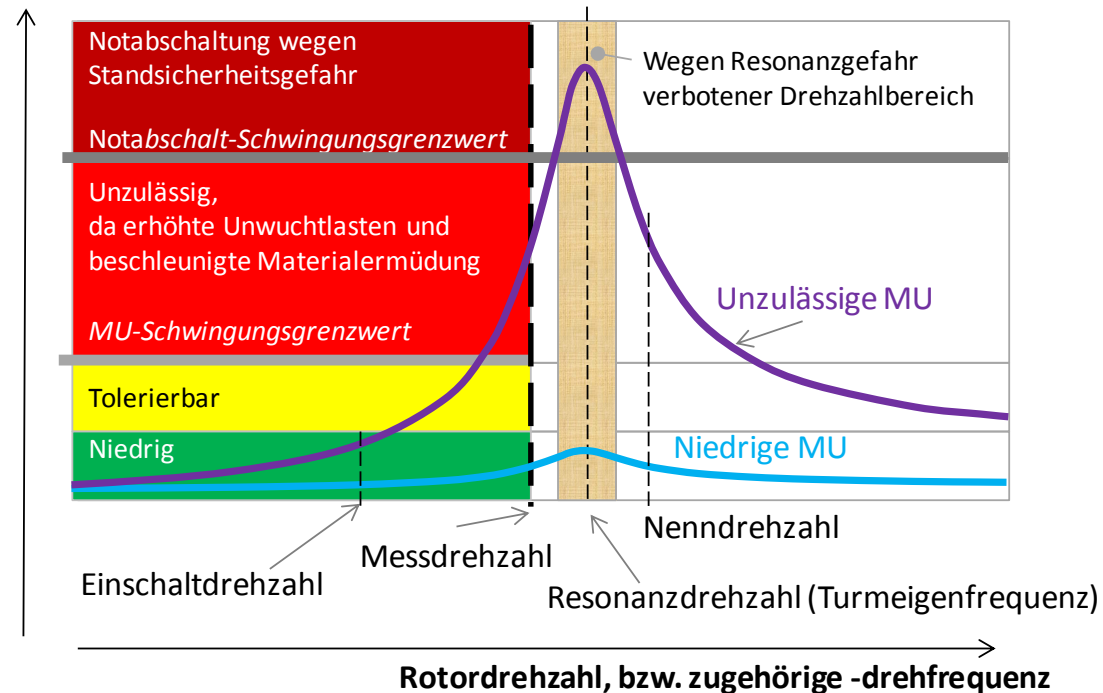


Wie kann ich die Qualität beim Rotorauswuchten beurteilen? - Die revidierte VDI-Richtlinie 3834 gibt Hilfestellung

Drehzahlbedingte Unwucht-Schwingungsamplitude durch Massenunwucht



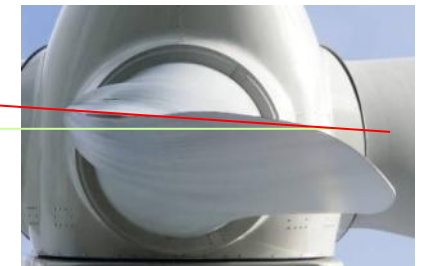
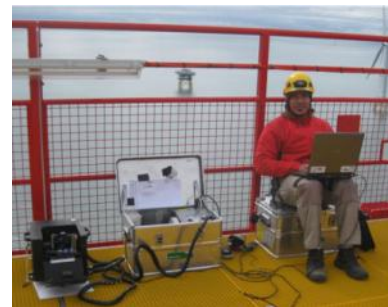
24. Windenergietage,
12. November 2015, Linstow
Forum 5 im Raum
Charleston 2 – Technik

Dr.-Ing. Christoph Heilmann
BerlinWind GmbH, Bundesallee
67, 12161 Berlin, Germany

www.berlinwind.com

- Unternehmensprofil
- Alte und neue VDI-Richtlinie 3834 im Überblick
- Betriebsunkt-Abhängigkeit der RMS-Beurteilungswerte
- Kriterien zum Betriebsauswuchten von WEA...
aus Norm zum Betriebsauswuchten DIN ISO 21940-13 ableitbar
- Jeder WEA-Typ hat seinen individuellen Unwucht-Grenzwert
- Beispiele für Wichtigkeit von Beurteilungs-Kriterien
- Kosten-Nutzen-Verhältnis von Blattwinkelmessung und Rotorauswuchten
- Zusammenfassung

- 2009 gegründetes, unabhängiges Ingenieurbüro, Teil der Holding *Corporate Energies Group*
- Mitglied u.a. **BWE-Sachverständigenrat** und AK „WEA-Weiterbetrieb“ sowie **VDI-Ausschuss zur Richtlinie VDI-3834 „Schwingungsbeurteilung bei WEA“**
- 10 Ingenieure mit **Windenergie-Erfahrung seit über 14 Jahren** in
 - **Rotorauswuchten**
1200+ 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



VDI-Richtlinie 3834, Blatt 1, Schwingungs- Beurteilung von WEA mit Getriebe

- Titel: “ Messung und Beurteilung der mechanischen Schwingungen von Windenergieanlagen und deren Komponenten“
 - Ziel: Allgemeine, „breitbandige“ Schwingungsbeurteilung, KEINE Diagnose
 - Inhalt (deutsch UND englisch):
 - Grundlagen,
 - Hinweise zur Messung und Auswertung an:
Gondel und Turm, Rotorlager, Getriebe, Generator
 - Kriterien für die Bewertung
 - Richtwerte für die Bewertung der Schwingungen
 - Schwingungsgrenzwerte für den Betrieb
 - Empfehlung zur Schwingungsüberwachung
- NEU in der Fassung 2015:**
- 5 Jahre Erfahrungen in der Anwendung, Nützlichkeit für Triebstrang gezeigt
 - Messtechnik-Anforderungen mit DIN ISO 2954 harmonisiert
 - Stark erweiterte Datenbasis, daher Erweiterung auf WEA ≥ 3 MW
 - Anhang: **Informationen zum Auswuchten des Hauptrotors am Aufstellungsort**
- Ausschussmitglieder: CMS-Anbieter, Zertifizierer, WEA-Hersteller, Zulieferer, Sachverständige und unabhängige Ingenieurbüros, (Mess-)Institute, Unis...

VDI-Richtlinie 3834, Ausschussmitglieder



VDI Mitglieder im Richtlinienausschuss VDI-GPP FA623 "Windenergie"



Foto zeigt nur einen Teil der Mitarbeiter



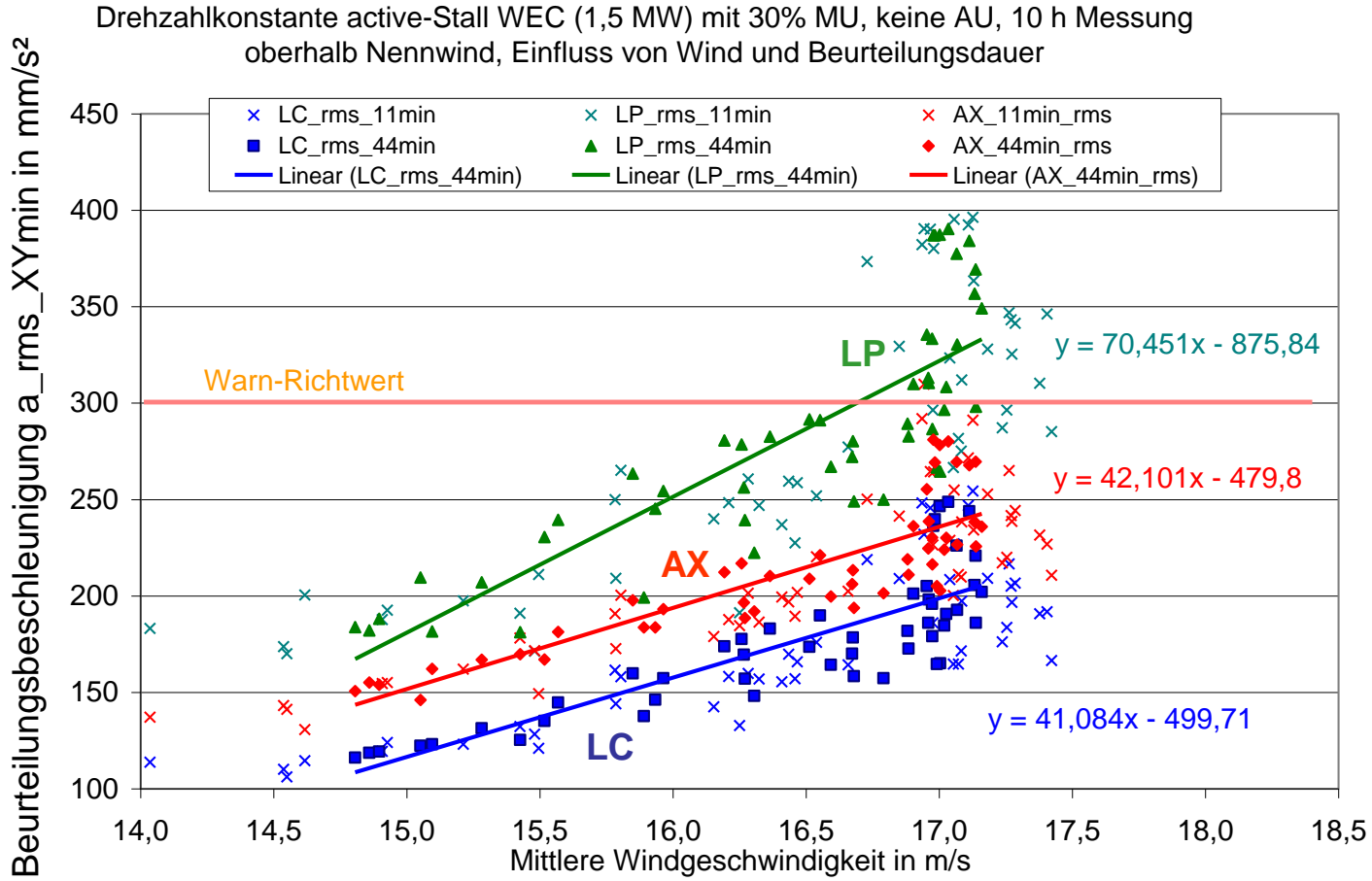
Quelle: Vortrag:
Schwingungsbeurteilung
und Diagnostik von Wind-
energieanlagen im
Spiegel von Normen
und Richtlinien
5. VDI-Schwingungstagung,
Bremen 2014
T. Gellermann,
AZT (Ausschuss-
Vorsitzender)
und
Prof. Kolerus, TU Wien

Interesse an der Mitarbeit? → Kontaktieren Sie den Vorsitzenden Thomas Gellermann

Unterschied zwischen VDI-3834:2015 und DIN ISO 10819-21:2015

- DIN ISO 10816-21:2015
„Mechanische Schwingungen — Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen — Teil 21: Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse und Getriebe“
 - Basiert auf das ALTEN Version der VDI3834 von 2009!
 - Richtwerte nur im Anhang (da angeblich zu wenig Anlagen in der Statistik)
 - Kein Anhang zum Auswuchten
- Intensive Mitarbeit der Ausschussmitglieder an der internationalen und deutschen Fassung (inhaltlich und Übersetzungsprüfung)
- **Also: VDI3834 Blatt1, neue Fassung 2015 ist „aktueller“, d.h. näher am Stand der Technik!**

Betriebspunkt-Abhängigkeit des RMS-Werts, Beispiel Drehzahlkonstante active-Stall WT (1,5 MW) über Nennwind



Wind-Zunahme um 2 m/s, führt zu a_RMS-Steigerung um mittleren Faktor...

ca. 1,8 (bei 17 m/s 1,5)

ca. 1,6 (bei 17 m/s 1,4)

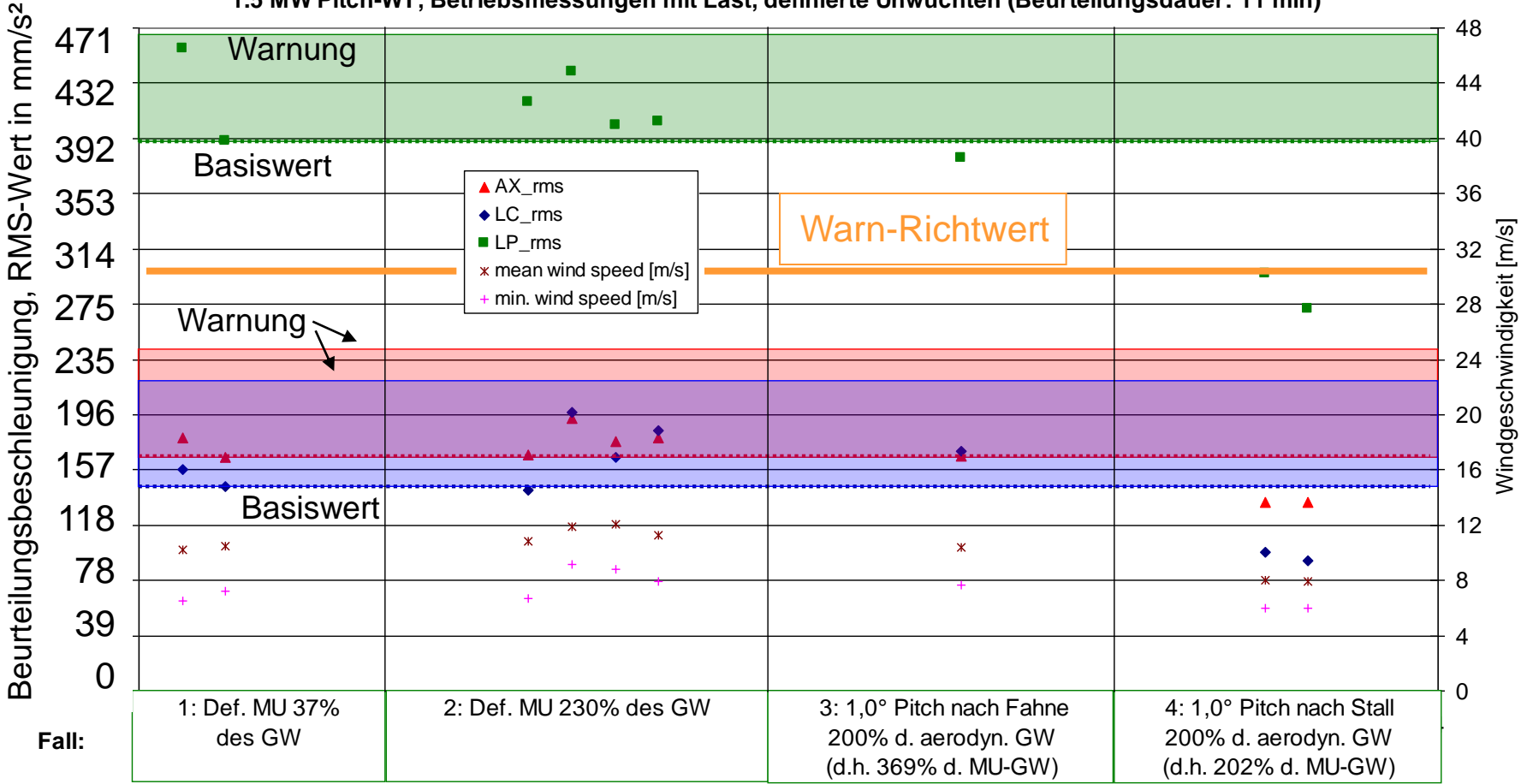
ca. 1,7 (bei 17 m/s 1,6)

- Mit Windgeschwindigkeit stark zunehmende RMS-Werte selbst bei Beurteilungsdauer 44min.
- **RMS-Wert kann innerhalb von 10 Stunden um den Faktor 2,0 schwanken, z.T. windbedingt.**
- Je stärker der Wind, desto größere Schwankung, längere Beurteilungsdauer liegt enger an Trendlinie

Motivation für Auswucht-Anhang: RMS-Wert nach VDI 3834 insensitiv für Unwuchten, Beispiel 1,5 MW Pitch-WEA



1.5 MW Pitch-WT, Betriebsmessungen mit Last, definierte Unwuchten (Beurteilungsdauer: 11 min)



- **Trotz unzulässiger Unwuchten keine Überschreitung des Warnwerts bei Sensor LC**
- **LP meist über Warn-Richtwert!**
- Fall 4 mit unzulässiger AU für alle Sensoren unter Warnrichtwert

VDI3834 versus Rotorunwuchtbestimmung – Statistische Auswertung (BerlinWind 2013)

BERLINWIND

- **RMS-Auswertung nach VDI3834 von 41 WEA:**
 - 900-2000 MW, 24 Stall-WEA, 11 Pitch-WEA, 6 Active-Stall-WEA
 - Höchster 10-min-RMS-Wert aller Sensoren aus mind. 30min Messung verwendet, d.h. nicht nur Einzelmessung
 - **Ergebnisse:**
 - Keine Korrelation zwischen höhe des RMS-Werts und Unwuchthöhe,
 - Selbst WEA mit gravierenden Unwuchten nach Blatttausch beim RMS-Wert unauffällig
 - **Schlussfolgerung:**
 - **Separate Auswuchtmessungen zur Unwuchtdiagnose unumgänglich, wie bei anderen rotierenden Maschinen**
- **Neuer Anhang zum WEA-Rotorauswuchten der VDI3834, Blatt1: 2015**

Wie Effizienz und Nutzen verschiedener Auswuchtstrategien beurteilen?

- **Ableitung technischer Beurteilungskriterien** aus dem jahrzehntelangen Betriebsauswuchten großer Rotoren in anderen Branchen:

DIN ISO 21940-13:2012: “Criteria and safeguards for the in-situ balancing of medium and large rotors“ – Kriterien und Sicherheitshinweise für das Betriebsauswuchten mittlerer und großer Rotoren

- **Notwendigkeit des Betriebsauswuchtens**

Es ist die **einzig sinnvolle Methode**, wenn ...

- die finale Rotormontage vor Ort geschieht und
- die **Unwucht sich offensichtlich im Betrieb verändert**
(Verschleiss, Erosion, Verlust von Teilen, signifikante Reparatur, etc..)

Beides gilt für WEA-Rotoren!

- **Angemessene Gesamtstrategie:** Alle anderen (drehfrequenten) Schwingungsursachen beseitigen VOR der Bestimmung der Massenunwucht!
- ***Trotz $D > 120\text{ m}$ und > 25000 WEA allein in Deutschland, fehlen WEA in der ISO.***

Technische Kriterien für Beurteilung des WEA-Auswuchten nach ISO 21940



#	Kriterium	Relevanz bei WEA
A	Dynamisches Vor-Ort-Betriebsauswuchten (MU) möglich: * technisch machbar und * Berücksichtigung der Dynamik	Dynamisches WEA-Betriebsauswuchten seit > 10 Jahren erfolgreich etabliert [1]. Grenzwerte vorhanden, Auswuchtkammern im Blatt vorhanden , aber oft effizientes Betriebsauswuchten kein Design-Kriterium (Rotorzugang, Montagepunkte für Sensoren, Test- und Ausgleichsmassen; Blattjustage kompliziert)
B	Sicherheit der Prozedur: Vermeiden... * Gefährlicher Betriebszustände * Gefahr für WEA und Personal	WEA-Sicherheitssystem meist ausreichend (Notstopp bei Überdrehzahl und Schwingungen); schwierige Testmassenmontage; Gefahr durch erhöhte Schwingungen bei falscher Empfehlung für Blattwinkel und Ausgleichsmassen
C	Andere potenzielle Schwingungsursachen vorhanden	Signifikante 3D-Überlagerung von AU- und MU-Kräften erfordert Ursachen-Untersuchung von AU und MU, z.B. Erosion, Blattwinkel- oder Twistdifferenz, Verlust von aerodyn. Elementen, Eis, Reparatur, Blatttausch, Wasser-Einlagerung, etc.
D	Geeignete Gesamtprozedur: Ursachengerechte Berücksichtigung der Gesamt-Dynamik, Ausschluss anderer Schwingungsursachen	Verschiedene Schwingungsursachen vorhanden , jede WEA ist individuell, Experten vor Ort zur Beurteilung der Komplexität, Ursachen und Einflussfaktoren (Resonanz?) Richtige Abfolge: ERST AU minimieren, DANN MU messen, Physikalische Nutzbarkeit der Messgrößen, richtige Grenzwerte verwenden
E	Geeignetes Messsystem	Geeignete Sensoren (Frequenz < 0,5 Hz, hohe Auflösung < 0.2 mm/s ²) und Anzahl an Sensoren; geeignete Testmassen und AU-Messmethode
F	Schwingungsvektor während Messung stationär, keine Verfälschungen?	Verfälschungen vorhanden , Monitoring der Schwingungsvektorlage und seiner statistischen Sicherheit nötig: erfordert fortgeschrittene Auswertemethoden (Ordnungsanalyse, Gleitendes-Fenster-Analyse, etc.) Validierung mit Testläufen für QC
F1	Rotordrehzahl-Schwankungen	Signifikant wegen wechselndem Wind bei Pitch-WEA trotz „fester Drehzahl“ , Statistische Sicherheit von Messung und Ergebnis prüfen
F2	Lastschwankungen	Wechselnde AU-Kräfte wegen wechselnder Windgeschwindigkeit und -richtung; Verfälschung durch aktive Schwingungsdämpfung im Normalbetrieb
F3	Resonanzprobleme	Auch bei „nagelneuen“ WEA-Typen Turmeigenfrequenz nahe oder im Betriebsdrehzahlbereich , starke Amplitudenvariation nahe Resonanz, Resonanz anderer nicht rotierender Bauteile

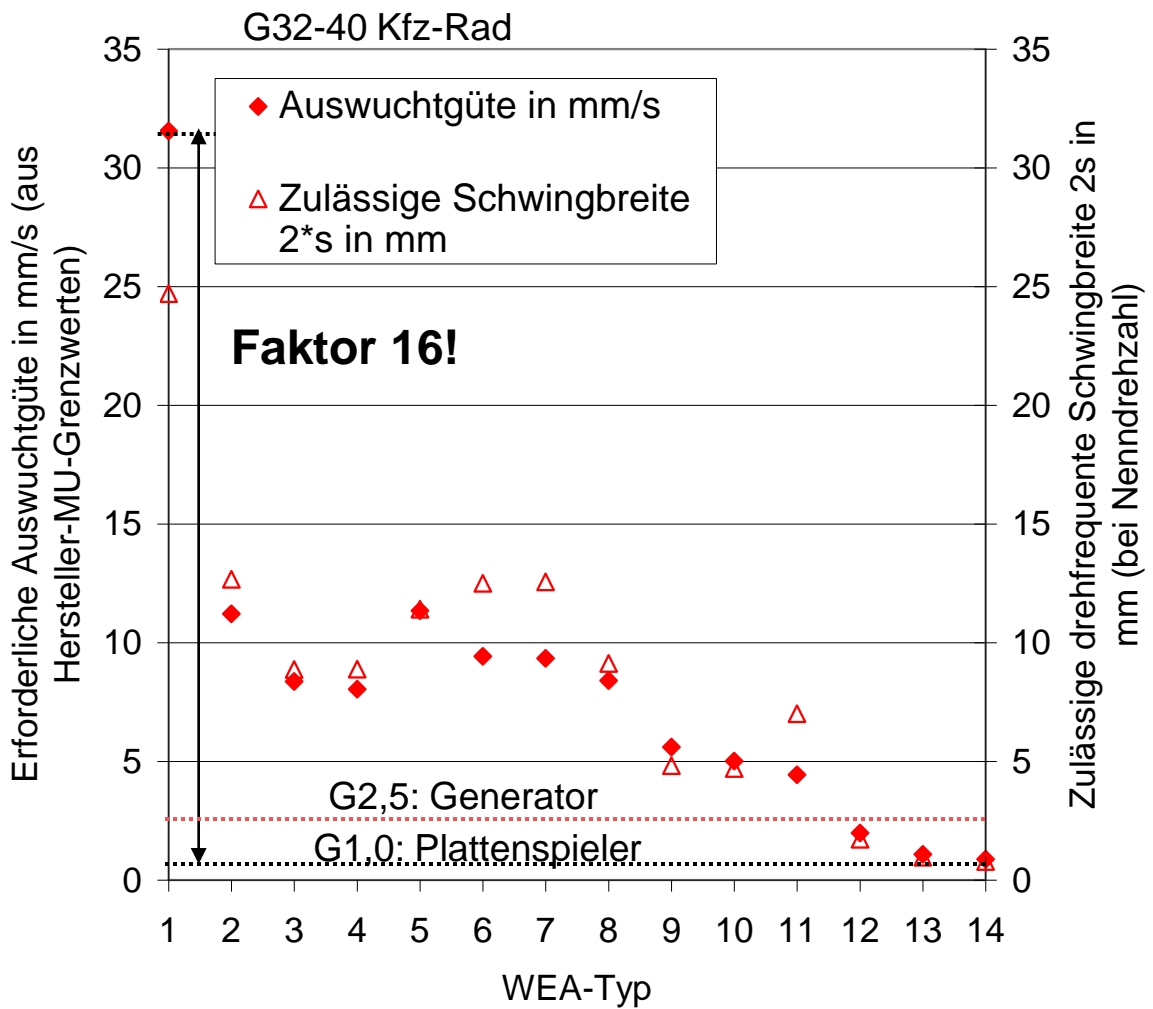
Kriterium A, B: Massenunwucht durch Schwingungsmessung sicher bestimmen

BERLINWIND

- **Erprobte Auswucht-Prozedur (> 10 Jahre):** Schwingungsmessung mit USB-Messsystem BalancingBox und Software BalancingTest
- Messung der **Turm-Gondel-Schwingungen** bei konstanter Drehzahl mit **3 Beschleunigungssensoren** und Drehzahlsensor
- **Statistische Reproduzierbarkeit** erfordern **Messzeiten größer 30 Minuten**
- **Frequenz-selektive Auswertung** der lateralen (MU) und axialen Schwingungen sowie Torsion (AU-Indikatoren)
- **Eigenfrequenzmessungen** wg. Resonanz
- **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
- **Typische Amplitudenreduktion um 90%, meist unter 25% des MU-Grenzwerts**



Kriterium A, D, E: Richtigen Grenzwert des individuellen WEA-Typ verwenden



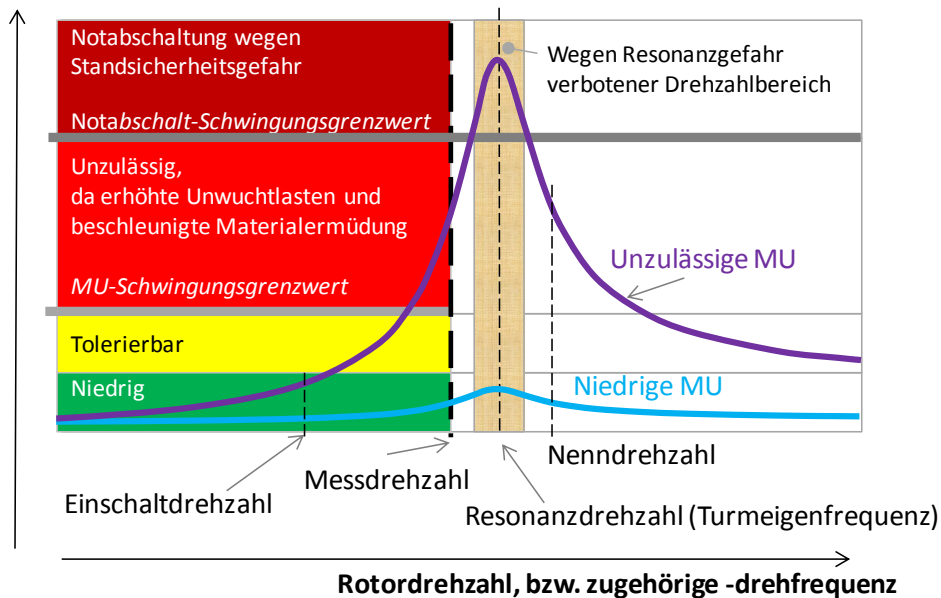
- **Auswuchtgüte in mm/s nach DIN ISO 1940** berechnet:

$$v = (e_{zul} * \Omega) = 1000 * U_{zul} [kg m]^* \Omega / m_{Rotor} [kg]$$
- **Auswuchtgütestufe für WEA-Rotor nicht standardisierbar, da hoher Einfluss von WEA-Konstruktion und Regelung!**
- Betriebs-Auswuchten auf $0,25 * U_{zul}$ sinnvoll und möglich
- Gemessene Turm-Gondel-Schwingungsamplitude abhängig von Resonanznähe zur Turm-Eigenfrequenz
- Zulässige drehfrequente Schwingbreite $2s = 2 * e_{zul}$ des TGS aus Nenndrehzahl variiert von ca. 1 mm bis ca. 25 mm!
- Drehfrequente Beschleunigung z.T. kleiner $5 \text{ mm/s}^2 \approx 0,5 \text{ mg}$

Kriterium A, E, F: MU-Messung reproduzierbar, kalibriert und validiert?

- Jedes Auswuchten erfordert geeignete Testmassen – auch bei WEA!
- **Beschleunigungsamplituden** unter $1 \text{ mm/s}^2 \approx 1/10000 \text{ g}$ → Sensorauflösung geeignet?
 - Die meisten CMS-Sensoren um Faktor 10 to 100 zu unsensibel und nur für $f > 0,5 \text{ Hz}$
- Amplitude und Winkellage der Schwingung variiert mit Messdrehzahl (Resonanznähe)
- **Prüfläufe** für QC zum Nachweis der Schwingungsberuhigung
- **Schätzung der MU-Niveaus (MU-Check)** mittels Schwingungskennwert möglich, wenn exakte Reproduzierbarkeit identischer Testbedingungen und höchste Sorgfalt angewandt

Drehzahlbedingte Unwucht-Schwingungsamplitude durch Massenunwucht

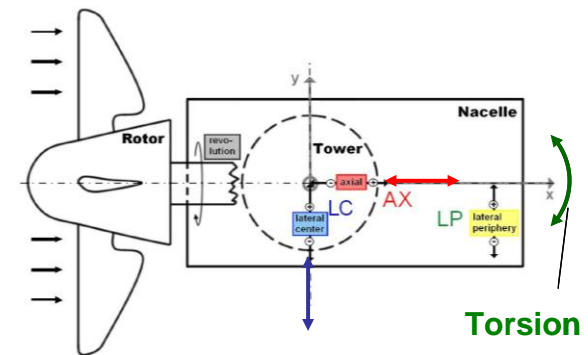
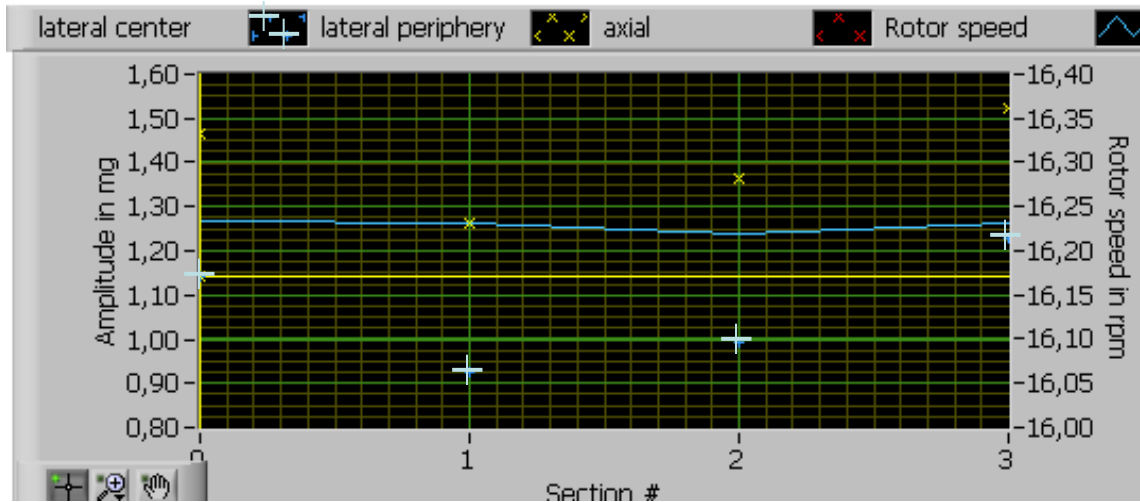


Für tonnenschwere Rotorblätter notwendige Testmassen > 100 kg



Kriterium F: Ausreichende Messdauer und statistische Sicherheit der MU-Messung

Auswertung längerer Messung mit 4x10-min-Fenstern



Zu kurze Messzeit von 10 min: Rotordrehzahl nahezu konstant, aber wegen wechselndem Wind **Variation der LC-Amplitude (MU-Maß) um > 30%**

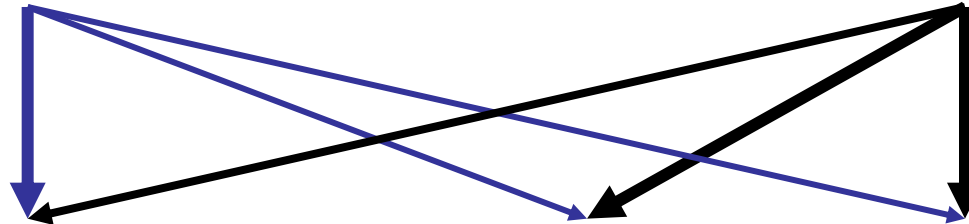
- **Statistisch sichere Messzeit** erforderlich
- Meist **definierte, spezielle Messbedingungen** notwendig, damit WEA-Steuerung nicht Messung verfälscht (z.B. aktive Dämpfung)
- Identische, reproduzierbare Sensorpositionen
- **Spezielle Auswertetechniken** (Ordnungsanalyse), um Amplitudenverfälschung bei FFT durch Drehzahlschwankung zu vermeiden
- **MU-Ergebnis nur zusammen mit statistischer Bewertung glaubwürdig**

Kriterium C, D: Identifikation anderer Schwingungsursachen – Prinzip und Folgen



Massenunwucht

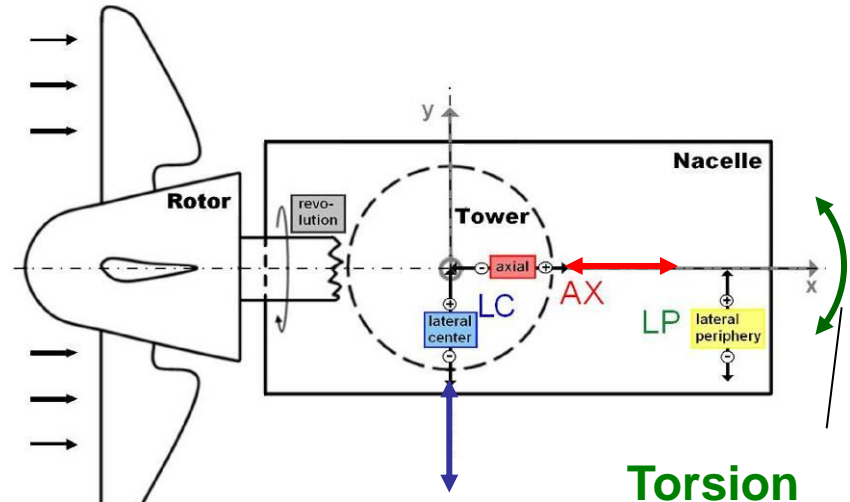
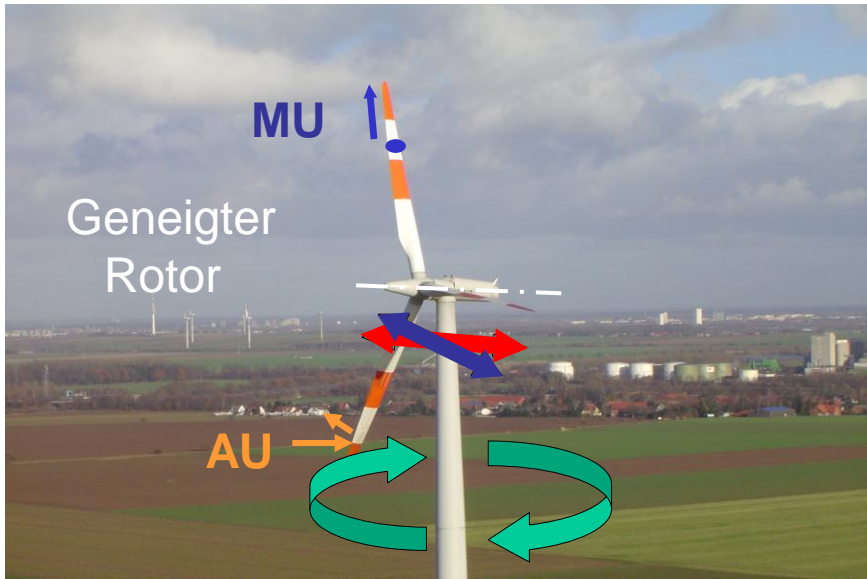
Aerodynamische Unwucht



Schwingrichtung: Lateral

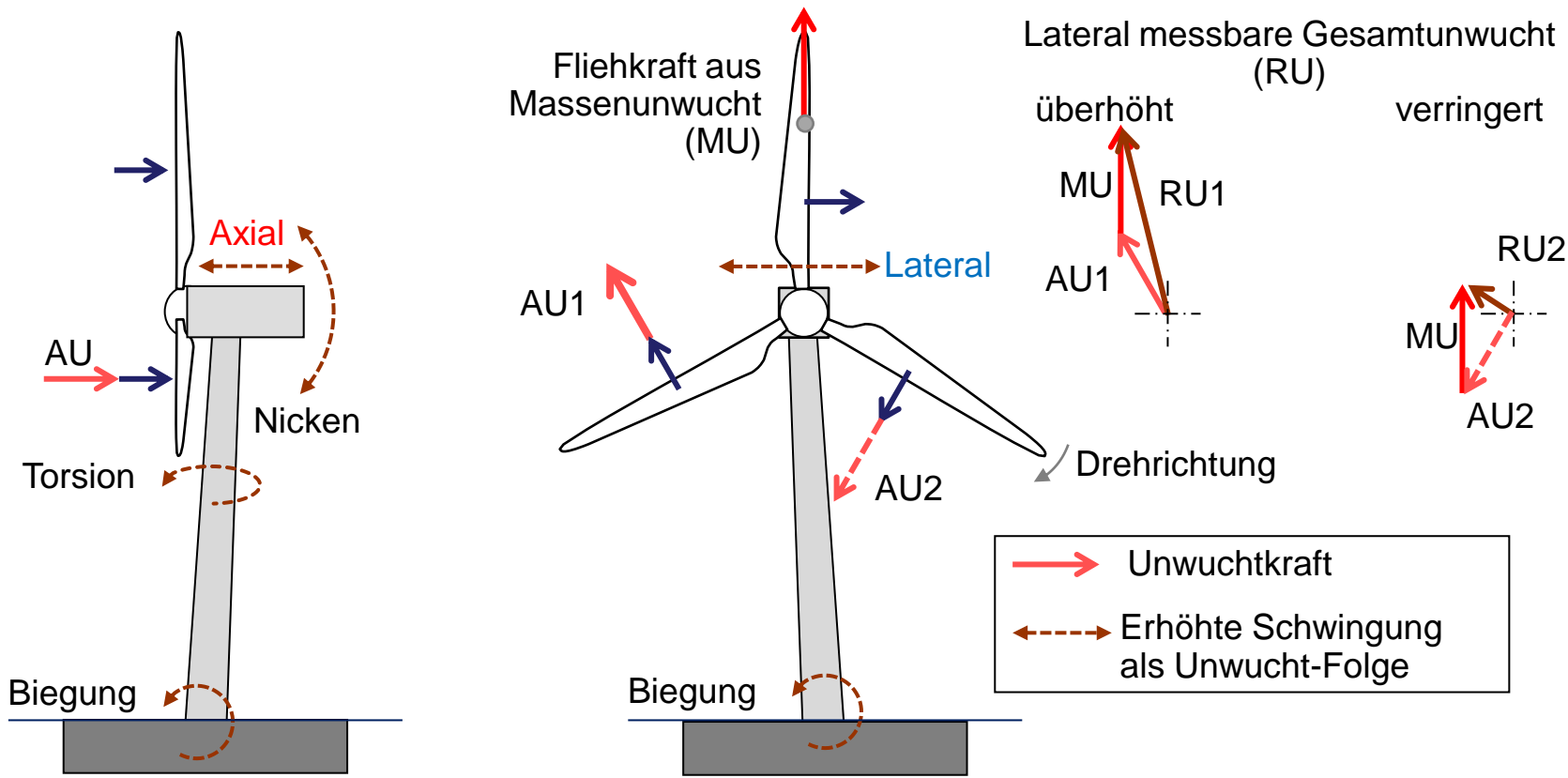
Axial

Torsion



- Erhöhte “Fußpunkterregung” aller Rotor- und Gondelkomponenten – Gondel-Erdbeben
- Erhöhte Biege- und Torsionsmomente in Turm und Fundament

Kriterium C: Unwucht-Verfälschung und erhöhte WEA-Schwingungen durch Blattwinkelfehler (AU)



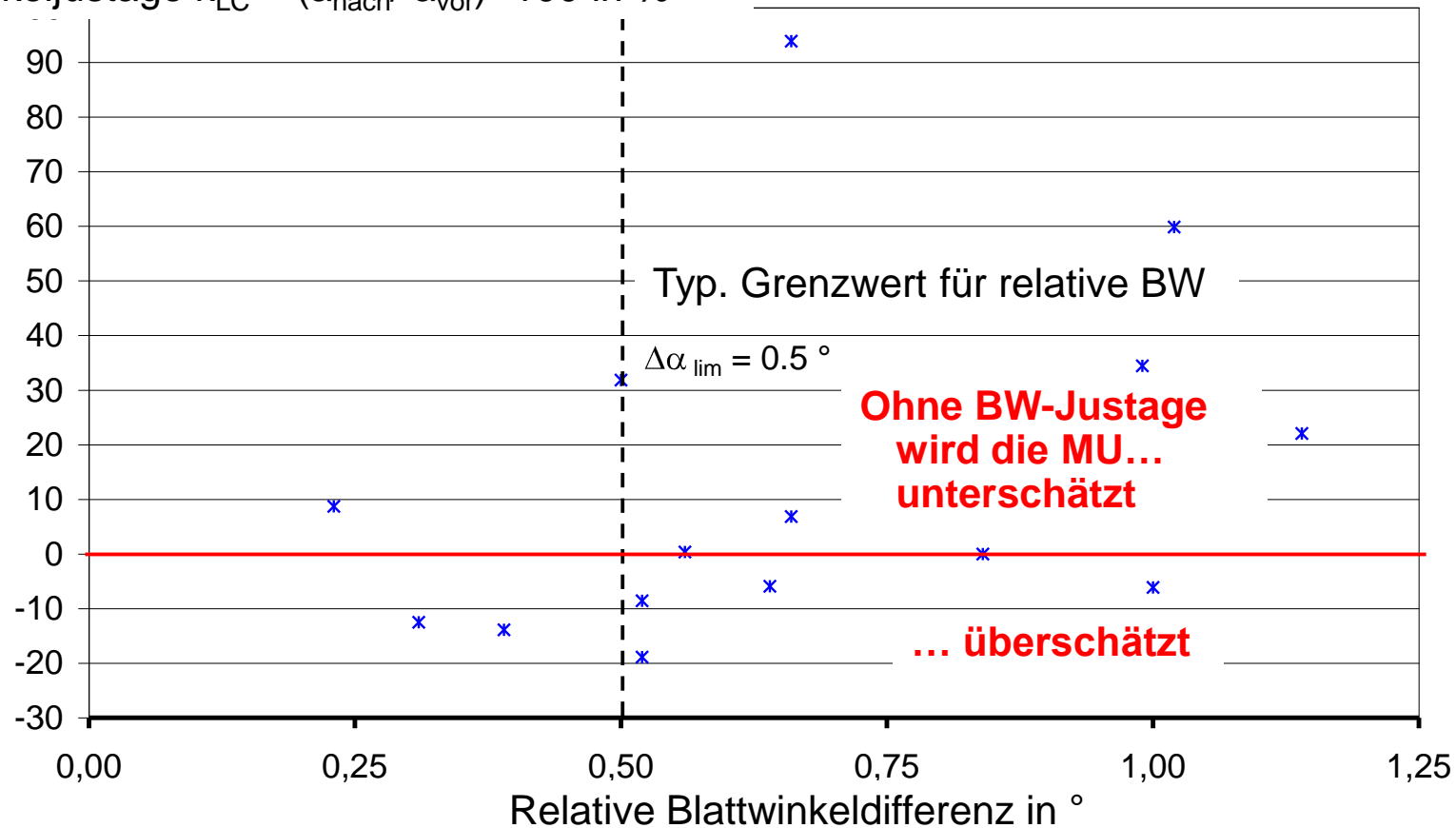
Ungleiche Schubkräfte bewirken **axiale** aerodynamische Unwucht (AU)

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

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

Kriterium C: Verfälschung der MU-Messung durch AU

Verhältnis der lateralen drehfrequenten Amplitude
(nach/vor) Blattwinkeljustage $k_{LC} = (a_{nach} / a_{vor}) - 100$ in %

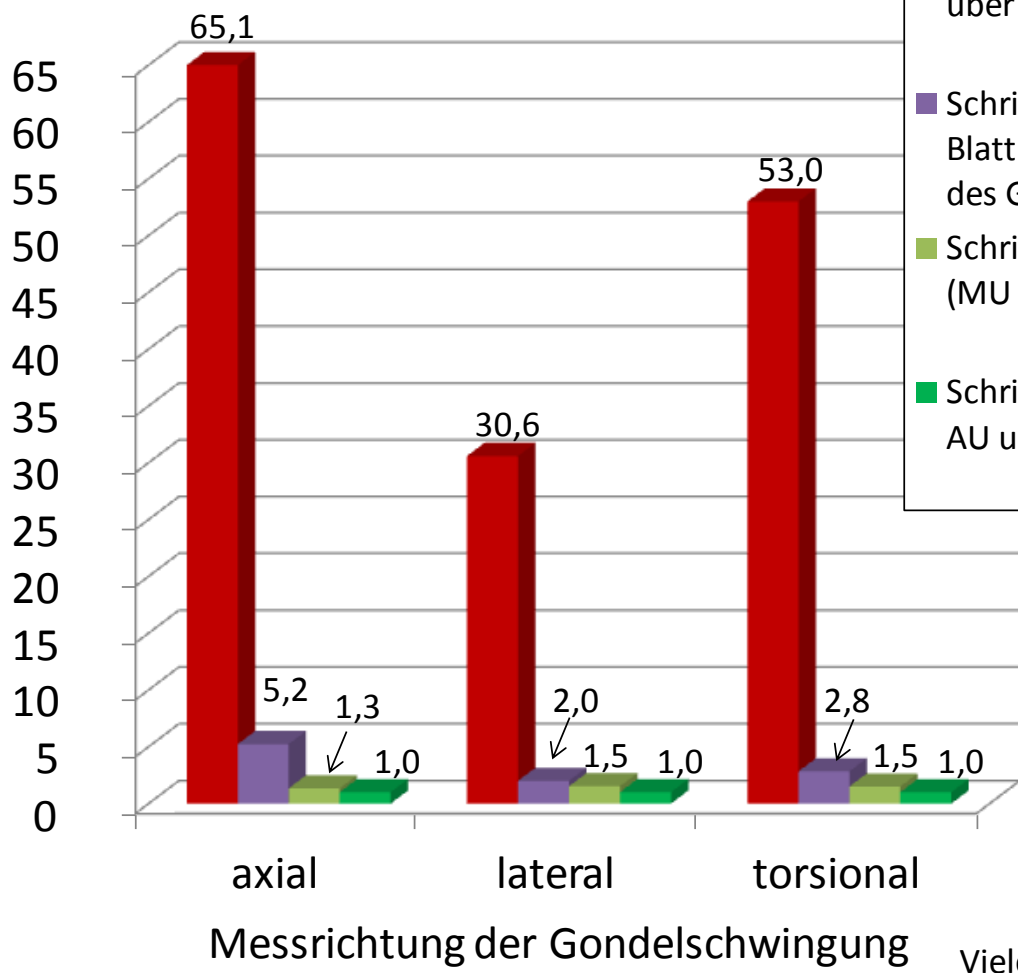


- 15 WEA desselben WEA-Typs mit variierender AU und MU (50 bis 450% des MU-Grenzwerts)
- Ohne vorherige Blattwinkeleinstellung unregelmäßige MU-Verfälschung, kein Muster erkennbar

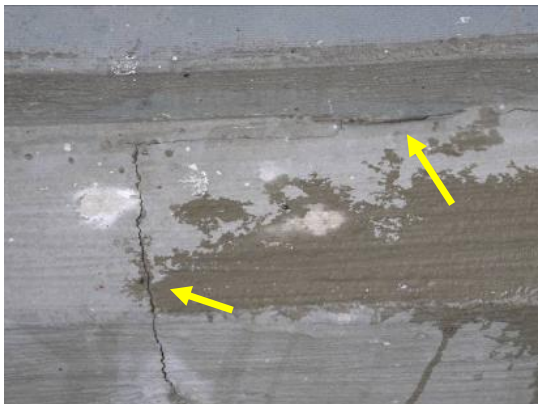
Durch Blattwinkelfehler bei Multi-MW WEA Schwingungsschäden bis ins Fundament



Normierte Unwuchtamplitude
(richtungsweise normiert auf Werte nach Schritt 3)

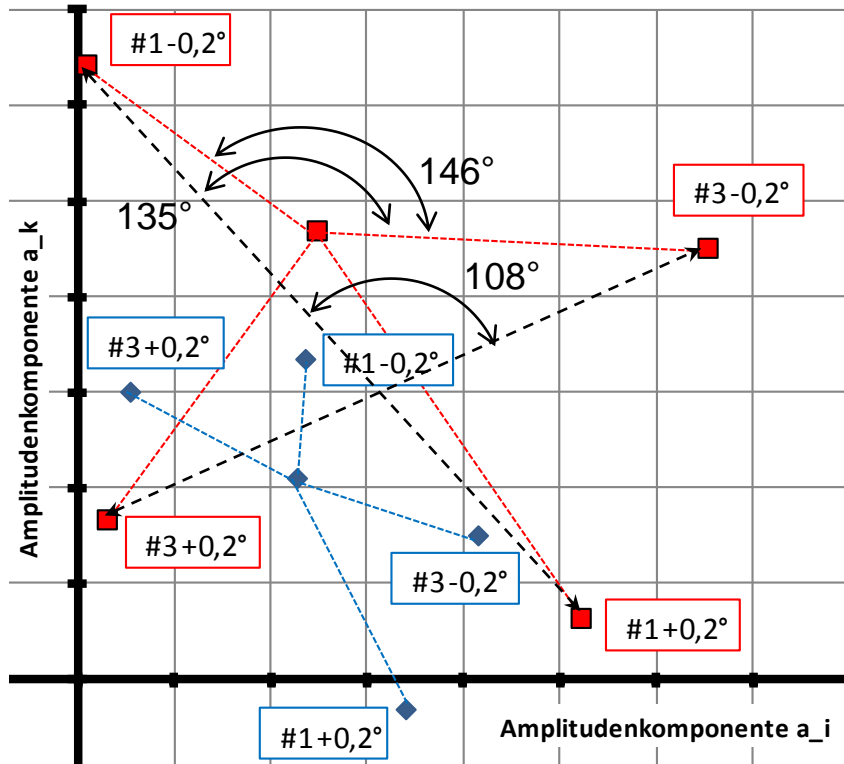


- Vor der Justage: Blattwinkeldifferenz 5,8°, über 12faches des Grenzwerts
- Schritt 1: Justage auf den AU-Grenzwert (ein Blatt 0,5°, zweites Blatt 0,2°, MU 1,5 faches des Grenzwerts)
- Schritt 2: Justage deutlich unter AU-Grenzwert (MU weiterhin 1,5 faches des Grenzwerts)
- Schritt 3: Nach Blattjustage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



Viele Fundamentrisse nach einem Betriebsjahr

Nicht-lineare Aerodynamik beeinflusst Schwingungsmessung zur Blattwinkeljustage



- Drehfrequente Amplituden und Phasenwinkel aus Ordnungsanalyse der Lateral-, und Axial-Schwingung

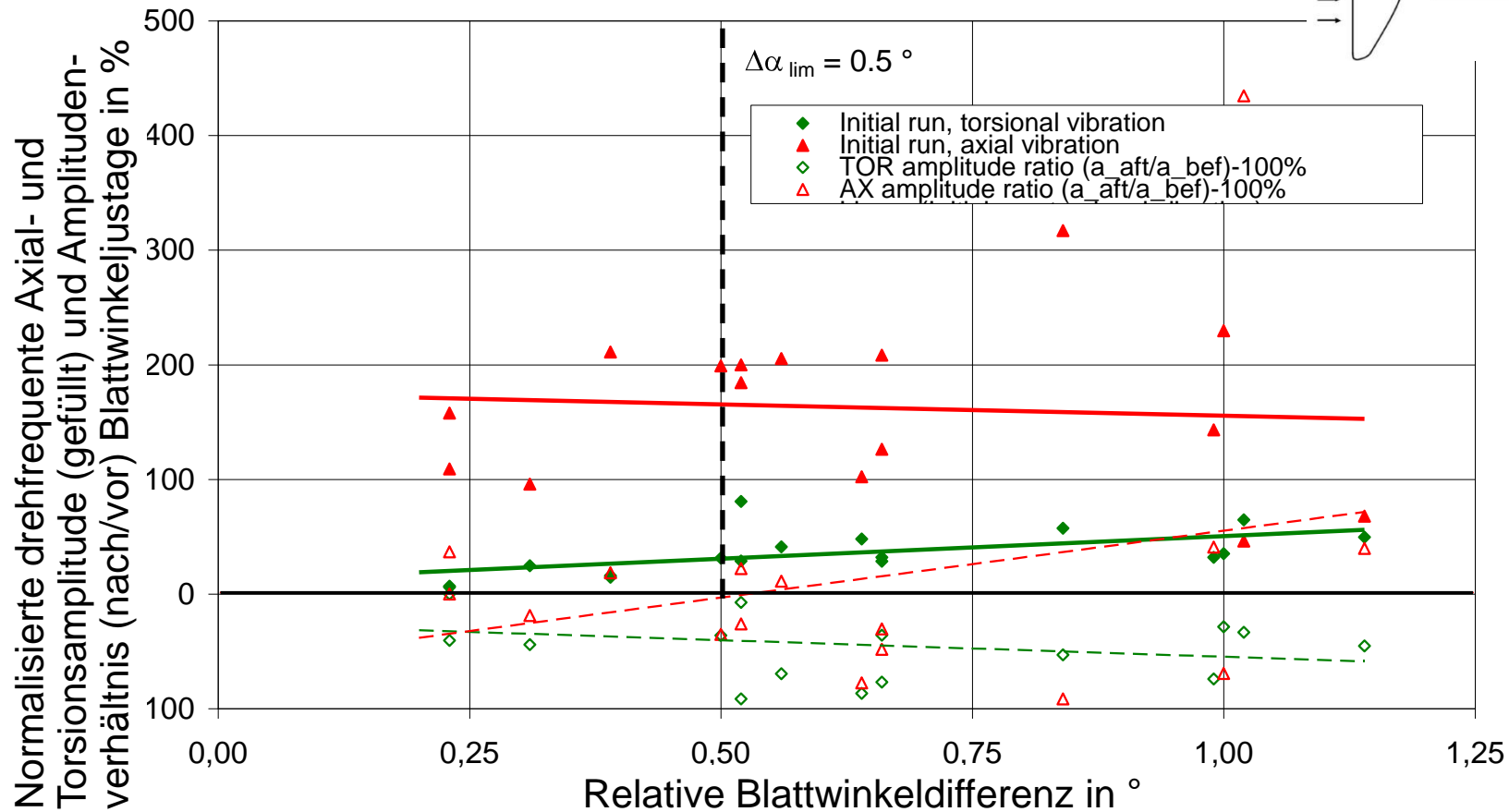
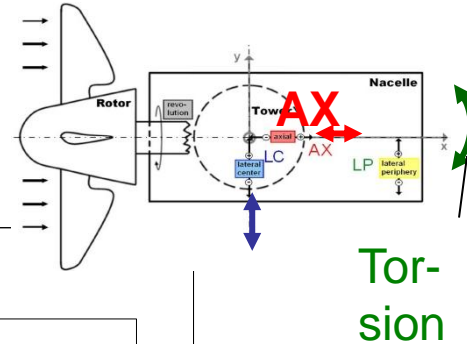
- Achsen gleich skaliert

- Erfahrungsgemäß jedoch zuverlässig:
Auswertung von Lateral-, Axial- UND Torsionsschwingung

- **Linearitätstest wie beim Bestimmen der Massenunwucht:**
 - An zwei Blättern einer Multi-MW WEA definierte Blattverstellung jeweils eines Blatts um jeweils den gleichen Betrag nach Fahne und Stall
 - „Übliche“ lastfreie Messung statistisch ausreichender Länge, alle Läufe unmittelbar hintereinander
 - Weitere Tests an 6 Multi-MW-WEA-Typen
- **Ergebnis: Testpitch an einem Blatt schafft keine Aussage über Verhalten bei anderer Pitchrichtung und beim Pitchen anderer Blätter - nicht lineares Verhalten:**
 - Skalierwert je $0,1^\circ$ variiert bis 50%
 - Gleiches Blatt: Phasendrehung ungleich 180°
 - Bei gleichem Pitch keine 120° Phasendrehung zwischen den Blättern
- **Ursachen:**
 - Verwindungs-Unterschiede der Rotorblätter
 - 3D-Windprofil und -schwankungen
 - Massenunwucht-Überlagerung usw.

Kriterium C, D: AU-Detektion: Axialsensor kein AU-Indikator, Torsion besser

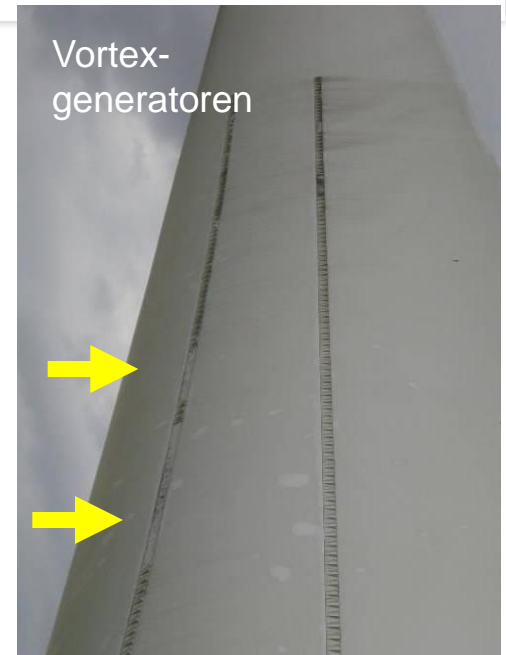
- Kein statistischer Zusammenhang zwischen Axialschwingung und relativer Blattwinkeldifferenz
 → 2-Sensor-Schwingungsmesssystem ungeeignet für AU-Diagnose
- Geeigneter: Torsionsschwingung reagiert eindeutiger auf Verstellung



Kriterium D: Ursachengerecht Handeln - auch das verursacht AU+MU

- Eis
- Blatt-Erosion
- Fehlende oder falsch installierte Strömungselemente (0,5 m in Schwingung sichtbar)

BERLINWIND



Vorderkantenerosion = (AU + MU)

Vereisung = Temporäre (AU + MU)

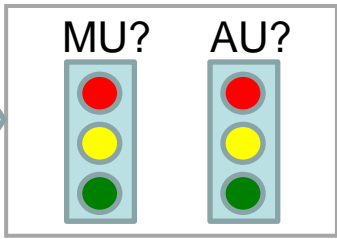
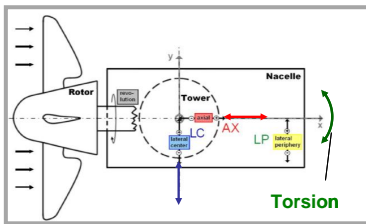
Abhilfe:

Abtauen, Reparieren,
Schwingungsprüfung und Auswuchten

Optimierte Gesamtstrategie: Schwingungsmessung plus optische Blattwinkelmessung



Schwingungsmessung zur WEA-Unwuchtprüfung bei definierten Messbedingungen auf MU und AU + Visuelle Prüfung auf andere Auffälligkeiten



MU- und AU-Kennzahlen

Aufnahme von Fotoserien

Blattwinkelgrenzwert, Design-Blattwinkel

Statistische Auswertung

Blattjustage notwendig?

Schwingungsmessung zur Qualitätskontrolle und MU-Prüfung

Blattwinkeljustage

Schwingungsmessung Rotor-Urzustand

Anbringen MU-Kalibriermasse

Schwingungsmessung zur MU-Bestimmung

Anbringen der Ausgleichsmassen

Schwingungsmessung zur Qualitätskontrolle

Kosten-Nutzen-Verhältnis im WEA-Leben von Blattwinkeljustage und Auswuchten



„Worst case Unwucht-Folgekosten“ mit 5 betroffenen WEA und BW-Ertragsverlust 40T€ p.a., 2 WEA fallen 2 Jahre eher aus

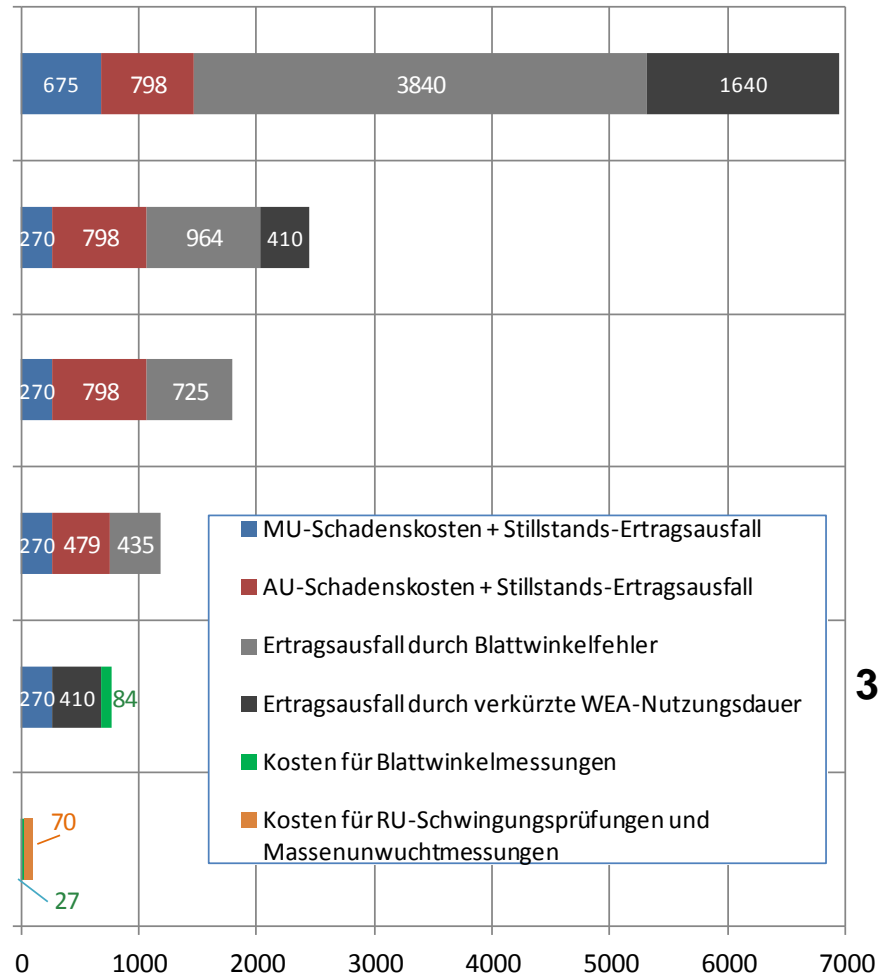
„Moderate Unwucht-Folgekosten“ mit 5 betroffenen WEA und BW-Ertragsverlust 10T€ p.a., 1 WEA fällt 1 Jahr eher aus

„Moderate Unwucht-Folgekosten“ mit je 5 betroffenen WEA und AU-Ertragsverlust 7T€ p.a.

„Moderate Unwucht-Folgekosten“ mit je 3 betroffenen WEA und AU-Ertragsverlust 7T€ p.a.

Strategie 2: Periodische BW-Messung aller WEA, keine Schwingungsmessungen, 1 WEA fällt wegen MU 1 Jahr eher aus

Strategie 1: Optimiertes, periodisches Komplett-Wuchten (BW- und MU-Messung), häufige betriebsbedingte Unwucht



Fallstudie für Windpark 10x 2 MW Pitch-WEA mit je 410 T€ Jahresertrag

Schadens- und Ertragsausfallkosten sowie Messkosten in 20 Jahren in T€

- VDI 3834 zur allgemeinen Schwingungsbeurteilung wichtig, Nützlichkeit am Triebstrang gezeigt
- Betriebspunkt-Abhängigkeit des RMS-Werts (Wind, Leistung) gezeigt
- RMS-Wert für Bewertung von Turm-Gondel-Schwingungen nur bedingt geeignet, da keine Reaktion auf Rotorunwucht
- Zusätzliche Rotorunwucht-Messungen zur Diagnose unabdingbar
- Kriterien für WEA-Auswuchtmessungen aus DIN ISO 21940-13 ableitbar
- Bedingungen der Feldmessungen an WEA anspruchsvoll
- Qualitativ hochwertige, sichere Messverfahren notwendig und verfügbar
- Ursachengerechtes Arbeiten notwendig (Erosion, AU, temporäre MU, reale MU)
- Schwingungsmessungen zur Qualitätssicherung
- Messkosten weit unter den vermiedenen Kosten (Ertragsausfall und Schäden)
- **VDI3834-aktuell: Arbeit an Blatt 2: Getriebelose WEA:
Herzliche Einladung zur Mitarbeit, v.a. Bedarf an Messdaten**

Auch mehr zum Thema:

Berlinwind-Whitepaper zum Rotorauswuchten und Blattwinkelmessung
im Portal www.windindustrie-in-deutschland.de

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>