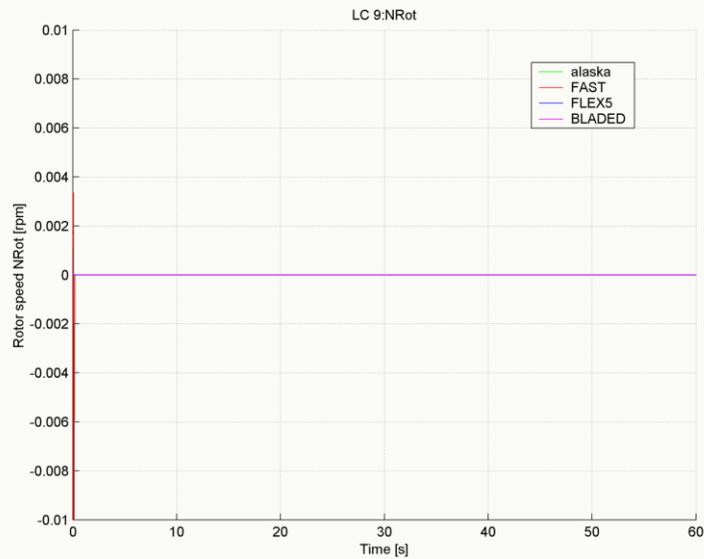
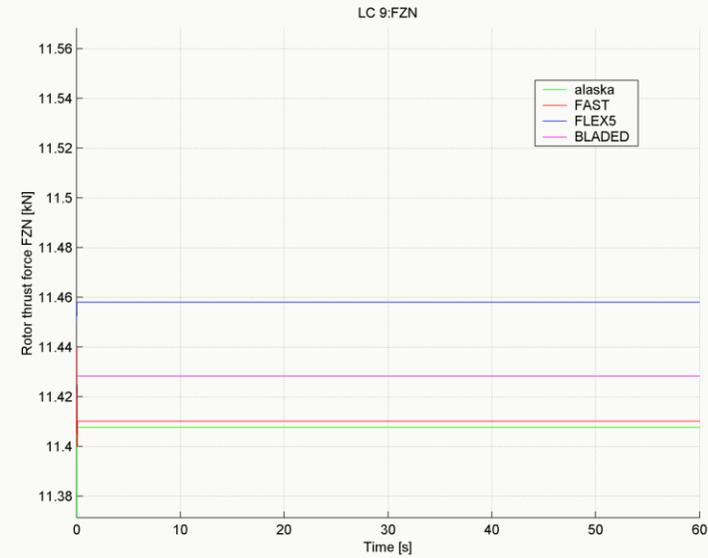
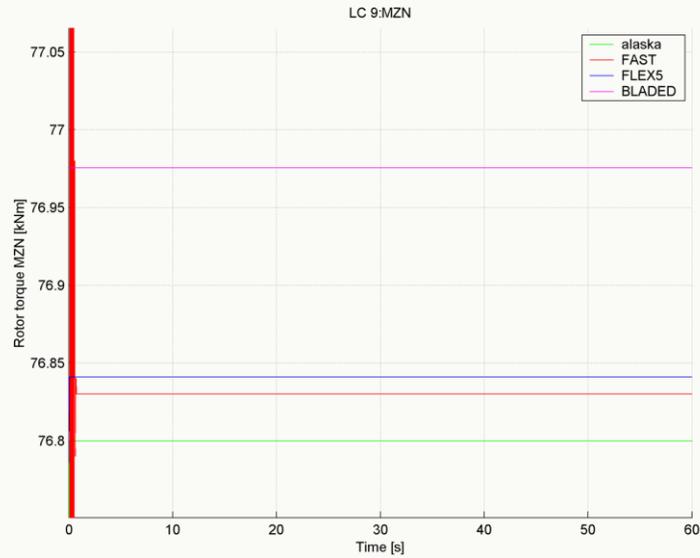


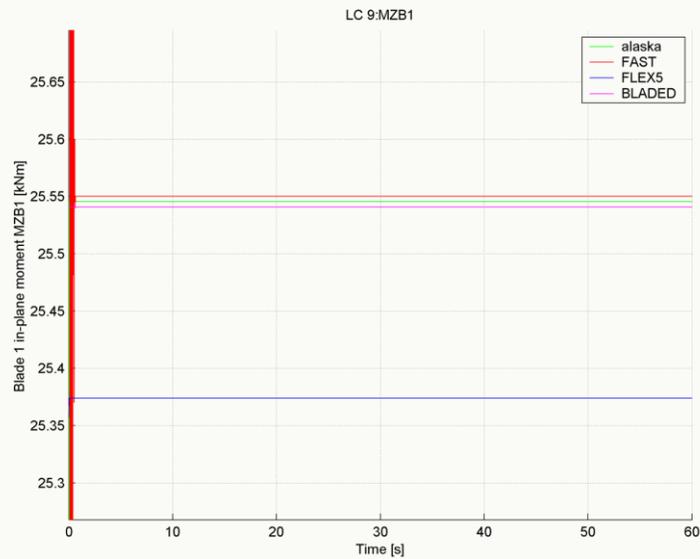
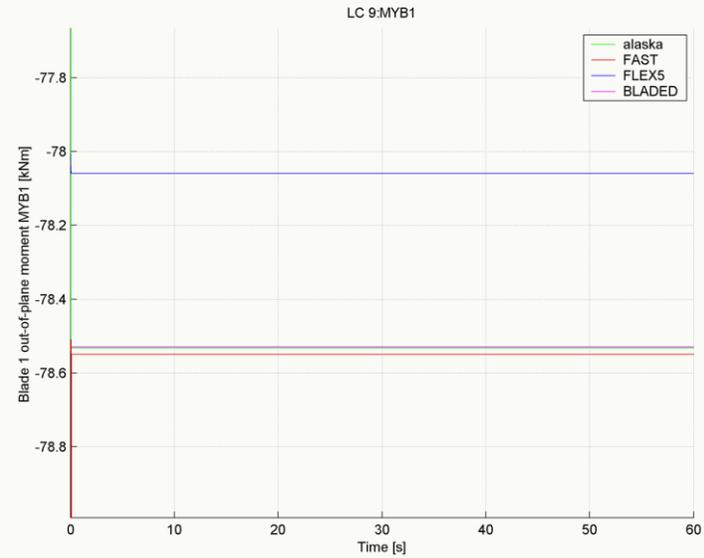
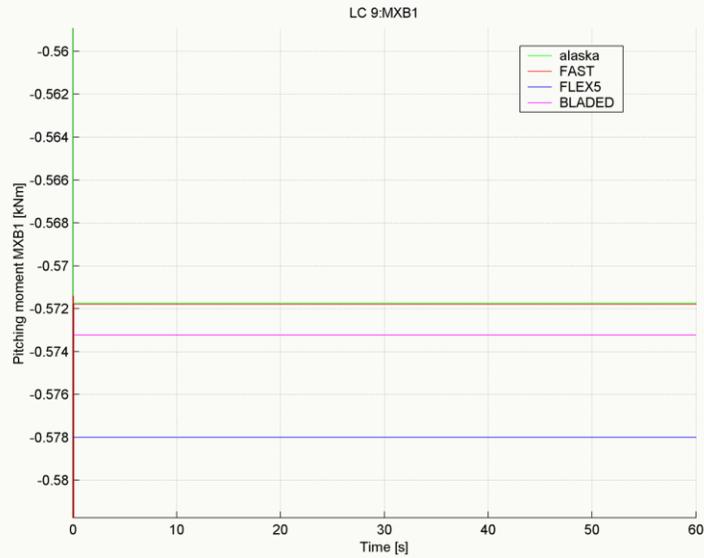
- kein Windshear
- kein Turmschatten
- keine tangentielle Induktion
- stationäre Rotordrehzahl
- starres Anlagenmodell

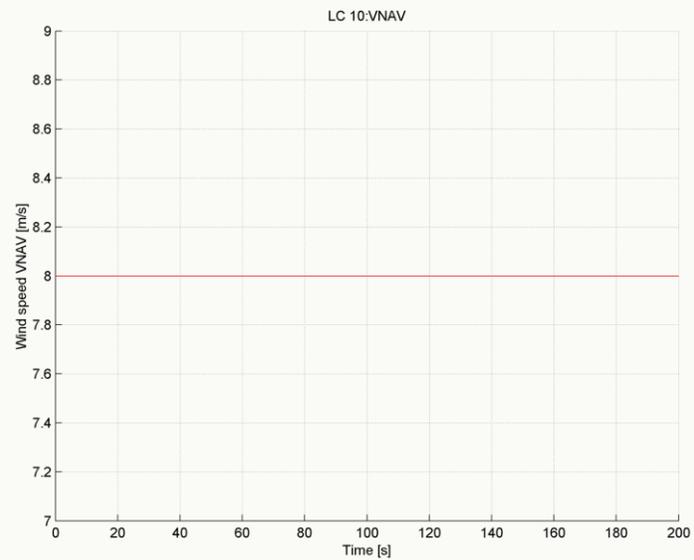
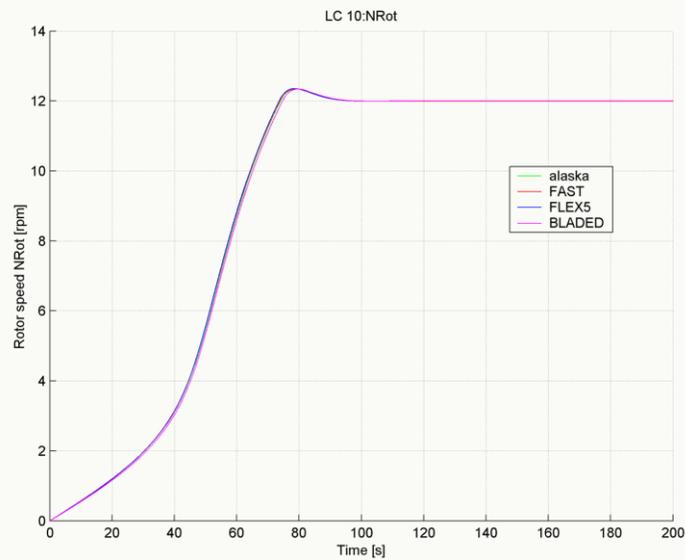
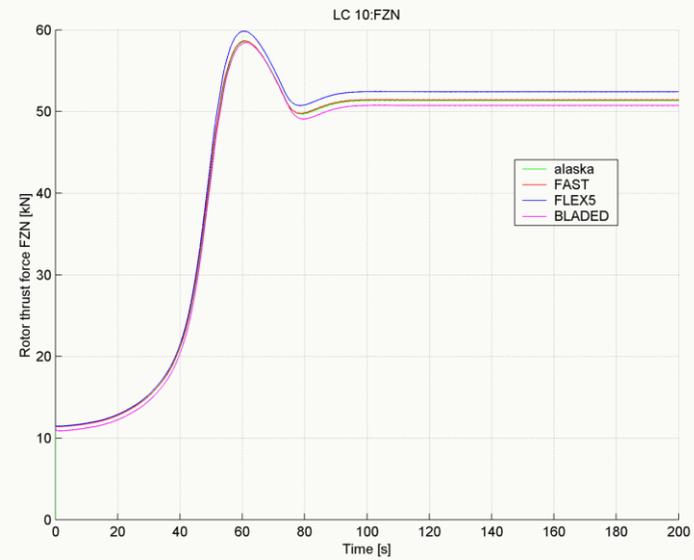
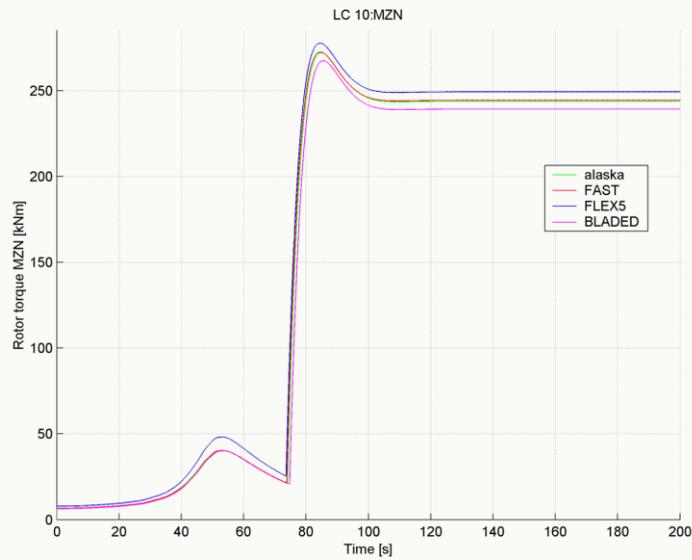
LCGroup III Schräganströmung

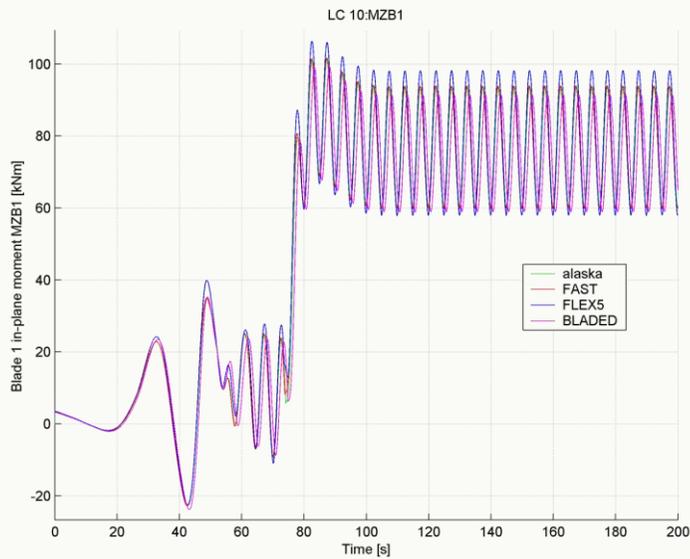
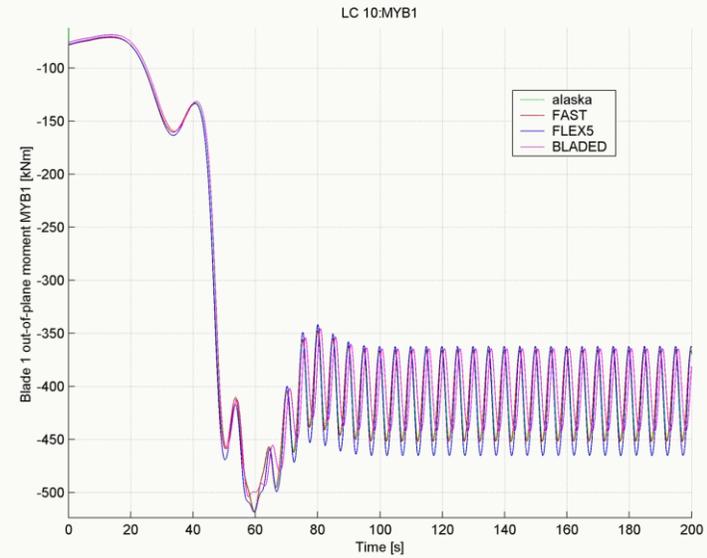
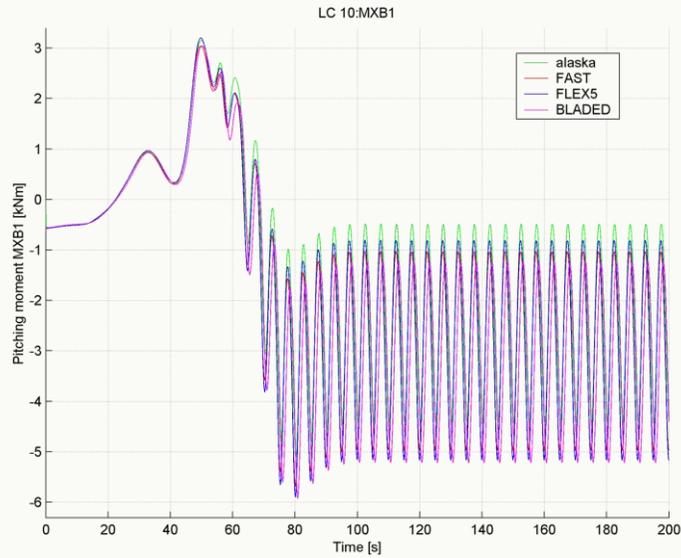
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	V _{hub}	YawErr	Turbulence	Time Step	T _{total}
	Eq/ GDW	None/ Bed/Oye	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	Eq	None	on	off	None	0.02	off	off	fixed, 10°	fixed, 0°	0	off	-	8	20°	off	0,02	60
10	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	12	8	20°	off	0,02	200
11	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	12	8	40°	off	0,02	200
12	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	on	6	8	60°	off	0,02	200
13	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	on	1	8	80°	off	0,02	200
14	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	fixed, 10°	fixed, 0°	0	off	-	8	var1	off	0,02	320

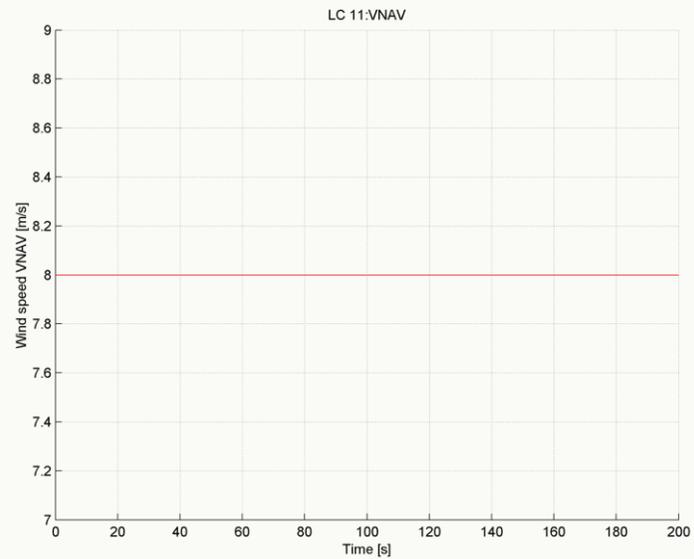
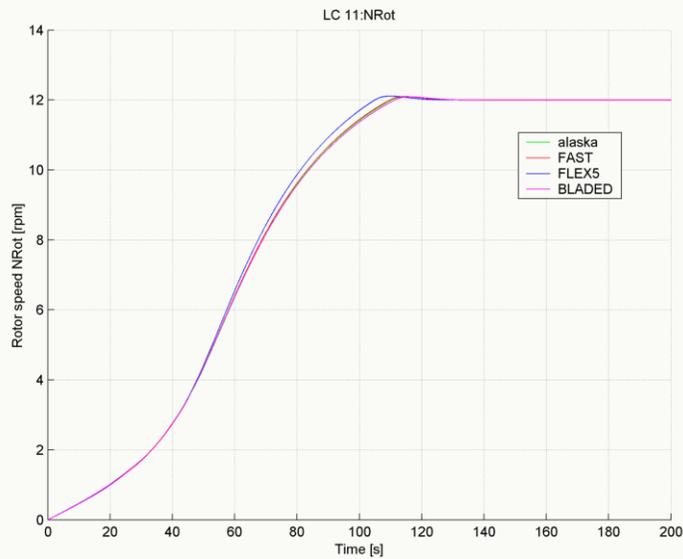
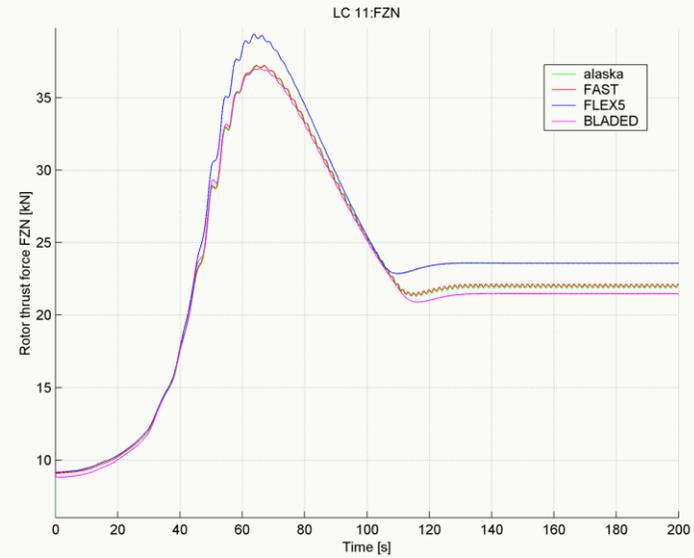
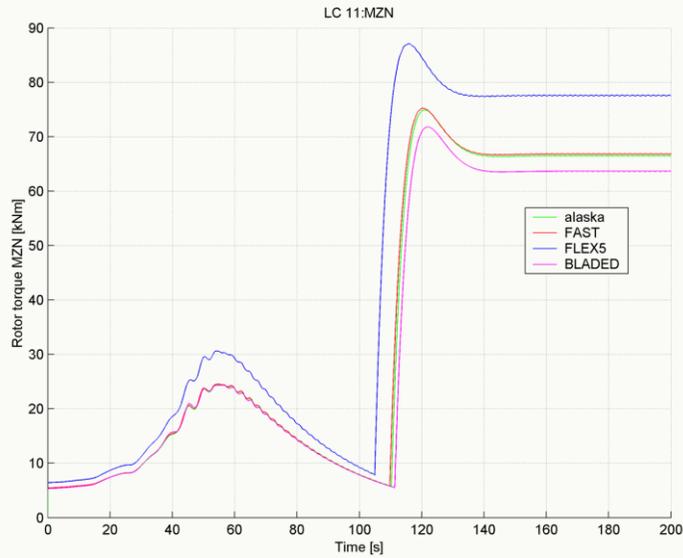
In LCGroup III wird mit Hilfe der Lastfälle 9-14 die Schräganströmungskorrektur validiert. Ziel ist der Vergleich der in den verschiedenen Tools umgesetzten Schräganströmungskorrektur und deren Auswirkung auf das Rotormoment.

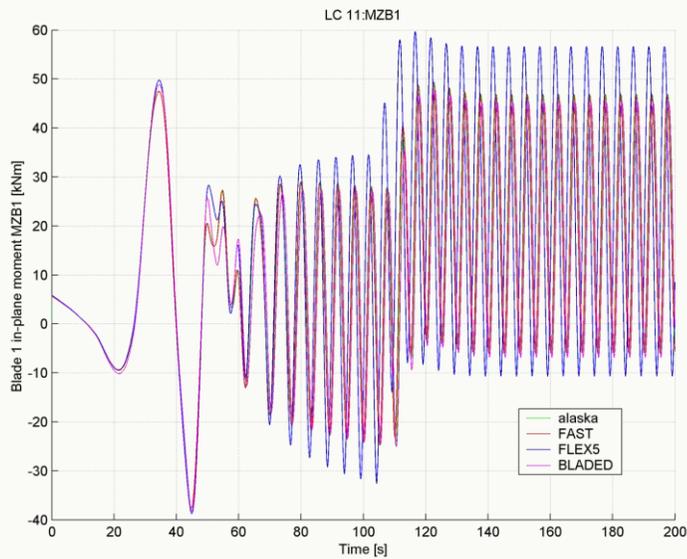
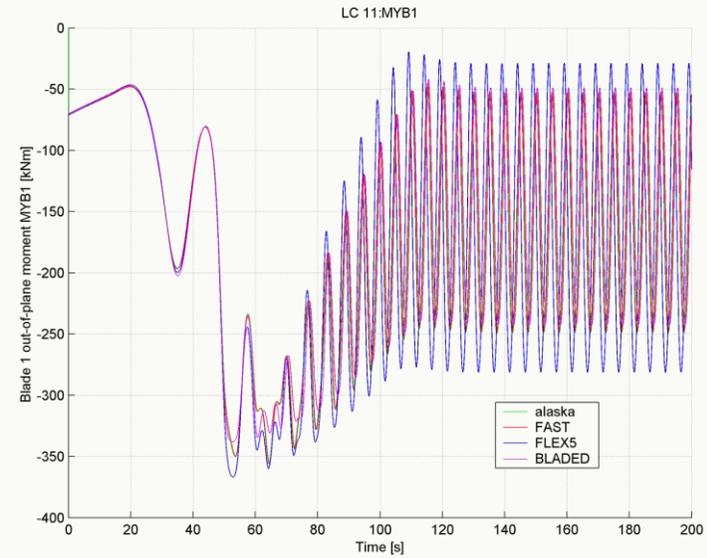
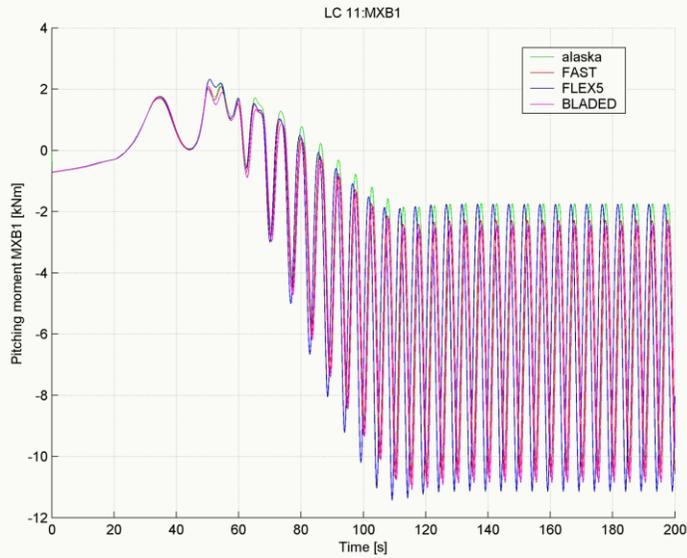


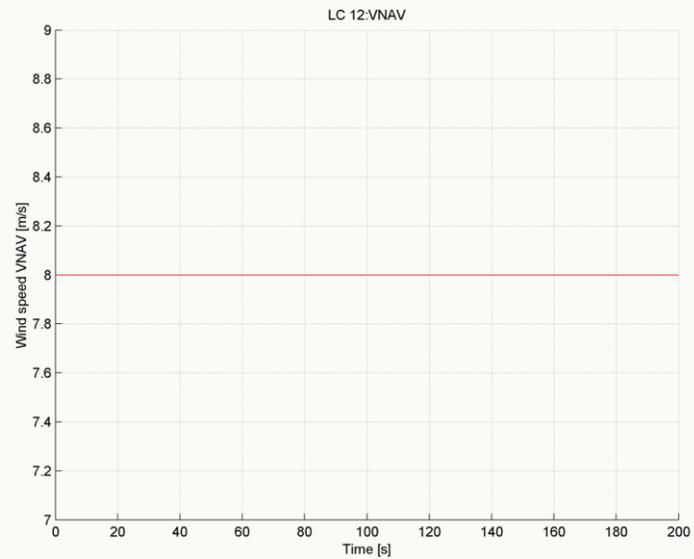
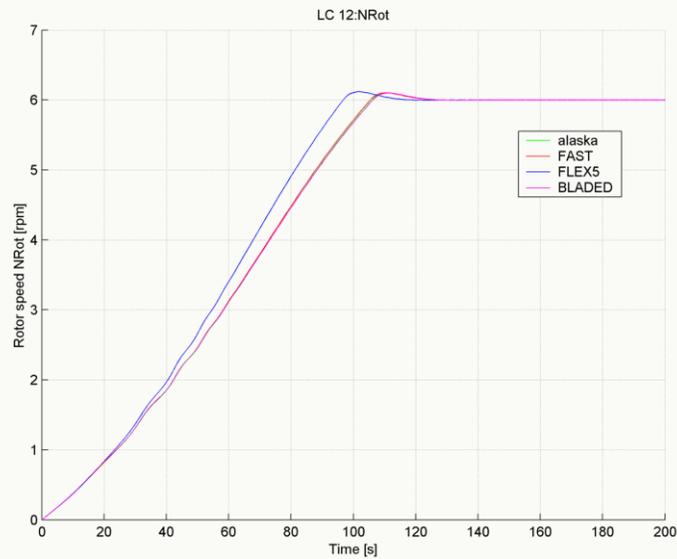
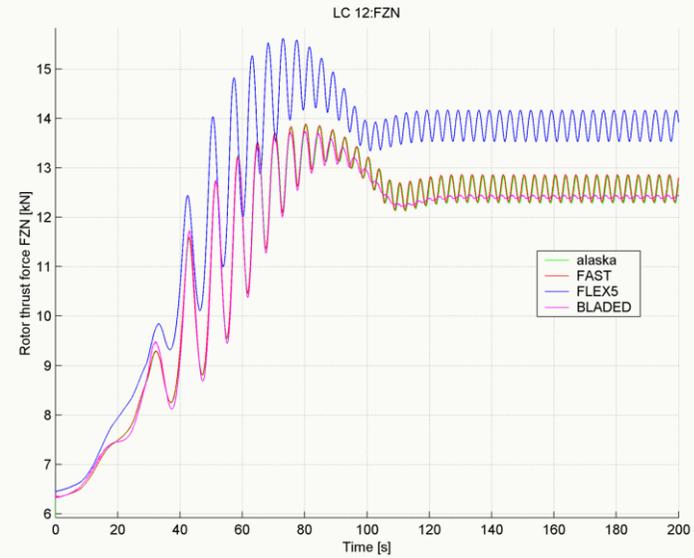
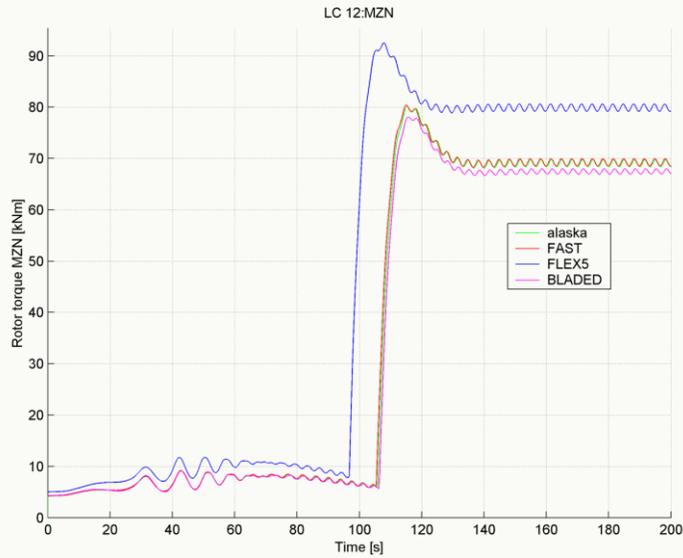


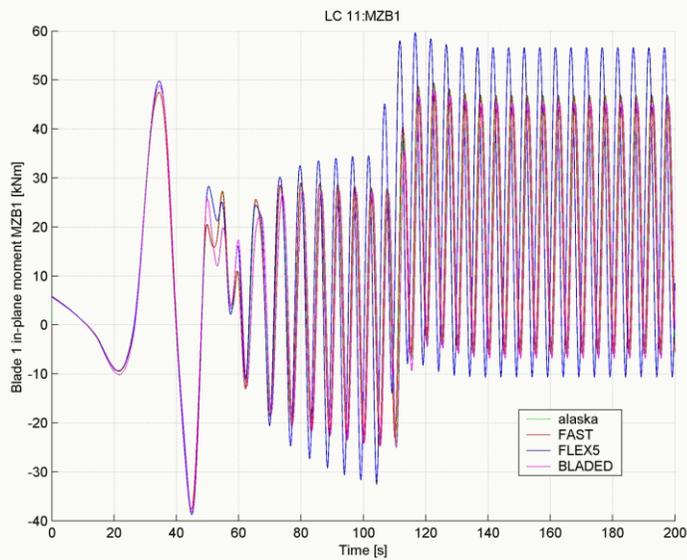
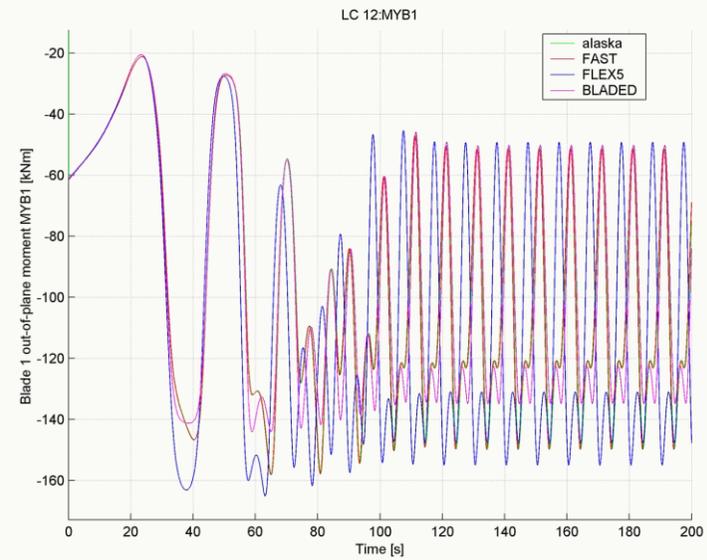
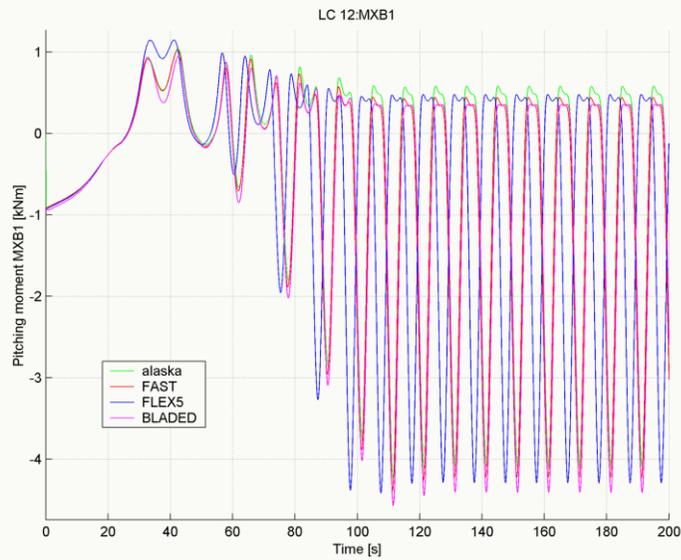


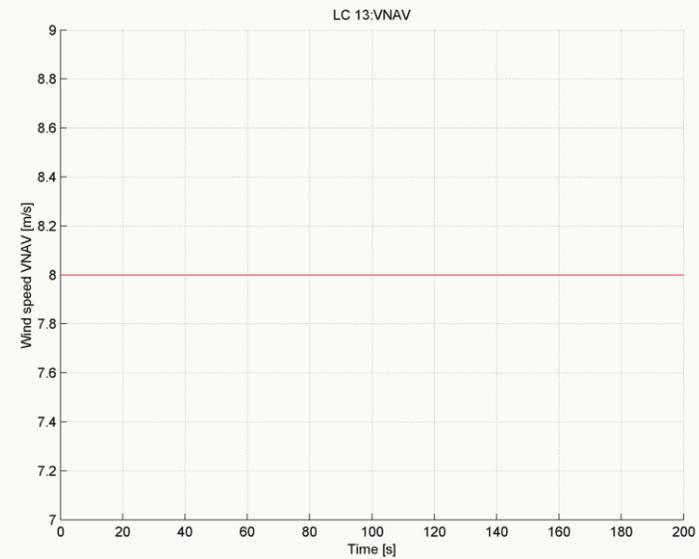
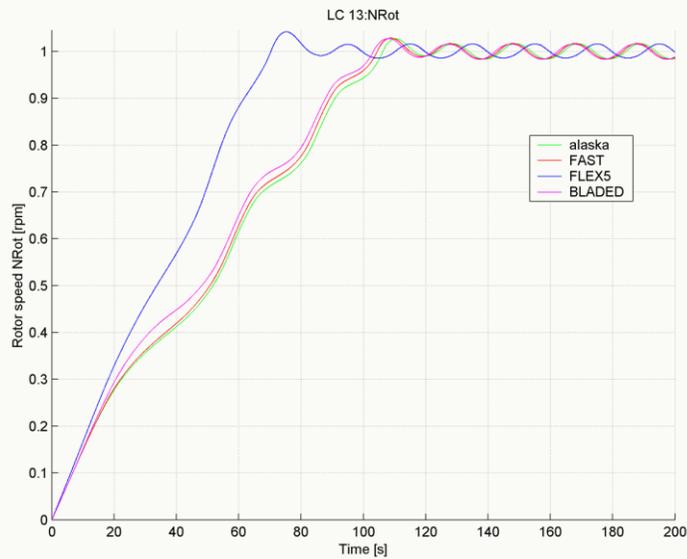
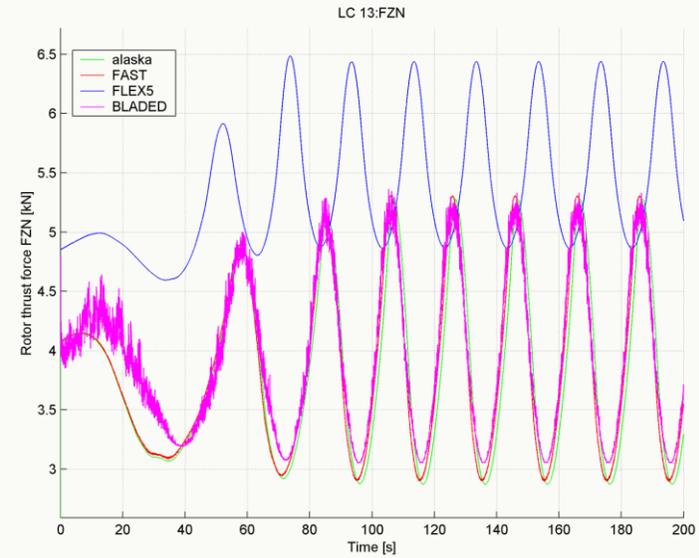
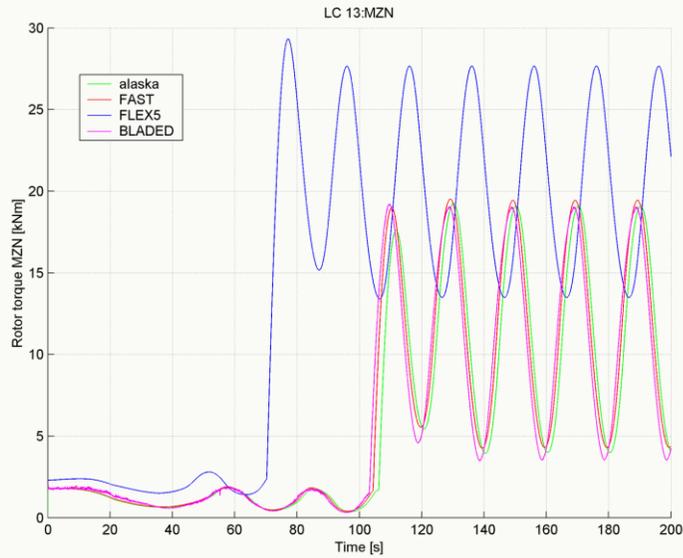


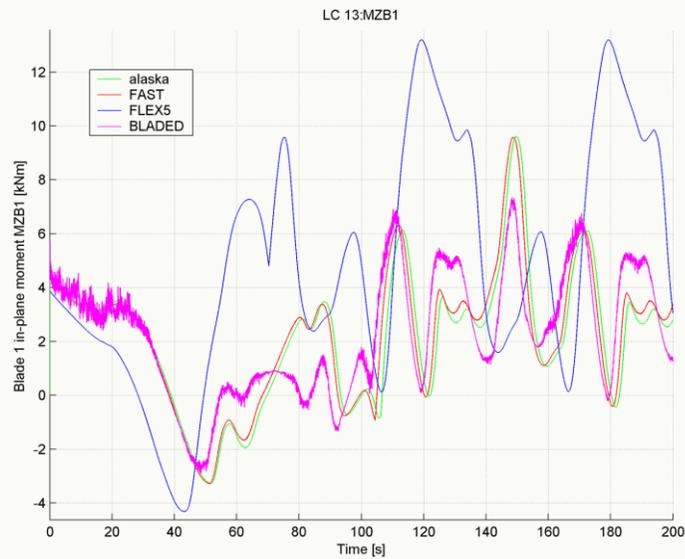
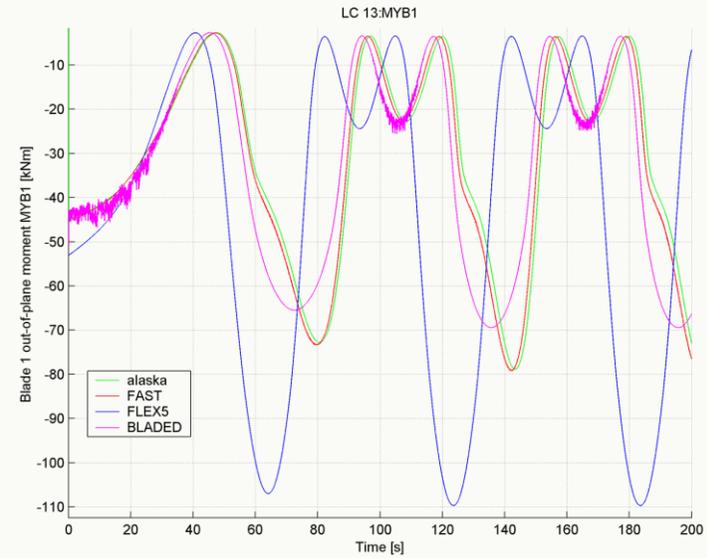
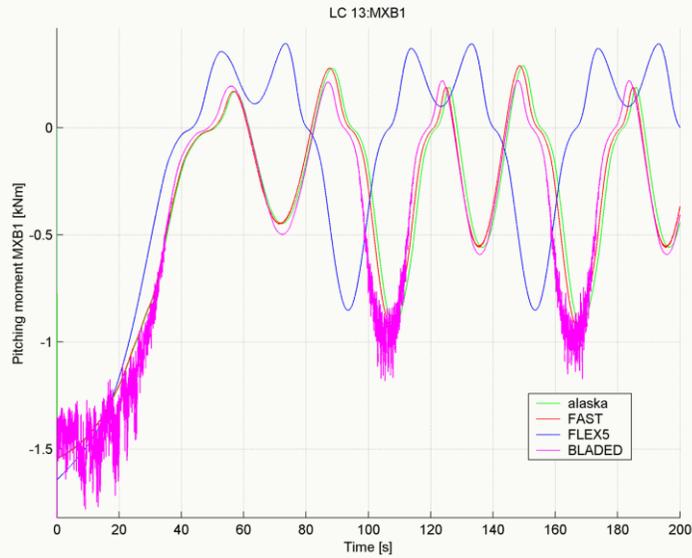


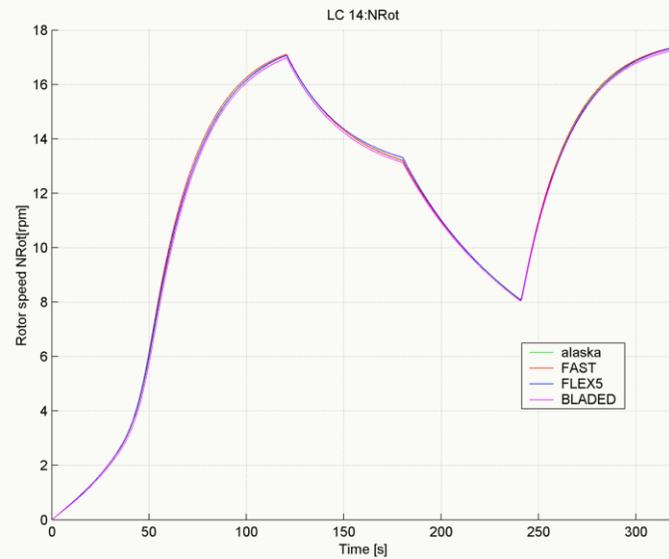
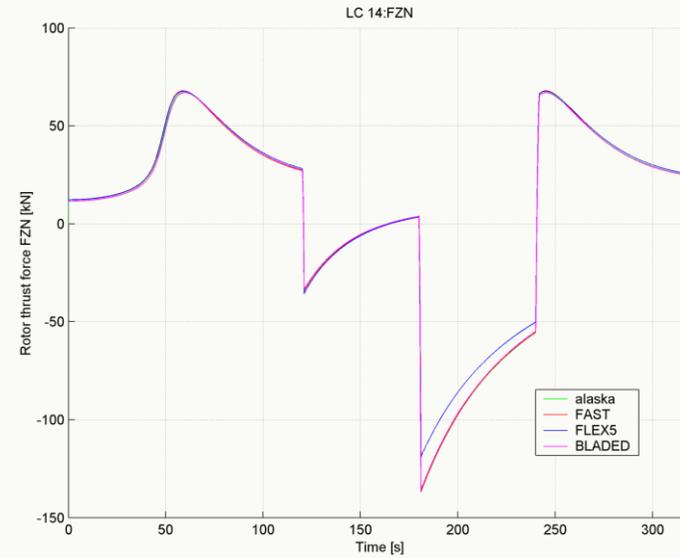
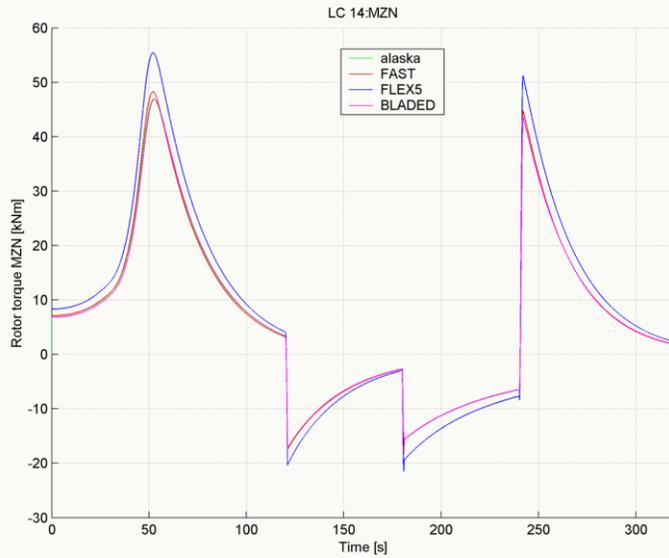


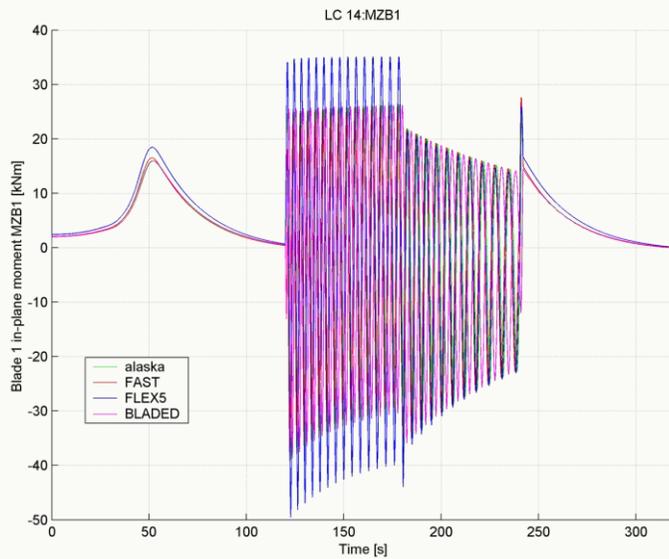
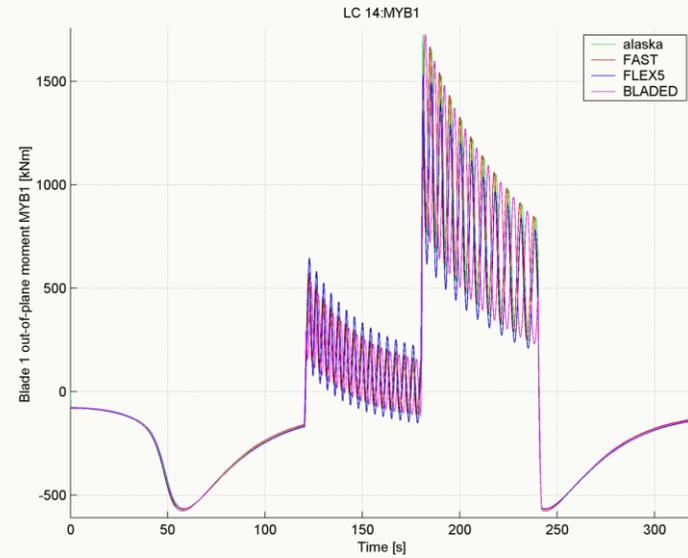
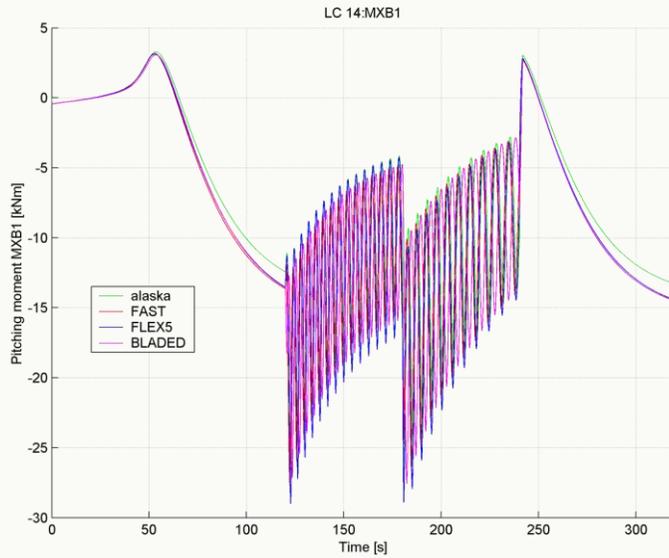










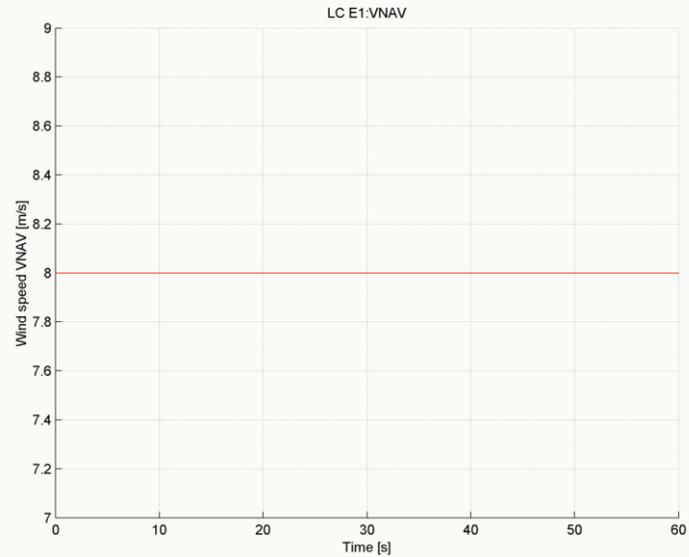
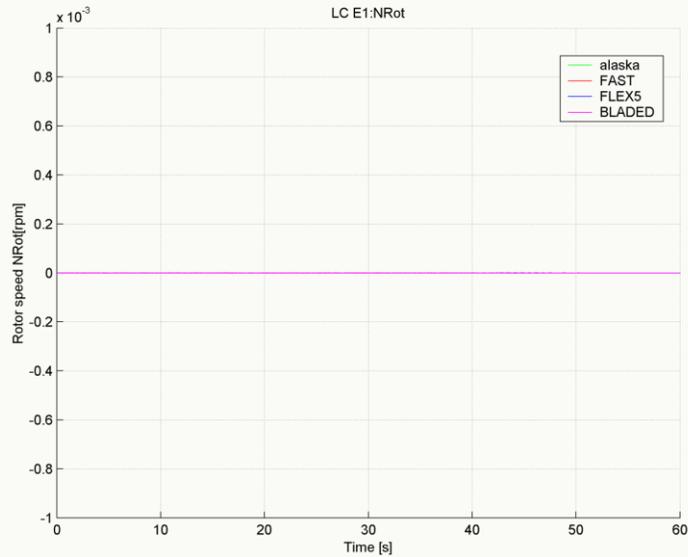
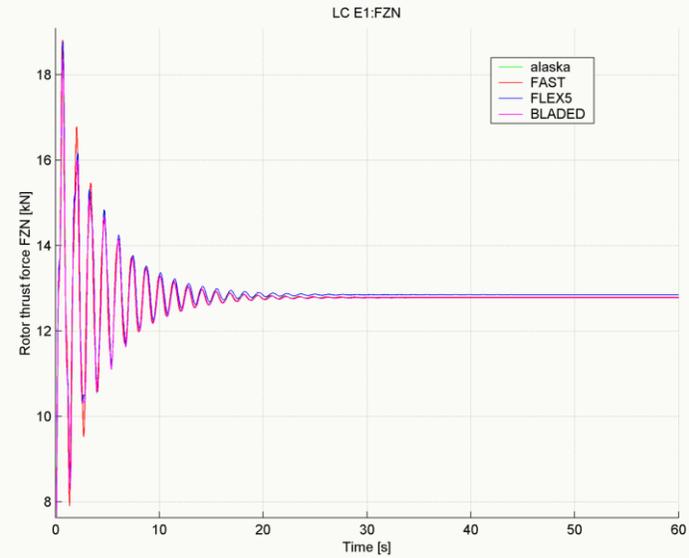
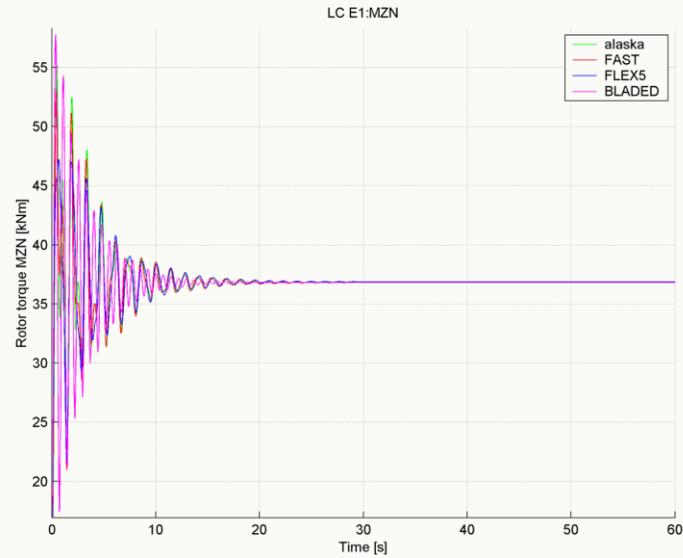


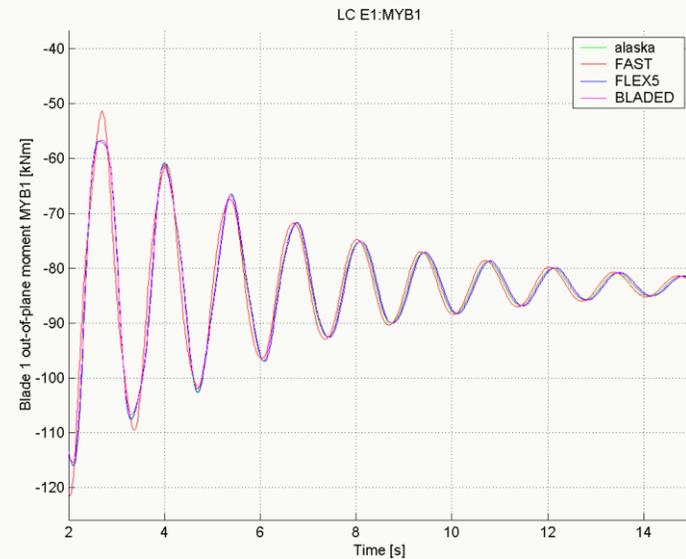
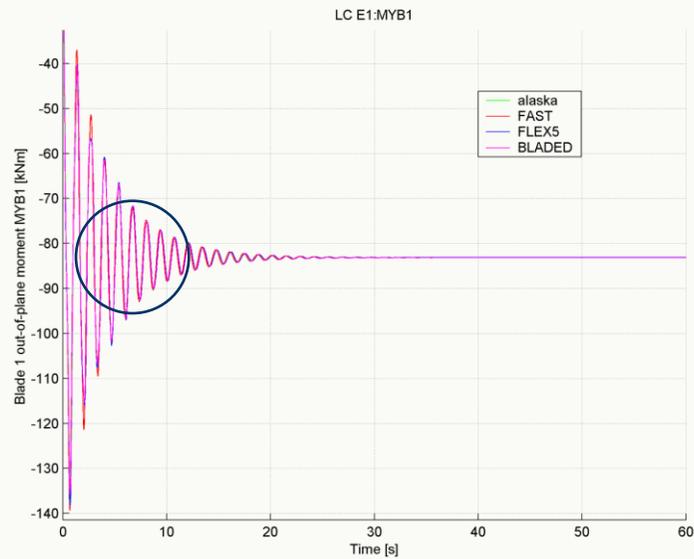
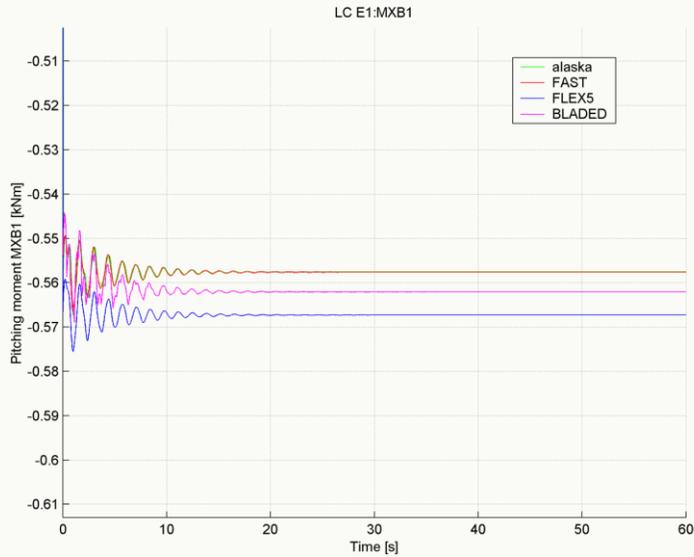
- kein Windshear
- kein Turmschatten
- keine tangentielle Induktion
- flexibles Blattmodell
- flexibles Turmmodell

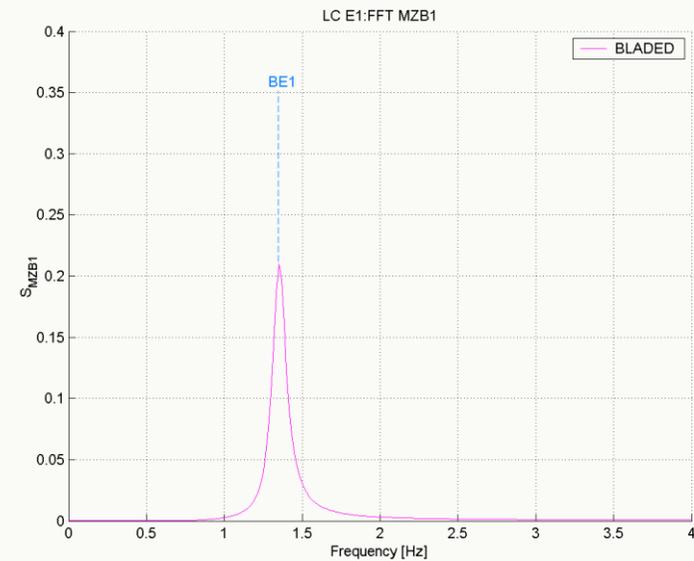
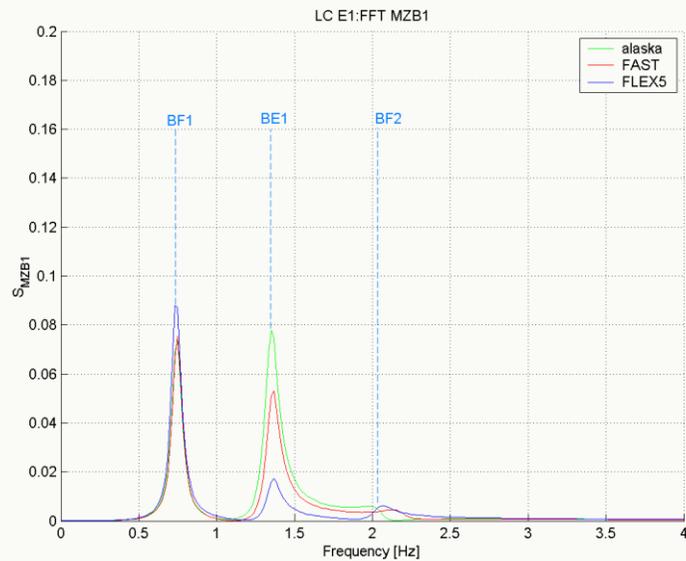
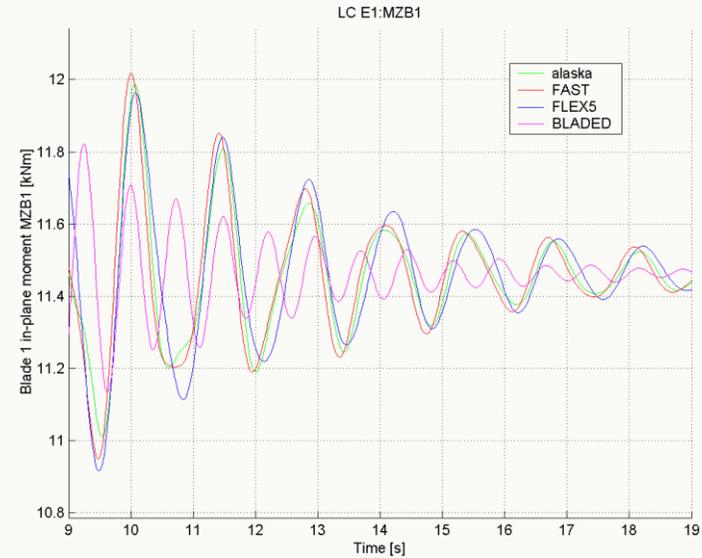
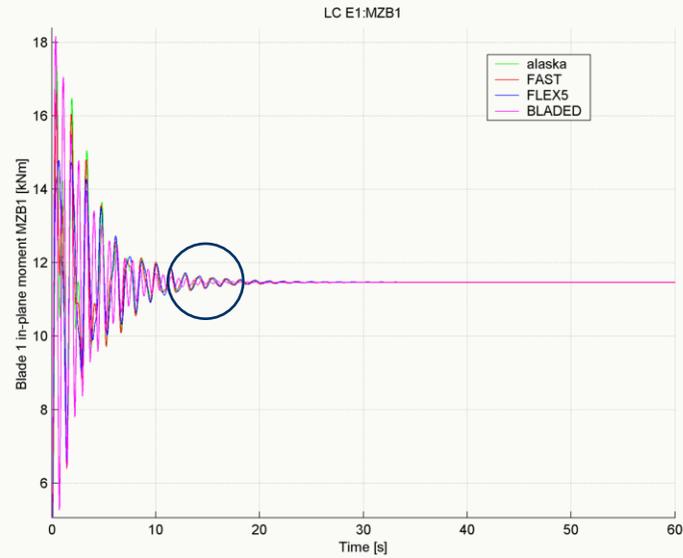
LCGroup I_Elastic

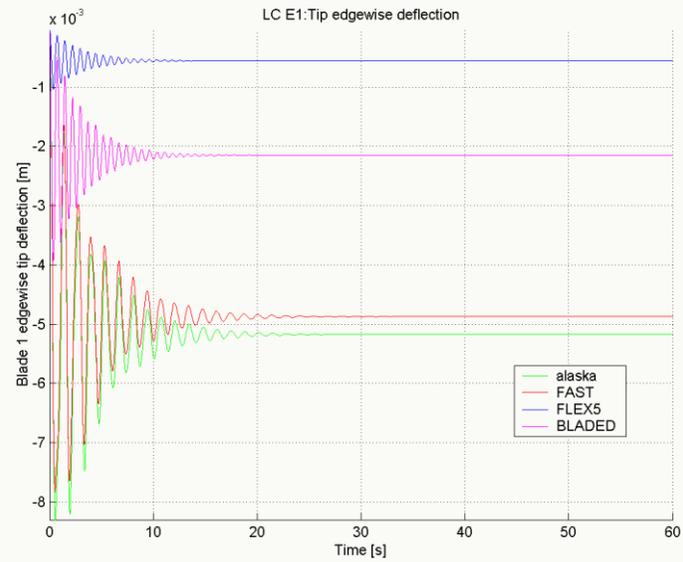
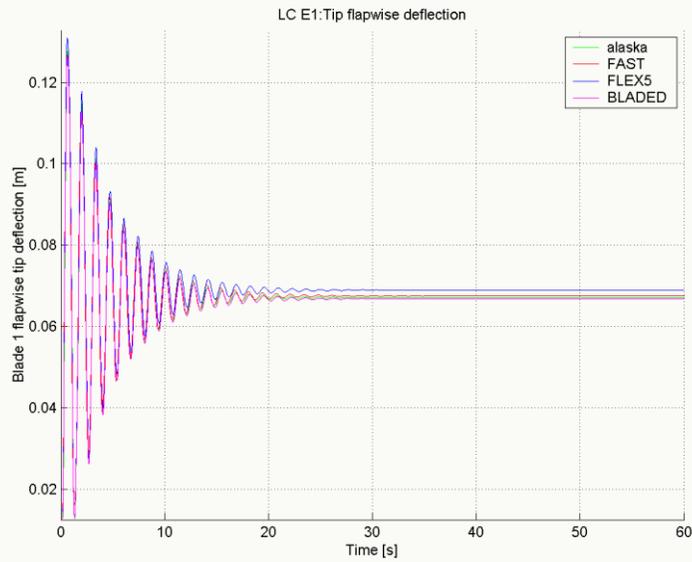
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model										Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Blade DOF 2 Flap, 1 Edge	Tower DOF 2 side-to-side 2 fore-aft	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	Demanded Rotor Speed	v_{Hub}	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 Blatt oder aber Turmmodell simuliert. Ziel ist die Validierung der elastischen Strukturen innerhalb des Gesamtanlagenmodells. Untersucht werden Schnittkräfte und Schnittmomente an Blatt und Turm sowie Blattdurchbiegungen.

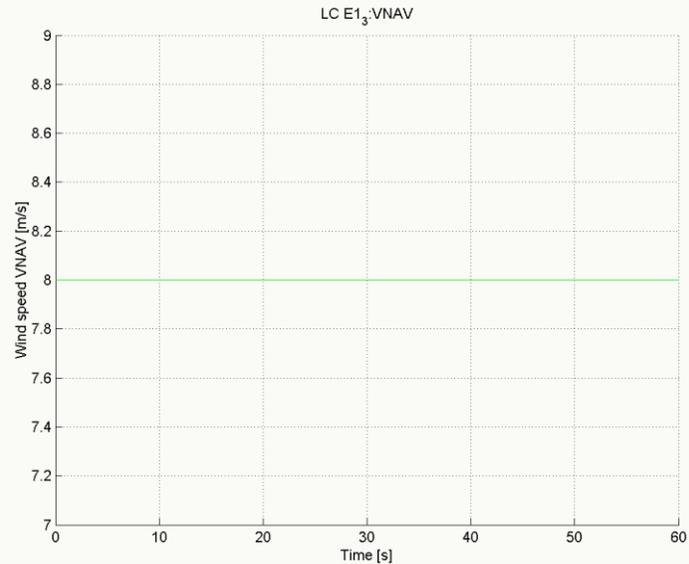
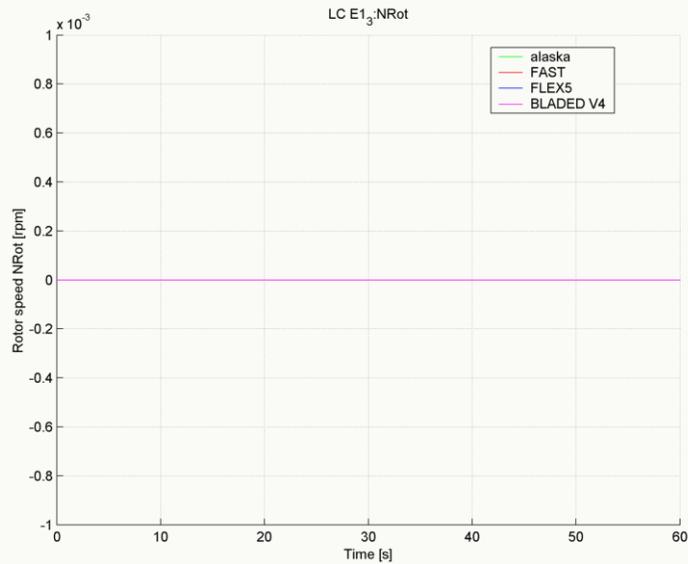
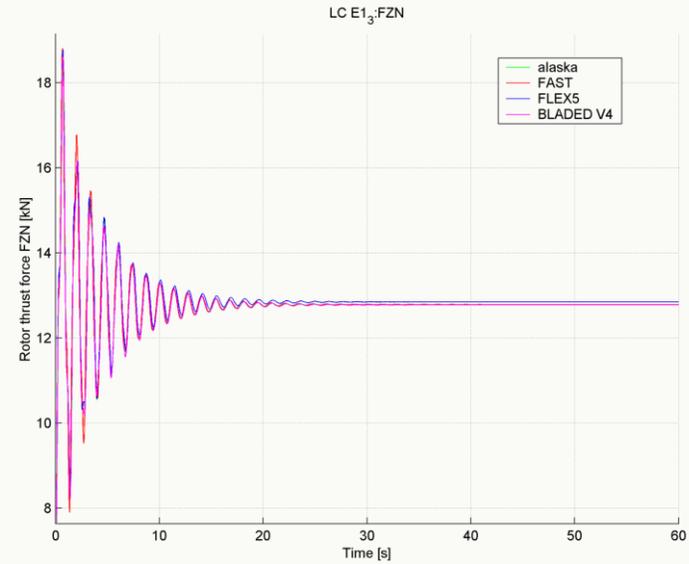
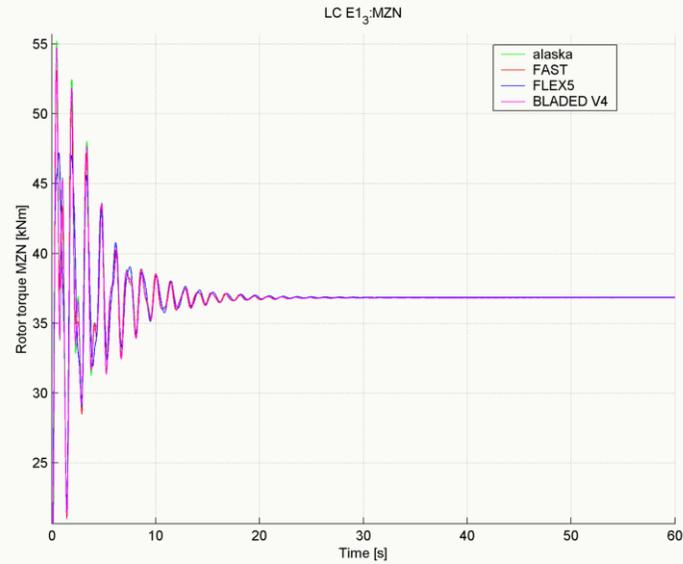


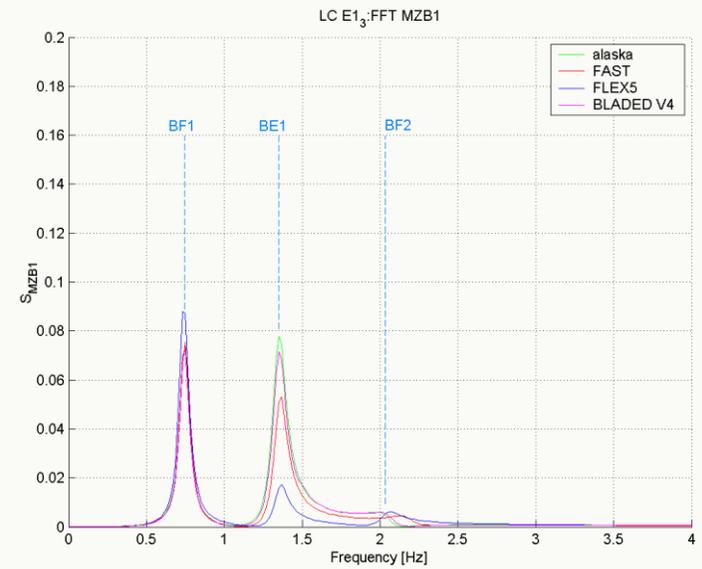
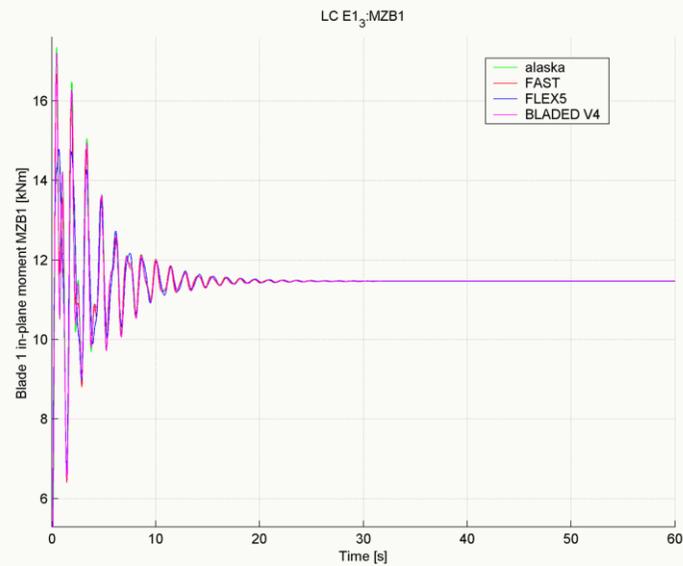
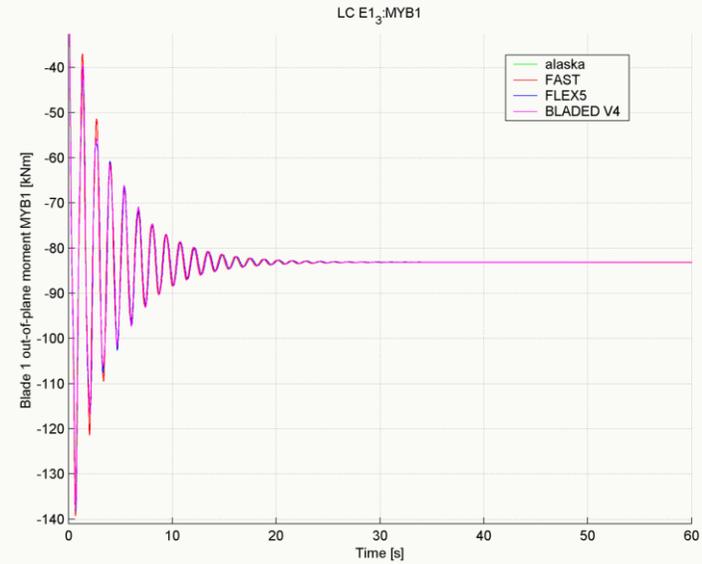
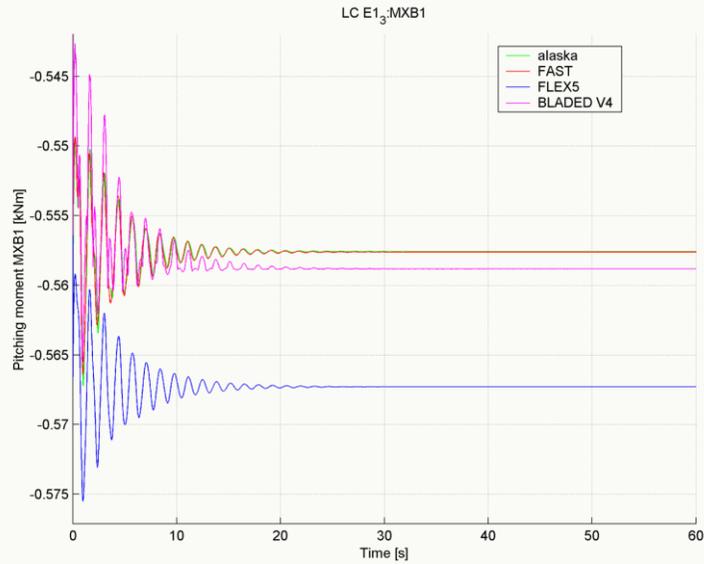


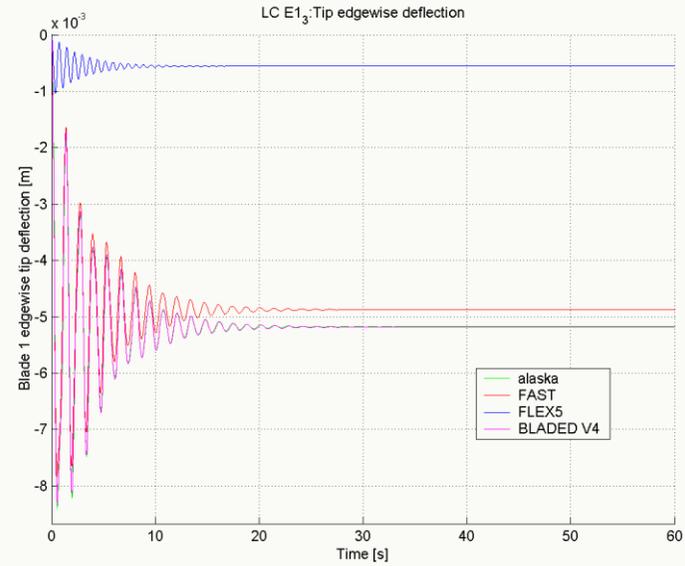
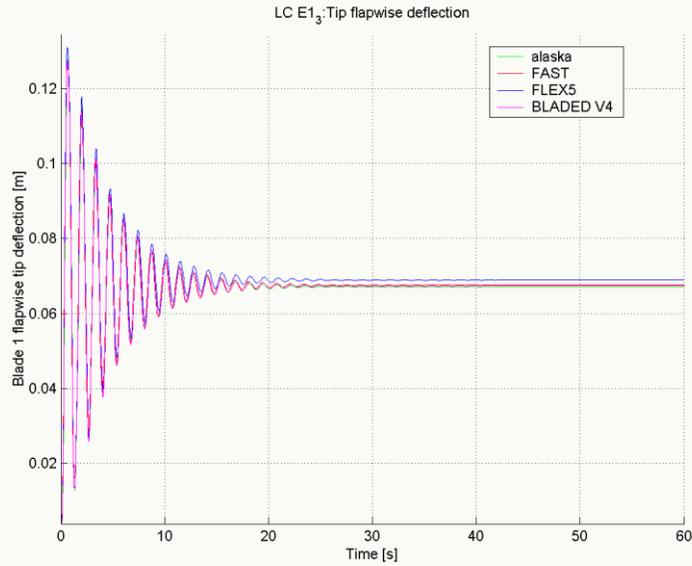


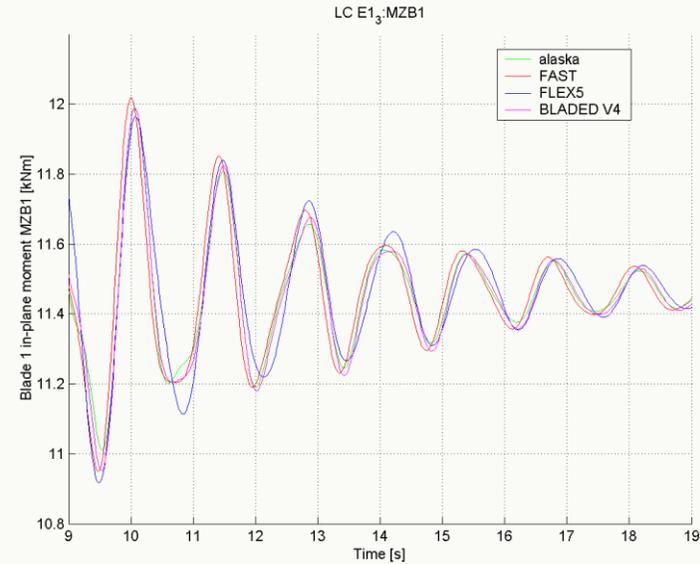
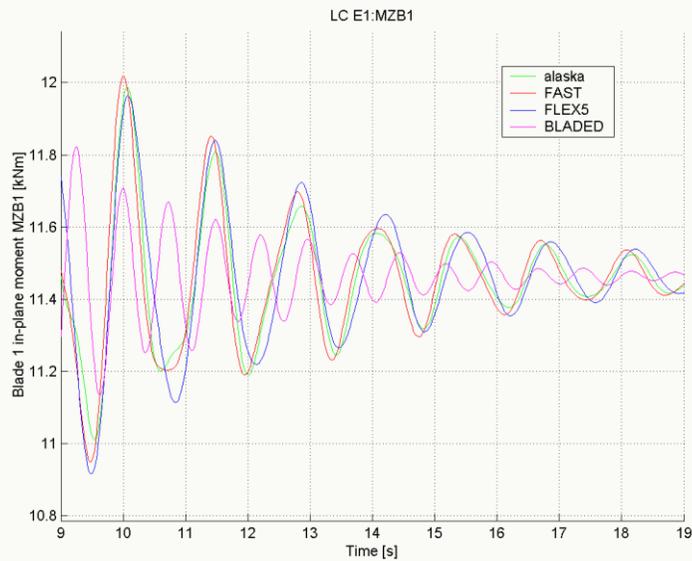


Der Lastfall LC E1_3 entspricht dem Lastfall LC E1 mit dem Unterschied das die BLADED Ergebnisse mit der neuen MKS-Version BLADED V4 erzeugt wurden. In dieser Version sind nach Angabe von Garrad Hassan die Blattmoden gekoppelt und die Beschreibung erfolgt bzgl. des Blattkoordinatensystems. Das bedeutet eine zum alaska Blattmodell äquivalente Beschreibung. Der Vergleich wurde hier mit aufgenommen um die MKS-Blattmodelle von alaska und BLADED V4 validieren zu können, und möglich Ursachen für die Abweichungen der Ergebnisse im Lastfall LC E1 zu finden.

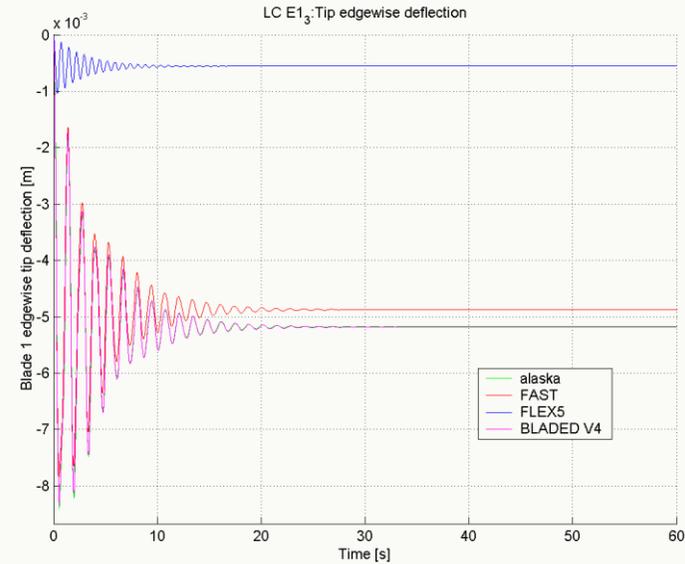
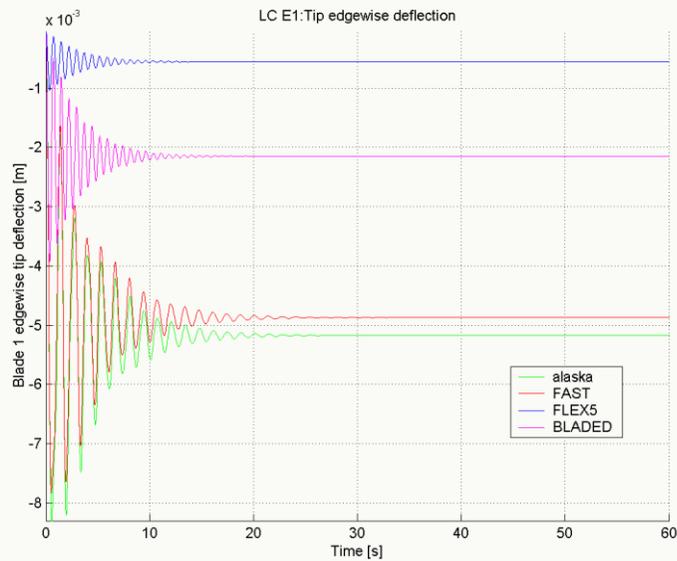




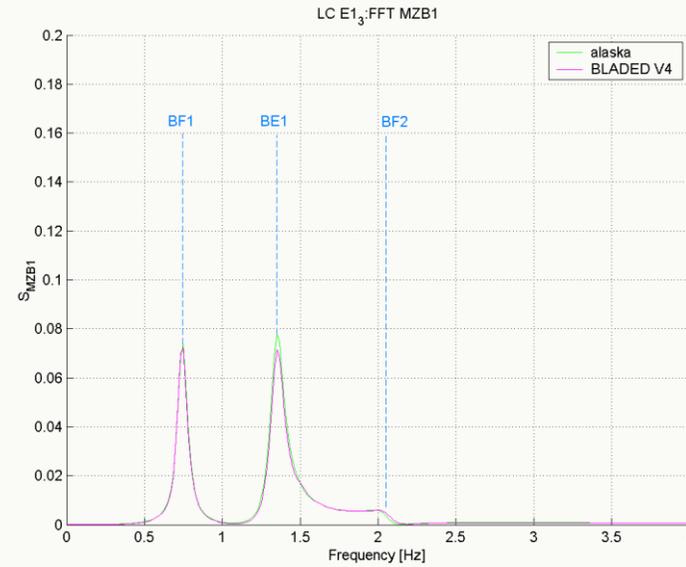
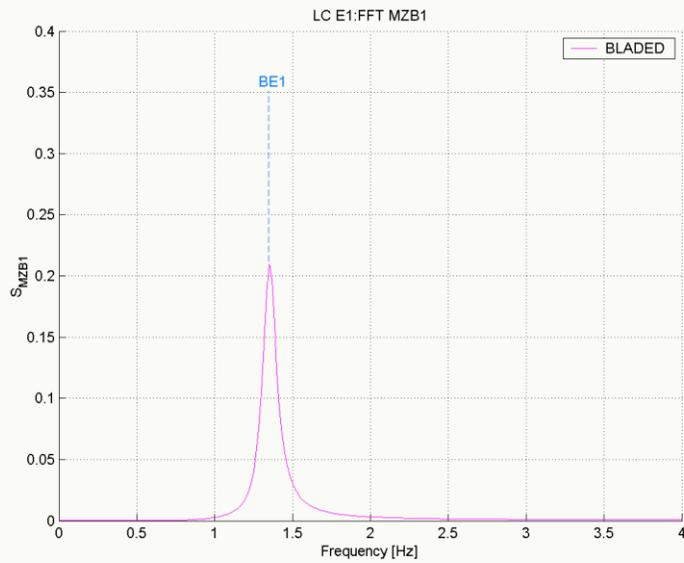




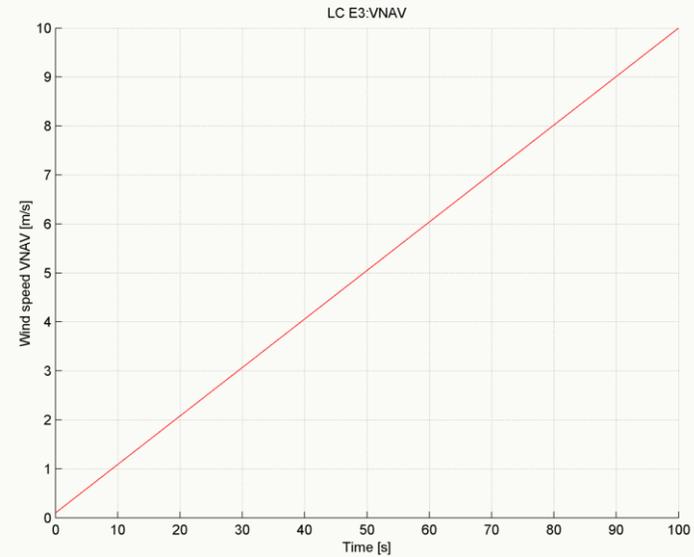
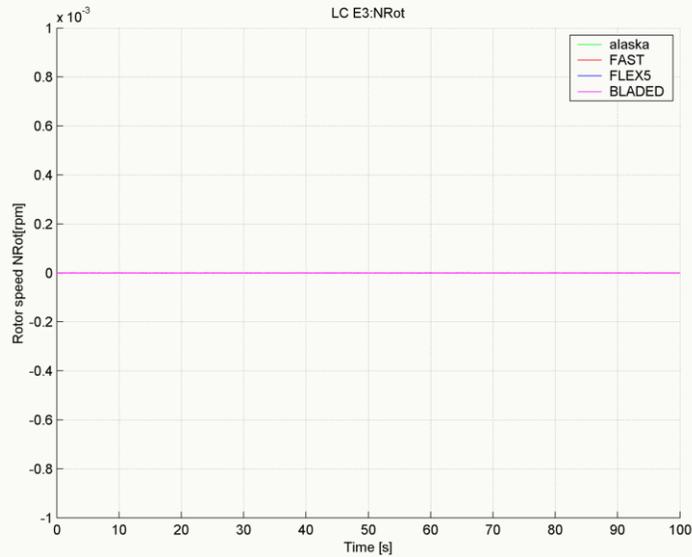
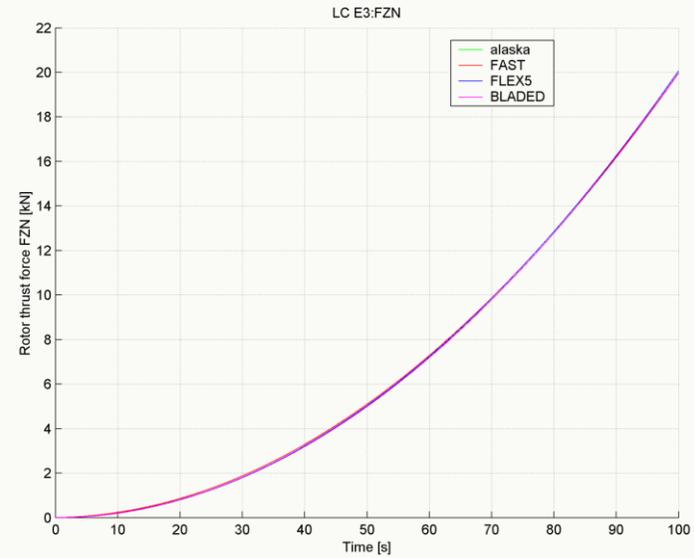
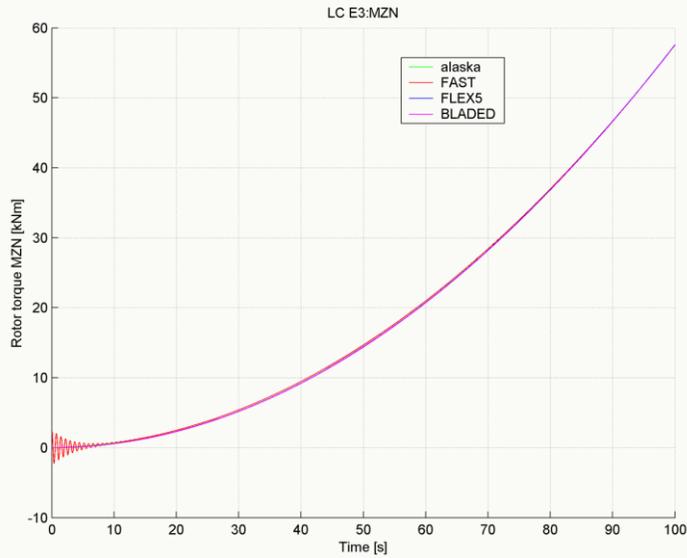
Vergleich des Schwenkmomentes für BLADED V3.82 und BLADED V4

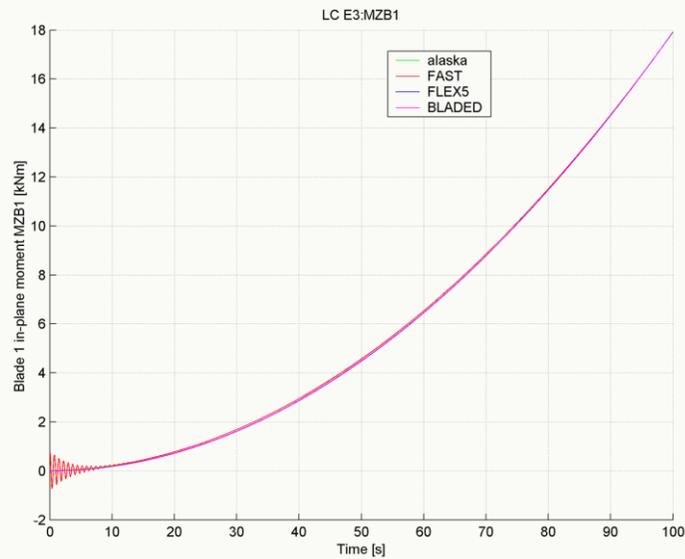
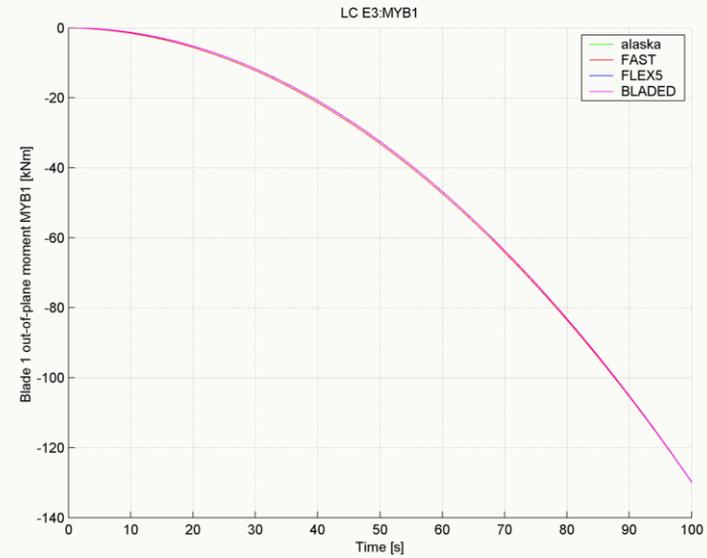
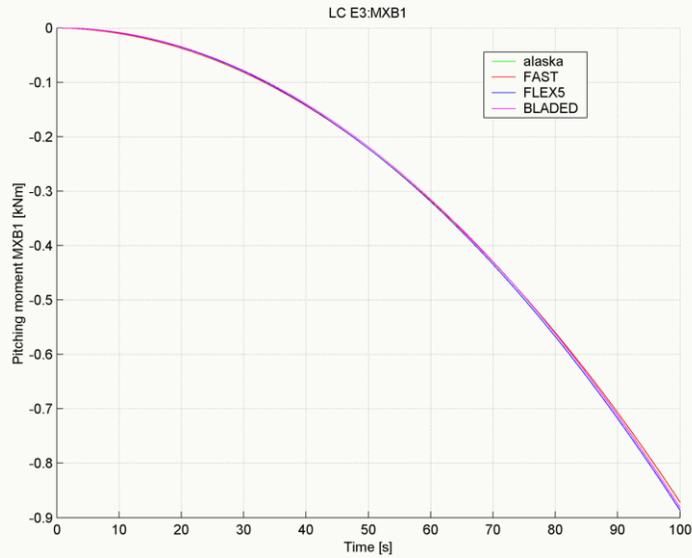


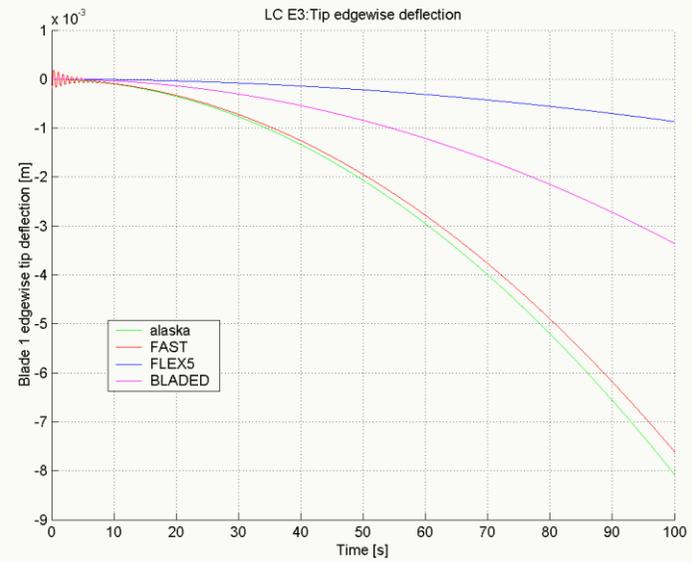
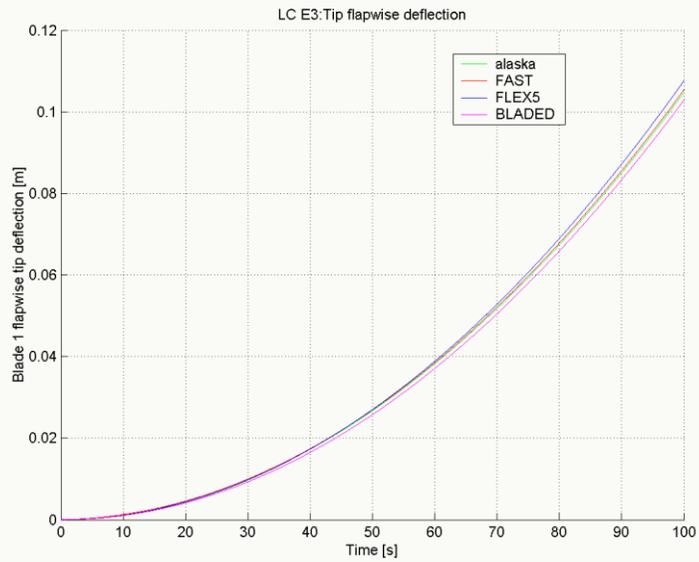
Vergleich der Blattbiegung in der Rotorebene für BLADED V3.82 und BLADED V4

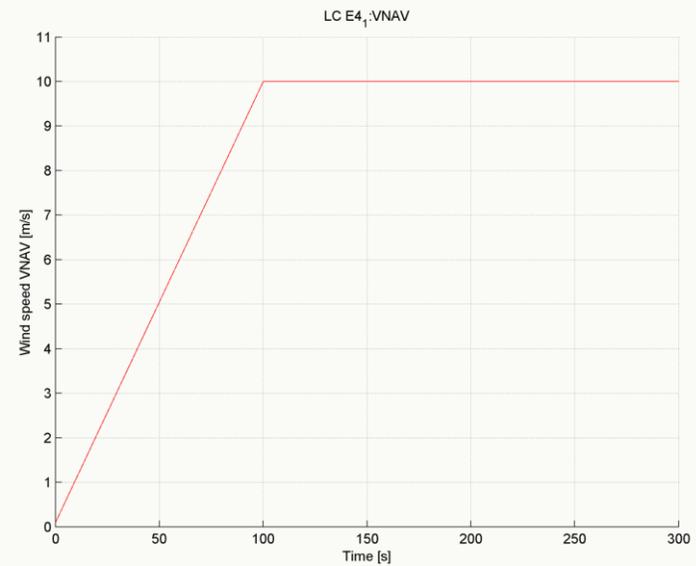
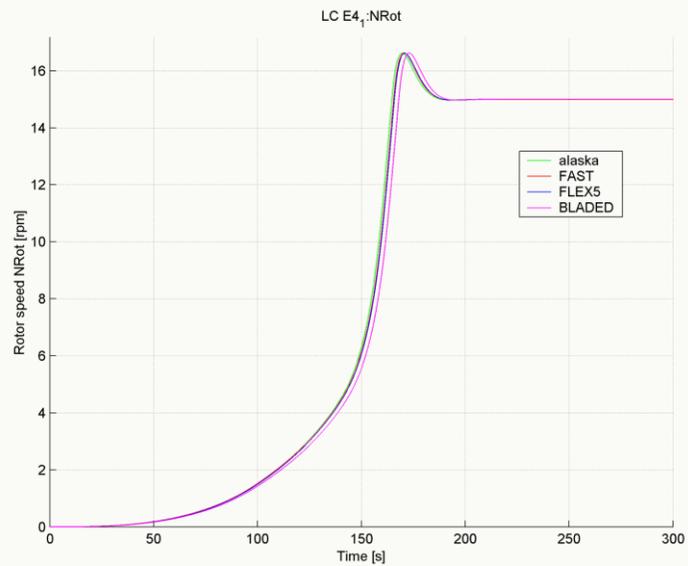
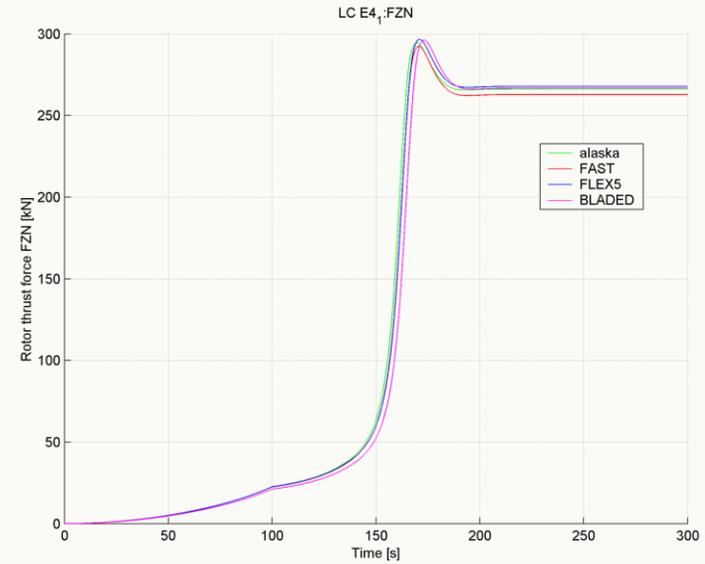
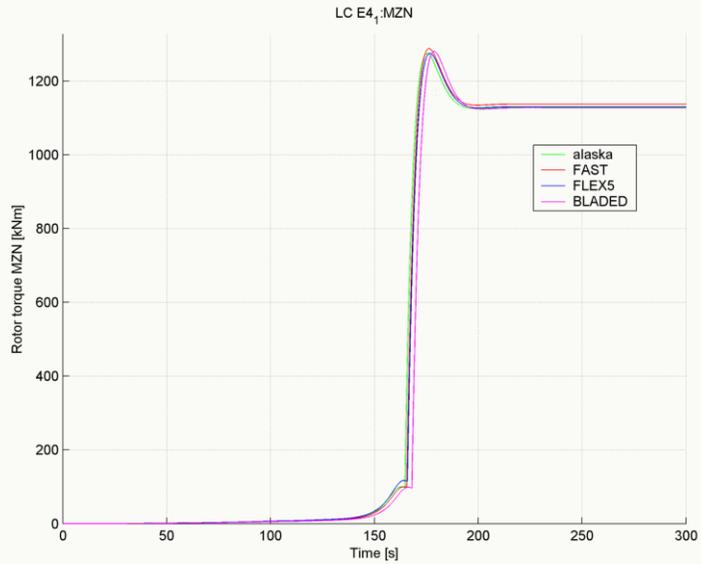


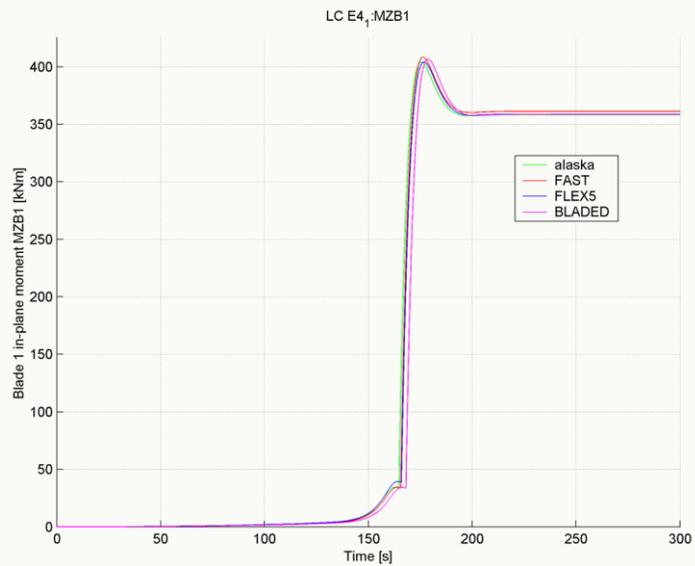
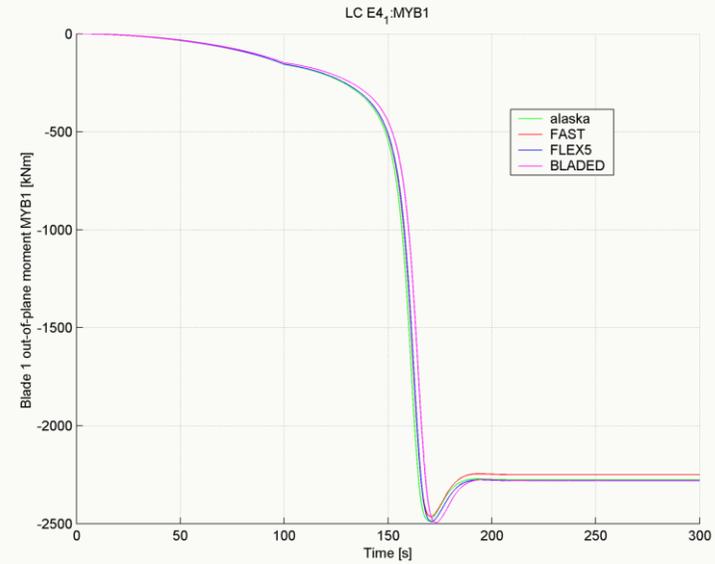
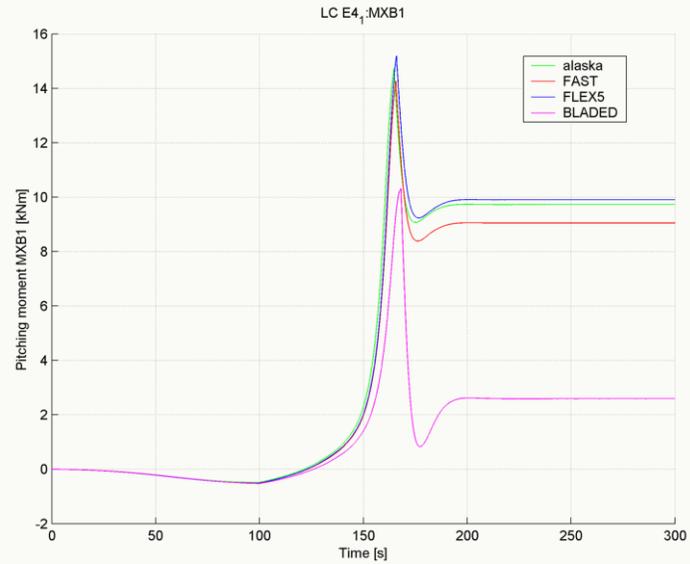
Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4

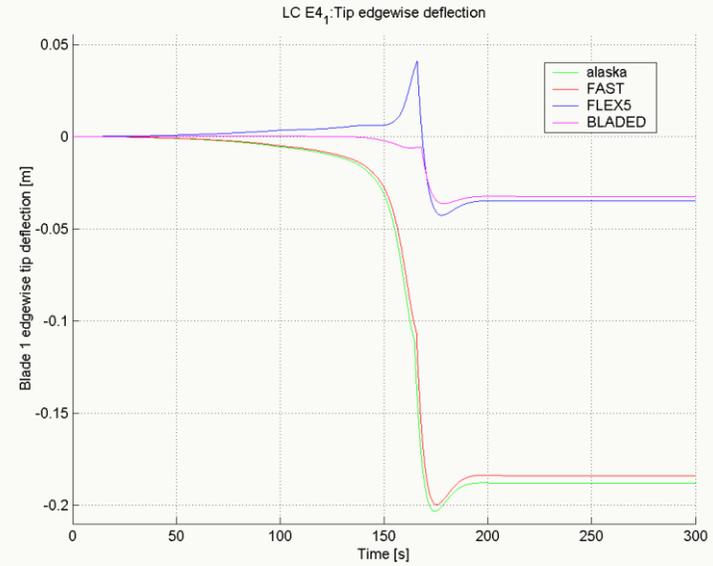
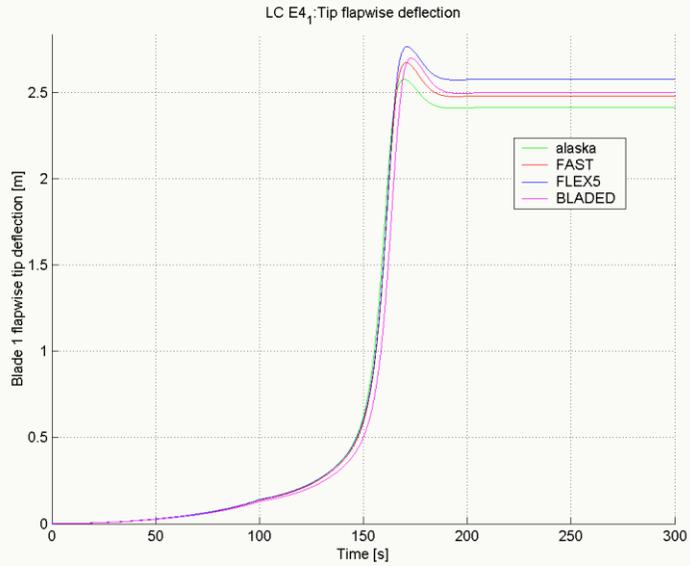




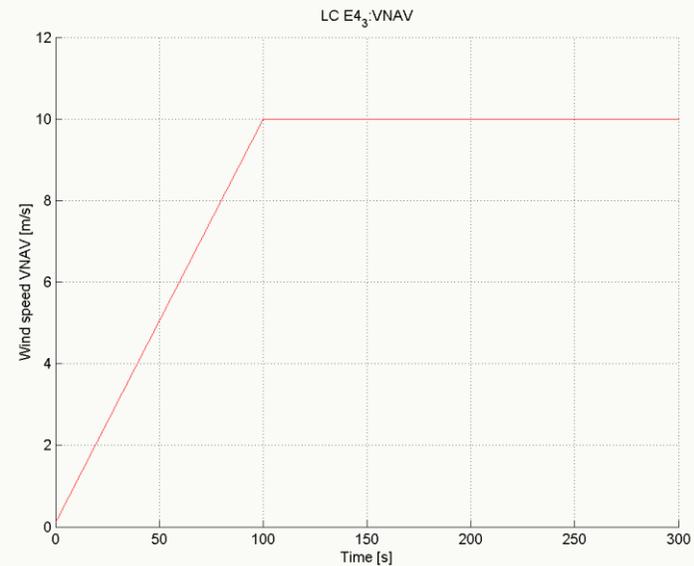
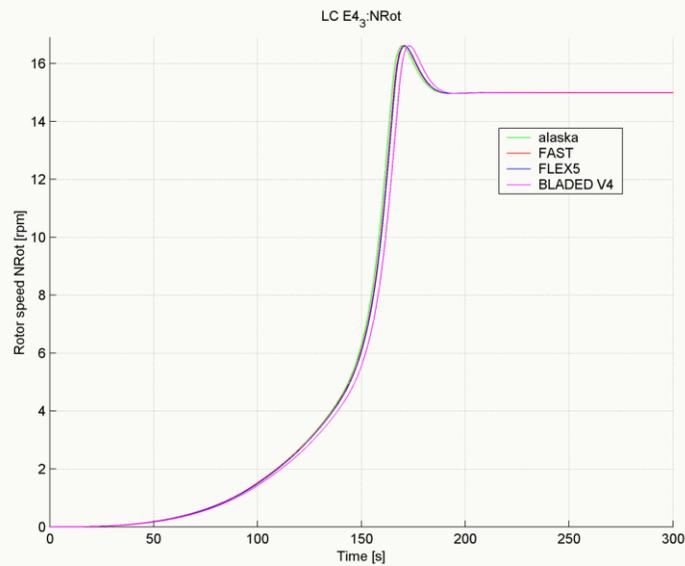
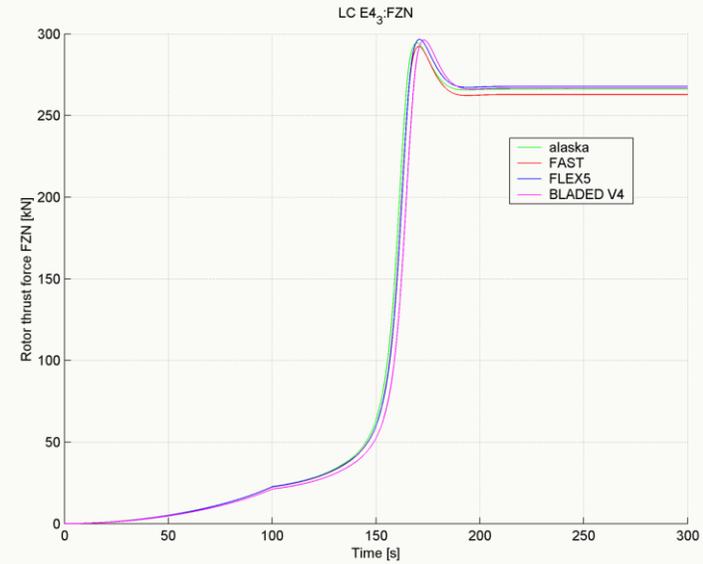
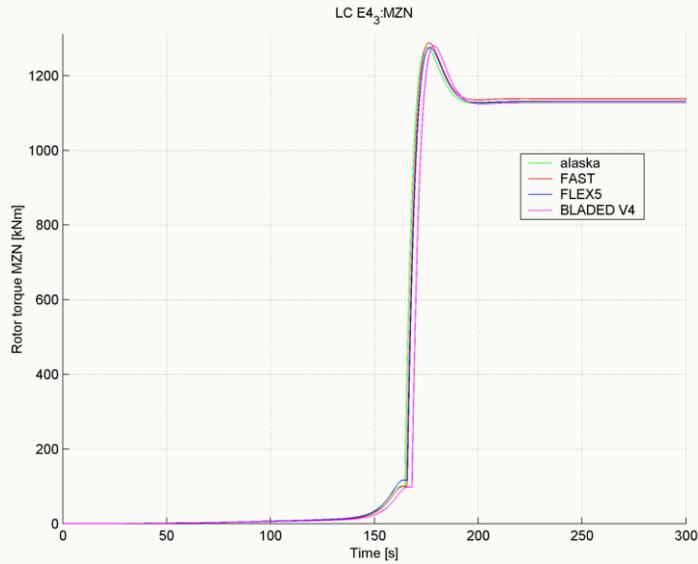


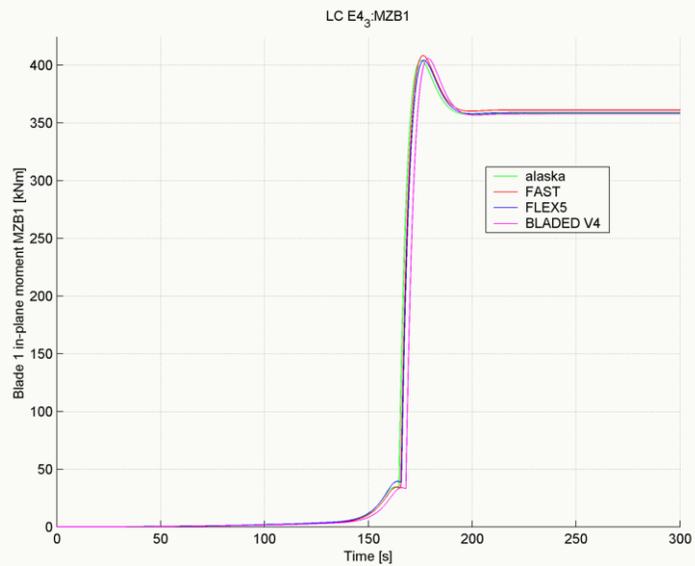
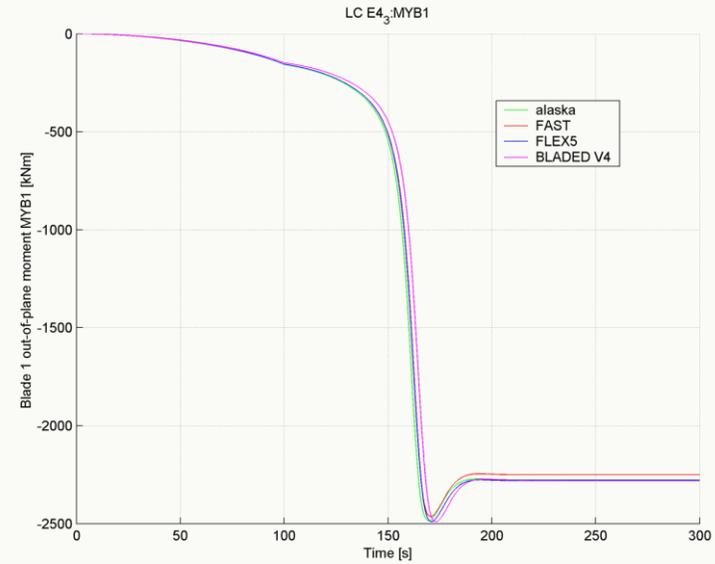
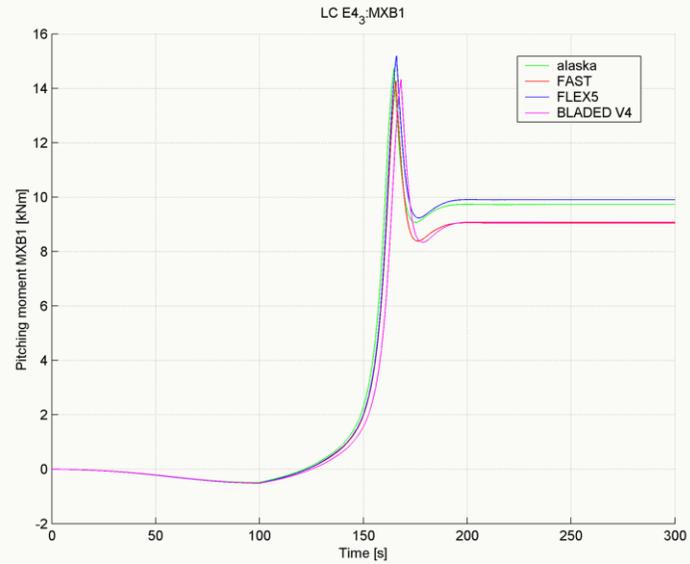


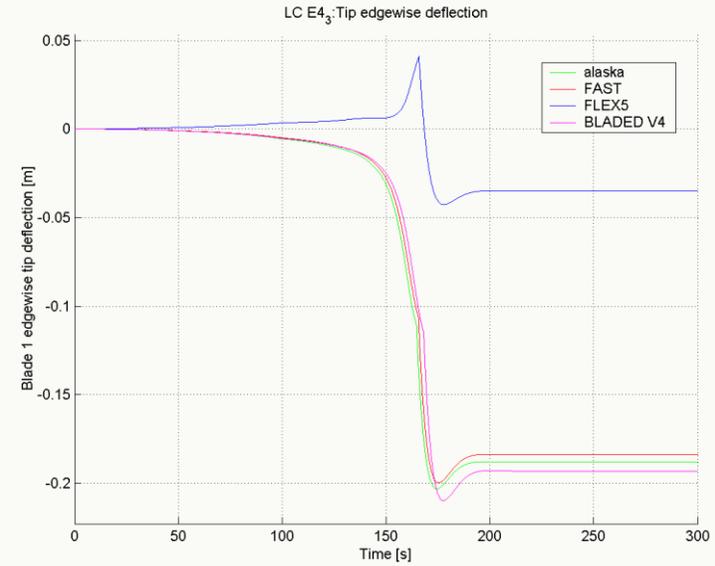
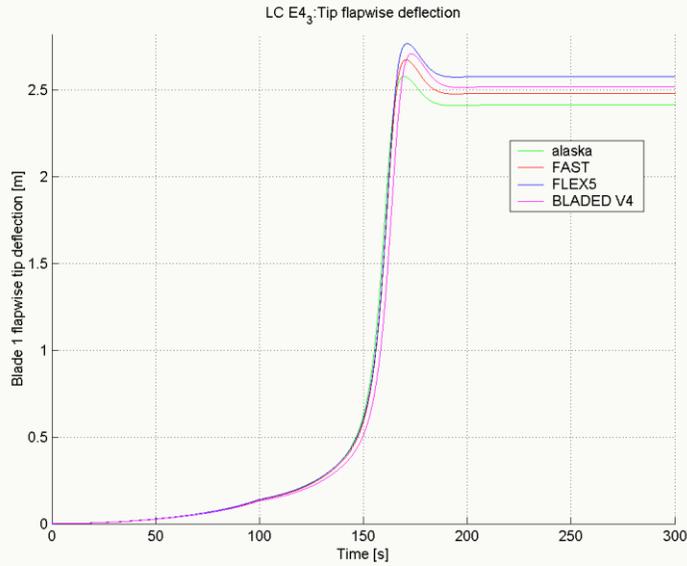


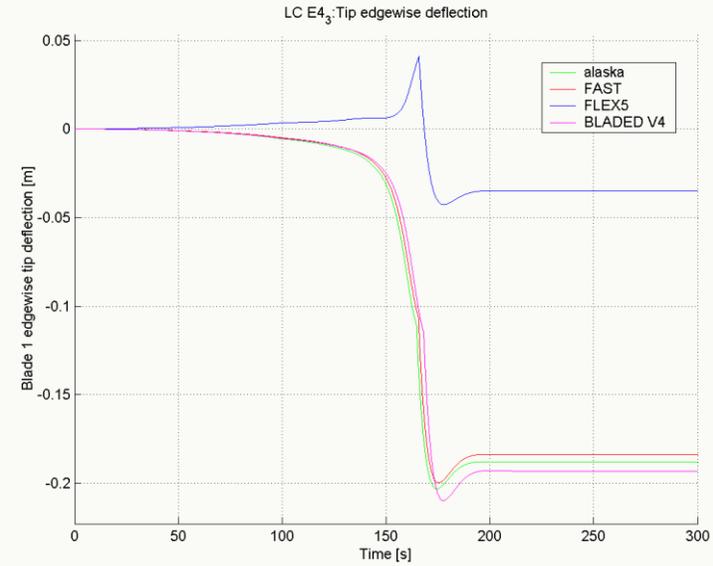
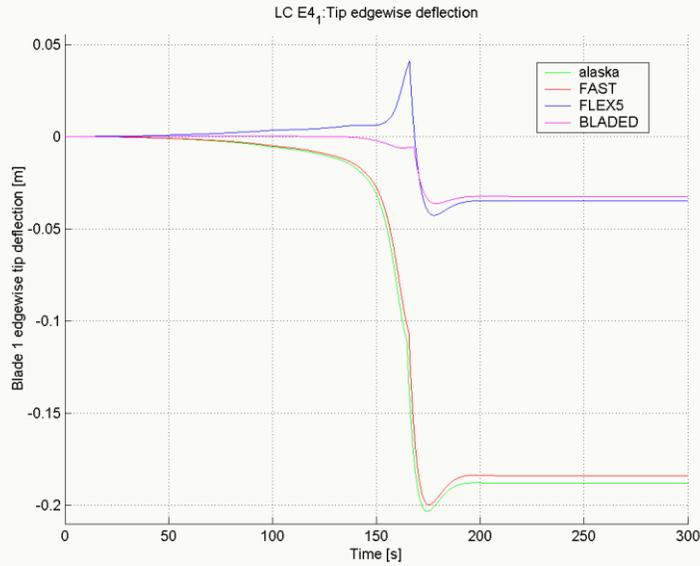


Der Lastfall LC E4_3 entspricht dem Lastfall LC E4_1 mit dem Unterschied das die BLADED Ergebnisse mit der neuen MKS-Version BLADED V4 erzeugt wurden. Dieser Vergleich wurde hier mit aufgenommen, da es unerklärliche Abweichungen im Pitchmoment und in der edgewise-Blattbiegung bei Ergebnissen in BLADED V3.82 gab.

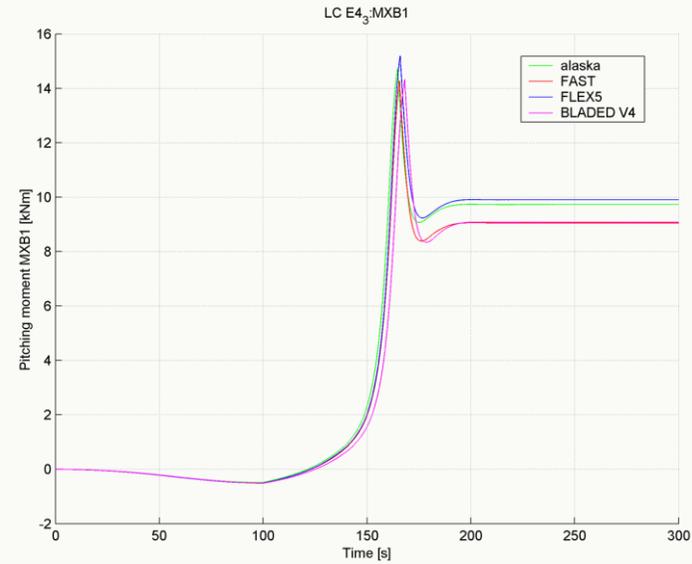
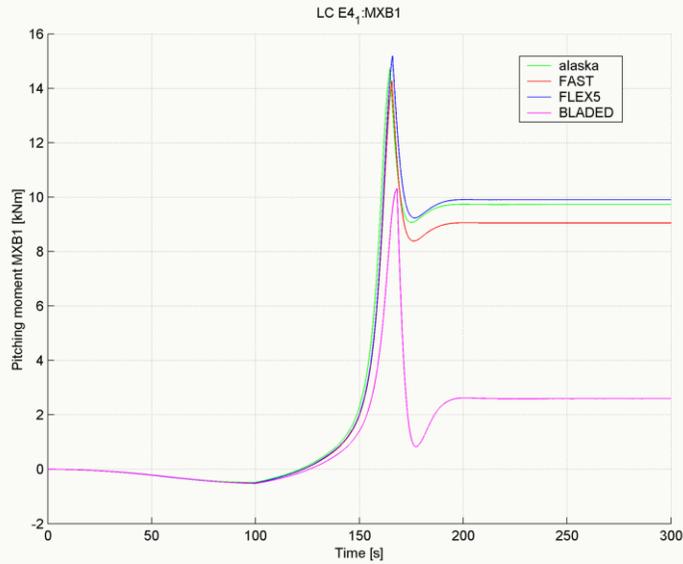




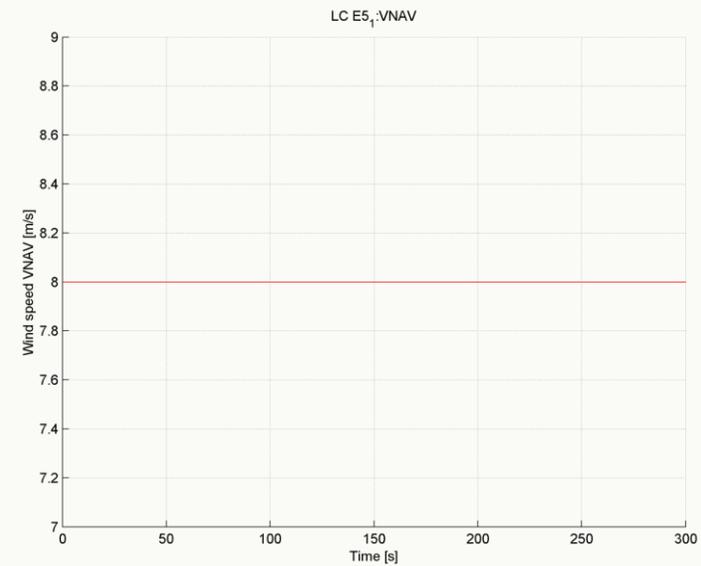
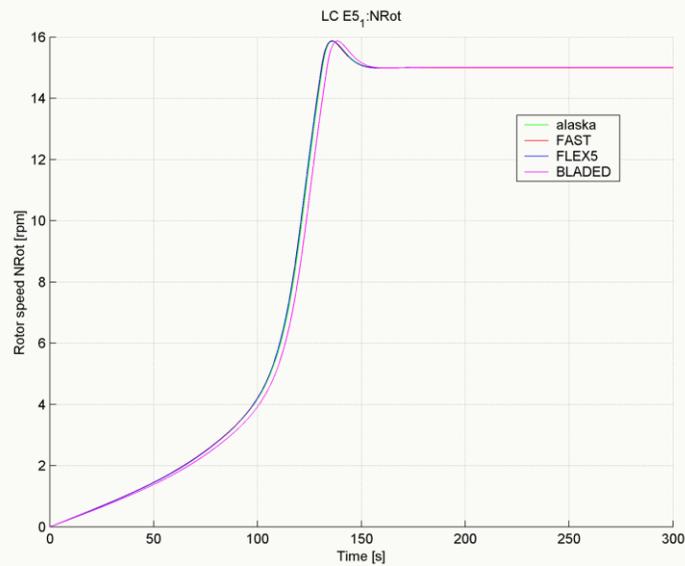
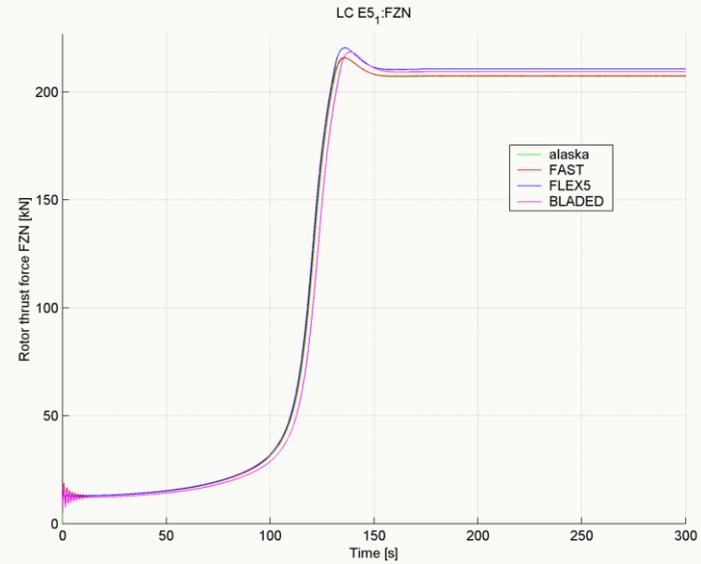
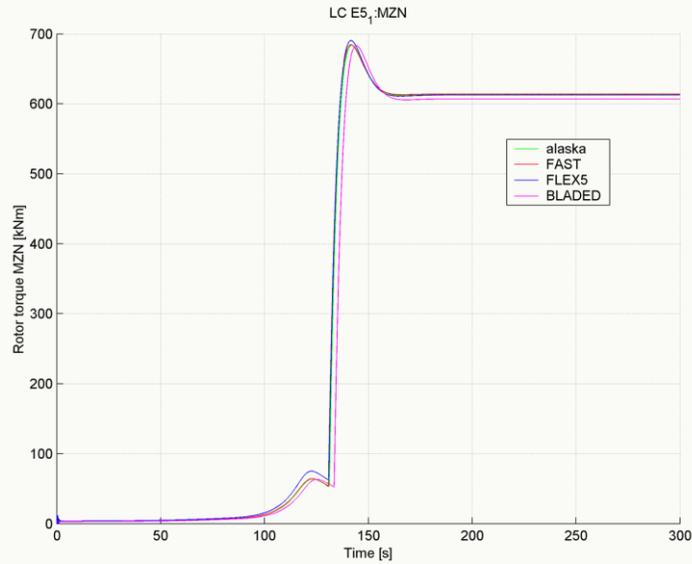


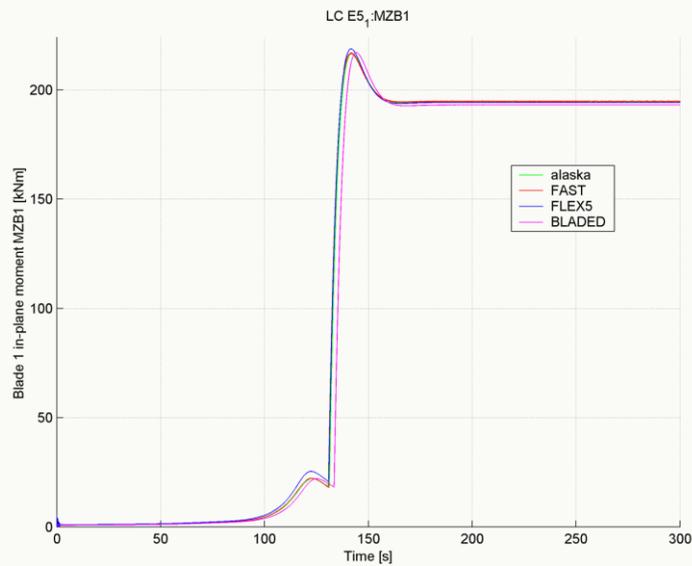
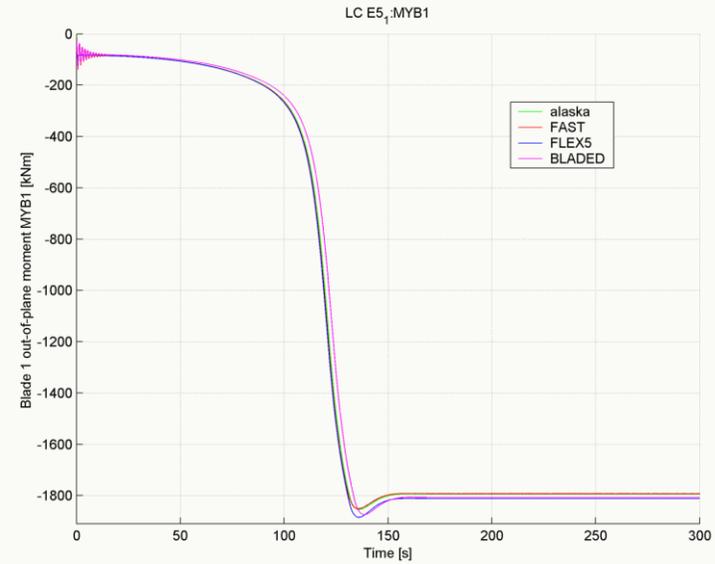
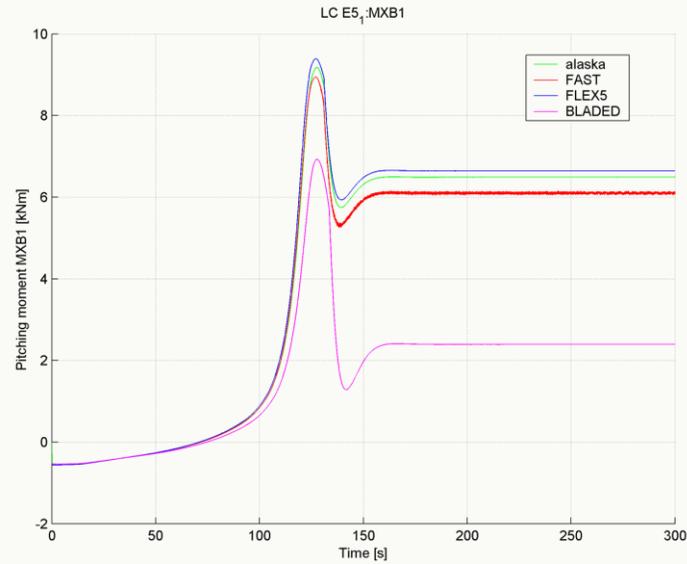


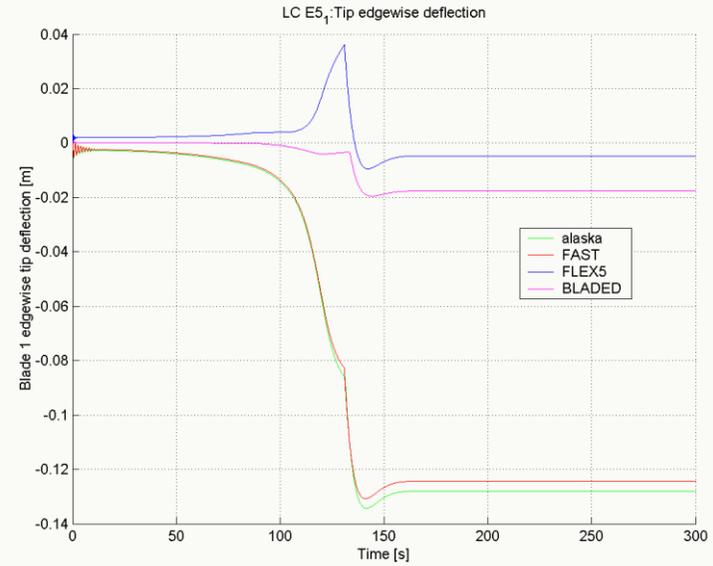
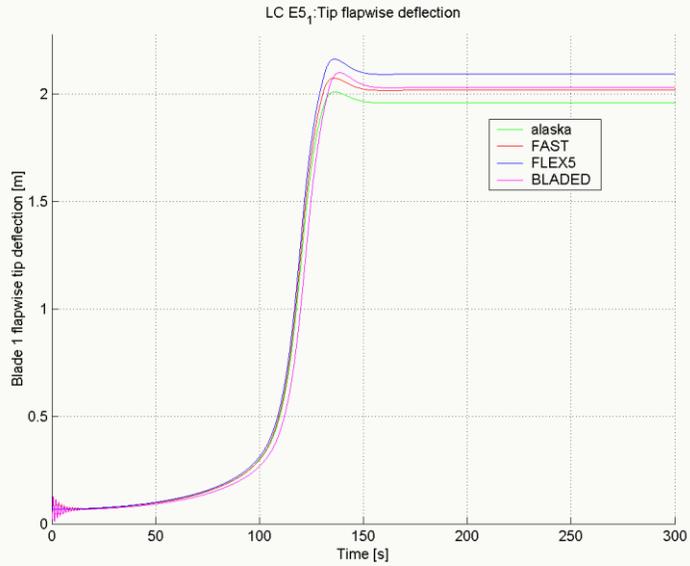
Vergleich der Blattbiegung in der Rotorebene für BLADED V3.82 und BLADED V4

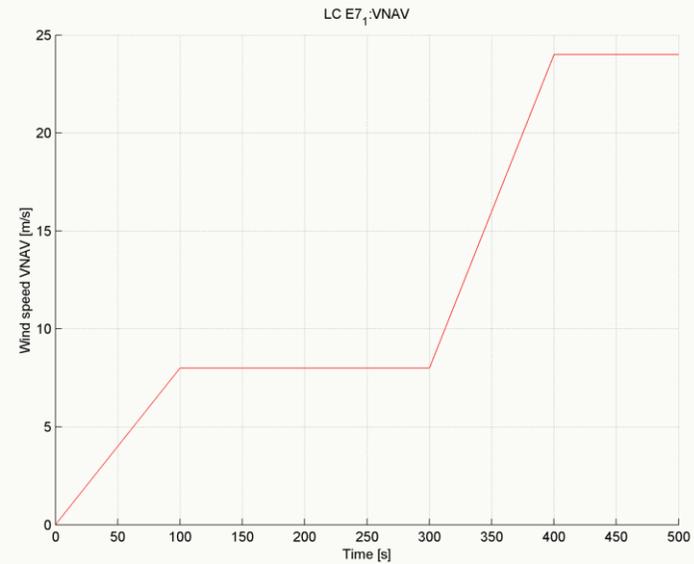
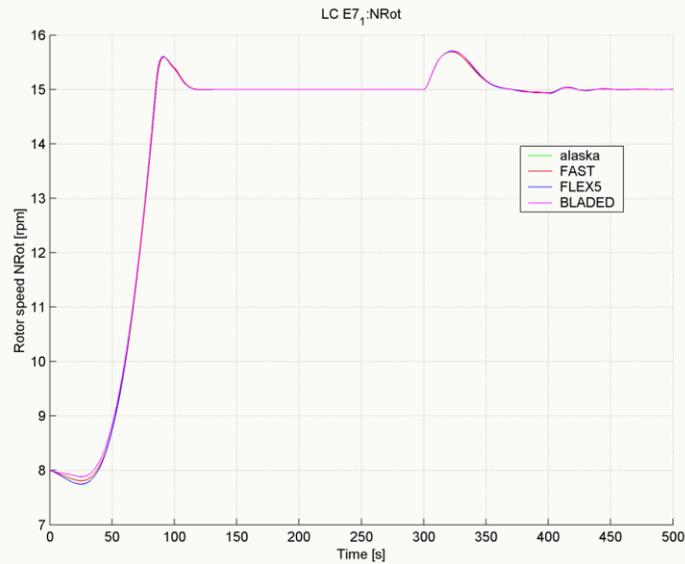


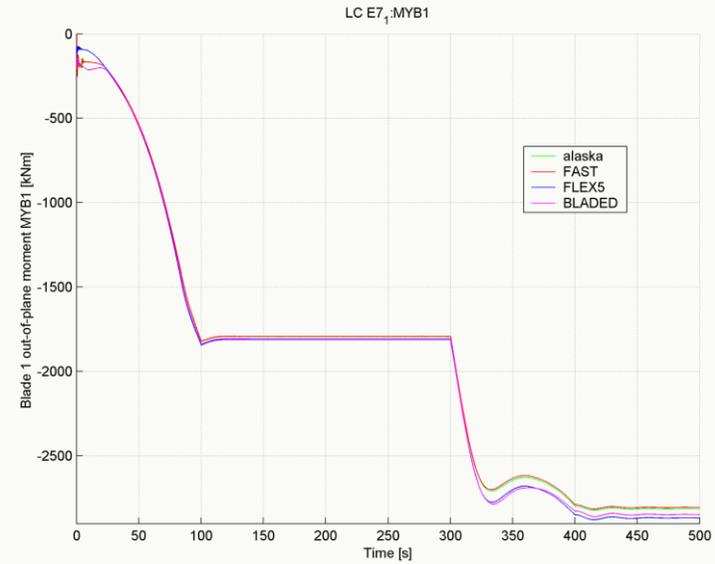
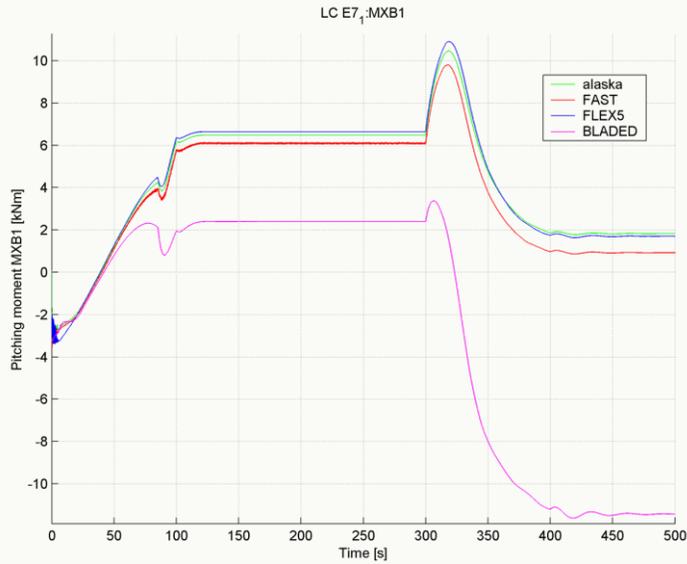
Vergleich des Pitchmomentes für BLADED V3.82 und BLADED V4

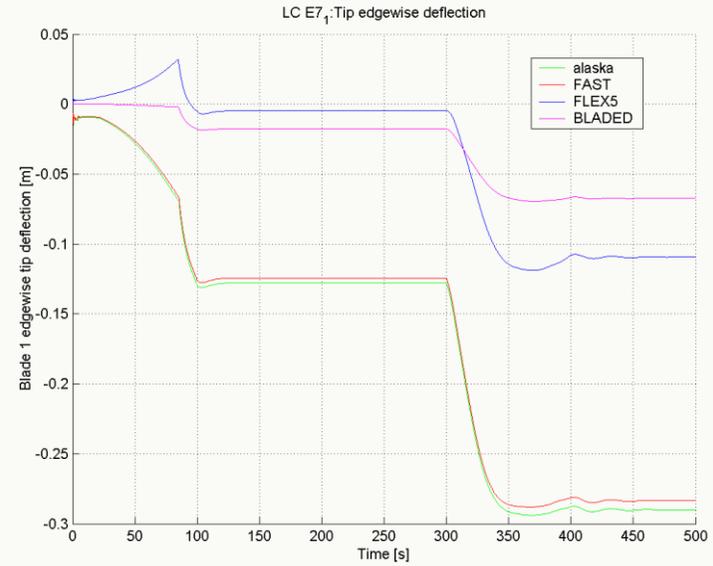
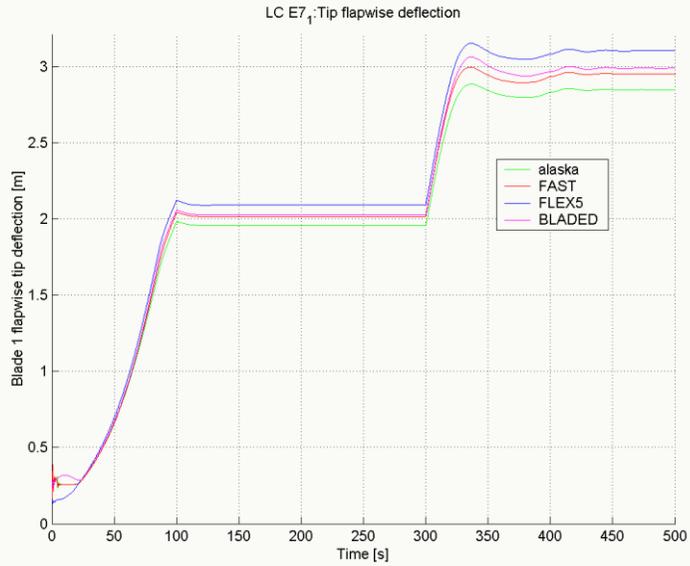


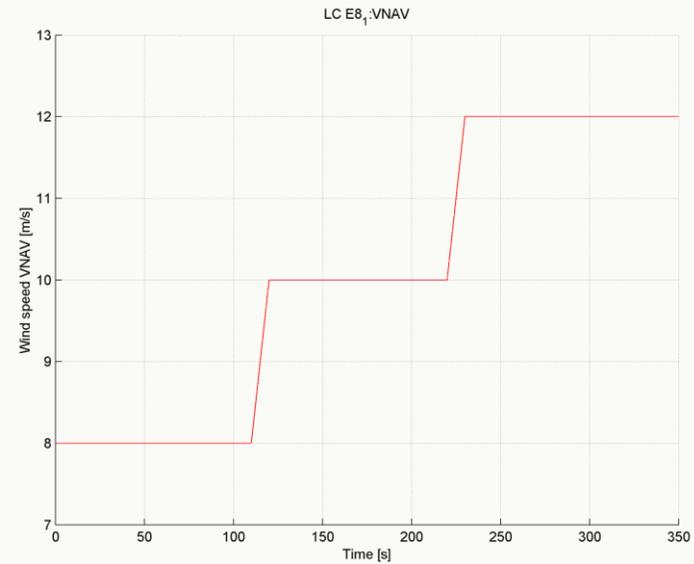
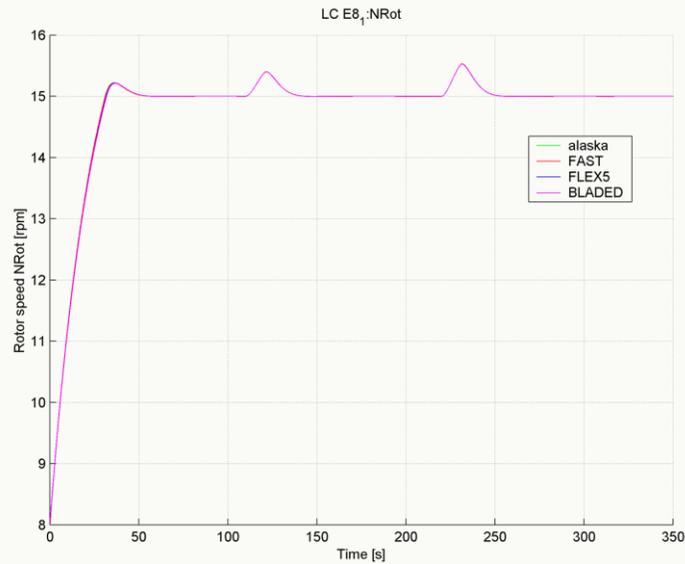
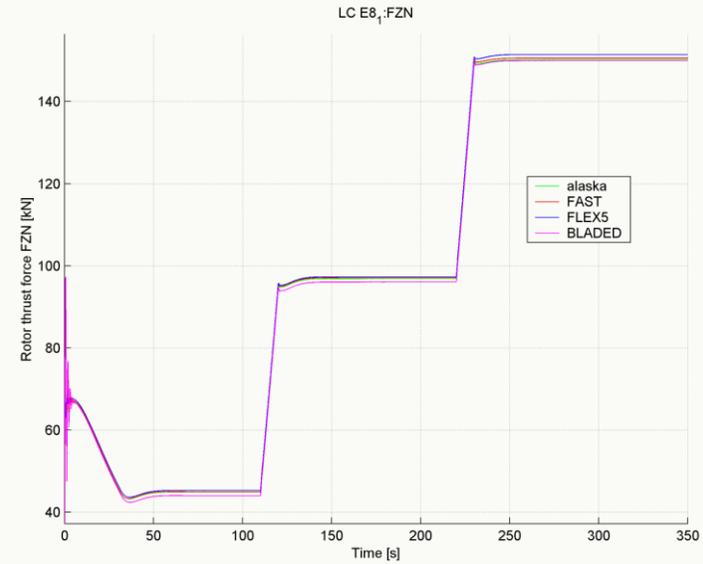
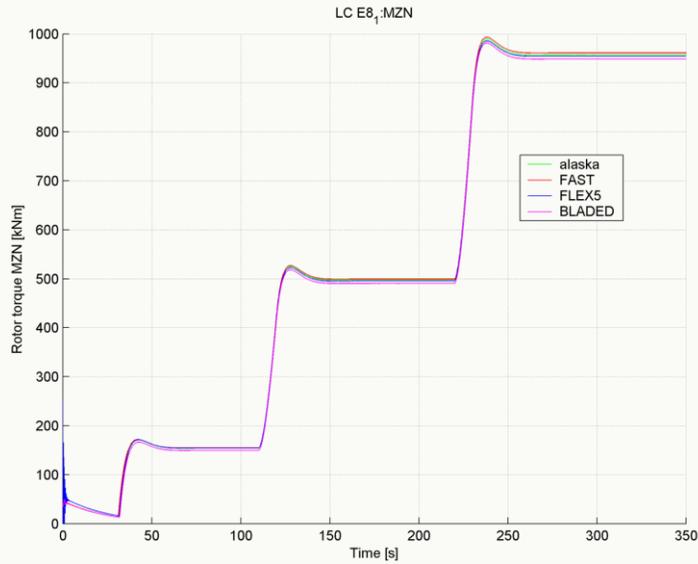


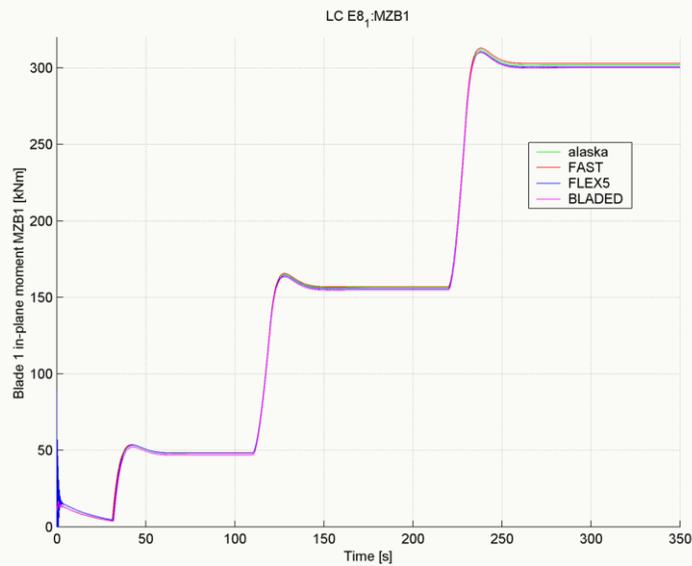
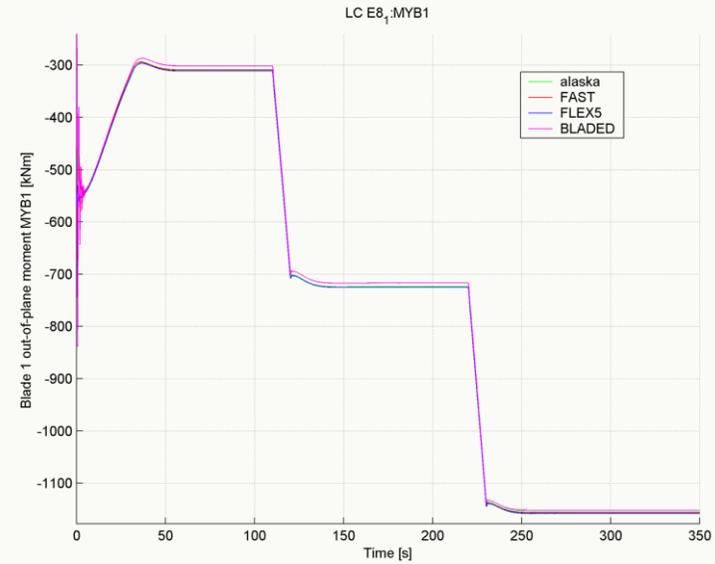
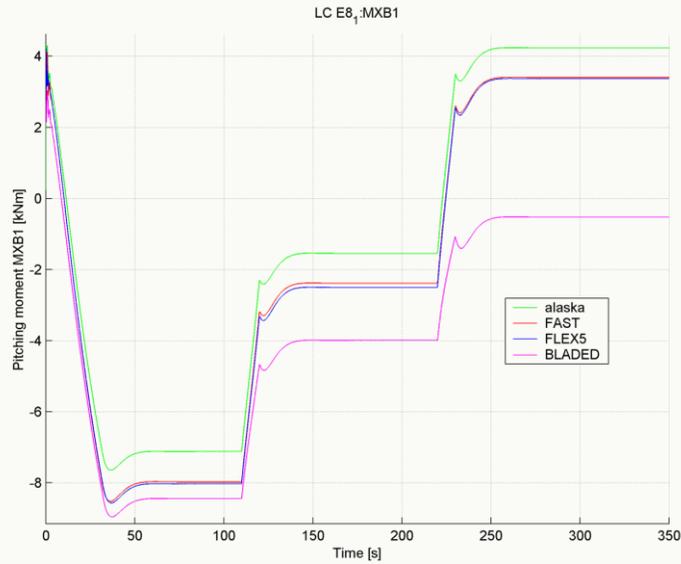


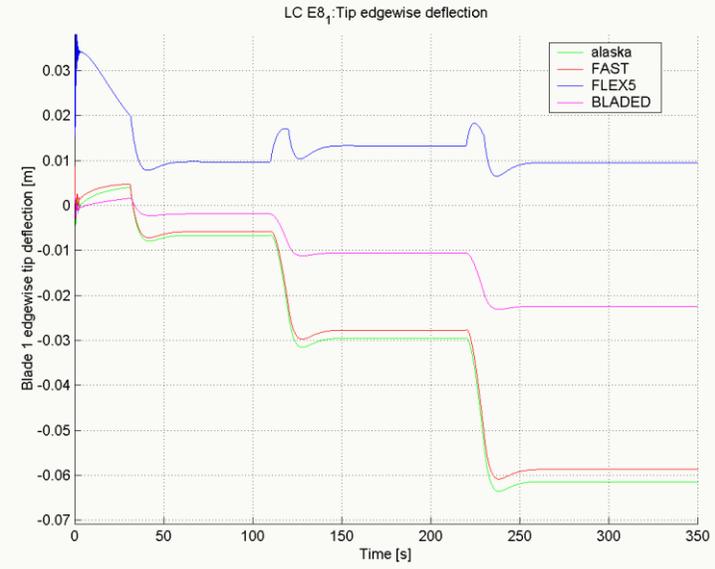
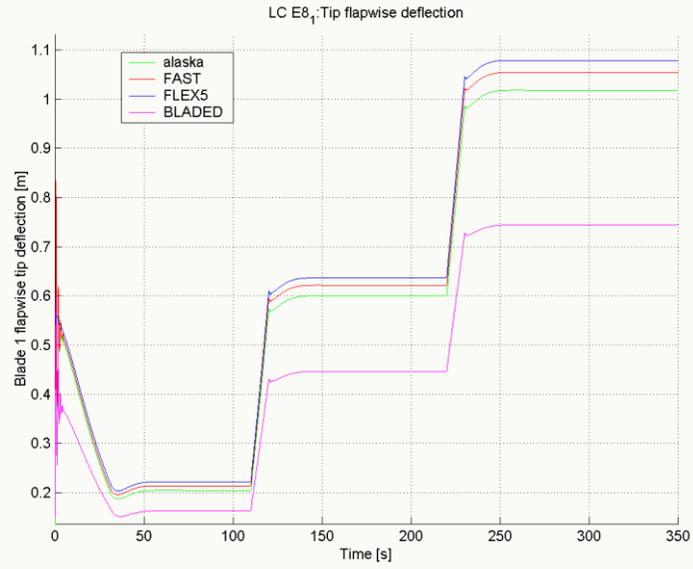




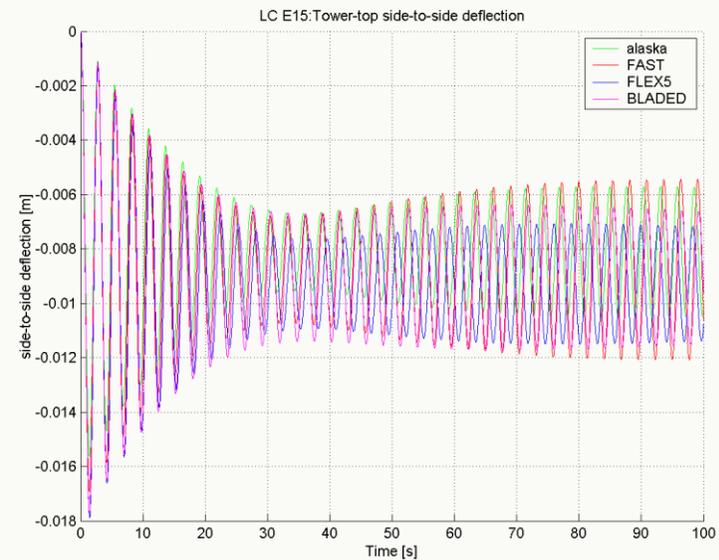
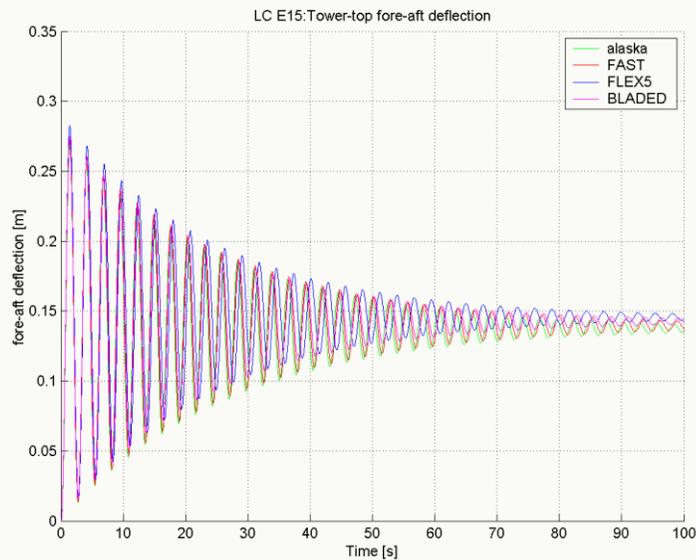
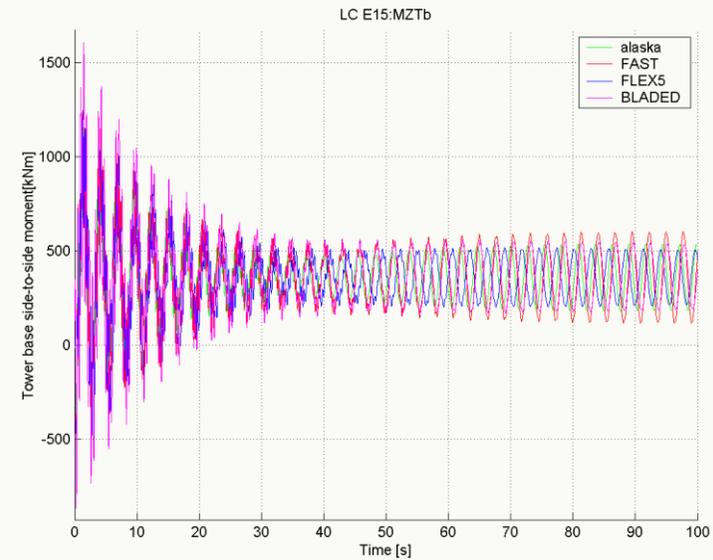
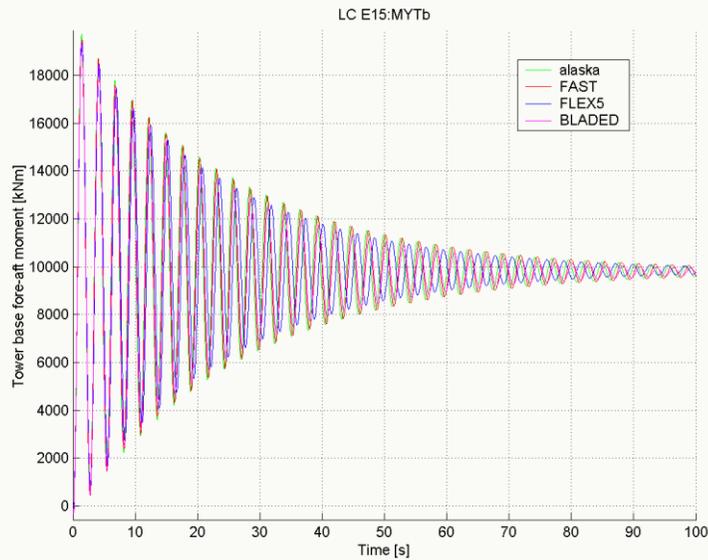


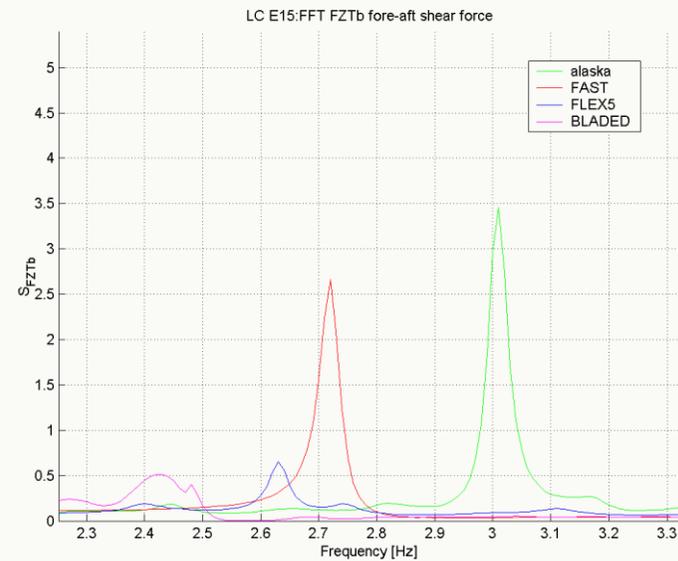
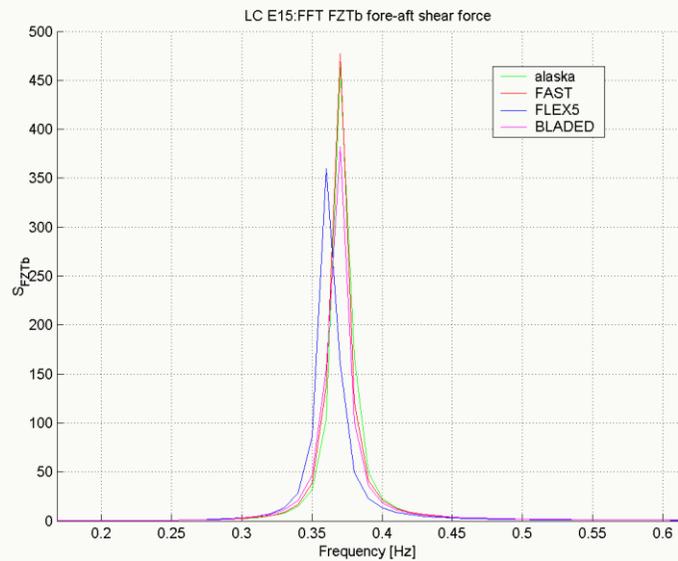
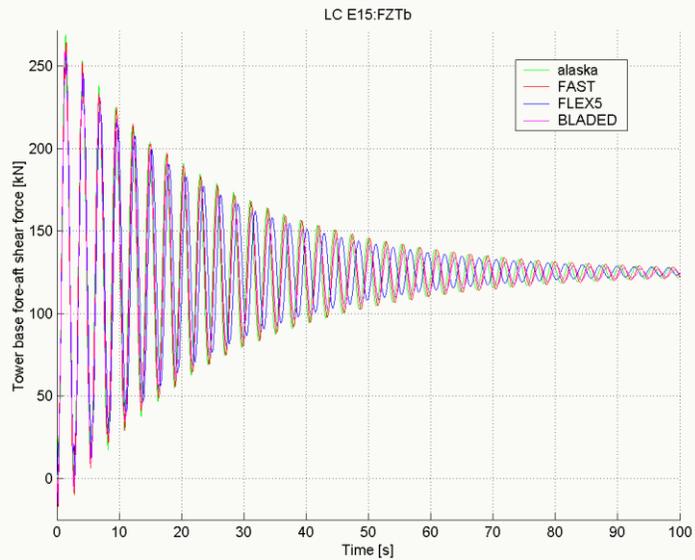


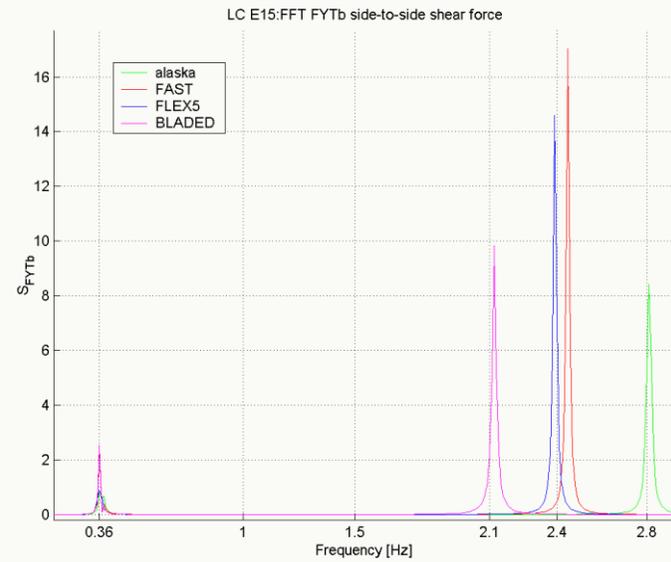
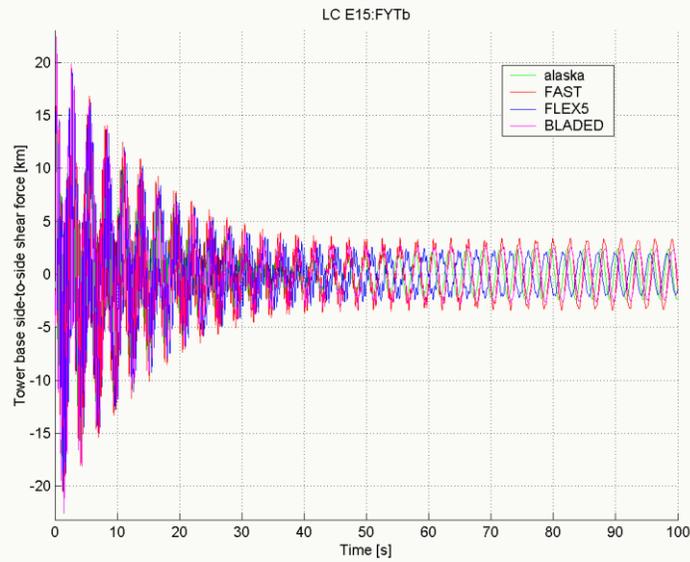




Der Lastfall LC E15 dient dem Vergleich der Turmeigenfrequenzen des modalen Referenzturmmodells in dem Gesamtanlagenmodell sowie der Überprüfung von Turmfußkräften und Turmfußmomenten. Das Anlagenmodell ist für die Simulation geparkt und mit Ausnahme der Turmfreiheitsgrade sind alle Freiheitsgrade gesperrt. Zu Beginn der Simulation wird mit Hilfe eines Windstoßes auf 25m/s der Turm zu Schwingungen angeregt.





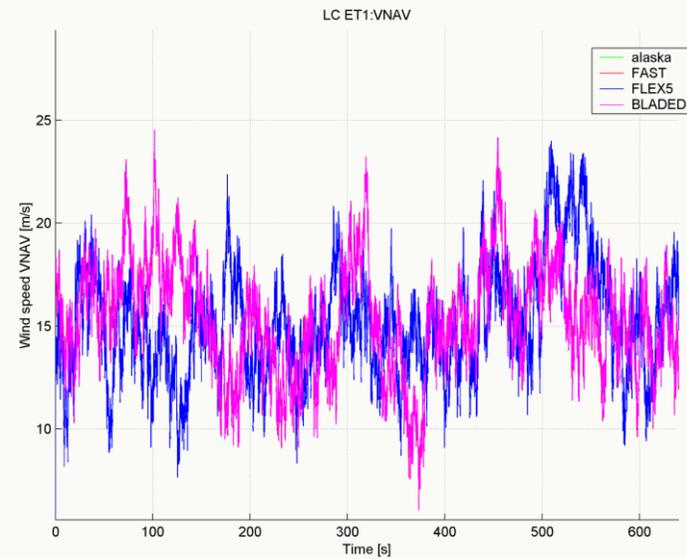
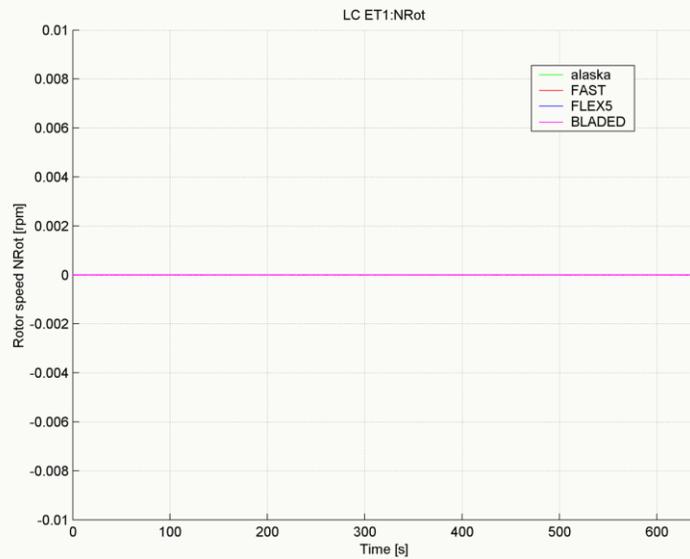
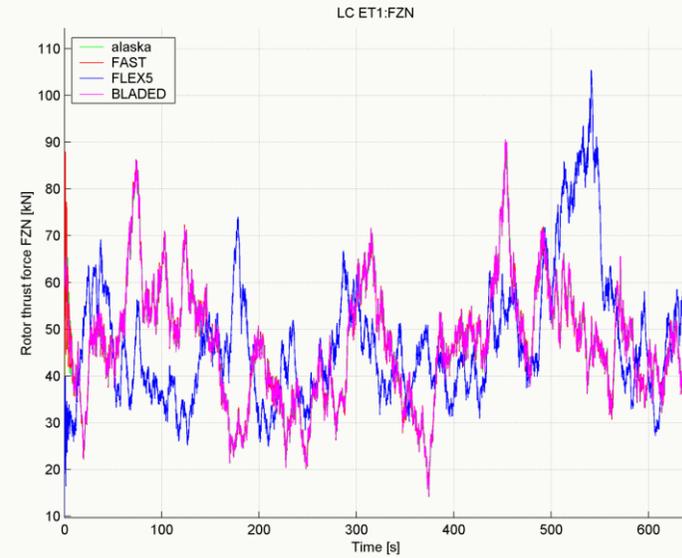
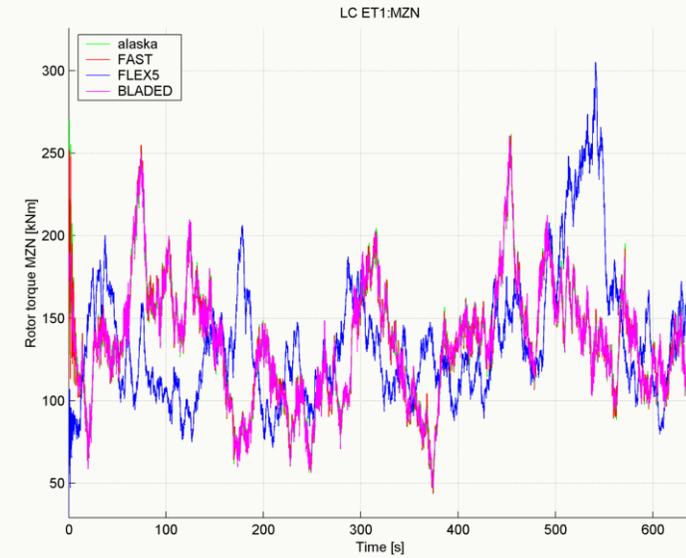


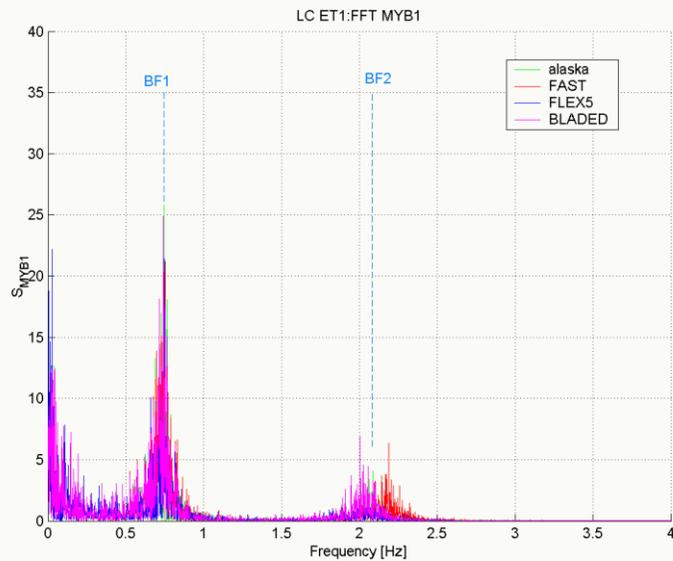
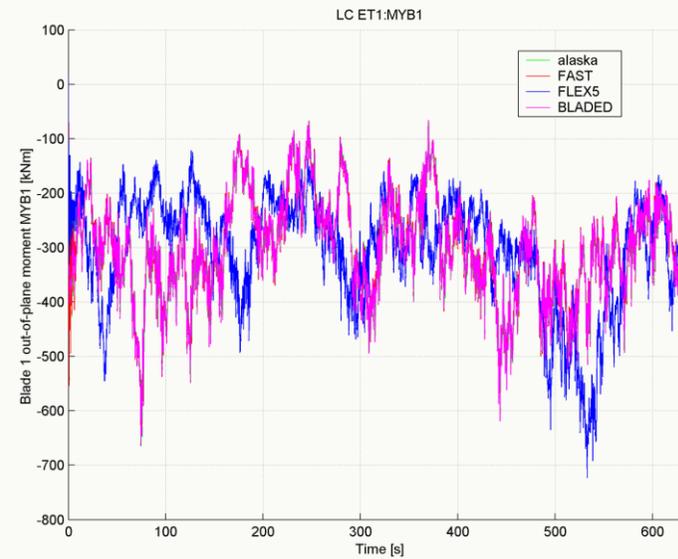
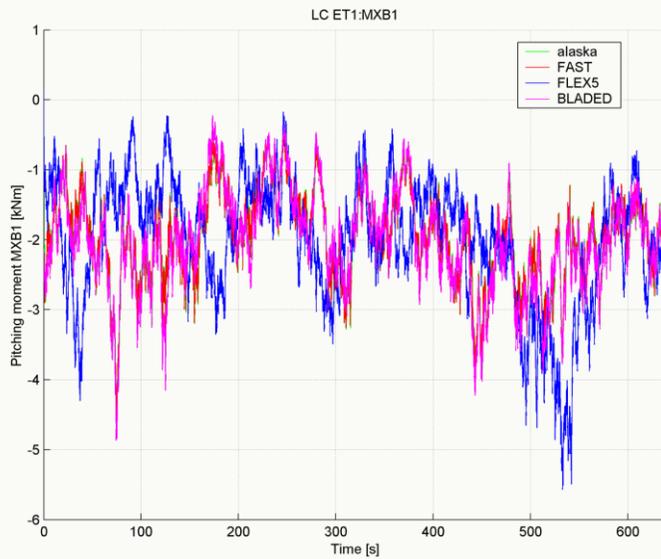
- kein Windshear
- kein Turmschatten
- keine tangentielle Induktion
- flexibles Blattmodell
- starres Turmmodell
- turbulenter Wind

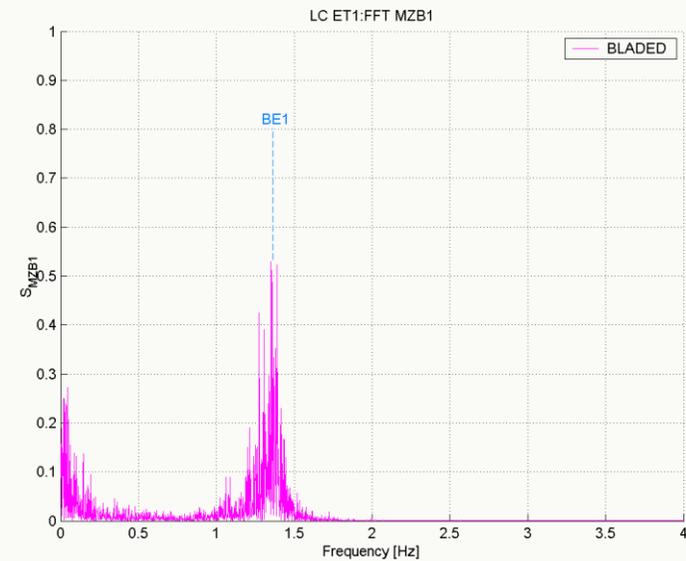
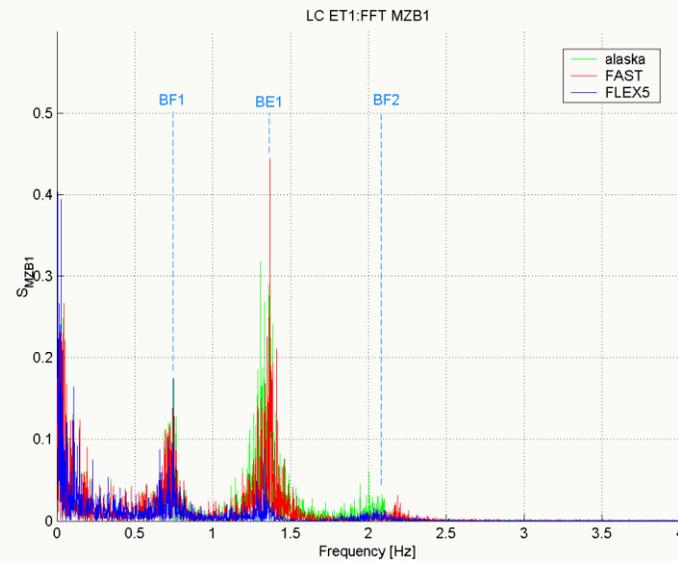
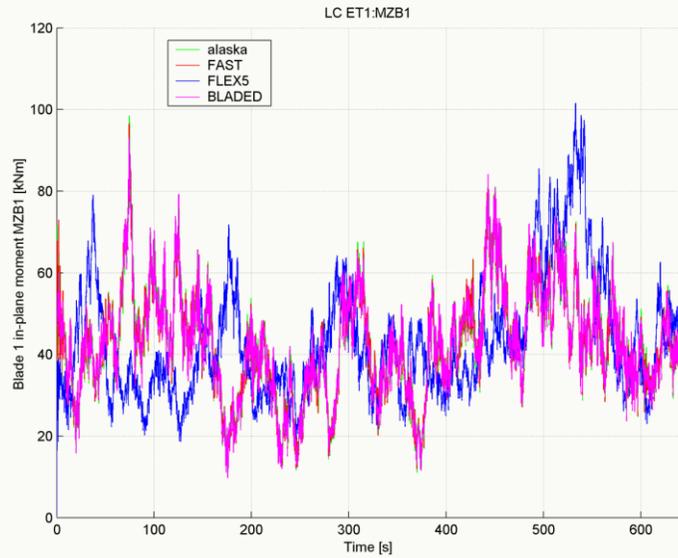
LCGroup I_Turb

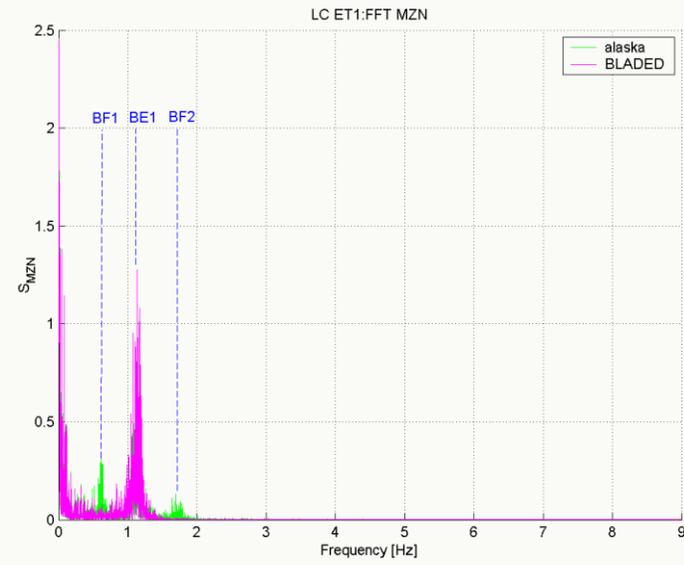
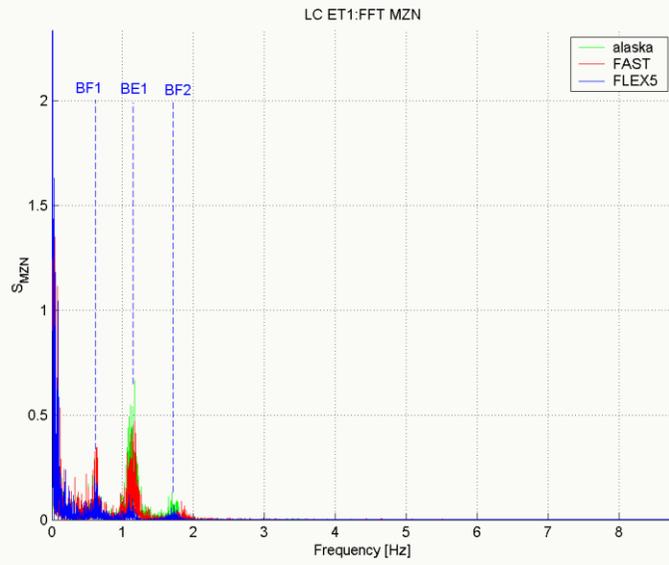
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model							Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Blade DOF 2 Flap, 1 Edge	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	V _{hub}	YawErr	Turbulence	Time Step	T _{total}
	Eq/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[s]	on/off	on/off	on/off	controlled/fixed	controlled/fixed	[rpm]	on/off	const/var [m/s]	const/var	[on/off]	[s]	[s]
ET1	Eq	None	on	off	None	0.02	off	off	on	fixed, 0°	fixed, 0°	0	off	var1	0°	on	0,02	640
T2	Eq	None	on	off	None	0.02	off	on	off	fixed, 30°	fixed, 0°	11	off	var1	0°	on	0,02	640
ET2	Eq	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 werden Lastfälle mit turbulentem Wind simuliert. Der turbulente Wind wurde mit Hilfe des Windfeldgenerators TurbSim [1] nach dem Spektrum von Kaimal generiert. TurbSim erlaubt die Generierung von BLADED-Style Turbulenz-Files 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 auf Basis des Kaimalspektrums ein separates Windfeld für das FLEX5 Modell erstellt. Die Validierung der verwendeten Windfelder erfolgt mit Hilfe des Lastfalls T1 aus LCGroup I_TurbSim.

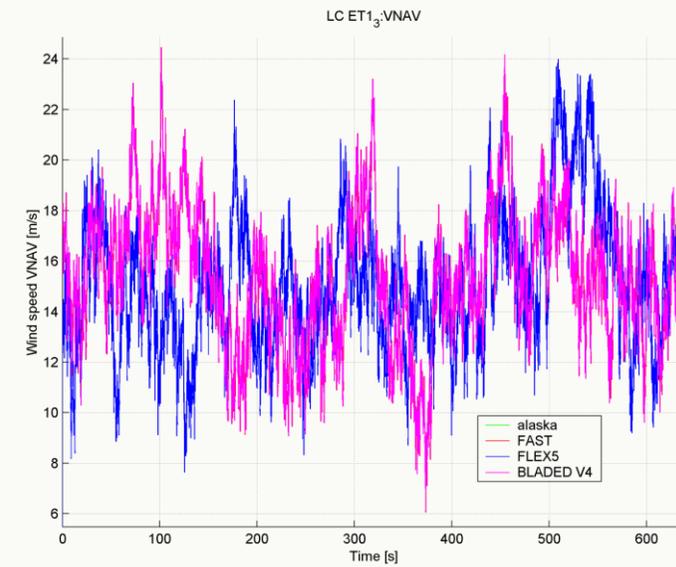
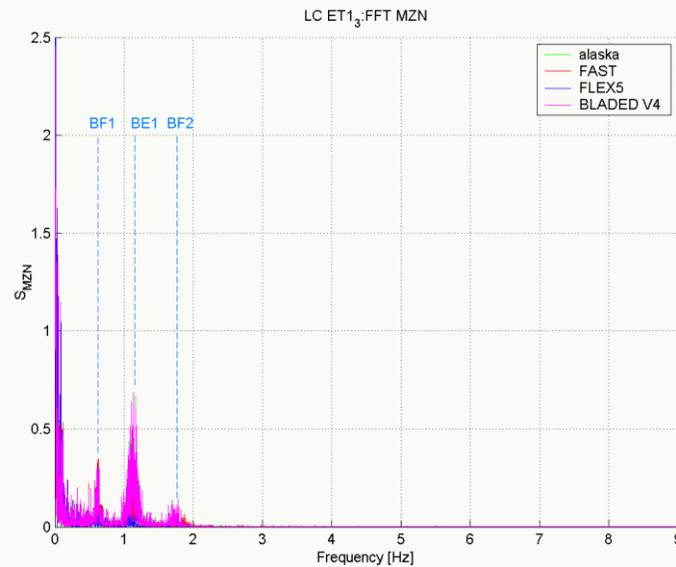
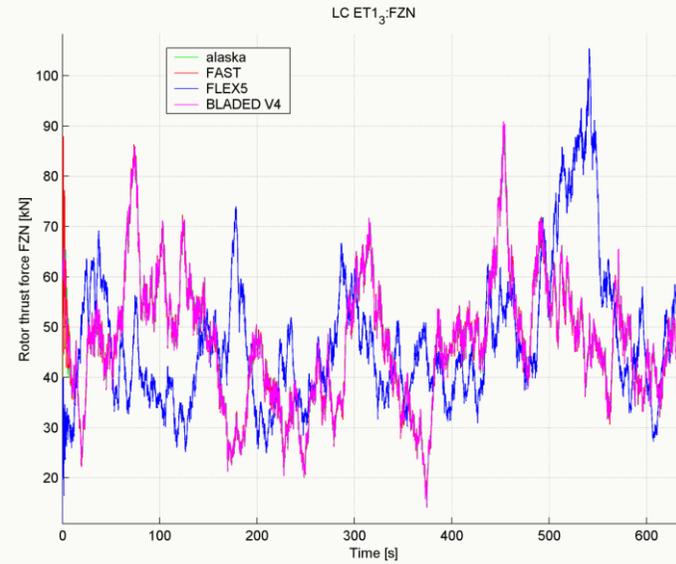
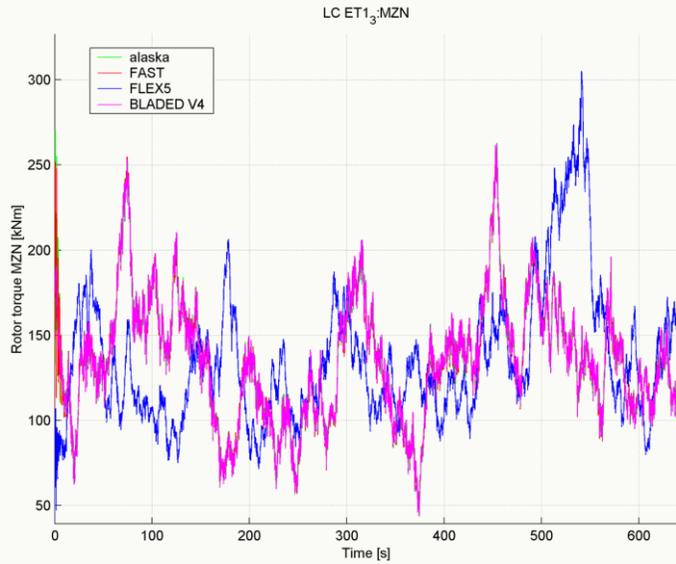


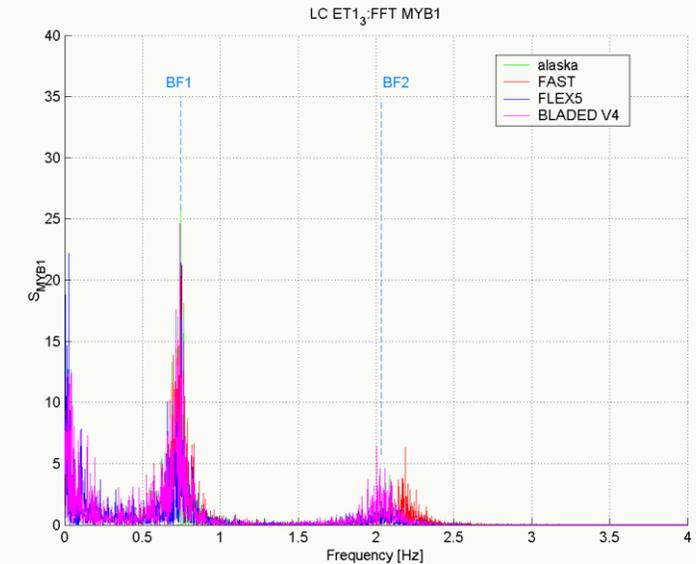
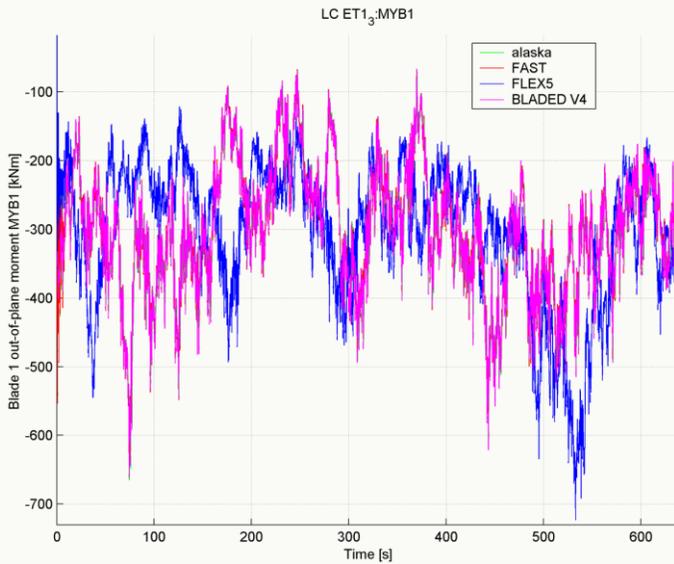
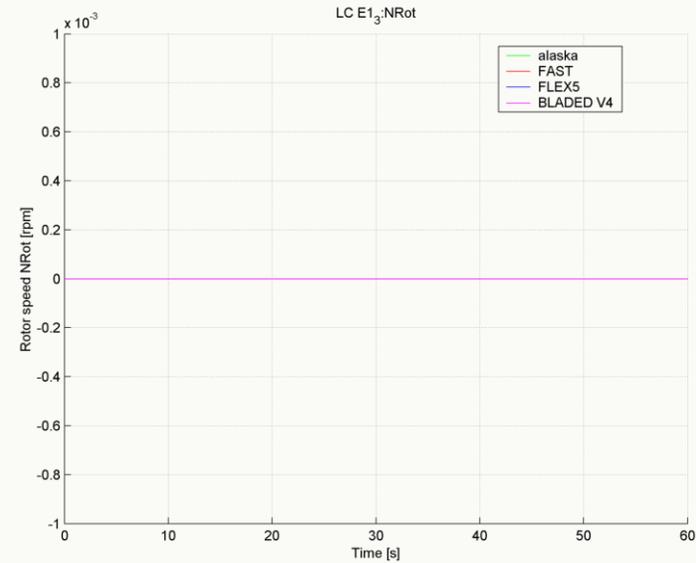
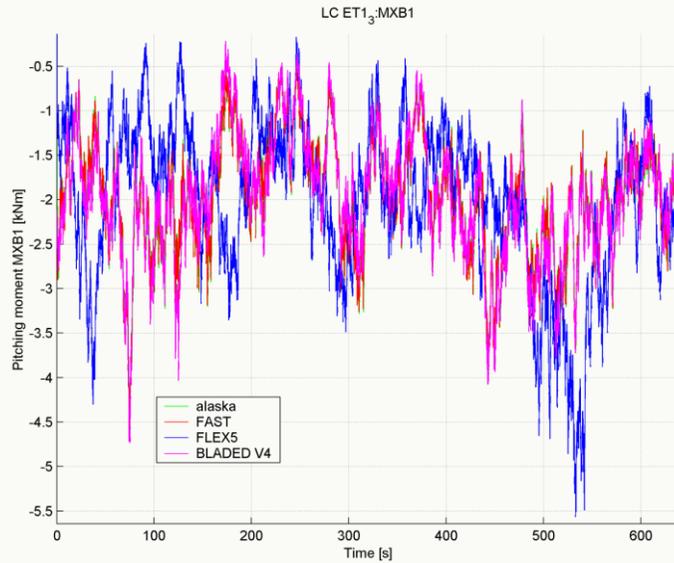


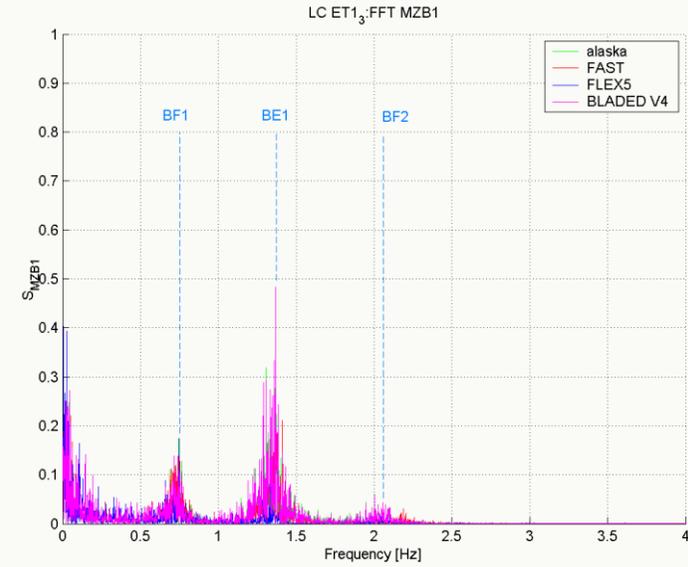
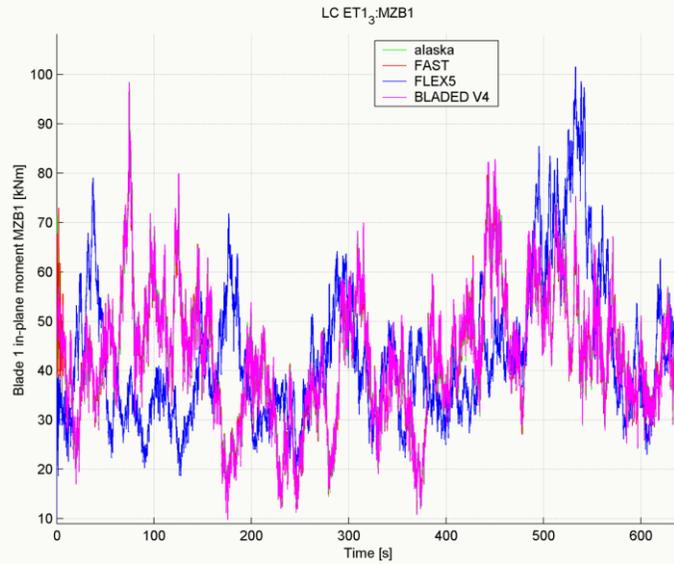


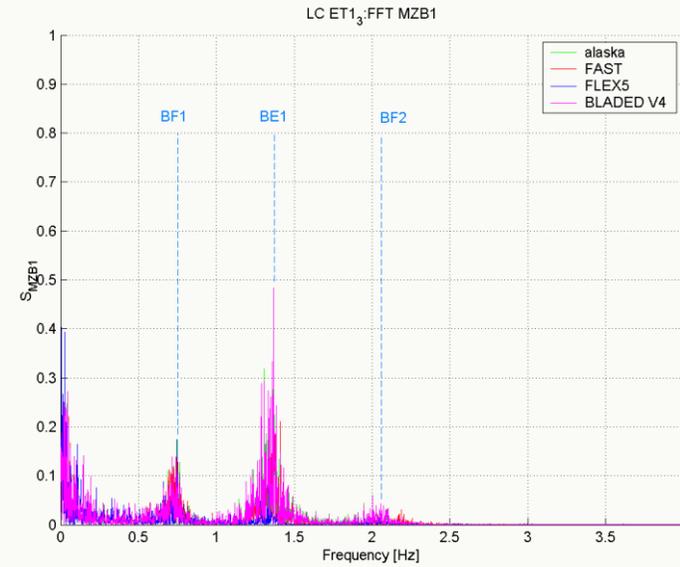
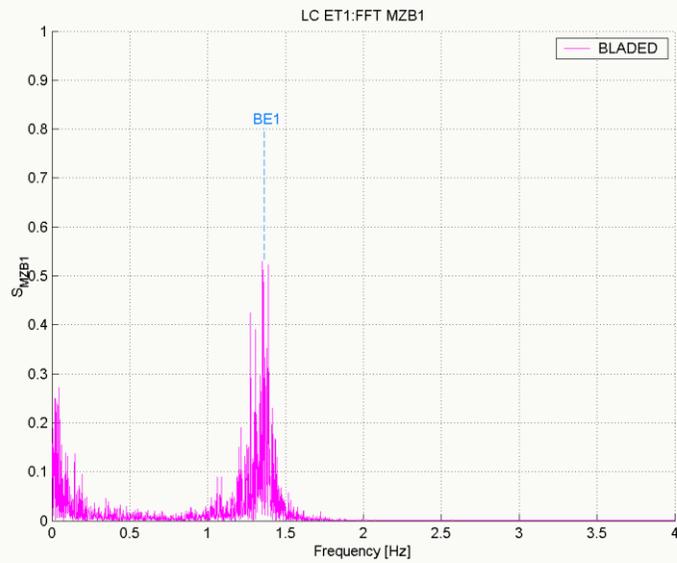


Der Lastfall LC ET1_3 entspricht dem Lastfall LC ET1 mit dem Unterschied das die BLADED Ergebnisse mit der neuen MKS-Version BLADED V4 erzeugt wurden.

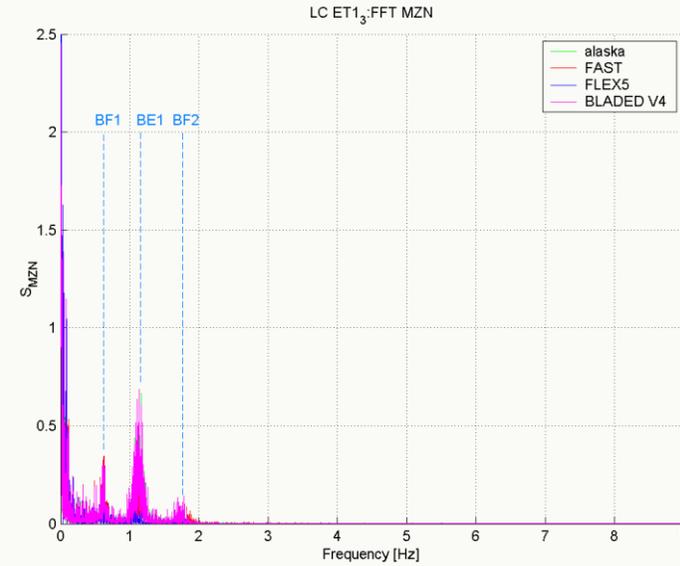
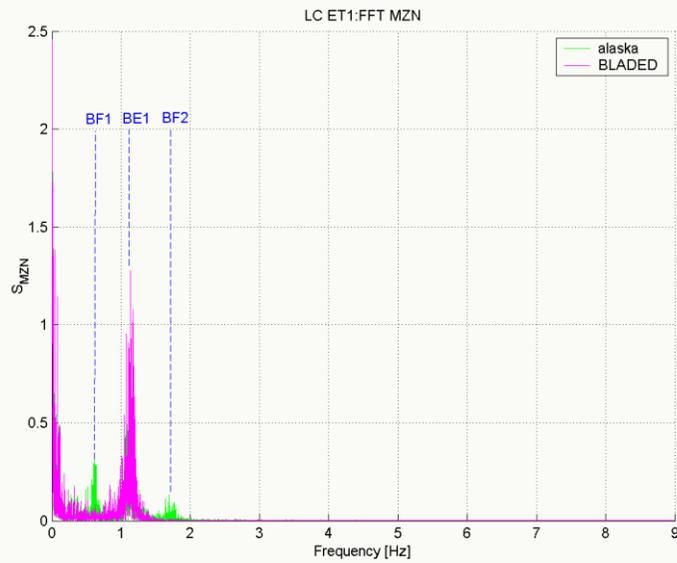




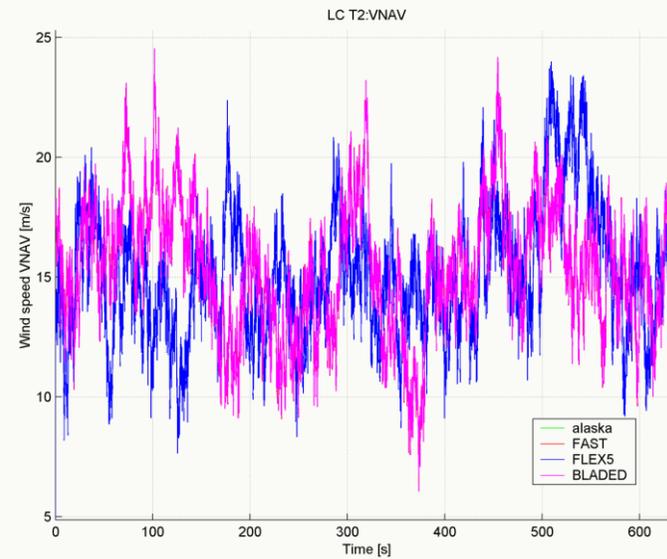
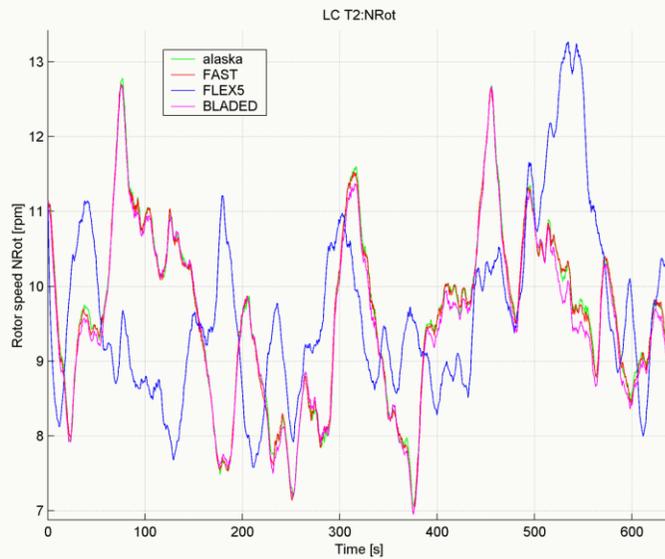
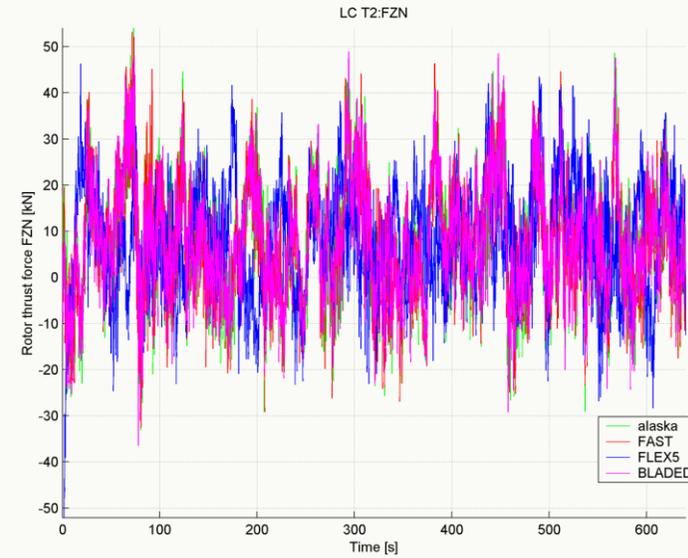
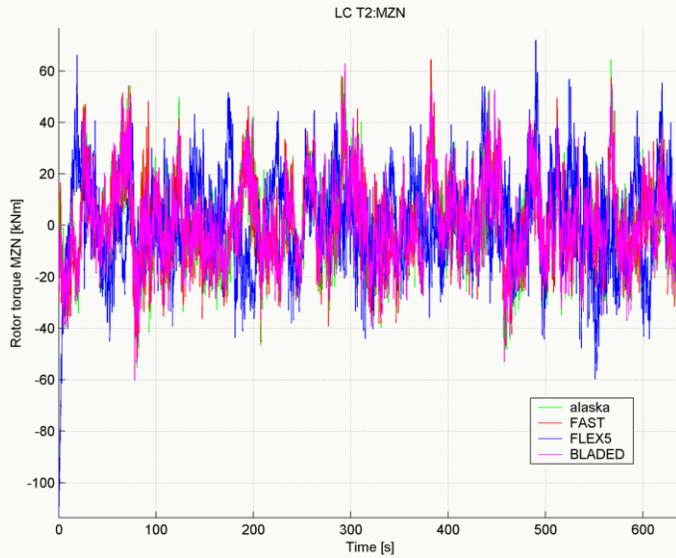


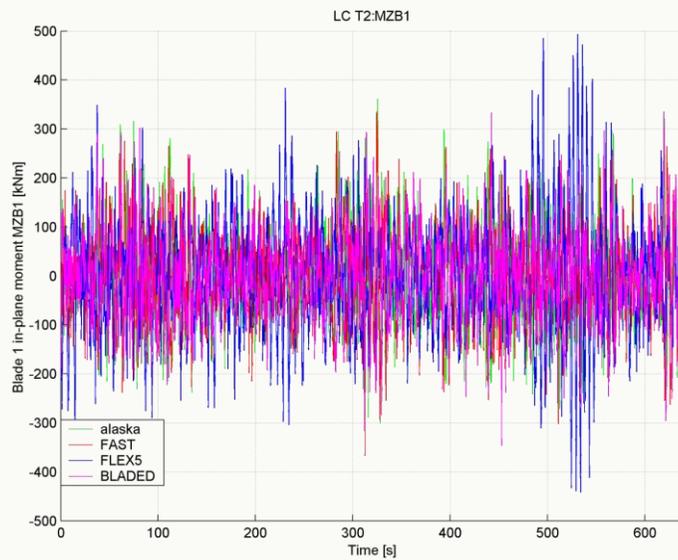
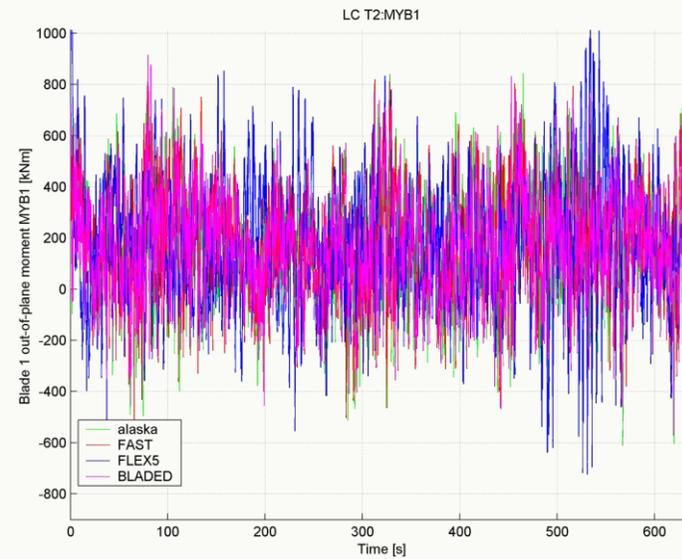
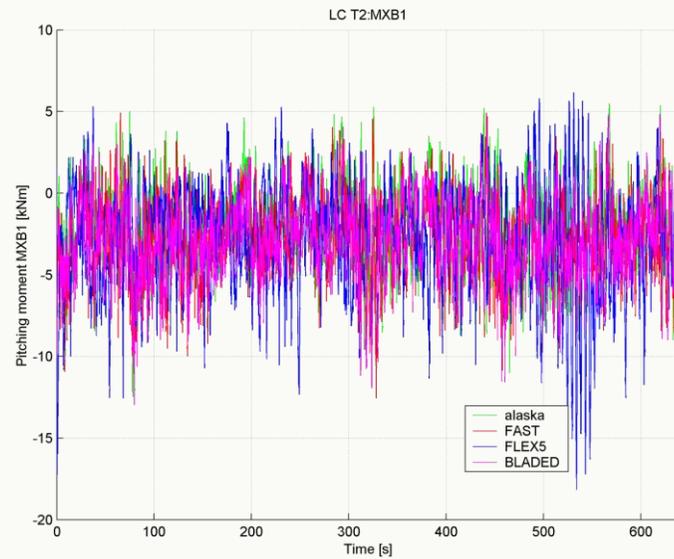


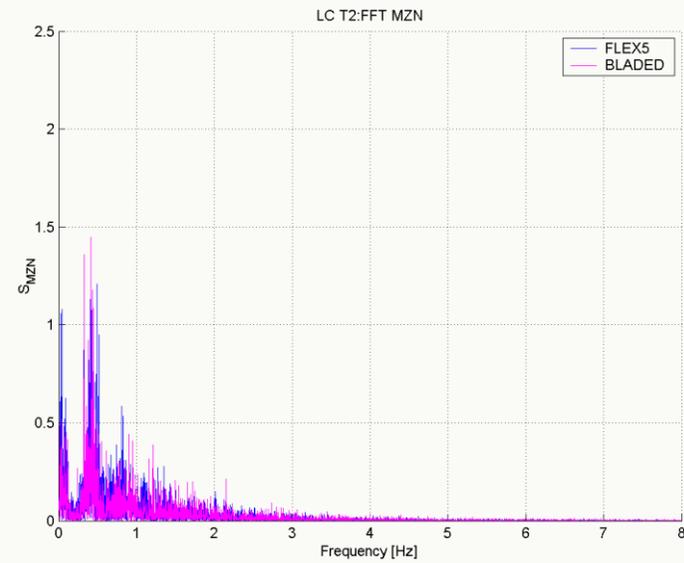
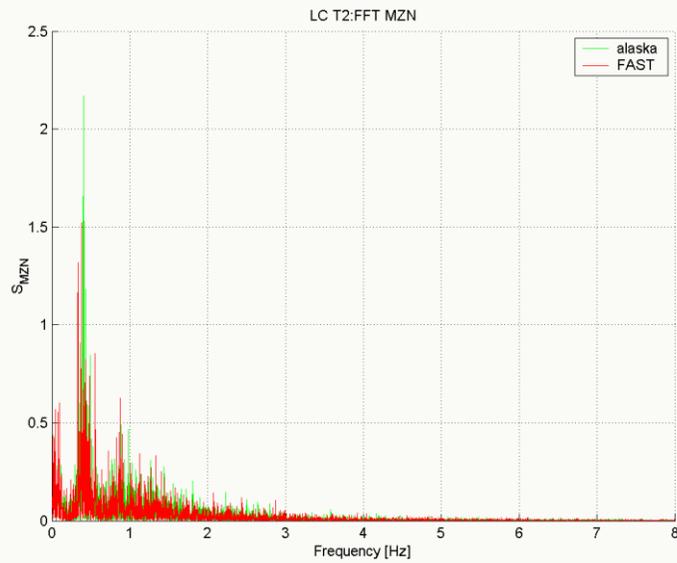
Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4

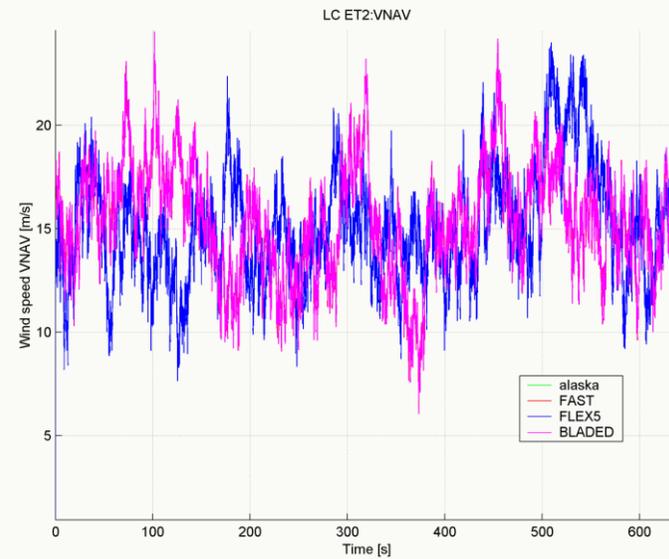
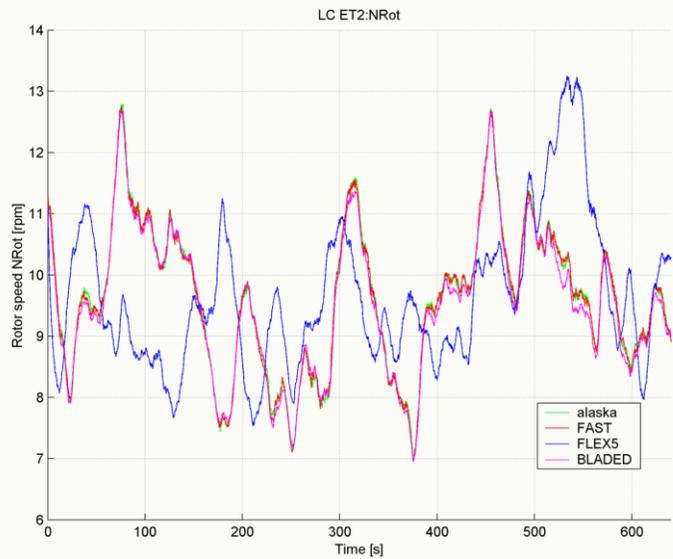
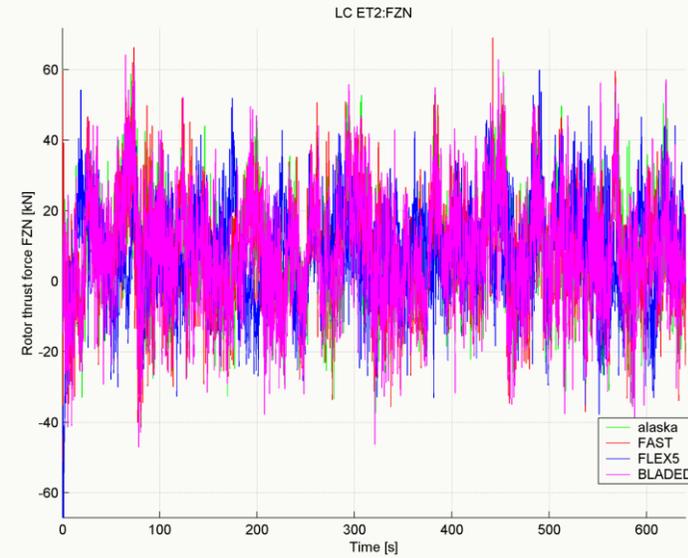
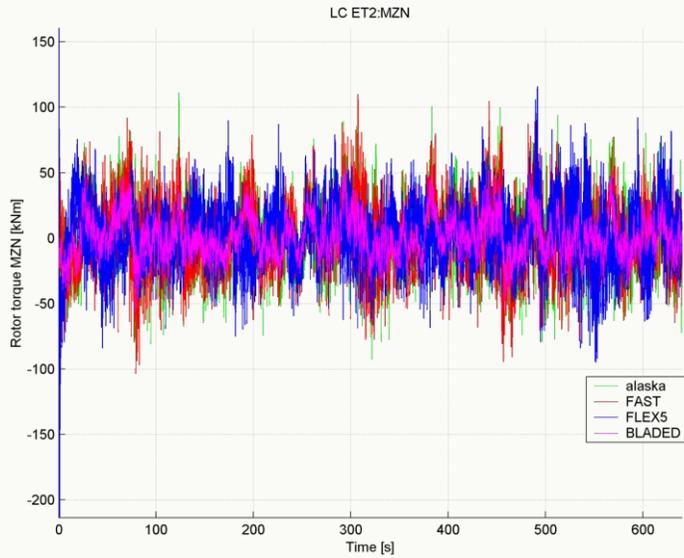


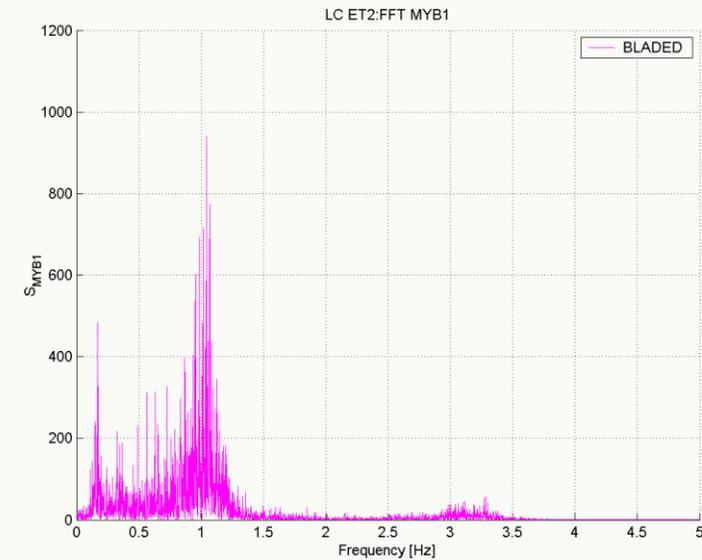
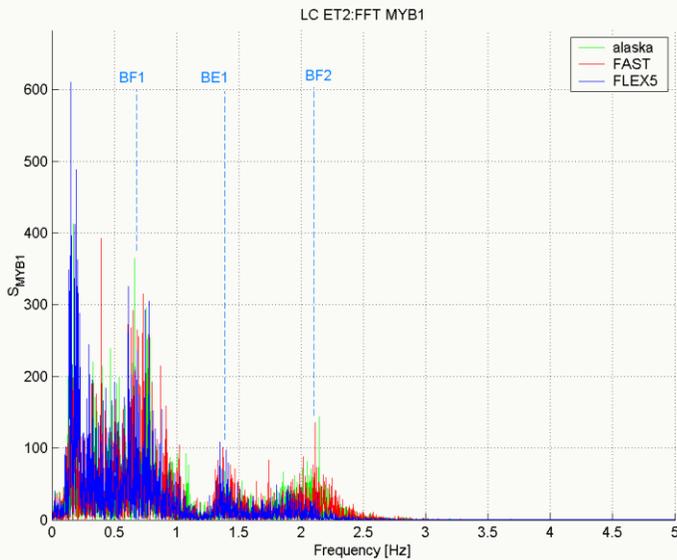
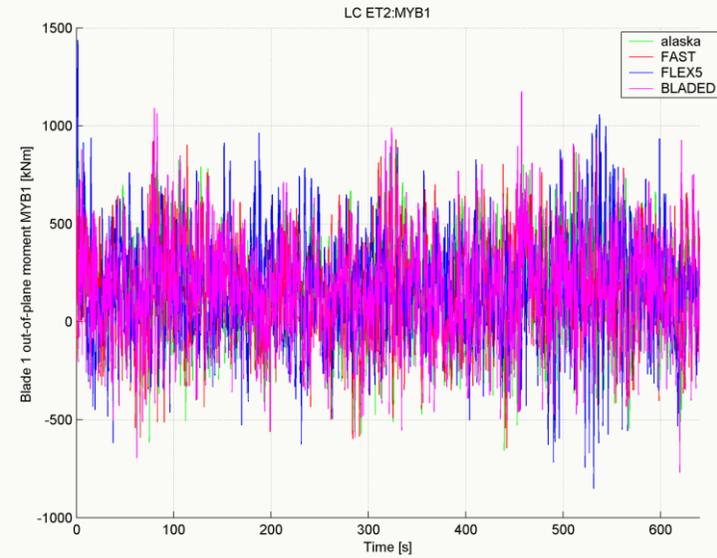
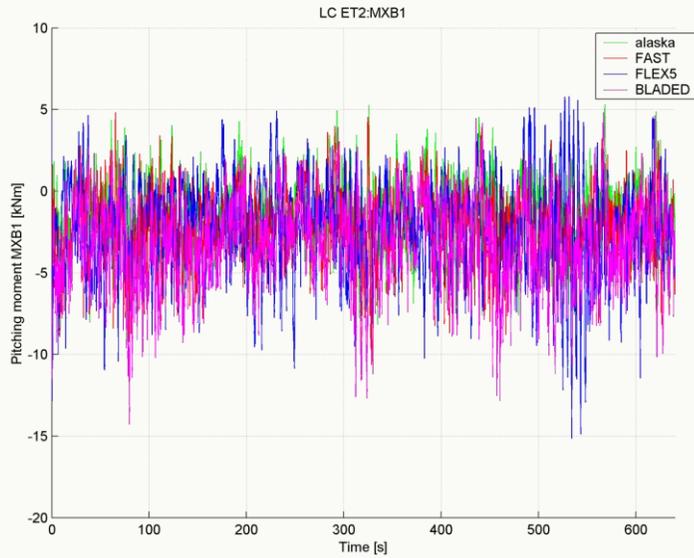
Vergleich Amplitudenspektrum Schnittmoment an der Hauptwelle für BLADED V3.82 und BLADED V4

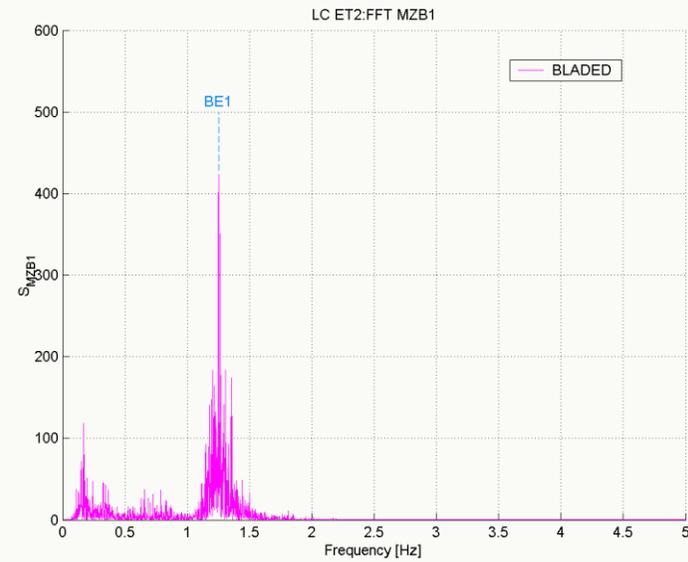
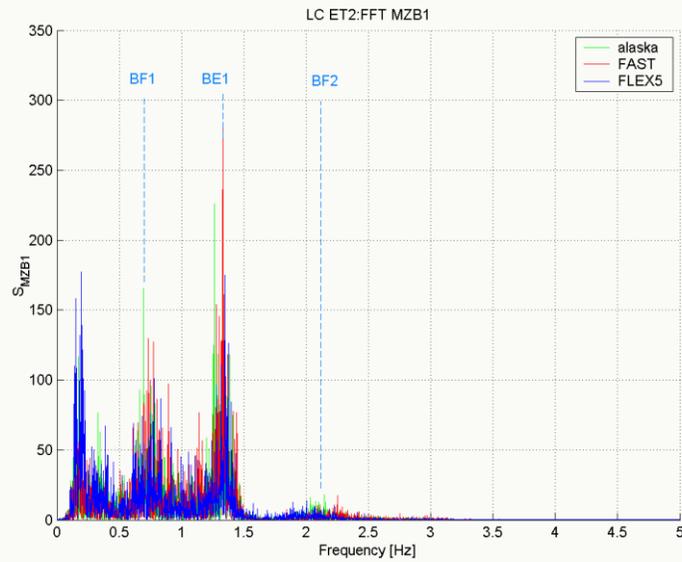
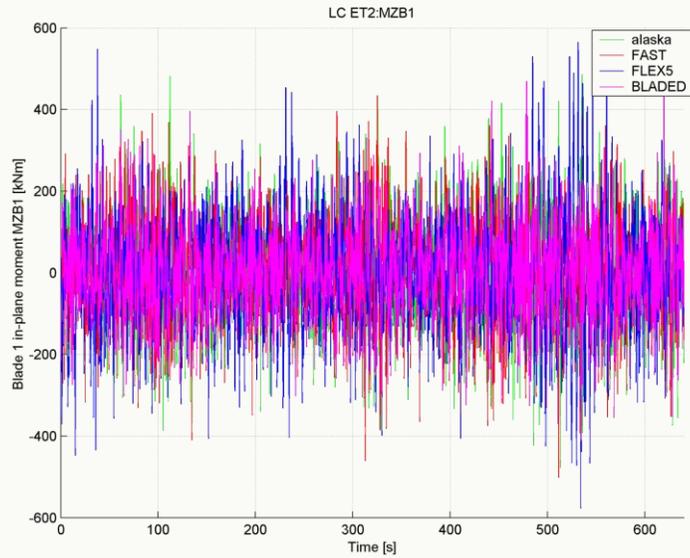


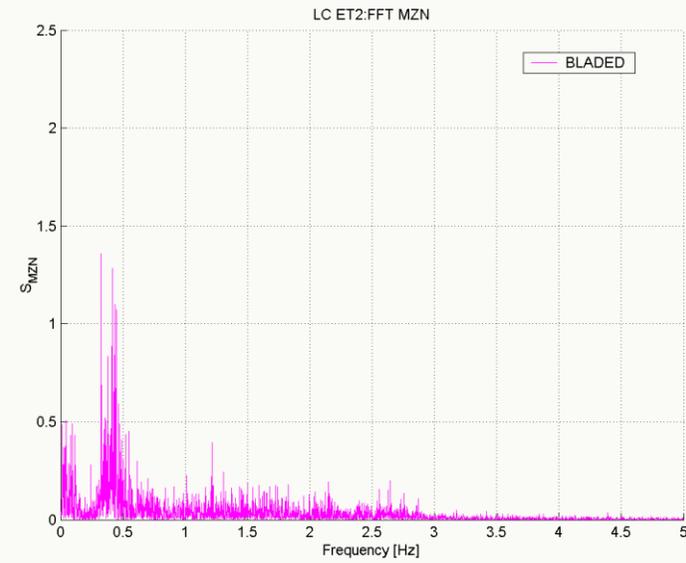
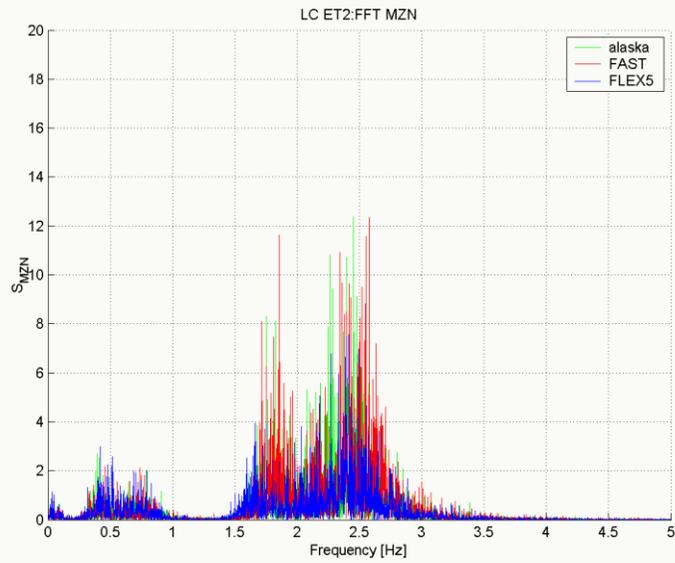




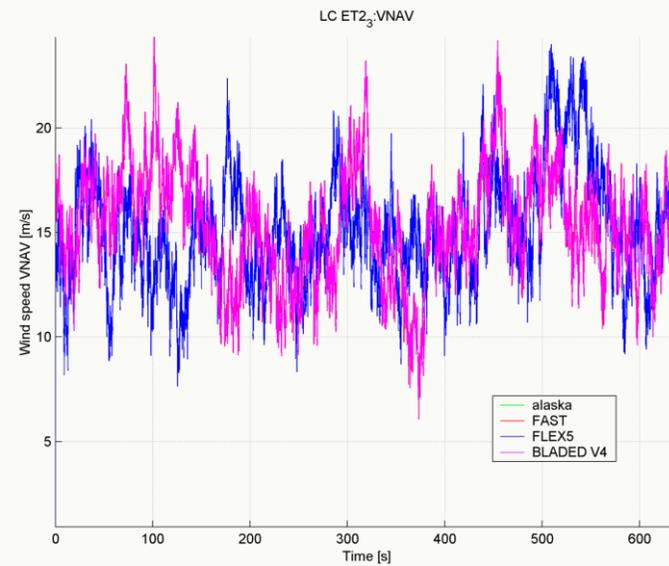
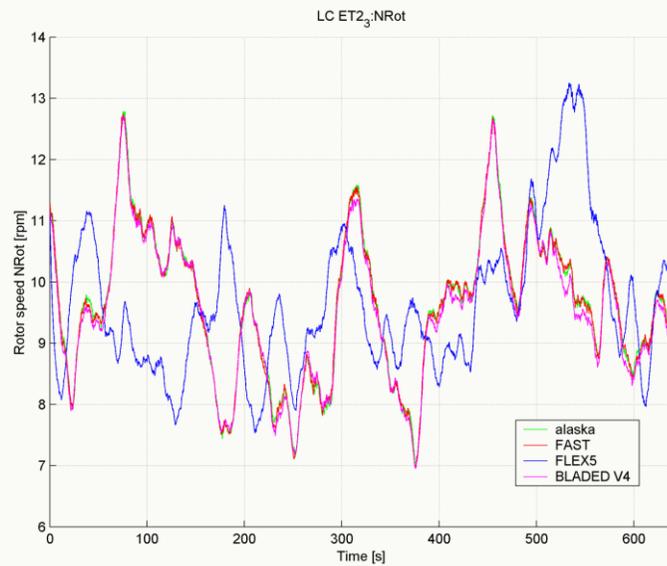
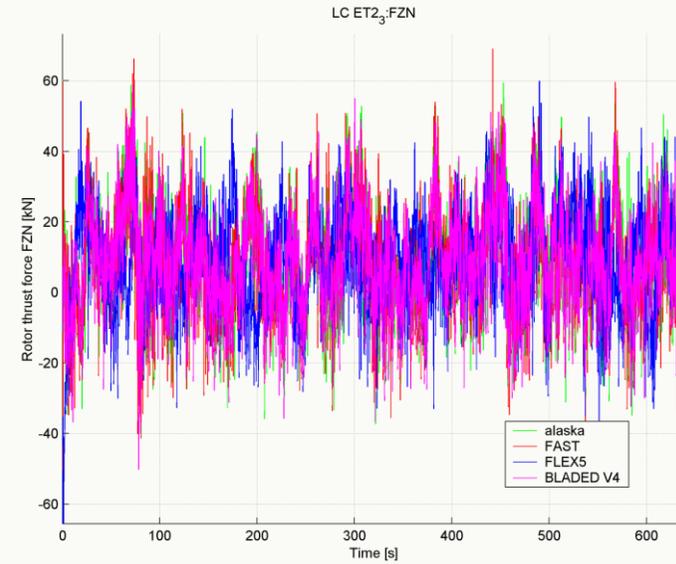
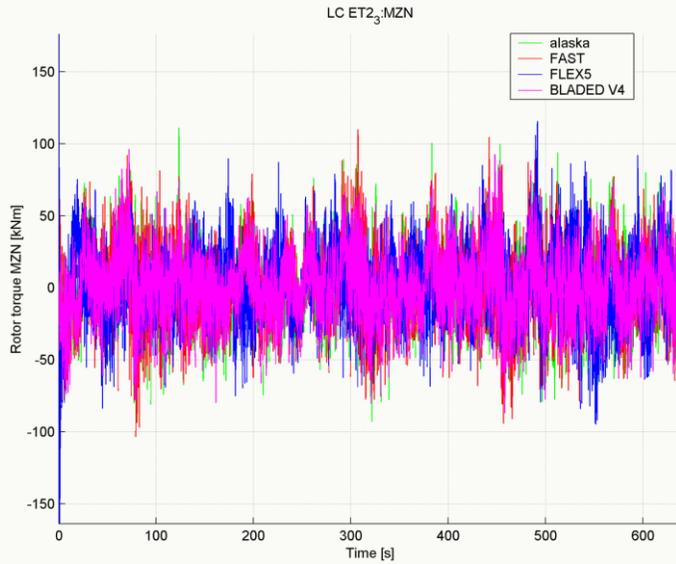


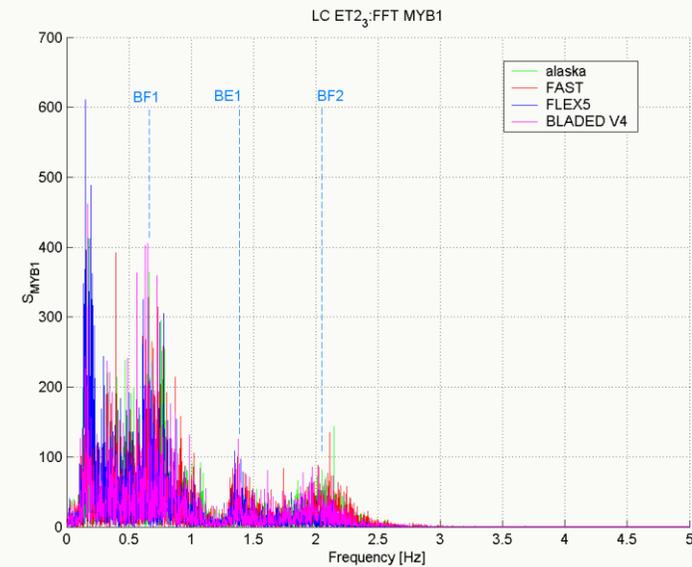
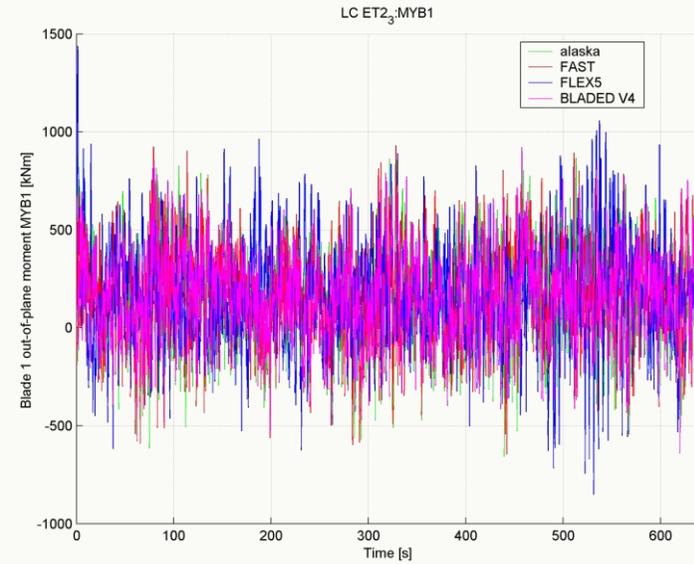
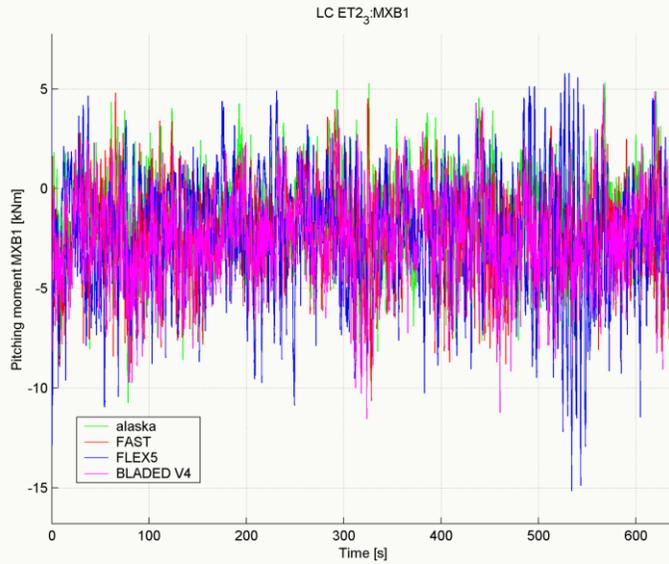


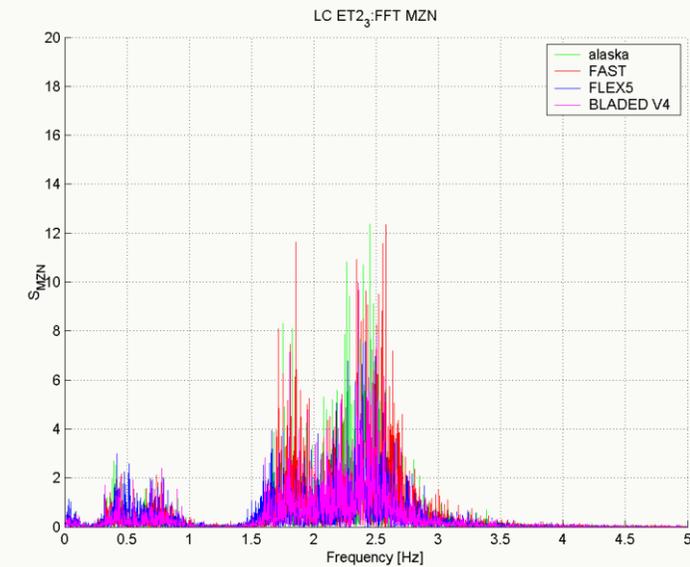
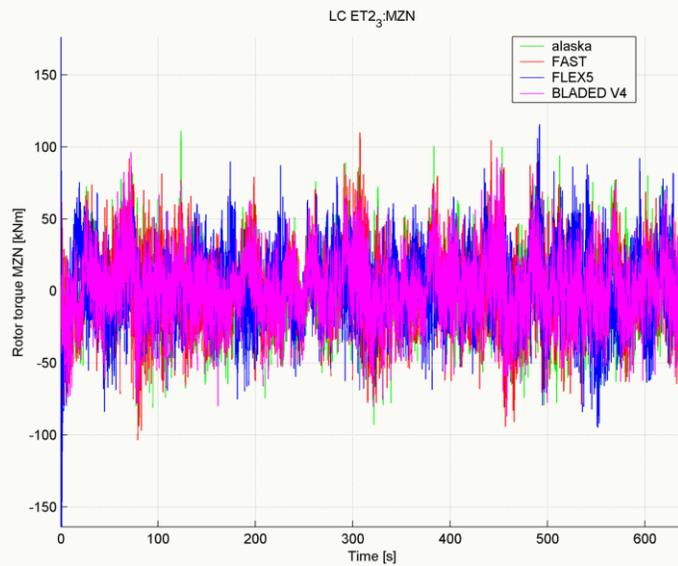
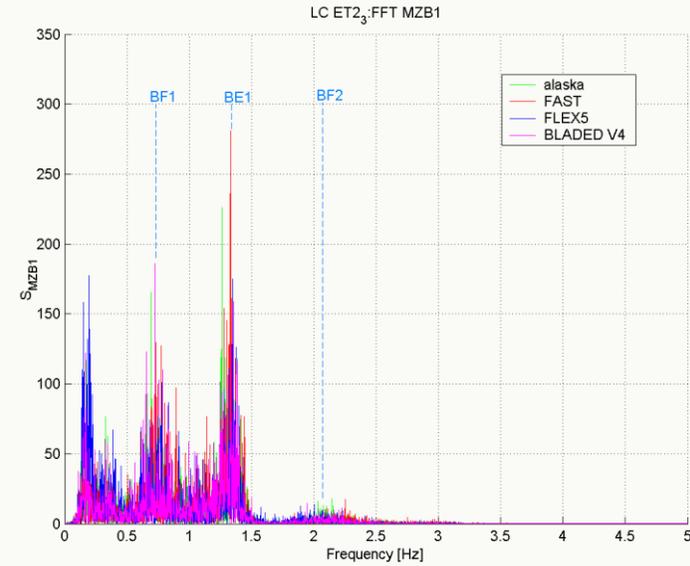
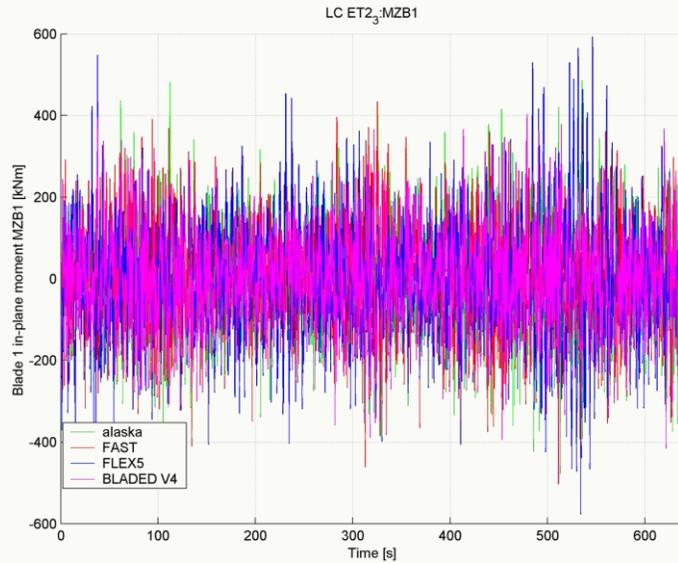


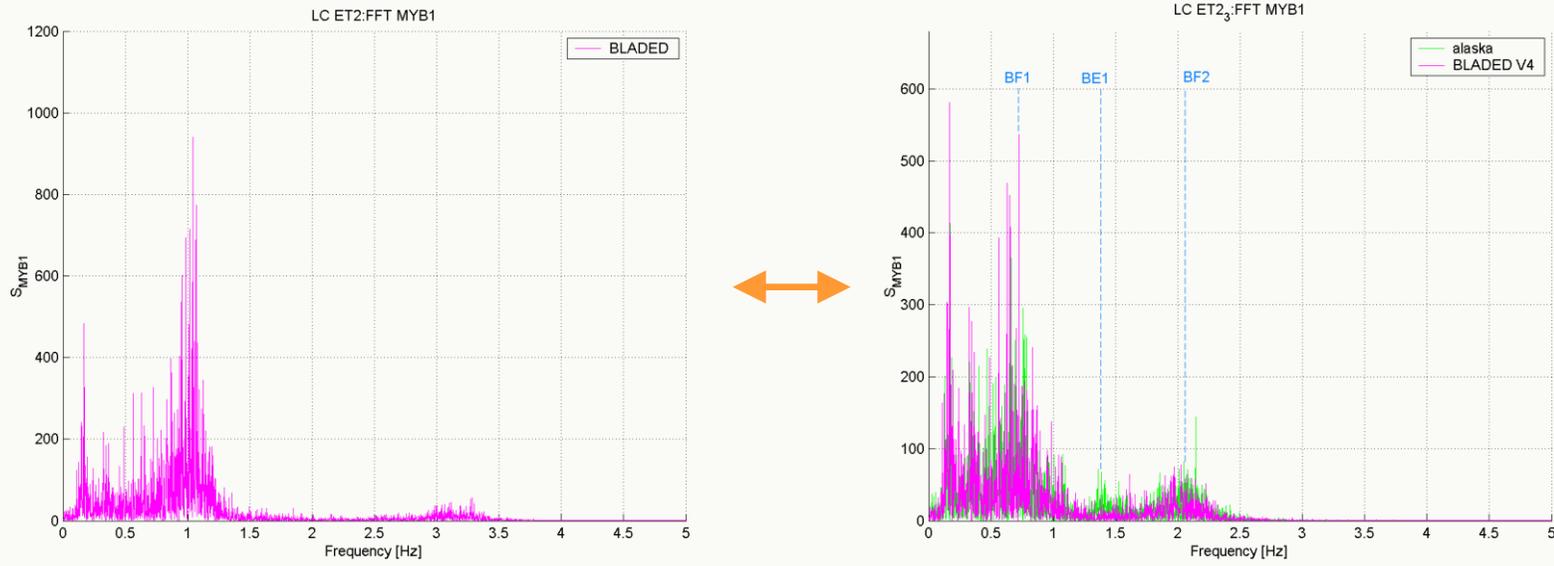


Der Lastfall LC ET2_3 entspricht dem Lastfall LC ET2 mit dem Unterschied das die BLADED Ergebnisse mit der neuen MKS-Version BLADED V4 erzeugt wurden.

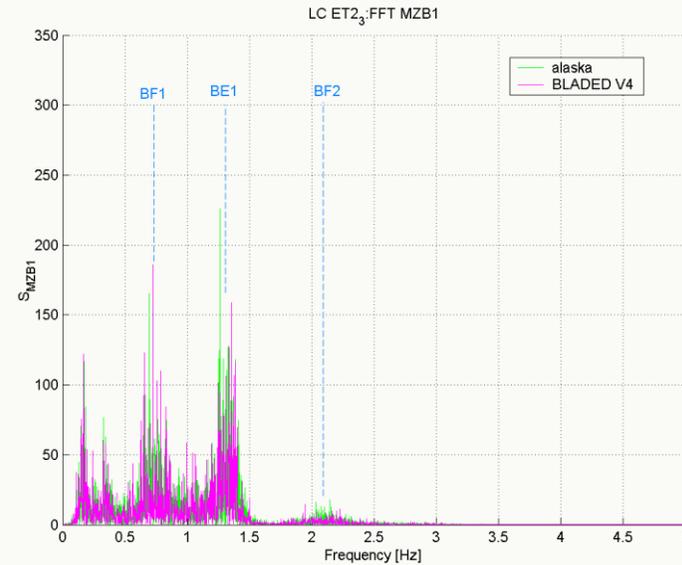
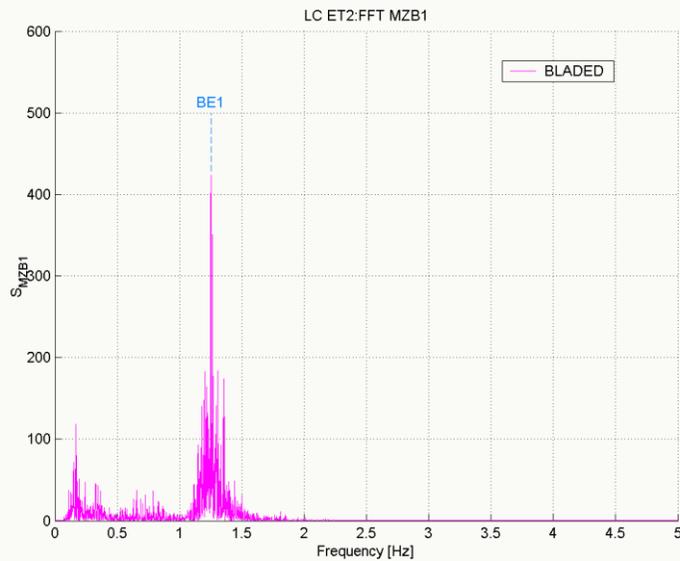




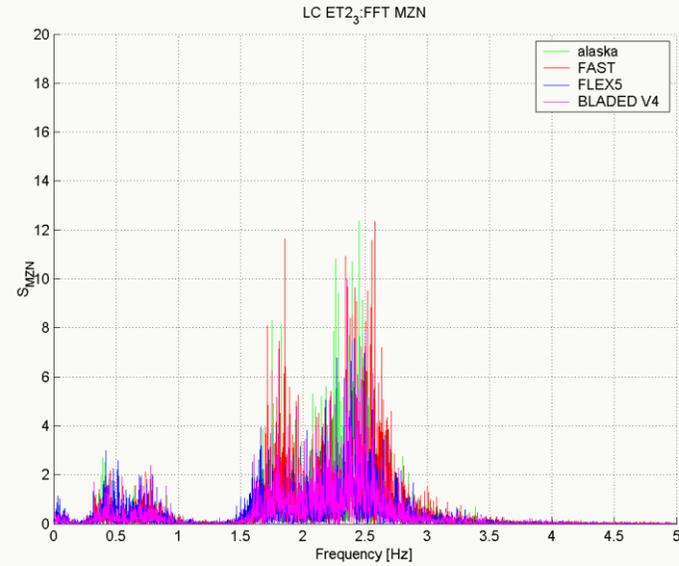
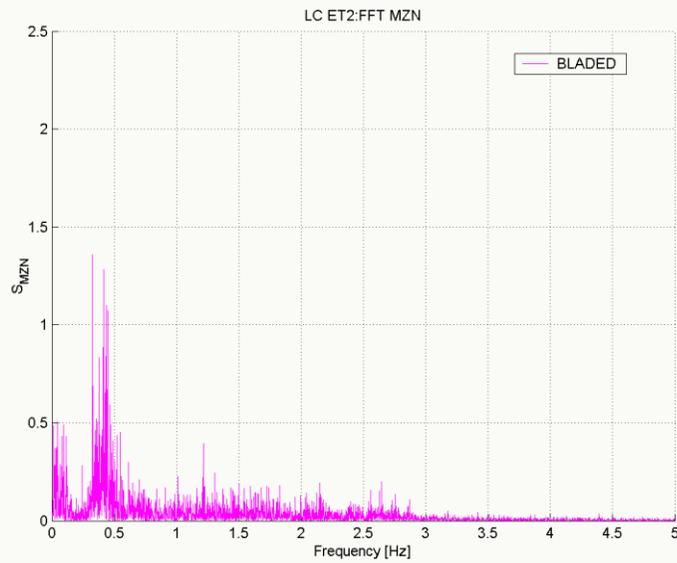




Vergleich Amplitudenspektrum Schlagmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4



Vergleich Amplitudenspektrum Schwenkmoment für BLADED V3.82 und BLADED V4



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

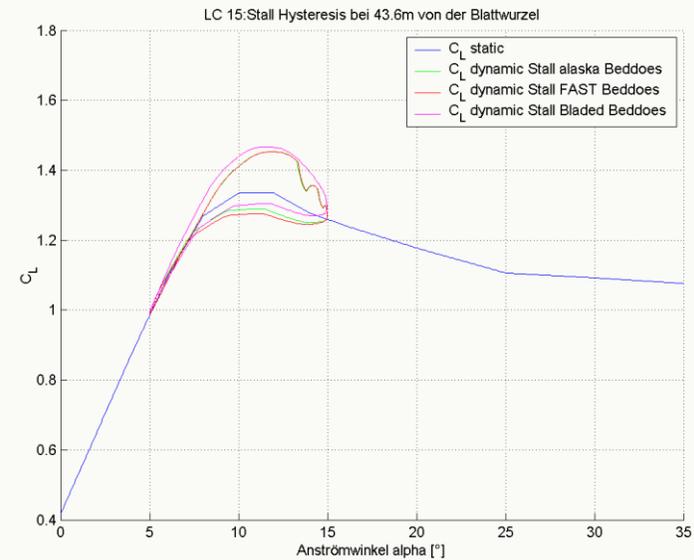
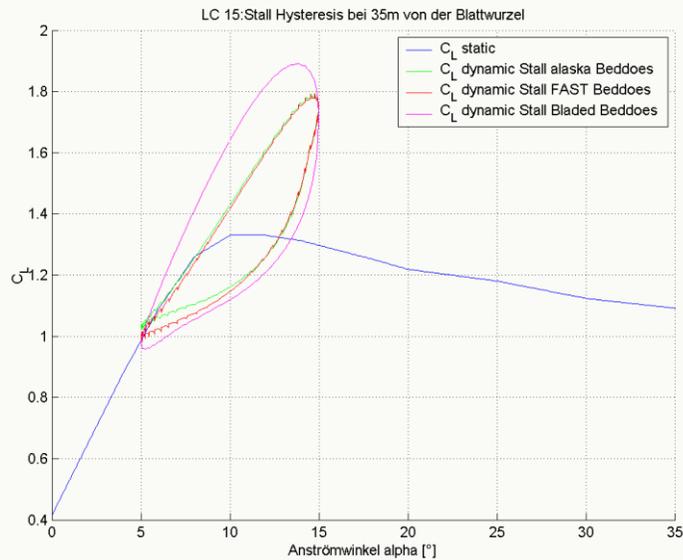
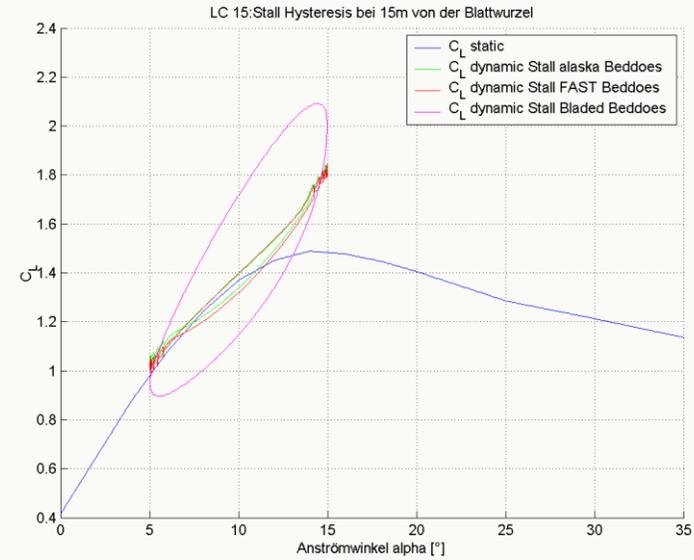
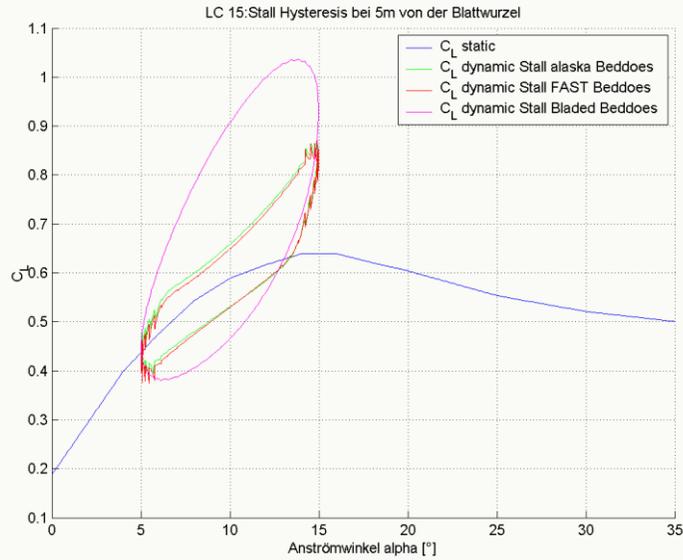
- stehender Rotor
- starres Blatt ohne Prebend und Twist
- Pitchwinkel 90°, Winkel zwischen Blattsehne und Hauptwindrichtung entspricht dem Anströmwinkel
- zyklische Änderung des Anströmwinkels mit 2 Hz wird über Windrichtungsänderung (WindYaw) erreicht
- Anlage ohne Tilt- und Konuswinkel

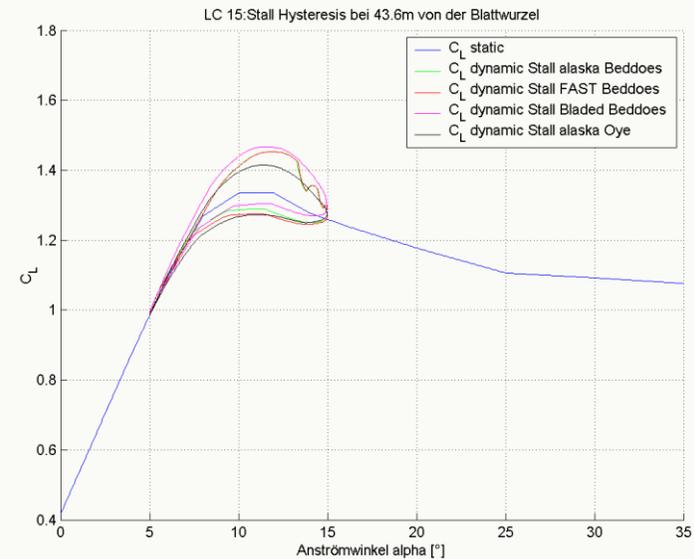
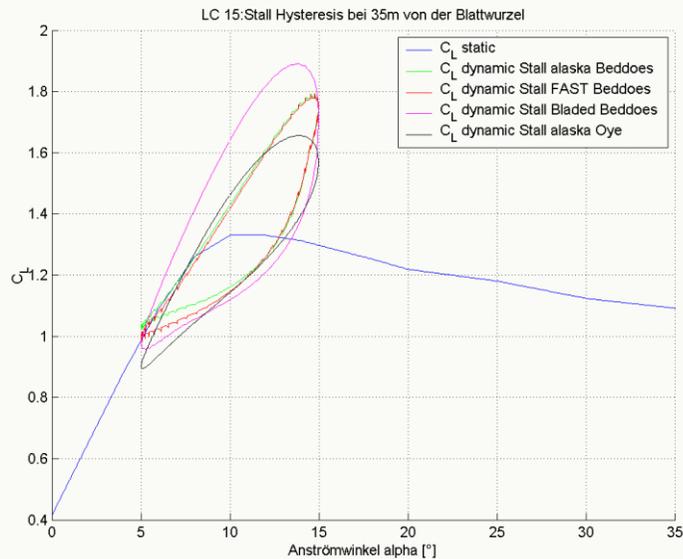
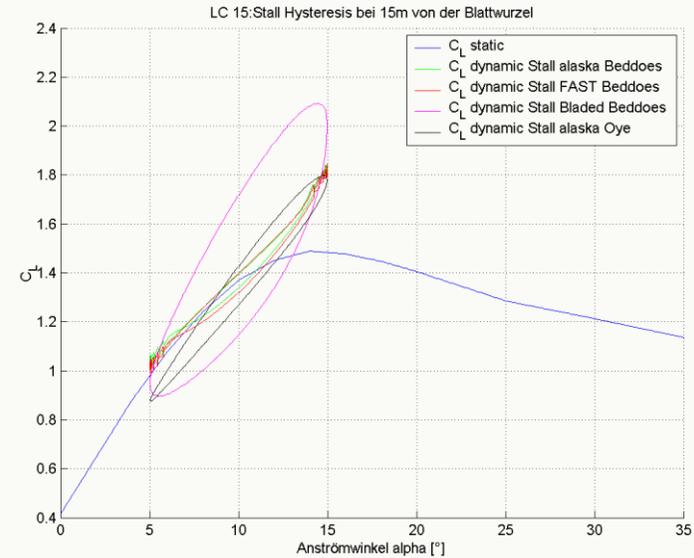
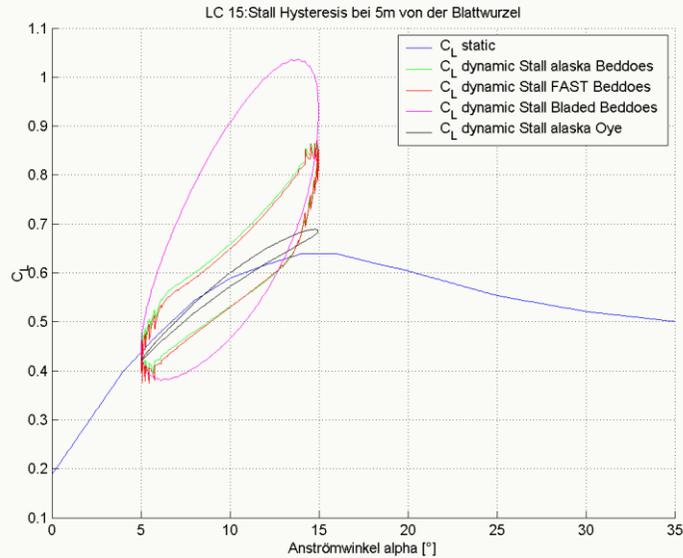
LCGroup IV

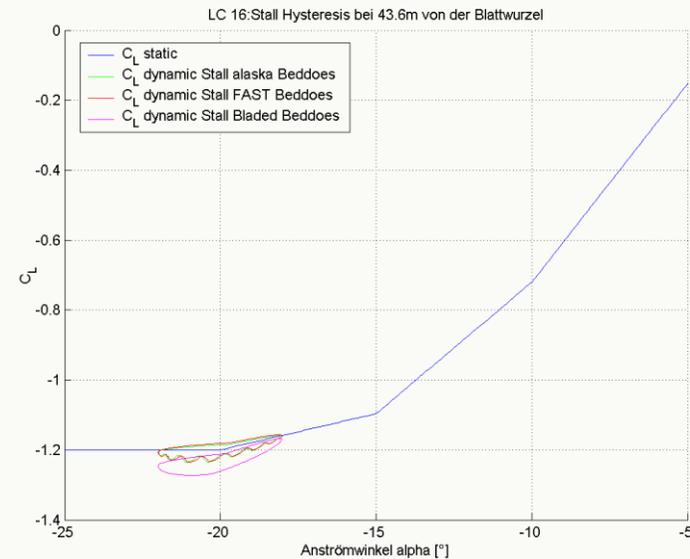
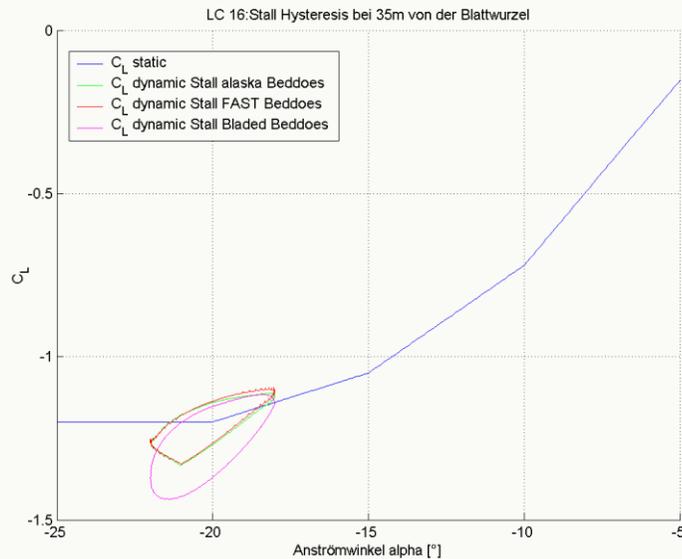
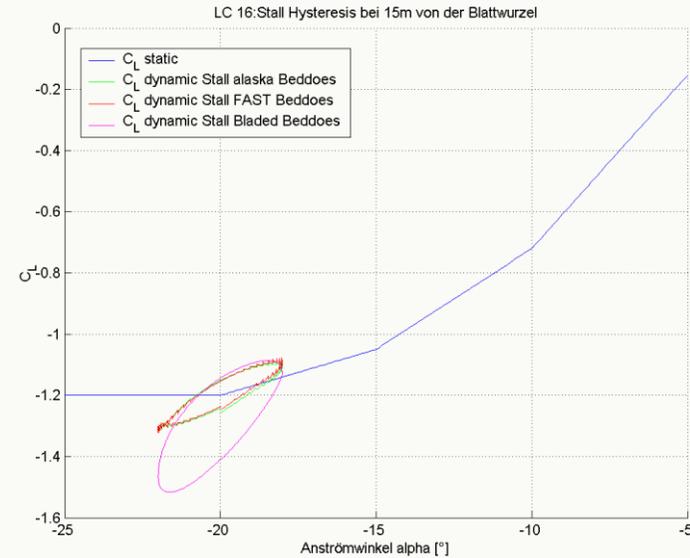
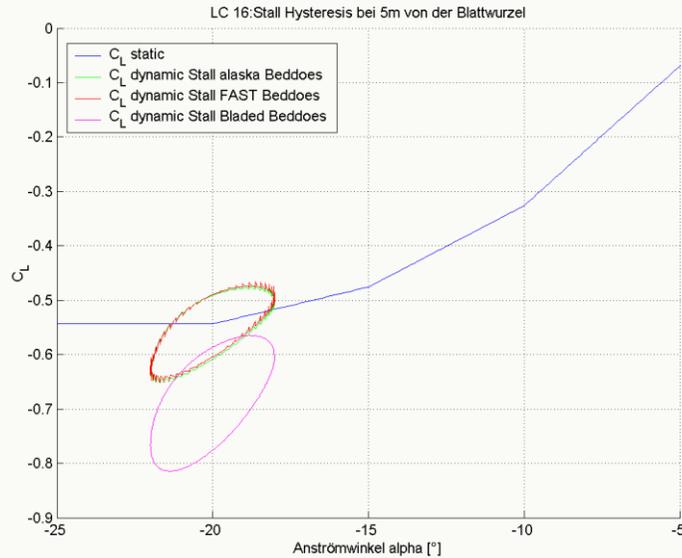
Testlastfälle Dynamic Stall (Beddoes-Leishman Modell, Stig Øye Modell)

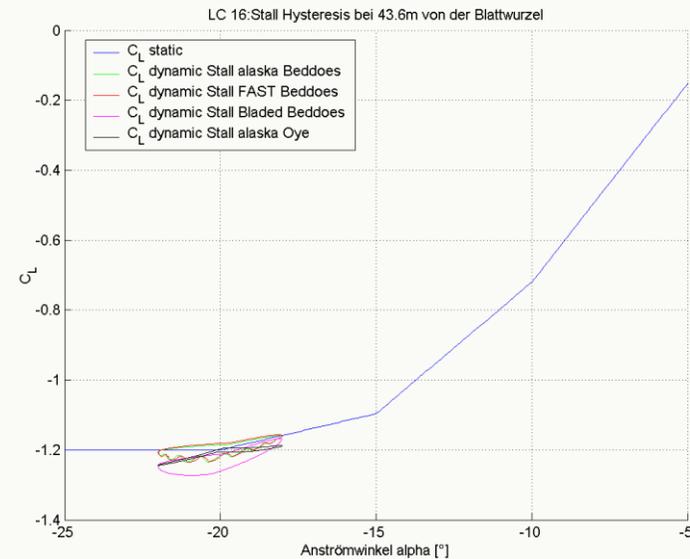
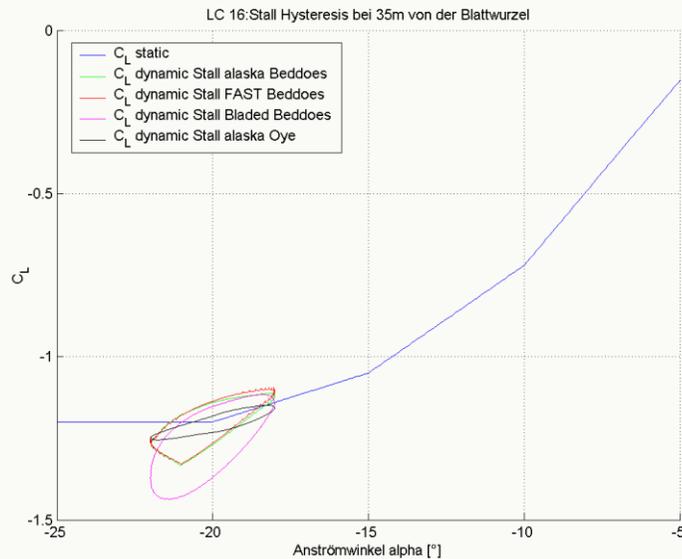
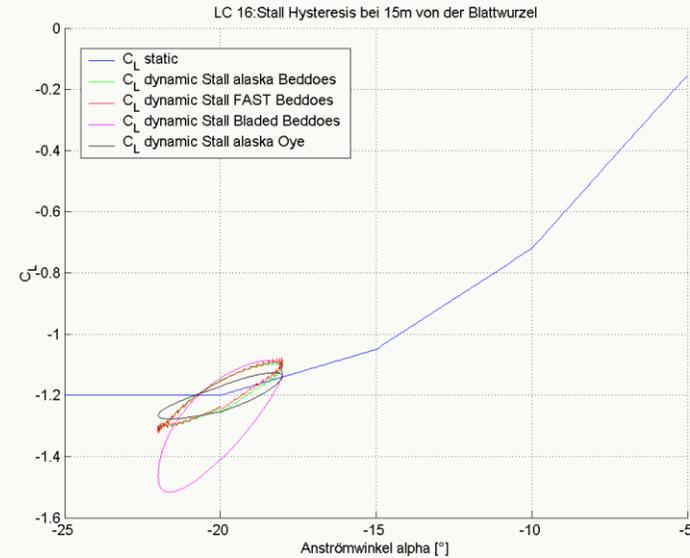
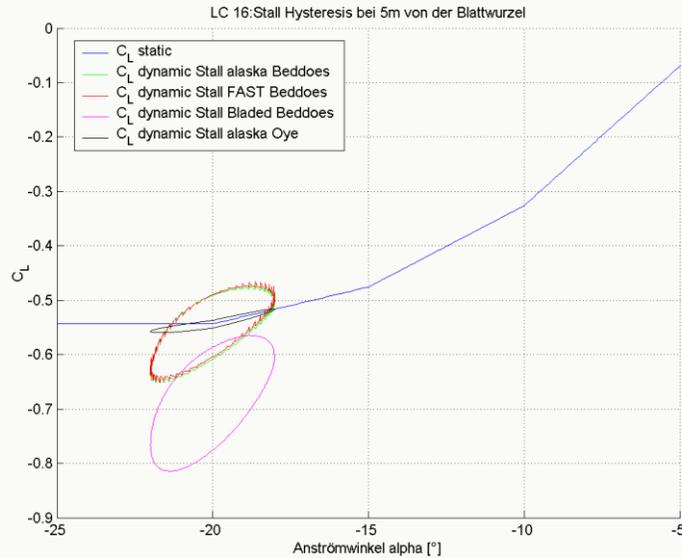
LC Id	Aerodynamics						Turbine Model						Wind			Simulation Control	
	Wake Modell	Dynamic Stall	Tip Loss Model	Tower Shadow	Wind Shear Model	Eval Time Step	Gravity	Rotor DOF	Pitch	Yaw	Rotor IC	Generator / Motor	v _{Hub}	YawErr	Turbulence	Time Step	T _{total}
	EqI/GDW	None/Bed/Oye	on/off	on/off	None/Log/Exp	[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

Dynamic Stall beschreibt den Effekt des dynamischen Strömungsabrisses am Rotorblatt. Mit Hilfe der Lastfälle aus LCGroup IV sollen die verschiedenen Dynamic Stall-Modelle getestet werden. Die Tools alaska, BLADED und FAST bieten als Stall-Modell die Methode nach Beddoes-Leishmann an. Das Stall-Modell nach Stig Øye [3] wird von alaska und FLEX5 unterstützt.





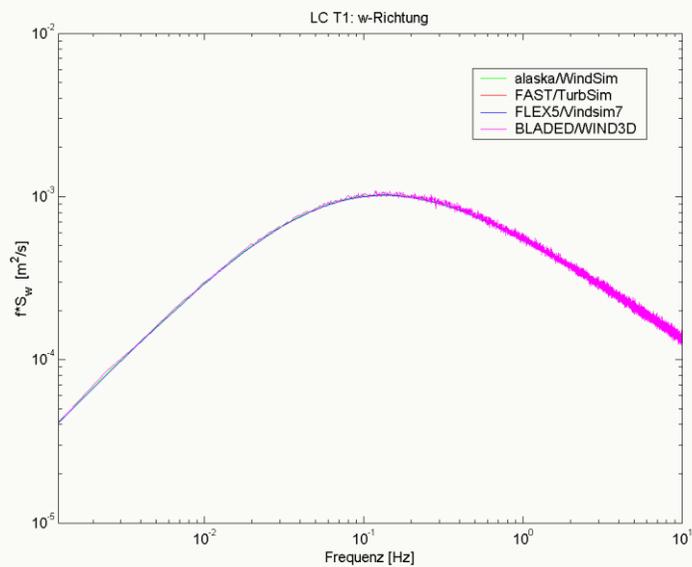
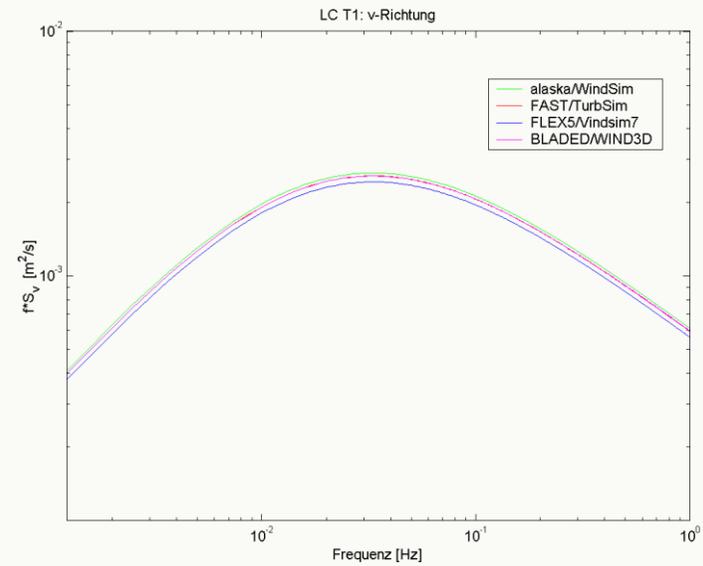
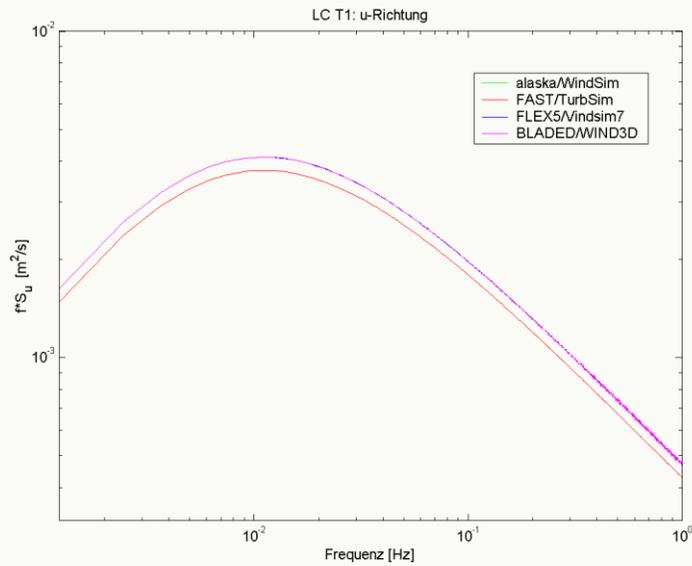




LCGroup I_TurbSim Vergleich synthetischer Windfelder

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 _{total}
		[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

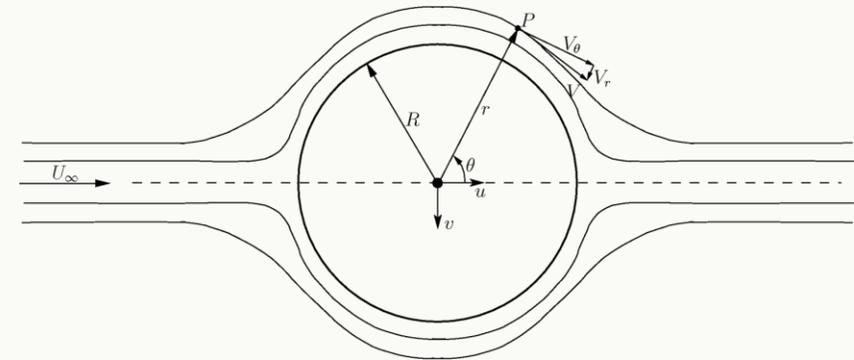
Für die Simulation eines Anlagenmodells mit turbulentem Wind muss ein entsprechendes 3D-Windfeld vorliegen. Dies kann aus Messungen oder mit Hilfe sogenannter Windfeldsimulatoren generiert werden. Mit Hilfe des Lastfalls T1 aus LCGroup I TurbSim sollen die Ergebnisse der verschiedenen Windfeldsimulatoren, die auf gleichen stochastischen Modellen nach Kaimal beruhen, verglichen werden.

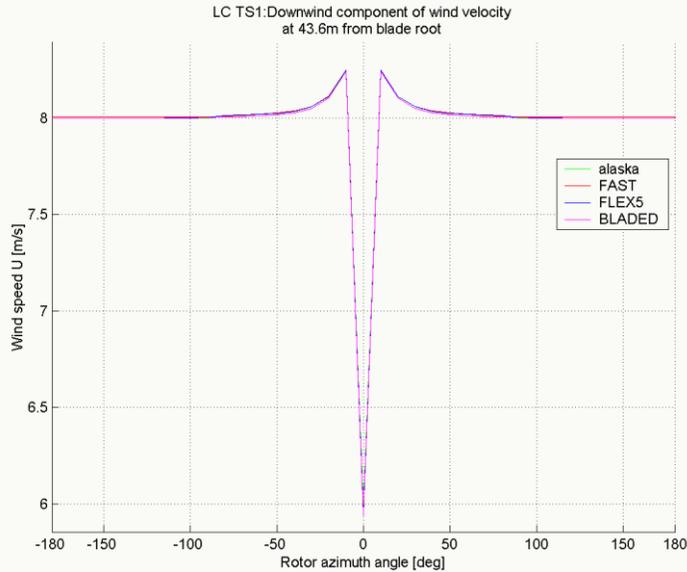
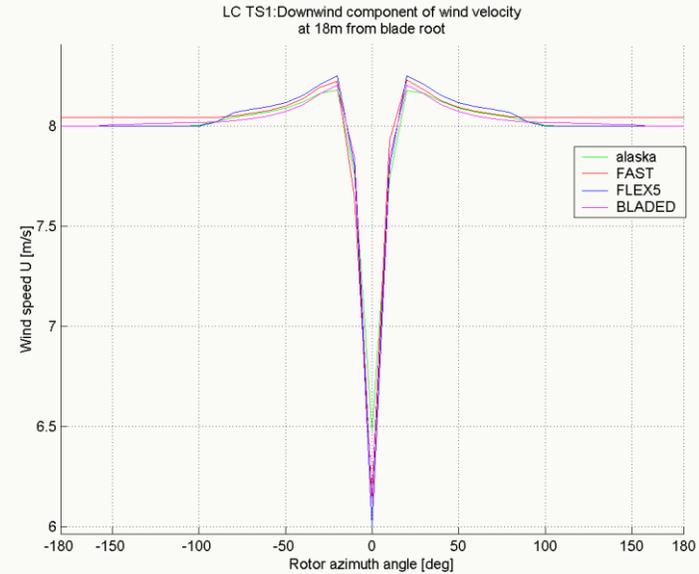
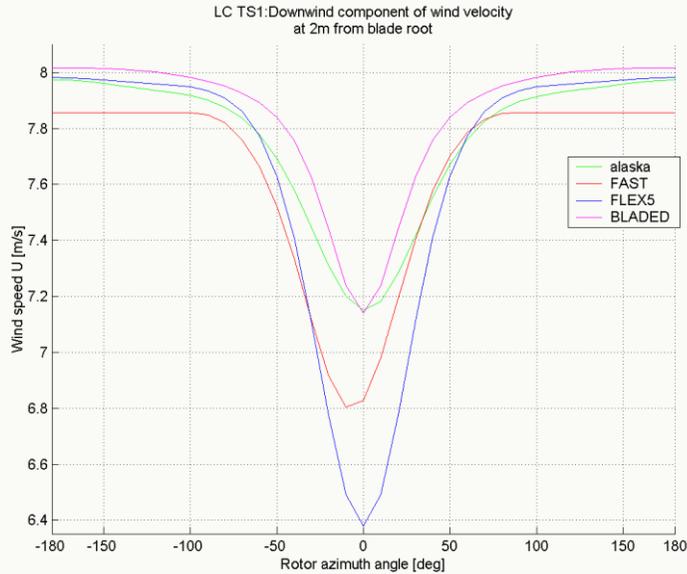


LCGroup I_TS Vergleich der Turmschattenmodelle

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

In Folge des Vorstau-effektes 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 TS1 werden die Turmschattenmodelle verglichen. Dabei wird an einem stehenden Rotor der Rotor-Azimutwinkel variiert und für ausgewählte Blattstationen die Windgeschwindigkeit in Hauptwindrichtung verglichen.





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!

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

[1] NWTC Design Codes (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman), Online im Internet:
URL: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/> [Stand 2011-03-02]

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

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