

Offshore-Rotorvermessung – Blattwinkelfehler und Unwucht samt ihrer Folgekosten sind vermeidbar



Michael Melsheimer (Geschäftsführer)
BerlinWind GmbH, Bundesallee 67, 12161 Berlin, Germany

www.berlinwind.com

Spreewind-Offshoretage, Forum 1, 17.+18. März 2016 in Berlin

- **Unternehmensprofil**
- **WEA-Normen und -Richtlinien fordern Blattwinkelfehler- und Unwucht-Grenzwerte bei Windenergieanlagen (WEA)**
- Unwuchtarten und Ursachen
- Häufigkeit von Unwucht bei Onshore-WEA
- Unwucht-Folgen: Leistungsabweichung, Ertragsausfall, Komponentenschäden, Lebensdauerverkürzung
- Qualitätskriterien für das Betriebsauswuchten von WEA
- Geeignete schrittweise Auswuchtprozedur
- Geeignete Messverfahren
- Positive Ergebnisse des erfolgreichen Auswuchtens
- Fazit

- 2009 gegründetes, **unabhängiges Ingenieurbüro**, Teil der Holding *Corporate Energies Group*
- Mitglied u.a. **BWE-Sachverständigenrat** und AK „WEA-Weiterbetrieb“ sowie AK zur **Richtlinie VDI-3834** „Schwingungsbeurteilung bei WEA“
- **Weltweite Windenergie-Erfahrung seit über 16 Jahren** in
 - **Rotorauswuchten**
1100+ WEA, 90+ WEA-Typen von 20+ Herstellern: 600W...5+ MW
 - **Lastmesskampagnen bis zu 3 Jahre und über 120 Sensoren**
 - **Consulting, Schadensanalysen, WEA-Performance-Optimierung**
 - **Messtechnik-Lösungen für Spezialmessungen an WEA und Rotoren**
 - BalancingBox zur Rotorunwucht-Prüfung und zum Auswuchten
 - Photometrische und Distanz-Laser basierte Blattwinkelmessung
 - Drei-Ebenen-Auswuchten des WEA-Triebstrangs
 - Video-basierte Schwingungsmessung
 - Kompaktes Lastmessungssystem für Weiterbetriebs-Analyse

Warum WEA auswuchten? Für sicheren Betrieb gemäß Normen und Richtlinien

- **Sicherer WEA-Entwurf nach DIN EN 61400-1, DIBt-Richtlinie und DNV-GL-Richtlinie**
Bei Betriebsfestigkeitsanalyse Grenzwerte für Blattwinkelfehlern und Massenunwucht definieren und einberechnen -> zulässige Betriebslasten der Gesamt-Nutzungsdauer
- **DIN ISO 21940-13:2012: Kriterien und Sicherheitshinweise für das Betriebsauswuchten mittlerer und großer Rotoren (Kraftwerksturbinen, etc.)**
Betriebsauswuchten einzig sinnvolle Methode, wenn ...
 - finale Rotormontage vor Ort und
 - Unwuchtveränderung im Betrieb
(Verschleiss, Erosion, Verlust von Teilen, signifikante Reparatur, etc.)

→ **Trifft auf WEA zu!**

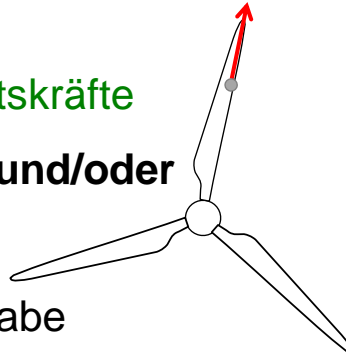
- **VDI-Richtlinie 3834, Blatt 1, 2015: Schwingungs-Beurteilung von WEA mit Getriebe: Neuer Anhang Informationen zum Auswuchten des Hauptrotors am Aufstellungsort**
Sammlung der Branchenerfahrungen sowie Bezug DIN ISO 21940-13

- Unternehmensprofil
- WEA-Normen und -Richtlinien fordern Blattwinkelfehler- und Unwucht-Grenzwerte bei Windenergieanlagen (WEA)
- **Unwuchtarten und Ursachen**
- **Häufigkeit von Unwucht bei Onshore-WEA – unabhängige Statistik**
- **Unwucht-Folgen: Leistungsabweichung, Ertragsausfall, Komponentenschäden, Lebensdauerverkürzung**
- Qualitätskriterien für das Betriebsauswuchten von WEA
- Geeignete schrittweise Auswuchtprozedur
- Geeignete Messverfahren
- Typische Ergebnisse bei erfolgreichem Auswuchten
- Fazit

Massenunwucht (MU)

Unsymmetrische Massenträgheitskräfte

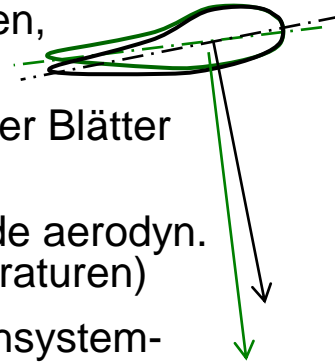
- **Unterschiede in Blattmassen und/oder Massenverteilung**
- Geometrieabweichungen und Winkelfehler von Blättern und Nabe
- Rotor-Exzentrizität
- Verbogene Welle
- Wassereinlagerung, Wasseraufnahme im Verbundmaterial
- Erosion und Eis
- Schäden mit Materialverlust
- Größere Reparaturen für Behebung von Blattmängeln
- Massenverlagerung durch abgelöste Teile, usw.



Aerodynamische Unwucht (AU)

unsymmetrische aerodynamische
...am drehenden Rotor

- **Blattwinkelfehler:** relativ, absolut (Blattmarke, Einbau, -messen, Parametrierung)
- Verwindungsunterschiede der Blätter (ggf. wegen Reparaturen)
- Profilabweichungen, fehlende aerodyn. Elements (ggf. wegen Reparaturen)
- Parametrierungsfehler, Pitchsystem-Defekte
- Schräganströmung und Gondel-Fehlausrichtung
- Erosion, Eis, Blattschäden
- Turbulentes Windfeld, d.h. ungleichmäßige Anströmung
- Nachlauf mit Teil-Abschattung, usw.

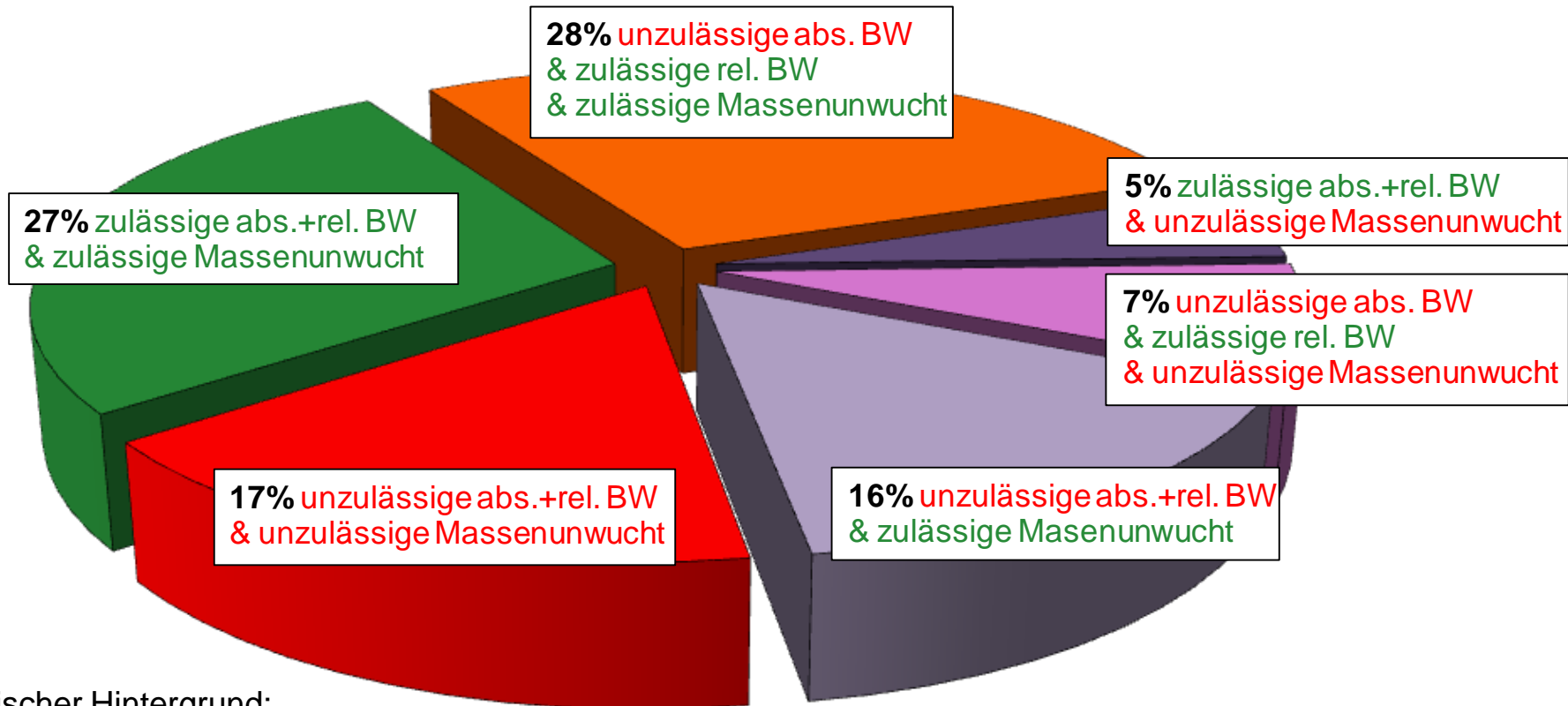


Ursachen-Kategorien möglich:

- Temporär, d.h. zuerst beseitigen,
- **Ursachengerecht behebbar**, d.h. beseitigen
- Kompensierbar, nicht ursachengerecht behebbar
- Weder behebbar noch voll kompensierbar (WEA- Betriebsbereich)

Unabhängige Unwucht-Statistik Onshore-WEA: Blattwinkelfehler und / oder Massenunwucht an mehr als 70% aller WEA

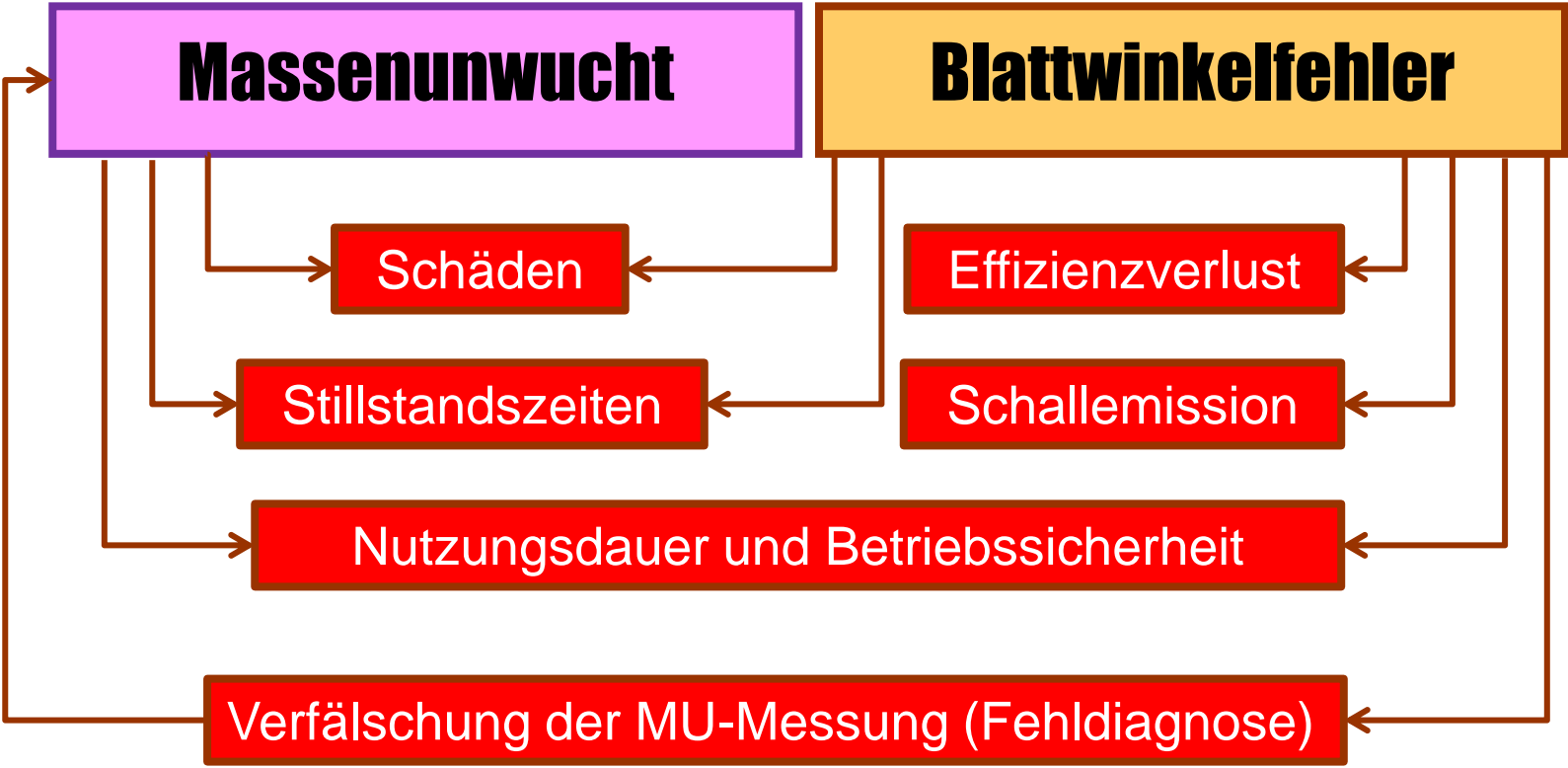
Intolerable RU bei... 73%
 BW: Blattwinkelfehler...68%
 MU: Massenunwucht...29%



Statistischer Hintergrund:

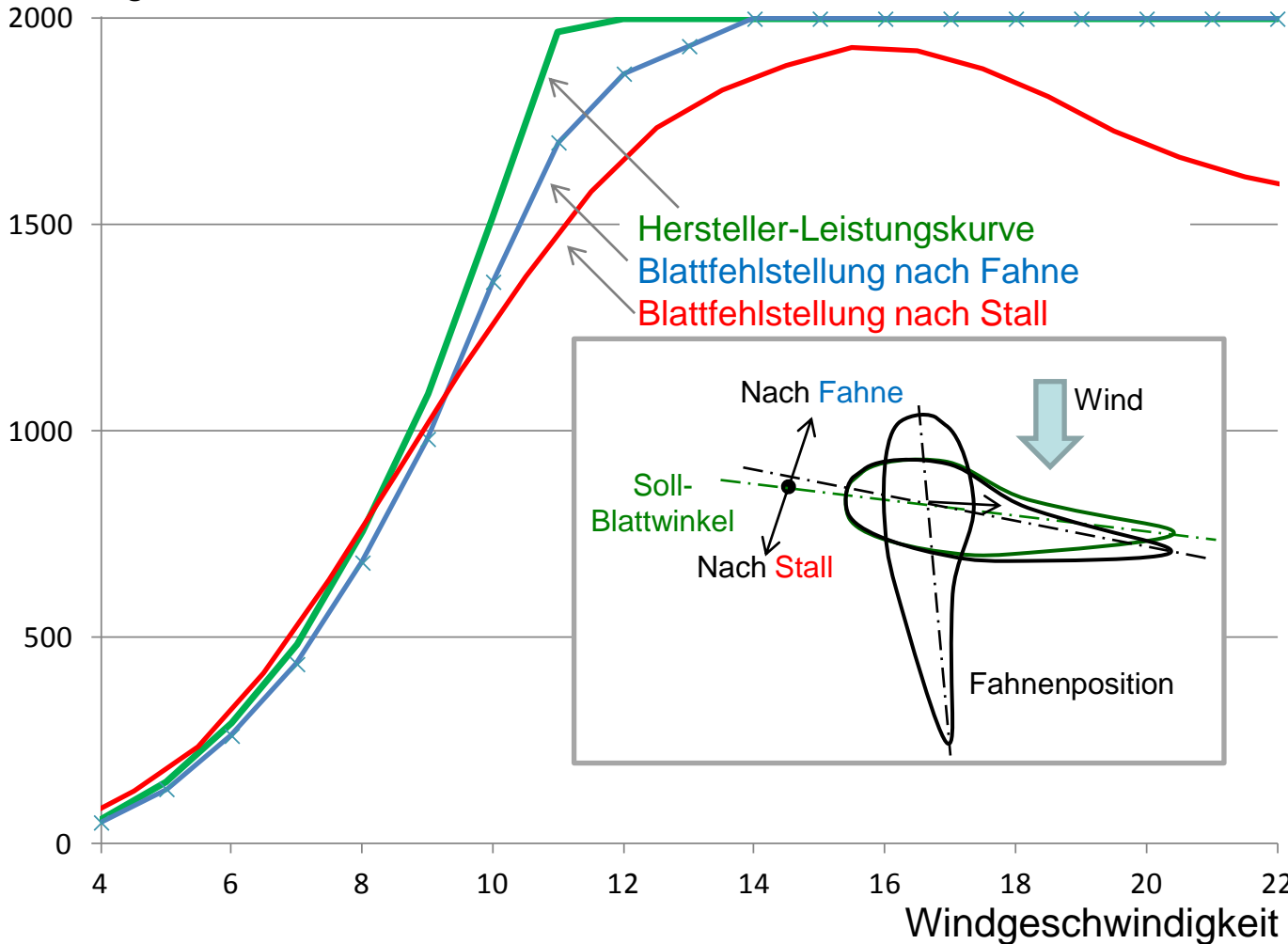
- Verdachtslose Messungen relativer Blattwinkel und Massenunwucht bei 239 WEA
- Kombination mit Statistik von Messung absoluter Blattwinkel an 383 WEA

Vielfältige Folgen von Blattwinkelfehlern und Massenunwucht



Leistungskurven-Abweichungen wegen Blattwinkelfehlern

Leistung in kW



WEA-Auslegung:
Festlegung des optimalen Soll-Blattwinkel für gewünschte Leistungskurve

Schlechtere Leistungskurve
= Weniger Ertrag bei gleichem Wind

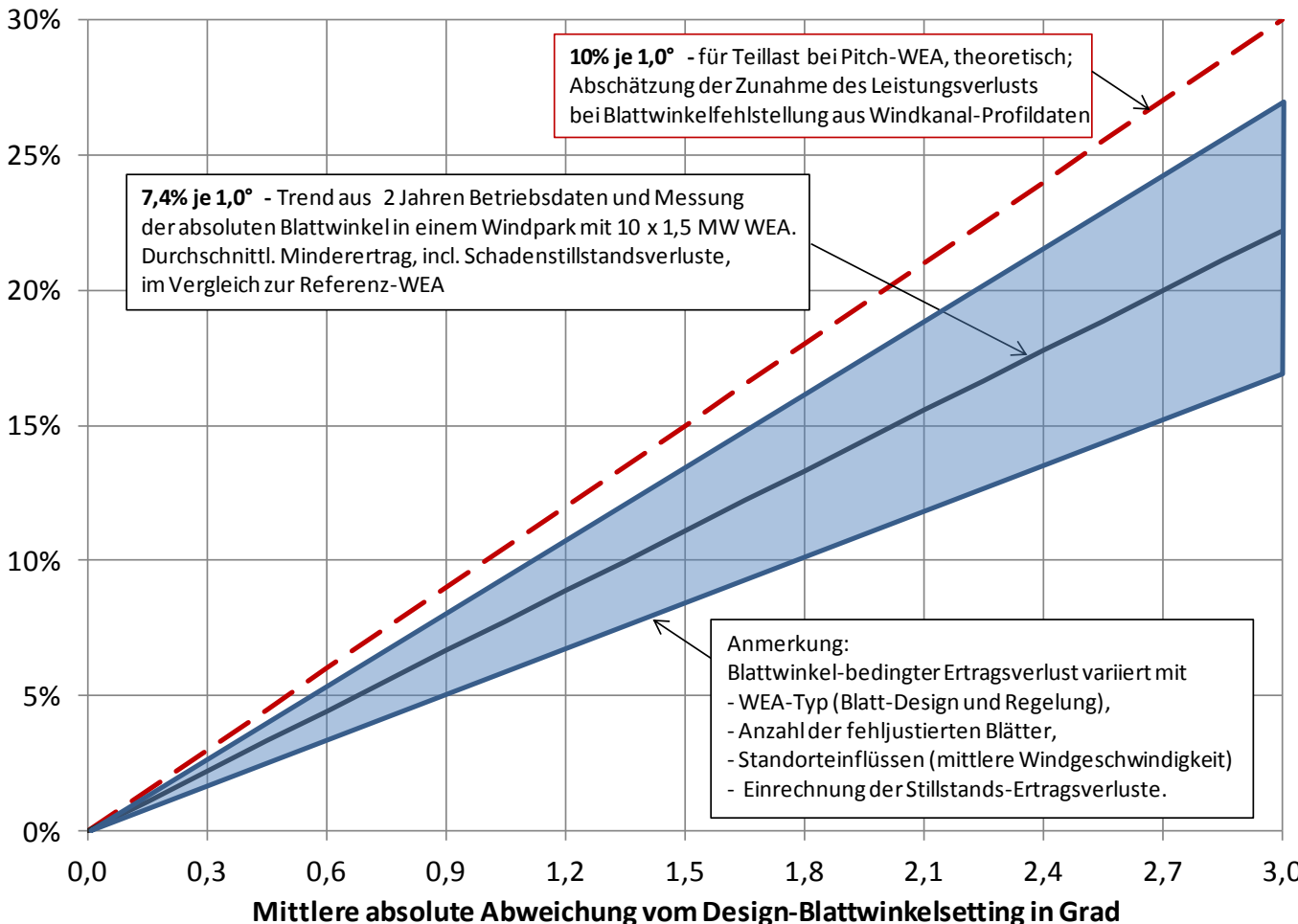
Justage „nach Stall“:
ggf. leichte Leistungserhöhung aber signifikant erhöhte Schwingungen, d.h. beschleunigte Materialermüdung bei Pitch-WEA

Für objektive Vergleiche sorgfältige Datenaufbereitung notwendig

Ertragsreduktion wegen Blattwinkelfehlern



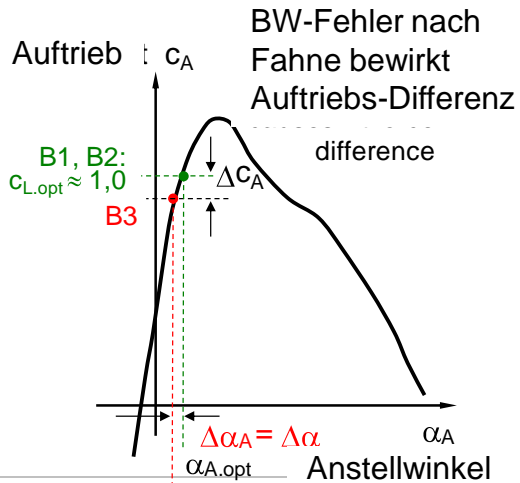
Ertrags- bzw. Produktionsverlust in %



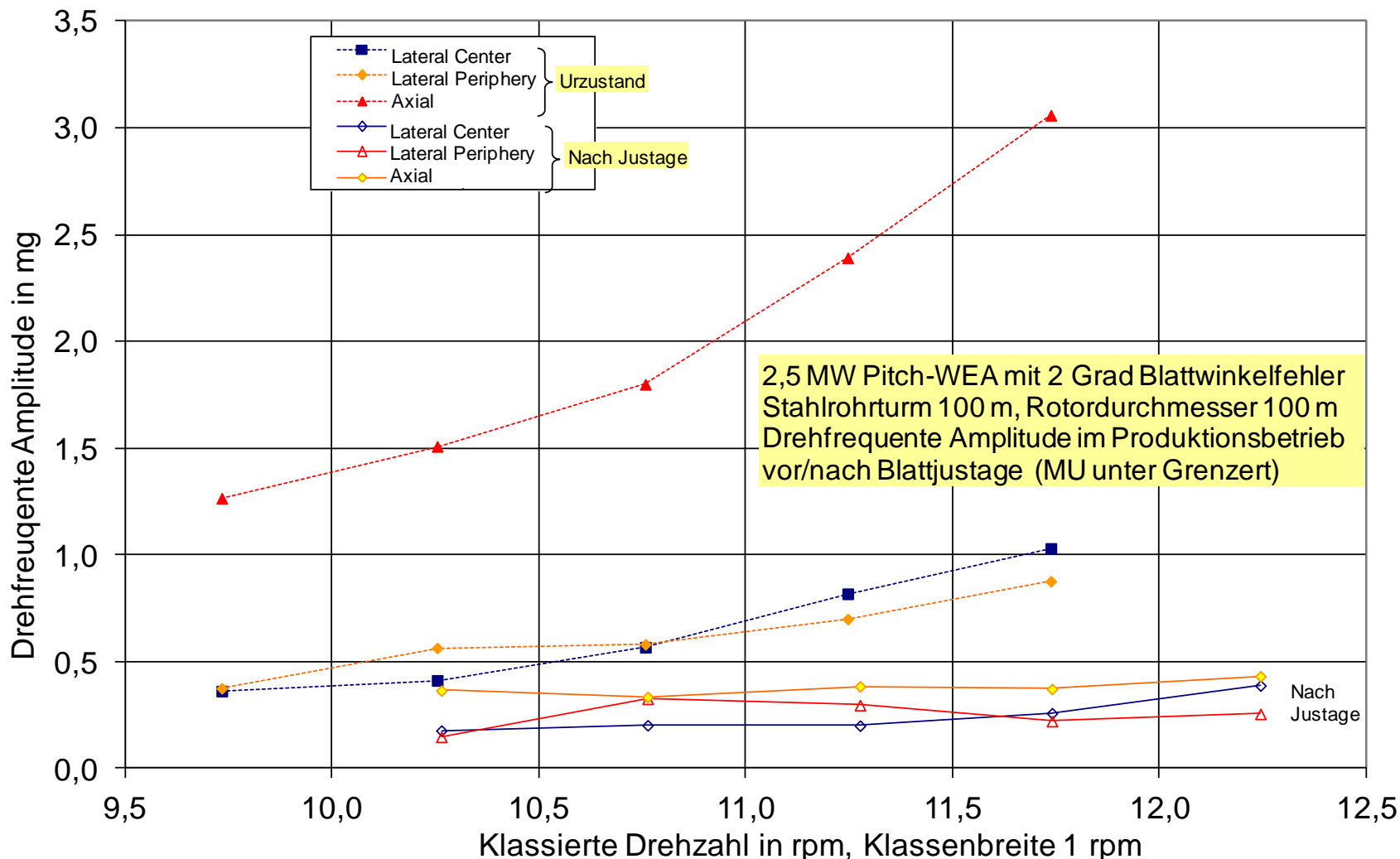
„-10% je 1,0°“ kommt aus Aerodynamik-Basics der ebenen Platte, siehe z.B. Gasch/Twele (Hrsg.): „Windkraftanlagen“

Realer Ertragsverlust streut wegen weiterer WEA- und Site-Einflussparameter

Selbst BW innerhalb der Grenzen schon Ertrags- und Lastverbesserung möglich.



Erhöhte Turm-Gondel-Betriebsschwingungen wegen Blattwinkelfehlern



Vermehrte Schäden wegen Blattwinkelfehlern und Massenunwucht

Erhöhung von...

- Schwingungsamplituden
- Ermüdungslasten
- Lebensdauerverbrauch
- O&M Kosten (Schäden und Stillstandszeiten)



Bild 1



Bild 2



Bild 3



Bild 4

- (1) Hinterkantenrisse
- (2) Gebrochene Blätter durch Rotorunwucht und Stall-induzierten Vibrationen
- (3) Verschlossene Azimutbremsen
- (4) Gebrochener Maschinenträger

Folgeschäden und WEA-Probleme als Unwucht-Indikatoren nutzbar



- **Blattschäden**, -risse
- **Schweissnahtrisse**, Maschinenträger, Gondelkran usw.
- **Triebstrangschäden** bzw. schnell wiederholte gleichartige Schäden nach Komponententausch
- **Erhöhter Verschleiß und wiederholte gleichartige Schäden** an gleichen Komponenten nach Austausch, ggf. vorzeitiger **Großkomponententausch** (Blatt, -lager, Hauptlager, Getriebe, Geno), auch **Pitchsystem**/-getriebemotoren/-hydraulik und **Windnachführung** (Azimut-bremsen, -Getriebemotoren incl. zugehöriger Verzahnungen)
- Lose gerüttelte **Schaltschränke** und Verschraubungen (entsprechende Elektronikschäden)
- **Struktur- und Fundamentschäden**, erhöhte *drehfrequente* Vibrationen im Struktur-CMS
- **Häufigere WEA-Abschaltungen** wegen Schwingungen, aber auch häufige Umrichter-Abschaltungen mit ungeklärter Ursache
- **Ausfälle von (Leistungs-)Elektronik** v.a. in der Gondel
- Deutliche **Ertrags-/ LK-Unterschiede** bei gleichem Betriebsdaten-Auswertzeitraum
- Sehr hohe Massenunwucht: Bei Schwachwind immer gleiches Blatt unten, verzögerter Anlauf
- **Ursachenidentifikation und -beseitigung (Unwucht) statt Symptombehandlung (Folgeproblem) ratsam**

- Unternehmensprofil
- WEA-Normen und -Richtlinien fordern Blattwinkelfehler- und Unwucht-Grenzwerte bei Windenergieanlagen (WEA)
- Unwuchtarten und Ursachen
- Häufigkeit von Unwucht bei Onshore-WEA – unabhängige Statistik
- Unwucht-Folgen: Leistungsabweichung, Ertragsausfall, Komponentenschäden, Lebensdauerverkürzung
- **Qualitätskriterien für das Betriebsauswuchten von WEA**
- Geeignete schrittweise Auswuchtprozedur
- Geeignete Messverfahren
- Typische Ergebnisse bei erfolgreichem Auswuchten
- Fazit

Technische Qualitätskriterien für Offshore-WEA-Auswuchten (nach DIN ISO 21940)

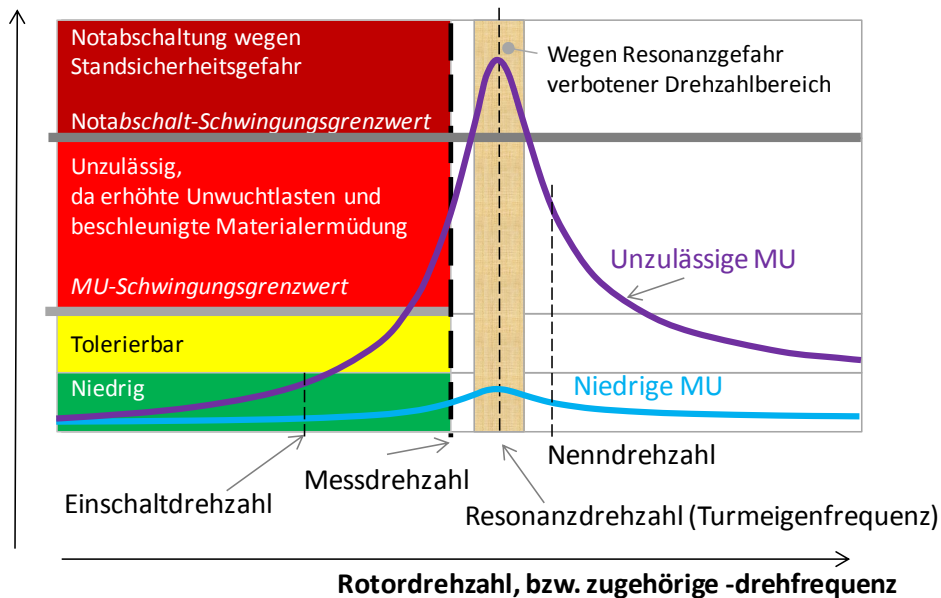
- **Dynamisches Vor-Ort-Auswuchten möglich und Arbeitssicherheit gegeben**
 - * Erprobte Auswucht-Prozedur, Onshore > 10 Jahre, Offshore > 5 Jahre
 - * RAMS vorhanden, Testmassenbefestigung möglich
- **Geeignete Messsysteme**
 - * Schwingungsmesssysteme für geringe Frequenzen und Messamplituden
 - * Optische Blattwinkel-Messsysteme hoher Auflösung
- **Sichere Identifikation anderer verfälschender Schwingungsursachen**
 - * Anwendung geeigneter Messtechnik und Anzahl an Sensoren
 - * Qualitätssicherung durch mehrere Schwingungs-Indikatoren und Prüfläufe
- **Eindeutige Ergebnis trotz schwankenden Messbedingungen (Wind, Drehzahl)**
 - * Definierte Messbedingungen und Abläufe für Erhöhung der Reproduzierbarkeit
 - * Statistisch sichere Messdauer
 - * Geeignete Auswerteverfahren (Ordnungsanalyse!)
 - * Vor-Ort-Kalibrierung mit Testmassen
 - * Schrittweise Prozedur mit Qualitätssicherung durch Prüfläufe
- **Verständnis der System-Gesamtdynamik**
 - * Jahrelanges Expertenwissen
 - * Ursachenanalyse und Ursachengerechte Empfehlungen
 - * Wissen um spezielle Aspekte, z.B. Resonanzeffekte, usw.

Vermeidung von folgenreichen Fehldiagnosen!

Aspekt: Reproduzierbarkeit und Eindeutigkeit der Massenunwucht-Messung

- Korrekte individuelle Grenzwerte des WEA-Typs, z.B. aus Typenprüfung
- Messdrehzahl beeinflusst Messamplitude und –Winkellage durch Resonanz-Effekte
- Geeignete Testmassen für Vor-Ort-Kalibrierung
- Geeignete Sensorik (Sensorauflösung unter $1 \text{ mm/s}^2 \approx 1/10000 \text{ g}$ bei Messfrequenz $< 0,5 \text{ Hz}$
– Viele CMS-Sensoren um Faktor 10-100 zu unsensibel und nur für $f > 0,5 \text{ Hz}$)
- Prüfläufe für QC zum Nachweis der Schwingungsberuhigung

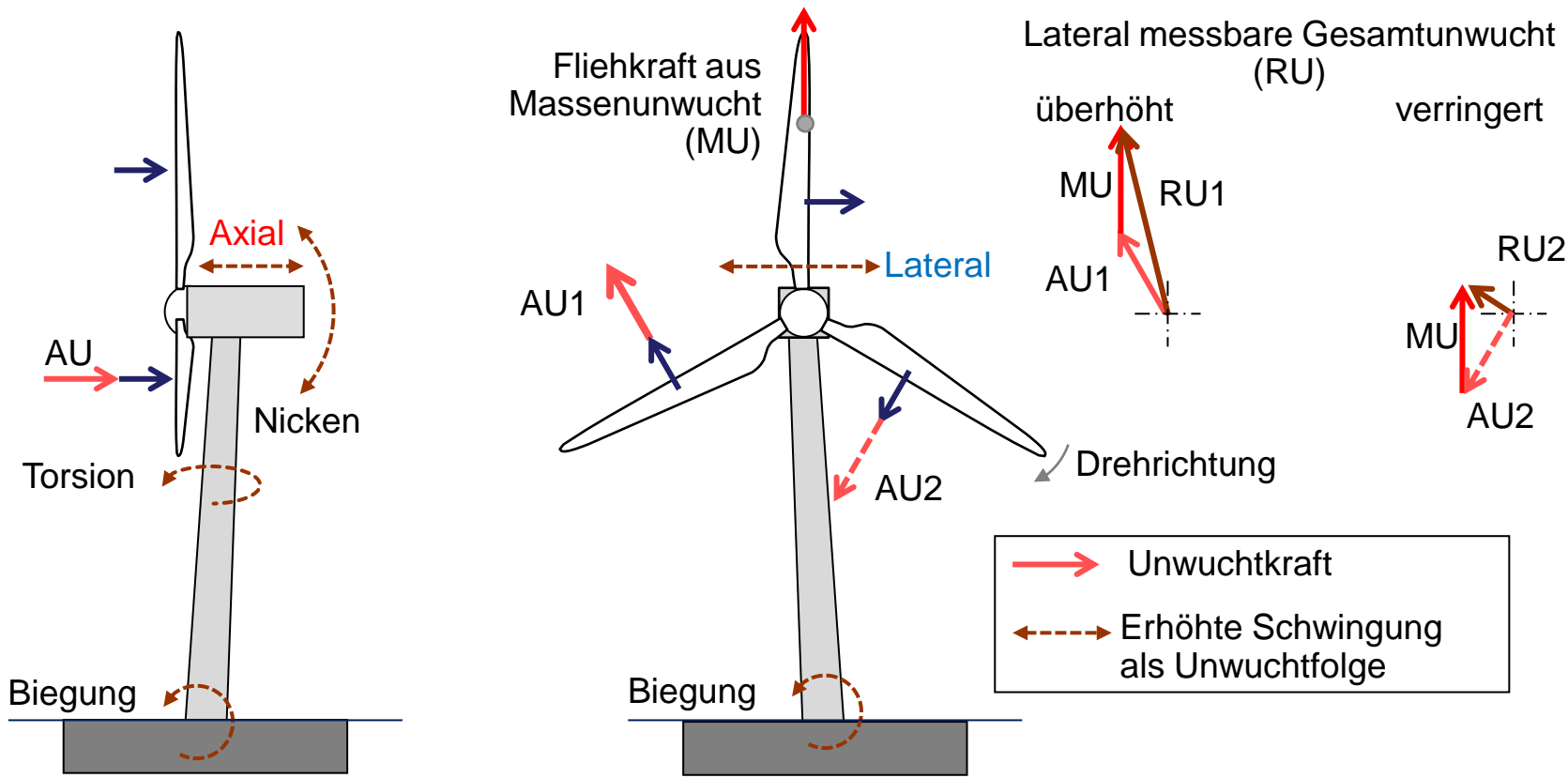
Drehzahlbedingte Unwucht-Schwingungsamplitude durch Massenunwucht



Für tonnenschwere Rotorblätter notwendige Testmassen $> 100 \text{ kg}$



Aspekt: Verfälschung der Unwuchtmessung durch Blattwinkelfehler

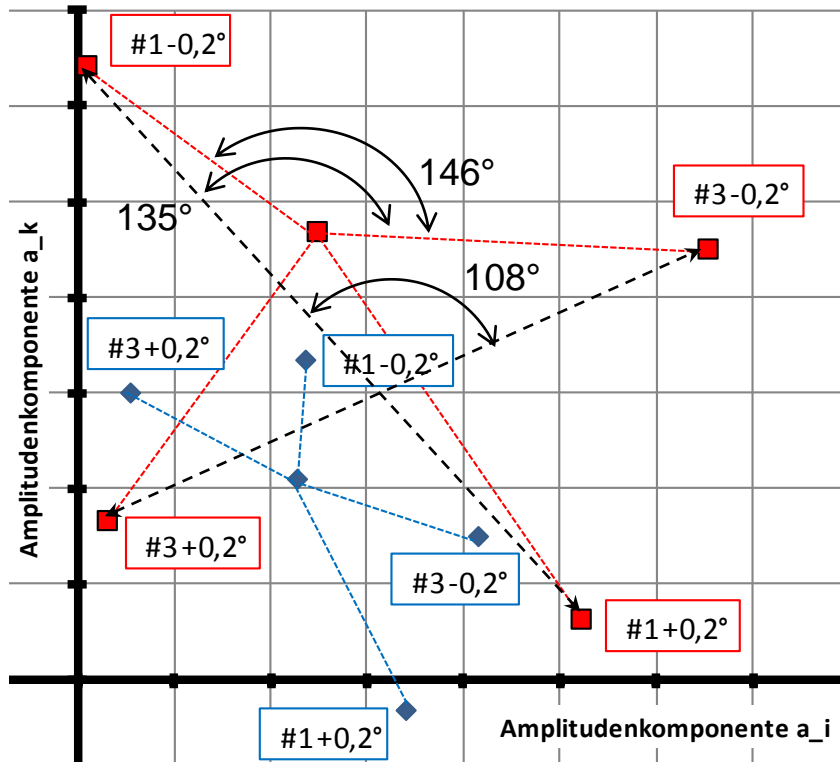


Ungleiche Schubkräfte bewirken **axiale** aerodynamische Unwucht (AU)

Ungleiche Umfangskräfte bewirken **laterale** aerodynamische Unwucht (AU)

Aerodynamische Unwucht → Erhöhte mehrachsige Schwingungen → Erhöhung von Materialermüdung, Schwingungsschäden, Schadensstillstand und ggf. verkürzte Nutzungsdauer (indirekte Ertragsverluste)

Aspekt: Nicht-lineare Aerodynamik beeinflusst Schwingungsänderung bei Blattwinkeljustage

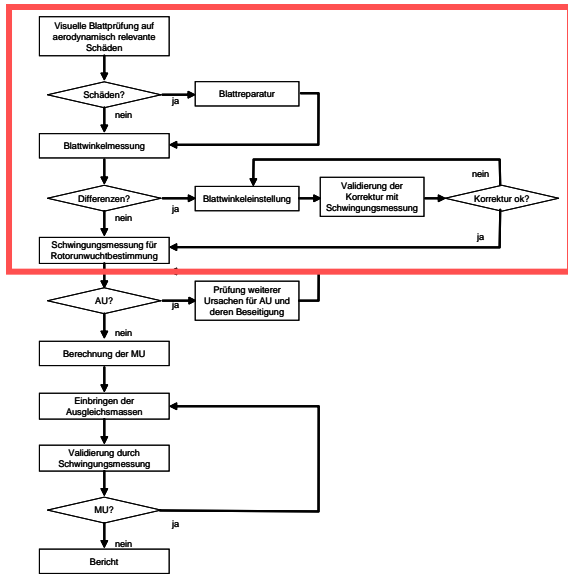
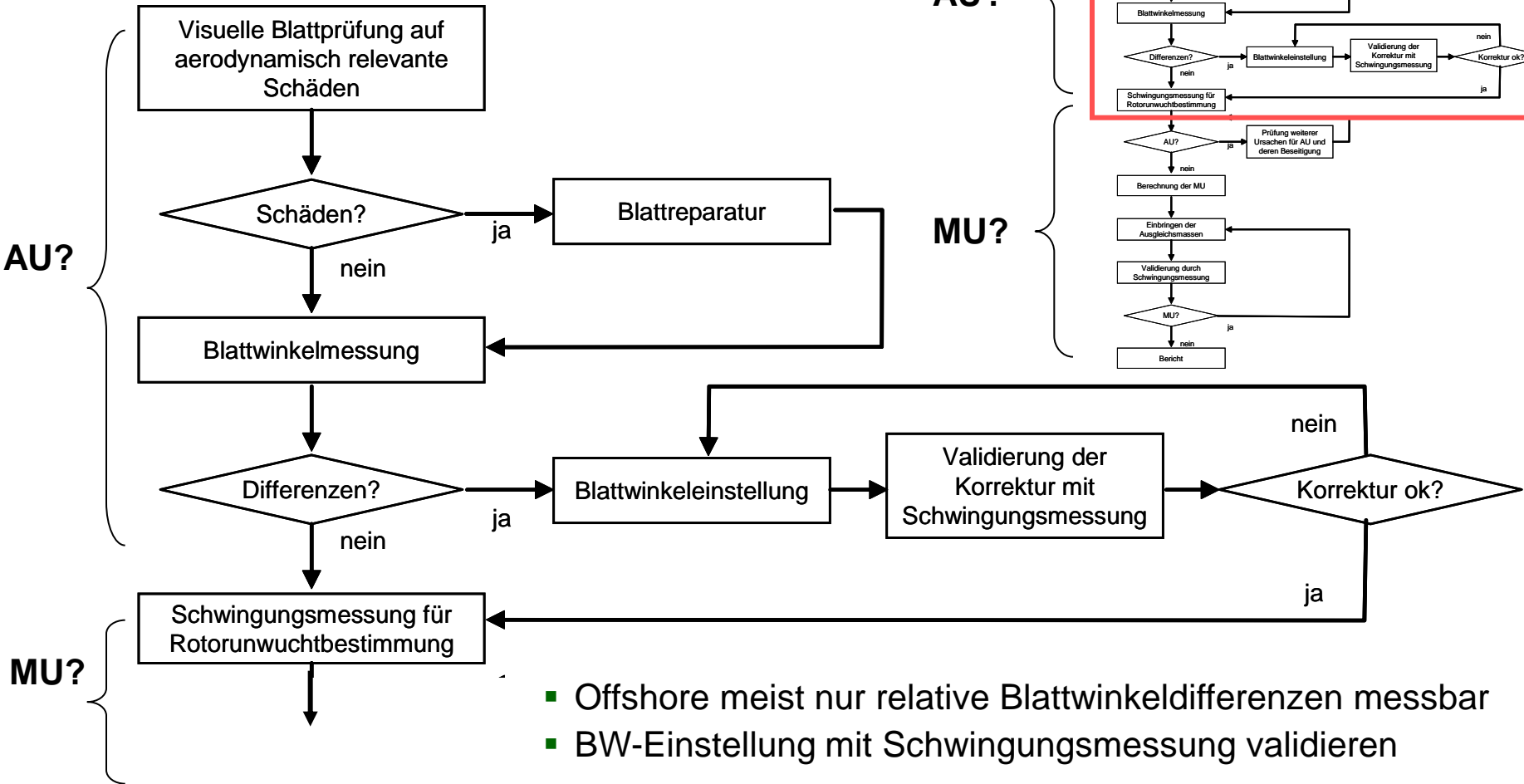


- Drehfrequente Amplituden und Phasenwinkel aus Ordnungsanalyse der Lateral-, und Axial-Schwingung einer Multi-MW-WEA
- Achsen gleich skaliert

- Test an Multi-MW-WEA mit Rotor > 100 m
Abwechselnde definierte Einzelverstellung von zwei Blättern (#1 und #3) um exakt $\pm 0,2^\circ$
- Testergebnis (Bild links):
 - * Trotz identischer Verstellung unterschiedliche Änderung der Amplituden- und Winkellage variiert
 - * **Nicht-Lineare Schwingungs-Reaktion des Gesamt-Rotors ist zu beachten**
- Lösung:
 - * Schrittweise Blattjustage und Schwingungsmessung zielführend für integrale Schwingungs-Reduktion
-> Beachtung des Gesamt-Systems
 - * Nutzung zusätzlicher, eindeutigerer Schwingungsindikatoren aus Torsionsschwingung
- Mögliche Ursachen
 - * Produktionsbedingte Blattverwindungs-Unterschiede moderner, langer Rotorblätter, d.h. Anstellung der Blätter variiert längs des Radius
 - * Zeitliche Variation des 3D-Windfeldes während der Messung
 - * zusätzlich ggf. Massenunwucht, usw.

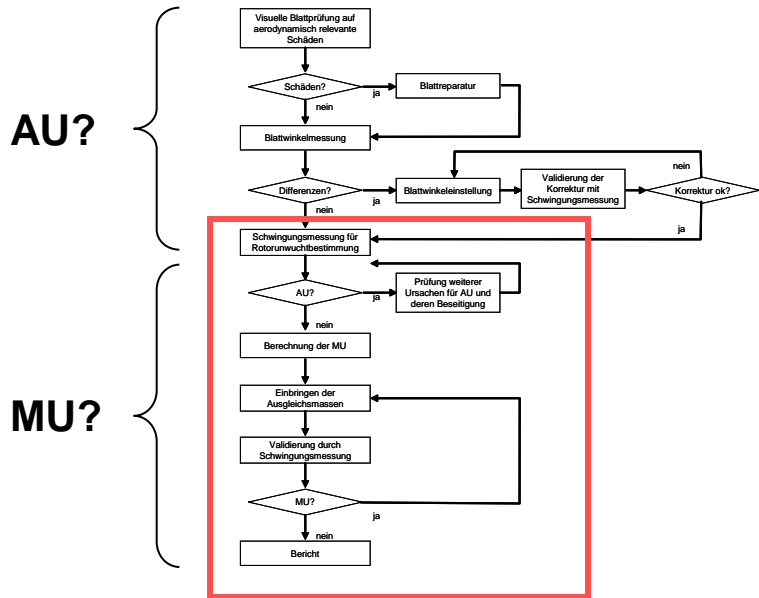
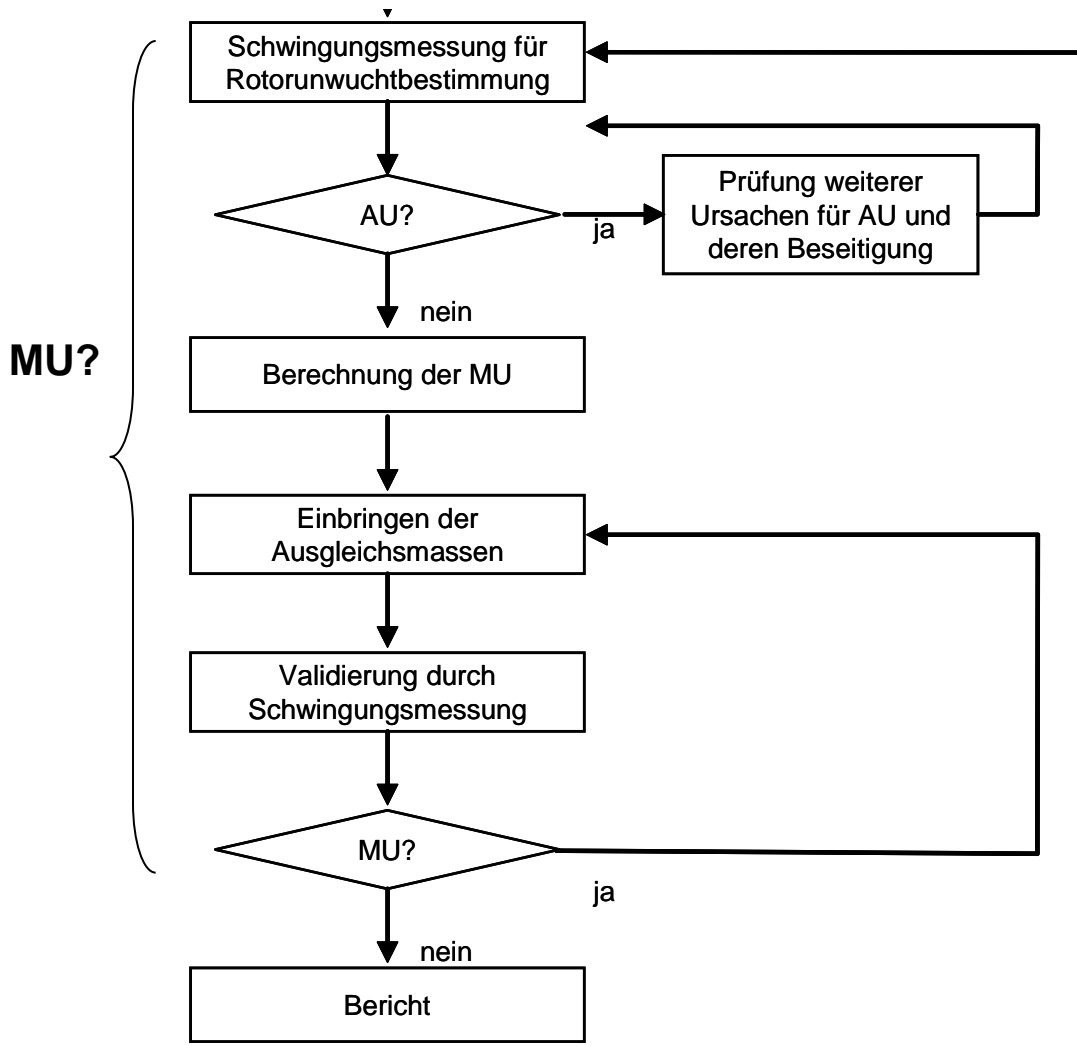
- Unternehmensprofil
- WEA-Normen und -Richtlinien fordern Blattwinkelfehler- und Unwucht-Grenzwerte bei Windenergieanlagen (WEA)
- Unwuchtarten und Ursachen
- Häufigkeit von Unwucht bei Onshore-WEA – unabhängige Statistik
- Unwucht-Folgen: Leistungsabweichung, Ertragsausfall, Komponentenschäden, Lebensdauerverkürzung
- Qualitätskriterien für das Betriebsauswuchten von WEA
- **Geeignete schrittweise Auswuchtprozedur**
- **Geeignete Messverfahren für Offshore-Wuchten**
- Typische Ergebnisse bei erfolgreichem Auswuchten
- Fazit

Erprobte ursachengerechte Auswucht- Prozedur für On- & Offshore WEA, Teil 1: AU



- Offshore meist nur relative Blattwinkeldifferenzen messbar
- BW-Einstellung mit Schwingungsmessung validieren

Erprobte ursachengerechte Auswucht- Prozedur für On- & Offshore WEA, Teil 2: MU

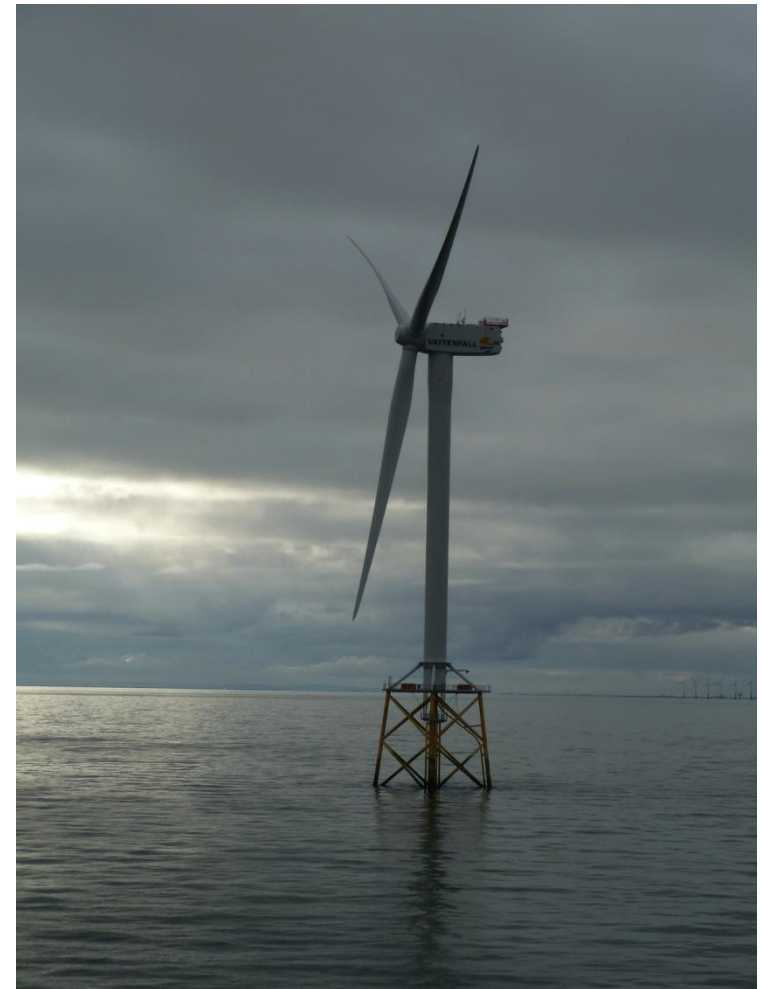


- Effiziente Messkampagne, 1-3 Tage plus Anreisen
- Berücksichtigung individueller WEA-Gegebenheiten, z.B. Eigenfrequenzen
- Ergebnisvalidierung!
- Gute Protokollierung und Qualitätskontrolle nötig

Generelle Herausforderung bei Offshore-WEA-Messungen

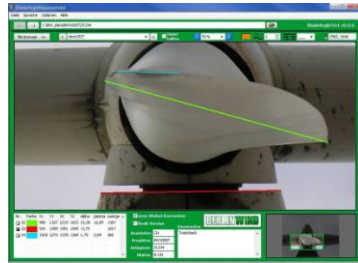
Erschwerte, teilweise sich kurzfristig ändernde Umgebungsbedingungen und Zugänglichkeit wegen Wind, Wellen und Strömung

- **Zeitfenster** für Messungen wegen Mindest-Wind sehr klein
- **Begrenzter Zugang** per Boot, teilweise konstruktiv erschwert und riskant
- Signifikante Kosten bei **Planung und Logistik** wegen
 - Koordination involvierter Firmen und
 - notwendiger kurzfristiger Reaktion
- Hoher Personal- und Sachaufwand (incl. Crew)
- Offshore-HSE-Zertifikate
- Hohe Standby-Kosten

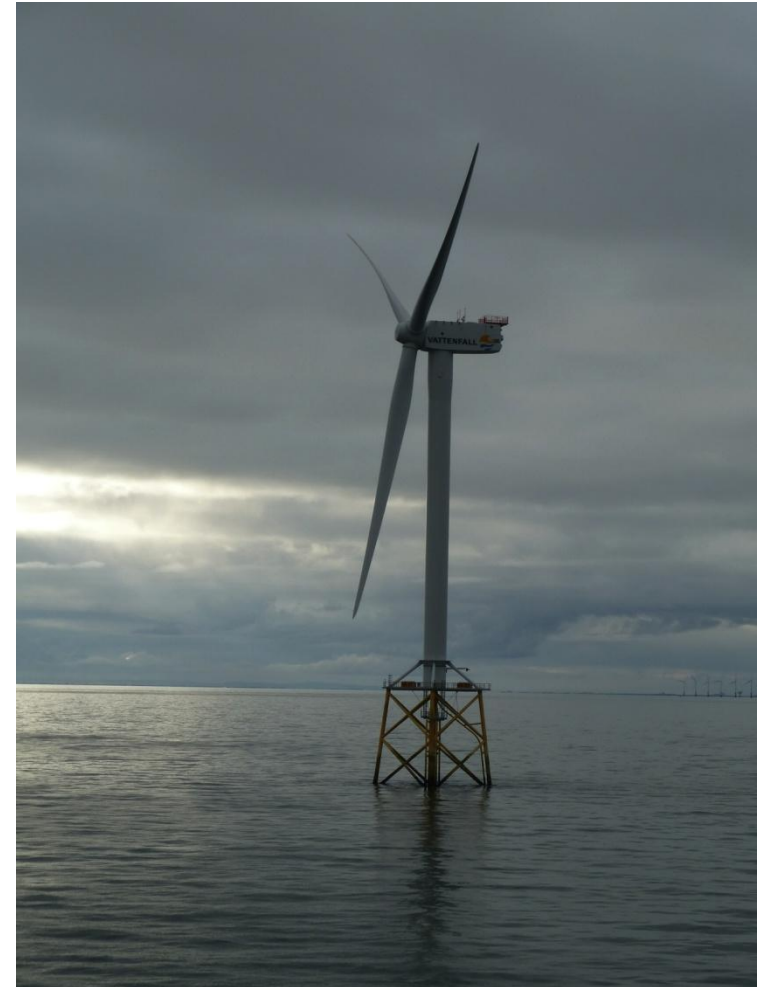


Spezielle Herausforderungen beim Offshore-WEA-Wuchten

- Messung der Blattwinkel:
Kein fester Untergrund für die Aufstellung des Mess-Equipments (Kamera) unter Rotor:



- Offshore-Auswucht-Messungen meist nicht schon beim Design und Wartungskonzept berücksichtigt
- Größere Rotoren
-> größere Testmassen und teilweise neue Befestigungsorte
- Niedrige Drehzahl
-> längere Messzeiten
- Individuelle Fundamentierung und Gesamthöhe
-> Vor-Ort-Kalibrierungen je WEA notwendig
- Schnellere Blatterosion Offshore wegen höherer Blattspitzengeschwindigkeiten

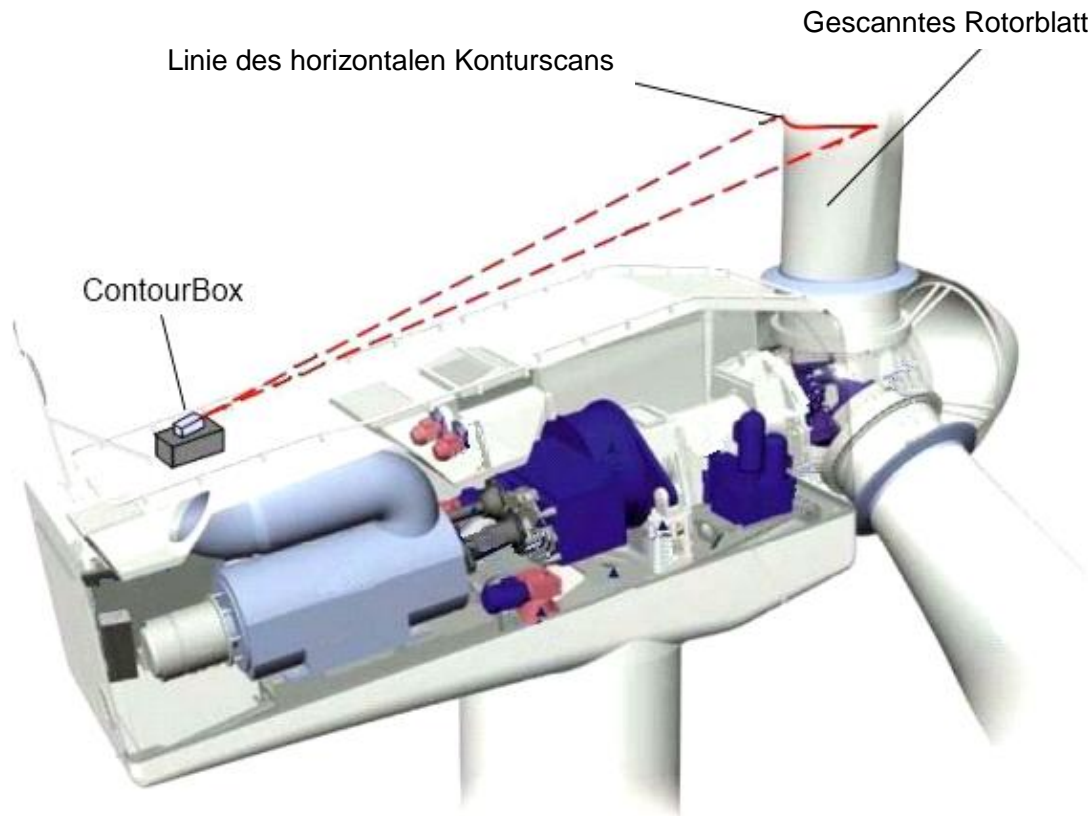


Lösung für Offshore Blattwinkelmessung - Schema

BERLINWIND

- **Distanzlaser** mit 0,1 mm Messgenauigkeit auf bis zu 100 m Entfernung
- **Messrate** 50 Hz
- **Servoachsen** für vertikale und horizontale Positionierung mit Auflösung 0,0025°
- **Horizontale Scans** des arretierten Blattes auf **mehreren Messhöhen**
- **Reproduzierbarkeit** der Blattwinkel: +/- 0,05°
- Messhöhe physikalisch begrenzt wegen Einfallswinkel
- **Vor-Ort-Kalibrierung**
- **Vor-Ort-Auswertung** ergibt relative Blattwinkel
- **Ergebnis-Validierung** mit Schwingungsmessung möglich

Messsystem **ContourBox** auf Gondeldach



Gondelzeichnung: Quelle Vestas

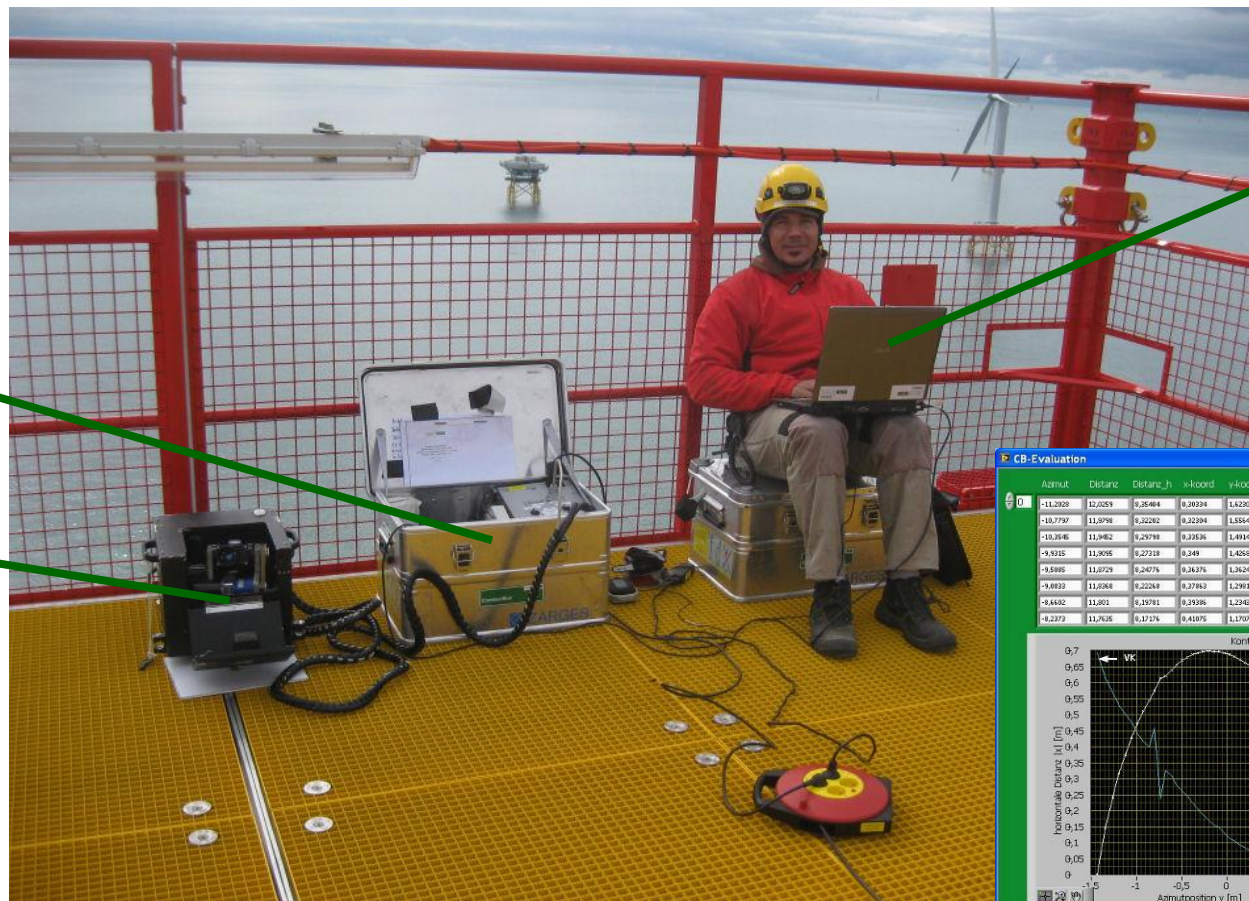
Lösung für Offshore Blattwinkelmessung - Praxis



Messaufbau mit **ContourBox** auf 5 MW Offshore-WEA

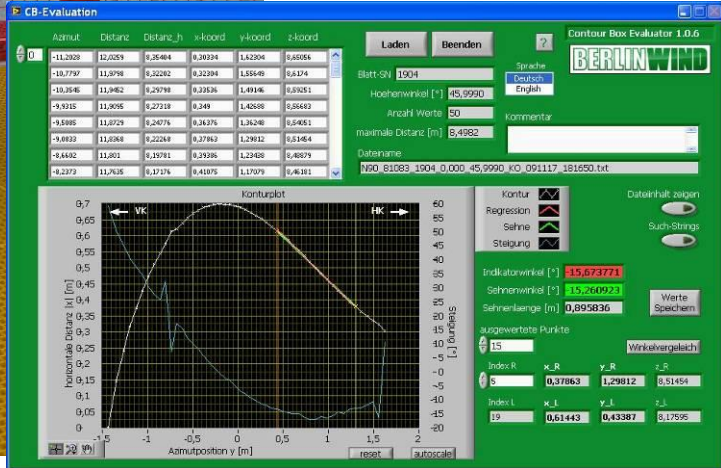
Control Unit

Laser Unit



Laptop mit Mess- und Auswerte-Software

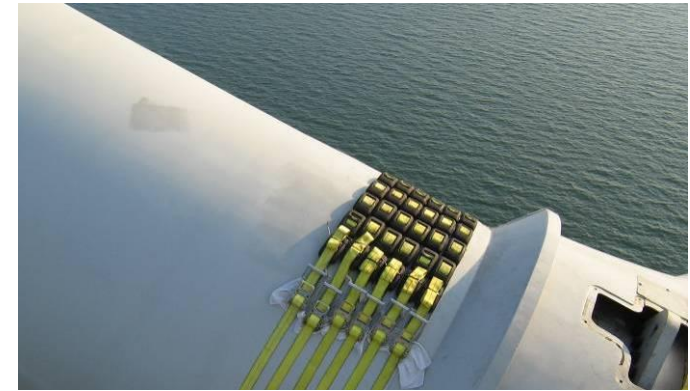
Auswerte-Software



Lösung für Offshore Massenunwucht-Messung

BERLINWIND

- **Erprobte Auswucht-Prozedur anwendbar:**
Schwingungsmessung mit USB-Messsystem
BalancingBox und Software BalancingTest
- Messung der **Turm-Gondel-Schwingungen** bei konstanter Drehzahl mit 3 Beschleunigungs-sensoren und Drehzahlsensor
- **Frequenz-selektive Auswertung** der lateralen und axialen Schwingungen sowie Torsion (AU-Indikatoren)
- Eigenfrequenzmessung
- **Vor-Ort-Kalibrierung** mit Testmassen
- **Testmassen-Montage:**
Bis 3 MW außen am Blatt
Über 3 MW im Blatt
- **Prüfläufe als Qualitätskontrolle** der AU- und MU-Messungen

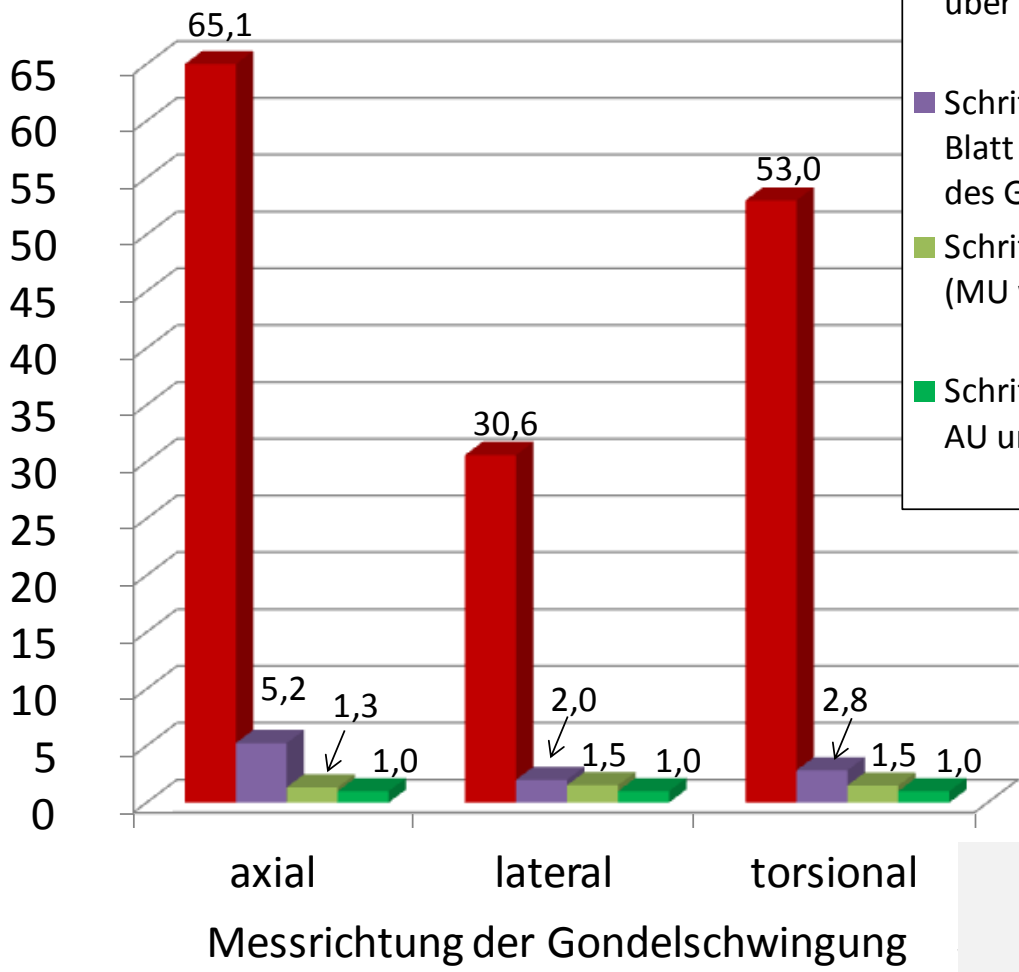


- Unternehmensprofil
- WEA-Normen und -Richtlinien fordern Blattwinkelfehler- und Unwucht-Grenzwerte bei Windenergieanlagen (WEA)
- Unwuchtarten und Ursachen
- Häufigkeit von Unwucht bei Onshore-WEA – unabhängige Statistik
- Unwucht-Folgen: Leistungsabweichung, Ertragsausfall, Komponentenschäden, Lebensdauerverkürzung
- Qualitätskriterien für das Betriebsauswuchten von WEA
- Geeignete schrittweise Auswuchtprozedur
- Geeignete Messverfahren für Offshore-Wuchten
- **Typische Ergebnisse bei erfolgreichem Auswuchten**
- **Fazit**

Deutliche Schwingungsreduktion durch Blattwinkeljustage und Auswuchten



Normierte Unwuchtamplitude
(richtungsweise normiert auf Werte nach Schritt 3)

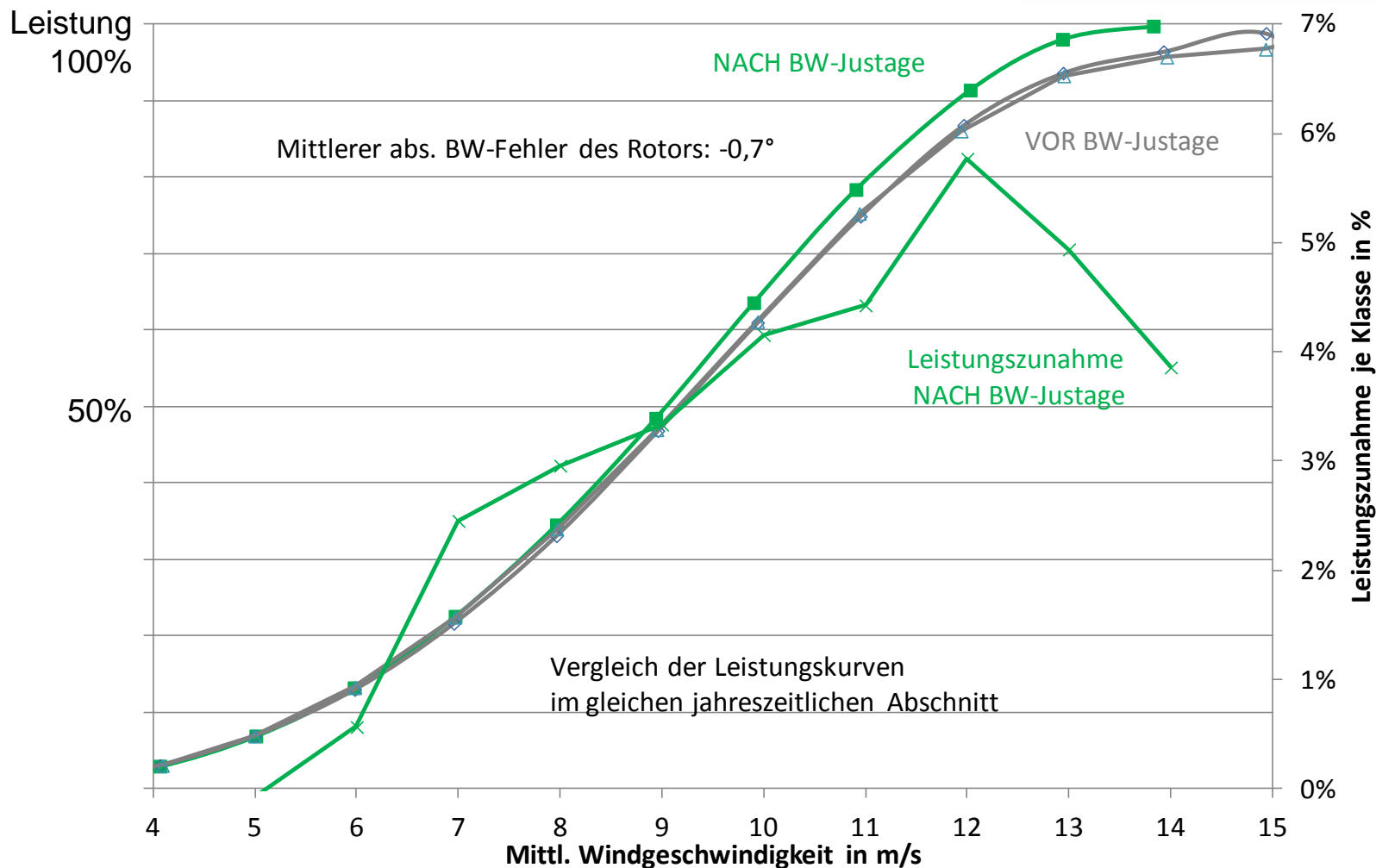


Multi-MW Onshore-WEA, lastfreier Modus

- Vor der Justage: Blattwinkeldifferenz 5,8°, über 12faches des Grenzwerts
- Schritt 1: Justage auf den AU-Grenzwert (ein Blatt 0,5°, zweites Blatt 0,2°, MU 1,5 faches des Grenzwerts)
- Schritt 2: Justage deutlich unter AU-Grenzwert (MU weiterhin 1,5 faches des Grenzwerts)
- Schritt 3: Nach Blattjustage und Auswuchten: AU und MU deutlich unter den Grenzwerten

- Unzulässige Blattwinkelfehler und Massenunwuchten an Offshore-WEA detektiert, Mehrfaches des jeweiligen Grenzwerts
- Entsprechende Simulationen bestätigen signifikante Lebensdauer-Reduktion um mehrere Jahre von Blattwurzel und Struktur

Leistungskurvenverbesserung durch Justage absoluter Blattwinkel



- Onshore-WEA : Ertragserhöhung im Prozent-Bereich erzielt,
- Messung absoluter Blattwinkel Offshore schwierig

Fazit: Auswuchten von Offshore-WEA sicher und wirtschaftlich

- Rotorunwucht und Blattwinkelfehler als „Root cause“ von Schäden und Problemen anerkennen (On- und Offshore)
- Messmethoden und Auswuchtprozedur sicher und erfolgreich
- Integrale Rotorunwucht an allen vermessenen Offshore-WEA, vielfaches des MU-äquivalenten Schwingungs-Grenzwerts
- Blattwinkeldifferenzen an allen vermessenen Offshore-WEA, bis über 3-fachem des AU-Grenzwerts
- Durch Auswuchten Reduktion der drehfrequenten Schwingung um ca. 95%
- Restunwuchten bis unter 25% des MU-Grenzwerts auch bei Offshore-WEA möglich
- Unabhängige Experten für Auswuchten von Offshore-WEA notwendig
- Periodisches WEA-Auswuchten ab Inbetriebnahme in Design und Wartung von Blatt und WEA berücksichtigen
- Folgekosten von Unwuchten betragen Vielfaches der Messkosten
- Gesamt-Messkosten noch optimierbar:
Art des WEA-Zugangs und Standbyzeit als Haupt-Kostentreiber



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



BerlinWind GmbH

Bundesallee 67, 12161 Berlin,
Germany

Tel.: +49 30 688 3337 40

Email: info@berlinwind.com

Internet: <http://www.berlinwind.com>