

Interaktion zwischen der Rotor aerodynamik und der Triebstrangdynamik an großen Windenergieanlagen

Daniel Kucher, Stefan Hauptmann

MesH Engineering GmbH, Stuttgart, Deutschland
wind@mesh-engineering.de

Die vorliegende Veröffentlichung befasst sich mit der Interaktion der Rotor aerodynamik, der Aeroelastik und dem turbulenten Windfeld mit der Triebstrangdynamik von großen Windenergieanlagen. Um die genannten Zusammenhänge zu analysieren werden insgesamt drei strukturdynamische Modelle einer generischen 5MW Windenergieanlage erstellt und die aerodynamischen Lasten unter Anwendung verschiedener Methoden auf die Modelle aufgeprägt. Die Ergebnisse werden anhand von Frequenzspektren unter Hinzuziehung der Energieverteilung der Eigenmoden analysiert.

1 Einleitung und Motivation

Die Auslegung von Windenergieanlagen (WEA) wird von Richtlinien wie der *Richtlinie zur Zertifizierung von Windenergieanlagen* des Germanischen Lloyd (GL) [1] beeinflusst, auf deren Basis auch die Zertifizierung erfolgt. Der GL beschreibt darin ein mehrteiliges Verfahren zur Ermittlung der Auslegungslasten von einzelnen Komponenten. Im ersten Schritt wird ein aero-servo-elastisches Lastsimulationsmodell zugrunde gelegt, welches unter Berücksichtigung der niederfrequenten Strukturdynamik, der turbulenten Einströmung, der instationären Aerodynamik sowie der Aeroelastik die globalen Lasten der Hauptkomponenten der WEA berechnet. In einem weiteren Schritt wird zudem ein detailliertes strukturdynamisches Triebstrangmodell gefordert, mit dem durch modale Analyse und eine Hochlaufsimulation Resonanzen mit den internen Anregungen ausgeschlossen werden können. Mit dem dynamischen Triebstrangmodell können zudem die globalen Lasten auf die lokalen Komponentenlasten umgerechnet werden.

Das Vorgehen, das von der GL-Richtlinie vorgeschlagen wird, basiert somit auf der Annahme, dass das niederfrequente Lastsimulationsmodell die Interaktionen zwischen der Aerodynamik und der Strukturdynamik der WEA ausreichend berücksichtigt. Bei größer werdenden WEA tritt der Aspekt des Leichtbaus jedoch mehr und mehr in den Vordergrund. Dies führt zu immer flexibleren Komponenten im Triebstrang, die weich gelagert sind und somit zu einem schwingungsfreudigeren Triebstrang. Es wird daher die These formuliert, dass eine Interaktion zwischen dem turbulenten Windfeld, sowie der aeroelastischen Effekte mit der Triebstrangdynamik stattfindet, die im derzeitigen Auslegungsprozess nicht betrachtet wird.

2 Methodik

Die vorliegende Untersuchung basiert auf einer generischen 5MW Windenergieanlage (WEA) der Klasse 1B gemäß [1], die von NREL für wissenschaftliche Untersuchungen definiert worden ist [2]. In einem ersten Schritt wird ein Triebstrang der genannten WEA vorausgelegt. Von der WEA wird nun sowohl ein Lastsimulationsmodell, als auch ein dynamisches Triebstrangmodell gemäß den Anforderungen des GL in dem Mehrkörpersimulationsprogramm *SIMPACK* aufgebaut. Im Falle des Lastsimulationsmodells werden die Rotor aerodynamik, sowie das turbulente Windfeld und die niederfrequente Strukturdynamik der WEA berücksichtigt. Das Triebstrangmodell berücksichtigt die hochfrequente Strukturdynamik des Triebstrangs, sowie die Anregungen durch die Verzahnungen. Des Weiteren wird ein ganzheitliches aero-servo-elastisches Lastsimulationsmodell entwickelt, indem das Triebstrangmodell in das Lastsimulationsmodell integriert wird. Mit diesem Modell können somit die lokalen Komponentenlasten unter Berücksichtigung von Aerodynamik und Windfeld direkt ermittelt werden.

2.1 Lastsimulationsmodell

Das Lastsimulationsmodell, wie vom GL gefordert, bildet die Strukturdynamik der Windenergieanlage im niederfrequenten Bereich bis etwa 10 Hz ab. Daher werden nur Freiheitsgrade der WEA berück-

sichtigt, die einen Einfluss auf diesen Frequenzbereich haben. Das Modell berücksichtigt somit 4 Freiheitsgrade (FHG) pro Rotorblatt um die ersten 2 Schlag- und Schwenk- Biegeeigenmoden der Rotorblätter abzubilden. Weitere 4 FHG werden zur modalen Beschreibung der Turmbiegung verwendet. 1 rotatorischer FHG dient zur Modellierung des Giermechanismus und mit weiteren 3 FHG wird die Triebstrangdynamik abgebildet. Im Triebstrang wird dabei die Biegung der Hauptwelle abgebildet und das Torsionsverhalten des Triebstrangs wird durch das Modell eines 2-Massen-Schwingers abgebildet. Unter Berücksichtigung von 1 FHG für die Rotorrotation beinhaltet das Lastsimulationsmodell somit 21 Freiheitsgrade insgesamt. In Abb. 1 wird das Modell visualisiert.

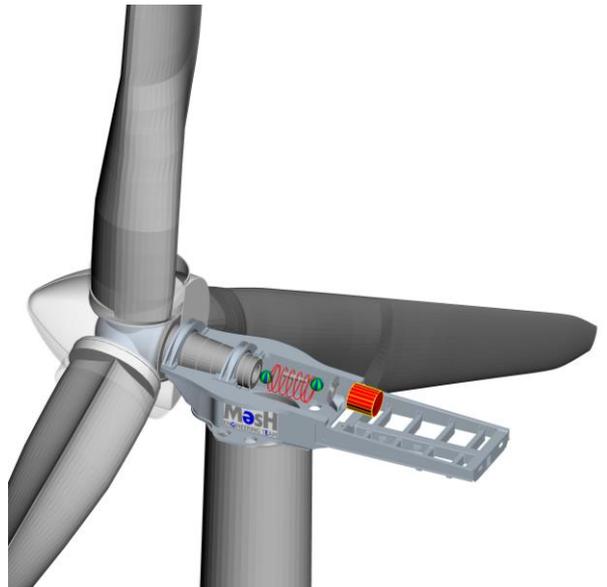


Abb. 1: 3D-Darstellung Lastsimulationsmodell

Das Strukturmodell wird im Lastsimulationsmodell mit den äußeren Lasten aus Rotor-aerodynamik und Generator-Luftspaltmoment belastet. Die Rotor-aerodynamik wird mit dem aerodynamischen Modul AeroDyn [3], welches in SIMPACK verfügbar ist, berechnet. Das Modul verwendet die Blattelement-Impuls-Theorie (BEM) zur Beschreibung der Rotor-aerodynamik. Die instationären Effekte werden mit dem Modell zum dynamischen Strömungsabriss (Dynamic stall) von Beddoes und Leishman [4] berücksichtigt. Die Einströmung auf den Rotor wird mit einem turbulenten Windfeld beschrieben, das mit dem Preprozessor TurbSim [5] berechnet wird. Es wird dabei das Windspektrum nach Kaimal verwendet.

2.2 Triebstrangmodell

Um die vorliegende Untersuchung durchführen zu können ist eine Vorauslegung des Triebstrangs für die betrachtete 5 MW WEA durchgeführt worden. Der Triebstrang umfasst eine Rotorwelle mit zwei Hauptlagern sowie eine Getriebeeinheit mit zwei Planetenstufen und einer Stirnradstufe. Das vordere Hauptlager ist als Toroidallager ausgelegt, das die radialen Lasten aus dem Rotor aufnimmt. Das hintere Hauptlager ist als Pendelrollenlager ausgelegt, das neben Radiallasten auch die Schubkraft aus dem Rotor in axialer Richtung aufnimmt. Die Rotorwelle ist über eine Presspassung mit dem Planetenträger der ersten Stufe der Getriebeeinheit verbunden. Die Gesamtübersetzung des Getriebes beträgt 97:1 und entspricht somit dem Wert, der bereits von NREL für die 5MW WEA definiert worden ist. Das Getriebemoment wird über Momentenstützen auf Höhe der ersten Stufe auf dem Maschinenträger abgestützt. In Tabelle 1 sind die Eckdaten der Getriebeeinheit zusammengefasst. Abbildung 2 zeigt eine Zusammenbauzeichnung des Getriebes.

Tab. 1: Hauptparameter des Getriebes

| Getriebestufe | | 1 | 2 | 3 |
|---------------------|------|------|------|------|
| Übersetzung | [-] | 4.89 | 5.38 | 3.69 |
| Normalmodul | [mm] | 22 | 15 | 7 |
| Planetenanzahl | [-] | 4 | 3 | - |
| Schrägungswinkel | [°] | 0 | 8 | 19 |
| Zahnbreite | [mm] | 460 | 310 | 200 |
| Getriebedurchmesser | [mm] | 2500 | | |

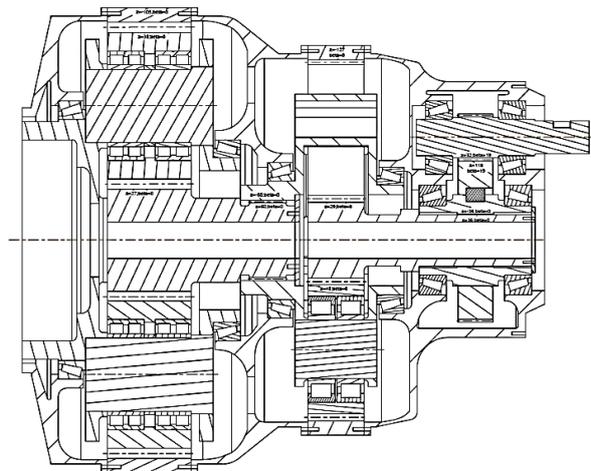


Abb. 2: Zusammenbauzeichnung Getriebe

Das dynamische Triebstrangmodell wurde gemäß den Mindestmodellierungsanforderungen in der GL Wind 2010 Richtlinie in SIMPACK modelliert. In Tabelle 2 sind die Freiheitsgrade des dynamischen Triebstrangmodells aufgelistet. Um die Anregungen aus dem Triebstrang zu erfassen werden auch die einzelnen flexiblen Zahnkontakte in allen drei Stufen modelliert (SIMPACK FE-225). Abbildung 3 zeigt eine 3D Darstellung des Triebstrangmodells.

Tab. 2: Freiheitsgrade des Triebstrangmodells

| | Freiheitsgrade Komponenten |
|------------------------------|------------------------------|
| Getriebegehäuse | 6 (über Drehmomentstützen) |
| Rotorwelle | 7 (4 Biege, 2 Tors, 1 Axial) |
| Zentralwellen (2x) | 6 (4 Biege, 1 Tors, 1 Axial) |
| Ritzelwelle | 6 (4 Biege, 1 Tors, 1 Axial) |
| Lagerung Rotorwelle | 6 |
| Lagerung Planetenträger (2x) | 6 |
| Lagerung Planeten (7x) | 6 |
| Lagerung Radwelle | 6 |
| Lagerung Ritzelwelle | 6 |
| Summe | 103 |

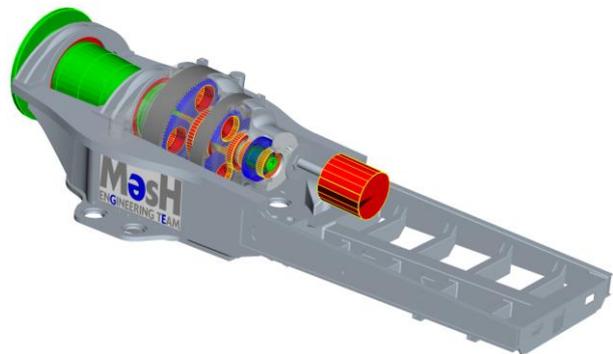


Abb. 3: 3D-Darstellung Triebstrangmodell

2.3 Ganzheitliches Modell

Die Verwendung mehrerer verschiedener Strukturmodelle für die dynamische Analyse ist mit modernen MKS-Programmen nicht mehr zwingend erforderlich. In der vorliegenden Untersuchung wird daher zusätzlich zu den richtlinienkonformen Modellen auch ein ganzheitliches aero-servo-elastisches Modell erstellt, indem das Triebstrangmodell in das Lastsimulationsmodell integriert wird. Dieses Modell berücksichtigt die Strukturmechanik der WEA in einem breiten Frequenzspektrum bis in den kHz-Bereich hinein. Durch die Verknüpfung mit dem aerodynamischen Modul AeroDyn können somit sowohl die inneren Anregungen aus dem Triebstrang, also die Unwucht von Wellen und der Zahneingriff berücksichtigt werden, als auch die äußeren Anregungen durch die instationäre Aerodynamik und turbulente Einströmung. Die Abb. 4 zeigt eine 3D-Visualisierung des ganzheitlichen Modells.

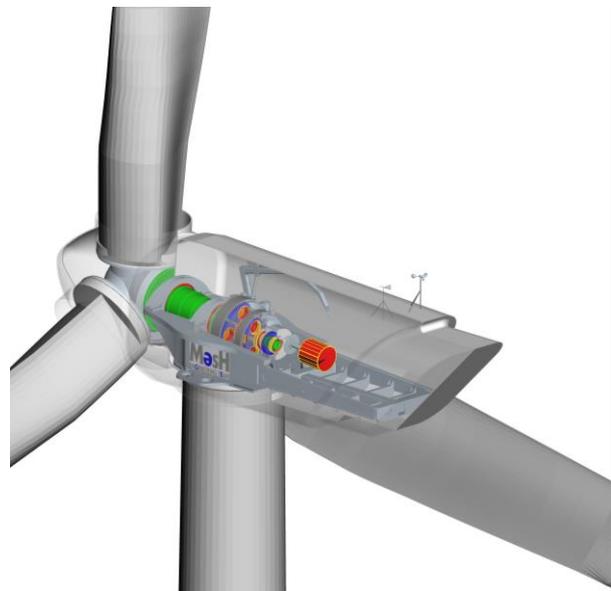


Abb. 4: 3D-Darstellung Ganzheitliches Modell

2.4 Definition der Simulationsansätze

Zuerst wird eine Validierung der Modelle anhand einer Hochlaufsimulation mit dem Lastsimulations-, sowie dem ganzheitlichen Modell durchgeführt. Eine Analyse des Hochlaufs anhand von Campbell-Diagrammen gibt Aufschluss, ob beide Modelle das dynamische Verhalten der WEA im niedrigen Frequenzbereich übereinstimmend repräsentieren. Um zu analysieren, inwieweit eine Interaktion zwischen der Aerodynamik und der Triebstrangdynamik an einer Multi-MW WEA stattfindet, werden weitere Simulationen mit den beschriebenen Modellen durchgeführt. Dabei wird ein Windfeld von 10-minütiger Länge mit dem *normalen Turbulenzmodell (NTM)* unter Verwendung des Kaimalspektrums und einer mittleren Windgeschwindigkeit von 8 m/s generiert. Für die betrachtete WEA der Klasse 1B ergibt sich dabei nach [1] eine Turbulenzintensität von $I_s = 23,2\%$. Für die Berechnung des Windfeldes wird das Kaimalspektrum bis zu einer Frequenz von 4 kHz berücksichtigt. Dies ist deutlich höher, als es bei Lastrechnungen im Allgemeinen üblich ist.

Der erste aeroelastische Simulationsansatz verwendet das ganzheitliche Modell der WEA. Die 10-minütige Zeitintegration des Modells erfolgt mit einer Abtastrate von 4kHz, die auch dem Kommunikationszeitschritt mit der aerodynamischen Berechnung entspricht. Dadurch wird bei diesem Modell nicht nur die Strukturmechanik inklusive der Aeroelastik hochfrequent berücksichtigt, sondern auch die Einflüsse der Turbulenz werden im gesamten Frequenzbereich erfasst.

Der zweite Simulationsansatz besteht aus 2 Schritten. Im ersten Schritt wird eine aeroelastische Berechnung mit dem Lastsimulationsmodell durchgeführt. Die Konfiguration des Integrators entspricht der ersten Simulation mit dem ganzheitlichen Modell. Auch bei diesem Modell wird daher der Einfluss der Turbulenz bis in den hochfrequenten Bereich berücksichtigt. Da das Lastsimulationsmodell die Strukturmechanik jedoch nur im niederfrequenten Bereich berücksichtigt, entfallen hier die Einflüsse der hochfrequenten Aeroelastik. Die aerodynamischen Lasten, also die Auftriebs- und Widerstandskräfte, sowie das Pitchmoment werden im ersten Schritt der Simulation aufgezeichnet. Im 2. Schritt wird das ganzheitliche Modell verwendet. Im Gegensatz zur aeroelastischen Simulation mit dem ganzheitlichen Modell wird nun die Aerodynamik nicht mittels BEM berechnet, sondern es werden die Lastzeitreihen aus der Simulation mit dem Lastsimulationsmodell aufgeprägt. Dieses Vorgehen führt dazu, dass die Einflüsse der Turbulenz erneut bis in den hochfrequenten Bereich berücksichtigt werden. Die aeroelastischen Effekte werden jedoch nur mit dem Lastsimulationsmodell ermittelt, sodass hochfrequente Einflüsse der Aeroelastik in dieser 2. Simulation ignoriert werden.

Der dritte Simulationsansatz besteht ebenfalls aus den bereits aus dem 2. Simulationsansatz bekannten 2. Schritten. Der dritte Simulationsansatz ist jedoch dadurch gekennzeichnet, dass die erste Simulation mit dem Lastsimulationsmodell nur mit einer Auflösung von 50 Hz durchgeführt wird. Dieses Vorgehen ist sehr verbreitet im derzeitigen Lastrechnungsprozess. Die Simulation im zweiten Schritt wird wiederum mit einer Frequenz von 4kHz aufgelöst. Dieses Vorgehen führt dazu, dass die Triebstrangdynamik, wie in den übrigen Ansätzen auch, bis in den hochfrequenten Bereich aufgelöst wird, jedoch neben den aeroelastischen Effekten auch der Einfluss der Turbulenz nur im niederfrequenten Bereich berücksichtigt wird.

3 Ergebnisse

Zuerst sollen an dieser Stelle die Ergebnisse der Hochlaufsimulation diskutiert werden. In den Abbildungen 5 und 6 sind die 3D Campbell-Diagramme zu erkennen.

Campbell-Diagramm - Rotormoment (0-10 Hz)

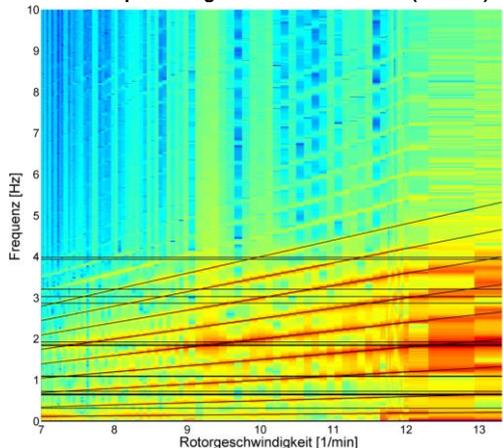


Abb. 5: Rotormoment - Lastsimulationsmodell

Die auf der x-Achse dargestellte Rotordrehzahl repräsentiert den gesamten relevanten Drehzahlbereich von der Einschaltzahl bis zur Nenndrehzahl +10%. Der dargestellte Frequenzbereich liegt zwischen 0 und 10 Hz. Zusätzlich zum 3D Campbell-Diagramm ist auch das 2D Campbell-Diagramm in den Abbildungen dargestellt. Die horizontalen Linien geben die Lage der Eigenfrequenzen der WEA an; die Ordnungen der Drehzahl der Hauptwelle sind ebenfalls markiert und beschriftet. In Abb. 5 ist das Ergebnis für das Lastsimulationsmodell dargestellt; Abb. 6 zeigt das Resultat für das ganzheitliche Modell. In den Abbildungen ist zu erkennen, dass beide Modelle das dynamische Verhalten im niedrigen Frequenzbereich sehr ähnlich abbilden.

Campbell-Diagramm - Rotormoment (0-10 Hz)

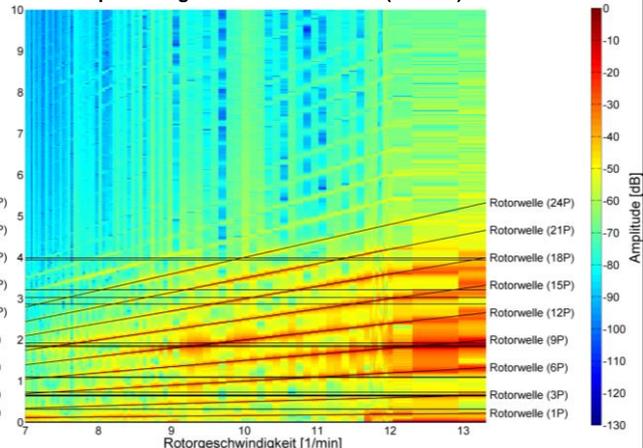


Abb. 6: Rotormoment - ganzheitliches Modell

Campbell-Diagramm Rotormoment (10-700 Hz)

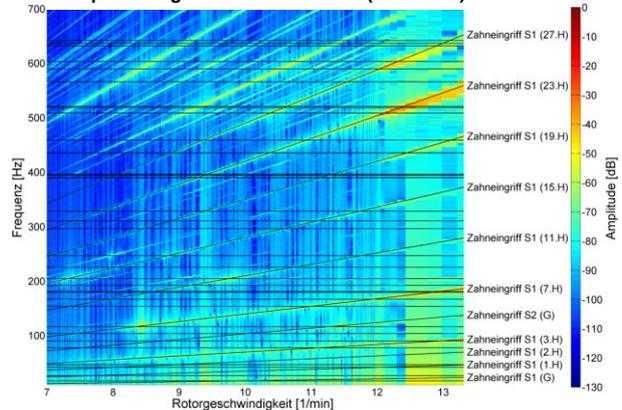


Abb. 7: Rotormoment ganzheitlich & hochfrequent

Abbildung 7 zeigt das Campbell-Diagramm für den hohen Frequenzbereich von 10 bis 700 Hz an. Diese Darstellung basiert auf der Hochlaufsimulation des ganzheitlichen Modells; das Lastsimulationsmodell zeigt in diesem Frequenzbereich keine Überhöhungen, da keine dynamischen Effekte in diesem hohen Frequenzbereich mehr abgebildet werden.

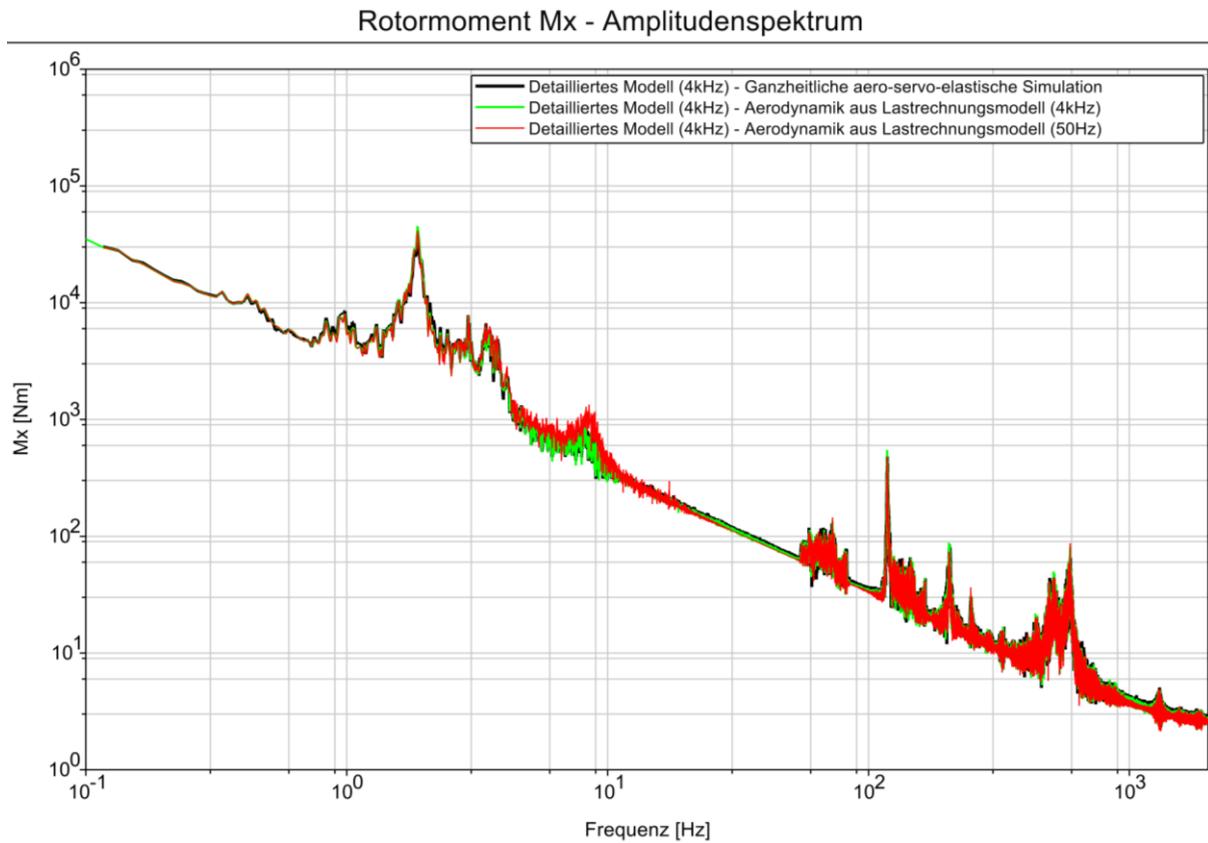


Abb. 8: Vergleich der Spektren - Rotormoment

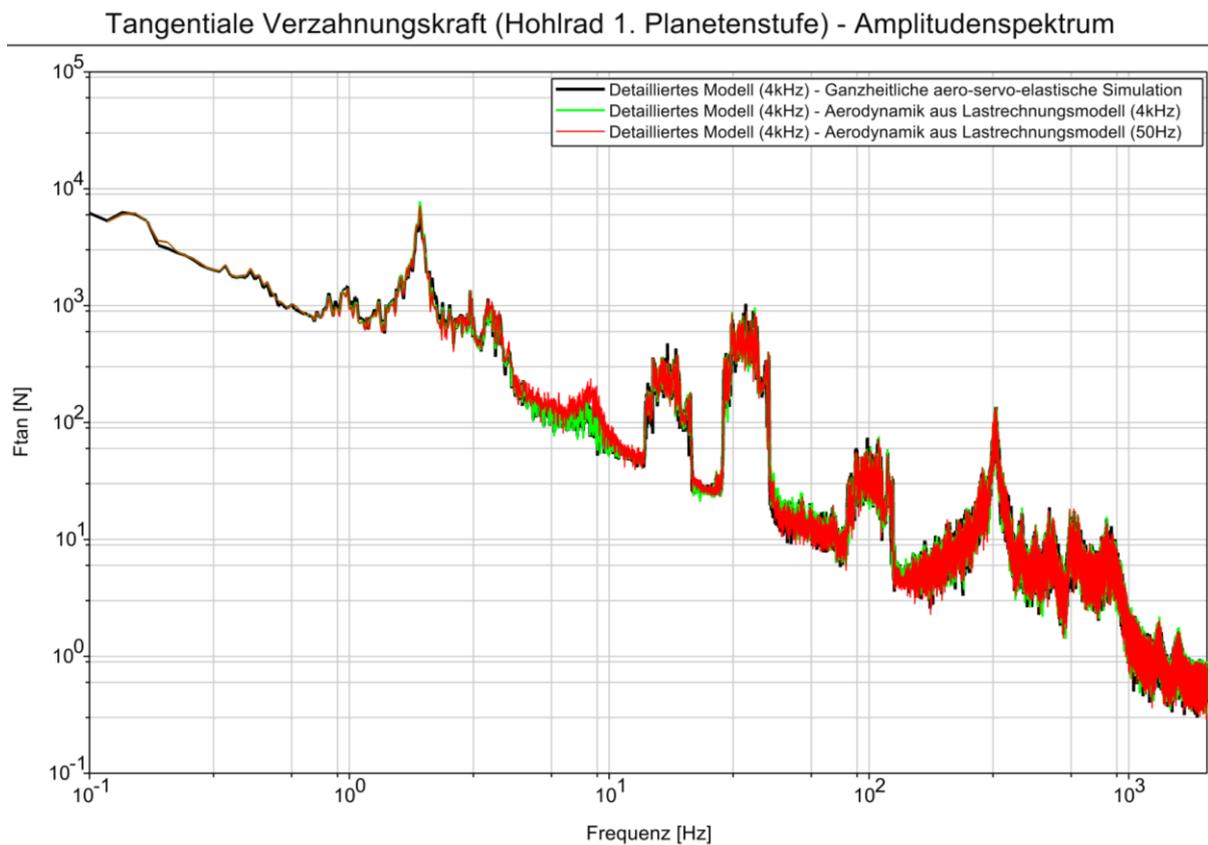


Abb. 9: Vergleich der Spektren - Verzahnung

Rotorschub Fx - Amplitudenspektrum

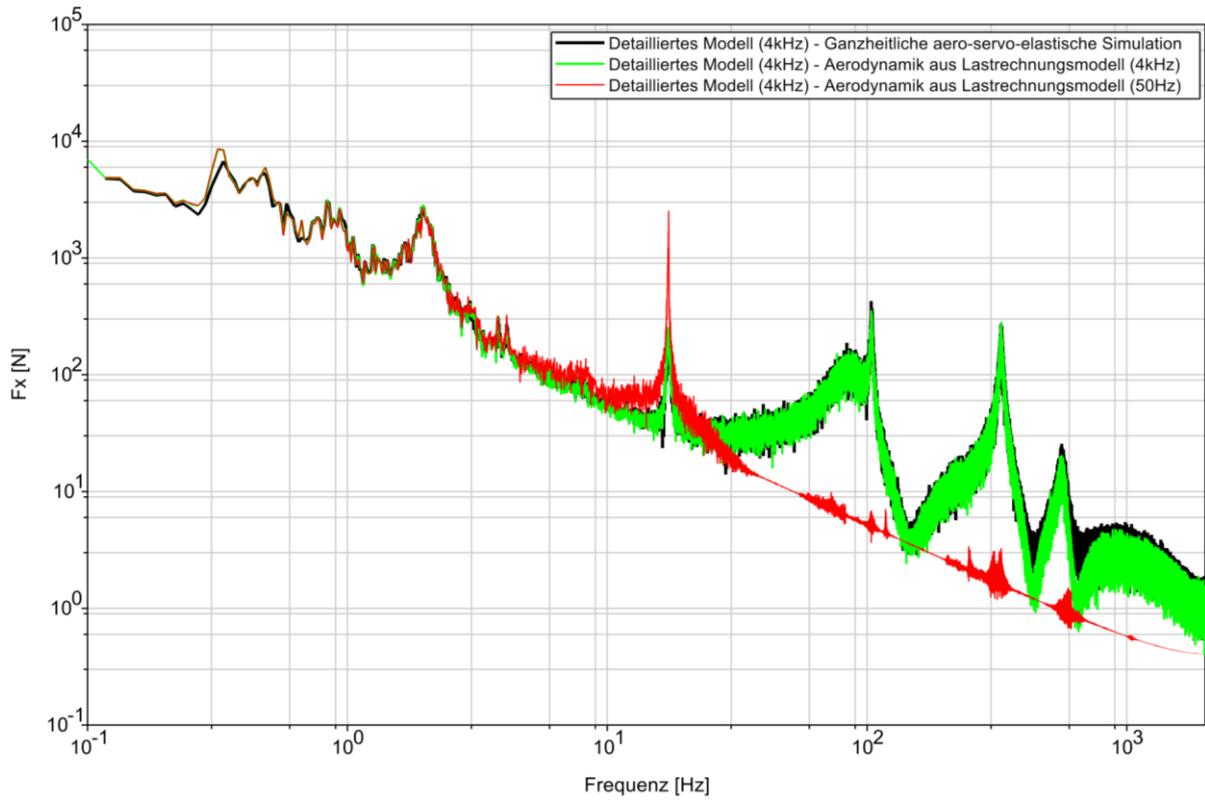


Abb. 10: Vergleich der Spektren - Rotorschub

Axiale Lagerlast (Planetenträgerlager 2. Planetenstufe) - Amplitudenspektrum

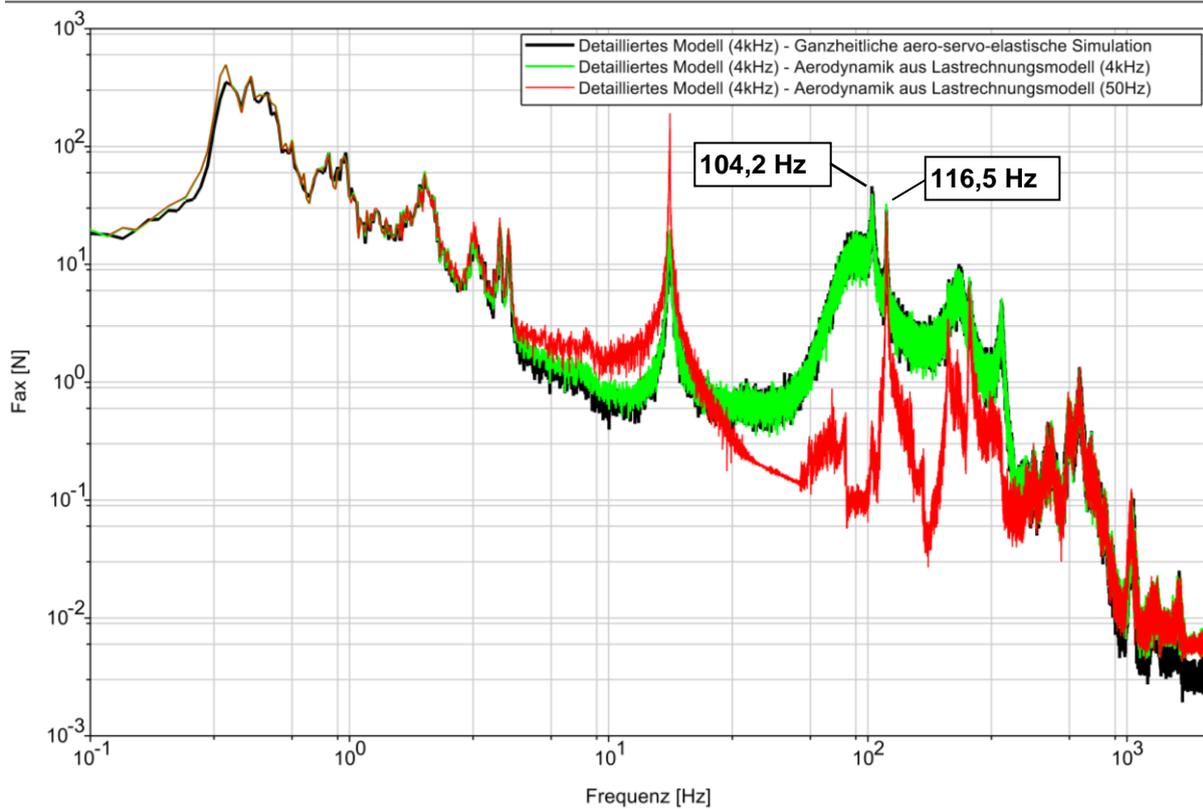


Abb. 11: Vergleich der Spektren - axiale Lagerlast

Um den Einfluss der hochfrequenten Aeroelastik einerseits und der hochfrequenten Turbulenz andererseits zu analysieren, sollen die Amplitudenspektren von ausgewählten Signalen aus der Simulation mit dem turbulenten Windfeld betrachtet werden. Die Abbildungen 8 bis 11 zeigen dazu die Spektren, die mit den drei verschiedenen Simulationsansätzen aus Kapitel 2.4 ermittelt worden sind.

Da das ganzheitliche aero-servo-elastische Modell sowohl die Strukturmechanik, als auch die Aeroelastik, sowie die Einflüsse aus dem turbulenten Windfeld bis zu einer Frequenz von 4kHz abbildet, wird dieses Modell für die vorliegende Studie als Referenz betrachtet. Dieses Modell wird in den Spektren mit der schwarzen Kurve dargestellt.

Die grüne Kurve repräsentiert die Spektren des 2. Simulationsansatzes. Hierbei werden die Lastzeitreihen, die bei einer Abtastfrequenz von 4 kHz mit dem Lastsimulationsmodell erzeugt worden sind, auf das ganzheitliche Strukturmodell aufgeprägt. Diese Spektren bilden die Strukturmechanik und die Einflüsse der Turbulenz mit 4 kHz ab, jedoch werden nur die niederfrequenten aeroelastischen Effekte berücksichtigt. Es ist zu erkennen, dass für alle betrachteten Signale die Spektren mit dem ganzheitlichen Modell übereinstimmen. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Aeroelastik bereits mit dem Lastsimulationsmodell hinreichend berücksichtigt wird. Höhere (Triebstrang-) Eigenmoden weisen keine Interaktion zwischen den strukturdynamischen Auslenkungen mit den rotoraerodynamischen Lasten auf.

Die rot dargestellten Spektren basieren auf dem Simulationsansatz, bei dem die aerodynamischen Lastzeitreihen nur mit 50 Hz aufgelöst sind und somit auch nur die Turbulenz bis zu 50 Hz berücksichtigt wird. Diese Spektren stimmen insbesondere für die rotatorischen Signale, also das Rotormoment an der Nabe, sowie die tangentialen Verzahnungskraften gut mit den übrigen Simulationsansätzen überein (Abb. 8 & Abb. 9). Dies zeigt, dass die Anregungen, die in den Spektren zu erkennen sind, aus der internen Triebstrangdynamik herrühren. Für das axiale Signal des Rotorschubs auf der Nabe, siehe Abbildung 10, wird eine deutliche Abweichung zu den übrigen Simulationsansätzen deutlich. Dies lässt erkennen, dass die Anregung, die die Lastüberhöhungen über 50 Hz verursachen aus der hochfrequenten turbulenten Einströmung herrührt. In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass ein solcher einfacher Zusammenhang für die axiale Lagerlast des Planetenträgers der 2. Stufe nicht gegeben ist. Bei einigen Frequenzen liegen Lastüberhöhungen vor, die direkt aus der Triebstrangdynamik (Zahnkontakt) herrühren, bei anderen Frequenzen scheint eine Anregung aus dem turbulenten Windfeld vorzuherrschen.

Dieser Effekt lässt sich erklären, indem die entsprechenden Eigenfrequenzen, bei denen die Lastüberhöhungen stattfinden, näher analysiert werden. Zu diesem Zweck wird in Abbildung 12 die Energieaufteilung von 2 unterschiedlichen Eigenmoden betrachtet.

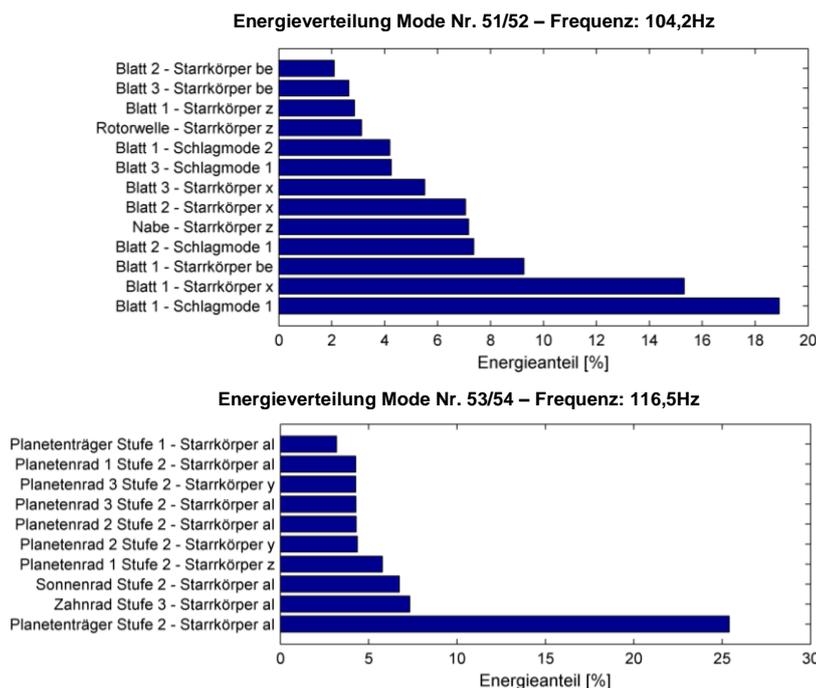


Abb. 12: Energieaufteilung bei zwei exemplarischen Eigenmoden

Die betrachteten Eigenmoden liegen bei den Eigenfrequenzen 104,2 Hz, sowie 116,5 Hz. Diese beiden Eigenmoden führen zu Lastüberhöhungen, die beispielsweise in Abbildung 11 für die axiale Lagerlast des Planetenträgerlagers in der 2. Stufe sichtbar sind. Dabei scheint die Frequenz von 104,2 Hz durch die hochfrequente Turbulenz angeregt zu werden, da die Anregung im 3. Simulationsansatz nicht sichtbar ist. Die Frequenz von 116,5 Hz jedoch wird in allen Simulationsansätzen angeregt und ist somit der internen Triebstrangdynamik zuzuschreiben. Um zu erklären, wieso einige Moden durch die hochfrequente Turbulenz angeregt werden und andere wiederum nicht, gibt die Energieverteilung Hinweise. Die modale Energie der Eigenfrequenz bei 104,2 Hz verteilt sich zu einem großen Anteil auf die Biegemoden der Rotorblätter in Schlagrichtung sowie auf deren axiale Starrkörperbewegung (d.h. in x-Richtung). Dies begründet die Möglichkeit der Energieeinleitung zu dieser Eigenmode durch die turbulente Einströmung, da in dieser Richtung die Änderung der Windgeschwindigkeit im turbulenten Windfeld am größten ist. Die Energieanteile der Eigenfrequenz von 116,5 Hz dagegen verteilen sich hauptsächlich auf Starrkörperbewegungen von Komponenten des Triebstrangs selbst. Eine Anregung durch die Turbulenz ist daher kaum ausgeprägt.

4 Fazit

In der vorliegenden Studie konnte ein Einfluss der turbulenten Einströmung auf die hochfrequente Triebstrangdynamik, d. h. auf Eigenfrequenzen größer als 50 Hz, am Beispiel der NREL 5 MW Windenergieanlage nachgewiesen werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass vor allem Triebstrangmoden mit einer großen Beteiligung der Rotorblätter anfällig sind für die Einleitung von Energie durch die turbulente Einströmung. Besonders deutlich wird dieser Einfluss bei Moden mit hohen Energieanteilen der Rotorblatt-FHG in axialer Richtung (Rotorachsrichtung). Bei Moden mit geringen Energieanteilen aus den Rotorfreiheitsgraden ist die Anregung unabhängig von der turbulenten Einströmung. Auf der anderen Seite existieren in dem betrachteten hohen Frequenzbereich keine Eigenmoden, die durch ihre Rotorblattbeteiligung zu einer aeroelastischen Rückwirkung auf die aerodynamischen Lasten führen. Somit handelt es sich bei dem nachgewiesenen Effekt nicht um eine Interaktion zwischen der Rotor-aerodynamik und der Triebstrangdynamik an großen Windenergieanlagen, sondern um einen einseitigen Einfluss der hochfrequenten Turbulenz auf die hochfrequente Triebstrangdynamik.

5 References

- [1] Germanischer Lloyd, „Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen“, Ausgabe 2010
- [2] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., und Scott, G., „Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development“, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, US, NREL/TP-500-38060, 2009
- [3] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (AeroDyn by David J. Laino, Ph.D.)
<http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn/>. Last modified 23-February-2013
- [4] Leishman, J. G., Beddoes, T. S., „A semi-empirical model for dynamic stall“, Journal of the American Helicopter Society, Vol. 34, Number 3, 1-July-1989, pp 3-17
- [5] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman).
<http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/>. Last modified 30-May-2013