

**Studie zu den Auswirkungen
erhöhter Anzahlen von Start/Stop- Vorgängen
auf die Anlagentechnik von Windenergieanlagen**

Berichtsnummer: Study_EC_01-2023
Revision: 0 / Dez. 2023

Erstellt für: energy consult GmbH

Peter-Henlein-Straße 2-4,
D-27472 Cuxhaven

Erstellt durch: **IDASWIND** GmbH
Dipl. Ing. (FH) Stephan Führ

Warschauer Straße 36
D-10243 Berlin
Tel.: +49 (30) 3642 8877-0
www.IDASWIND.com

Rechtlicher Hinweis

Die vorliegende Studie darf im Sinne der zwischen der energy consult und IDASWIND bestehenden Vereinbarung an und durch Dritte weitergereicht, vervielfältigt und in Auszügen geteilt werden. Die Urheberschaft von IDASWIND muss dabei weiter klar erkennbar bleiben.

Alle hier enthaltenen Aussagen und Handlungsempfehlungen basieren auf einer generischen Studie und erheben damit keinen Anspruch auf absolute Übertragbarkeit. Entsprechend sind hieraus keine rechtlichen Ansprüche gegen den Urheber dieser Studie ableitbar.

© Dez. 2023 / IDASWIND

Inhaltsverzeichnis

TEIL 1 - SIMULATIONSSTUDIE ZU DEN AUSWIRKUNGEN AUF DIE STANDSICHERHEIT INFOLGE VON MATERIALERMÜDUNG	7
1.1 Zielsetzung der hier durchgeführten Untersuchungen	7
1.2 Beschreibung der Herangehensweise	7
A) Simulationsmodell	7
B) Definition der betrachteten Lastfälle	8
C) Abbildung der Start-/Stopp Vorgänge	9
D) Vorgehen zur Auswertung der Lastzeitreihen (Post Processing)	10
1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	12
A) Vergleich der Varianten – Geneüberstellung der Zeitverläufe	12
B) Vergleich der Varianten - Trendentwicklung aus Variantenprüfung	15
1.4 Schlussfolgerungen - Teil 1	34
TEIL 2 - AUSWIRKUNGEN AUF DEN VERSCHLEIß VON WEA-KOMPONENTEN	35
2.1 Zielsetzung	35
2.2 Durch EA beanspruchte Funktionseinheiten	35
A) Lagerung & Verzahnung der Blattverstellung	36
B) Elektrische, hydraulische & Elektromotorische Komponenten der Blattverstellung	36
C) Umrichtersystem & Schaltelemente im elektrischen Antriebsstrang	37
2.3 Handlungsempfehlungen	38
A) Anpassung Schmiersysteme	38
B) Instandhaltung elektrische & hydraulische Schaltelemente	38
2.4 Schlussfolgerungen - Teil 2	40

Verwendete Abkürzungen:

WEA	Windenergieanlage
EA	ereignisbezogene Abschaltung
AKS	Antikollisionssystemen
KNE	Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DEL	engl. Abkürzung für <u>D</u> amage <u>E</u> quivalent <u>L</u> oad

Quellverweise:

- [1] Reichenbach, M., Aussieker, T. & Holzmüller, J. (2021), [Wirtschaftliche Aspekte ereignis-bezogener Abschaltungen zum Vogelschutz an Windenergieanlagen. Brutplatzszenarien -Ertragseinbußen - Einfluss auf die Anlagentechnik](#), KNE_20201210
- [2] DIBt, [Richtlinie für Windenergieanlagen](#), RiLi-WEA Stand: Oktober 2012 – korrigierte Fassung März 2015
- [3] ABB SACE, [ABB solutions for switching and protection of low speed wind turbines](#), 1SDC007411G0201 - 06/2013
- [4] ABBSACE, [Technischer Katalog Emax Offene Leistungsschalter](#), 1SDC200006D0102-04/2005

Vorwort

Infolge von Auflagen (Redispatch/EinSMan, Schall, Schattenwurf) und die Einführung neuer Technologien zur Gefahrenabwehr (z.B. Luftraumradar und Antikollisionssysteme zum Schutz von Fledermäusen & Vögeln), unterliegen heute betriebene Windenergieanlagen (WEA) innerhalb ihrer Betriebslebensdauer deutlich höheren Anzahlen von Start/Stop-Vorgängen als noch vor Jahren. Diese werden allgemein unter dem Begriff „Ereignisbezogene Abschaltungen“ (EA) zusammengefasst. Die Anlage wird damit einhergehend für eine Zeitspanne von Minuten bis Stunden zusätzlich in den Trudelbetrieb versetzt. Die Rotorblätter der Anlage werden im Zuge des Stoppvorgangs aus dem Wind gedreht und die Einspeisung der Anlage unterbrochen. Nach einer Wartezeit im Trudelmodus wird der Anlagenrotor über die Blattverstellung wieder beschleunigt und die Anlage selbst, nach durchlaufen der üblichen Startprozedur, zurück in den Einspeisebetrieb versetzt.

Die nach einschlägigen Designrichtlinien üblicherweise anzusetzenden 1100 Start/Stop-Vorgänge pro Jahr werden so leicht um Faktor 2 überschritten. Im Zusammenhang mit Antikollisionssystemen (AKS) scheinen zudem weitere 5000 und mehr Stops im Jahr möglich.

Naheliegendergab sich damit für den Auftraggeber dieser Studie die Frage, ob sich derart zusätzliche Abschaltungen in irgendeiner Weise negativ auf die mechanischen und elektrischen Systemkomponenten einer WEA auswirken könnten. Zudem wurden sich von dieser Studie Aussagen zu pauschalen Obergrenzen für Soft-Stop Vorgänge erwartet, die durch die mechanischen, wie elektrischen Bauteile einer WEA sicher zu ertragen sind.

Letzteres erscheint auf Grund von Unterschieden in der Anlagentechnik und möglichen Standorteinflüssen jedoch wenig zielführend. Entsprechend werden hier stattdessen die allgemeinen Grundlagen zur Ableitung individueller Festlegungen aufgezeigt. Zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen gliedert sich die vorliegende Studie in zwei separate Teile:

- Teil 1** ... der Studie, widmet sich der Analyse möglicher Auswirkungen auf die Standsicherheit auf Grundlage der mit jedem Stoppvorgang einhergehenden materialtechnischen Ermüdungsbeanspruchung.
- Teil 2** ... der Studie, liefert eine Zusammenfassung über möglicherweise zu beachtenden erhöhten Verschleiß von WEA-Komponenten.

Einordnung gegenüber dem Stand der Technik

Fachliche Stellungnahmen zu möglichen Auswirkungen einer erhöhten Anzahl von Start/Stop-Vorgängen auf WEA sind z.B. mit der durch das Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende KNE GmbH beauftragten Studie - *Wirtschaftliche Aspekte ereignisbezogener Abschaltung zum Vogelschutz an Windenergieanlagen [1]* – dokumentiert. Auf Wunsch des Auftraggebers hatte sich IDASWIND bereits im Vorfeld zu dieser geäußert.

Durch die KNE-Studie werden die Mechanismen Materialermüdung und Verschleiß zunächst fachlich richtig als die in Verbindung mit EA relevanten Abnutzungserscheinungen herausgearbeitet. Der Mechanismus der Materialermüdung wird dabei dem etablierten Stand der Technik folgend korrekt skizziert. Aufbauend darauf werden - der aufgezeigten Logik folgend - plausible Erwartungen zum Einfluss von Start/Stop-Vorgängen mit anschließenden Stillstands- oder Trudelzeiten geschildert. Unter Zugrundelegung einer üblichen Anlagenbetriebsweise, kann daher die in [1] - Absatz 3.3.5.1 (S.50) aus einer logischen Ableitung heraus getroffene Aussage - „[...] dass zusätzliche Stopp- und Startvorgänge sowie zusätzliche Stillstandzeiten nicht zu einer erhöhten Materialermüdung bzw. Abnutzung führen“ - im Grunde als richtig angesehen werden. Mit Blick auf die laufende Debatte über angepasste Betriebsweisen zur Erreichung kürzerer Abbrems- und ggf. auch Stillstands- bzw. Trudelzeiten, scheint allerdings eine darüber hinaus gehende, vergleichende Betrachtung angebracht.

Ähnliches gilt nach Stand der Technik für die in der KNE-Studie enthaltenen Aussagen zum Mechanismus Verschleiß. Die in [1] enthaltene Auflistung, evl. von erhöhter Abnutzung betroffener Bauteile und Sub-Komponenten, erscheint soweit vollständig und korrekt. Hinsichtlich der korrekt wiedergegebenen Erwartung hinsichtlich eines steigenden Wartungsaufwands und der damit verbundenen Kosten ([1] - Absatz 3.3.5.2) verzichtet die Studie allerdings auf eine tiefergehende Beleuchtung des damit für Betreiber bestehenden Problems zur Festlegung geeigneter Wartungsintervalle. Letztere wird insbesondere zur erfolgreichen Umsetzung einer vorbeugenden oder zustandsorientierten Wartungsstrategie benötigt.

Auch in Hinblick auf den derzeit geltenden, technisch-regulatorischen Rahmen ist grundsätzlich festzuhalten, dass der Umgang mit gegenüber den Entwurfsannahmen übermäßig oft auftretenden EA gegenwärtig weitestgehend den Betreibern, bzw. den mit der Betriebsführung beauftragten Firmen überlassen bleibt. Die bauaufsichtlich relevante Richtlinie des DIBt [2] jedenfalls, definiert diesbezüglich bisher keinerlei im Rahmen der dort geregelten Prüfung zur Standorteignung anzuwendende Kriterien. Die Richtlinie bewegt sich damit praktisch auf gleicher Ebene mit der in der KNE-Studie [1] geäußerten Ansichten zur Materialermüdung.

Hinsichtlich der Festlegung geeigneter Wartungsintervalle zielen Betreiber und Betriebsführer nach Wissen von IDASWIND derzeit vor allem auf jeweils individuell auf die jeweiligen Standortverhältnisse zugeschnittene Wartungsfahrpläne - und zwar auf Basis datengetriebener Ansätze. Nach einer gewissen Anlernzeit würden sich damit auch entsprechende Einflüsse aus erhöhten Anzahlen von EA in den Wartungsfahrplänen abbilden. Letzteres verlangt allerdings nach bestimmten Voraussetzungen und ist ohne Unterstützung durch Anlagenhersteller oder Drittanbieter für kleinere Betriebe ggf. nicht ohne weiteres nutzbar.

Teil 1 - Simulationsstudie zu den Auswirkungen auf die Standsicherheit infolge von Materialermüdung

WEA sind allgemein hin als hochgradig dynamisch belastete Strukturen bekannt. Dem Ermüdungsverhalten ihrer Bauteile kommt so mit Blick auf die Standsicherheit - insbesondere im Zuge des Entwurfs, der Erteilung von Betriebsbewilligungen und auch in Verbindung mit der Betriebsführung - eine besondere Bedeutung zu. Ausschlaggebend für den sicheren Betrieb sind die mit Garantie für die Standsicherheit nachgewiesenen Grenzen der aus Betrieb und Stillstand über die Nutzungsdauer akkumulierten Lasteinwirkungen. Mögliche Abweichung von der somit entwurfsmäßig als Grenzfall vorgesehenen Betriebsweise sind damit zunächst immer hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Standsicherheit zu prüfen. Gemäß der ursprünglichen Herleitung, werden aus typischen Start-/Stopp Vorgängen keine schädlichen Einflüsse auf die Materialermüdung erwartet.

1.1 Zielsetzung der hier durchgeführten Untersuchungen

Mit Teil 1 der vorliegenden Studie sollen nun die insofern nur auf Basis einer logischen Herleitung zum Mechanismus Materialermüdung getroffenen Aussagen der einleitend wiedergegebenen KNE-Studie [1] noch einmal verifiziert und um zusätzliche Detailbetrachtungen erweitert werden. Anders als in der genannten Studie sollen hierfür jedoch konkrete Lastvergleiche auf Basis simulierter Zeitreihen herangezogen werden.

Zudem soll hier eine Variantenprüfung zu verschiedenen Einflussparametern erfolgen. Die untersuchten Varianten sollen dabei insbesondere verschiedene Stillstands- bzw. Trudelzeiten, unterschiedliche Verfahrgeschwindigkeiten der Blätter, sowie Endlagenwinkel der Pitchverstellung abbilden (siehe auch **Tab.2**). Auf Grundlage des aus diesen Varianten hervorgehenden Datenraums sollen schließlich Schaubilder entwickelt werden, aus denen sich auch über diese festgelegten Grenzen des Betriebs hinausgehende Trends der Lastentwicklung ableiten lassen.

Folgende Zusammenhänge stehen dabei im besonderen Fokus der Betrachtung:

- Welche Änderungen in den Betriebsbedingungen führen zu welchen veränderten Belastungen?
- Welche Komponenten würden durch Abschaltungen möglicherweise kritisch belastet und in welcher Form?

1.2 Beschreibung der Herangehensweise

A) Simulationsmodell

Alle zugrundeliegenden Simulationsberechnungen wurden mit Hilfe von Softwarelösungen erstellt, die auch im Rahmen von Zertifizierungs- und Anlagendesignprojekten genutzt werden (in diesem Fall Aeroelastik-Code Flex5 & dafür erstellte Erweiterungen). Als Basis für die Ermittlung der Lastzeitreihen diente in diesem Fall ein generisches WEA-Strukturmodell mit den in **Tab.1** dargestellten technischen Kenngrößen.

Nennleistung	3050 kW
Nabenhöhen	149,0 m (hybrid)
Rotordurchmesser	101 m
Anlagentyp	Getriebelos; Luvläufer mit aktiver Rotorblattverstellung
Rotorblatt-Anzahl	3
Konuswinkel	0
Rotorachswinkel	5
Drehzahlbereich Leistungseinspeisung	4 - 14,2 U/min
Blattspitzengeschwindigkeit	bis 77,74 m/s
Rotorblattverstellung	je ein autarkes elektrisches Stellsystem mit indiv. Notversorgung

Tab.1 Technische Kenngrößen der modellierten WEA

Neben dem generischen Strukturmodell wurde ein ebenso generischer Anlagenregler verwendet, der bewusst keine besonderen Funktionen zur Lastreduktion (Dämpfer) bot (konservativer Ansatz). Im Rahmen der Lastfalldefinition wurde darauf geachtet, dass die WEA zunächst nach Abschluss des Stopp-Vorgangs jeweils im Trudelbetrieb verbleibt und nach einer festgelegten Zeit selbständig in den Startbetrieb übergeht. Zudem waren jegliche Überwachungsfunktionen des Reglers deaktiviert. Ein zeitlich unkontrolliertes Auslösen der mechanischen Rotorbremse war damit sicher ausgeschlossen.

B) Definition der betrachteten Lastfälle

Wie einleitend beschrieben, ist das Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen ein Lastvergleich. Entsprechend dieser Zielsetzung werden einzelne Lastzeitreihen mit und ohne EA verglichen. **Abb.1** bietet einen visuellen Eindruck über diesen Vergleich anhand einer beispielhaft gewählten Zeitreihe.

Fall	Zeitliche Abbildung		Umweltmodell					Pitch Reaktion	
	Vhub	Tmax	Tidle	Turb.-Seeds	L.Dichte	Vexp	Vslope	Offset WR	V - Pitch
m/s	s	s		Kg/m ³	-	°	°	°/s	°
2	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
4	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
6	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
8	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
10	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
12	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
14	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
16	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
18	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
20	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
22	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45
24	920, 1220, 1520	300, 600, 900	s1, ... s12	1.225	0.2	8	+/-8 altern.	2, 4,10	90, 60, 45

Tab.2 Variantenübersicht - Parameter der Lastfalldefinition

Grundlage für die Vergleiche bilden mehrere Minuten umfassende Simulationszeitreihen, deren Länge (Tmax) entsprechend der beabsichtigten Dauer des Trudelbetriebs - Tidle (Festlegung auf 300, 600 & 900 Sekunden) zu wählen war. Als Wind-Regime wurden für die einzelnen Lastfallvarianten die nach IEC-Designrichtlinie gültigen windklimatischen Bedingungen (Luftdichte, Höhenexponent) und zugehörigen Standardturbulenzen verwandt. Tatsächliche Standortturbulenzen sollten üblicherweise unterhalb der IEC-Turbulenzen liegen. Verstärkende Effekte aus einer schrägen Anströmung des Rotors

(Offset WR), sowie der Steigung des umgebenden Terrains (Vslope), sind im Sinne eines konservativen Ansatzes in gleicher Weise berücksichtigt.

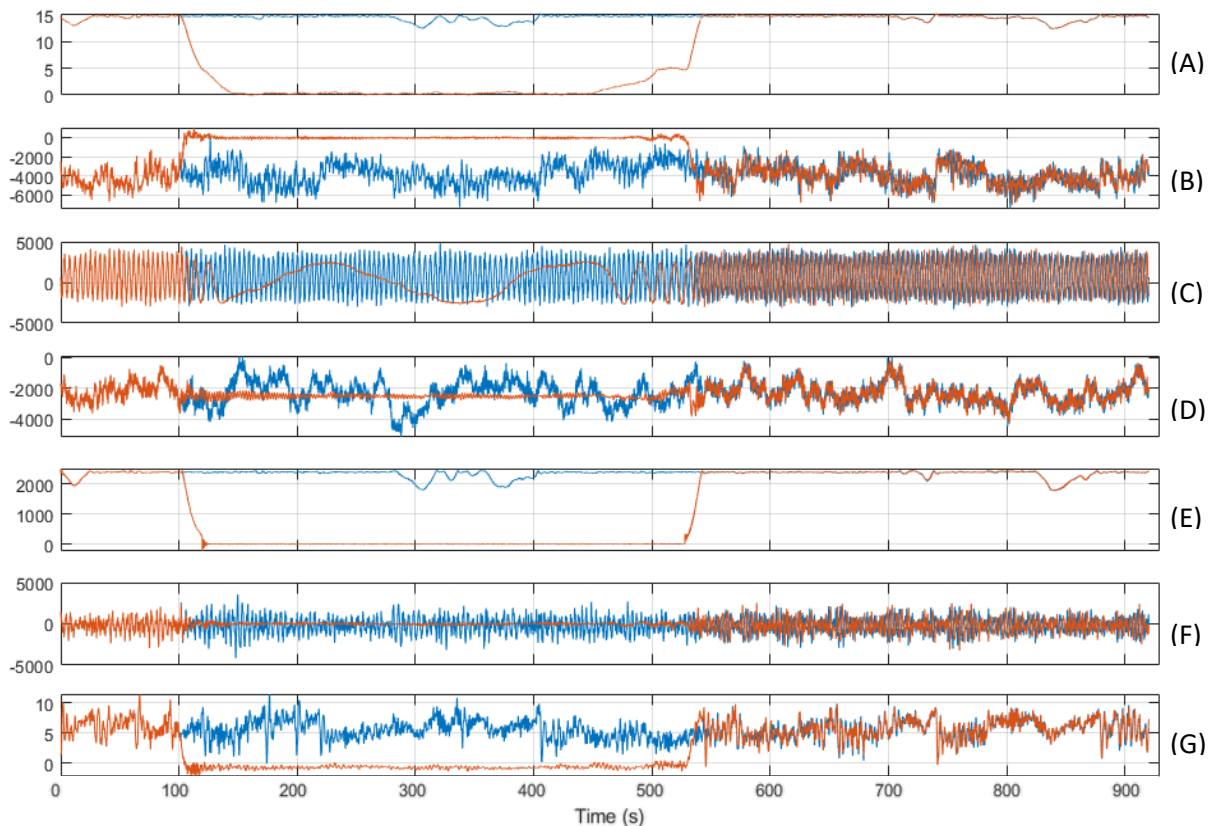


Abb.1 Beispiel für simulierte Lastzeitreihen mit (rot) und ohne (blau) EA und anschließend zeitweisen Trudelbetrieb, bei 300s Trudelbetrieb, 90° Endlagenwinkel und 2° Pitch-Geschwindigkeit während Stopp bei Nennwind.

Dargestellte Sensoren: ...

Rotordrehzahl (A), Nickmoment My (B) & Rollmoment Mz (C) am Blattlager - stehender Teil, Nickmoment My Hauptlager (D), Torsionsmoment Mz Welle (E), Giermoment Mx Nabe (F), Biegemoment in Schubrichtung My Turmfuss (G)

Als Nabenwindgeschwindigkeit wurden mittlere Werte von 6 bis 24m/s in Schrittweiten von 2m/s betrachtet. Von allen simulierten Zeitreihen wurden zur Beschleunigung des Auswertungsprozesses allerdings abschließend nur die in **Tab.2** farblich hervorgehobenen Nabenwindgeschwindigkeiten (V_{hub}) für das Post-Processing herangezogen. Jede der nach Wind und Simulationsdauer verschiedenen Lastfallvarianten wurde jeweils für 12 unterschiedliche Turbulenzzeitreihen (Seeds) gerechnet, womit dem stochastischen Charakter der Turbulenzmodellierung (zeitliches Zusammentreffen von Windgeschwindigkeit und -richtung mit Stopp) im üblichen Maße Rechnung getragen wurde.

C) Abbildung der Start-/Stopp Vorgänge

Im Rahmen des angestrebten Vergleichs wurden für alle betrachteten Nabenwindgeschwindigkeiten und Dauern des Trudelbetriebs (Tidle) zusätzlich verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten der Blätter (V-Pitch) und Endlagenwinkel (Pitch max) der Pitchverstellung simuliert. Hierzu wurden je drei verschiedene Werte für die Verfahrensgeschwindigkeit (2, 4 & 10°/s) und

für die Endlagenwinkel (45, 60 & 90°) betrachtet (siehe **Tab.2**). Damit sollte der im Zusammenhang mit AKS laufenden Diskussion hinsichtlich möglicher, vom aktuellen Standard abweichender Stopp-Prozeduren nachgekommen werden.

Das Auslösen des Stoppvorgangs erfolgte in den simulierten Zeitreihen stets zu einem festen Zeitpunkt (100s) nach Aufzeichnungsbeginn. Als Kriterium für den erfolgreichen Abschluss des Bremsvorgangs diente in diesem Fall das Erreichen des Endlagenwinkels. Der Rotor der Anlage wurde damit also in den hier betrachteten Fällen ausdrücklich nicht erst bis zum völligen Stillstand abgebremst. Es erfolgt ein nahtloser Übergang aus dem Bremsvorgang durch Blattverstellung in den Trudelbetrieb. Der Generator blieb zudem jeweils während des gesamten Abbremsvorgangs bis hin zur Unterschreitung der minimalen Betriebsdrehzahl am Netz und wurde so stets erst mit einem minimalen Wellenmoment abgeschaltet.

Zusätzlich erforderte der hier angestrebte Vergleich eine annähernd zeitsynchrone und zeitlich klar definierte Abfolge der Vorgänge zum „Wiederanfahren“ der WEA aus dem Trudelbetrieb heraus. Die Einleitung des Startvorgangs folgte entsprechend der festgelegten Trudelzeit (Tidle) - versetzt zum Abschluss des Bremsvorgangs. Als entscheidende Vereinfachung wurde jedoch auf die Abbildung der sonst üblichen Vorgänge zur Prüfung verschiedener Anlagensysteme verzichtet. Die zeitliche Abfolge des Startvorgangs ergab sich somit rein aus der im Regelalgorithmus abgebildeten Prüfung der erreichten Betriebsdrehzahl zur Netzaufschaltung des Generators.

Zur Veranschaulichung der sich aus den verschiedenen Varianten ableitenden Effekte in Bezug auf das Start/Stop-Verhalten und die sich einstellende Trudeldrehzahl, sei hier zusätzlich auf die mit **Abb.2 & 3** gelieferten Darstellungen verwiesen.

D) Vorgehen zur Auswertung der Lastzeitreihen (Post Processing)

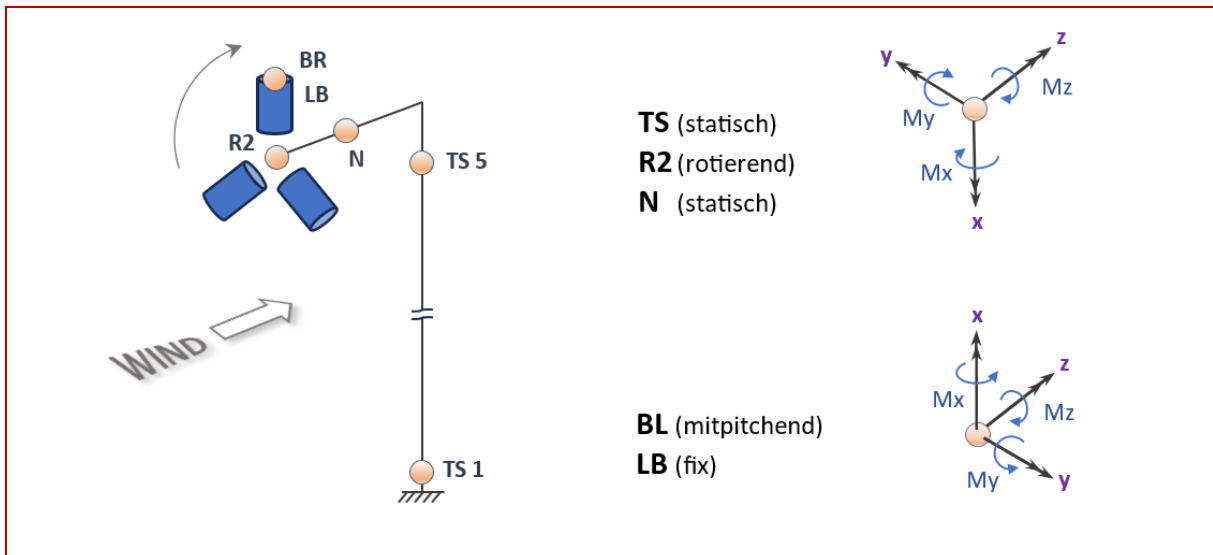
Die materielle Schädigung (Materialermüdung) struktureller Bauteile steht im direkten Zusammenhang mit dem Spektrum der verschiedenen Schwingweiten, also der stochastisch verteilt wirkenden Lastwechsel und deren individuellen Häufigkeit des Auftretens. Als repräsentative Vergleichsgröße für dieses Spektrum, lassen sich für gemessene oder simulierte Lastzeitreihen, mittels etablierter Zählverfahren, sogenannte schädigungsäquivalente Lastamplituden (DEL) für eine vorher festzulegende Vergleichsanzahl von Schwingspielen ermitteln. Diese wiederum ermöglichen im Nachgang individuelle Aussagen zu den daraus folgenden - und damit wieder im direkten last- und zeitspezifischen Bezug stehenden - Schädigungen.

Da in diesem Fall keine Aussagen zu einem individuellen Schädigungsverlauf einer spezifischen Anlage erwartet werden, ist es für den hier beabsichtigten Vergleich völlig ausreichend sich zunächst auf DEL zu beschränken. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der verschiedenen betrachteten Varianten, wird zur Ableitung der jeweiligen DEL zudem für jeden einzelnen der betrachteten Lastfälle jeweils nicht der sich aus einer lokalen Windverteilung ableitende, sondern stets der gleiche pauschale Zeitbezug von 1000 Betriebsstunden verwendet. Das heißt, anders als z.B. für eine Betrachtung zum Weiterbetrieb oder für die Erbringung von Designnachweisen, sind hier jeweils auf Lastfallebene ermittelte DEL unmittelbar und unabhängig von der zugehörigen mittleren Nabenwindgeschwindigkeit auch direkt untereinander vergleichbar. Dies führt zu deutlichen Vereinfachungen in der Umsetzung des beabsichtigten Vergleichs.

Die angesprochene Auszählung der Lastzeitreihen erfolgte hier jeweils nach dem üblichen Rainflow Zählverfahren. Zur abschließenden Ableitung der Wind-Bin spezifischen DEL, wurden jeweils die 12 turbulenzspezifischen Versionen (Seeds) des gleichen Lastfalls zusammengefasst.

Infolge der jeweils drei Varianten für Trudeldauer, Verstellgeschwindigkeit und Endlagenwinkel, sowie den final sieben betrachteten Windgeschwindigkeiten (Bin's), ergaben sich so (inklusive der Vergleichsdatensätze ohne Abschaltung) insgesamt 210 Auswertungsdatensätze, auf Grundlage von 2520 simulierten Einzelzeitreihen. Für jeden der beschriebenen Auswertungsdatensätze wurden final jeweils 16 DEL entsprechend der betrachteten Einzelsensoren ermittelt (siehe **Tab.3**).

Sensor	Bezeichnung	Relevanter Bezug Schädigung Komponente
BR_1_My	Flap-Biegemoment Blattwurzel (mitdrehend)	Blattanschluss/Blattlager inkl. Verschraubung
BR_1_Mz	Edge-Biegemoment Blattwurzel (mitdrehend)	Blattanschluss/Blattlager inkl. Verschraubung
BR_1_Mx	Torsionsmoment Blattwurzel (mitdrehend)	Pitchantriebe / Verzahnung + Verschraubung
PD_Me_A	Externes Moment Pitch Antrieb	Pitchantriebe / Verzahnung + Verschraubung
PD_Mb_A	Bremsmoment Pitch Antrieb	Pitchantriebe / Verzahnung + Verschraubung
LB_My	Nickmoment am Blattlager (fixes KS)	Nabe / Blattlager inkl. Verschraubung
LB_Mz	Rollmoment am Blattlager (fixes KS)	Nabe / Blattlager inkl. Verschraubung
N_Mx	Giermoment Hauptlager (fixes KS)	Hauptlager / Hauptwelle / Achszapfen /Getriebe
N_My	Nickmoment Hauptlager (fixes KS)	Hauptlager / Hauptwelle / Achszapfen /Getriebe
R2_Mx	Giermoment Nabe (mitrot. KS)	Nabe inkl. Verschraubung
R2_My	Nickmoment Nabe (mitrot. KS)	Nabe inkl. Verschraubung
TS1_My	Biegemoment in Schubrichtung – Turmfuss	Turmfuß / Fundament inkl. Verschraubung
TS2_My	Biegemoment in Schubrichtung – Turmflg.2	Turmhülle inkl. Flangeverschraubung
TS3_My	Biegemoment in Schubrichtung – Turmflg.3	Turmhülle inkl. Flangeverschraubung
TS4_My	Biegemoment in Schubrichtung – Turmflg.4	Turmhülle inkl. Flangeverschraubung
TS5_My	Biegemoment in Schubrichtung – Turmkopf	Turmkopf/Yaw-Lager inkl. Verschraubung



Tab.3 Betrachtete Einzelsensoren inklusive Komponentenbezug

Die sich daraus ableitenden Funktionszusammenhänge der sich für die unterschiedlichen Start/Stop-Varianten ergebenden Betriebslasteinwirkungen sind für die jeweiligen Einzelsensoren und verschiedene Vergleichsperspektiven im nachfolgenden Auswertungsteil grafisch dargestellt (siehe **Abb.4-19**).

1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden sind nun die Einzelergebnisse der Simulationsstudie über die Auswirkungen von EA auf die Standsicherheit von WEA näher dargestellt.

A) Vergleich der Varianten – Geneüberstellung der Zeitverläufe

Bereits aus einer direkten Gegenüberstellung der Zeitverläufe mit und ohne EA, sind die von der KNE-Studie [1] per Herleitung vorausgesagten Effekte klar zu erkennen (**Abb.1**). Sowohl Lastamplituden als auch Anzahl der Lastwechsel treten jeweils im Bereich des Trudelbetriebs deutlich gedämpfter in Erscheinung. Entsprechend naheliegender scheint, dass sich damit auch die aus dem Betrieb ableitende Schädigung durch Abschaltungen relevant vermindert.

Ein rein visueller Vergleich reicht jedoch nicht aus, um diese Vermutung für alle in **Tab.3** gelisteten Sensoren sicher zu bestätigen. Hierfür braucht es die im nachfolgenden **Abschnitt B** dargestellten DEL-Schaubilder. Auf Grundlage der zusätzlich mit dieser Simulationsstudie verfolgten Variantenuntersuchung sei jedoch zusätzlich noch auf folgende Sachverhalte näher eingegangen (**Abb.2 & 3**).

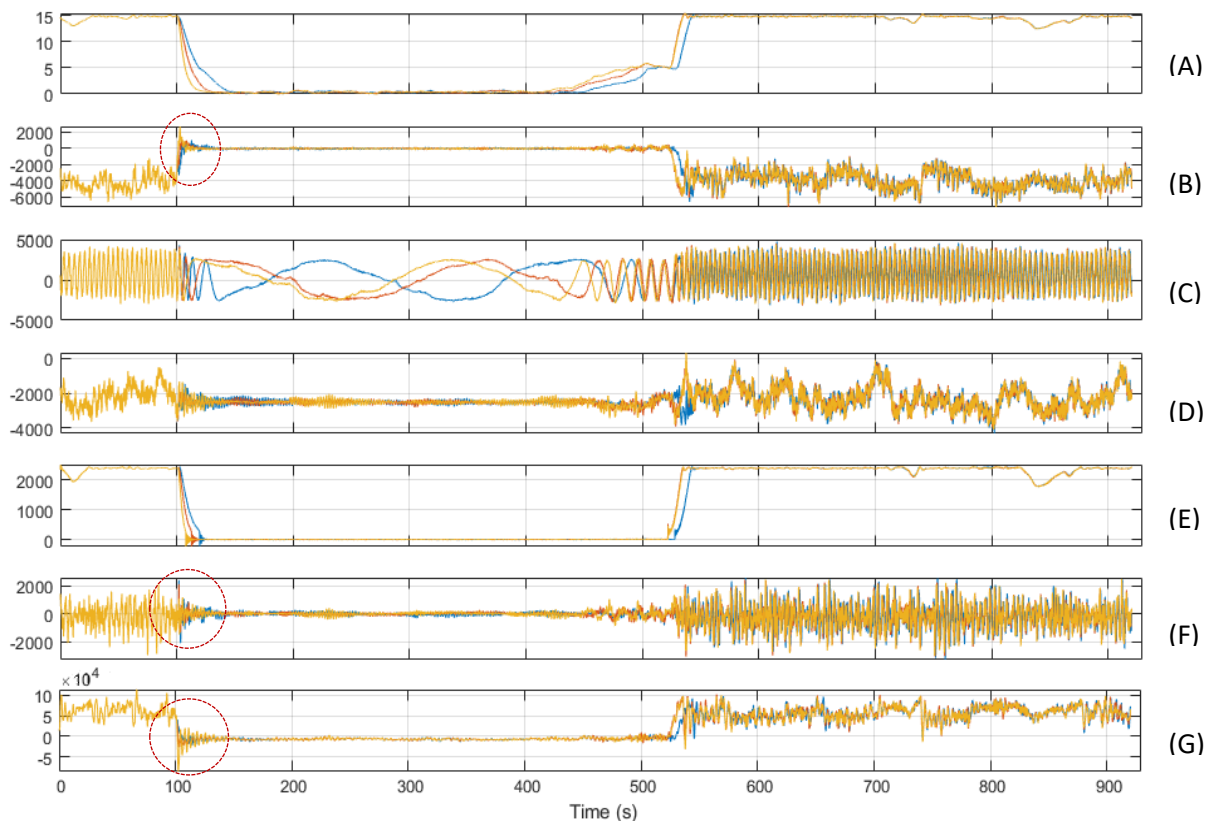


Abb.2 Einfluss der Verstellgeschwindigkeit der Rotorblätter auf die Lastzeitreihen mit 2°/s (blau), 4°/s (rot) und 10°/s (beige), bei jeweils 300s Trudelbetrieb und 90° Endlagenwinkel bei Ende Stopp.

Dargestellte Sensoren: ...

Rotordrehzahl (A), Nickmoment My (B) & Rollmoment Mz (C) am Blattlager - stehender Teil, Nickmoment My Hauptlager (D), Torsionsmoment Mz Welle (E), Giermoment Mx Nabe (F), Biegemoment in Schubrichtung My Turmfuss (G)

Abb.2 widmet sich zunächst einem Vergleich der im Zuge des Stoppvorgangs bei verschiedenen Verstellgeschwindigkeiten der Rotorblätter wirkenden Lasten. Durch schnelleres Pitchen kommt es erwartbar zu einer rascheren Verzögerung der Rotordrehzahl, womit auch zunächst die an die Rotationsfrequenz gekoppelten Wechsellasten (z.B. Sensor C) gemindert werden. Dem entgegen stehen jedoch ein durch die schnellere Abbremsung deutlich verstärkter Trägheitsimpuls in Wechselwirkung mit zusätzlichen aerodynamischen Effekten. Zumindest kurzzeitig, zeigen sich damit für einige Sensoren (z.B. Sensoren B, F & G) deutlich höhere Schwingweiten im Zeitverlauf als ohne, oder mit langsamer Abbremsung. Art und Weise der Abbremsung (z.B. schnelles Verfahren der Blätter, Lastabwurf mit Einleitung des Bremsvorgangs, etc.) und des anschließenden Trudels, zeigen also mitunter durchaus sichtbare Einflüsse auf die Zeitverläufe einzelner Sensoren. Welcher Effekt sich daraus nun abschließend für die Materialermüdung ergibt, kann auf Grundlage der im nachfolgenden **Abschnitt B** präsentierten Schaubilder ermittelt werden.

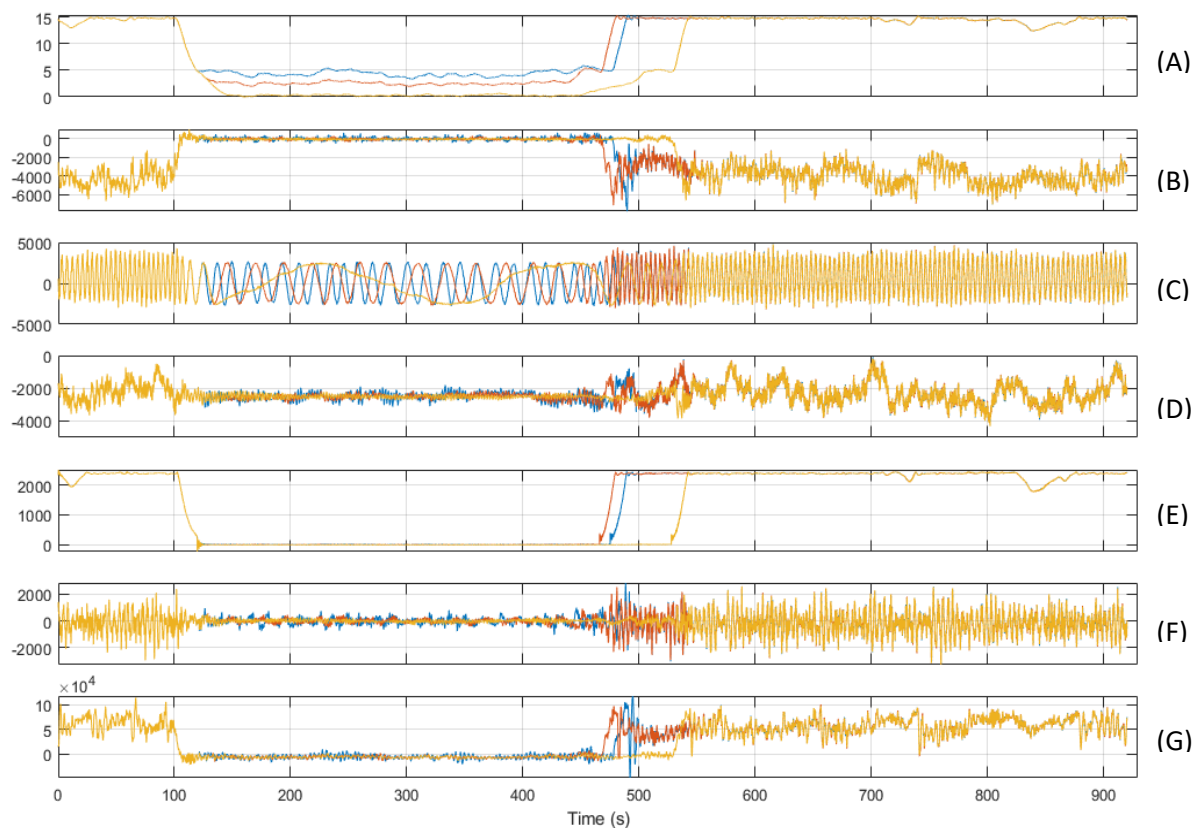


Abb.3 Einfluss des Endlagenwinkels der Rotorblätter auf die Lastzeitreihen mit 45°/s (blau), 60°/s (rot) und 90°/s (beige), bei jeweils 300s Trudelbetrieb und 2° Verfahrensgeschwindigkeit während Stopp.

Dargestellte Sensoren: ...

Rotordrehzahl **(A)**, Nickmoment My **(B)** & Rollmoment Mz **(C)** am Blattlager - stehender Teil, Nickmoment My Hauptlager **(D)**, Torsionsmoment Mz Welle **(E)**, Giermoment Mx Nabe **(F)**, Biegemoment in Schubrichtung My Turmfuß **(G)**

Auch die Wahl des Endlagenwinkels der Blattverstellung (**Abb.3**) hinterlässt in den ermittelten Zeitverläufen deutlich erkennbare Spuren. Ein flacherer Blattwinkel während des Trudels führt erwartbar zu höheren Drehzahlen, womit auch die an die Rotationsfrequenz gekoppelten Wechsellasten gegenüber niedrigeren Drehzahlen zunehmen. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass die mit

Endwinkeln um 45° erreichten Blattspitzengeschwindigkeiten im Grunde schon deutlich über den für AKS empfohlenen Werten liegen. Die hierfür ermittelten Lastniveaus sind also als entsprechender Extremfall wahrzunehmen.

Sowohl in **Abb.2** als auch in **Abb.3** zeigt sich darüber hinaus jeweils ein stark schwankendes Startverhalten aus dem Trudelbetrieb heraus. Dieses ist vordergründig durch den stochastischen Charakter der Zeitreihen infolge der Turbulenzmodellierung definiert, somit klar methodisch bedingt, aber letztendlich nicht zu vermeiden. Es hinterlässt jedoch eine gewisse Unschärfe bei der Ermittlung der jeweiligen DEL, die sich jedoch mit der Länge des Trudelbetriebs zunehmend relativiert.

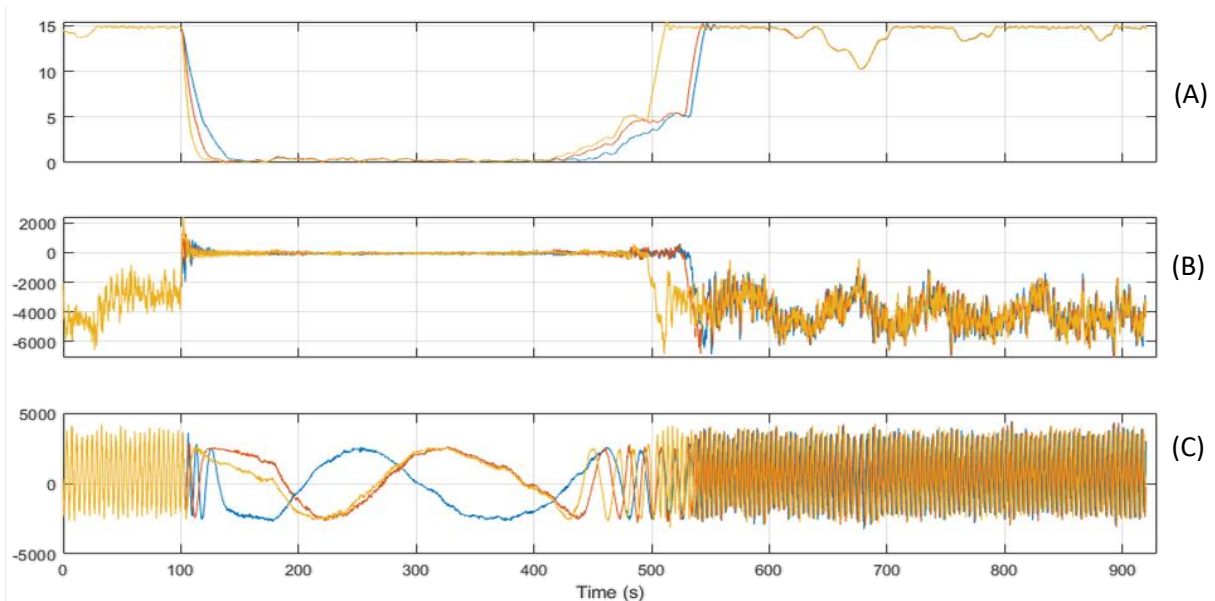


Abb.4 Beispiel für Einfluss der Pitchbewegung auf die Lastzeitreihen des Blattlagers mit $2^\circ/\text{s}$ (blau), $4^\circ/\text{s}$ (rot) und $10^\circ/\text{s}$ (beige), bei jeweils 300s Trudelbetrieb und 90° Endlagenwinkel bei Ende Stopp.

Dargestellte Sensoren: ...

Rotordrehzahl **(A)**, Nickmoment M_y **(B)** & Rollmoment M_z **(C)** am Blattlager - stehender Teil

Abschließend sei noch mit den **Abb. 4 & 5** auf zwei wichtige Effekte des Abbremsens durch Verdrehen (Pitchen) der Blätter eingegangen, die für eine korrekte Interpretation, der im folgenden **Abschnitt B** vorgestellten Schaubilder von Bedeutung sind. Auch diese Effekte sind über einen unmittelbaren Vergleich der ermittelten Zeitreihen direkt zu erkennen. Neben den bereits mit **Abb.2** angesprochenen Trägheits- und aerodynamischen Effekten, verändert sich mit dem Pitchen der Blätter selbst nämlich auch die Wirkrichtung der Lasten im Verhältnis zu den sonst (normaler Betrieb) typischen Hauptbelastungsachsen am Blattlager. Für die Blattwurzel ändert sich mit dem Verdrehen der Blätter sogar zusätzlich die Ausrichtung des Koordinatensystems.

Auf Grund der sonst in Schubrichtung bestehenden, hohen aerodynamischen Dämpfung herrscht im Produktionsbetrieb in der Regel eine deutliche Asymmetrie zwischen den Momenten in Schub- und Schlagrichtung der Blätter. Reale Lastamplituden und Schwingfrequenzen des Lastverlaufs liegen zwar in Schlagrichtung des Blattes im Schnitt deutlich über denen in Schwenkrichtung (Drehrichtung des Rotors), die für die Schädigung relevanten Schwingweiten sind aber für letztere deutlich größer. Durch das Verdrehen der Blätter, kommt es daher mit den Trudelbetrieb im Bereich der Blattwurzel ganz

entscheidend auch zu einer Verschiebung der Schwingweiten (**Abb.5**). Diese Tatsache zwingt zu einer korrekten Form der Auswertung um ein realistisches Abbild der Einflüsse auf die Materialermüdung zu erreichen. Im nachfolgenden **Abschnitt B** wird darauf noch entsprechend weiter eingegangen werden.

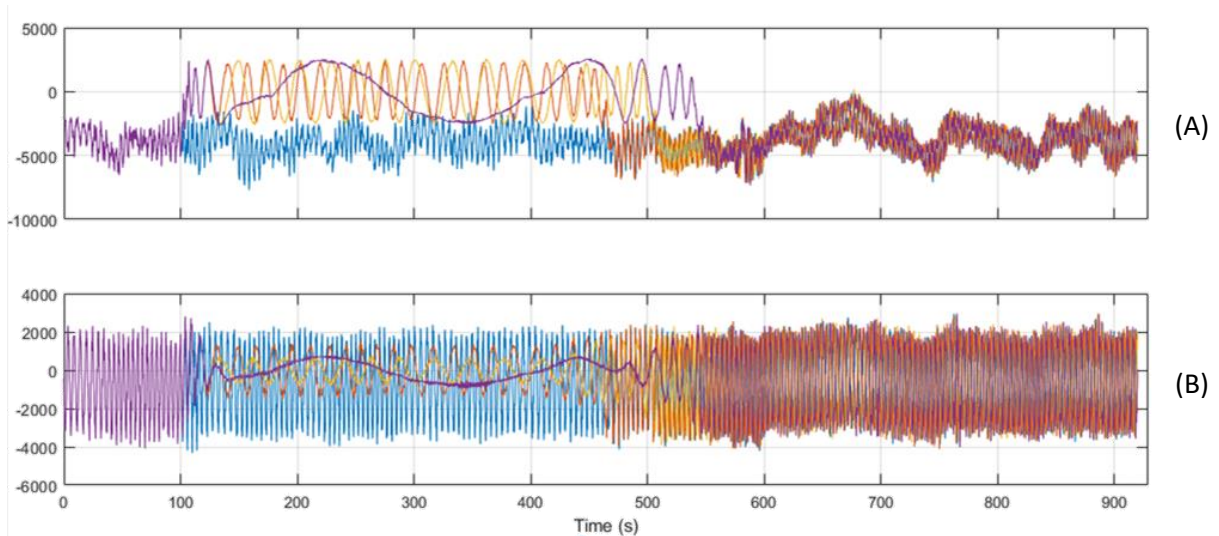


Abb.5 Beispiel für die Entwicklung der Lastzeitreihen für die Blattwurzel in Abhängigkeit vom Endlagenwinkel mit $45^\circ/\text{s}$ (rot), $60^\circ/\text{s}$ (gelb) und $90^\circ/\text{s}$ (violett), bei jeweils 300s Trudelbetrieb und 2° Verfahrensgeschwindigkeit während Stopp, im Vergleich zu Basisfall des durchlaufenden Betriebs (blau).

Dargestellte Sensoren: ...

Schlagmoment M_y (A) & Schwenkmoment M_z (B) Blattwurzel (mit-pitchendes Koordinatensystem)

B) Vergleich der Varianten - Trendentwicklung aus Variantenprüfung

Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Auswertungsdatensätze sollten nun im Rahmen der Variantenprüfung zusätzliche Schaubilder entwickelt werden. Diese erlauben nicht nur einen gegenüber der visuellen Darstellung von Zeitreihen in seiner Aussagesicherheit deutlich verbesserten Vergleich, sondern auch die Ableitung weiterführender Trends über die Entwicklung der schadigungsrelevanten Lasteinwirkungen für Punkte außerhalb der durch die untersuchten Varianten festgelegten Limiten für den Start/Stop-Betrieb. All diese Schaubilder sind nachfolgend nun für die in **Tab.3** gelisteten Sensoren zusammengestellt (**Abb.6-21**). Zum besseren Verständnis der Schaubilder sei aber zunächst kurz noch auf deren Herleitung eingegangen:

➔ Entwicklung der Schaubilder

Im Zuge der Variantenprüfung waren im vorliegenden Fall für alle Sensoren stets drei unabhängig voneinander gültige Schaubilder zu entwickeln. Diese sind hier jeweils untereinander angeordnet dargestellt. Dabei repräsentiert jedes der drei Einzelschaubilder genau ein Szenario der in Absatz 1.2 beschriebenen Variationen zur Abbildung der EA. Sie stehen also entweder für die Variation der Verstellgeschwindigkeit der Blätter (immer oben), die Variation des Endlagenwinkels (immer mittig) oder die Variation der Dauer des Trudelbetriebs (immer unten).

In jedem dieser getrennt nach Sensor und Einzelszenario entwickelten Bilder werden nun in Abhängigkeit von der mittleren Nabenwindgeschwindigkeit jeweils vier Verläufe für verschiedene Lastniveaus dargestellt. Dabei handelt es sich stets um den zugehörigen Basisfall (Base Line - in Form des „ungestoppten“ Betriebs) und drei weitere Fälle mit Abbildung der EA. Letztere wiederum, folgen den drei vordefinierten Einzelfällen der jeweils betrachteten Variation (siehe **Tab.2**).

Zur eindeutigen Festlegung des dargestellten Auswertungsdatensatzes reicht dieser Bezug allein jedoch noch nicht aus. Denn infolge der drei zu betrachtenden Szenarien musste auch für die beiden jeweils nicht „mitvariieren“ Parameter der EA, eine Festlegung getroffen werden. Im vorliegenden Fall wurde hierfür der Standardfall Tidle = 300s, Pitch max = 90° und V-pitch = 2°/s definiert. Die einzelnen Schaubilder folgen somit stets den in **Tab.4** dargestellten Parameterkombinationen.

Szenario Verstellgeschwindigkeit			Szenario Endlagenwinkel			Szenario Trudeldauer				
Tidle	Pitch max	V-pitch	Tidle	Pitch max	V-pitch	Tidle	Pitch max	V-pitch		
300s	90°	2°/s	300s	90°	2 °/s	300s	90°	2°/s		
		4°/s							60°	600s
		10 °/s							45°	900s

Tab.4 Basis der in den szenarienspez. Einzelschaubildern dargestellten Lastniveaus mit Abbildung der EA

Zur Vereinfachung des relativen Vergleichs, werden die einzelnen Lastniveaus darüber hinaus immer auf den Wert 1 normierten dargestellt. Der dafür erforderliche Basiswert bezog sich jeweils auf den größten Realwert aller für den „ungestoppten“ Betrieb getrennt nach Nabenwindgeschwindigkeit ausgewerteten DEL. Dieser war jeweils sensorspezifisch zu ermitteln. Die dargestellten Relativwerte erlaubt also keinerlei unmittelbare Aussage über die absolute Lastentwicklung an einem konkreten Standort, sondern lediglich eine qualitative Aussage über den möglichen Einfluss von EA.

Für die Ableitung der Schaubilder **Abb.6-21** war zudem unerheblich, inwiefern deren jeweiliger Darstellungsbereich mit dem der Aktivierung von AKS korrespondiert. Entsprechend den Darstellungen in **[1]**, zeigen Vögel je nach Windbedingungen ein deutlich abweichendes Flugverhalten. Hier allerdings wurden die Trends der DEL allgemein für den gesamten Windgeschwindigkeitsbereich von 4 bis 24m/s dargestellt. Nur für den Endlagenwinkel 45° ergaben sich für Windgeschwindigkeiten oberhalb von 12m/s recht große Streuungen des Anlaufverhaltens aus dem Trudelbetrieb heraus, so dass für diesen Bereich auf eine Darstellung der zugehörigen DEL verzichtet wurde.

➔ **Analyse der Schaubilder**

Zu den aus der Variantenprüfung hervorgegangenen Schaubildern (**Abb.6-21**), lässt sich nun folgendes festhalten:

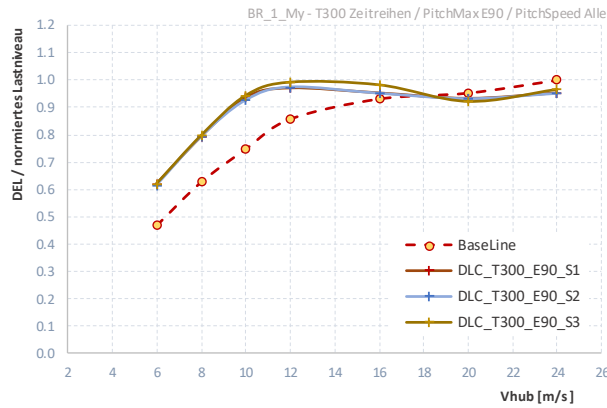
Wie erwartet finden sich für die meisten der in **Tab.3** gelisteten Sensoren zunächst die aus **[1]** bekannten Aussagen zum Einfluss von EA auf das Ermüdungsverhalten wesentlicher Strukturbauteile von WEA unmittelbar bestätigt. Dies gilt sowohl für die Sensoren im Bereich der Blattwurzel (**Abb.6-9**), als auch für die Nabe (**Abb.12-16**), die Maschinenkomponenten der Gondel (**Abb.17-19**) und des Turms (**Abb.19-21**). Auf eine separate Darstellung der Sensoren TS2, TS3 und TS4 wurde hier bewusst verzichtet, da diese sich praktisch identisch zu den Sensoren an Turmkopf und Turmfuß verhalten.

Die für die genannten Sensoren ermittelten Trends der DEL bleiben jedenfalls für die betrachteten Fälle mit EA überwiegend deutlich hinter den Niveaus der Fälle mit durchgehendem Anlagenbetrieb zurück. Auch zeigt sich dieser Effekt umso klarer, je länger die Anlage im Trudelbetrieb verbleibt (jeweils unteres Schaubild). Schnelleres Pitchen (oberes Schaubild), oder aber ein flacherer Endlagenwinkel (jeweils Mitte), bedeuten zwar ebenfalls höhere Lastniveaus - die Veränderungen gegenüber dem Standardfall fallen jedoch deutlich geringer aus als für eine abweichende Dauer des Trudelbetriebs. Damit bleibt auch das resultierende Lastniveau überwiegend hinter jenem des Basisfalls zurück. Entsprechend ist für die genannten Fälle tatsächlich von einer durch EA insgesamt reduzierten Materialermüdung der relevanten Strukturbauteile einer WEA auszugehen.

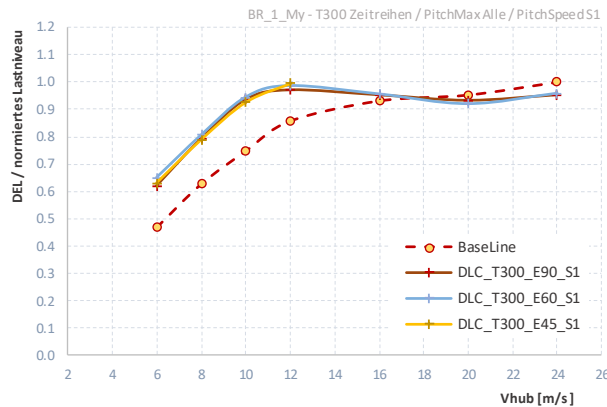
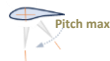
Es zeigen sich aber auch deutlich davon abweichende Trends! Etwa für die im Normalbetrieb vor allem über das Schlagmoment des Rotorblatts definierten Sensoren - Flap-Biegemoment Blattwurzel (**Abb.6**) und Nickmoment Blattlager (**Abb.12**). Für die Dimensionierung der Blattschale spielt die mit dem Schlagmoment in Verbindung stehende Materialermüdung jedenfalls eine eher untergeordnete Rolle. Für Blattwurzel und Blattlager hingegen, wären zunächst die aus der Verdrehung des Blattes folgenden und bereits mit **Abb.4 & 5** beschriebenen Effekte passend zu berücksichtigen. Auf Grund der sich demgemäß zeitlich stark gegenüber dem Normalbetrieb verändernden Wirkrichtung des sich aus Schlag- und Schwenkmoment zusammensetzenden Gesamtmoments, braucht es für die Komponenten Blattwurzel und Blattlager eine grundlegend andere Herangehensweise zur Ermittlung der repräsentativen DEL. Üblicherweise werden hierfür sektorielle DEL auf Grundlage von winkelbezogenen Zeitreihen in Winkelschritten von 15° betrachtet. Im vorliegenden Fall waren also die jeweiligen Maxima (LB max, BR max) der sektoriellen DEL zu identifizieren und entsprechend gegenüberzustellen (**Abb. 8 & 14**). Darauf aufbauend lässt sich abschließend auch für die Komponenten Blattlager und Blattwurzel festhalten, dass es durch vermehrte Abschaltungen zwar klar zu einer Verlagerung der meist belastetsten Stelle am Flanschring kommt, allerdings von keiner höheren Materialermüdung durch EA auszugehen ist. Eine gewisse Relevanz könnte sich damit ggf. jedoch für die turnusmäßige Prüfung der mit diesen Komponenten in Verbindung stehenden Schraubverbindungen ergeben.

Mit der Darstellung der Entwicklung des Nickmoments am Blattlager (**Abb.6**) bleibt klar ersichtlich, dass eine entscheidende Einflussgröße auf die Höhe der DEL im Bereich der Nabe, neben der Dauer des Trudelbetriebs, ganz klar auch die Verstellgeschwindigkeit der Rotorblätter ist. Je höher diese Geschwindigkeit, desto ausgeprägter ist die Schwingantwort der Anlage auf die Reduzierung des ansonsten dämpfenden Rotorschubs. Rasche Änderungen im Schub beeinflussen deutlich die Einpendelbewegung des Turms im Rahmen des Bremsvorgangs oder Wiederanlauf der Anlage. **Abb.20** gibt entsprechende Hinweise darauf, dass bei sehr schneller Verstellung der Rotorblätter, ggf. das Biegemoment am Turmfuss überschritten werden könnte. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Rahmen des hier verwendeten Simulationsmodells nur eine sehr rudimentäre Anlagenregelung nachgebildet wurde.

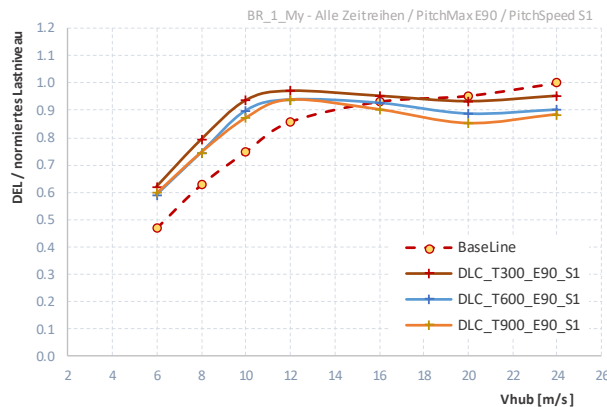
Abschließend sei noch kurz auf die Entwicklung der Pitchantriebsmomente eingegangen (**Abb.9 - 11**). Aus diesen Schaubildern ist zunächst abzulesen, dass die Betriebsbelastungen infolge von EA praktisch auch für die Verstellantriebe und alle der Blattverstellung zugeordneten mechanischen Komponenten zurück gehen. Diese Darstellungen bieten allerdings keine vollständig korrekte Vergleichsgrundlage, da die eigentlichen Nachweise für Stellantriebe und Lagerverzahnung üblicherweise nicht auf Basis von DEL, sondern anderen, deutlich komplexeren Ansätzen zu erbringen sind. Die gezeigten DEL können dennoch als Indikator der Lastentwicklung dienen. Sie lassen hier keine negativen Einflüsse erwarten.



Sensor: Flap-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 10



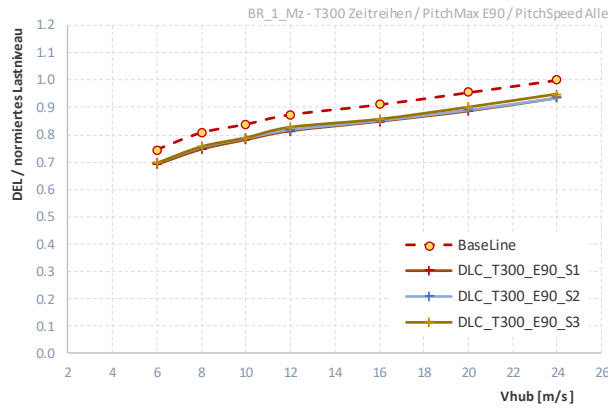
Sensor: Flap-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10



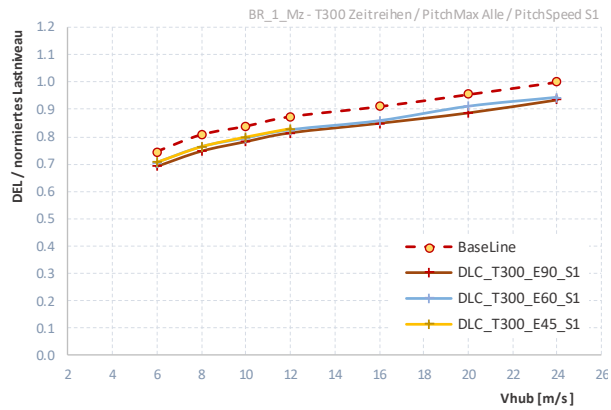
Sensor: Flap-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

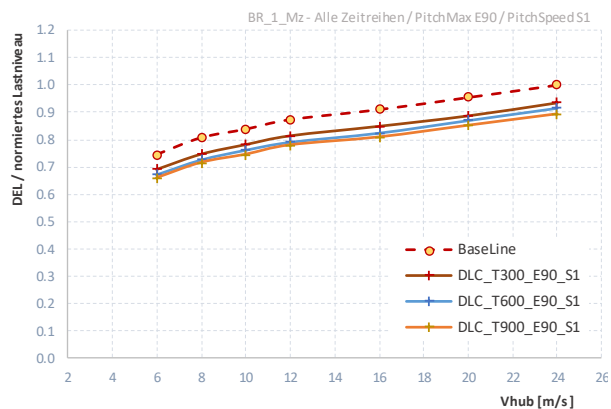
Abb.6 Entwicklung DEL-Lastniveau des BR_1_My / Flap-Biegemoments Blattwurzel, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Edge-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 10



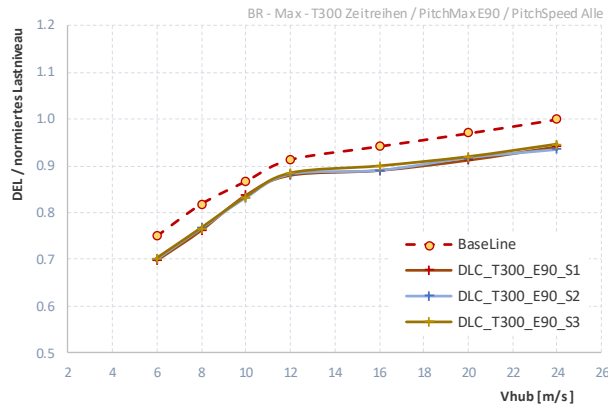
Sensor: Edge-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10



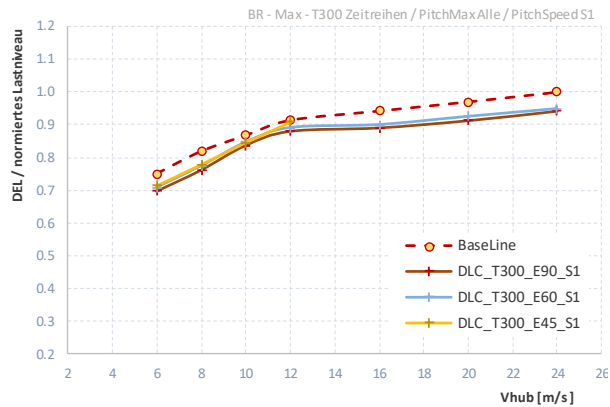
Sensor: Edge-Biegemoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

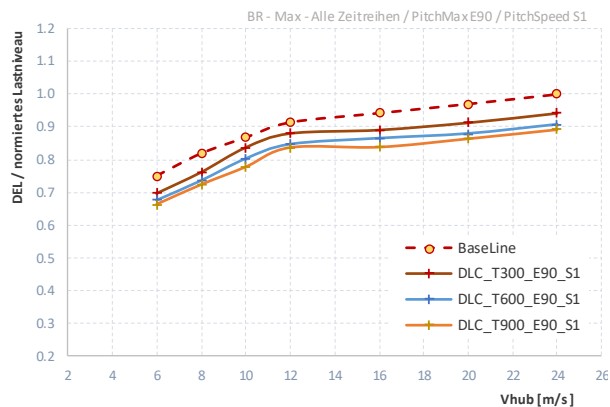
Abb.7 Entwicklung DEL-Lastniveau des BR_1_Mz / Edge-Biegemoments Blattwurzel, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Max. sektorielles Biegemoment Blattwurzel
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 10



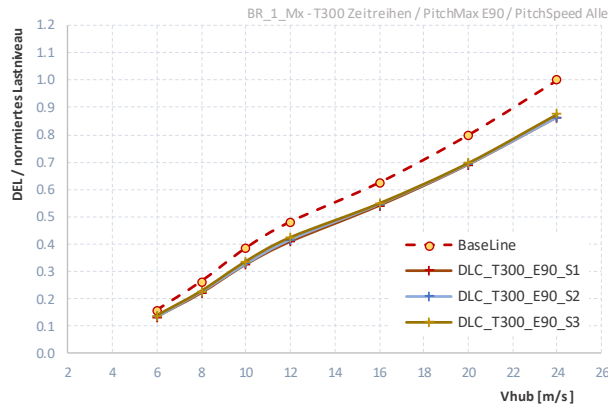
Sensor: Max. sektorielles Biegemoment Blattwurzel
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10



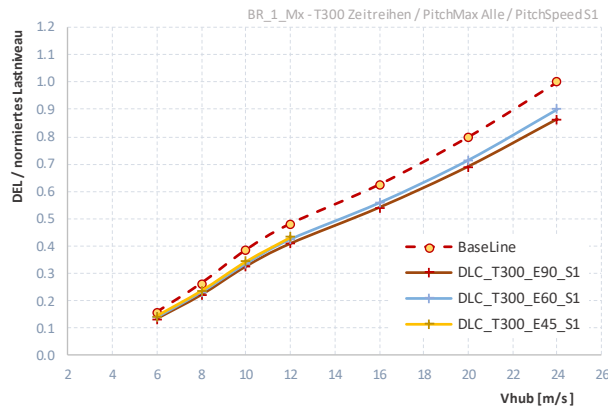
Sensor: Max. sektorielles Biegemoment Blattwurzel
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

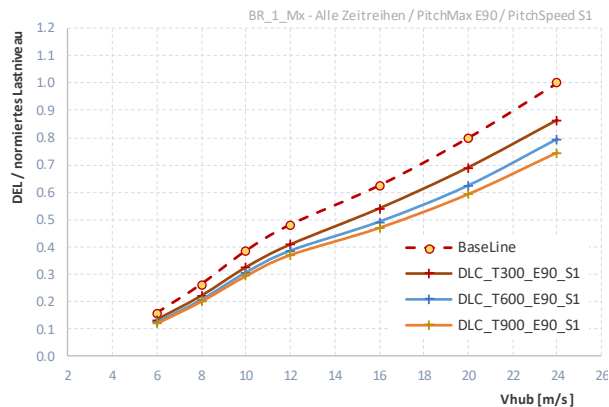
Abb.8 Entwicklung DEL-Lastniveau max. sektorielles Biegemoment Blattwurzel (BR max), in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Torsionsmoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



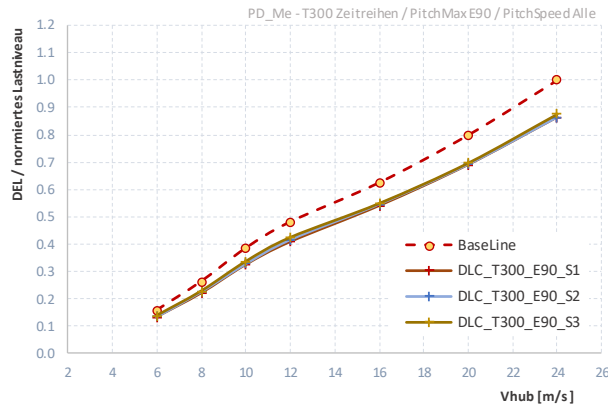
Sensor: Torsionsmoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



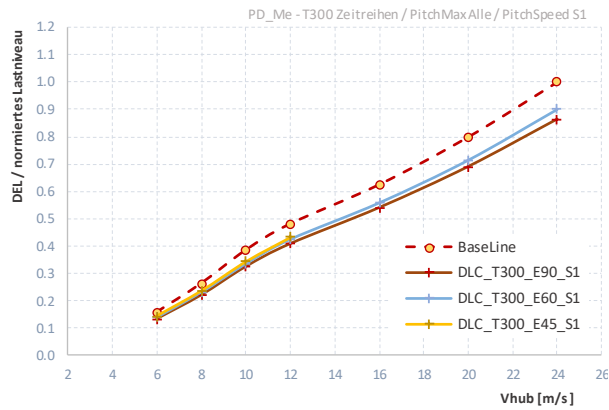
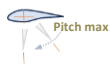
Sensor: Torsionsmoment Blattwurzel (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

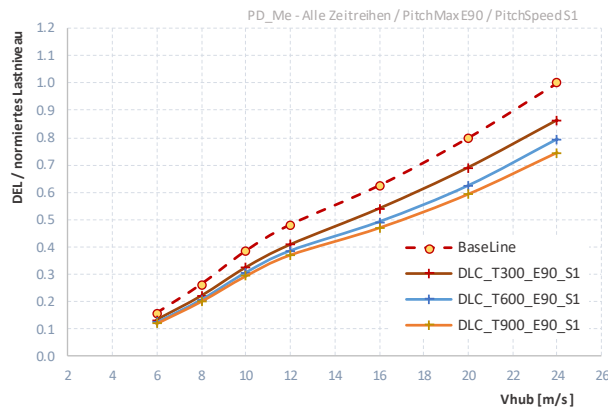
Abb.9 Entwicklung DEL-Lastniveau des BR_1_Mx / Torsionsmoments an der Blattwurzel, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Externes Moment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



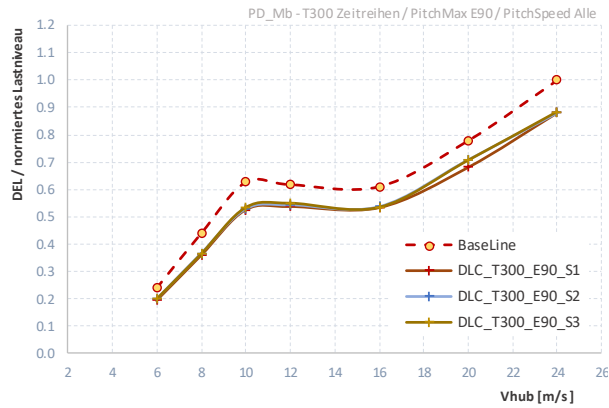
Sensor: Externes Moment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



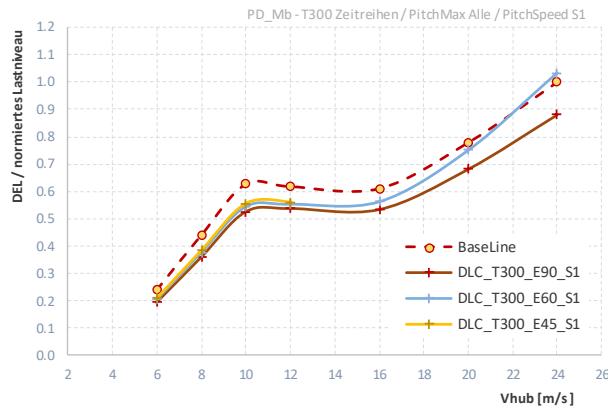
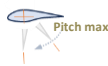
Sensor: Externes Moment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

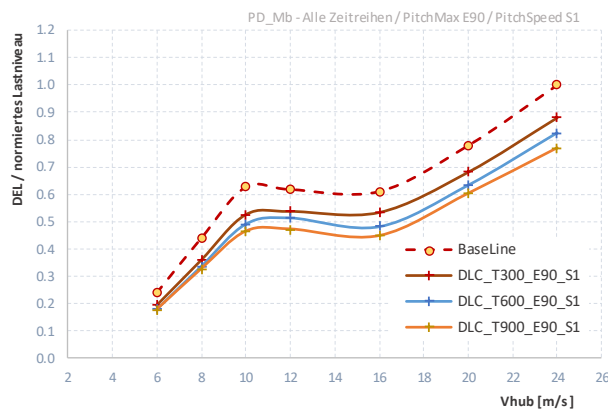
Abb.10 Entwicklung DEL-Lastniveau des PD_Me_A / externen Moments am Pitchantrieb, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Bremsmoment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



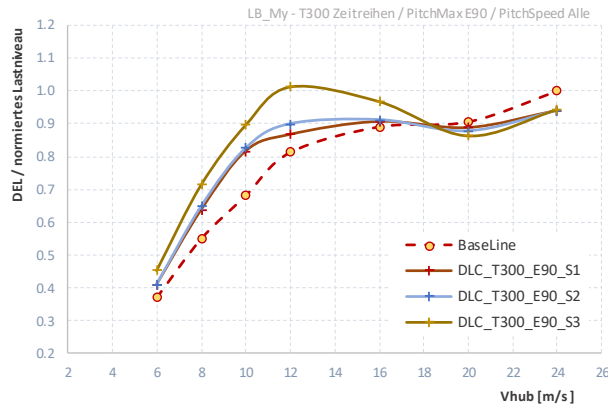
Sensor: Bremsmoment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



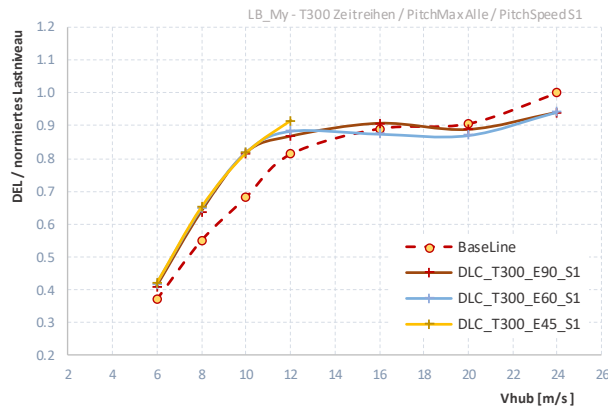
Sensor: Bremsmoment Pitch Antrieb
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudeltreibs (u)]

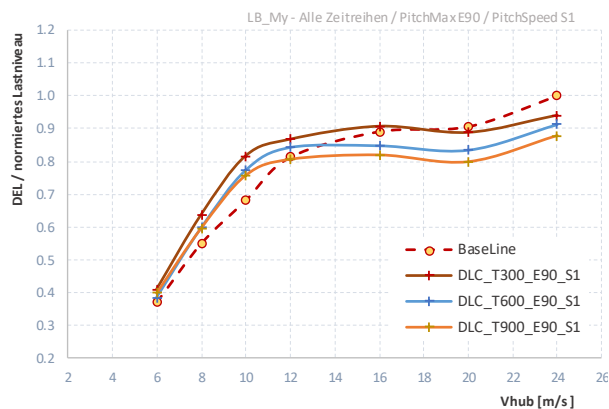
Abb.11 Entwicklung DEL-Lastniveau des PD_Mb_A / Bremsmoments am Pitchantrieb, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Nickmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 10



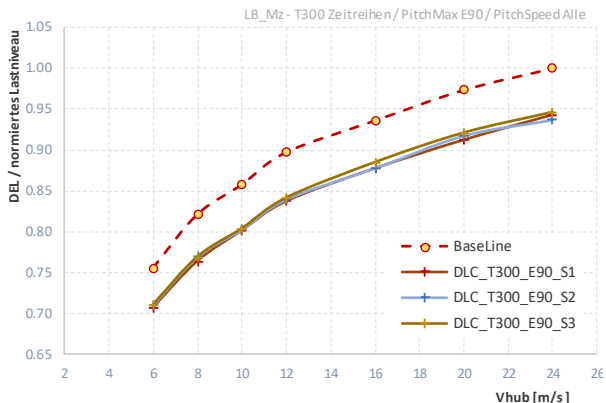
Sensor: Nickmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10



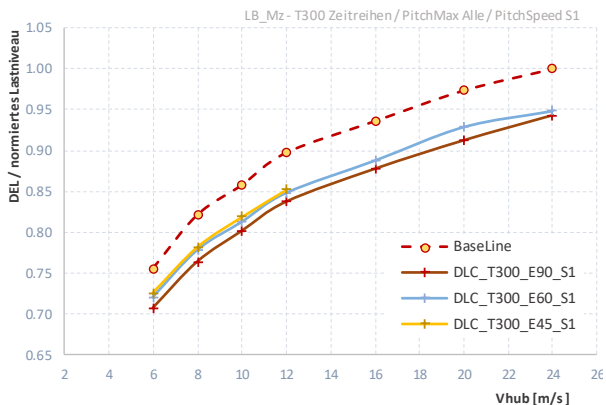
Sensor: Nickmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

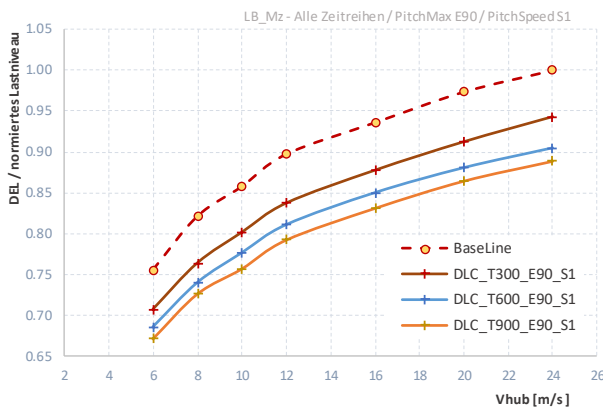
Abb.12 Entwicklung DEL-Lastniveau des LB_My / Nickmoments am Blattlager, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Rollmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 10



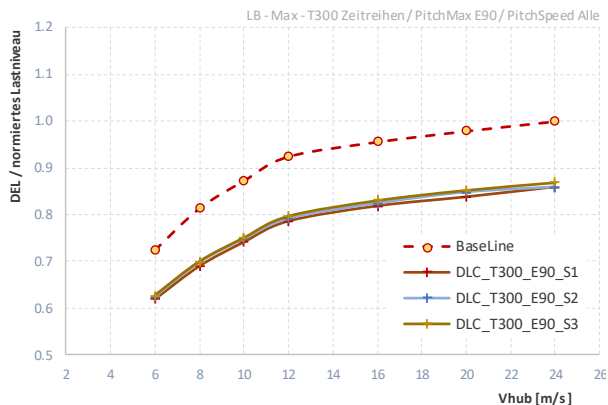
Sensor: Rollmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10



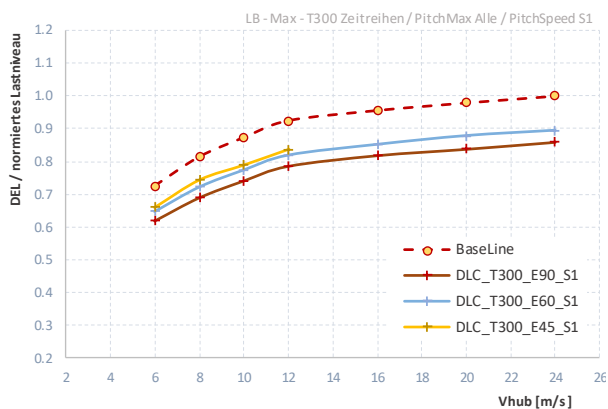
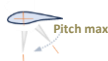
Sensor: Rollmoment am Blattlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 10

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

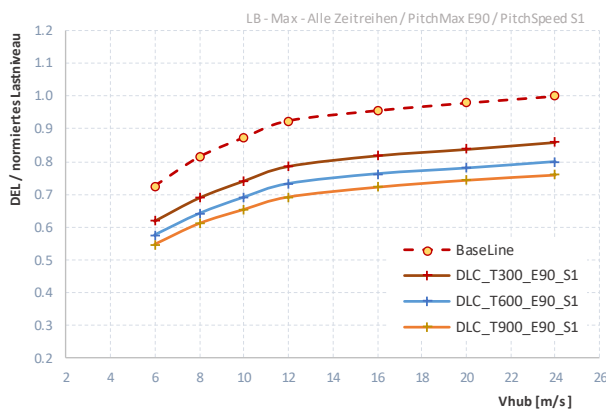
Abb.13 Entwicklung DEL-Lastniveau des LB_Mz / Rollmoments am Blattlager, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Max. sektorielles BiegemomentBlattlager
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



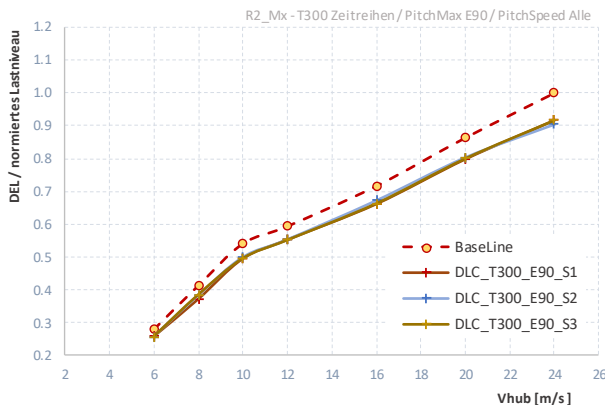
Sensor: Max. sektorielles BiegemomentBlattlager
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



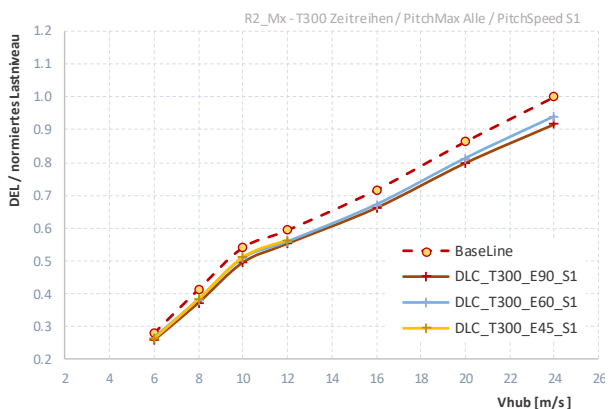
Sensor: Max. sektorielles BiegemomentBlattlager
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

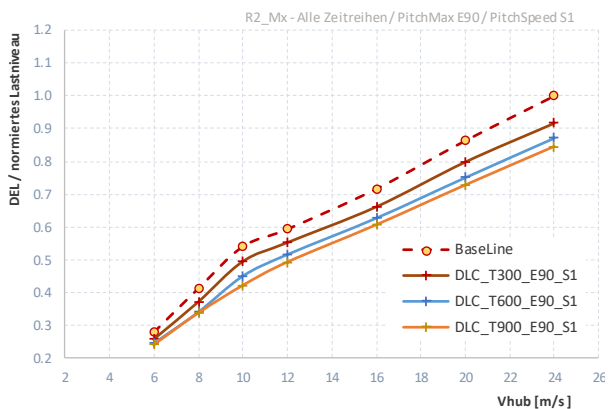
Abb.14 Entwicklung DEL-Lastniveau max. sektorielles Biegemoment am Blattlager (LB max), in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Giermoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 8



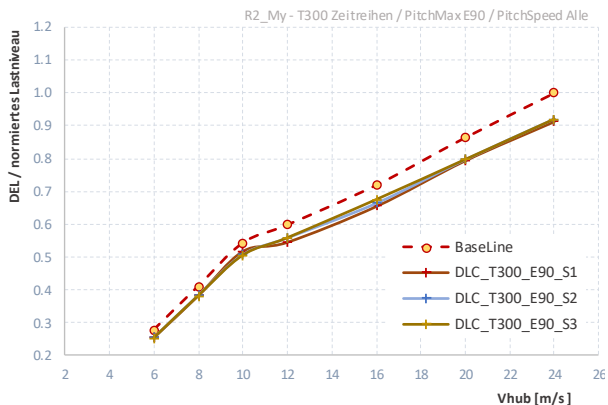
Sensor: Giermoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 8



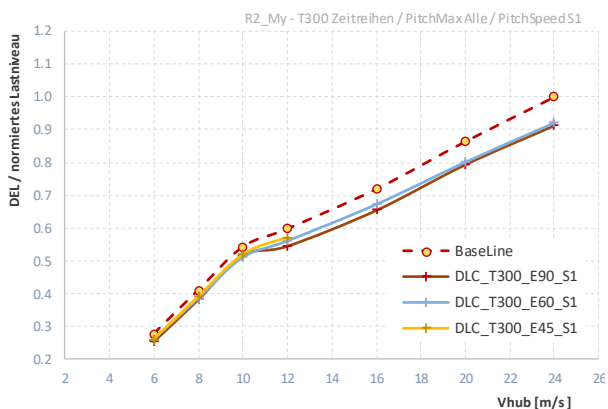
Sensor: Giermoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 8

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

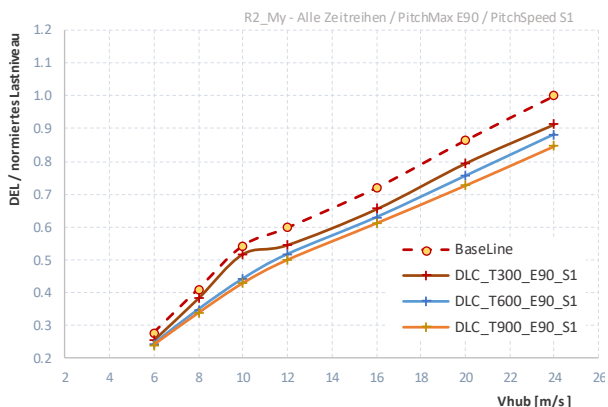
Abb.15 Entwicklung DEL-Lastniveau des R2_Mx / Giermoments der Nabe, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Nickmoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 8



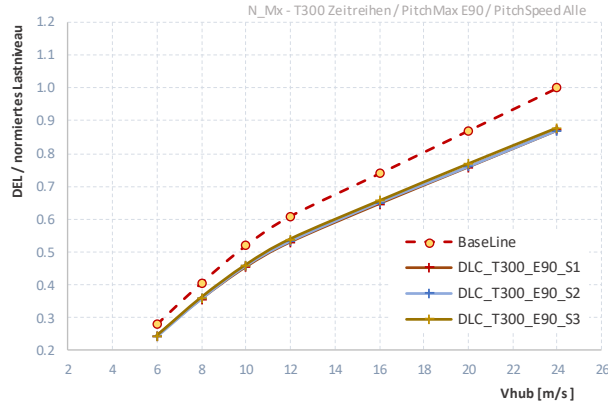
Sensor: Nickmoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 8



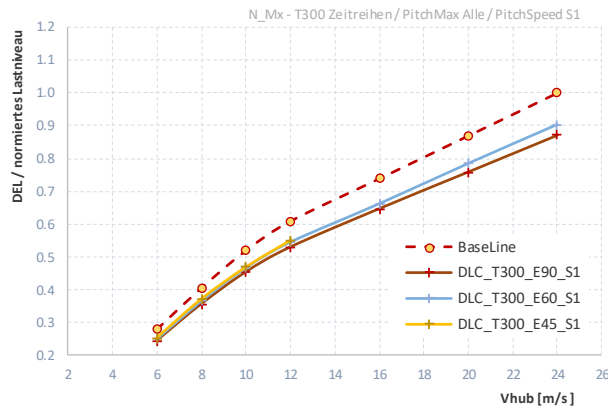
Sensor: Nickmoment Nabe (mitrot. KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 8

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

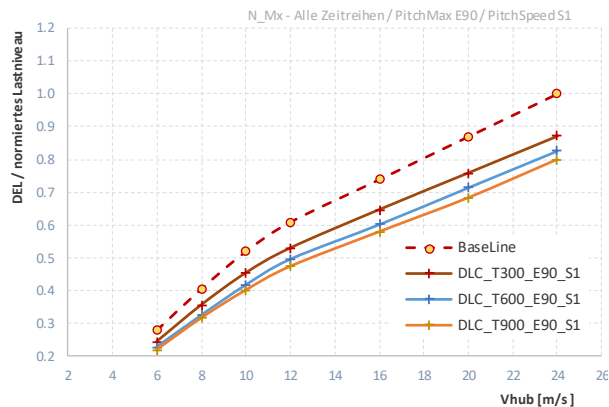
Abb.16 Entwicklung DEL-Lastniveau des R2_My / Nickmoments der Nabe, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Giermoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 5



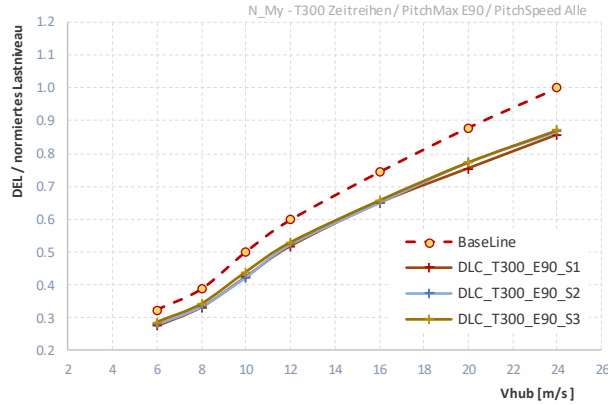
Sensor: Giermoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 5



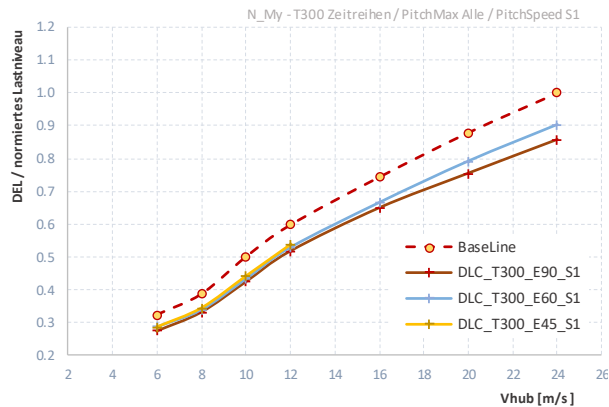
Sensor: Giermoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 5

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

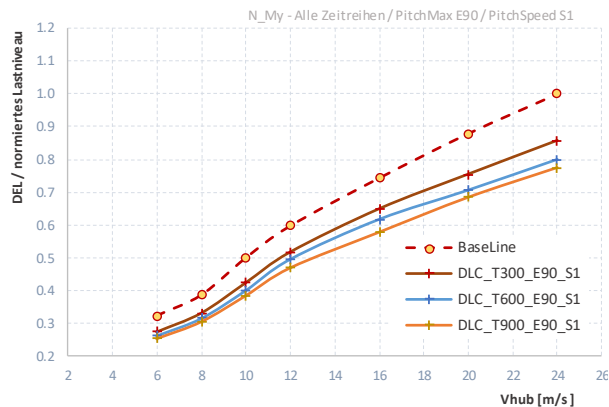
Abb.17 Entwicklung DEL-Lastniveau des N_Mx / Giermoments am Hauptlager, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Nickmoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 5



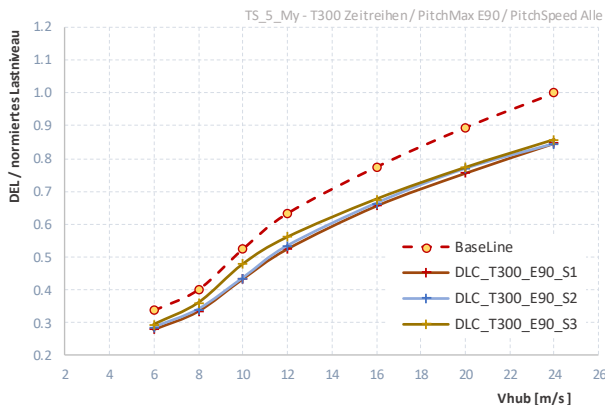
Sensor: Nickmoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 5



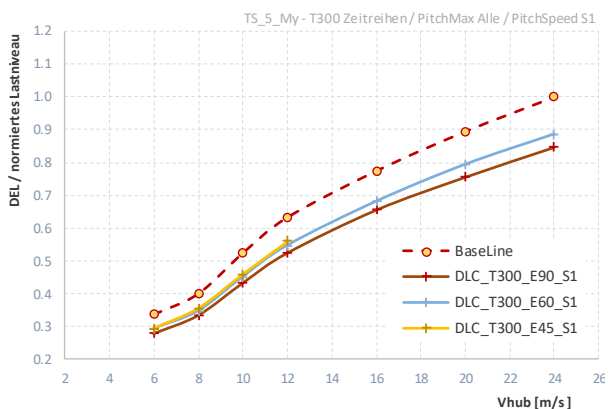
Sensor: Nickmoment Hauptlager (festes KS)
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 5

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

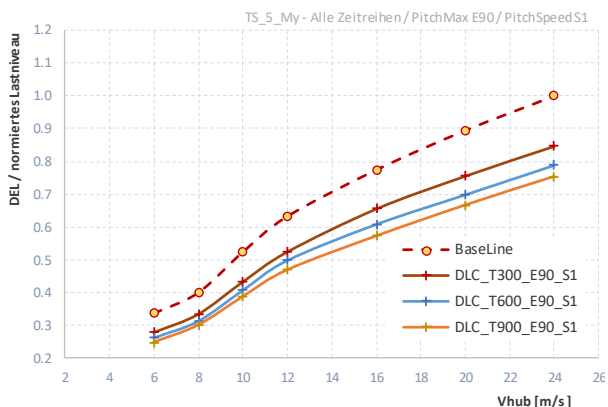
Abb.18 Entwicklung DEL-Lastniveau des N_My / Nickmoments am Hauptlager, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmkopf
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



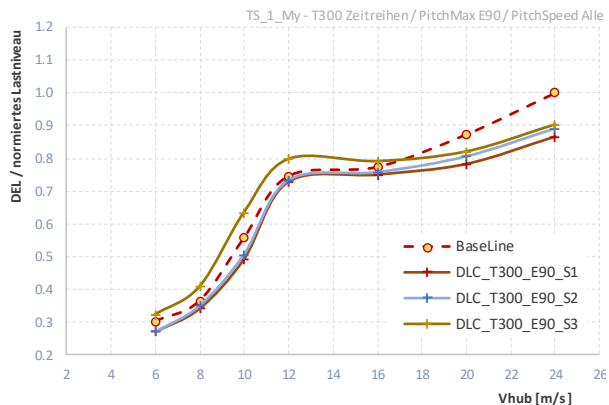
Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmkopf
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



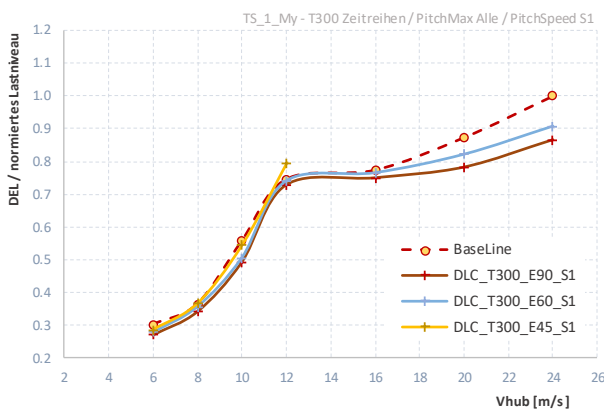
Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmkopf
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

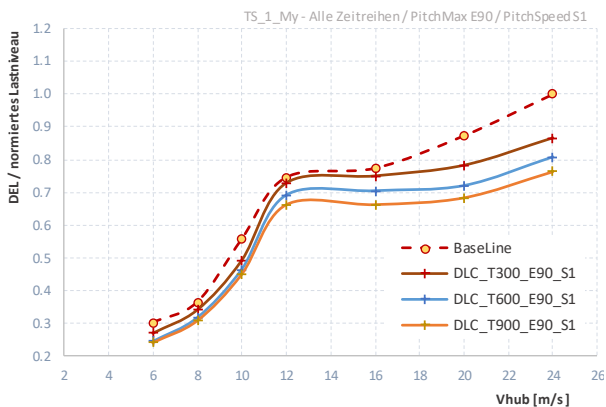
Abb.19 Entwicklung DEL-Lastniveau des TS5_My / Biegemoments in Schubrichtung am Turmkopf, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmfuss
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



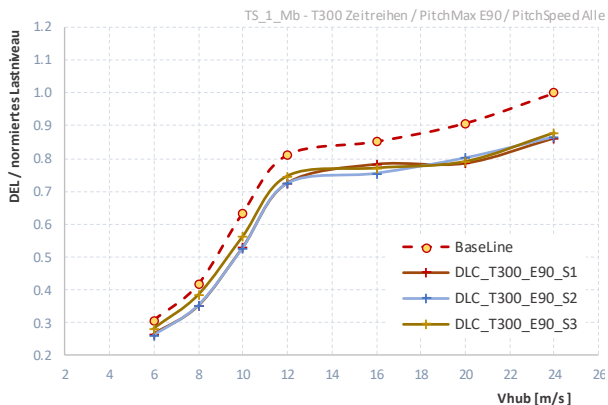
Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmfuss
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



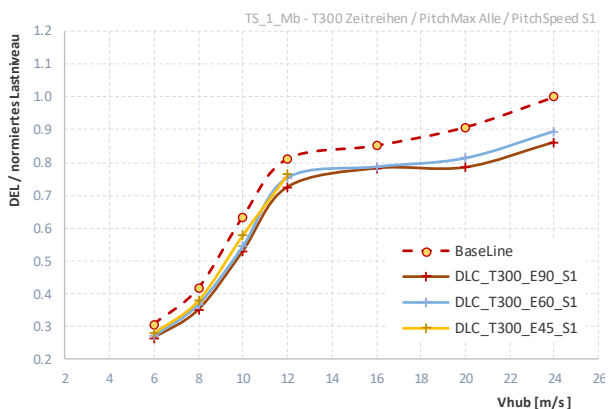
Sensor: Biegemoment in Schubrichtung - Turmfuss
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

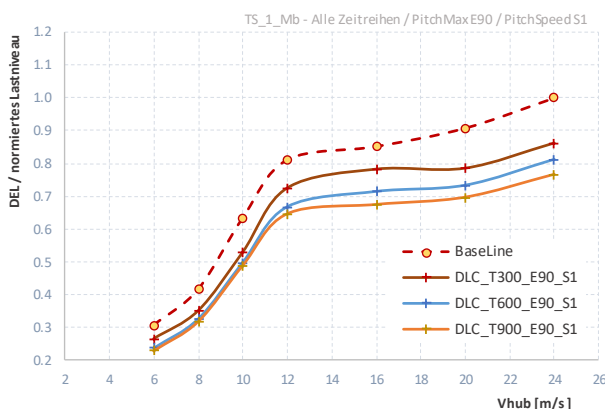
Abb.20 Entwicklung DEL-Lastniveau des TS1_My / Biegemoments in Schubrichtung am Turmfuss, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten



Sensor: Total. res. Biegemoment - Turmfuss
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: alle
 Wöhlerkoeffizient m: 4



Sensor: Total. res. Biegemoment - Turmfuss
 Trudel-Dauer: 300 s
 Endlagenwinkel: alle
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4



Sensor: Total. res. Biegemoment - Turmfuss
 Trudel-Dauer: alle
 Endlagenwinkel: 90 °
 Verstellgeschwindigkeit: 2 °/s
 Wöhlerkoeffizient m: 4

[Vergleich nach: ... Verstellgeschwindigkeit Blätter (o) / Endlagenwinkel (m) / Dauer des Trudelbetriebs (u)]

Abb.21 Entwicklung DEL-Lastniveau des TS1_Mb / resultierenden Biegemoments am Turmfuss, in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Start/Stop-Varianten

1.4 Schlussfolgerungen - Teil 1

Mit der hier dargestellten Simulationsstudie konnten die grundlegenden Aussagen der zitierten KNE-Studie zum Einfluss von EA auf die Standsicherheit von WEA [1] klar verifiziert und weiter konkretisiert werden.

Grundsätzlich fand sich bestätigt, dass im Rahmen üblicher Start/Stop-Vorgänge mit zwischenzeitlichem Trudelbetrieb tatsächlich keine höhere Gefährdung für die Standsicherheit von WEA zu erwarten ist. Die letztendliche Anzahl der über die Zeit infolge von EA auftretenden Start/Stop-Vorgänge bleibt damit also wie erwartet für den Normalfall vollständig ohne Relevanz für die Betriebssicherheit einer konkreten Anlage. Denn jeder einzelne Fall von EA führt gegenüber dem Normalbetrieb bereits individuell zu einer eher reduzierten Materialermüdung der Strukturbauteile. Etwaige sich daraus ergebende, die Betriebsdauer gegenüber der ausgewiesenen Designlebensdauer verlängernde Effekte von EA wären allerdings stets im Einzelfall auf Grundlage standortspezifischer Parameter zu prüfen.

Mit der hier durchgeführten Variantenuntersuchung wurde weiterhin klar nachgewiesen, dass ein schnelleres Pitchen, flachere Endlagenwinkel oder kurze Trudelzeiten durchaus zu einer ungünstigen Verschiebung der Materialermüdung beitragen. Die Basiswerte des durchgehenden Betriebs würden aber auch dann nur bei sehr hohen Verstellgeschwindigkeiten und in Kombination mit sehr kurzen Trudelzeiten überhaupt Gefahr laufen tatsächlich relevant überschritten zu werden. Betroffen davon wären dann vordergründig die Komponenten Turm, Blattlager und Rotorblatt. Die Art und Weise der Abbremsung (z.B. ein deutlich schnelleres Verfahren der Blätter im Zusammenhang mit AKS, Lastabwurf mit Einleitung des Bremsvorgangs, etc.) sollte also nicht ohne weiteres und ggf. auch nicht ohne Rücksprachen mit den Anlagenherstellern verändert werden. Heutige Regelalgorithmen bieten allerdings durchaus Möglichkeiten zur Einbindung einer zusätzlichen Dämpfung für die während einer Bremsung auftretenden Lasten (hier nicht abgebildet). Die Möglichkeit zum schnellen Bremsen steht damit keinesfalls grundsätzlich in Frage.

Teil 2 - Auswirkungen auf den Verschleiß von WEA-Komponenten

Definitionsgemäß werden unter dem Begriff Verschleiß alle tribologisch (mechanisch oder chemisch) verursachten Veränderungen zusammengefasst, die sich an den Kontaktstellen zweier Oberflächen vollziehen, wenn diese relativ zueinander in Bewegung sind. Das Kennzeichen des Verschleißes ist also, anders als bei der zuvor betrachteten Materialermüdung, ein unmittelbarer Materialverlust, der über eine fortschreitende Formänderung zu einem zunehmenden Funktionsverlust und schließlich zu einem vollständigen Funktionsausfall führen kann. Hieraus ergibt sich zugleich die besondere wirtschaftliche Bedeutung entsprechender Maßnahmen zur frühzeitigen Erkennung und Minderung von Verschleiß, wobei letzteres meist schon durch geeignete Ansätze wie z.B. Schmier- oder Kühlen zu erreichen, jedoch nicht in allen Fällen uneingeschränkt wiederholbar ist.

2.1 Zielsetzung

Mit Teil 1 der vorliegenden Studie wurden bisher die Einflüsse von EA auf die Materialermüdung der standsicherheitsrelevanten Strukturbauteile untersucht. Teil 2 widmet sich nun dem durch EA verursachten Verschleiß.

Zunächst sollen die relevanten Bauteile bzw. Funktionseinheiten noch einmal genauer identifiziert und die jeweils erwartbaren Auswirkungen und zugehörigen Verschleißanzeichen näher konkretisiert werden. Ziel ist es, ergänzend zu [1] ein besseres Verständnis hinsichtlich der aus EA zu erwartenden Veränderungen zu entwickeln, um - sofern notwendig - hierüber geeignete Ansätze zur Eindämmung wirtschaftlicher Verluste aufzuzeigen.

2.2 Durch EA beanspruchte Funktionseinheiten

Schon der normale Betrieb von WEA ist nach heutigem Stand der Technik von einer Abfolge sich zeitlich in unregelmäßigen Abständen wiederholender Funktionsabläufe gekennzeichnet. Für sich genommen, führt jeder dieser Abläufe zu fortschreitendem Verschleiß der involvierten Komponenten. Verschleiß ist also kein Alleinstellungsmerkmal von EA, sondern klarer Bestandteil der im Rahmen des Entwurfs zu bewertenden Beanspruchungen. Seine Entsprechung findet dies unter anderem in der Festlegung geeigneter Schmier-, Wartungs- und Instandsetzungsintervalle. Diese werden in aller Regel in enger Abstimmung mit den jeweiligen Komponentenherstellern erarbeitet und in entsprechenden Handbüchern und Anweisungen festgehalten.

Unbestreitbar führen EA dennoch zu einer Zunahme im Auftreten bestimmter Funktionsabläufe die mit dem Abbremsen und Wiederanfahren einer WEA in Verbindung stehen. Lager, Verzahnungen, Schalter und Antriebe lassen damit zunächst zusätzlichen Verschleiß vermuten. Jedoch ist auch hier nicht allein die pure Anzahl der Vorgänge entscheidend. Auf die Lebenszeit gesehen, muss der insgesamt akkumulierte Verschleiß aus Dauer und Intensität (Stärke) der Einzelvorgänge betrachtet werden. Für die eingebundenen Funktionseinheiten stellt sich dies nun in etwa wie folgt dar:

A) Lagerung & Verzahnung der Blattverstellung

Da EA objektiv vor allem mit der Verstellung der Blattwinkel zur Umsetzung des Brems- und Wiederanfahrvorgangs einhergehen, scheint es zunächst naheliegend zunehmenden Verschleiß vor allem im Bereich der mit der Blattverstellung verbundenen mechanischen Komponenten zu vermuten. Bei entsprechend hoher Anzahl an Start/Stop-Vorgängen ergibt sich möglicherweise zunächst die Vorstellung einer erhöhten Laufleistung und damit einhergehend einer erhöhten Beanspruchung der Blattlager und evl. vorhandener Verzahnung. Defacto ist aber tatsächlich das Gegenteil der Fall.

Blattlager werden jedoch überwiegend hinsichtlich der wirkenden Traglasten ausgewählt. Das heißt in Hinblick auf ihre Eigenschaft als Drehlager bleiben zunächst deutliche Reserven. Allerdings verharrt der Blattwinkel im Normalbetrieb üblicherweise nur in einem relativ engen Bereich, auf den sich dann entsprechend auch der unvermeidbare Verschleiß konzentriert. Durch den mit EA einhergehenden Trudelbetrieb wird der sonst in diesem hochbeanspruchten Bereich auftretenden Verschleiß schließlich örtlich verlagert, und damit im relevanten Bereich der Laufflächen und Verzahnung insgesamt vermindert.

Darüber hinaus ergeben sich gerade auf Grund der üblicherweise im Normalbetrieb über die Anlagenregelung generierten, relativ gesehen immer nur recht kleinen Winkeländerungen aus tribologischer Sicht mitunter ungünstige Schmierverhältnisse. Ein zeitweise sich vollziehendes Verfahren des Lagers über einen weiteren Winkelbereich wirkt demgegenüber also sogar positiv und wäre anderenfalls auch über die Software der Analgensteuerung aktiv vorgesehen.

Allerdings steigt durch EA auf Grund der dann insgesamt weiteren Verfahrenwege möglicherweise der Verbrauch an Schmiermitteln und damit der zu betreibende Wartungsaufwand. Bei Aufrechterhaltung einer dauerhaften Schmierung ist aber auch in Anbetracht der mit Teil 1 dargestellten Verminderung der Betriebslasten zunächst von keiner kritischen Zunahme der Verschleißbelastungen für Lager und Verzahnung auszugehen.

B) Elektrische, hydraulische & elektromotorische Komponenten der Blattverstellung

Etwas anders sieht es im Bereich der elektrischen, hydraulischen und elektromotorischen Komponenten der Blattverstellung aus. Eine pauschalisierte Aussage ist jedoch auf Grund der unterschiedlichen technischen Ausführung der verbauten Systeme nicht ohne weiteres möglich. Entsprechend können hier nur Hinweise zur näheren Eingrenzung diskutiert werden. Eine genaue Analyse muss jeweils für das betrachtete Anlagenmodell erfolgen.

Relativ sicher ist zunächst, dass die in den Blattverstellsystemen verbauten kondensatorischen, akku- oder druckbasierten Energiespeicher in Bezug auf die Verschleißbetrachtung eher ohne direkte Relevanz bleiben. Die Aktivierung der für die nötige Winkelverstellung benötigten Elemente (Pumpen, Ventile, Bremsen, Motoren, Zylinder) sollte üblicherweise über das dafür vorgesehene Anlagenbordnetz, also ohne Einbindung von Speicherelementen erfolgen.

Rein von der Anzahl an Betriebsstunden sollten ebenfalls alle diese Elemente im Grunde durch den mit EA einhergehenden Trudelbetrieb und in Anlehnung an die Ergebnisse aus Teil 1 insgesamt weniger belastet sein. Das heißt sogar geringerer Verschleiß wäre eine mögliche Folge. Eine zentrale Frage zum Verschleiß könnte sich allerdings entlang der zur automatischen Aktivierung der Verstellelemente benötigten elektrischen und/oder hydraulischen Schaltelemente (Magnetventile, Relais, Schütze,

Leistungsschalter) ergeben. Der Verschleiß dieser Bauteile lässt sich nämlich anders als bei den meisten mechanischen Komponenten nicht unbedingt durch regelmäßiges Nachschmieren mindern. Ein Ausfall dieser Bauteile ist meist an eine Anzahl geleisteter Schaltvorgänge gebunden. Durch EA würden diese möglicherweise deutlich öfter geschaltet und damit mögliche Grenzen für Bedienhäufigkeiten überschritten. EA könnten damit ebenfalls in diesen Bereichen zu höheren Wartungs- und Instandsetzungsaufwand führen.

C) Umrichtersystem & Schaltelemente im elektrischen Antriebsstrang

Auch für die Komponenten des elektrischen Antriebsstrang gilt ähnliches wie für Absatz B. Mit Blick auf Generator, Umrichter und Transformator sind zunächst im Zuge von EA tatsächlich keine erhöhten Verschleißeffekte zu erwarten. Jedoch sind auch hier an zentralen Stellen elektrische Schaltelemente verbaut, die gemäß Spezifikation einer gewissen Grenzzahl von möglichen Schaltvorgängen unterliegen. Aus Sicherheitsgründen sind diese sogar teilweise mit spezifischen Zählwerken ausgestattet, die bei Erreichung einer vorgegebenen Anzahl von Schaltvorgängen unmittelbar keine weitere Bedienung mehr erlauben.

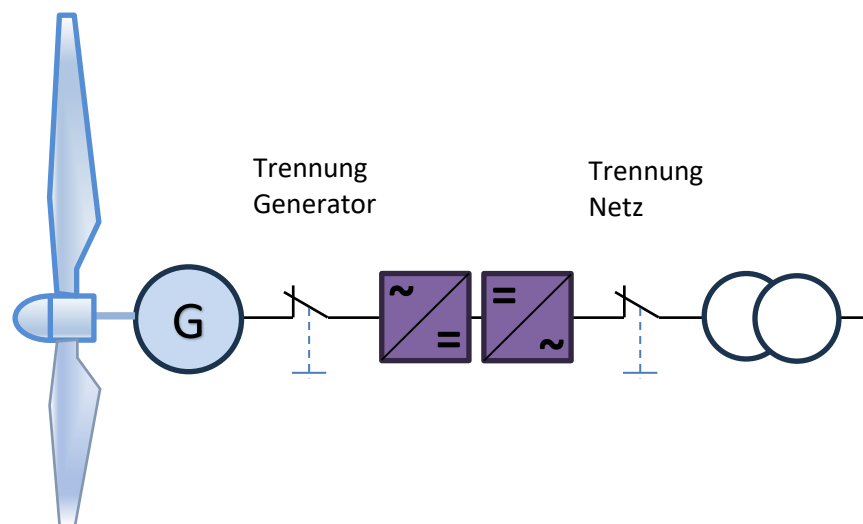


Abb.22 Beispiel für Schaltelemente in einem elektrischen WEA-Triebstrang

Als besonderer Unterschied zu Absatz B gilt hier allerdings, dass diese Schalter im Zuge von EA nicht zwangsläufig physisch zum Einsatz kommen. Zum Beispiel können je nach umgesetzten Anlagenkonzept die in **Abb.22** dargestellten elektrischen Verbindungen im Zuge von EA auch weiter bestehen bleiben. Der Hersteller ABB gibt hierzu z.B. die in **Abb. 23** zusammenfassten Empfehlungen. Anderenfalls würden die auf Grundlage von EA stattfindenden Schaltvorgänge aber im Grunde auch nur bei gegenüber dem Nominalwert geringer elektrischer Last erfolgen. Das heißt, zur Festlegung angepasster Instandsetzungsintervalle wäre bei gegenüber den Designannahmen vermehrt auftretenden EA überwiegend von einer mechanischen Belastung der Schaltelemente auszugehen.

Characteristics	Main power circuit on the generator side	Main power circuit on the grid side	Main auxiliary circuit
Load current [A]	≤ 5000 or nx 700...1600	≤ 5000 or nx 700...1600	< 250
Voltage [V]	≤ 1000	≤ 690	≤ 690
Frequency [Hz]	1...16 30...80 40...140	50 - 60	50 - 60
Prospective-short circuit current [kA]	≤ 15 @ 1000V*	35 @ 690V	
Presence of inrush current	No	No	Yes
Type of load	AC1	AC1	AC3
Life time [years]	20	20	20
Number of mechanical operations (or electrical operations at low current) to disconnect the system (maintenance or out of service)	100...1000	< 1000	< 1000
Number of mechanical operations (or electrical operations at low current) of connection to/ disconnection from the grid or of reconfiguration (production control)	Not available (generally the generator remains connected to the converter)	1000...100000 (according to the control strategy)	Not applicable
Number of electrical operations	< 500 (tripping of protections or emergency stop)	< 500 (tripping of protections or emergency stop)	> 500 (tripping of protections or emergency stop)
Protection against overcurrents	Yes	Yes	Yes
Optimum solution	Circuit-breaker (if protection is required for the connection cable or the inverter input) Switch-disconnector (if an external protection system is present)	Circuit-breaker + contactor more than one operation per day required) circuit-breaker (less than one operation per day)	Circuit-breaker

Abb.23 Empfehlungen von ABB zur Auswahl und Einbindung von Leistungsschaltern für den elektrischen Triebstrang von WEA [3]

2.3 Handlungsempfehlungen

Gemäß den vorausgehenden Ausführungen lassen sich in Verbindung mit EA zwei wesentlichen Handlungsfelder als Antwort auf einen möglicherweise höheren Verschleiß identifizieren.

A) Anpassung Schmier-systeme

Wie vorausgehend dargestellt, kommt es durch EA mitunter zu deutlich verlängerten Verfahrenswegen und damit zu einem höheren Verbrauch an Schmiermitteln im Bereich der Blattverstellung. Zur dauerhaften Gewährleistung der verschleißmindernden Schmierung kann darauf in einfacher Weise mit einer entsprechenden Anpassung der Schmier- und Wartungspläne reagiert werden.

Der dafür zu betreibende Aufwand begrenzt sich im Wesentlichen auf die Ermittlung der benötigten Anpassung der Intervalle, sowie die Bereitstellung der Schmiermittel zur Umsetzung der angepassten Wartung. Auf Grundlage des über einen Zeitraum T registrierten Verbrauchs, sowie evl. feststellbarer Übertritt von zu viel aufgebrauchten Schmiermitteln, lassen sich auf einfache Weise, und idealerweise bereits zu Beginn der Betriebszeit einer Anlage angepasste Intervalle ermitteln, zu dem sich ohnehin auf Grundlage von Erfahrungen eine höhere Anzahl von vor Ort-Prüfungen der Schmier- und Auffangbehälter empfiehlt. Die angepassten Schmierintervalle wären dann entsprechend auch parameterseitig noch in der Anlagensteuerung zu integrieren (Anpassung Schmierintervalle für z.B. Ritzel und Lager, ggf. sonstige Komponenten bei hydraulischer Verstellung). Zur Sicherung des Schmierstoffvorrats sind darüber hinaus ggf. engere Wartungsintervalle erforderlich, und entsprechend koordinativ umzusetzen.

B) Instandhaltung elektrische & hydraulische Schaltelemente

Der vorausgehend mit Kapitel 2.2 - Absätze B & C herausgearbeitete, mögliche höhere Verschleiß der elektrischen und hydraulischen Schaltelemente erfordert zunächst vor allem eine Auseinandersetzung mit den zugehörigen Datenblättern und Spezifikationen. Im Idealfall finden sich dort, wie in den mit **Abb.24** gegebenen Beispielen dargestellt, entsprechende Angaben zu den unter verschiedenen Bedingungen gewährleisteten Schaltvorgängen. Anderenfalls sind entsprechende Angaben ggf. von den verwendeten Herstellern zu erfragen. Sollten allerdings keine Angaben verfügbar sein, wären diese lediglich durch Versuch im praktischen Betrieb zu ermitteln. Letzteres wird allerdings auch von Herstellern zur Optimierung der Wartungszyklen empfohlen. Teilweise lässt sich dafür der eingetretene materielle Verschleiß sogar unmittelbar an den involvierten Schaltkontakten überprüfen.

		E3 L		E4 S-H-V		E6 H-V			
Bemessungsdauerstrom (bei 40 °C) I_u	[A]	2000	2500	3200	4000	3200	4000	5000	6300
Mechanische Lebensdauer bei regelmäßiger Wartung	[Anzahl Schaltungen x 1000]	15	15	15	15	12	12	12	12
Schalthäufigkeit	[Schaltungen/Stunde]	60	60	60	60	60	60	60	60
Elektrische Lebensdauer	(440 V ~) [Anzahl Schaltungen x 1000]	2	1.8	7	5	5	4	3	2
	(690 V ~) [Anzahl Schaltungen x 1000]	1.5	1.3	7	4	5	4	2	1.5
Schalthäufigkeit	[Schaltungen/Stunde]	20	20	10	10	10	10	10	10

Abb.24 Ausgewiesene Lebensdauer von Leistungsschaltern am Beispiel von ABB SACE Emax [4]

Ein zustandsorientierter Tausch der betreffenden Schaltelemente sollte sich im Grunde mit vertretbarem Aufwand auch in Ergänzung zu den herkömmlichen Wartungsintervallen einbinden lassen. Die anzustrebenden Tauschintervalle lassen sich bei Kenntnis der auftretenden Häufigkeiten von EA entsprechend standortspezifisch aus den Angaben der Datenblätter ermitteln. Für die Durchführung der entsprechenden Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten ist sich an die Vorgaben der jeweiligen Hersteller zu halten.

2.4 Schlussfolgerungen - Teil 2

Im Ergebnis einer erhöhten Anzahl ereignisbezogener Abschaltungen ist für einige Anlagenbauteile ein erhöhter Verschleiß nicht vollständig auszuschließen. Grundsätzlich handelt es sich dabei jedoch vor allem um einfach zu ersetzende Sub-Baugruppen, bzw. um Verschleiß der sich über eine angepasste Schmierung optimal mindern lässt. Bei einem geeigneten Umgang mit den herausgearbeiteten Effekten, lassen sich die damit verbundenen Mehrkosten und Aufwände in einem eher begrenzten Rahmen halten. Im Wesentlichen sind zwei zentrale Dinge zu gewährleisten:

- Zum einen ist eine dauerhafte Aufrechterhaltung der Schmierung von Bauteilen der Blattverstellung auf Grundlage von angepassten Schmier- und Wartungsplänen von Bedeutung.
- Zum anderen ist ggf. für einen früheren Austausch eventuell verschleißender, elektrischer & hydraulischer Schaltelemente (Magnetventile, Relais, Schütze, Leistungsschalter) auf Grundlage überarbeiteter Instandsetzungsfahrpläne zu sorgen.

Eine belastbare Aussage zu dafür anfallenden Kosten ist auf Grund der Vielfalt ausgeführter Lösungen nur für den individuellen Fall möglich. Es kann aber in Anlehnung an **[1]** davon ausgegangen werden, dass sich diese Mehrkosten nur unwesentlich in der Betriebsbilanz einer Anlage niederschlagen werden.

