

TOP-VIMS

Tonalitäts-Prädiktion durch vibroakustische Messung und Simulation

Schlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger:

GE Wind Energy GmbH
Holsterfeld 16
48499 Salzbergen

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2022 bis 31.12.2024

Projektleiter: Maximilian Geers

Autor: Matthias Thulke

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autoren

Berlin 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	4
1.1	Stand von Wissenschaft und Technik	4
1.2	Aufgabenstellung	4
1.3	Voraussetzungen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
2	Eingehende Darstellung	5
2.1	AP1 – Simulation	5
2.2	AP2 – Messungen.....	6
2.3	AP3 – Model Update und AP4 - Abhilfemaßnahmen.....	7
2.4	Zahlenmäßiger Nachweis	7

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BEM	Boundary Element Methode
GE	GE Wind Energy GmbH
GVB	Gesamtvorhabenbeschreibung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MKS	Mehrkörpersimulation
MS	Meilenstein
Teil-AP	Teil-Arbeitspaket
TVB	Teilvorhabenbeschreibung
WEA	Windenergieanlage
Wölfel	Wölfel Engineering GmbH & Co. KG
ZF	ZF Friedrichshafen AG

1 Kurzdarstellung

1.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Die messtechnische Beschreibung und Modellierung von getriebebasierten Tonhaltigkeiten gehören im allgemeinen Maschinenbau - insbesondere im Automobilbau - seit Jahren zum Standardrüstzeug der Ingenieure. Aufgrund der enorm hohen Stückzahlen können sowohl auf Komponentenbasis (Getriebeprüfstand) als auch im Gesamtfahrzeug (Rollenprüfstand) umfangreiche Datenerfassungen unter Laborbedingungen durchgeführt werden, einschließlich Studien zur Produktstreuung. Die Laborbedingungen erlauben, bestimmte Betriebszustände wiederholt anzusteuern, um so Designänderungen gezielt zu beurteilen. Die Datenerfassung zeigt nur minimale Messunsicherheiten (0,1 dB), da Einflüsse von Umgebungsbedingungen im Labor erfolgreich ausgeschlossen werden können.

Solche Möglichkeiten sind für Ingenieure in der Windkraftbranche unerreichbar.

In der Windkraftbranche werden üblicherweise dreistellige Stückzahlen erreicht. Unter solchen Voraussetzungen können nur einzelne oder wenige Komponenten gleicher Bauart bzgl. ihrer Produktstreuung vermessen werden. Die vorhandenen Maschinenhaus- oder Triebstrangprüfstände erlauben zwar Messungen unter Laborbedingungen, ermöglichen aber nicht die Abbildung des vibroakustischen Gesamtsystems, das zwingend Turm und Blätter beinhalten muss. Daher kann das Gesamtsystem nur als Prototyp unter Feldbedingungen vermessen werden. Unter Feldbedingungen werden Betriebszustände vom Wind vorgegeben. Die Messunsicherheiten sind relativ hoch (mehrere dB), der Einfluss der äußeren Umgebungsbedingungen bei den räumlich sehr ausgedehnten Messfeldern erschwert die Wiederholbarkeit einer Messung und damit die Beurteilung einer Designänderung enorm.

→ Vibroakustische Mess- und Simulationsverfahren sind in der Windkraftbranche deutlich weniger ausgereift als in anderen Industriezweigen.

Der Kostendruck in der Windenergie führt bei Neuentwicklungen zu einer starken Zunahme der Nennleistungen. Im Zusammenhang mit logistischen Herausforderungen (Transport, Kranarbeiten) können aber die Dimensionen und Gewichte der Komponenten nicht gleichermaßen mitwachsen. Die hierdurch stetig zunehmende Leistungsdichte führt zwingend zu konzeptionellen Änderungen im Design von Getrieben, Triebstrang und Rahmenstrukturen.

→ Für neuentwickelte Produkte liegen zumeist keine vibroakustischen Erfahrungswerte vor.

1.2 Aufgabenstellung

Das Gesamtprojekt fokussiert sich auf (i) die messtechnische Beschreibung getriebebasierter Tonhaltigkeiten unter Einsatz erprobter und experimenteller Messmethoden. Dabei sollen sowohl die Anregungskräfte, die Übertragungspfade als auch die schallabstrahlenden Bauteile umfangreich betrachtet werden. Die gewonnenen Daten dienen (ii) des Aufbaus und der Validierung robuster und akkurater Simulationsmethoden zur Quantifizierung getriebebasierter Tonhaltigkeiten.

1.3 Voraussetzungen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als Hersteller von Onshore Windkraftanlagen hat GE offensichtlich langjährige Erfahrung im Design und Testen von Komponenten und Gesamtsystem-Prototypen. Dabei gehören auch

vibroakustische Auslegungen und Problemlösungen zum Tagesgeschäft. Im Rahmen der Produktentwicklung muss schnell und zielgerichtet mit Hilfe der vorhandenen Methoden vorgegangen werden.

Die Zusammenarbeit mit Wölfel und ZF bietet die Möglichkeit, die unterschiedlichen Stärken beider Partner miteinander zu verknüpfen.

So erfolgte von Seiten GE u.a. ein Austausch von Simulationsparametern mit Wölfel und eine intensive Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen an einem WEA-Prototyp. ZF unterstützte durch Erfahrung mit Getriebetests die Erstellung des Testplans und stellte wesentlichen Input für die Getriebemodellierung bereit. Wölfel übernahm mit detailliertem Wissen zu akustischen Tests das Design der durchgeführten Messungen.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der durchgeführte Arbeitsplan besteht aus zwei Schwerpunkten: Erstellung und Validierung von vibroakustischen Simulationsmodellen (AP1) und Durchführung einer umfangreichen Messkampagne (AP2).

AP1 - Simulation

Im ersten Arbeitsschritt werden vibroakustische Simulationsmodelle in MKS und BEM-Umgebungen aufgebaut. Während GE ihre eigenen Modelle erzeugt, werden außerdem Inputs für das generische Modell von Wölfel, wie z.B. FE-Modelle, bereitgestellt. Diese Erkenntnisse sind ein Input für das AP2 und werden genutzt, um einen detaillierten Testplan zu erstellen.

AP2 - Messungen

Basierend auf den Inputs aus AP1 wird ein detaillierter Testplan aufgestellt. GE wird die Bereitstellung des Prototyps, die nötige Organisation und wesentliche Unterstützung bei der Installation der Messtechnik übernehmen. Die Bereitstellung von Messtechnik und die Durchführung von Messungen werden hauptsächlich von Wölfel übernommen.

Die gewonnenen Messdaten sollen im Anschluss an dieses Projekt genutzt werden, um das Modell aus AP1 zu validieren.

2 Eingehende Darstellung

2.1 AP1 – Simulation

Die im AP beschriebene Simulationsumgebung wurde erstellt und mit vorhandenen Messungen validiert. Die dabei beobachtete Genauigkeit der Vorhersage von kritischen Tonalitäten gemäß IEC 61400-11 lag dabei im Bereich von $\sim 2\text{dB}$, was den Bedarf von Untersuchungen zur Verbesserung dieser Vorhersagen unterstreicht.

Besonders kritisch gesehen werden dabei die folgenden Annahmen:

- Als Komponente mit der höchsten Schallabstrahlung in die Umgebung wird das obere Turmsegment angenommen. Die Stärke der Abstrahlung wird maßgeblich vom Übertragungspfad bestimmt und im Fall des Turms von der Schnittstelle zum Grundrahmen. Diese Schnittstelle beinhaltet im Falle der ausgewählten Turbine zwei Pfade:

Über die Azimutbremsen und die Azimutlager. Im bestehenden Modell sind diese Komponenten zwar mit den verfügbaren Bauteilparametern versehen, das zugrundeliegende Modell verlangt jedoch nach mehr Parametern, die optimalerweise im Turbinensystem bestimmt werden.

Ein Ziel des AP2 wird daher die Vermessung des Übertragungsverhaltens Grundrahmen – Turmsegment sein, um es danach für die Validierung oder Bestimmung von kritischen Modellparametern zu verwenden.

- Die Annahme von hohen Schallabstrahlungen durch das oberste Turmsegment basiert auf Felderfahrungen, die an diesem stationären Bauteil recht einfach zu sammeln sind. Es gibt jedoch Hinweise, dass auch Rotorblätter einen signifikanten Einfluss auf hörbare Tonalitäten haben können. Die Quantifizierung an diesem rotierenden Teil ist jedoch ungleich schwieriger.

Als ein weiteres Ziel des AP2 ist daher die Vermessung von Oberflächenschwingungen am Blatt. Dabei soll geklärt werden, ob eine signifikante Schallabstrahlung besteht, die eine detailliertere Modellierung nötig macht. Die Messung soll dann dabei helfen kritische Modellparameter zu bestimmen.

Als Ergebnis des AP1 steht eine gekoppelte Simulationsumgebung aus einem MKS-Modell der ausgewählten WEA und BEM-Modell des oberen Turmsegments. Als Konsequenz aus der Modellvalidierung lassen sich die folgenden Ziele für das AP2 formulieren:

1. Vermessung der Schwingungsübertragung vom Grundrahmen zum Turm zum Zweck der genaueren Modellparametrierung.
2. Vermessung der Schwingungen an einem Rotorblatt, um einen möglichen Einfluss auf die Gesamtschallabstrahlung der Anlage und die Notwendigkeit einer Modellierung zu ermitteln.

2.2 AP2 – Messungen

Um die im AP1 definierten Ziele zu erreichen, wurde ein zweistufiger Messplan erstellt:

1. Schwingungsmessung bei Normalbetrieb der Anlage. Dabei befinden sich Sensoren an folgenden Positionen:
 - a. Am Übergang von Nabe zum Blatt (Blattlager)
 - b. Am Übergang vom Grundrahmen zum Turm (Azimutlager)
 - c. In der Gondel an Grundrahmen und Getriebe
 - d. Mikrofone innerhalb und außerhalb der WEA
2. Schwingungsmessung mit externer Anregung (Shaker). Dazu werden zwei Shaker am Getriebe angebracht und bei stillstehender WEA eine definierte Anregung eingebracht. Mit dieser Messung soll das Übertragungsverhalten vom Getriebe zu den Sensoren bei verschiedenen Frequenzen quantifiziert werden. Die folgenden Positionen werden vermessen:
 - a. Sensoren aus Messteil 1
 - b. Nach Sensorumbau werden die zugänglichen Teile des Blattes und das obere Turmsegment instrumentiert und vermessen.

Bei der Umsetzung kam GE die folgenden Aufgaben zu

- Bereitstellung des Prototyps. Da der Prototyp nicht alleinig für das vorgeschlagene Projekt genutzt wird, besteht ein Großteil der Bereitstellung in der Planung und Organisation von Mess- und Installationszeiten.

- Daneben unterstützt GE personell die Instrumentierung gemäß Testplan. Diese beinhaltet neben der Sensorinstallation auch die Installation der Shaker und die Unterstützung der Vermessung des Messteils 2.

Gemäß dem erstellten Testplan wurden alle Daten gesammelt und an GE übermittelt.

2.3 AP3 – Model Update und AP4 - Abhilfemaßnahmen

Die in der TVB beschriebenen AP3 und AP4 konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht bearbeitet werden. Dies ist in der wirtschaftlichen Situation von GE begründet, die sich im Vergleich zum Beginn des Projektes stark verändert hat. Im Zuge einer Restrukturierung wurde die Personalstärke der ausführenden Abteilung deutlich reduziert und Aufgaben dieses Projektes an neue Mitarbeiter übergeben. Da diese AP mit hohem personellem Aufwand bei GE einhergehen und dafür sehr spezifisches Wissen erforderlich ist, werden diese Arbeiten erst mit Verzögerung bearbeitet werden können.

2.4 Zahlenmäßiger Nachweis

Gemäß dem oben beschriebenen ausgeführten Arbeiten in AP1 und AP2 wurden folgende Kosten in Rechnung gestellt. Für AP3 und AP4 wurde selbstverständlich keine Erstattung angefragt.

Jahr	Quartal	Kosten, basierend auf den Förderrichtlinien				Geleistete Erstattung
		Personal	Zuordnung zu AP	Externe Dienstleistungen und Sachmittel	Zuordnung zu AP	Personal & Externe Dienstleistungen und Sachmittel
2022	Q4	4,731.01 €	AP1			1,892.40 €
2023	Q1	9,332.92 €				AP1, AP2
	Q2	8,812.42 €	3,524.97 €			
	Q3	22,428.61 €	8,971.44 €			
	Q4	31,294.67 €	22,505.30 €			
2024	Q1	29,655.68 €		13,093.57 €	17,099.70 €	
	Q2	29,083.29 €		22,335.44 €	20,567.49 €	
	Q3	19,548.60 €		20,000.00 €	15,819.44 €	
	Q4	29,235.28 €			11,694.11 €	
Summen		184,122.48 €		80,397.59 €		105,808.03 €

Figure 1: Zahlenmäßiger Nachweis

Zum Vergleich: In der TVB wurden für die AP1 und AP2 die Personalkosten mit 208000€ abgeschätzt und die Sachmittel für AP2 mit 155000€. Die für AP1 veranschlagten Sachmittel für die Simulationssoftware, mussten nicht in Rechnung gestellt werden.

2.5 Verwertung und voraussichtlicher Nutzen

Die während der Projektlaufzeit gesammelten Daten bilden die Grundlage für eine tiefere Validierung der erstellten Simulationsmodelle und sind für uns von großem Nutzen. Insbesondere erhoffen wir uns Erkenntnisse über die Orte signifikanter Schallabstrahlung und der Transferpfade der Vibrationen vom Getriebe zu diesen Orten. Eine genauere Vorhersage durch verbesserte Modelle betreffe Neuentwicklungen genauso wie bereits entwickelte Produkte, bei denen man durch Analyse und Behebung von Feldproblemen kommerzielle Risiken reduzieren kann.

Aufgrund der veränderten wirtschaftlichen Situation muss dieser Schritt jedoch zeitlich gestreckt werden und fällt damit außerhalb der vereinbarten Projektlaufzeit.