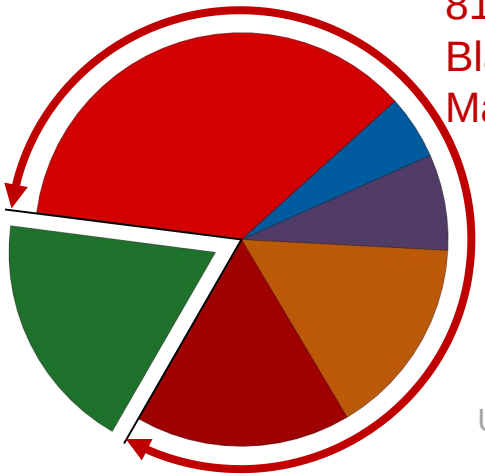
Gut Gewuchtet ins Dritte Jahrzehnt
- WEA-Weiterbetrieb und Ertrag sichern -



BerlinWind
Unwuchtstatistik 2018

27. Windenergietage, 7.November 2017, Linstow
Forum 21, Weiterbetrieb + Instandhaltung

BerlinWind GmbH, Bundesallee 67, 12161 Berlin, Germany

www.berlinwind.com

[Windenergietage.de]

© BerlinWind GmbH 2018

BerlinWind – kurz und bündig

Gründung 2009, Strategische Partnerschaften mit mehreren Firmen weltweit

Ingenieure mit Windenergie-Erfahrungen seit Mitte der 1990er

Unabhängige Sachverständige: Mitglied des BWE-Sachverständigenbeirats + AK Weiterbetrieb

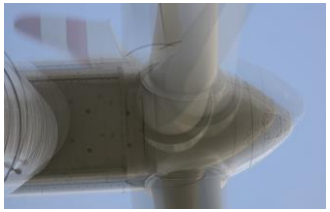
Mitglied im **VDI-Fachausschuss** der Richtlinie VDI 3834 zu WEA-Schwingungen (mit WEA-Auswucht-Anhang)

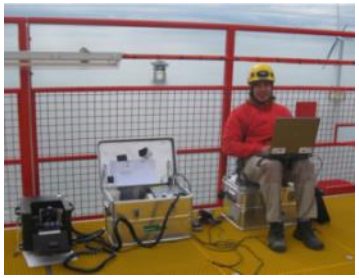
Weltweite Dienstleistungen

- 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)





© BerlinWind GmbH 2018

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

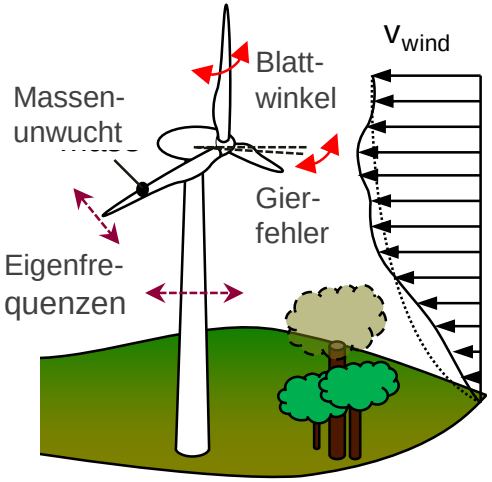
© BerlinWind GmbH 2018

WEA-Auslegung mit Grenzwerten für Massenunwucht, Blattwinkelfehler und Gondelfehlausrichtung

WEA-Zertifizierung/Typenprüfung beinhaltet Definition und Anwendung von Grenzwerten in Betriebslasten-Rechung 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 +/- 0,3° 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. +/- 8° ,
   nach DIBt-Richtlinie 2012

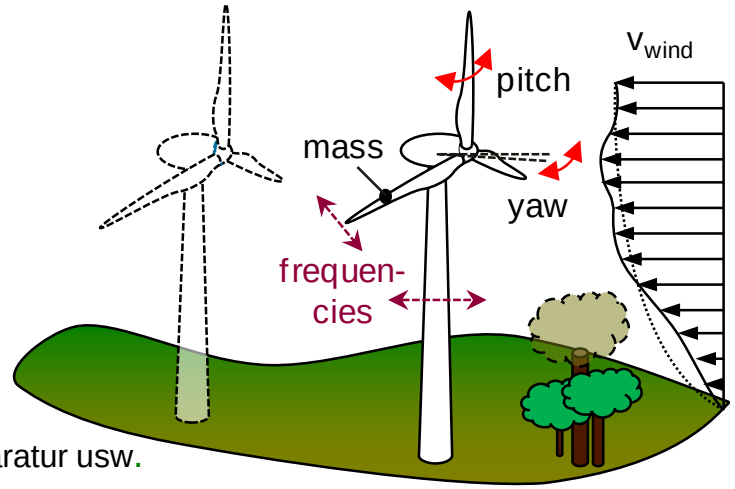
Weiterhin:
Vorgaben zu Parameter-Untersuchung für Turm-Eigenfrequenz-Bereich sowie mögliche Resonanzeffekte zwischen Turmeigenfrequenz und Rotordrehzahl bzw. Blattpassage („verbotener Drehzahlbereich“)

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

© BerlinWind GmbH 2018

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

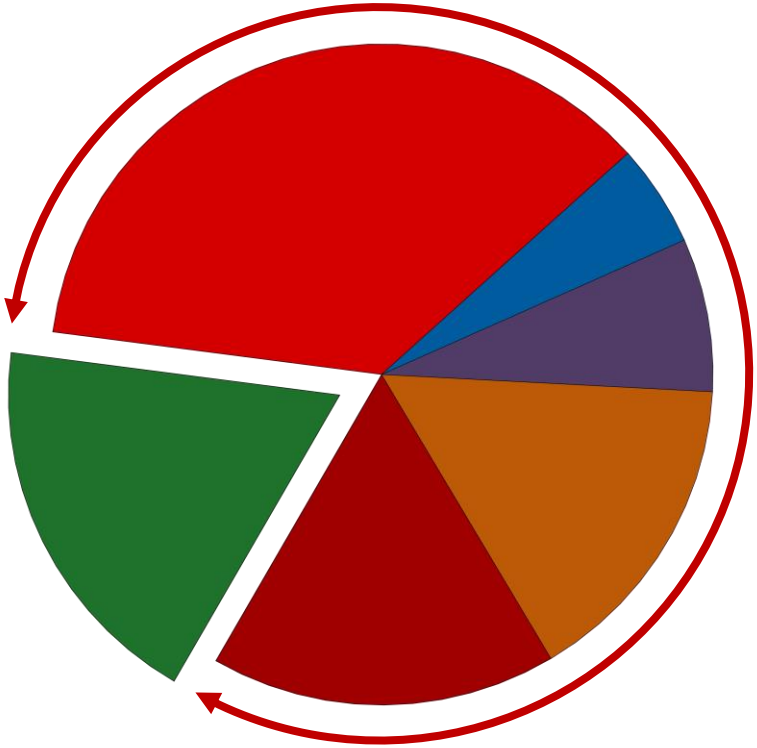
1. **Vereinfachungen und Fehler bei der Auslegung**
   Programmierfehler, Vernachlässigung von Lastkomponenten, zu grobe Rechenschrittweite (z.B. Windge-schwindigkeit), neue Materialien, bisher unbekannte Physik, fehlende Erfahrung der Windbrache / Mitarbeiter
2. **Abweichende externe Standortbedingungen**
   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!

© BerlinWind GmbH 2018

Statistik Rotorunwucht 2018, im Durchschnitt betroffene WEA



81% ÜBER Grenzwert, Blattwinkel und/oder Massenunwucht unzulässig, Potenzial für

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

19% UNTER Grenzwert, Blattwinkel und/oder Massenunwucht zulässig

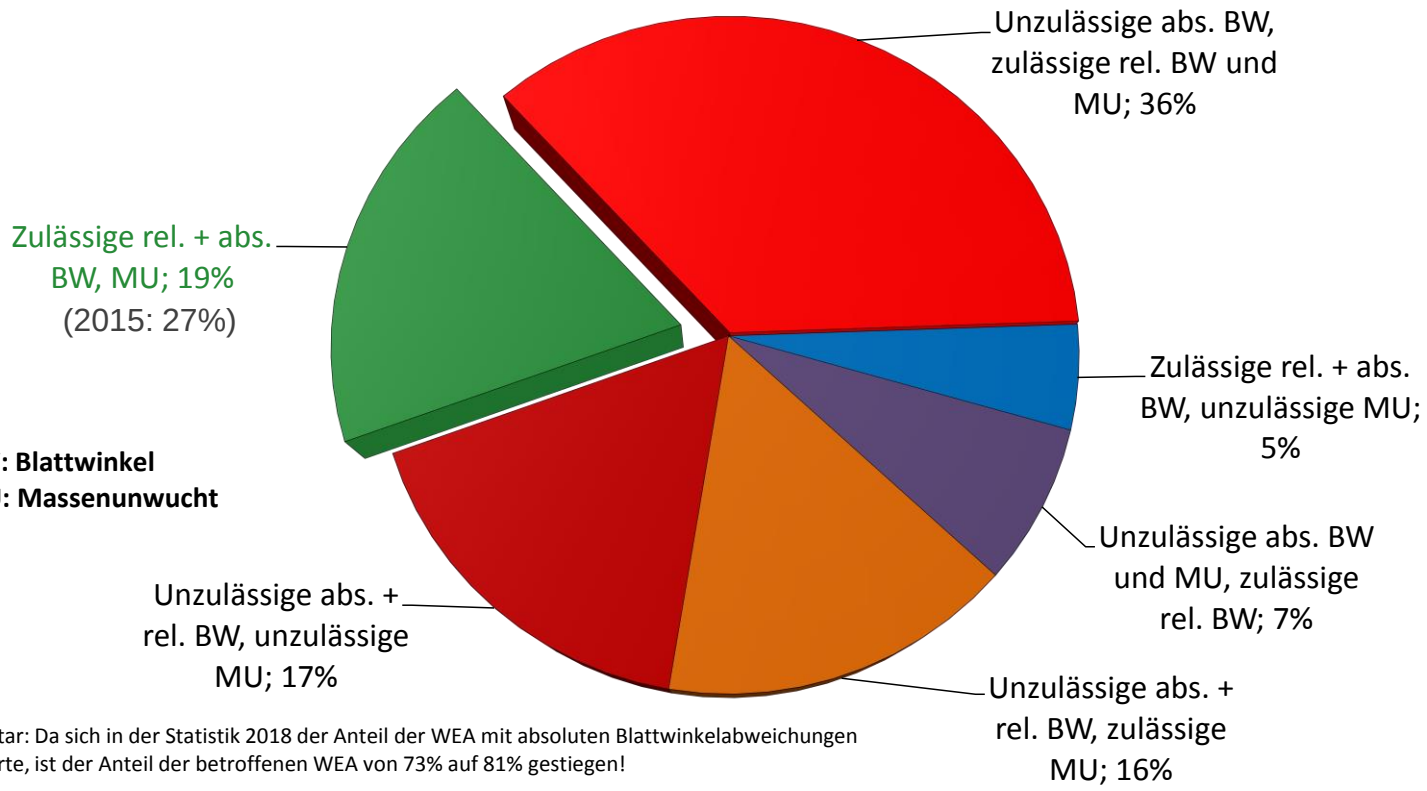
(2015: 27%)

- 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

© BerlinWind GmbH 2018

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)



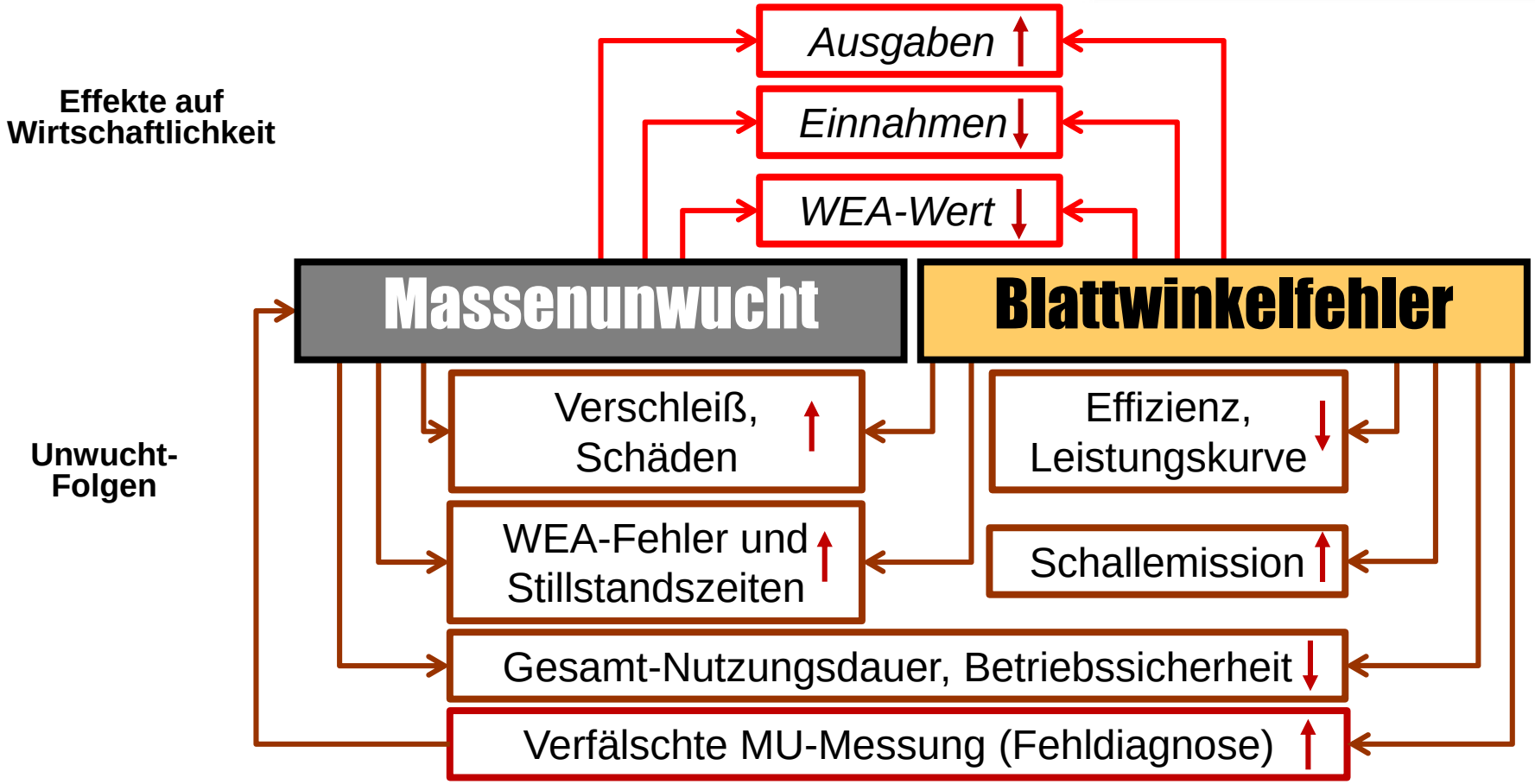
BW: Blattwinkel
MU: Massenunwucht

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

© BerlinWind GmbH 2018

Negative Folgen von Unwucht auf Wirtschaftlichkeit und Weiterbetrieb



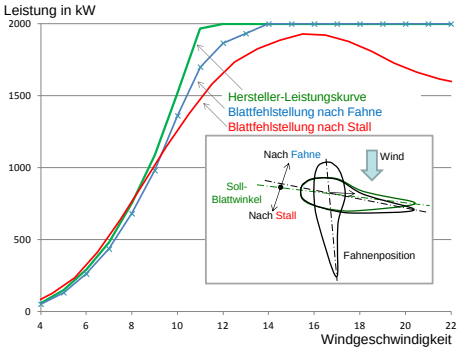
- Unwucht- und Blattwinkelprüfung ist **lebenslanges Thema ab Inbetriebnahme**
- Exakte Diagnosemessungen zur **ursachengerechten Ursachenbeseitigung** notwendig
- Wichtige Auswucht-Qualitätskriterien in BerlinWind-Veröffentlichungen oder auch VDI 3834-1:2015, Anhang zum Betriebsauswuchten von WEA-Rotoren

© BerlinWind GmbH 2018

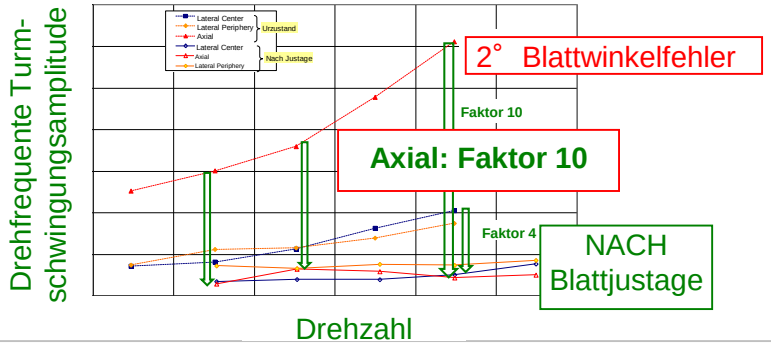
WEA-Wirtschaftlichkeit und Weiterbetrieb - ein paar Überlegungen...

- **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



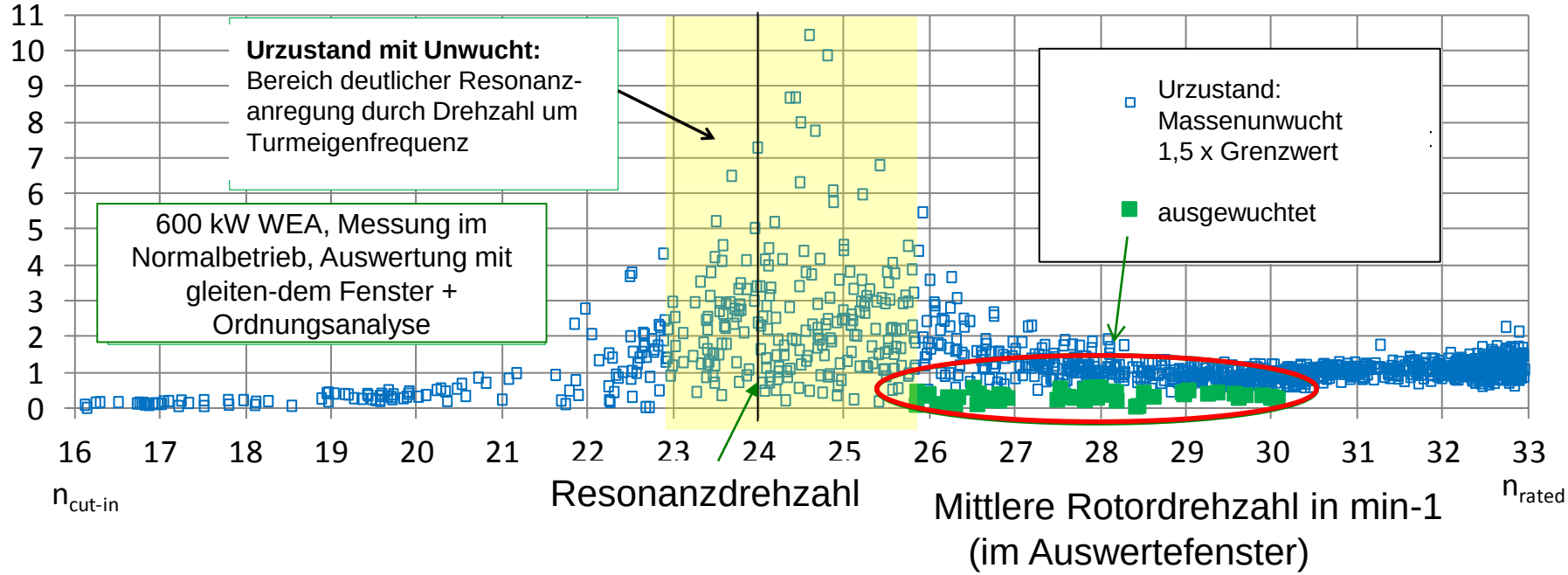
Mit dem bloßen Auge erkennbare „Stall“-Stromlinien am Blatt einer Pitch-WEA, d.h. großer Blattwinkelfehler und starke Vibrationen und Ertragsverlust



© BerlinWind GmbH 2018

Lastärmerer Betrieb nach Unwuchtbeseitigung bei WEA-Typ mit Resonanzbetrieb

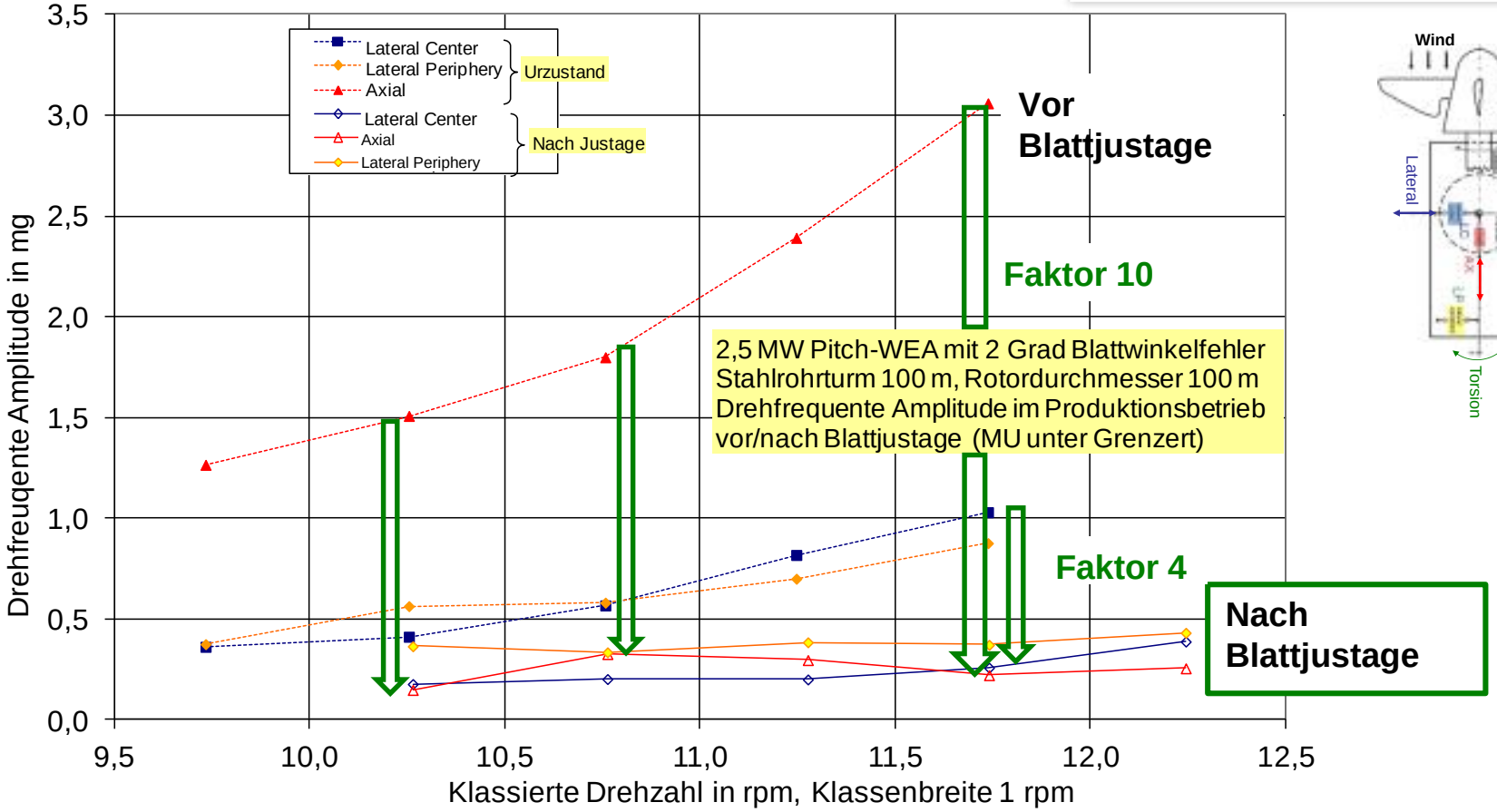
Laterale, drehfrequente Beschleunigungsamplitude

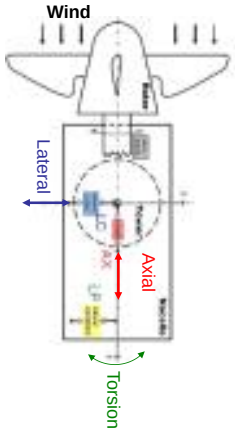


- *WEA-Gesamtnutzungsdauer korrekt abgeschätzt - oder wegen unbekannter Unwucht eigentlich erhöhter Lebensdauerverbrauch?*
- Massenunwucht: Ermüdungsrelevanter Grenzwert bei Auslegung, definiert und eingerechnet in Betriebslastenrechnung zur Typ-Zertifizierung
- **Nach Auswuchten kein Ansteigen der Amplitude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

© BerlinWind GmbH 2018

Lastenärmerer Betrieb durch korrekte , validierte Blattwinkeljustage

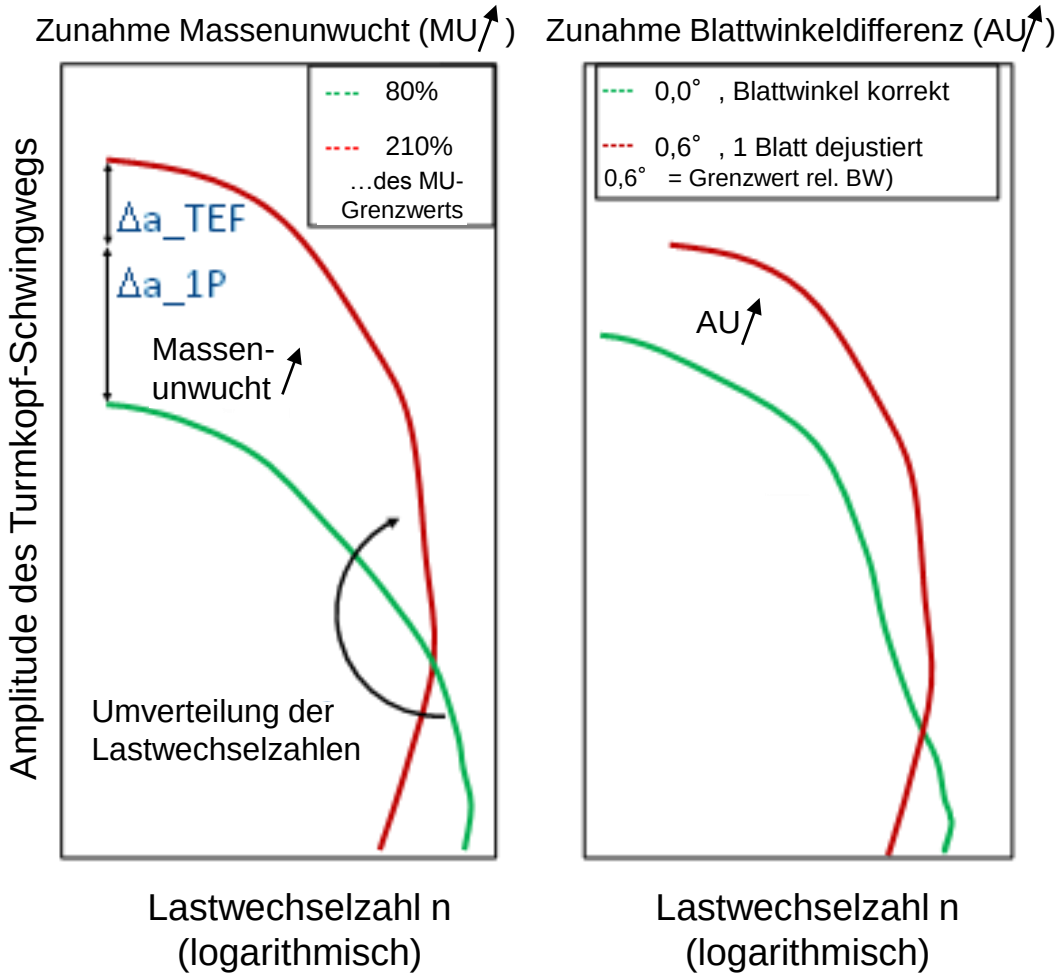




- *WEA-Gesamtnutzungsdauer korrekt abgeschätzt - oder wegen unbekannter Unwucht eigentlich erhöhter Lebensdauerverbrauch?*
- Validierung der Blattwinkeljustage per Schwingungsmessung notwendig, u.a. wegen Verwindungsunterschieden von Blättern eines Rotors!
- Moderne WEA: Sehr geringe Ziel-Amplituden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

© BerlinWind GmbH 2018

Messbare Erhöhung der 10 min-Betriebslasten durch zunehmende Rotorunwucht



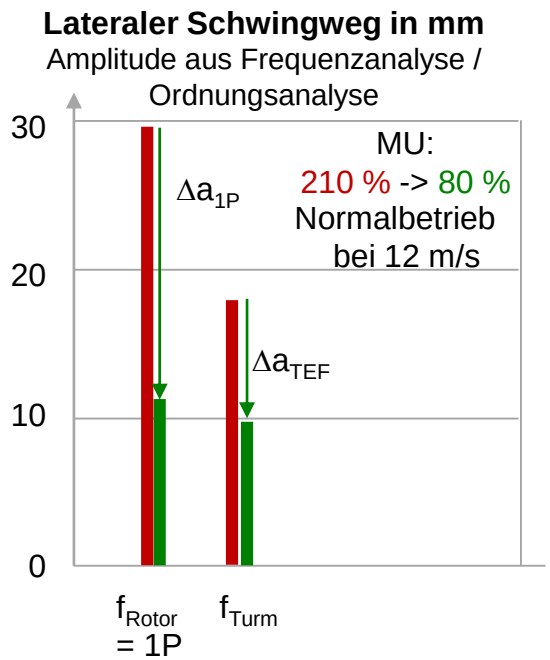
Methode:

- **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 Betriebs-zustand 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 Last-kollektivs um die Summe (Δa_1P + Δa_TEF), Schwingungsüberlagerung („freak wave"-Effekt)
- Bei konstanter Gesamt-Lastwechselzahl **Umverteilung der Lastwechselzahlen** von niedrigen zu höheren Amplituden

© BerlinWind GmbH 2018

Auswuchten senkt auch simultane Turmeigenfrequenz-Amplitude

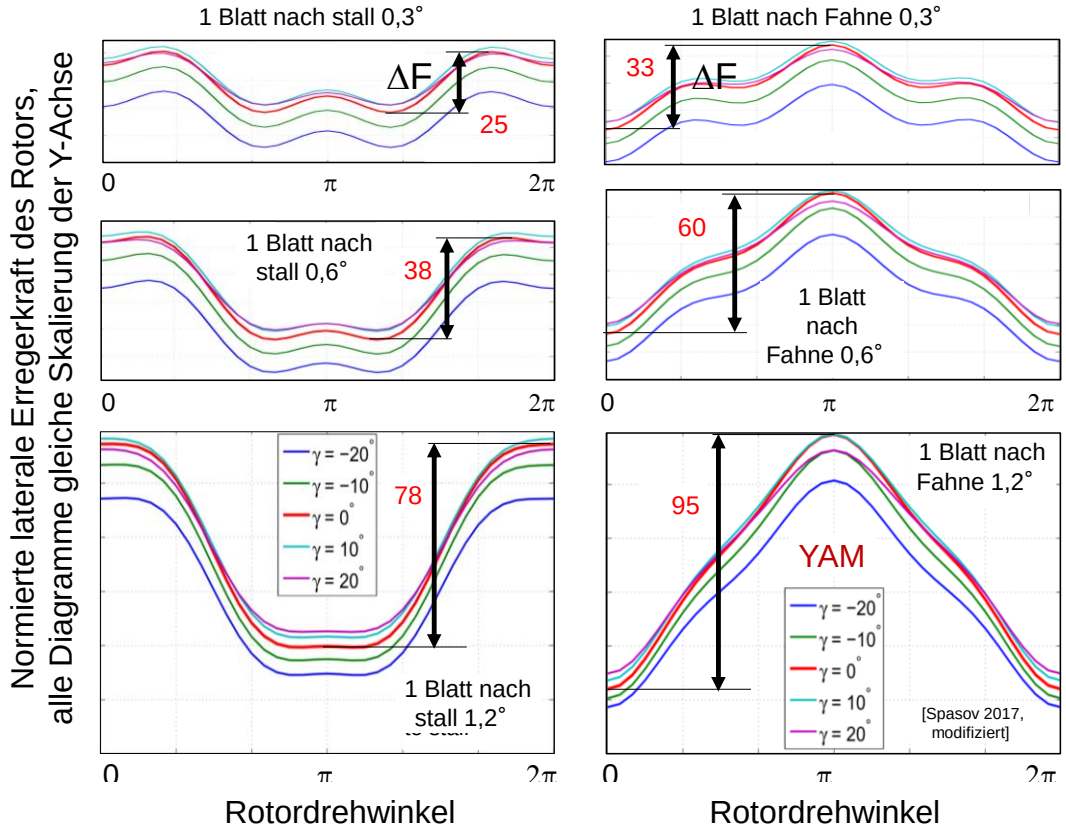


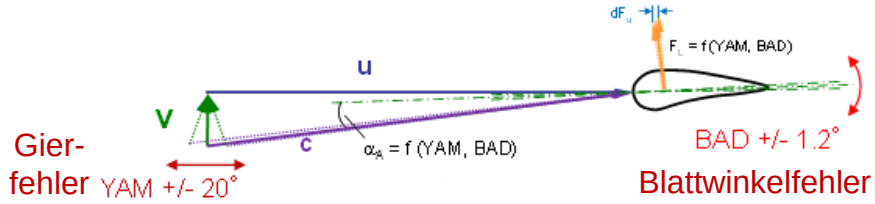
Beispiel

- **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**, *betroffene Komponente (schwächstes Glied der Kette) variiert*
- *Beachte: Komplexe WEA-Dynamik: Effekt variiert je nach WEA-Typ und Betriebszustand mit Drehzahl und Resonanznähe zur Turmeigenfrequenz*

© BerlinWind GmbH 2018

„Unsichtbarer“ Blattwinkelfehler ist schlimmer als „sichtbarer“ Gierfehler





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 Rotorumdrehung**, insbesondere Peak-to-Peak-Werte ΔF siehe Diagramme links

Ergebnisse:

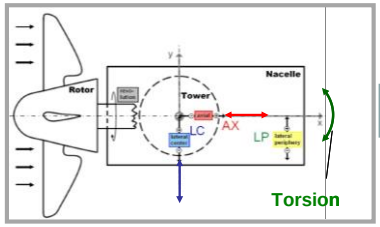
- Bei 0,3° Blattwinkelfehler sichtbare **Schwingungs-Überlagerung der Kräfte von 1P (Blattwinkelfehler) und 3P (Gierfehler)**
- Blattwinkelfehler bestimmt eher den peak-to-peak-Wert, Gierfehler eher die Lage des Mittelwerts
- Bei größerem Blattwinkelfehler 1,2° Verdreifachung von ΔF, Einfluss von Blattwinkelfehler 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)**

© BerlinWind GmbH 2018

Optimierte Kombination von Schwingungs-messung mit optischer Blattwinkelmessung

BERLINWIND

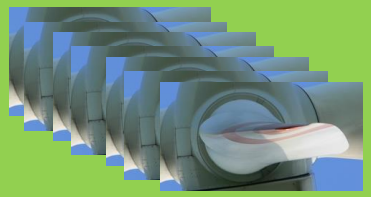
Schwingungsmessung
zur **WEA-Unwuchtprüfung** bei definierten Messbedingungen auf MU und AU
+ Visuelle Prüfung auf andere Auffälligkeiten



MU? AU?

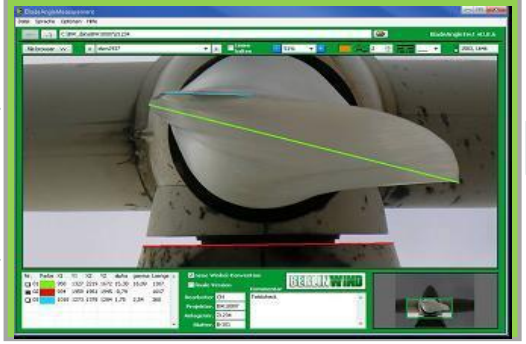
MU- und AU-Grenzwerte + Kennzahlen

Aufnahme von Fotoserien



Blattwinkelgrenzwert, Design-Blattwinkel

Statistische Auswertung



Blattjustage notwendig?

Schwingungsmessung Rotor-Urzustand

Blattwinkel-justage

Schwingungsmessung zur **Qualitätskontrolle** und MU-Prüfung

Anbringen MU-Kalibriermasse

Schwingungs-messung zur MU-Bestimmung

Anbringen der Ausgleichs-massen

Schwingungsmessung zur **Qualitätskontrolle**

© BerlinWind GmbH 2018

Überblick und Methodik der Unwuchtstatistik 2018

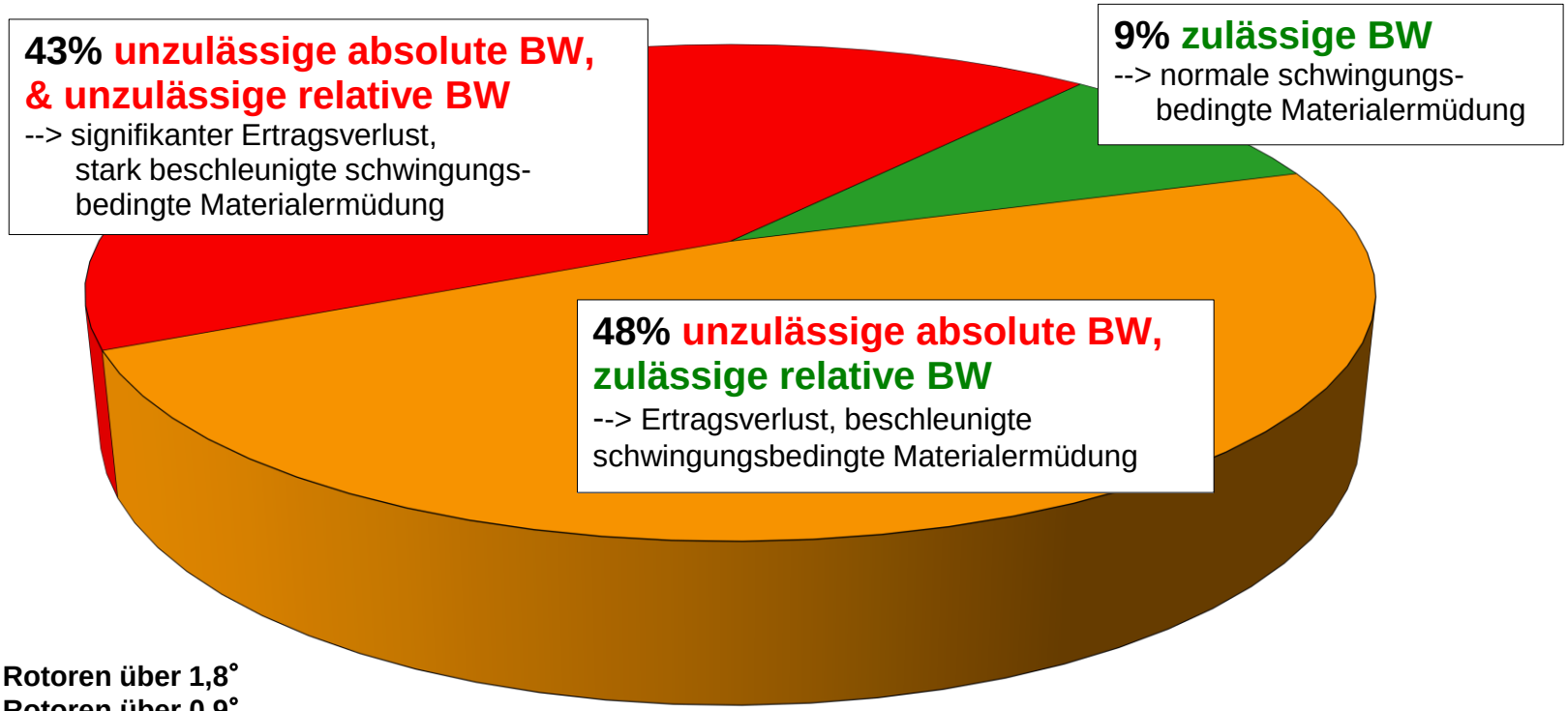
- Statistik „Blattwinkel 2018“:
  Statistische Auswertung der Ergebnisse aus **photometrischen Messungen der Blattwinkel** an 500 WEA, Messungen mit und ohne Verdacht
- Statistik „Rotorunwucht 2018“:
  Kombination der Ergebnisse „Blattwinkel 2018“ mit Statistik „Rotorunwucht 2013“ aus verdachtslosen 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 GmbH 2018

Statistik Blattwinkel 2018 -1

BERLINWIND

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

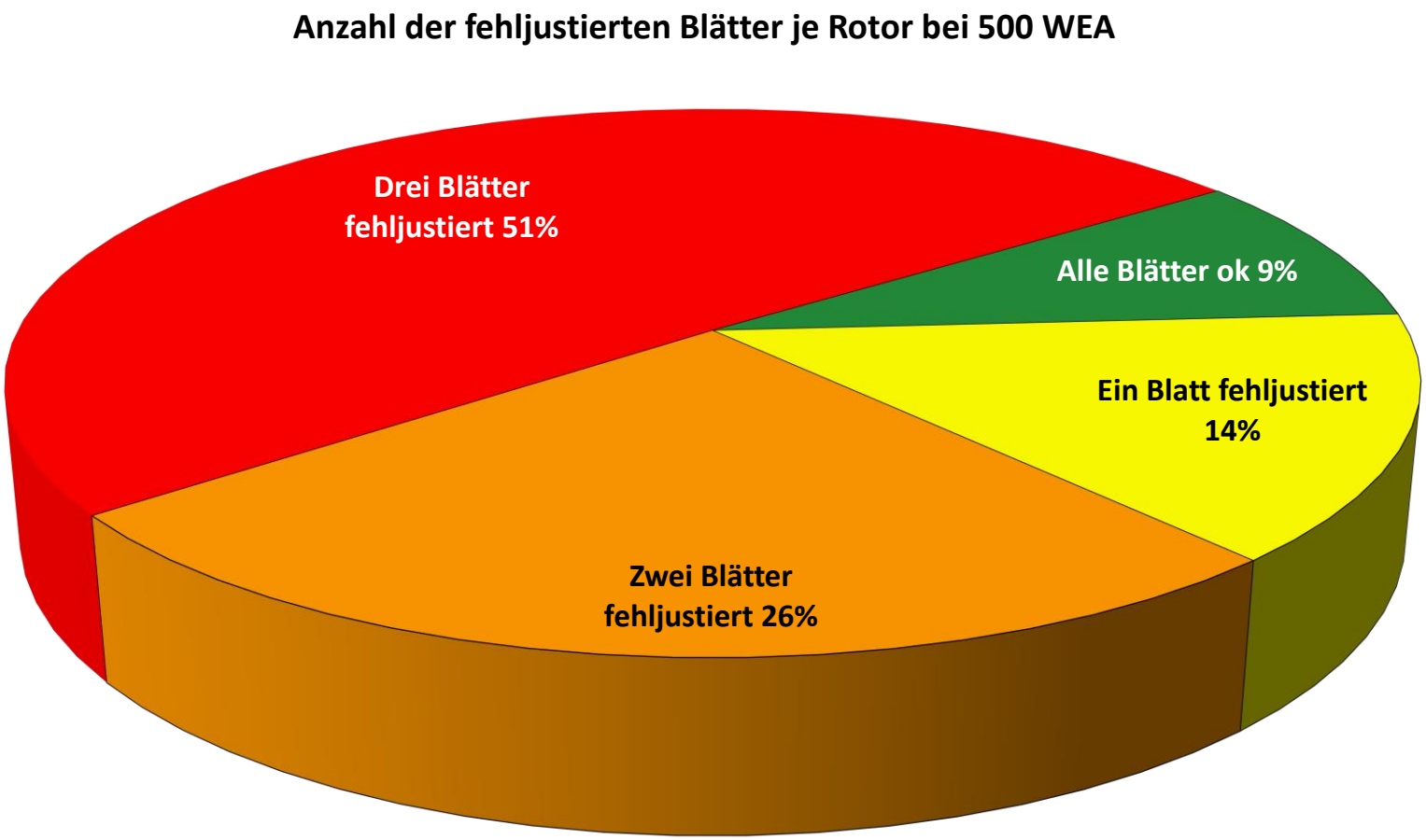


- **20% der Rotoren über 1,8˚**
- **50% der Rotoren über 0,9˚**
- **50% der Rotoren mit allen 3 Blättern über Grenzwert**

- 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

© BerlinWind GmbH 2018

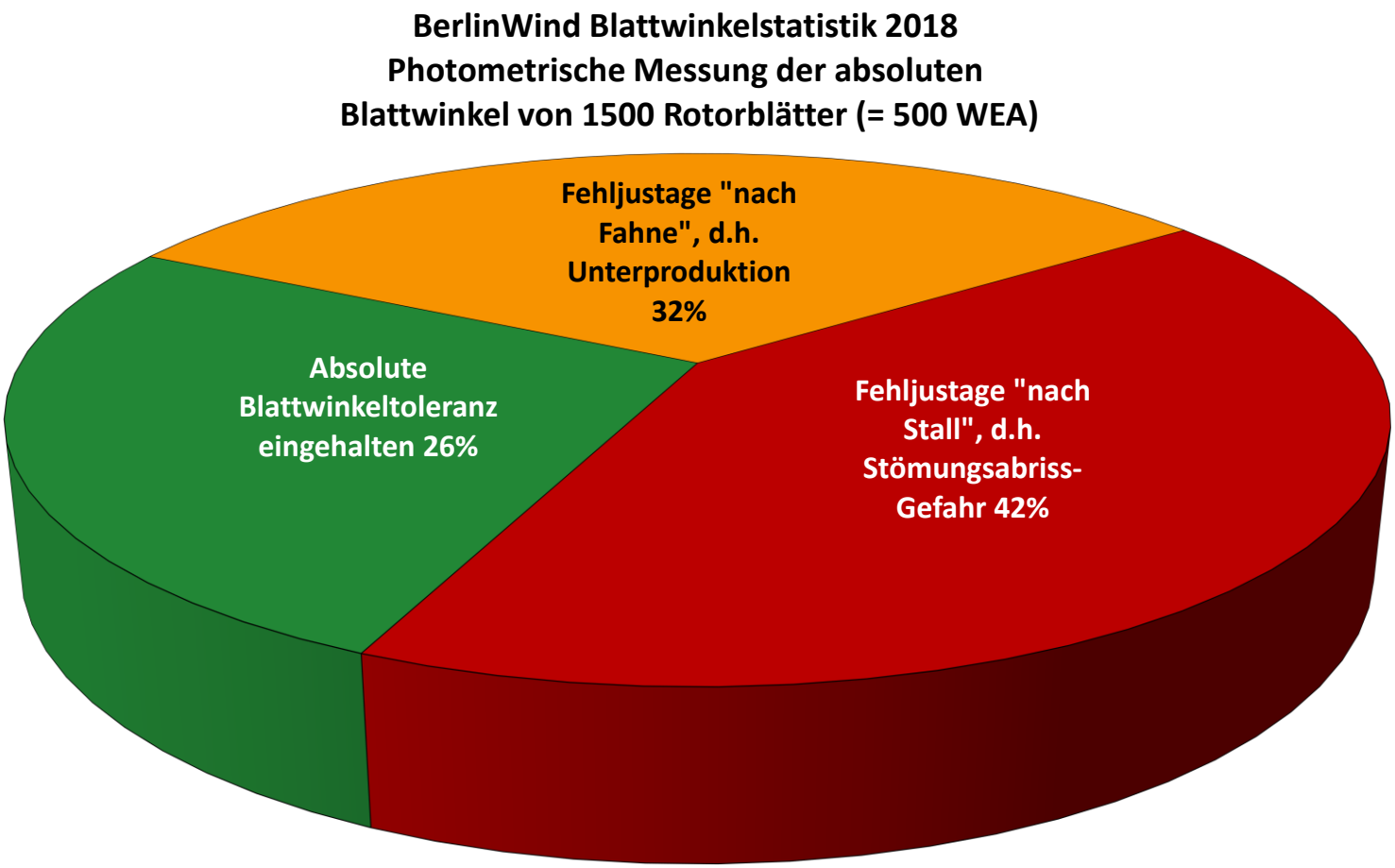
Statistik Blattwinkel 2018 – 2
Anzahl der betroffenen Blätter je Rotor



- 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!

© BerlinWind GmbH 2018

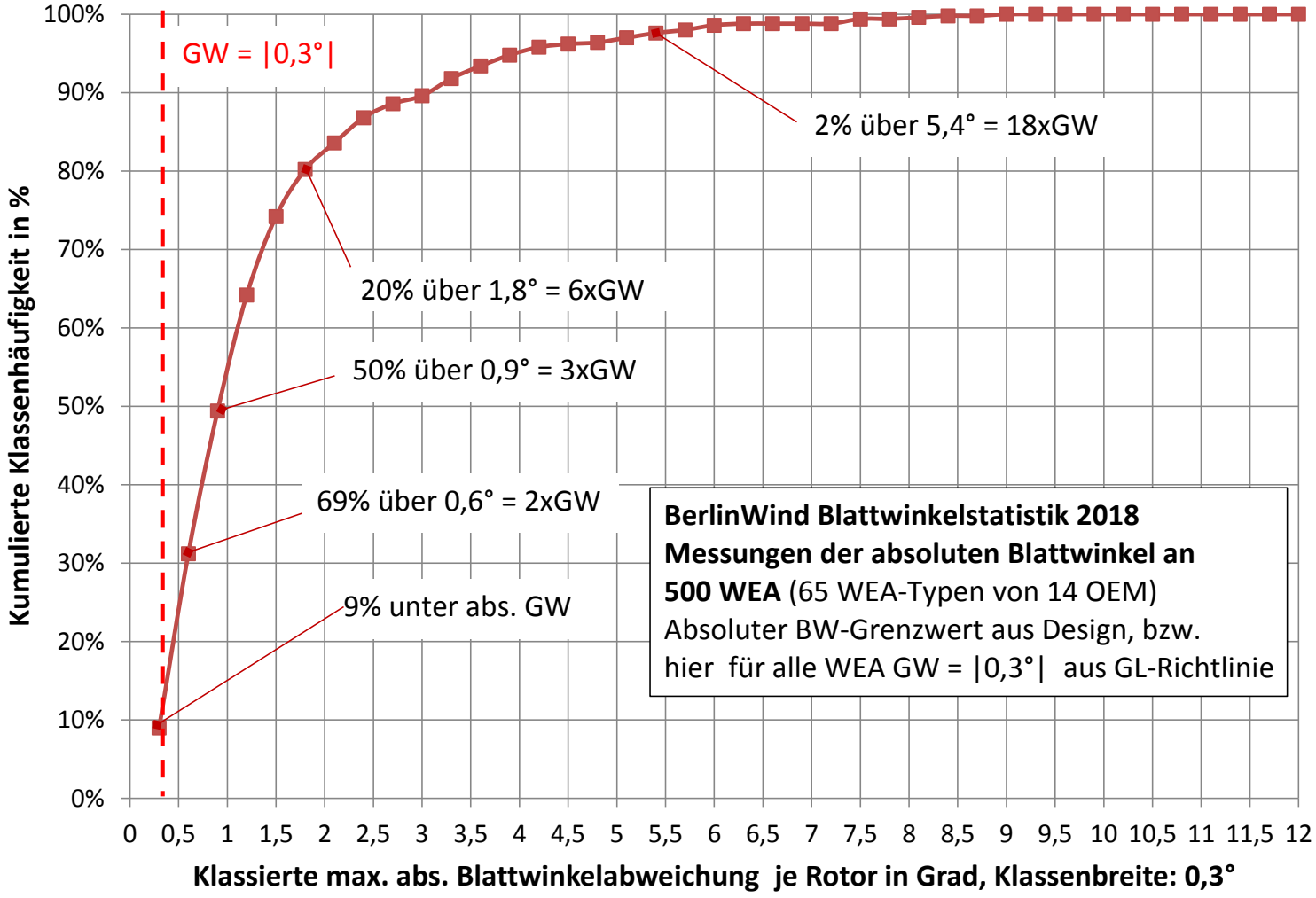
Statistik Blattwinkel 2018 – 3: Absolute Blattwinkel nach Richtung der Fehljustage



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

© BerlinWind GmbH 2018

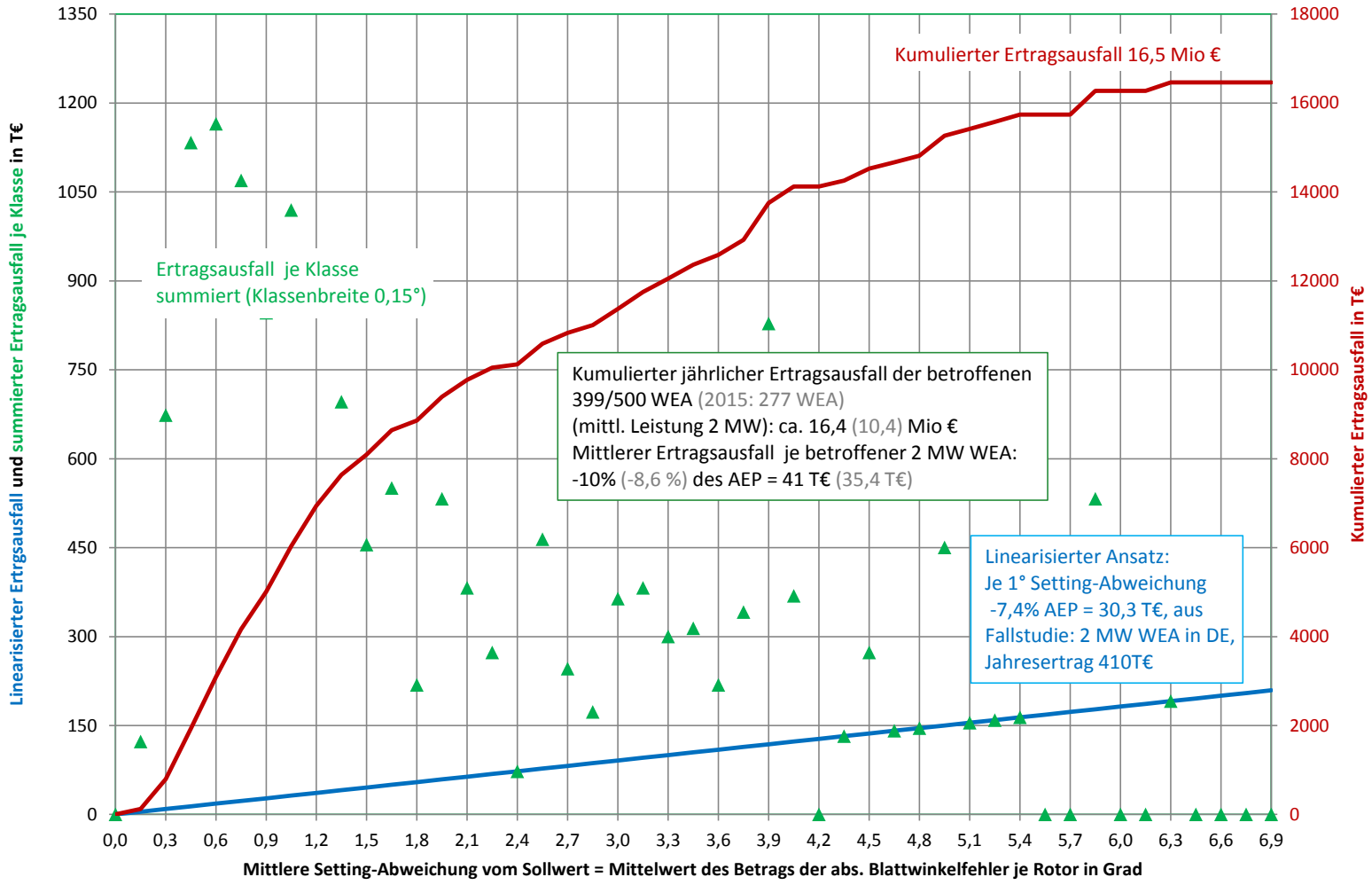
Statistik Blattwinkel 2018 – 4: Häufigkeit maximale abs. Blattwinkelabweichung je Rotor



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

© BerlinWind GmbH 2018

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.

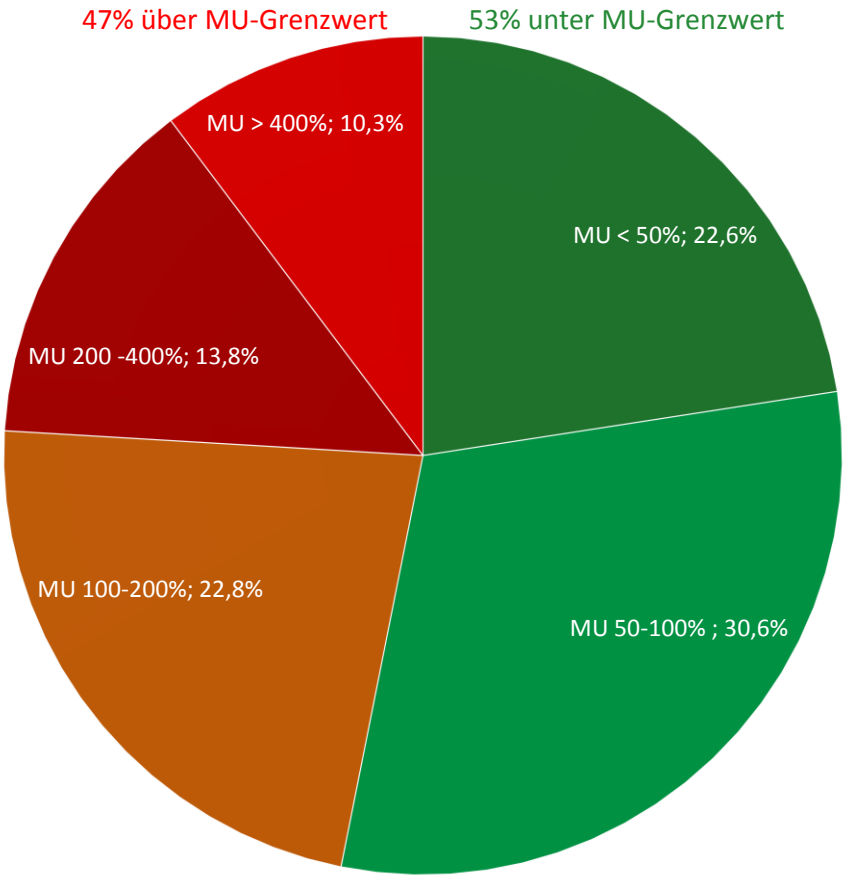
- Beiträge zum kumulierten Ertragsausfall sowohl von viele WEA mit geringer Abweichung, als auch wenigen WEA mit großer Abweichung

© BerlinWind GmbH 2018

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

BERLINWIND

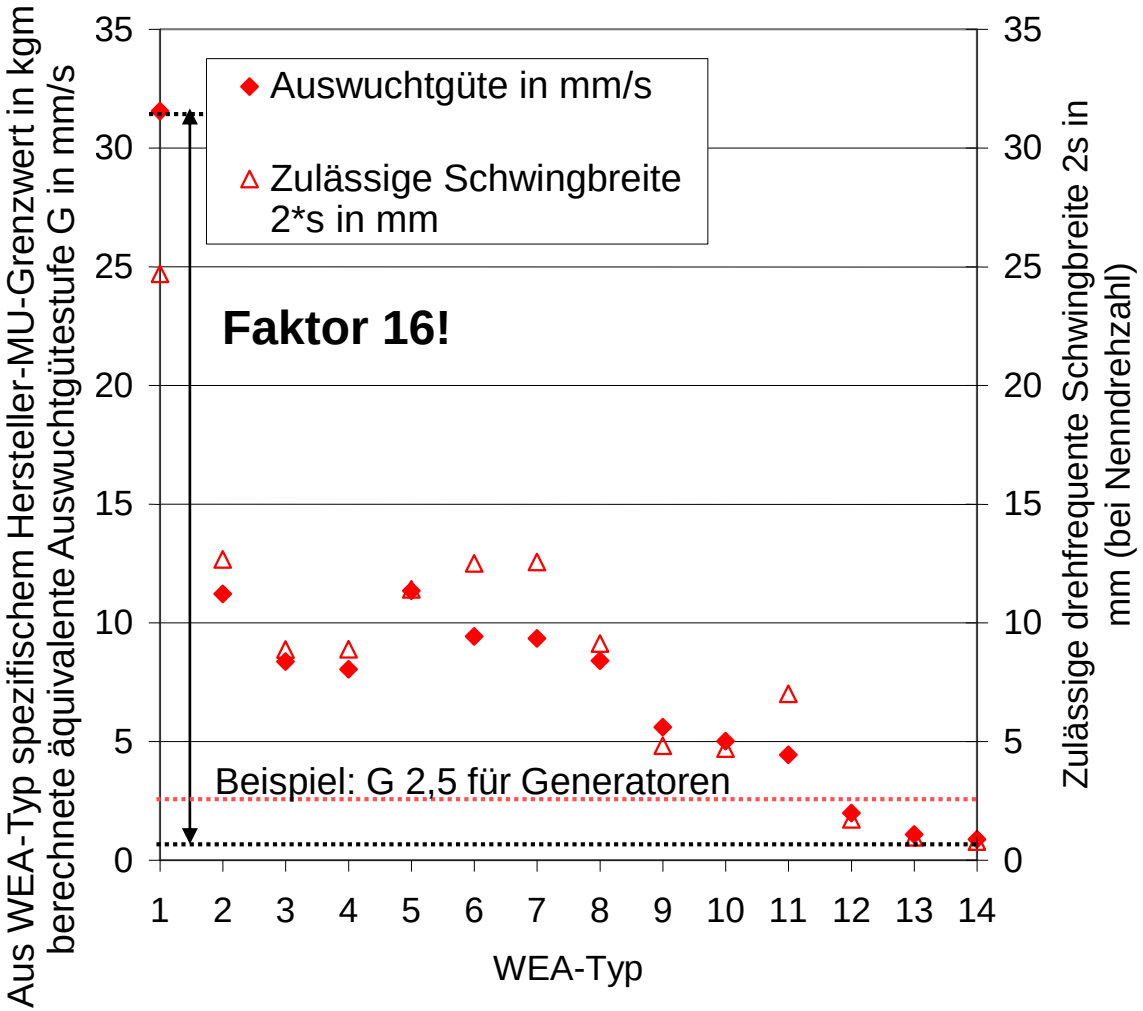
BerlinWind-Massenunwuchtstatistik 2018, Schwingungsmessungen an 399 WEA nach Blattwinkeljustage (mit und ohne Verdacht), mittlere Nennleistung 1,8 MW



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

© BerlinWind GmbH 2018

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

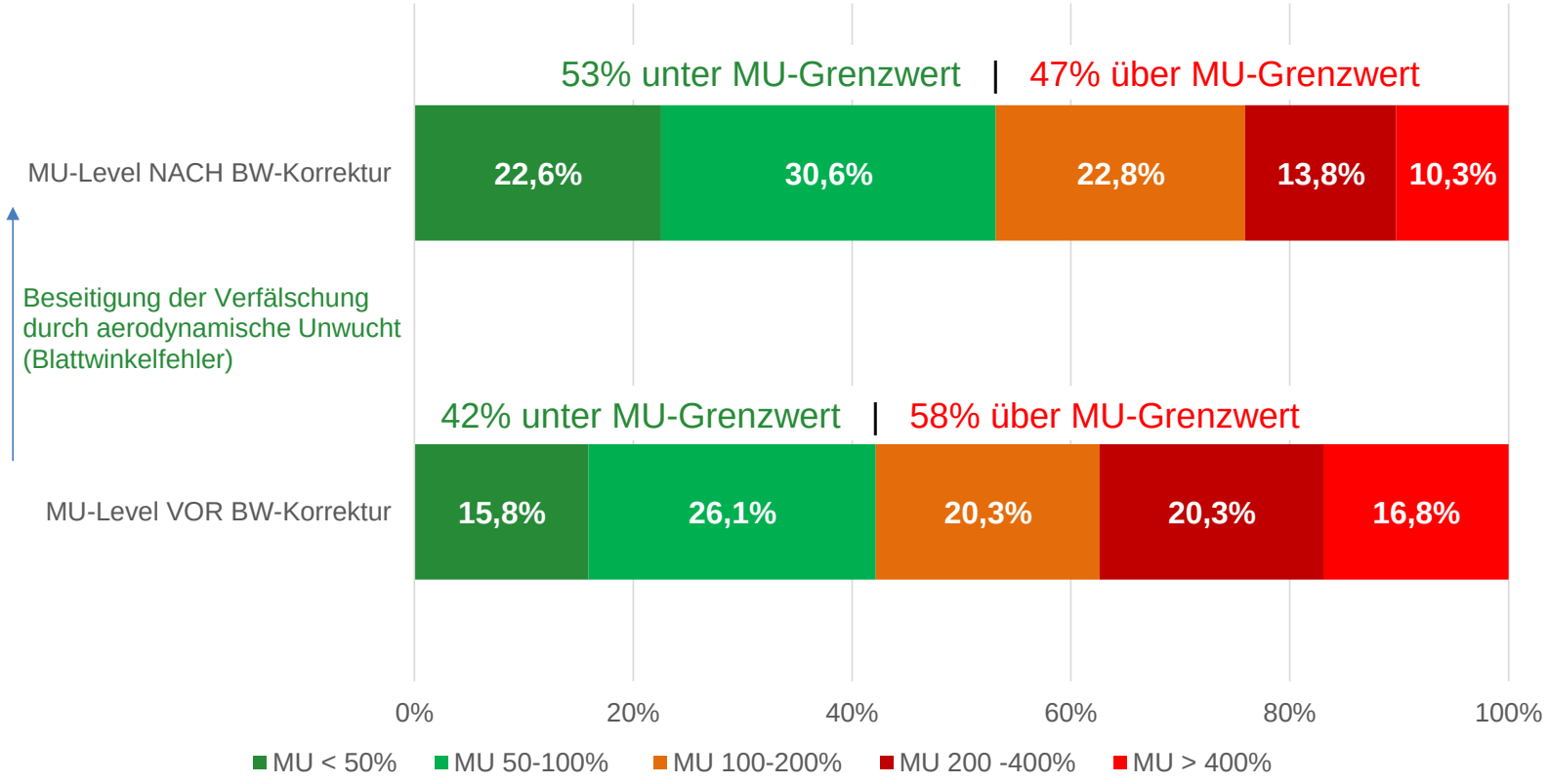
$G = v = (e_{zul} * \Omega) = 1000 * U_{zul}$ [kg m]* Ω / m_{Rotor} [kg]

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

© BerlinWind GmbH 2018

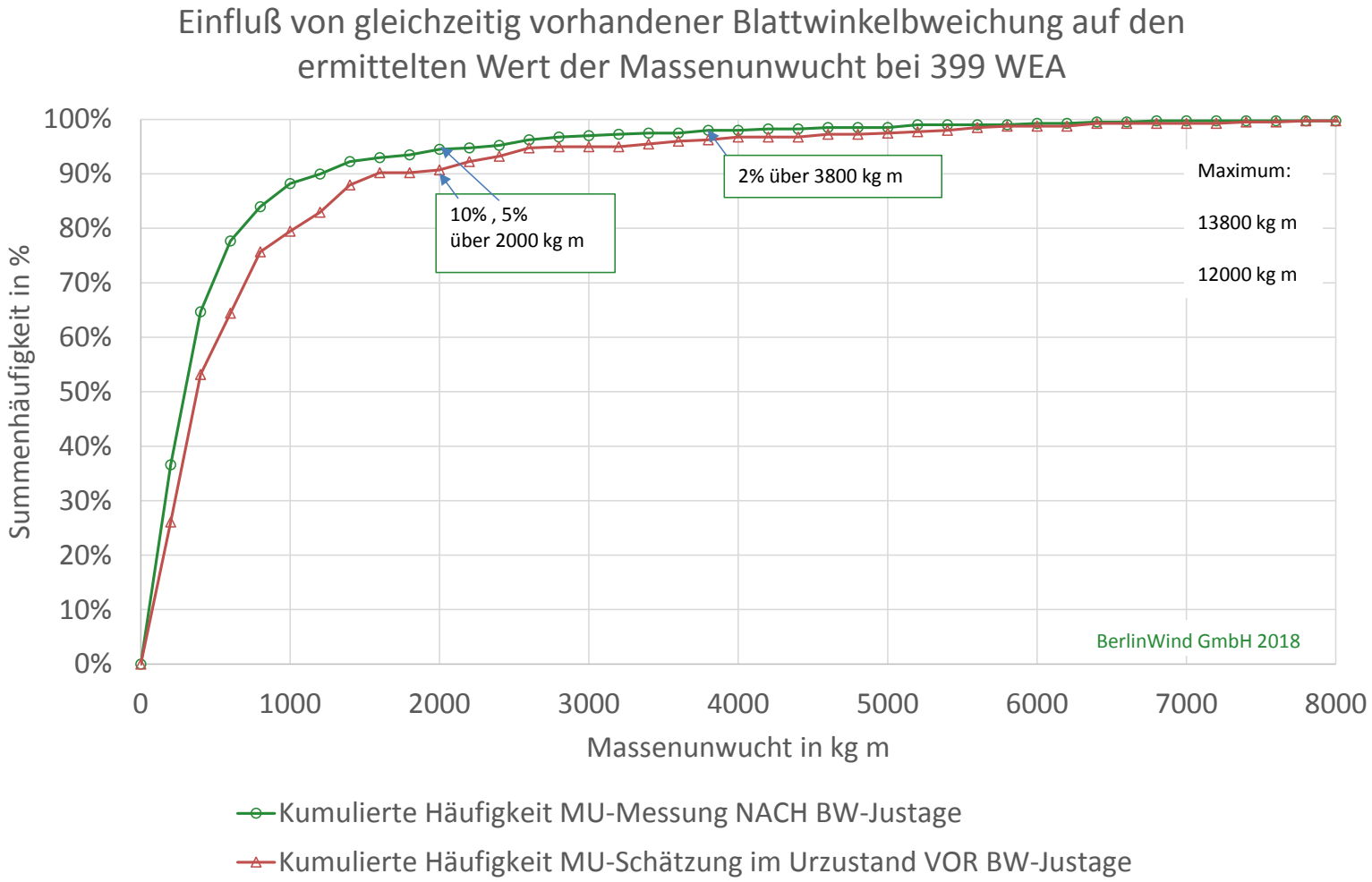
Statistik Massenunwucht 2018 – 2: Blattwinkel-fehler verfälscht Massenunwucht-Ergebnis

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



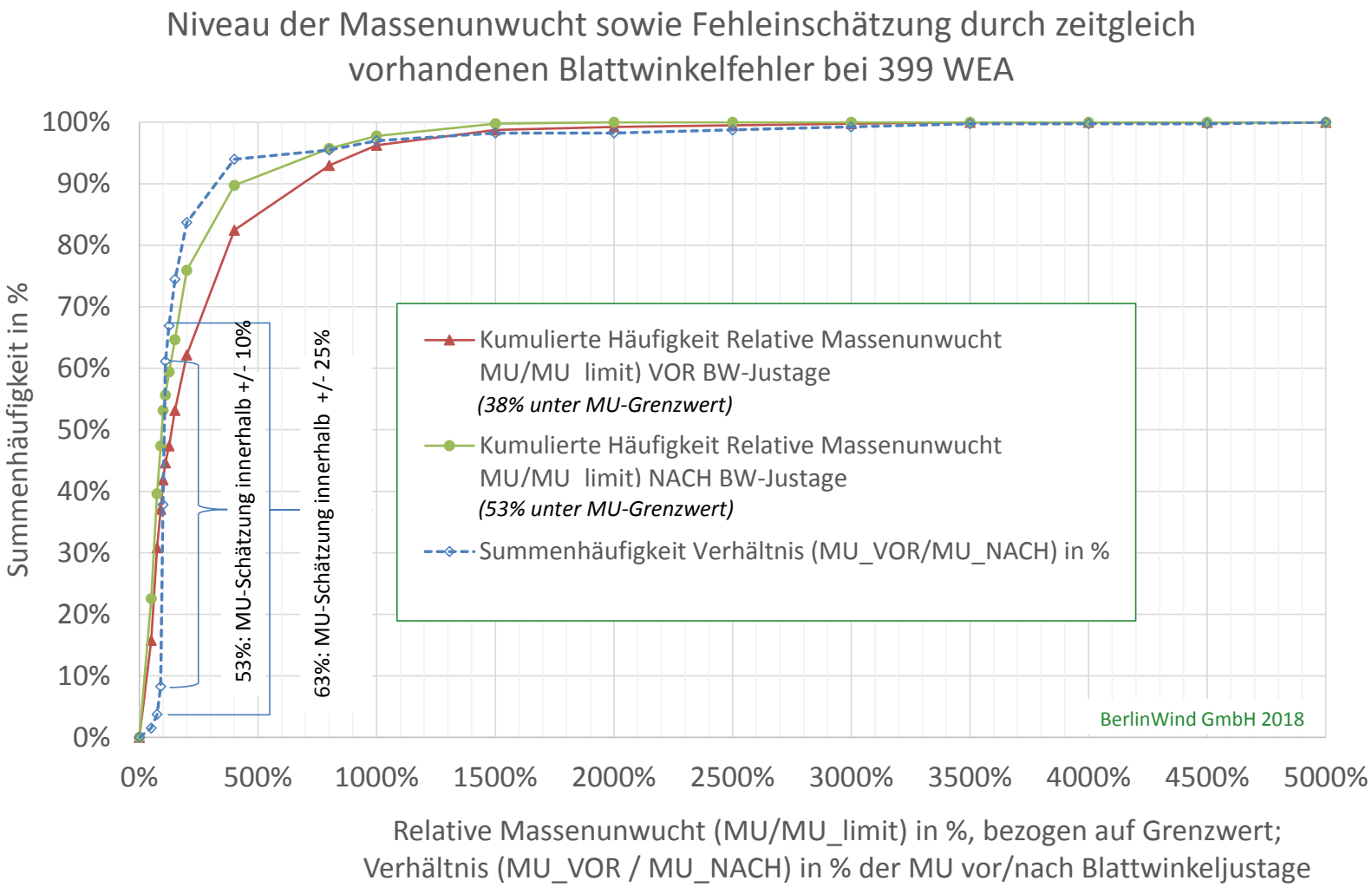
© BerlinWind GmbH 2018

Statistik Massenunwucht 2018 – 3: Häufigkeitsverteilung der Massenunwucht



© BerlinWind GmbH 2018

Statistik Massenunwucht 2018 – 4: Blattwinkel-fehler verfälscht Massenunwucht-Ergebnis



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

© BerlinWind GmbH 2018

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

© BerlinWind GmbH 2018

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

© BerlinWind GmbH 2018