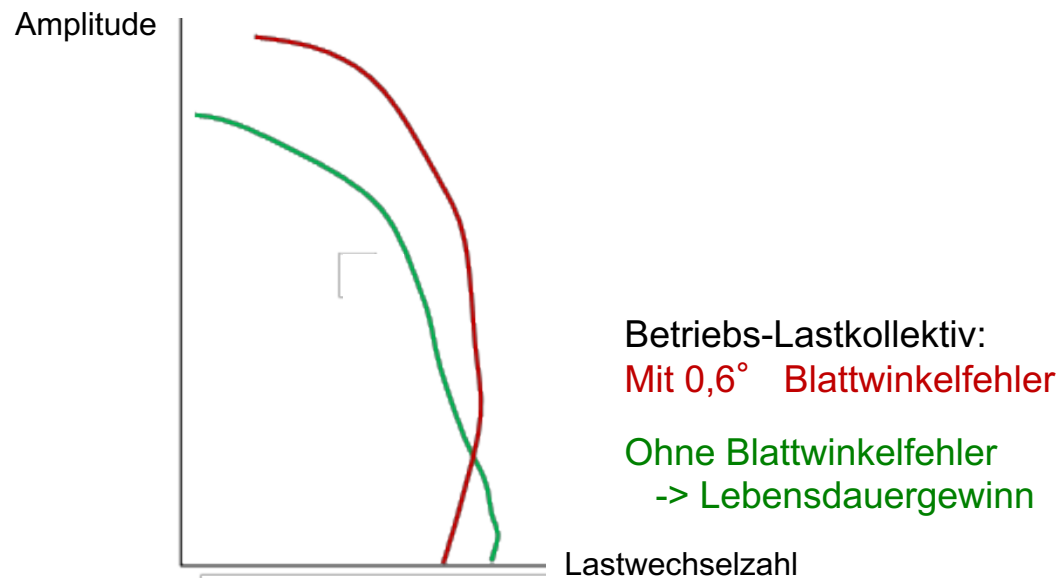


Lebensdauerertrag durch Auswuchten



28. Windenergietage, 6. November 2019, Linstow
Forum 12, Weiterbetrieb hat viele Seiten

BerlinWind GmbH, Bundesallee 67, 12161 Berlin, Germany

www.berlinwind.com



[Windenergietage.de]

Gründung 2009, Strategische Partnerschaften mit mehreren Firmen weltweit

Ingenieure mit Windenergie-Erfahrungen seit Mitte der 1990er

Unabhängige Sachverständige: Mitglied des BWE-Sachverständigenbeirats + AK Weiterbetrieb

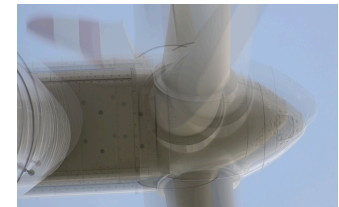
Mitglied im **VDI-Fachausschuss** der Richtlinie VDI 3834 zu WEA-Schwingungen (mit WEA-Auswucht-Anhang)

Weltweite Dienstleistungen

- Blattwinkel- und Massenunwucht-Messungen: 2000+ WEA, 80+ WEA-Typen, 7 Offshore-WEA-Typen
- Spezial-Messungen: Lasten, Schwingungen, Blatt-Turm-Freigang, Modal-Messungen
- Technisches Consulting, Ursachenanalysen, Performance-Optimierung

In-house FuE für hochwertige Messungen an WEA

- 18+ Jahre Rotorunwucht-Messungen + Lastmessungen (BalancingBox)
- 13+ Jahre photometrische und laser-basierte Blattwinkelmessungen (ContourBox)
- 6+ Jahre videobasierte Schwingungsanalyse
- 4+ Jahre Dauer-Lastmessung an 600 kW-WEA (MultiBox, 17-Kanäle)



Messungen und ihr positiver Beitrag für den Weiterbetrieb



Mess-Einsatzbereiche (nach BWE-Weiterbetriebs-Grundsätze, neue Fassung 2017)

1. Ermittlung standortspezifischer Einwirkungen (Wind, Meteorologie)

Z.B. große Windparks mit eigenem Messmast oder temporäre Windmessung

2. Bestimmung von WEA-Parametrierung und Struktureigenschaften

Eigenfrequenzen, Dämpfung, Kennlinien (Leistung, Drehzahl, Pitch),
Unwucht, Blattwinkel, Resonanz-Ausblendung, ...

3. Geometrie- und Materialeigenschaften

Turmgeometrie, Neigung, Materialproben, ...

4. Zustandsüberwachung

CMS an Triebstrang, Blatt, Struktur, Rissüberwachung, ...

5. Messung von Betriebslasten

a) *zeitweise*, z.B. Eingangsdaten für analytischen Teil, Validierung von Simulationsannahmen und lastmindernden Maßnahmen

b) *dauerhaft* → Lebensdauerverbrauch

- Aktuelle Normen beachten, QM-System nachweisen,
- Anforderungen an Sachverständige erfüllen

WEA-Auslegung mit Grenzwerten für Massenunwucht, Blattwinkelfehler und Gondelfehlausrichtung

WEA-Zertifizierung/Typenprüfung beinhaltet Definition und Anwendung von Grenzwerten in Betriebslasten-Rechnung für 20jährigen Betrieb, Werte ungünstig überlagert permanent eingerechnet

Falls nicht an der individuellen WEA gemessen, werden diese in der Analytik der BPW verwendet!

1. Massenunwucht des Rotors

Je WEA-Typ individueller Grenzwert für Massenexzentrizität des Rotors in kg^*m

...oder relativer Wert bezogen auf statisches Moment des Rotors, oft aber nicht immer 0,2%, oft Grenzwert von WEA höher als der der Blatt-Wiegeprotokolle, weil eben montierter Gesamt-Rotor

2. Absolute Blattwinkelabweichung

Je WEA-Typ individueller Grenzwert.

Oft verwendet, aber nicht immer $\pm 0,3^\circ$ vom Blattwinkel-Sollwert am Referenzradius nach GL2010, d.h. für relative Blattwinkeldifferenz 0,6° (zusätzlich auch Blattverwindungs-toleranzen und mehr)

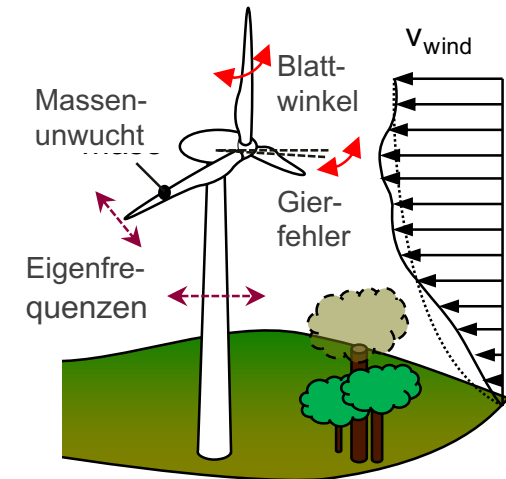
3. Gondelfehlausrichtung /Gierfehler

Abweichung zwischen Windrichtung und Rotorachse z.B. $\pm 8^\circ$, nach DIBt-Richtlinie 2012

Weiterhin:

Vorgaben zu Parameter-Untersuchung für Turm-Eigenfrequenz-Bereich sowie mögliche Resonanzeffekte zwischen Turmeigenfrequenz und Rotordrehzahl bzw. Blattpassage („verbotener Drehzahlbereich“)

Bezüge: DIN EN 61400-1, DIBt-Richtlinie 2012, GL2010, neuere DNVGL-Richtlinien usw.



Warum höhere Lasten der individuellen WEA als bei der WEA-Auslegung?

1. Vereinfachungen und Fehler bei der Auslegung

Programmierfehler, Vernachlässigung von Lastkomponenten, zu grobe Rechenschrittweite (z.B. Windgeschwindigkeit), neue Materialien, bisher unbekannte Physik, fehlende Erfahrung der Windbranche / Mitarbeiter

2. Abweichende externe Standortbedingungen

Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität, Windprofil, Windparkeffekte (Nachlauf), Geländekomplexität und -änderungen, Vereisung, Netzausfälle und Abschaltungen, späterer Zubau

3. Abweichungen der individuellen WEA und ihres dynamischen Verhaltens von der Auslegung

Geänderte Struktureigenschaften, **Parametrierung, Konfiguration, Kennlinien (Pitch, Leistungskurve)**, unerwartete Phänomene (z.B. Resonanz mit Turmeigenfrequenz), Material, Geometrie

4. Abweichender Rotorzustand

Massenunwucht, Blattwinkelfehler, Gondel-Fehlausrichtung, Vortexgeneratoren, Dämpfer, Erosion, Vereisung, Twistverlauf

5. Fehlende korrekte Ursachenanalyse bei wiederholt auftretender Schäden

...mit folgender struktureller Vorschädigung

6. Vorgeschädigte Struktur

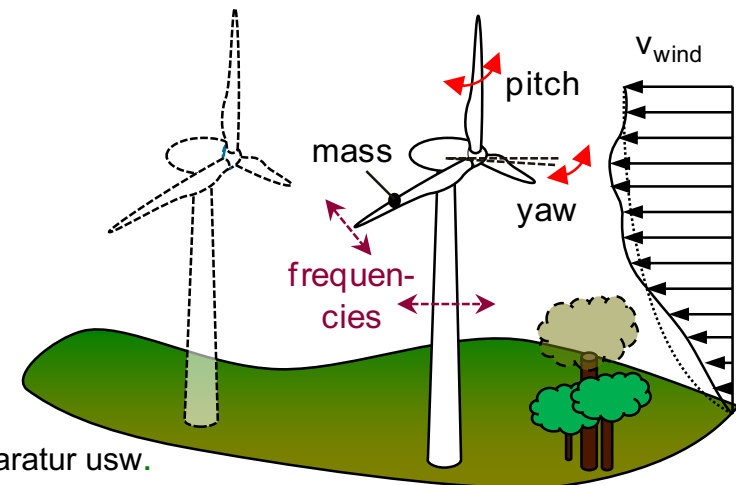
mit beschleunigter Materialermüdung nach Extremereignissen

7. (Verzögerte) Wartung und Reparatur

z.B. abgenutzte Azimutbremsen, lecke Pitch-Hydraulik, größere Blattreparatur usw.

8. Ersatzteile mit anderen Eigenschaften

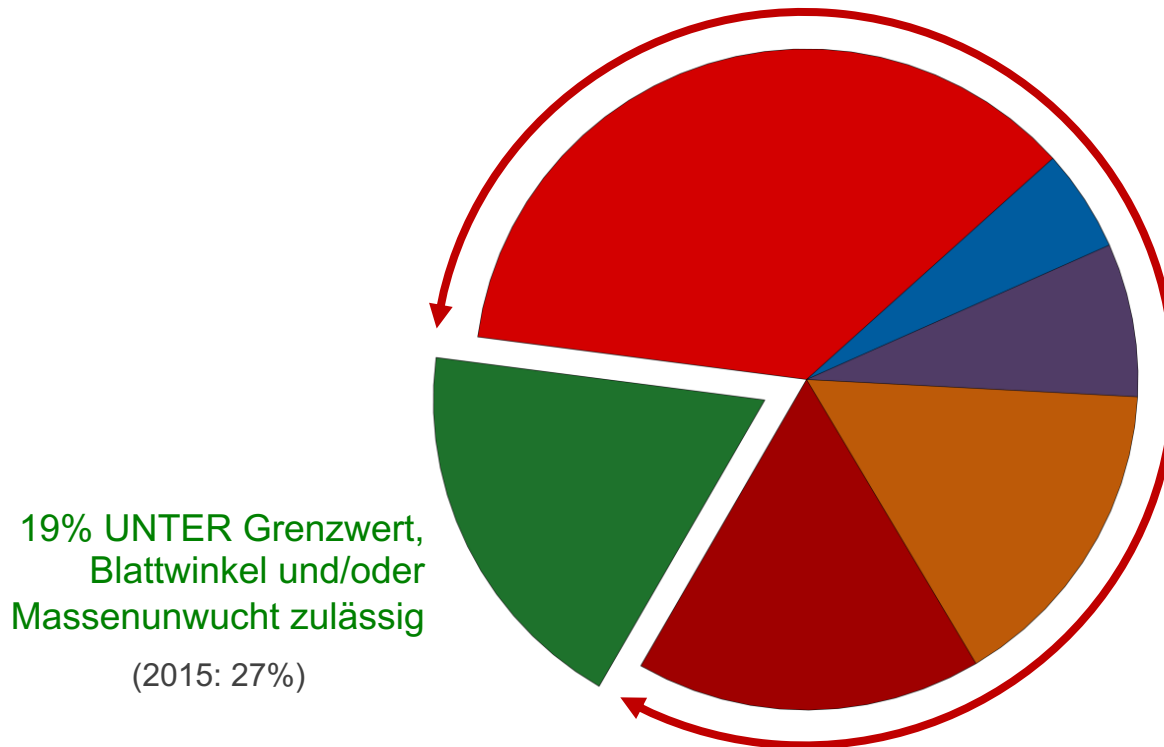
Originalersatzteile - aber Fertigungstoleranzen oder gebrauchte/gänzlich andere Teile....



Grün = beeinflussbar!

Statistik Rotorunwucht 2018, im Durchschnitt betroffene WEA

BERLINWIND



**81% ÜBER Grenzwert,
Blattwinkel und/oder
Massenunwucht unzulässig, d.h.
erhöhter Lebensdauerverbrauch**

Potenzial für

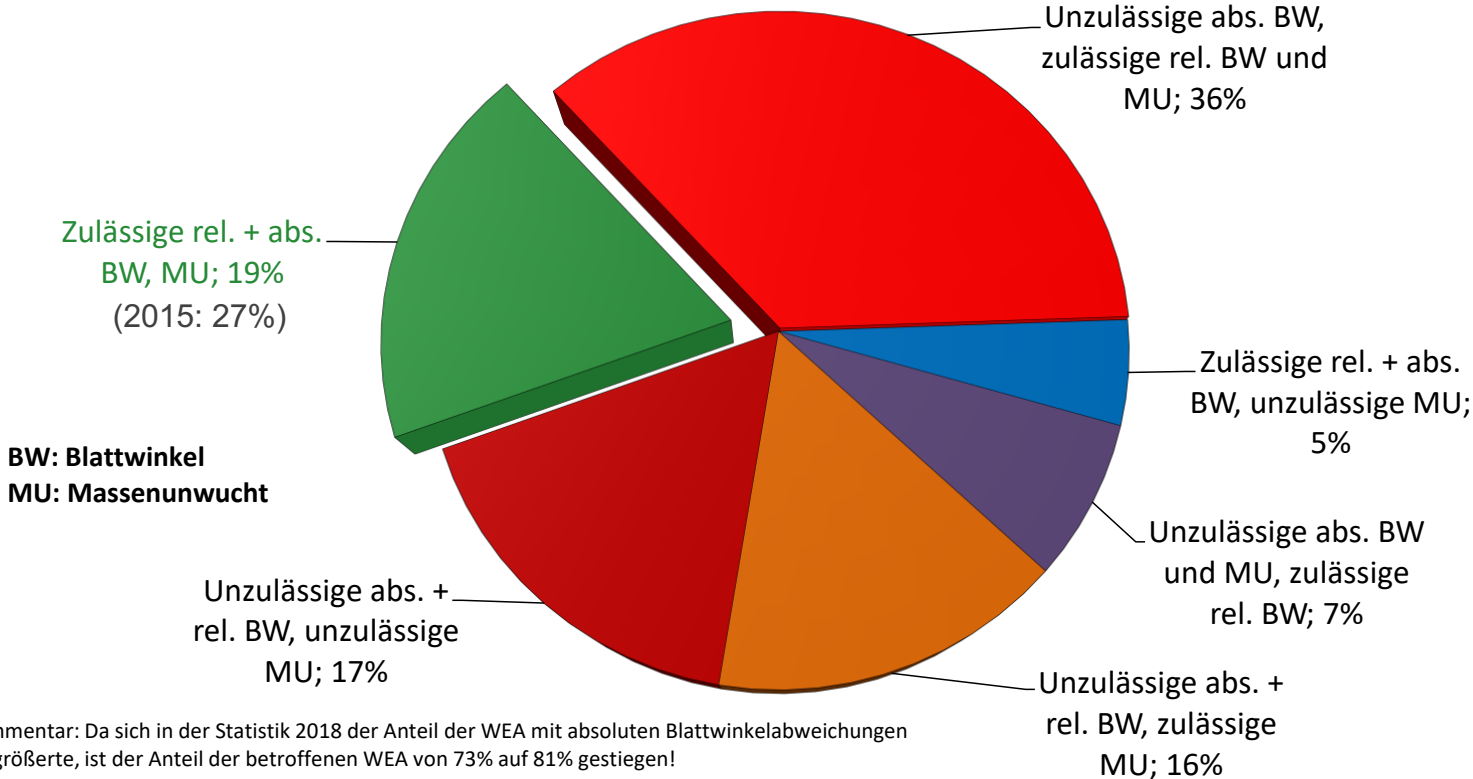
- Leistungskurvenverbesserung
- Reduktion von vibrations- und ermüdungs-bedingten Stillständen/Schäden

- Bei 81% wird realer Lebensdauerverbrauch unterschätzt, wenn in Analytik zum Weiterbetrieb Grenzwerte aus Typenprüfung verwendet werden, insbesondere, wenn Blattwinkelabweichung so groß, dass Stall auftritt
- Qualitätsmangel „Unzulässige Rotorunwucht“ nimmt zu – Wieviel UNNÖTIG erhöhte Schwingung mute ich meiner WEA zu?
- Selbst in 2018 bei Neuaufstellungen Blattwinkelfehler über 1° sowie mehrere Tonnen-Meter Massenunwucht
- Teilweise gravierende Turm- und Fundamentschäden in 2 Jahren, viele mit den Jahren auftretende Ermüdungsschäden

Statistik Rotorunwucht 2018, im Durchschnitt betroffene WEA, Details



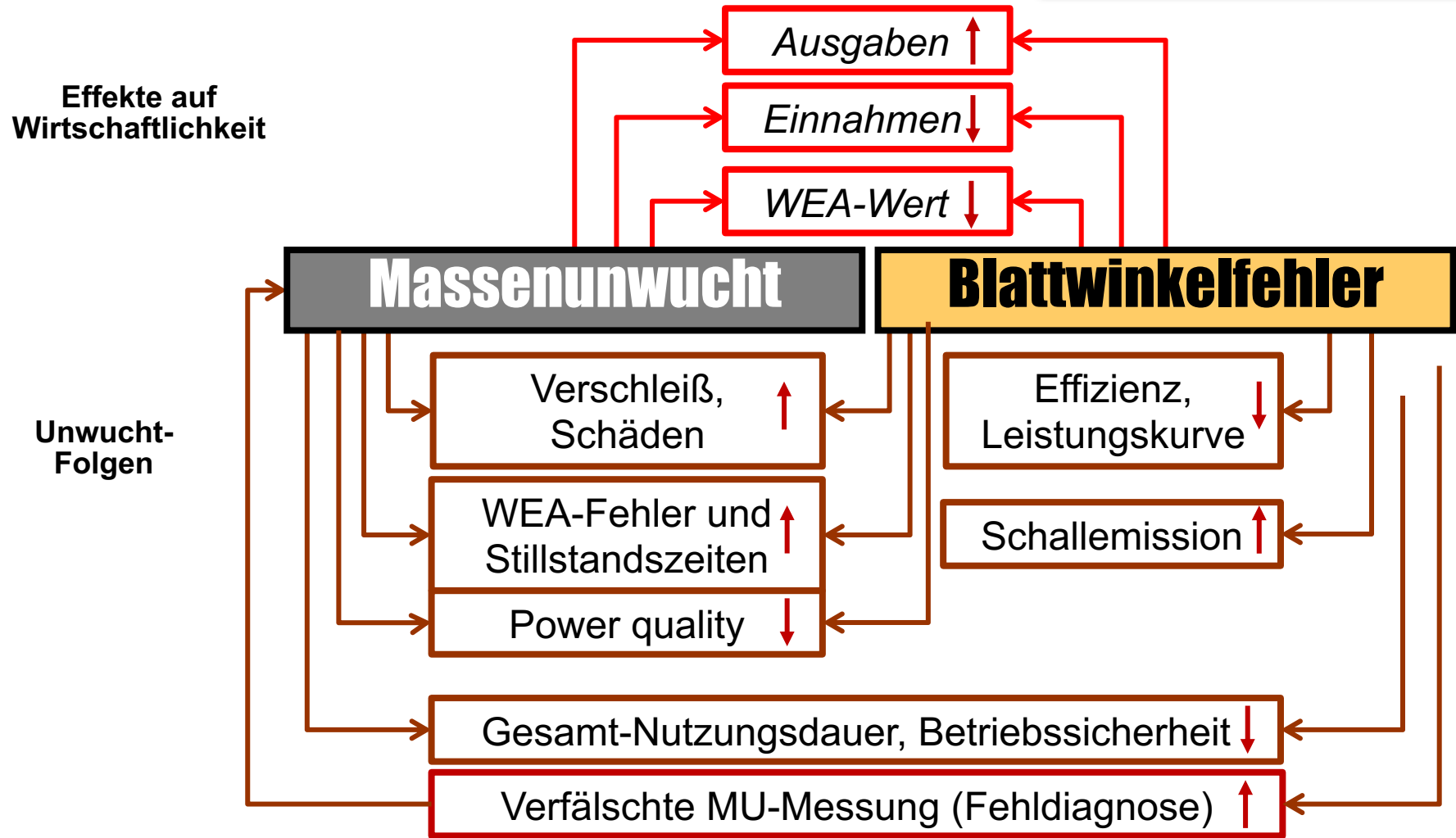
Statistik zu relativen und absoluten Blattwinkelfehlern und Massenunwucht bei WEA-Rotoren: Kombination der verdachtslosen Statistik 2013 zu MU und rel. BW (239 WEA) und der Statistik 2018 zu rel. und abs. BW (500 WEA)



Kommentar: Da sich in der Statistik 2018 der Anteil der WEA mit absoluten Blattwinkelabweichungen vergrößerte, ist der Anteil der betroffenen WEA von 73% auf 81% gestiegen!

- Rel. BW: relative Blattwinkeldifferenzen zwischen den Blättern eines Rotors, typischer Grenzwert 0,6°
- Abs. BW: Absolute Blattwinkelabweichung gegenüber dem Sollwert aus dem WEA-Design , typischer Grenzwert +/- 0,3°
- MU- und BW-Grenzwerte: Gemäß DIBt/IEC61400-1/GL2010 im WEA-Design je WEA-Typ festgelegte Grenzen, von jeder WEA einzuhalten

Negative Folgen von Unwucht auf Wirtschaftlichkeit und Weiterbetrieb



Unwucht /Blattwinkel können sich mehrmals im WEA-Leben ändern...

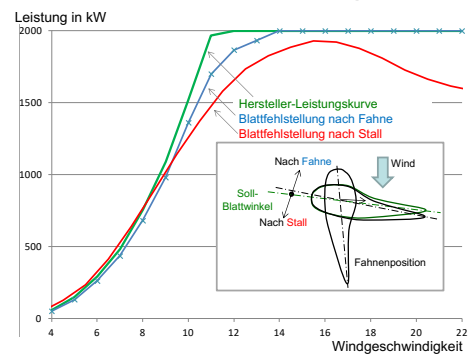
- Unwucht- und Blattwinkelprüfung ist **lebenslanges Thema ab Inbetriebnahme:**
- Ereignisse im Betrieb und/oder Änderungen an der WEA-Steuerung beeinflussen Unwuchtzustand/Blattwinkel
- Blatt-Wiegeprotokolle aus dem Werk geben nur den Zustand zum Zeitpunkt des Wiegens an, nicht den nach 1, 5, 10, 20 Jahren
- Exakte Diagnosemessungen zur **ursachengerechten Ursachenbeseitigung** notwendig
- Wichtige Auswucht-Qualitätskriterien in BerlinWind-Veröffentlichungen (Auswucht-Whitepaper beim BWE) oder auch VDI 3834-1:2015, Anhang zum Betriebsauswuchten von WEA-Rotoren

WEA-Wirtschaftlichkeit und Weiterbetrieb - ein paar Überlegungen...

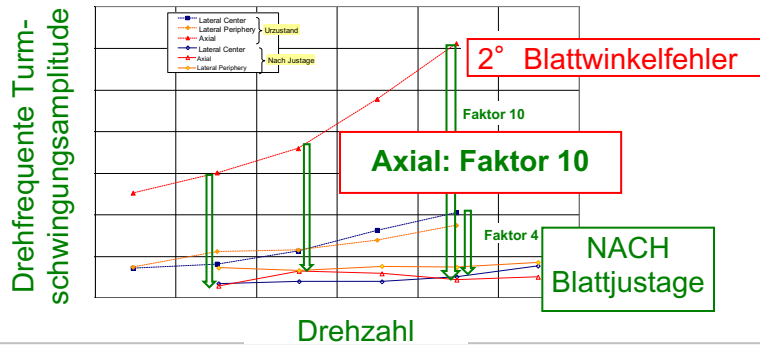


- **Strom „punkt-genau“ liefern**
- oder wegen ungeplanter schwingungsbedingter Stillstände Strom spontan woanders einkaufen müssen?
- **Mehr Ertrag am selben Standort** durch geprüfte/korrigierte Blattwinkel
- oder Minderertrag durch Leistungskurvenabweichung?
- WEA gründlich angeschaut sowie typische „Unwucht-Indikatoren“ in Betriebsdaten, Fehler-logs usw.?
- Messbarer **Unwucht-Zustand bekannt** und bei einer **Wertermittlung** berücksichtigt?
- **Planbare Betriebskosten**
- oder vermehrter Verschleiß/Komponentenschäden mit entsprechenden Kosten und Stillständen?
- **WEA-Gesamtnutzungsdauer** korrekt abgeschätzt
- oder eigentlich wegen vorhandener Unwucht erhöhter Lebensdauerverbrauch?
- **Reparatur-Nachhaltigkeit:** „Mini-Reparatur-budget“ oder auch in eine Ursachensuche und -beseitigung?
- **Sicherstellung der Basis-Konfiguration des Rotors** bevor ich zusätzliche Systeme/Add-ons/Features einbaue?

Blattwinkel-Einfluss auf Leistungskurve

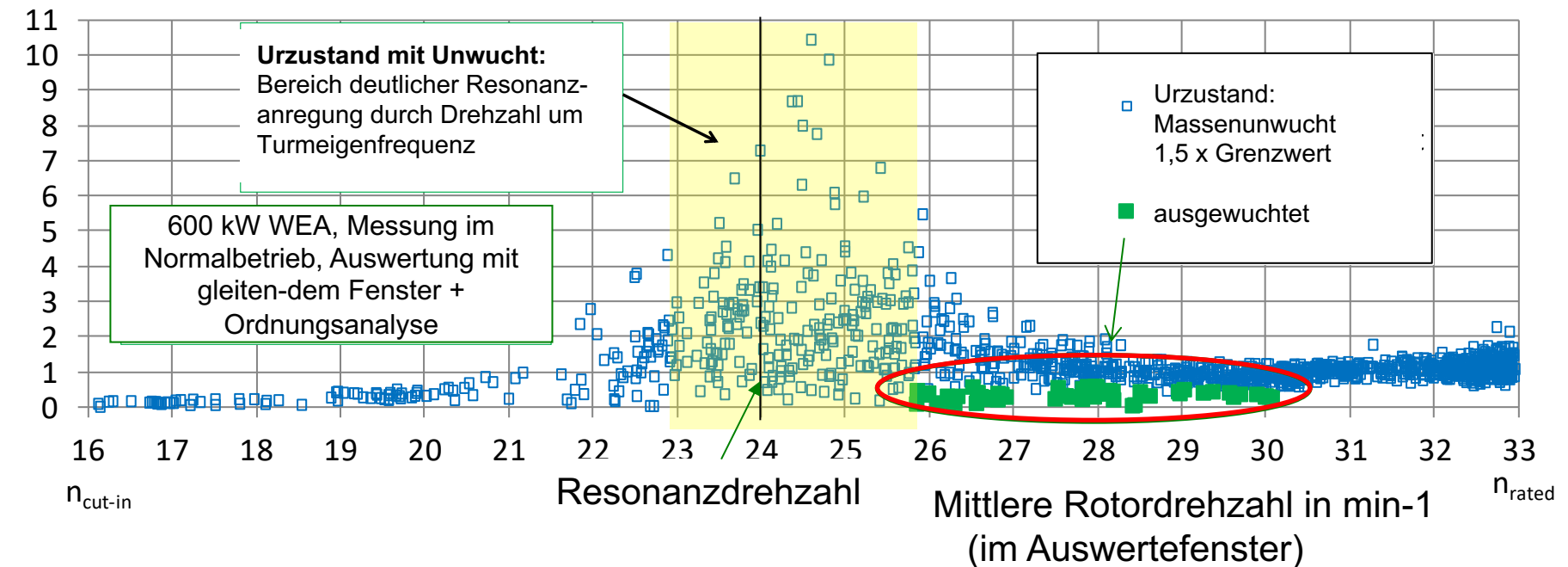


Mit dem bloßen Auge erkennbare „Stall“-Stromlinien am Blatt einer Pitch-WEA, d.h. großer Blattwinkelfehler und starke Vibrationen und Ertragsverlust



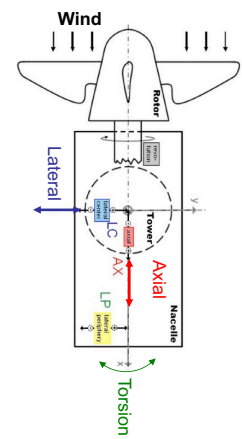
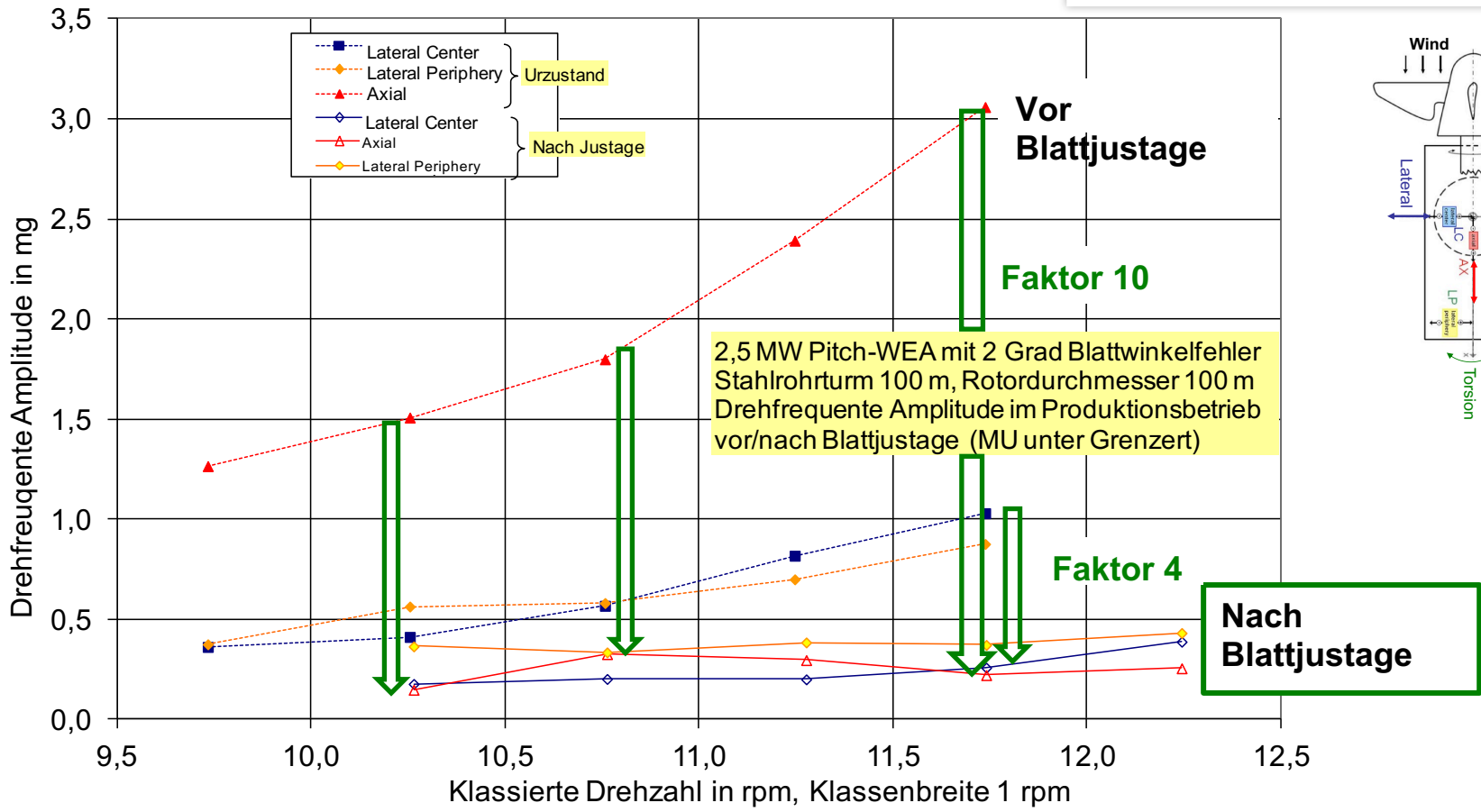
Lastärmerer Betrieb nach Unwuchtbeseitigung bei WEA-Typ mit Resonanzbetrieb

Laterale, drehfrequente Beschleunigungsamplitude



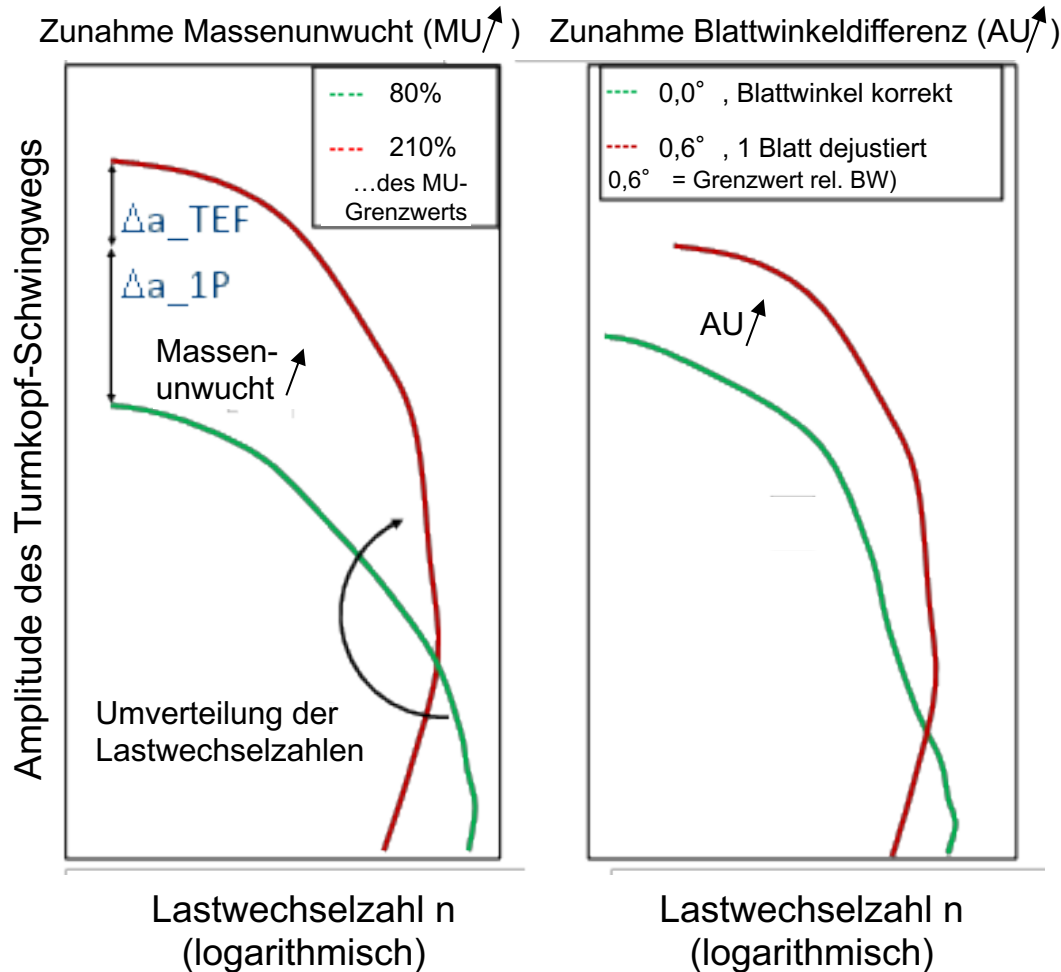
- WEA-Gesamtnutzungsdauer korrekt abgeschätzt - oder wegen unbekannter Unwucht eigentlich erhöhter Lebensdauerverbrauch?
- Massenunwucht: Ermüdungsrelevanter Grenzwert bei Auslegung, definiert und eingerechnet in Betriebslastenrechnung zur Typ-Zertifizierung
- Nach Auswuchten kein Ansteigen der Amplitude nahe der Resonanzdrehzahl

Lastenärmerer Betrieb durch korrekte, validierte Blattwinkeljustage



- WEA-Gesamtnutzungsdauer korrekt abgeschätzt - oder wegen unbekannter Unwucht eigentlich erhöhter Lebensdauerverbrauch?
- Validierung der Blattwinkeljustage per Schwingungsmessung notwendig, u.a. wegen Verwindungsunterschieden von Blättern eines Rotors!
- Moderne WEA: Sehr geringe Ziel-Amplituden 0,1 - 0,5 mg (1 - 5 mm/s²) , d.h. hochwertige Messtechnik nötig

Messbare Erhöhung der 10 min-Betriebslasten durch zunehmende Rotorunwucht

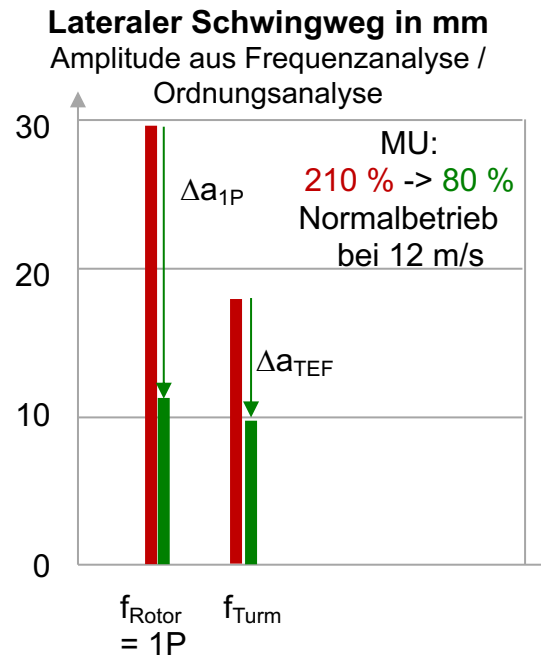


Methode:

- **Messung** der lateralen Beschleunigung in der WEA-Gondel Turmkopf im Normalbetrieb einer Multi-MW WEA für verschiedene Niveaus von MU und AU (Rotorzustand)
 - Klassierung der **10 min Zeitreihen**
 - Ermittlung von 10 min Zeitreihen mit gleichem Betriebszustand (Windgeschwindigkeit, gleiche konstante Drehzahl, etc.)
 - Berechnung Turmkopf-Schwingweg durch Integration
 - Berechnung der Turmkopf-Lastkollektive mittels Rainflow-Zählung
 - Lastkollektiv-Mittelung je Rotorzustand
 - Vergleich der Lastkollektive bei gleichem Betriebszustand und verschiedenen Rotorzuständen
- **Ergebnisse:**
- **Erfolgreiche Validierung der Lastkollektive** mittels simultaner, video-basierter Schwingwegmessung
 - **Signifikanter negativer Unwucht-Einfluss im Lastkollektiv**
 - Signifikante Zunahme der Amplituden bei Rotordrehfrequenz (Erregung 1P) und bei erster Turmeigenfrequenz (Strukturantwort TEF)
 - **Erhöhung der Maximalamplitude** des Lastkollektivs um die Summe ($\Delta a_{1P} + \Delta a_{TEF}$), Schwingungsüberlagerung („freak wave“-Effekt)
 - Bei konstanter Gesamt-Lastwechselzahl **Umverteilung der Lastwechselzahlen** von niedrigen zu höheren Amplituden

Auswuchten senkt auch simultane Turmeigenfrequenz-Amplitude

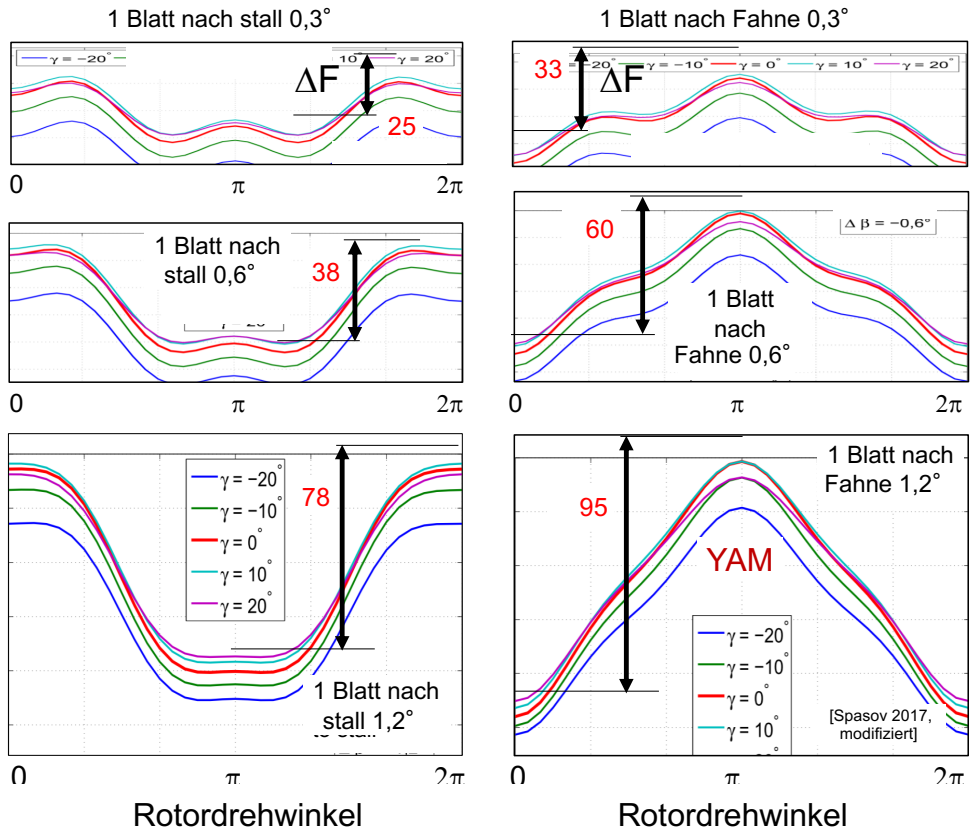
Beispiel



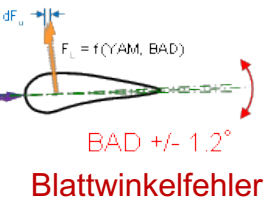
- **Maximalamplitude** des Lastkollektivs ändert sich etwa um die Amplitudensumme ($\Delta a_{1P} + \Delta a_{TEF}$)
Schwingungsüberlagerung („freak wave“-Effekt)
- **Beispiel: MU-Reduktion**
210 % -> 80 % , d.h. Faktor 2,6
MU-Wert relativ zum MU-Grenzwert
- ...bewirkt **Reduktion der Amplitudensumme um 20 mm**
($\Delta a_{1P} + \Delta a_{TEF}$) = 46 mm - 26 mm, d.h. Faktor 2,2
- Schwingweg = Turmkopfauslenkung proportional zur Turmfuß-Belastung
- **Mehr oder weniger starkes permanentes „Gondel-Erdbeben“**, schüttelt alle Gondel-Komponenten, *betreffene Komponente (schwächstes Glied der Kette) variiert*
- *Beachte: Komplexe WEA-Dynamik: Effekt variiert je nach WEA-Typ und Betriebszustand mit Drehzahl und Resonanznähe zur Turmeigenfrequenz*

„Unsichtbarer“ Blattwinkelfehler ist schlimmer als „sichtbarer“ Gierfehler

Normierte laterale Erregerkraft des Rotors, alle Diagramme gleiche Skalierung der Y-Achse



Gierfehler YAM +/- 20°



Methode:

- Analytische Berechnung der aerodynamischen Kräfte am Rotor während einer Rotorumdrehung mit BEM-Simulation: 90 m Rotor, Schnelllaufzahl 7, Rotorachsneigung 5°, typisches vertikales Windprofil
- Schrittweise Berechnung der resultierenden Lateralkraft je Rotordrehung
- Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche Blattwinkelfehler (BAD), überlagert mit Gierfehler γ (Gondel-Fehlausrichtung, YAM)
- Vergleich der normierten Kurven der Lateralkraft je Rotordrehung, insbesondere Peak-to-Peak-Werte ΔF siehe Diagramme links

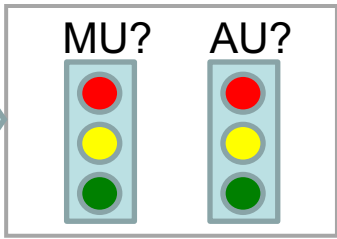
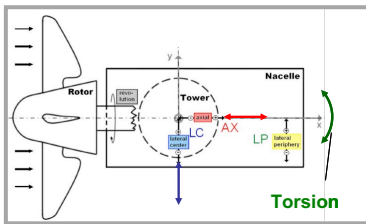
Ergebnisse:

- Bei 0,3° Blattwinkelfehler sichtbare Schwingungs-Überlagerung der Kräfte von 1P (Blattwinkelfehler) und 3P (Gierfehler)
- Blattwinkelfehler bestimmt eher den peak-to-peak-Wert, Gierfehler eher die Lage des Mittelwerts
- Bei größerem Blattwinkelfehler 1,2° Verdreifachung von ΔF , Einfluss von Blattwinkelfehler dominiert klar
- Leichter Einfluss der Richtung des Blattwinkelfehlers (stall oder Fahne)
- Unsymmetrischer Einfluss der Richtung des Gierfehlers
- Negativer Einfluss von 1,2° Blattwinkelfehler (2x Grenzwert) auf ΔF vielfach höher als der eines Gierfehlers von 20° (2,5 x Grenzwert)
- Größere laterale Ermüdungslasten durch unzulässige Blattwinkelfehler als durch große Gierfehler (Validierung durch Messung geplant)

Optimierte Kombination von Schwingungsmessung mit optischer Blattwinkelmessung



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



MU- und AU-Grenzwerte + 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**

Überblick und Methodik der Unwuchtstatistik 2018

- Statistik „Blattwinkel 2018“:
Statistische Auswertung der Ergebnisse aus **photometrischen Messungen der Blattwinkel** an 500 WEA, Messungen mit und ohne Verdacht
- Statistik „Rotorunwucht 2018“:
Kombination der Ergebnisse „Blattwinkel 2018“ mit Statistik „Rotorunwucht 2013“ aus verdachtslosen Messungen an 239 WEA zur Verallgemeinerung der Ergebnisse
- Statistik „Massenunwucht 2018“:
Statistische Auswertung der Ergebnisse aus **Unwucht-Schwingungsmessungen** an 399 WEA vor und nach Blattwinkeljustage, Messungen mit und ohne Verdacht

BerlinWind-Blattwinkelstatistik 2018 photometrische Messung an 500 WEA Rotoren, mittlere Nennleistung 2,1 MW

**43% unzulässige absolute BW,
& unzulässige relative BW**

--> signifikanter Ertragsverlust,
stark beschleunigte schwingungs-
bedingte Materialermüdung

9% zulässige BW

--> normale schwingungs-
bedingte Materialermüdung

**48% unzulässige absolute BW,
zulässige relative BW**

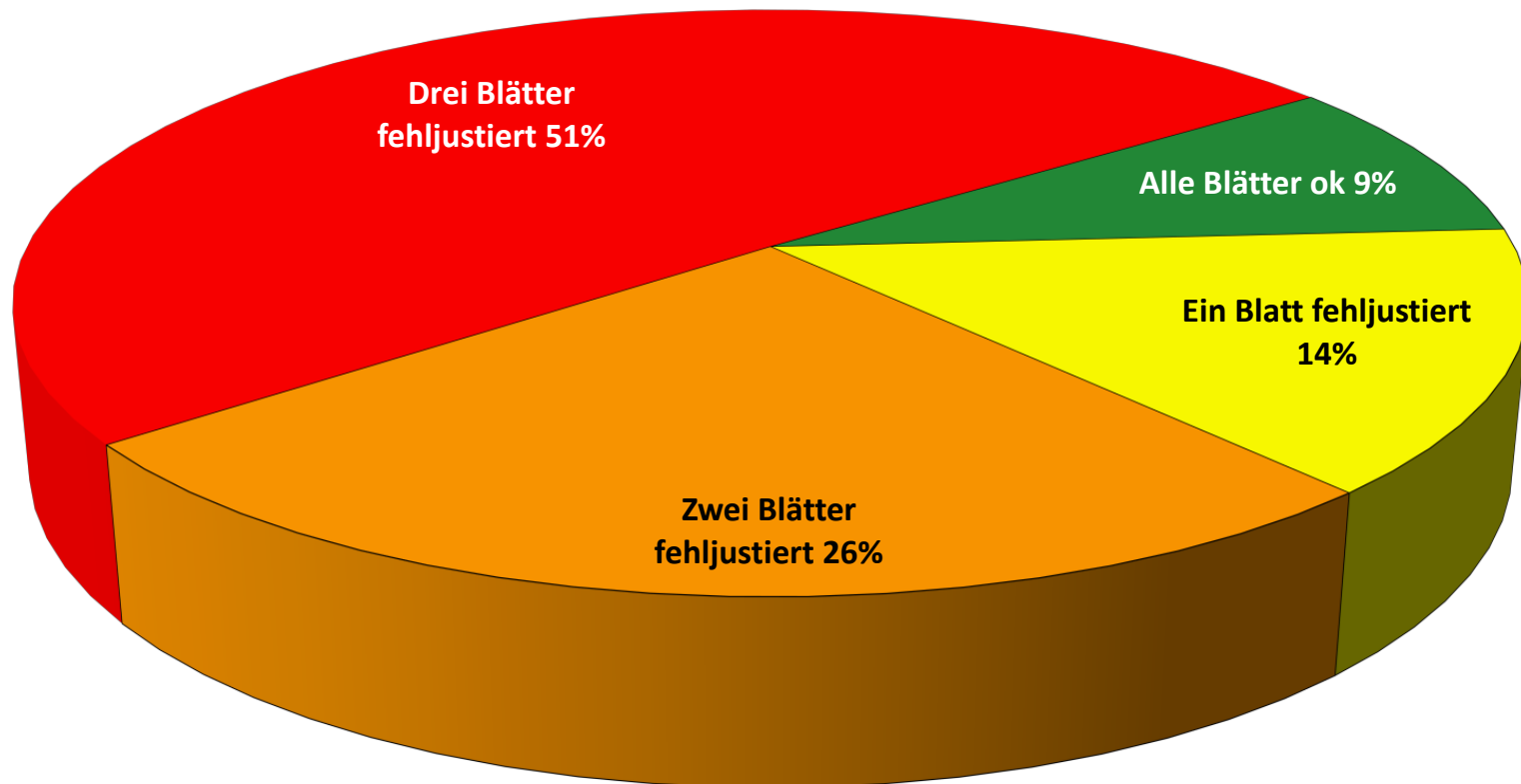
--> Ertragsverlust, beschleunigte
schwingungsbedingte Materialermüdung

- 20% der Rotoren über 1,8°
- 50% der Rotoren über 0,9°
- 50% der Rotoren mit allen 3 Blättern über Grenzwert
- Rel. BW: relative Blattwinkeldifferenzen zwischen den Blättern eines Rotors, typischer Grenzwert 0,6°
- Abs. BW: Absolute Blattwinkelabweichung gegenüber dem Sollwert aus dem WEA-Design, typischer Grenzwert +/- 0,3°
- Grenzwerte: Gemäß DIBt/IEC61400-1/GL2010 im WEA-Design festzulegende Grenzen, die jede WEA einhalten muss, sonst unzulässig

Statistik Blattwinkel 2018 – 2

Anzahl der betroffenen Blätter je Rotor

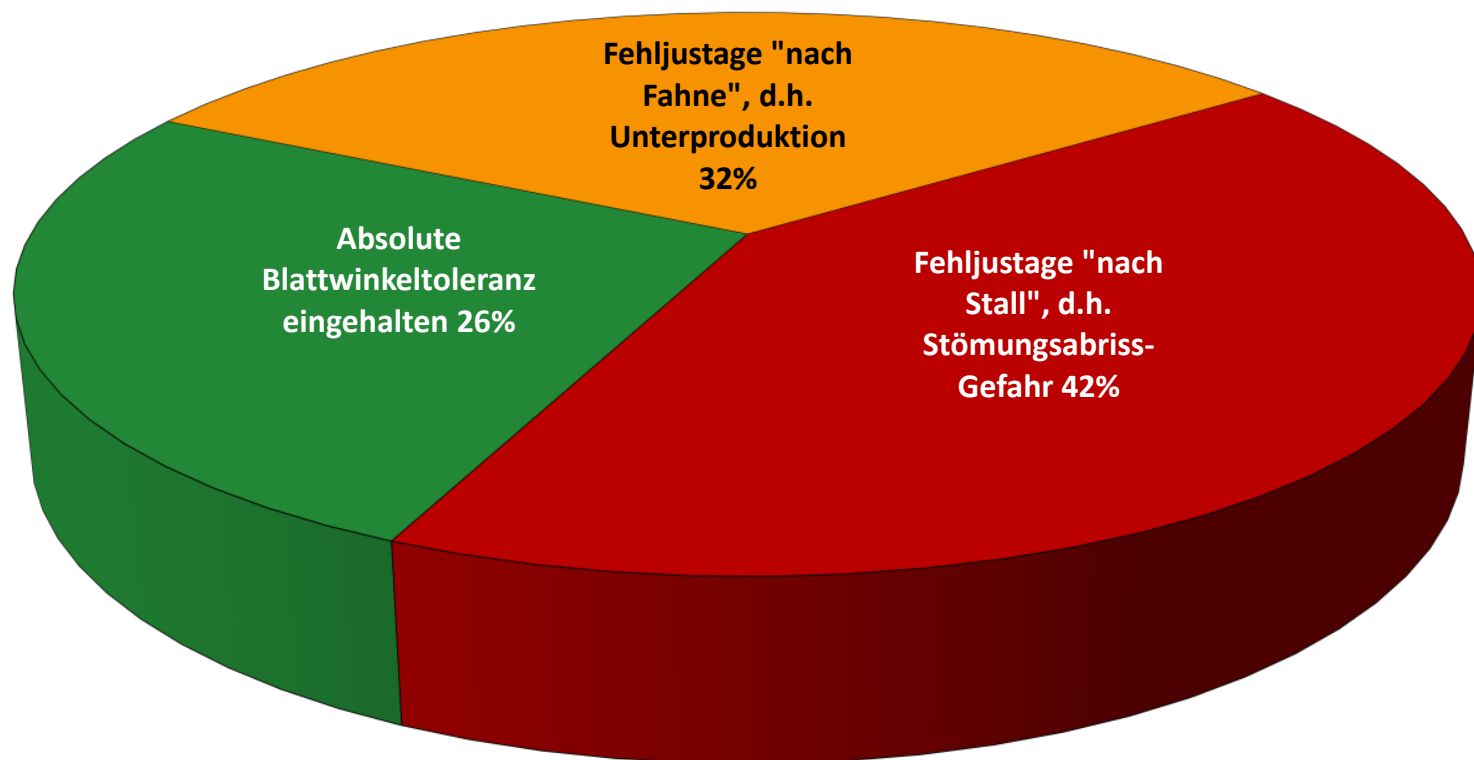
Anzahl der fehljustierten Blätter je Rotor bei 500 WEA



- Messung absoluter Blattwinkel zwingend nötig da relative Blattwinkeljustage ertrags-relevante absolute Abweichung nicht behebt.
- Bei zwei fehljustierten Blättern Gefahr, dass das dritte, „gute“ Blatt durch die Justage in Wirklichkeit ebenfalls fehljustiert wird!

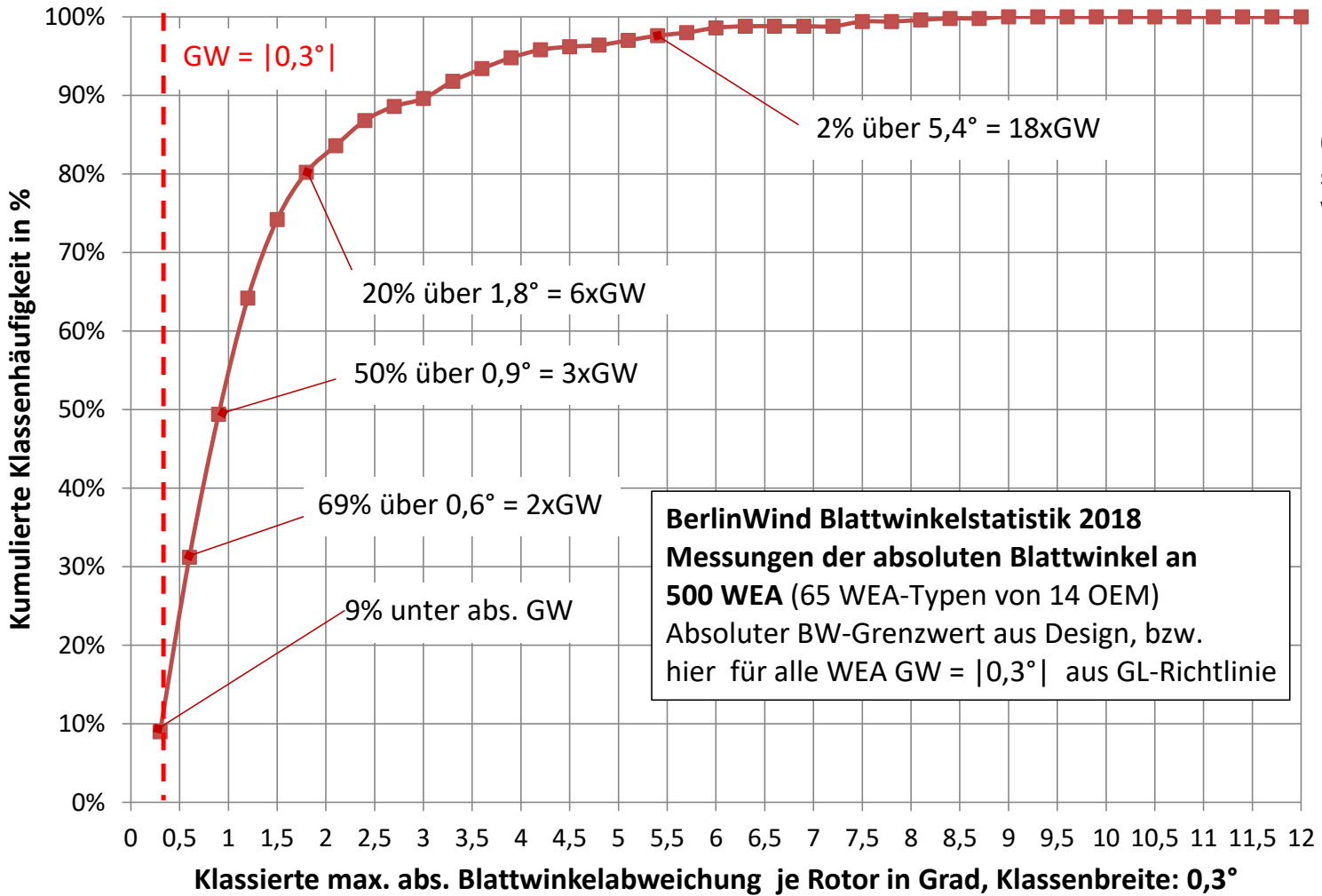
Statistik Blattwinkel 2018 – 3: Absolute Blattwinkel nach Richtung der Fehljustage

BerlinWind Blattwinkelstatistik 2018
Photometrische Messung der absoluten
Blattwinkel von 1500 Rotorblätter (= 500 WEA)



- **Fehljustage „Nach Stall“:** Gefahr von Strömungsabriss, d.h. stark erhöhte Schwingungen, Leistungseinbruch und erhöhte Geräuscentwicklung, korrekte Blattwinkeljustage -> Vermeidung von beschleunigter Materialermüdung, Minderertrag sowie Schallgutachten-bedingter Leistungsreduktion / zeitweiliger WEA-Abschaltung durch korrekte Blattwinkeljustage

Statistik Blattwinkel 2018 – 4: Häufigkeit maximale abs. Blattwinkelabweichung je Rotor

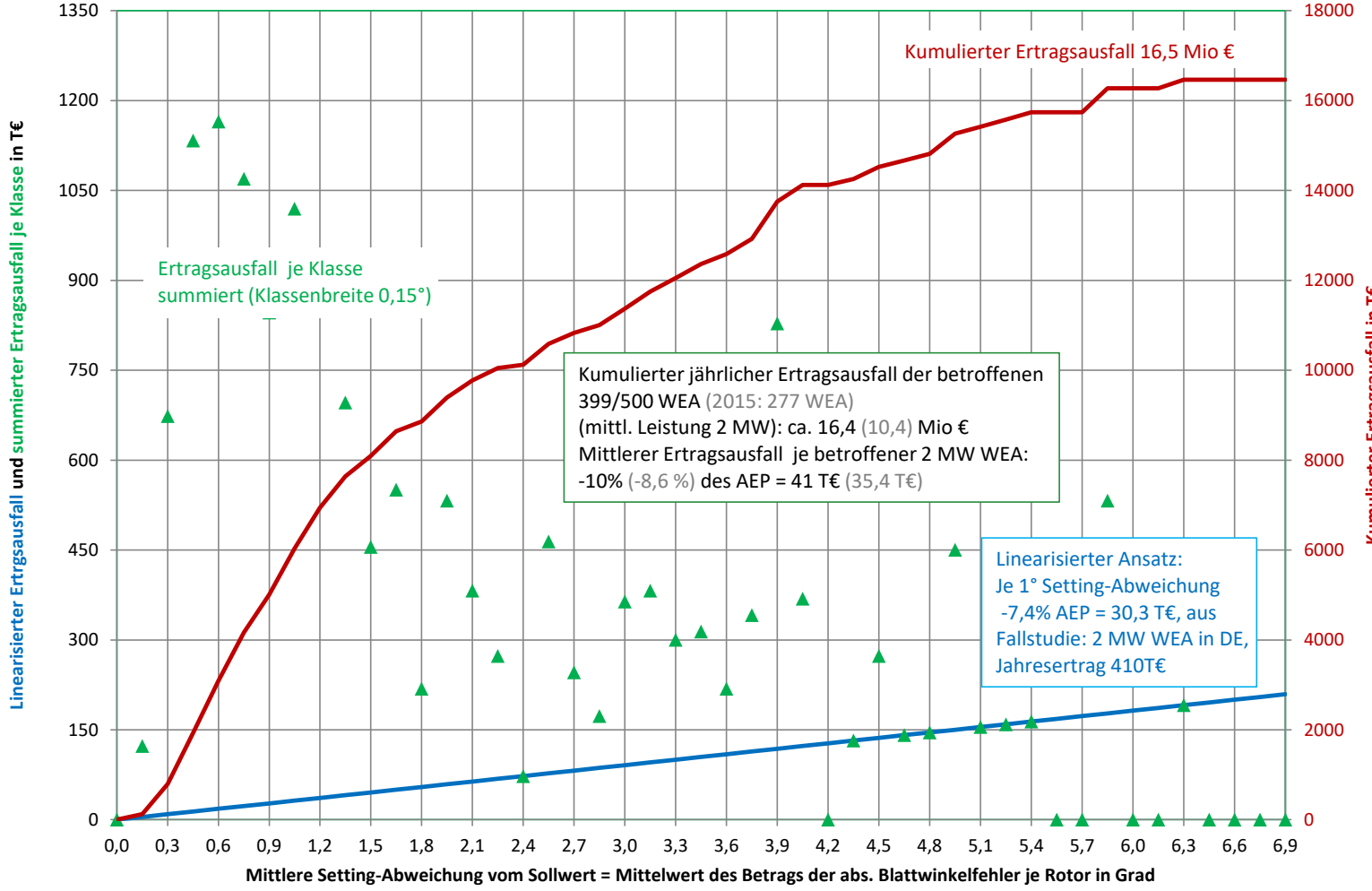


Messgenauigkeit 0,1° notwendig, sonst viele betroffene WEA nicht gefunden.

BerlinWind Blattwinkelstatistik 2018
Messungen der absoluten Blattwinkel an 500 WEA (65 WEA-Typen von 14 OEM)
 Absoluter BW-Grenzwert aus Design, bzw. hier für alle WEA $GW = |0,3^\circ|$ aus GL-Richtlinie

Statistik Blattwinkel 2018 – Fallstudie

Ertragsausfall von 2015, aktualisiert 2018



Mittlerer Ertragsausfall bei betroffener WEA pro Jahr: -10%

Beispiel: 2MW WEA -41T€/a

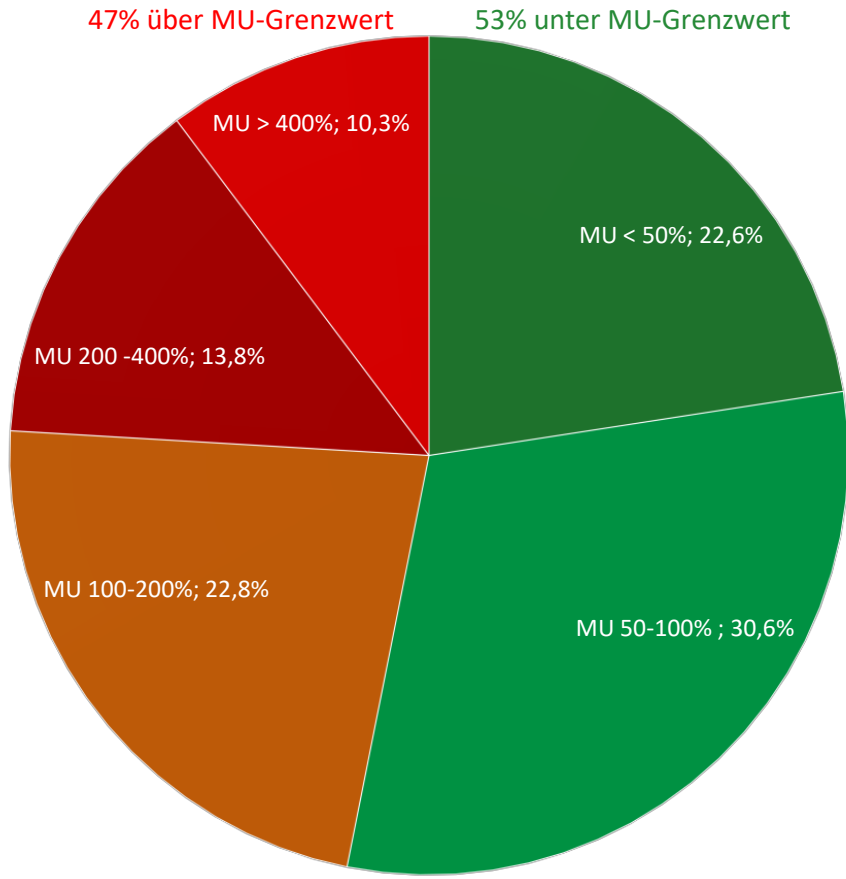
Hinzu kommen: Höhere O&M-Kosten für Verschleiß, Schäden, Reparaturen, häufigere Anfahrten, usw.

- Beiträge zum kumulierten Ertragsausfall sowohl von viele WEA mit geringer Abweichung, als auch wenigen WEA mit großer Abweichung

Statistik Massenunwucht 2018 – 1: Massenunwucht-Niveau relativ zum Grenzwert

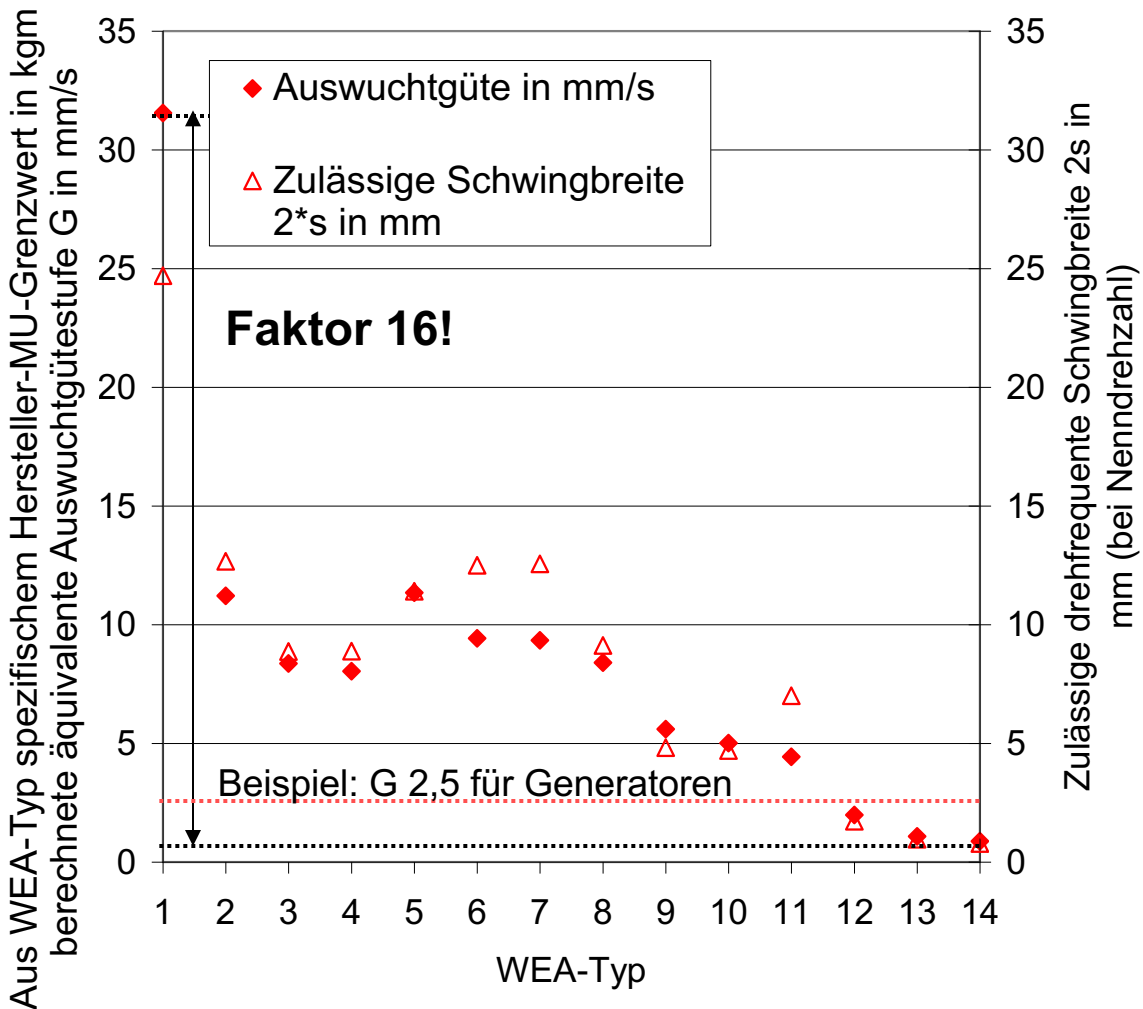


BerlinWind-Massenunwuchtstatistik 2018, Schwingungsmessungen an 399 WEA nach Blattwinkeljustage (mit und ohne Verdacht), mittlere Nennleistung 1,8 MW



- Massenunwucht-Grenzwert individuell je WEA-Typ aus WEA-Design, Blatttyp, etc.

Richtigen je WEA-Typ individuellen Massenunwucht-Grenzwert verwenden



Grafik: Umrechnung von realen MU-Grenzwerten (60... > 1000 kg m) für Rotorunwucht aus WEA-Typenprüfungen in jeweilige äquivalente Auswucht-Gütestufe G (DIN ISO 21940-11) zeigt starke typ-spezifische Variation der Auswuchtgütestufen
-> WEA-MU-Grenzwerte nicht nach Auswucht-Gütestufe standardisierbar, weil individueller Grenzwert maßgeblich!

(Siehe auch VDI3834-1:2015, Anhang zum Betriebsauswuchten von WEA-Rotoren)

DENN: Bei WEA Messung der Bauwerks-schwingung des „weichen“ Turms, d.h.

...bei gleicher WEA-Plattform abhängig von Turmtyp (Stahl, Beton), Nabenhöhe, usw.

...bei ein und derselben WEA und gleicher Unwucht variierend mit Test-Drehzahl und Resonanznähe zur Turm-Eigenfrequenz

Anmerkung: Je WEA-Typ nach Kalibriermessungen Bewertung mit ermitteltem Schwingungsgrenzwert möglich für gleiche Testdrehzahl, sofern Türme gleich

„Übliches Auswuchten“ nach DIN ISO 21940-11: Messung der **Maschinenschwingung von fest auf ein Fundament geschraubter rotierender Maschine** oft mit „standardisierter“ Auswucht-Gütestufe G bewertet, d.h. Schwinggeschwindigkeits-Grenzwert in mm/s

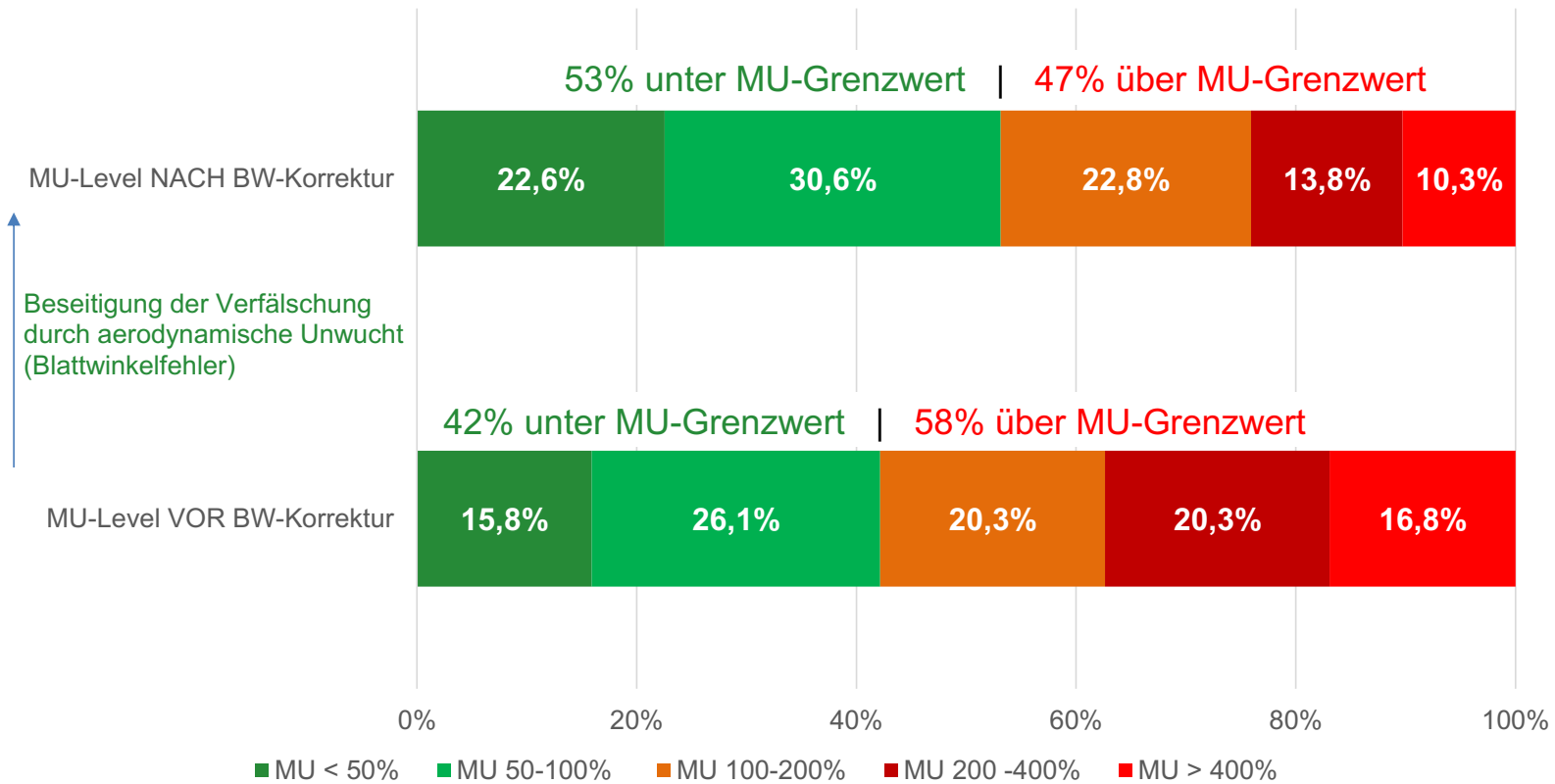
$$G = v = (e_{zul} * \Omega) = 1000 * U_{zul} [kg m] * \Omega / m_{Rotor} [kg]$$

mit $\Omega = 2 * \pi * n_{test} / 60$ aus Test-Drehzahl

Statistik Massenunwucht 2018 – 2: Blattwinkel- fehler verfälscht Massenunwucht-Ergebnis



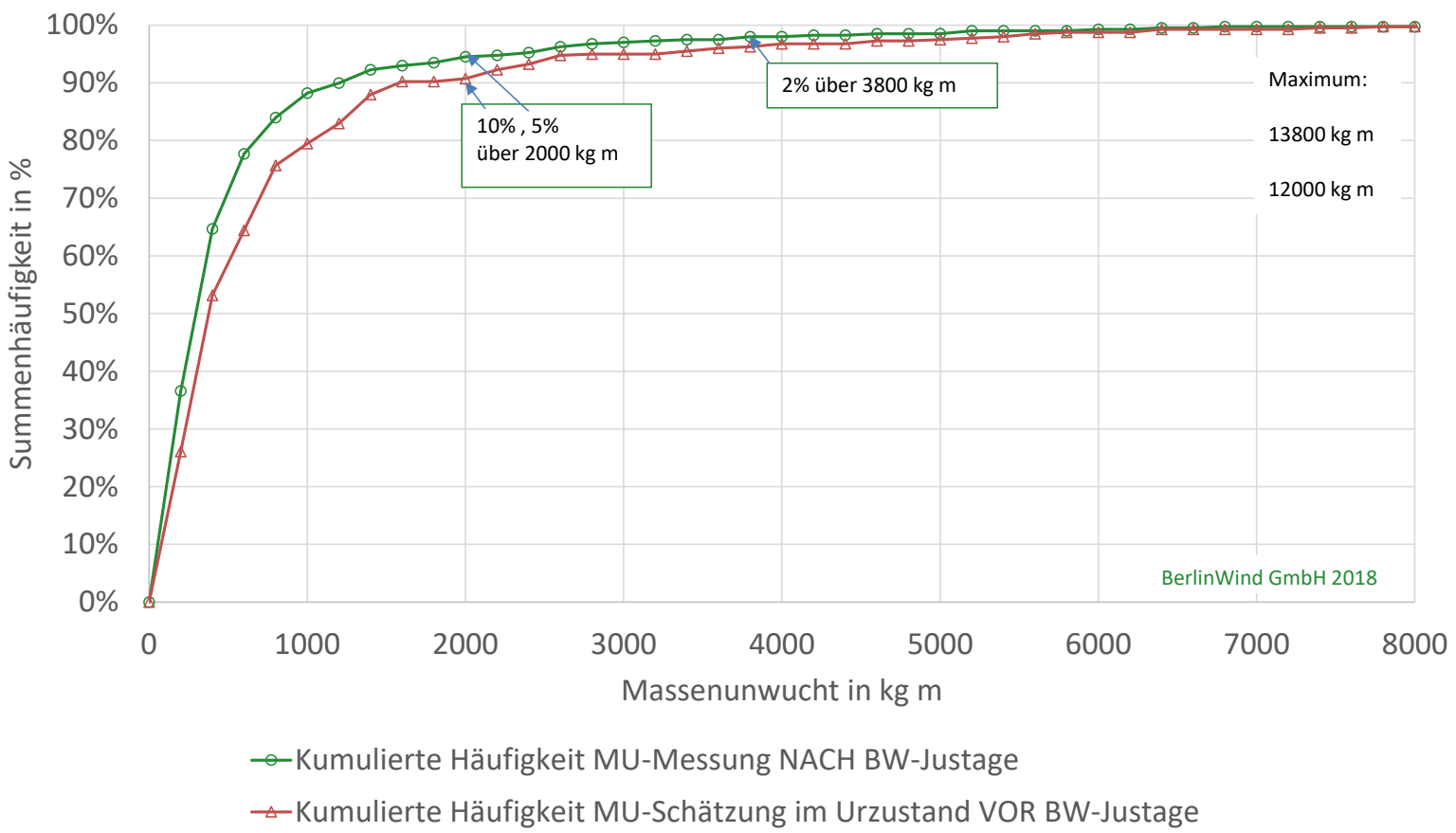
BerlinWind-Massenunwuchtstatistik 2018, Schwingungsmessungen an 399 WEA
vor und nach Blattwinkelkorrektur (mit und ohne Verdacht),
mittlere Nennleistung 1,8 MW



Statistik Massenunwucht 2018 – 3: Häufigkeitsverteilung der Massenunwucht



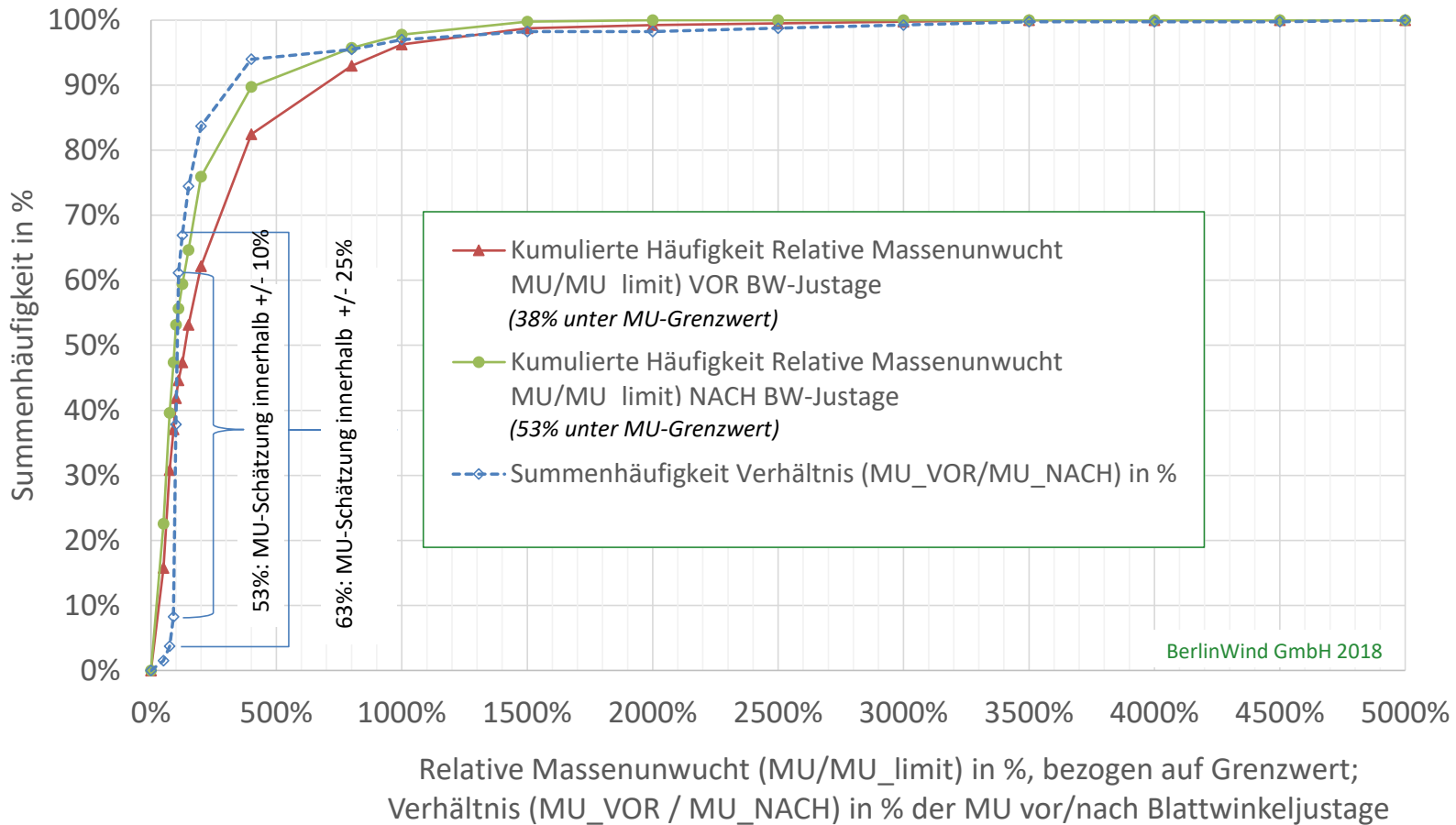
Einfluß von gleichzeitig vorhandener Blattwinkelabweichung auf den ermittelten Wert der Massenunwucht bei 399 WEA



Statistik Massenunwucht 2018 – 4: Blattwinkelfehler verfälscht Massenunwucht-Ergebnis



Niveau der Massenunwucht sowie Fehleinschätzung durch zeitgleich vorhandenen Blattwinkelfehler bei 399 WEA



BerlinWind GmbH 2018

■ Ohne Blattwinkelkorrektur erhebliche Fehleinschätzung der Massenunwucht, sowohl Über- als auch Unterschätzung

Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

- 1. Mehrheit der WEA mit unzulässiger Rotorunwucht**, hoher Prozentsatz von WEA mit **kombinierter Rotorunwucht**, d.h. Massenunwucht (MU) und Blattwinkelfehler zeitgleich vorhanden.
- 2. Realer WEA-Lebensdauerverbrauch** nur richtig abgebildet, wenn in Weiterbetriebs-Analytik die gemessene, **real vorhandene Unwucht** verwendet wird, statt der Design-Grenzwerte
- 3. Großer Prozentsatz von WEA mit relativen und/oder absoluten Blattwinkelfehlern** -> großes Potenzial für Ertragssteigerung und Lastreduktion.
- 4. Großer Prozentsatz von Rotoren mit Blattwinkelfehler aller drei Blätter**, d.h. nur absolute Blattwinkelmessung zielführend.
- 5. Blattwinkelkorrektur vor MU-Messung nötig**, da sonst Gefahr der Verfälschung des MU-Ergebnisses durch Blattwinkelfehler.
- 6. Exakte MU nur durch spezielle MU-Messung bestimmbar**, da MU-Schätzung im Betrieb (z.B. mit CMS) mit gewisser Unsicherheit aufgrund unbekannter Blattwinkelfehler.
- 7. Erhöhter Lebensdauerverbrauch durch MU und Blattwinkelfehler im Lastkollektiv sichtbar.**
- 8. Deutlich höhere Zusatzlasten durch 1,2° Blattwinkelfehler als durch 20° Gierfehler.**
- 9. Hohes Qualitätsniveau der (Diagnose-) Messungen notwendig: geeignete Messtechnik, bewährtes, statistisch sicheres Messverfahren, je WEA-Typ individueller Grenzwert,...**

Periodisches Betriebsauswuchten des Rotors im WEA-Lebenszyklus

- führt zu Einhaltung der unwucht-bedingten Entwurfslasten,
- vermeidet Ertragsverluste und
- sichert, bzw. erhöht das Potenzial für den WEA-Weiterbetrieb

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>