REPROJEKT GmbH
Wind power expertise and consultancy

Change Engineering GmbH

Auswirkungen von Rotorunwucht auf das Hauptlager

Kontakt:
Michael Melsheimer
michael.melsheimer@reprojekt.de
+49 173 645 6748

Werner Göbel
werner.goebel@change-engineering.com
+49 151 291 56354

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Wie entsteht eigentlich eine Rotorunwucht?

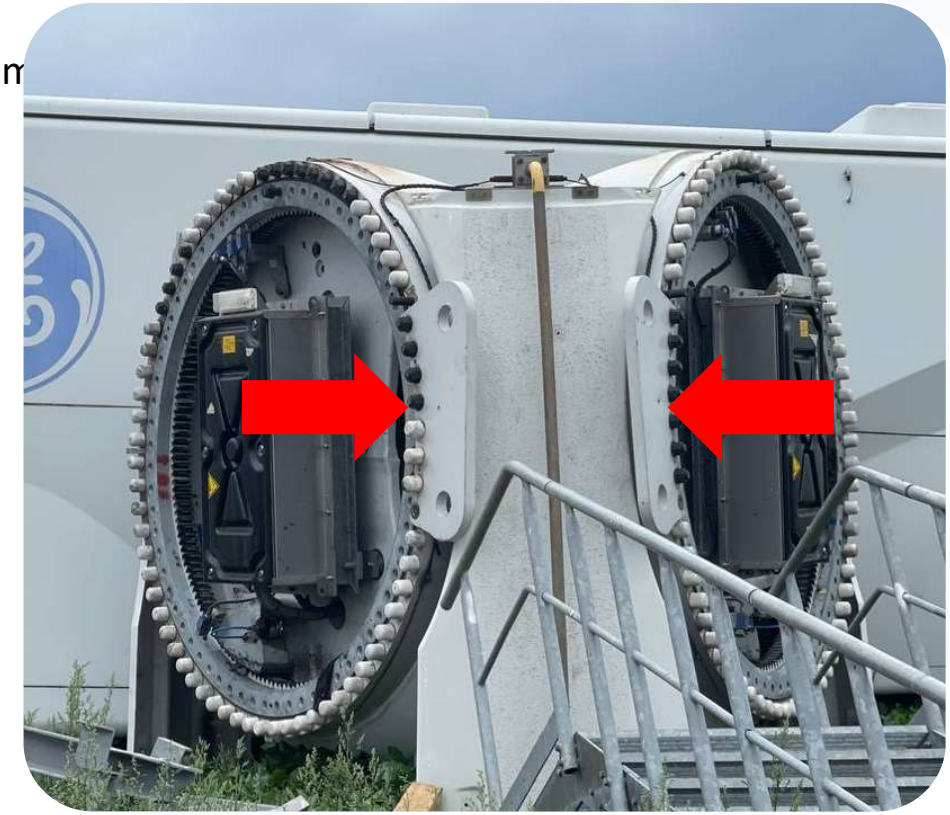
Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Bei der Konstruktion der Anlage
- Ungleiche Massenverteilung im Nabenbereich (Assymm
- Toleranzfestlegung

Beim Bau der Komponenten
- Rotorblätter mit ungleicher Massenverteilung
- Fehler an den Flanschen

Bei der Installation der Anlagen
- Vertauschen der Rotorblätter

Im Betrieb von Anlagen
- Reparaturen
- Änderung der Massenmomente über Zeit
- Eis (temporär)
- Wassereinlagerung (veränderlich)



REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Wie entsteht aerodynamische Unwucht?

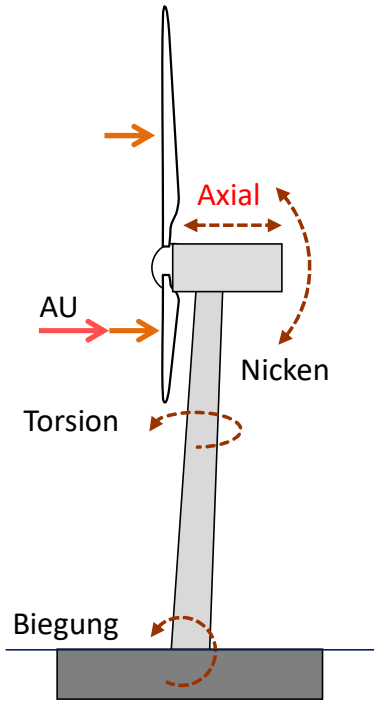
Bei der Konstruktion der Anlage
- Toleranzfestlegung

Beim Bau der Komponenten
- Rotorblätter aus unterschiedlichen Formen
- Fehler bei den Blattwinkelindikatoren

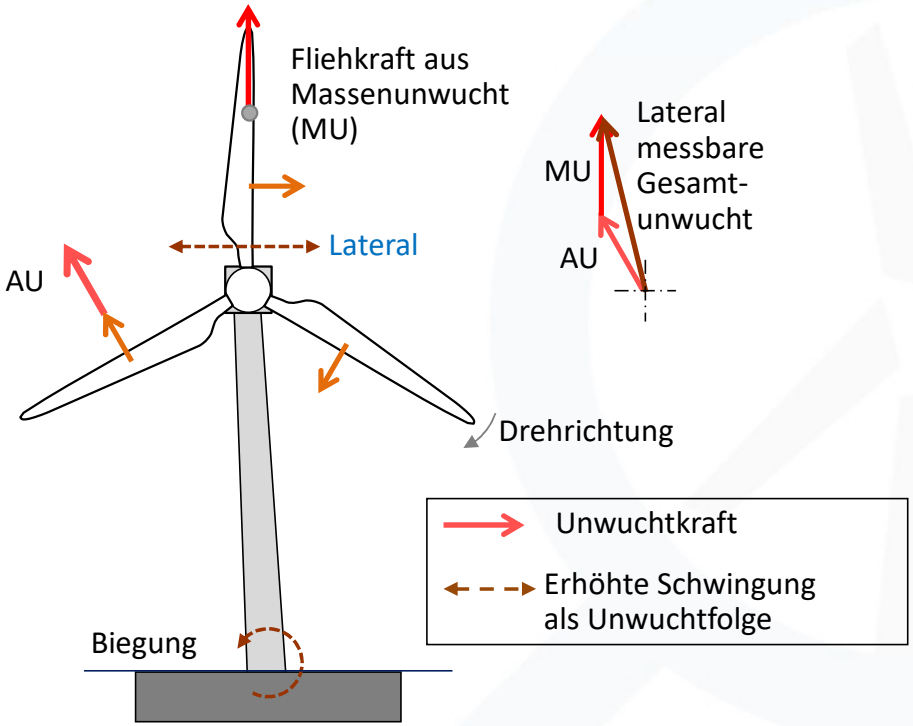
Bei der Installation der Anlagen
- Verwechslung der Rotorblätter
- Fehler beim einjustieren der Rotorblätter
- Tranportschäden

Im Betrieb von Anlagen
- Reparaturen
- Verlust von aerodynamischen Elementen
- Erosion

Schwingungen sind die Folge



Ungleiche Schubkräfte bewirken
axiale aerodynamische Unwucht (AU)



Ungleiche Umfangskräfte bewirken
laterale aerodynamische Unwucht (AU)

Quelle:BerlinWind Blattwinkel & Rotorunwuchtmessungen 2015

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Auswirkungen auf das Hauptlager

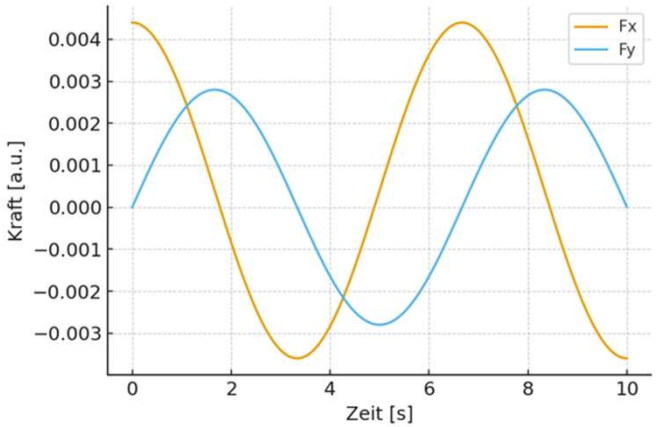
- **Erhöhte Radiallasten**
- **Dynamische Dauerbelastung**
- **Schwingungen im Lager**
- **Asymmetrische Belastung**
- **Variierende Momentenbelastung**
- **Umlaufende Schubschwingung**
- **Resonanzeffekte**
- **Axiallasten**
- **Yawing Effekte**

Welche Kräfte sieht das Hauptlager?

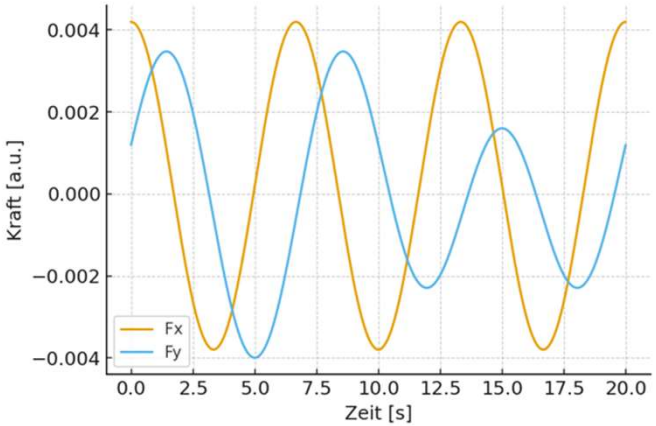
Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Schematische Darstellungen

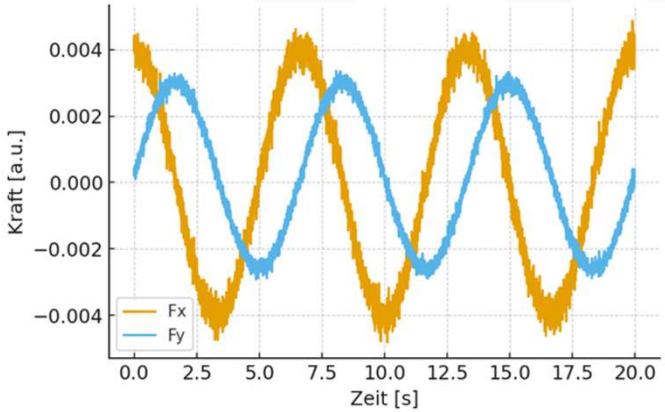
- Lagerkräfte teilen sich in Fx und Fy auf jeweils phasenverschoben
- Durch Fehlpitch wird eine Komponente kleiner
- Seitenwind, Massenunwucht und Blattschwingungen modulieren Schwingungen



Ein Blatt mit falschem Pitch



Überlage-rung von Seiten-wind



Verwobbe-lung durch Massen-unwucht und Blattschwin-gung

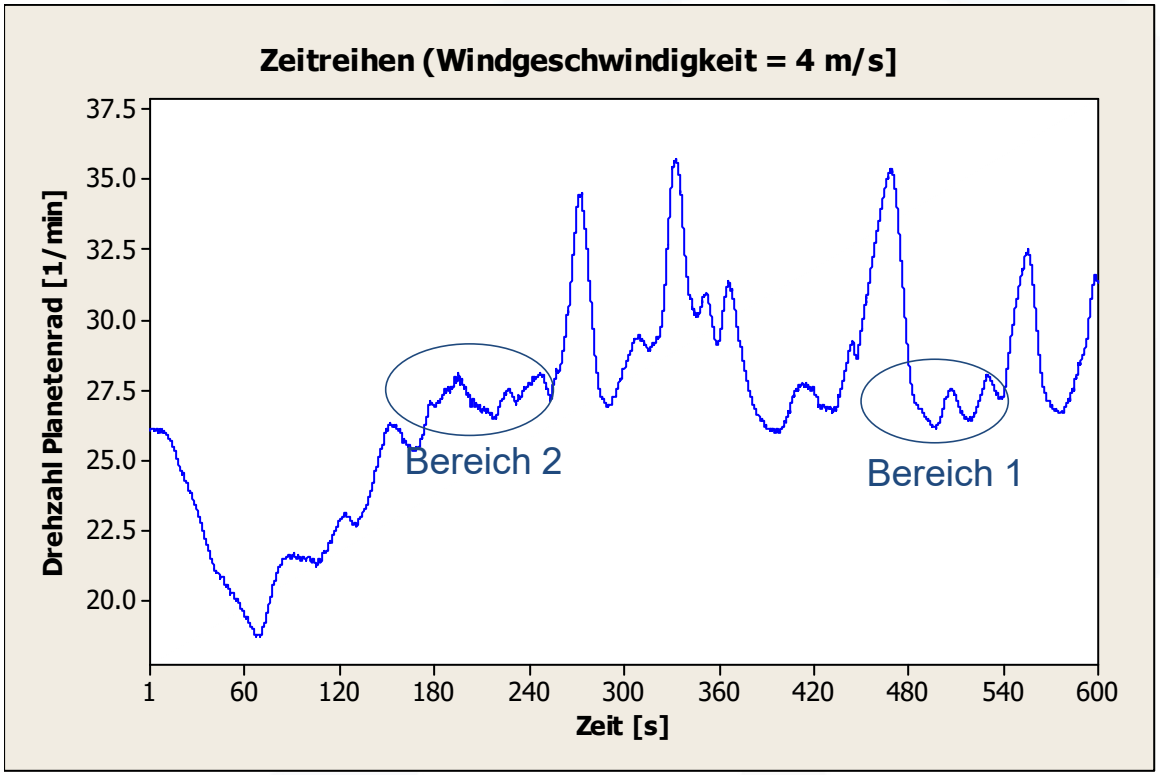
REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Welche Folgen hat das für die Drehzahl?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Die Folgen von „Verwobbelungen“ auf das Drehzahlverhalten im Antriebsstrang grafisch dargestellt am Beispiel der Berechnung für das Planetenrad einer 1,5 MW Windenergieanlage bei Niedrigwindverhältnissen mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 4 m/s

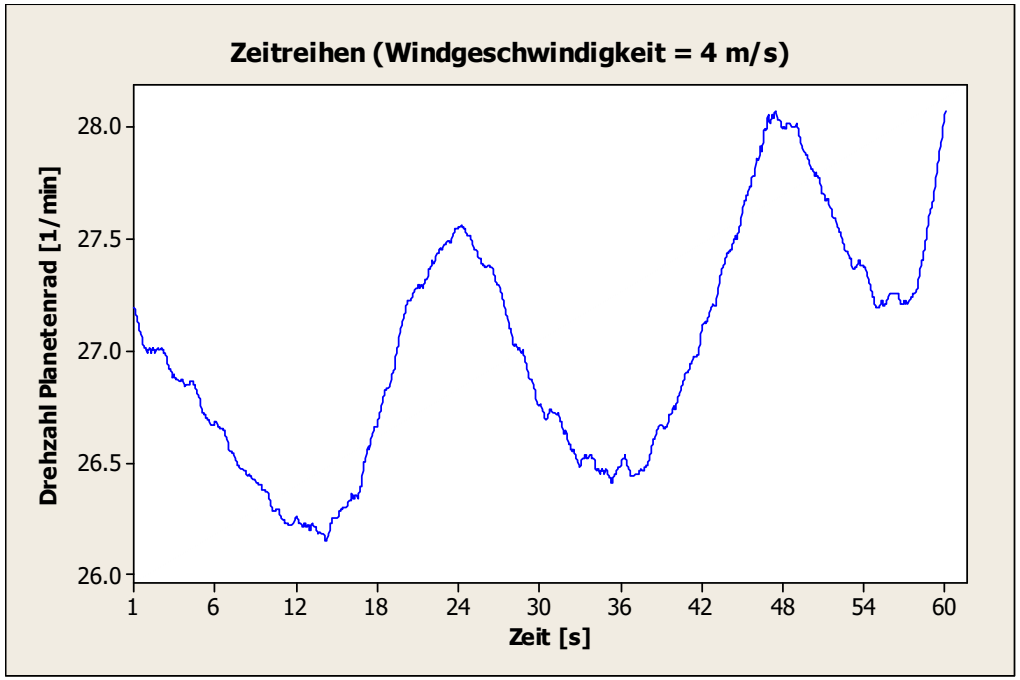


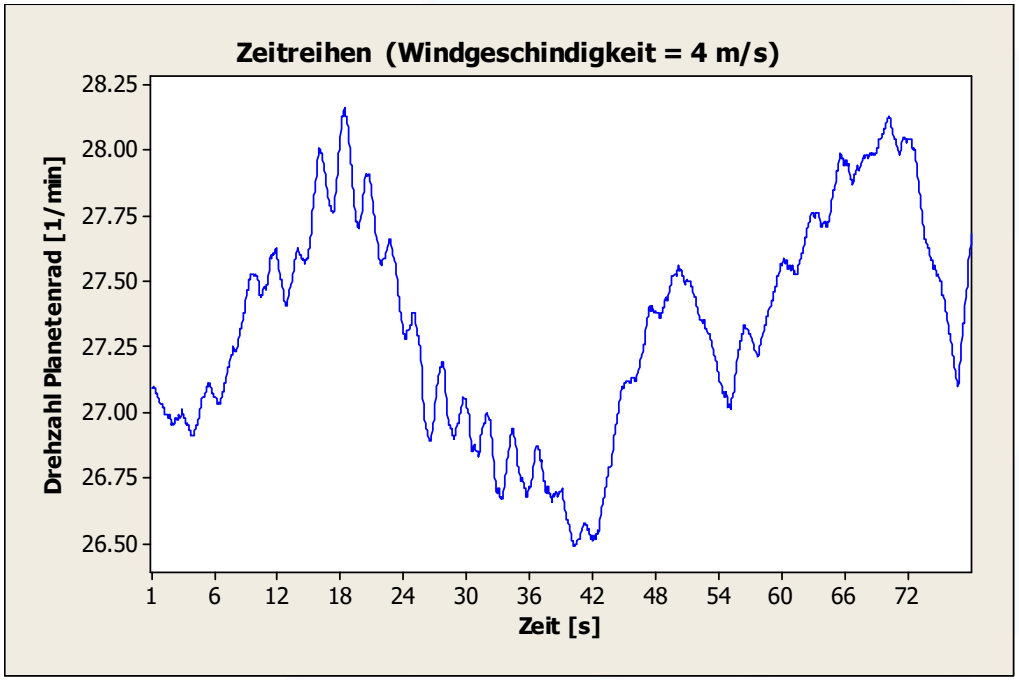
REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Wann treten „Verwobbelungen“ auf!

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE



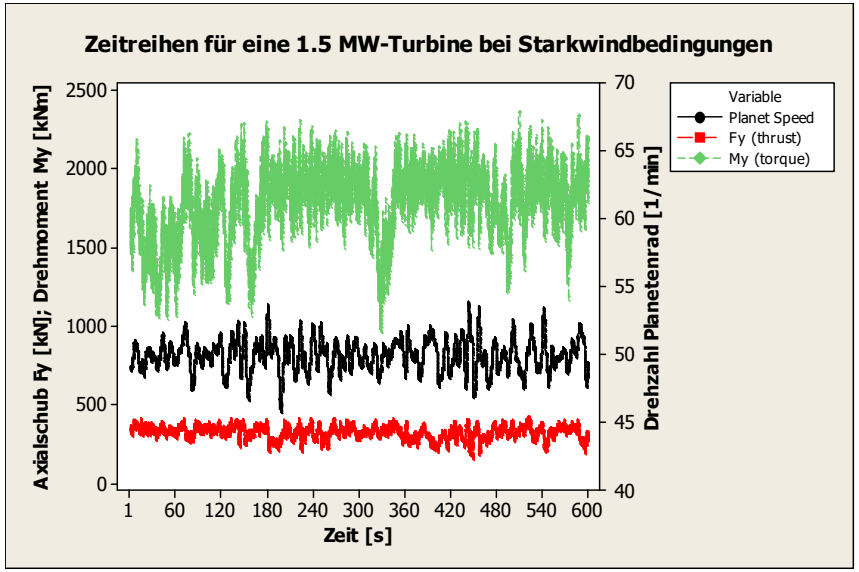


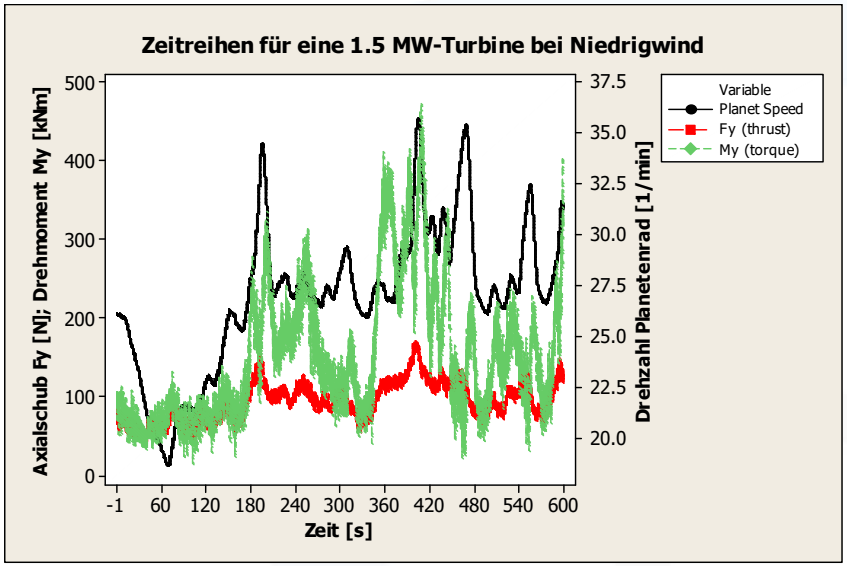
„Verwobbelungen“ treten im immer dann an den Stellen des Antriebsstrangs auf, an denen die Turbinen-schwingungen Resonanzen auslösen. Hier grafisch aufgezeigt anhand der Gegenüberstellung der beiden aus dem vorigen Grafen herausgezoomten Bereiche 1 ohne Resonanz (linker Graf) und 2 mit Resonanz (rechter Graf)

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

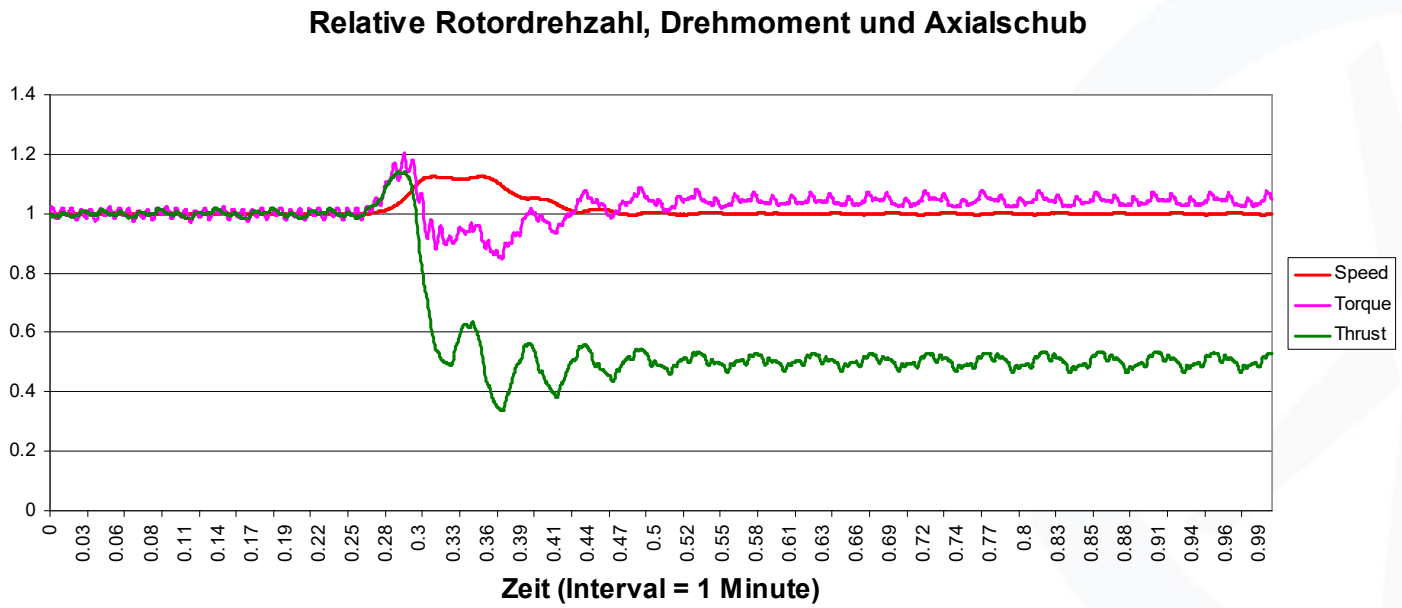
Was folgt daraus für die Belastungen?





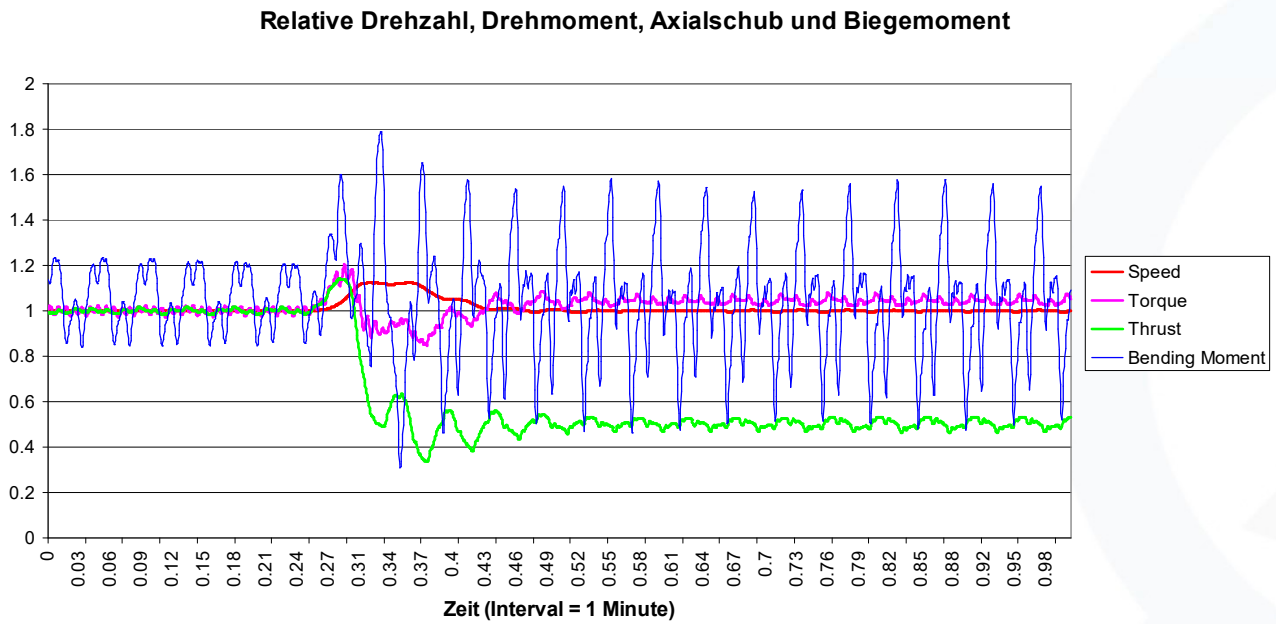
Beide Grafen zeigen für das vorherige Beispiel jetzt zusätzlich zur Planetendrehzahl noch den Zeitsynchronen Axialschub F_y und das Drehmoment M_y. Das Auftreten von Resonanzen und deren Ausprägung auf die verschiedenen Belastungsgrößen des Antriebsstranges hängt sehr stark von den Windverhältnissen ab. Entgegen der lange Zeit bei den Entwicklern verbreiteten Meinung ist die Wahrscheinlichkeit für deren Auftreten bei Starkwindverhältnissen (linker Graf) geringer als bei Niedrigwind (rechter Graf). Der Grund liegt in der relativ guten Korrelation aller 3 Belastungsgrößen bei Starkwind.

Was, wenn Sonderereignisse auftreten?



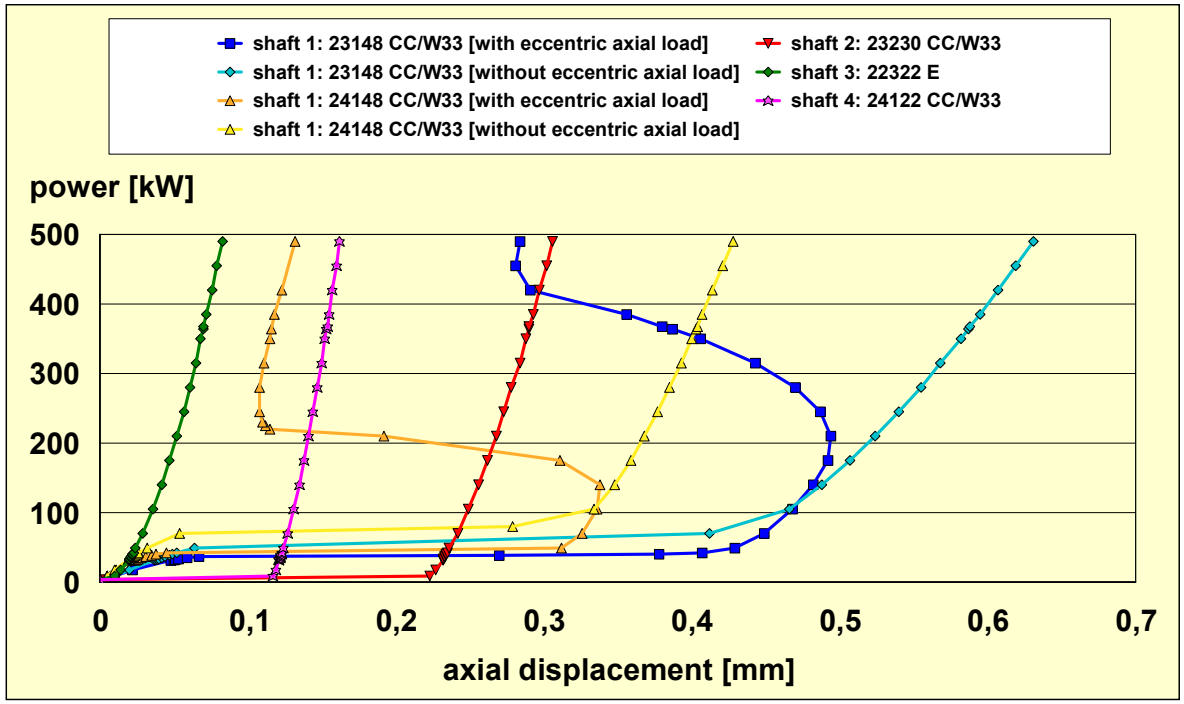
Wenn auf den Rotor im Fall der bereits erreichten Nennleistung Sonderereignisse, wie das des hier wiederum für das vorherige Beispiel berechneten DLC 1.9 der IEC 61400-1 / 1999 einwirken, dann reagiert die Anlagensteuerung mit einer Blattwinkel-Korrektur, welche das für die Ertrag entscheidende Drehmoment relativ schnell nach dem Anstieg auf das für den Generator erträgliche Niveau und damit auch die Drehzahl zurückregelt. Und ganz nebenbei geht auch der, das Hauptlager belastende Axialschub zurück.

Was, wenn Sondererereignisse auftreten?



In der um das vertikale Biegemoment erweiterten Betrachtung ergibt sich ein ganz anderes Bild. Hier steigt die Schwankung des stark von dem Blattdurchgang durch den Turmschatten beeinflusste vertikale Biegemoments von vorher rund +/- 20 % auf +/- 80 % an. Die Folge ist ein, sich aus der Nabenmitte periodisch nach oben verschiebender Angriffspunkt für den Axialschub.

Welche Folgen hat das?



Das sich aus dem Axialschub ergebende vertikale Biegemoment wirkt dem sich aus der Schwerkraft des Rotor ergebenden konstanten Biegemoments entgegen. Damit verändern sich gleichzeitig die Radialkräfte der Hauptlagerung periodisch.

Pendelrollenlager haben Bauartbedingt kleine Druckwinkel. Damit verbunden ist eine im Vergleich zu anderen Bauarten wesentlich größere Axialluft.

Das führt in dem, den Axialschub aufnehmenden Hauptlager im Leistungsbereich unterhalb der Nenn-leistung zu dem, in der linken Grafik beispielhaft dargestellten axialen Steifigkeitsverhalten.

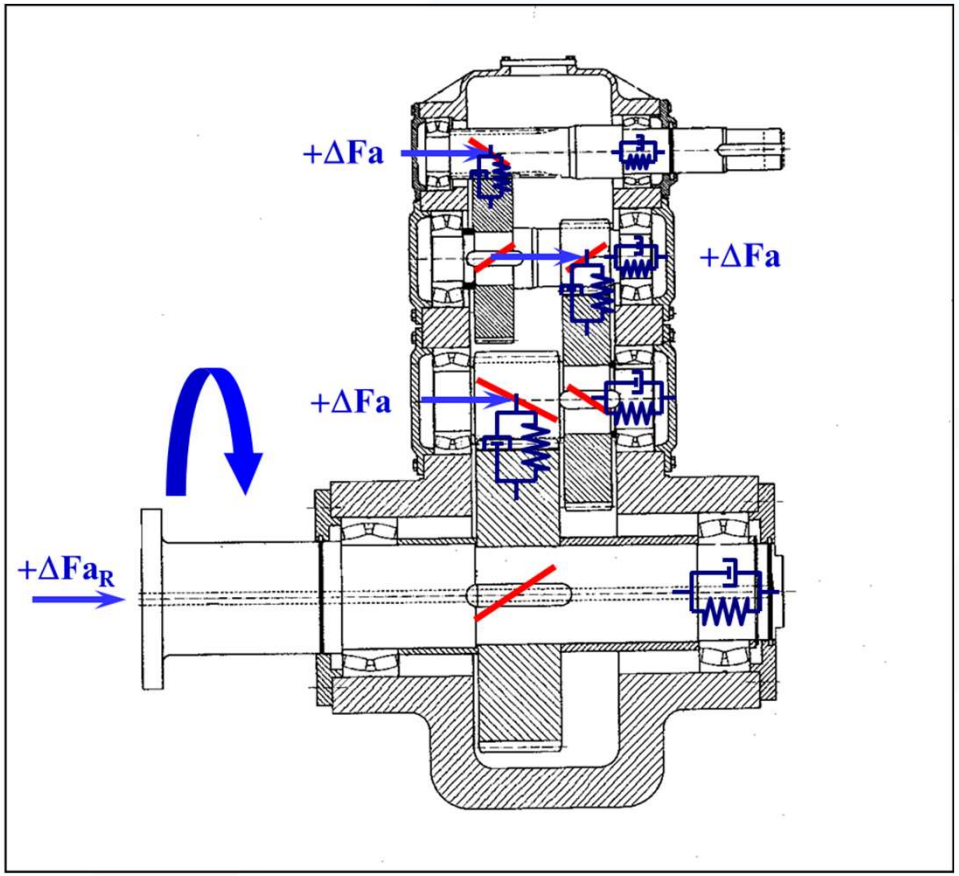
Das dargestellte Beispiel stammt aus einer alten 300 kW Turbine mit in das dreistufige Getriebe integrierter Rotorwelle.

Warum ist das so?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

In dem zuvor gezeigten Beispiel waren die Schrägungswinkel der Verzahnung wie hier rot dargestellt angeordnet.

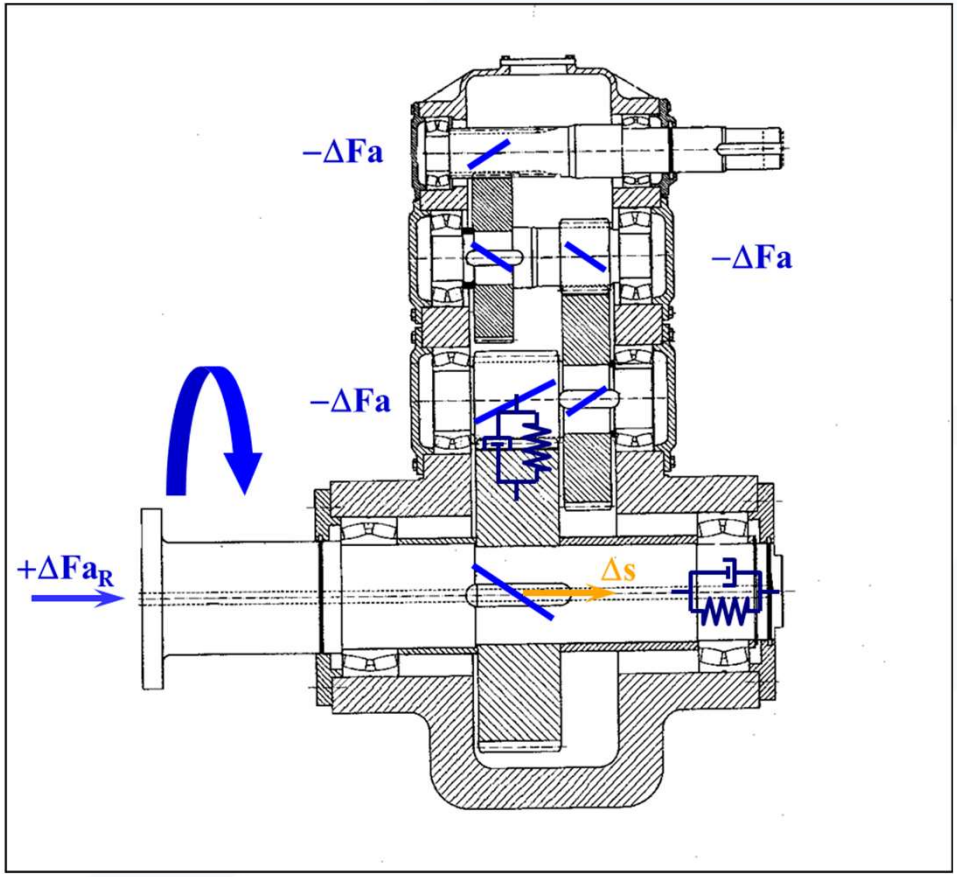
Das für alle an der Kraftübertragung beteiligten Lager und Verzahnungen überlagernd eingezeichneten Masse-Feder-Schaltbild verdeutlicht eine, von der Getriebeübersetzung unabhängige Weiterleitung des Axialschubs bis hin zu der Welle, die in der auf der vorherigen Folie enthaltenen Grafik die höchste axialen Steifigkeit aufweist.



Was wäre besser gewesen?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

- Mit einer Anordnung der Zahnschräge, wie es hier blau dargestellt ist, wird das Durch-schlagen der periodischen Axiallasterhöhung des Rotors auf die Nachbarwellen vermieten
- und durch die mit Δ s bezeichnete axiale Verschiebung gleichzeitig die Drehmomenten-Verspannung von der Eingangswelle bis zur Ausgangswelle des Getriebes reduziert.



REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

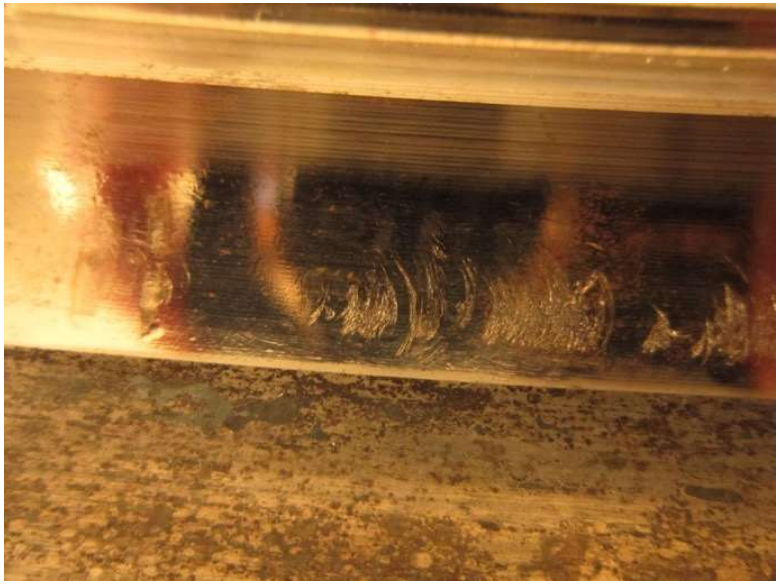
Zu welchen Schäden führt das?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

- Kommt dann bei den Blattlagern in den Bohrungen der Verschraubungen auch noch Korrosion dazu, dann sind Ringbrüche wie hier im linken Bild zu sehen, vorprogrammiert.
- Wie das rechte Bild eines als Hauptlager eingesetzten Zylinderrollenlagers zeigt, sind die Folgen der zuvor am Beispiel des Pendelrollenlagers aufgezeigten periodischen Axialverschiebungen im Worst Case Fall die gleichen. Das gilt unabhängig von der eingesetzten Rollenlagerbauart.

Zu welchen Schäden führt das?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE



Bei Blattlagern führt das im Fall einer unzureichenden Schmierung zu dem in beiden Bildern zu sehenden Reibverschleiß. Auslöser ist das sich aufgrund der Rotordrehung an der Blattwurzel periodisch ändernde Kippmoment. Infolge dessen wandert der Kugelkontakt periodisch in Richtung Laufbahnschulter und wieder zurück, was zu dem im Bild aufgerauten hellen Bereichen führt.

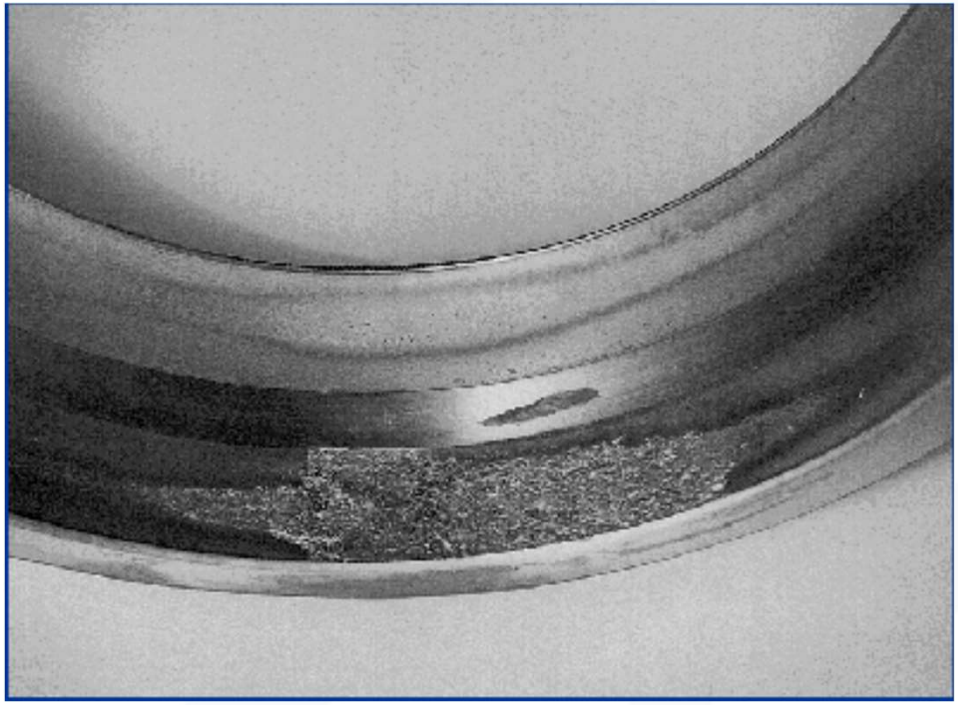
Zu welchen Schäden führt das?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Im Hauptlager führt das im Fall einer unzureichenden Schmierung zu dem, im nebenstehenden Bild am Beispiel der Laufbahn des Außenrings eines Pendelrollenlagers gezeigten Schaden.

Die obere Laufbahn zeigt die vom Axialschub entlastete rotorseitige Laufbahn. An den hellen Stellen ist der Beginn des Verschleißes zu erkennen.

Die untere Laufbahn zeigt die den Axialschub aufnehmende generatorseitige Laufbahn. Dort ist der Verschleiß bereits soweit fortgeschritten, dass die ursprüngliche logarithmische Kontaktgeometrie verloren ist und an den Rollenenden Kantenspannungen auftreten, die dann zu der bereits eingetretenen vorzeitigen Ermüdung führen.



Wie kann man Rotorunwuchten erkennen?

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Durch visuelle Inspektion kaum erkennbar !

- **Toleranzfestlegung**: Blattwinkelindikatoren und Steuerungsparameter prüfen.
- **Schwingungsmessungen** aus Auswirkung ist relativ gut feststellbar
  - Mittels Bescheunigungsmessung in der Gondel
  - Turm-Gondel-Schwingungen per Video
  - Rundlauf der Anlage im Betrieb oder manuelles drehen im Stillstand
- **Blattwinkelmessungen**
  - Optisch
  - Laser
  - Tower-clearance

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Blattwinkel + Rotorunwucht

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Ziele eines Blattwinkel- & Rotorunwucht-Gutachtens

- **Erkennung von Blattwinkelabweichungen**
  durch Fehler in der Herstellung, Montage und Wartung
- **Feststellung und Bewertung von Rotorunwucht**
  verursacht durch Massenunterschiede, aerodynamische Asymmetrien
- **Reduzierung von Schwingungen**
  Schutz für Lager, Getriebe, Turm und Fundament
- **Schallreduzierung**
  durch optimierte Blattwinkel und gleichmäßige Umströmung
- **Optimierung der Energieausbeute**
  durch verbesserte Aerodynamik und Lastverteilung
- **Erhöhung der Betriebssicherheit**
  frühzeitige Erkennung kritischer dynamischer Belastungen
- **Einsatz nach Reparatur oder Blattwechsel**
  zur Wiederherstellung des optimalen Rotorverhaltens

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Getriebe und Hauptlager Begutachtung

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Endoskopie – Schwingungsmessung - Schmierstoffproben

Ziel:
- Früherkennung von Schäden (Getriebe / Hauptlager)
- Bewertung von Betriebssicherheit & Restlebensdauer
- Grundlage für Instandhaltung, Austausch oder Versicherung

Inhalte:
- Schwingungsmessung: Analyse von Lager- & Zahnradverhalten
- Videoendoskopie: Sichtprüfung von Verzahnung & Lagern
- Schmierstoffanalyse: Wasser, Partikel, Verschleißindikatoren

Ergebnis:
- Schadensortung, Ausfallwahrscheinlichkeit
- Schadensbewertung mit Fotodokumentation
- Klassifikation nach Kritikalität
- Handlungsempfehlungen (z. B. Weiterbetrieb, Reparatur)

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH

Mitglied im Sachverständigen-beirat des BWE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Wenn Sie Fragen haben oder an einer Zusammenarbeit interessiert sind, **nehmen Sie gerne Kontakt mit mir auf** – ich freue mich auf Ihre Nachricht.

Kontakt:
Reprojekt GmbH
Michael Melsheimer
michael.melsheimer@reprojekt.de

+49 173 645 6748

Bültenstr. 5a
31515 Wunstorf
www.reprojekt.de

REPROJEKT GmbH

Change Engineering GmbH