

"Nicht nur Gutes kommt von oben" Schädliche Auswirkungen von Rotorunwucht-Vibrationen auf Turm und Fundament

Michael Melsheimer
BerlinWind GmbH

Bundesallee 67, 12161 Berlin
www.berlinwind.com



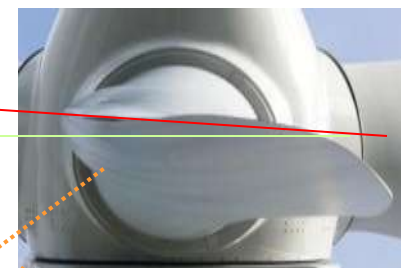
Forum 6 Vom Fuß zum Hals / Fundamente und Türme

21. Windenergietage, im Resort A-ROSA am Scharmützelsee, 13.-15.11.2012

Unternehmensprofil

BERLINWIND

- 2009 gegründetes, unabhängiges Ingenieurbüro, Teil der Holding *Corporate Energies Group*
- Mitglied u.a. des BWE-Sachverständigenrats und AK VDI-3834
- 5 Ingenieure mit langjähriger Windenergie-Erfahrung:
 - Rotorauswuchten bei über 700 WEA
 - Lastmesskampagnen bis zu 3 Jahre und über 120 Sensoren
 - Consulting, Schadensanalysen, WEA-Performance-Optimierung
 - F&E für Messungen an WEA:
 - BalancingBox zur Rotorunwucht-Prüfung und zum Auswuchten
 - Photometrische Blattwinkelmessung
 - ContourBox zur Distanz-Laser basierten Blattwinkelmessung
 - Mehr-Ebenen-Auswuchten des WEA-Triebstrangs



Rotormassen ok?



Blattwinkel ok?



- Bisherige Erfahrung von Rotorunwuchtmessungen an über 700 WEA: WEA-Rotorunwucht bei 25% aller WEA über Grenzwert
- Aerodynamische und Massenunwucht gleich relevant
- Vielfältige Schäden, „am schwächsten Glied der Kette“

Fallstudie Reihenuntersuchung zu Massenunwucht						
WEA-Typ	Nennleistung in kW	Rotordrehzahl	Leistungsbegrenzung	Anzahl untersuchter WEA	Grenzwert überschritten, Anteil in %	Unter 50% des Grenzwerts, Anteil in %
1	2000	variabel	Pitch nach Fahne	15	20	27
2	1500	konstant	active-stall	21	67	10
3	1500	variabel	Pitch nach Fahne	13	69	8
4	2100	konstant	Pitch nach Fahne	19	37	21
WEA-Anzahl gesamt bzw. Durchschnitt in %:				68	48	16

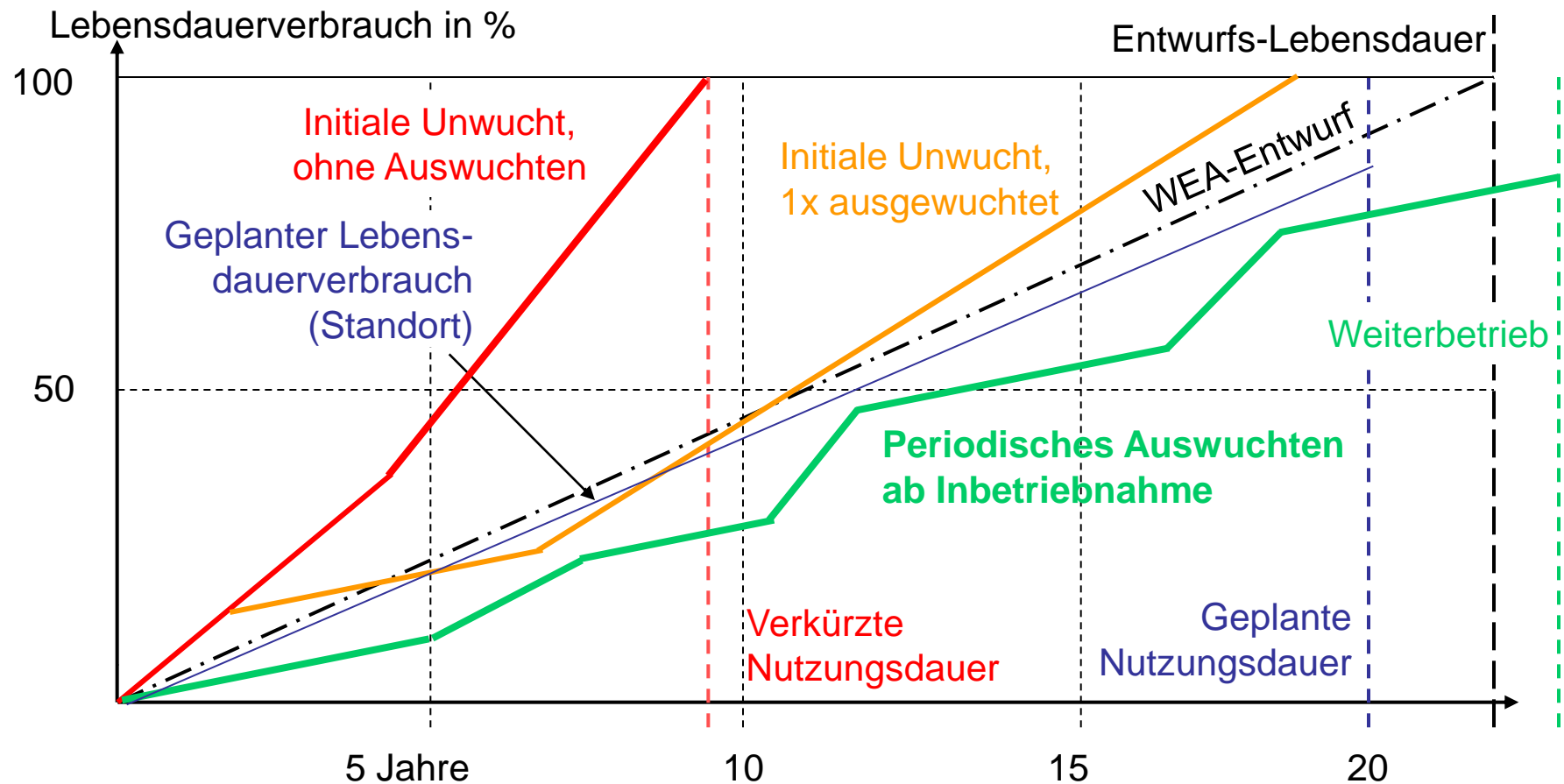
Fallstudie Reihenuntersuchung zu aerodynamischer Unwucht wegen Blattwinkeldifferenzen						
WEA-Typ	Nennleistung in kW	Rotordrehzahl	Leistungsbegrenzung	Anzahl untersuchter WEA	Grenzwert überschritten, Anteil in %	Unter 50% des Grenzwerts, Anteil in %
1	2000	variabel	Pitch nach Fahne	15	40	13
2	1500	konstant	active-stall	21	72	14
3	1500	variabel	Pitch nach Fahne	13	85	0
4	2100	konstant	Pitch nach Fahne	19	47	16
WEA-Anzahl gesamt bzw. Durchschnitt in %:				68	61	11

- **Entwurfs-relevante zyklische Ermüdungslasten durch Rotorunwucht:**
Gesamte WEA-Betriebslastenrechnung für 20 Jahre mit Grenzwerten für Massenunwucht und aerodynamische Unwucht (IEC 61400-1, GL, DIBt)
- Reale Unwucht an der laufenden WEA ist meist unbekannt, keine periodische Überprüfung gefordert in Richtlinien
- Rotorunwuchtmessungen an über 700 Onshore-WEA:
Grenzwert überschreitende Rotorunwucht (RU) bei über 25% der WEA
- Rotorunwucht erhöht Lastniveau und beschleunigt Ermüdung aller Komponenten
- Erhöhte zyklische Lasten aus **Rotorunwucht als potenzielle und vermeidbare Schadensursache bei Turm- und Fundamentproblemen** oft unbeachtet
- Bei WEA mit Turm- und Fundamentproblemen ist Auswuchten dringend empfohlen, um das Lastniveau zu senken und wieder eine wieder Lebensdauerreserve zu schaffen
- WEA-Abschaltungen und –Schäden sowie Ertragsverlust aufgrund von RU durch **regelmäßige Unwuchtprüfung ab der Inbetriebnahme** vermeidbar

Periodisches Rotor-Auswuchten vermeidet erhöhten Lebensdauerverbrauch bei On- und Offshore-WEA und schont Turm und Fundament!

Unwucht erhöht Lebensdauererbrauch

- WEA-Entwurf mit Lebensdauerreserve
- Unwucht bewirkt durch erhöhte Schwingungen erhöhten Lebensdauererbrauch
- Auswuchten und periodisches Nachwuchten senkt Lebensdauererbrauch



Folgen von Rotorunwucht 1

- Schäden an wichtigen Komponenten bis hin zum Fundament
- Hohe Reparaturkosten
- Hoher Lebensdauerverbrauch
- Geringere Verfügbarkeit
- Reduzierter Ertrag

- 1) Hinterkantenrisse am Blatt
- 2) Durch MU und Stall-Vibration (AU) gebrochene Blätter von Pitch-WEA
- 3) Gebrochener Maschinenträger

Bild 1



Bild 2

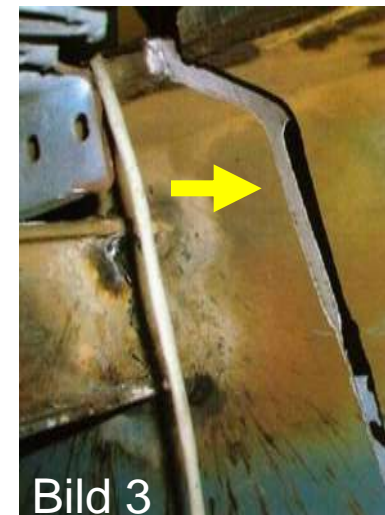


Bild 3

Folgen von Rotorunwucht 2

BERLINWIND

- 4) Durchrutschende Azimut-Bremsen wegen Torsionsschwingungen aus AU
- 5) Fundamentrisse (nach 1 Jahr mit AU 12xGW)
- 6) Totalverlust von WEA wegen MU und AU nach wenigen Jahren

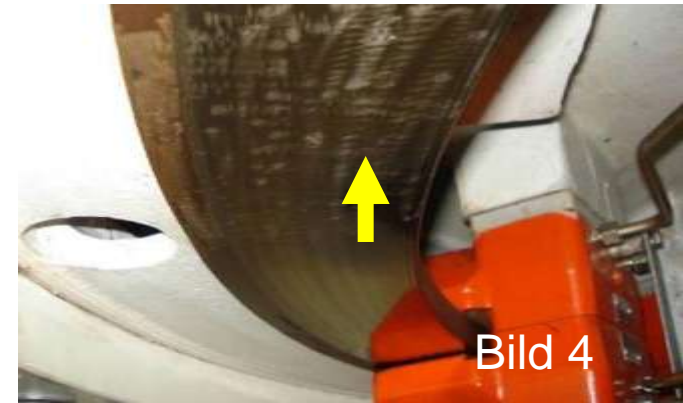


Bild 4



Bild 6



Bild 5

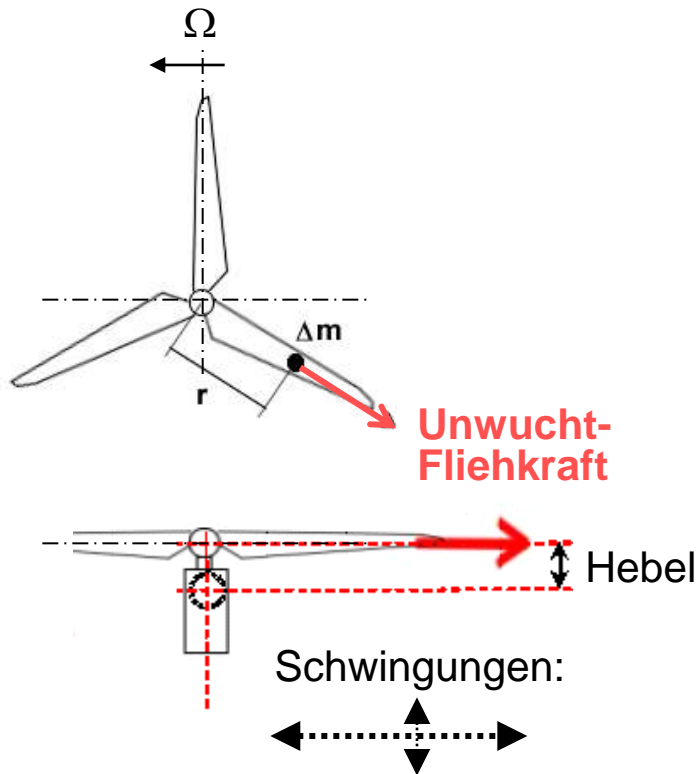
- Zwei **Rotorunwucht-Arten** mit unterschiedlichen physikalischen Ursachen:
- **Massenunwucht (MU)**: Schädliche Fliehkraft durch ungleiche Massen, bzw. -verteilung im Rotor
- **Aerodynamische Unwucht (AU)**: Schädliche Schubkraft- und Umfangskraft-Differenzen durch abweichende aerodynamische Eigenschaften der Blätter, z.B. Blattwinkeldifferenzen
- **Vektorielle Addition** der Kräfte aus MU und AU
- Meist Integrale Rotorunwucht (RU) **vorhanden**, d.h. **Kombination von AU und MU**
- Für **nachhaltiges Auswuchten** korrekte Prozedur mit Identifikation der Unwuchtarten und –ursachen notwendig
- Einhaltung von **Unwucht-Grenzwerten** für **beide** Unwuchtarten bei **WEA-Berechnung** in Normen und Richtlinien gefordert
- **Unwucht schwer fühlbar**, da ständig schwankende stochastische Windanregungen



WEA mit AU und MU:
Verschiedene Massen und –
verteilung sowie unter-
schiedliche Aerodynamik

Massenunwucht - 1

Grundlagen



Typische MU-Ursachen:

Toleranzen und Fehler bei Produktion und Aufbau, Blattschäden, -verschleiß, -tausch, Wartung und Reparatur (bzw. Fehler dabei)

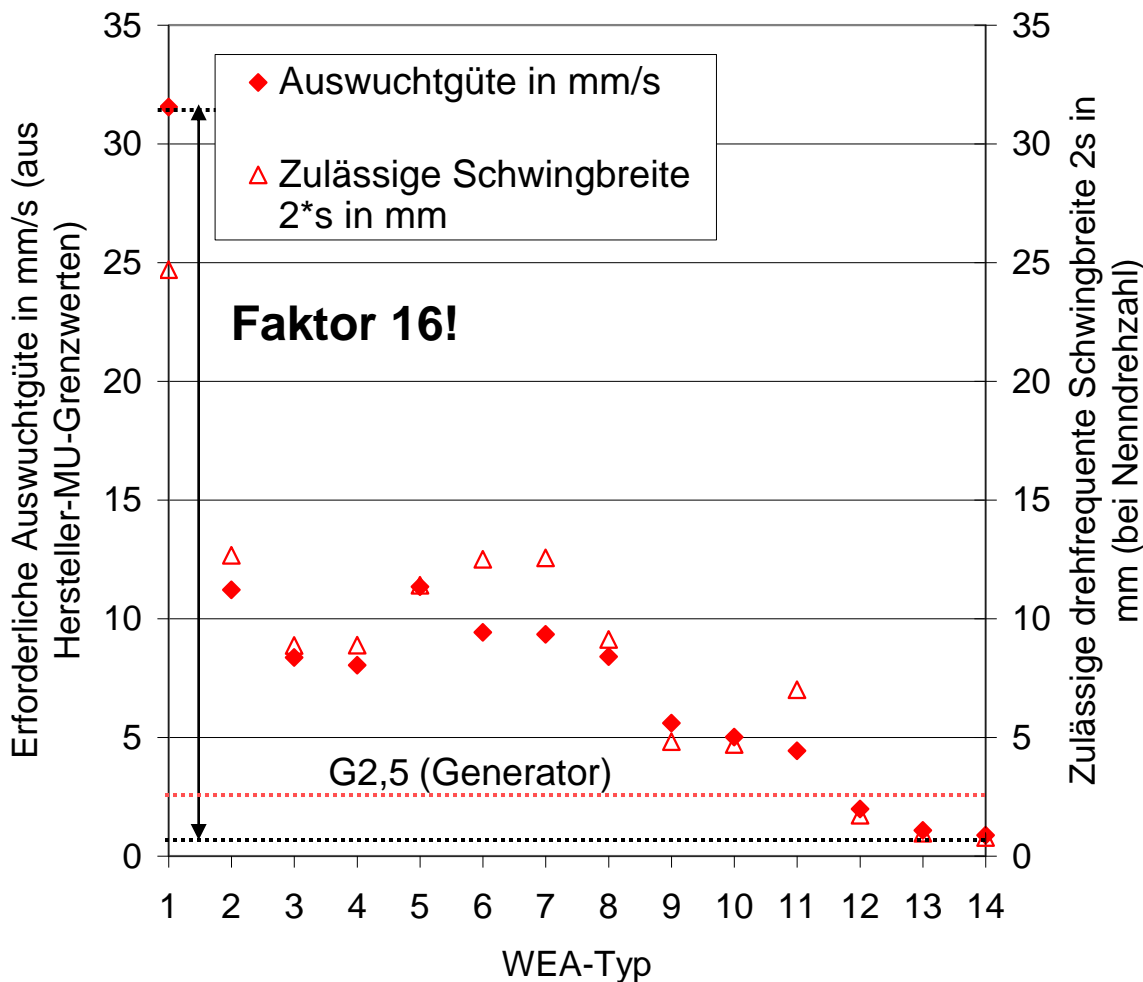
- **Ursache:** Ungleiche Blattmassen, bzw. Massenverteilung im Rotor
- Grenzwert U_{Zul} vom Hersteller bei WEA-Entwurf festgelegt
- Unwucht-Fliehkraft: $F_U = \Delta m r \Omega^2 = U \Omega^2$
- Quadratischer Einfluss der Drehzahl
- **Wirkung:** V.a. laterale Turm-Gondel-Schwingungen (TGS)
- Resonanzeinfluss auf TGS
- MU quantifizierbar & lokalisierbar durch Messung der Turm-Gondel-Schwingungen nach Vor-Ort-Kalibrierung mit Testmasse

Abhilfe:

Bei MU kann Rotor mit **Ausgleichsmassen** ausgewuchtet werden, ... **falls keine AU.**

Massenunwucht - 2

Variierende Hersteller-Grenzwerte

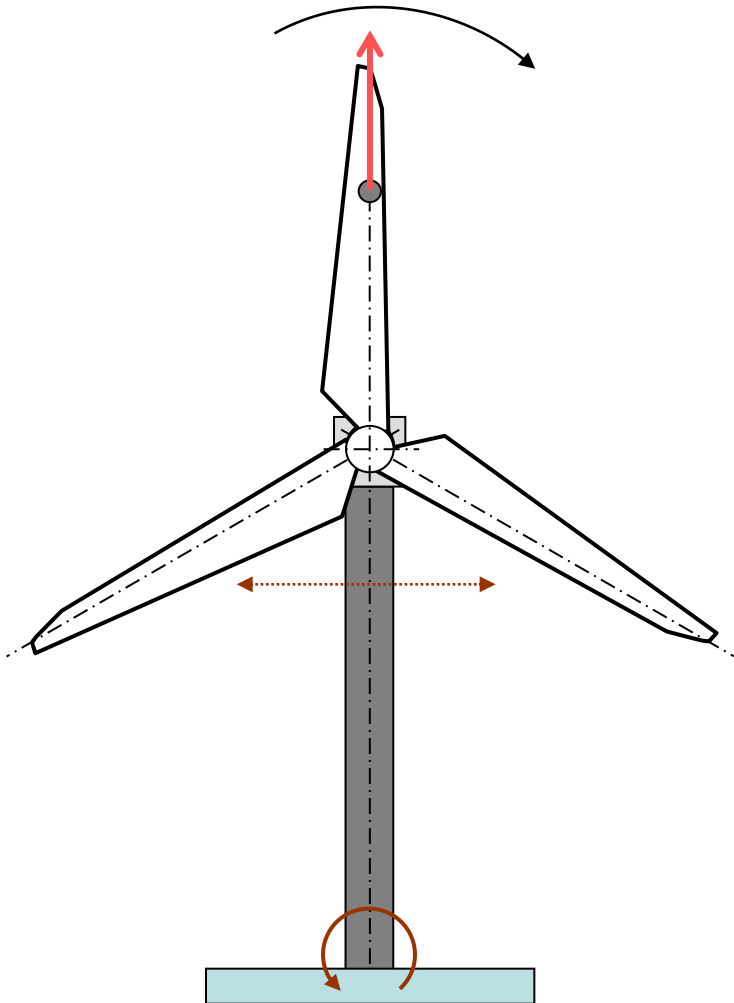


- Auswuchtgüte in mm/s nach DIN ISO 1940 berechnet:

$$v = (e_{zul} * \Omega) = 1000 * U_{zul}$$

$$[kg\ m]^* \Omega / m_{Rotor} [kg]$$
- **Auswuchtgütestufe für WEA-Rotor nicht standardisiert, da hoher Einfluss von Konstruktion und Regelung!**
- Betriebs-Auswuchten auf $0,25 * U_{zul}$ sinnvoll und möglich
- Gemessene Turm-Gondel-Schwingungsamplitude abhängig von Resonanznähe zur Turm-Eigenfrequenz
- Schwingbreite $2s = 2 * e_{zul}$ des TGS aus Nenndrehzahl berechnet
- Beschleunigungsamplitude, z.T. kleiner $5\ mm/s^2 \approx 5/1000\ g$

Auswirkungen von MU: Zyklische laterale Turm-Gondelschwingungen



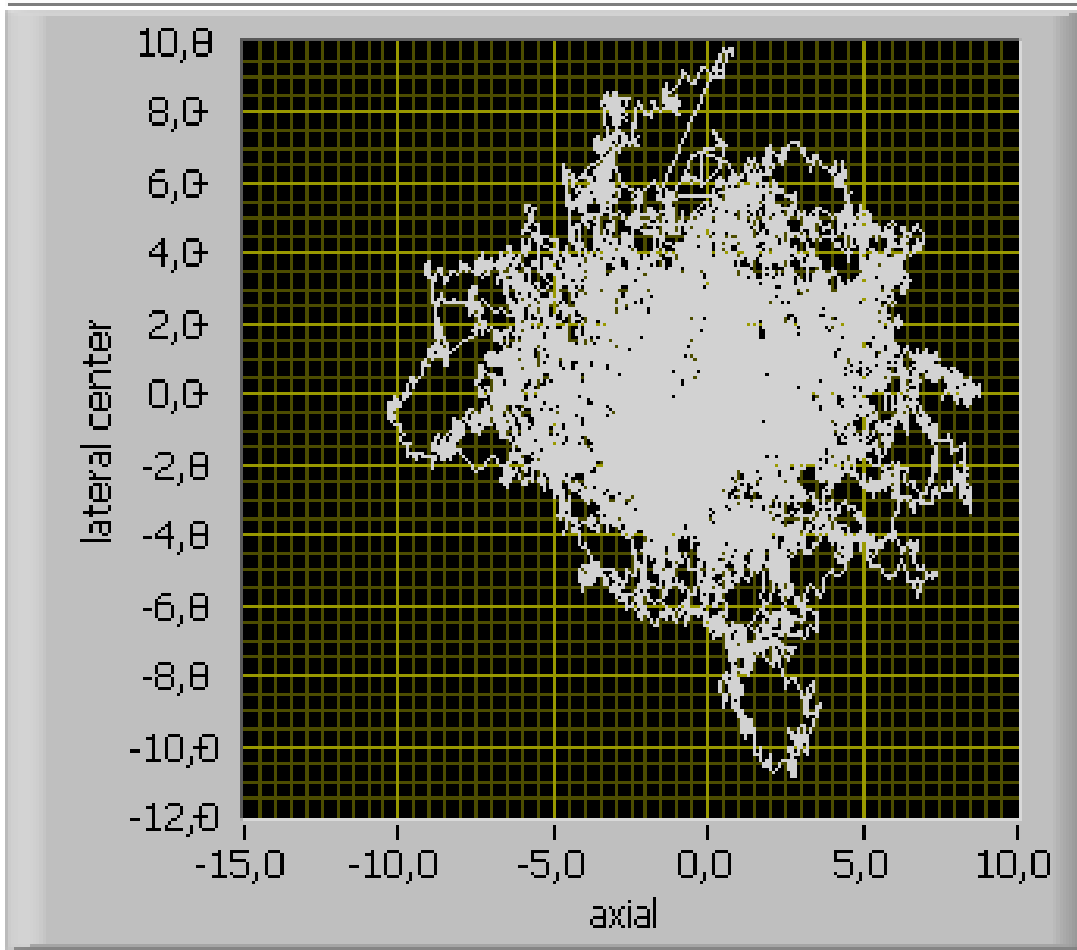
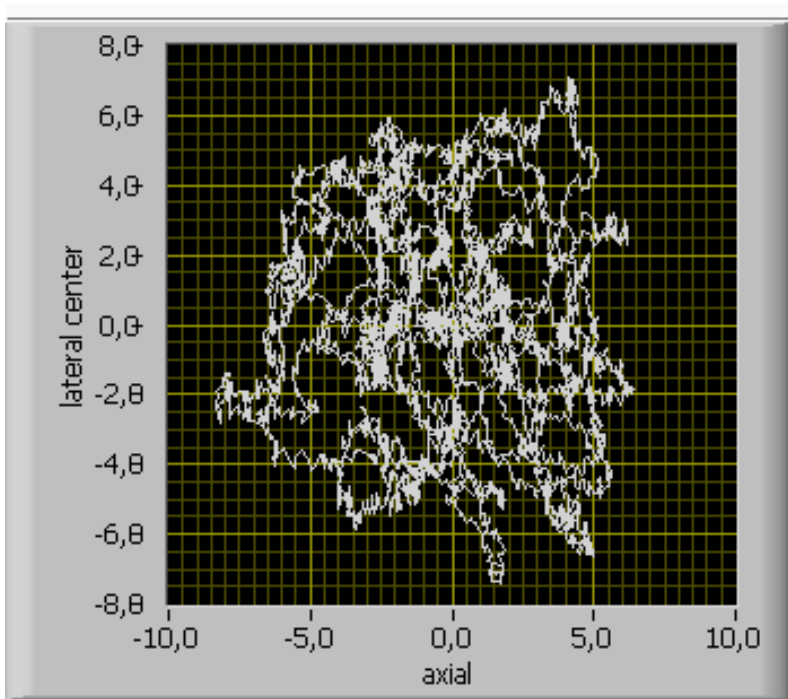
Folgen der MU:

- Zusätzliche Zugbelastung in Blattwurzel
- Zusätzliche zyklische Blattbeanspruchung durch Gondelschwingung (Schwingendes Rotor-Zentrum)
- Zyklische Belastung von Hauptlager und Getriebeabstützung durch umlaufende Kräfte
- Laterale Turm-Gondel-Schwingungen als Fußpunkterregung aller Gondelkomponenten
- Zusätzliche zyklische laterale Turmbiegung, da Nabenhöhe als Hebelarm bis zum Fundament
- Größenordnung der vermeidbaren Turmfußbiegung: Annahme 2 MW WEA, $h_N = 100$ m, $D = 80$ m, bei Nenndrehzahl und grenzwertiger MU :
Drehfrequente Amplitude $M_{\text{biegung}} = 100$ kNm

Auswirkungen von MU: 2D-Orbit der Turm-Gondelschwingungen



2D-Orbit von 100 s mit Stößen vom Pitch und Azimut



- **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
- **Statistische Reproduzierbarkeit** erst ab
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 Grenzwerts

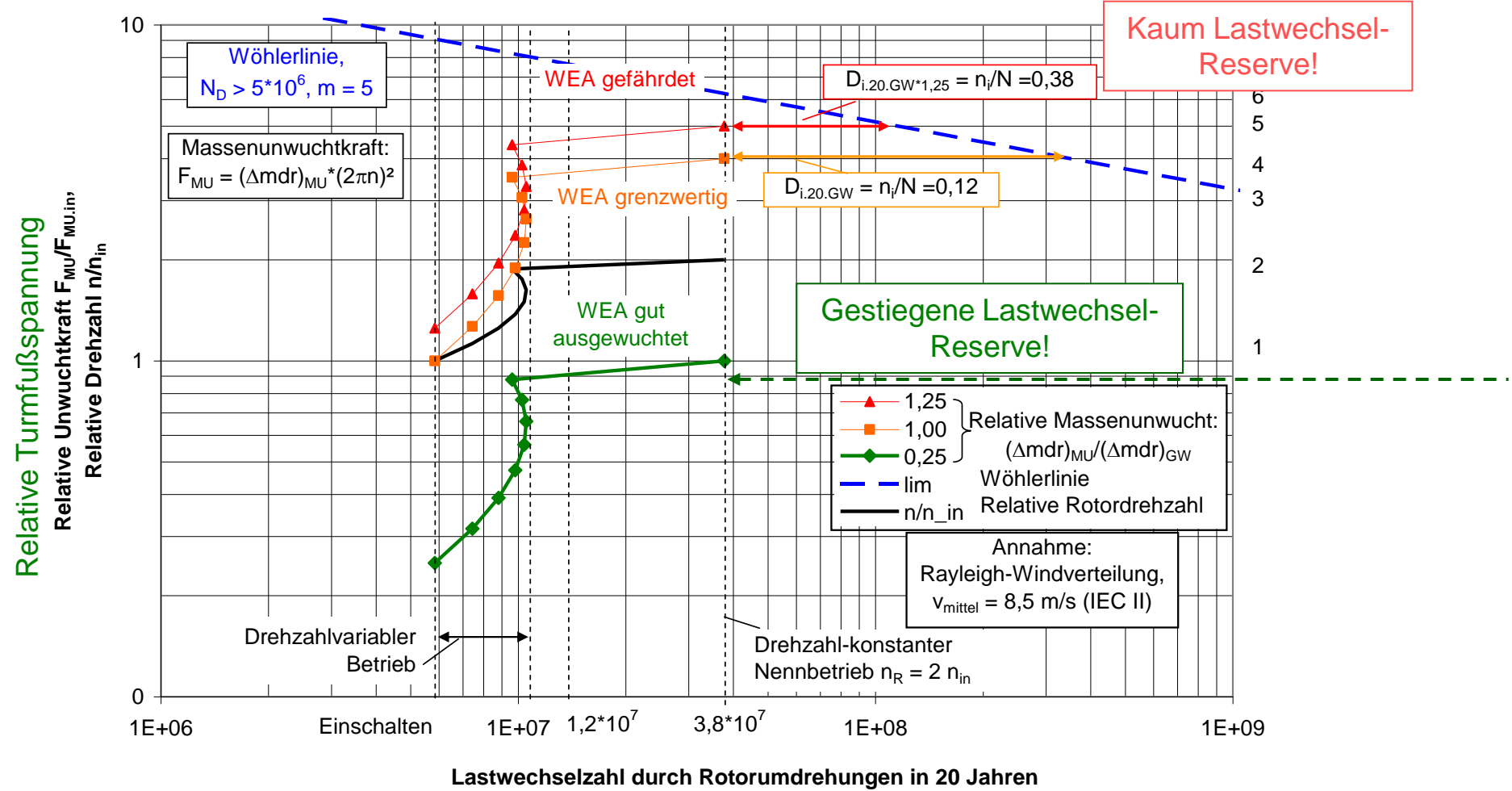


Relatives Lastkollektiv aus MU -0 Szenario

- Anwendung von WEA-Auslegungskriterien
- Drehzahlvariable WEA mit $n_R = 2 * n_{in}$; Resonanz vernachlässigt
- Referenzfall: Grenzwertige Massenunwucht
- Referenzkraft $F_{in}(n_{in}) = 1,0$ aus Referenzfall bei Einschaldrehzahl
- Relative Lastkurve $F(n)$, bezogen auf Referenzkraft
- Multiplikation der Lastkurve mit Windhäufigkeitsverteilung ergibt auftretende Lastwechselzahl n_i je Amplitudenklasse i
- MU-Schädigungsanteil je Amplitudenklasse $D_i = n_i / N_i$ als Quotient aus auftretender und ertragbarer Lastwechselzahl in 20 Jahren

Relatives Lastkollektiv aus MU -5 Schädigungsanteil aus Unwucht

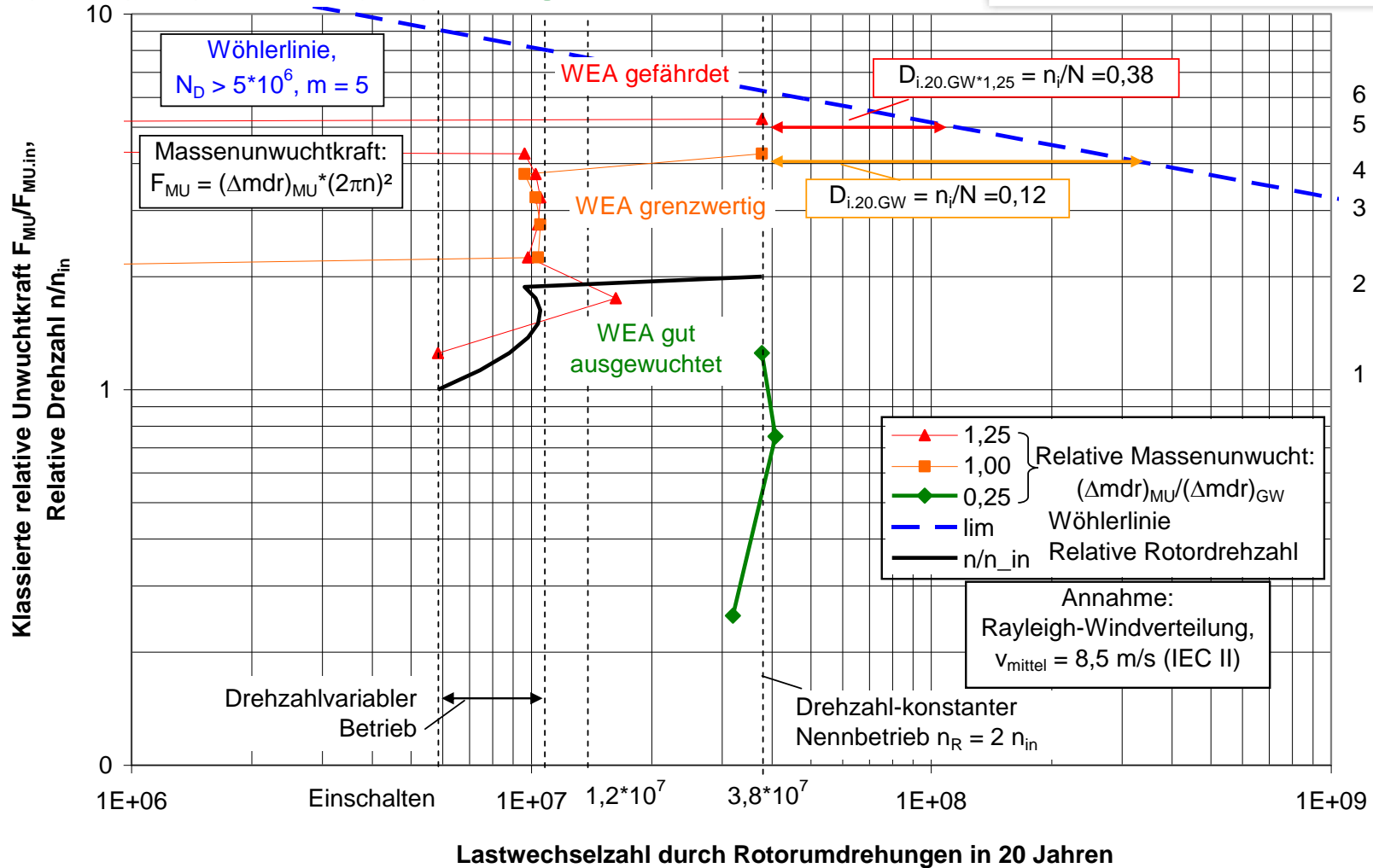
• Laterales Biegemoment am Turmfuß: $M_{b,lat} = F_{MU} \cdot h_N$, d.h. Betrachtung gilt auch für Turmfuß!



Annahme: $y_F = y_M = 1,25$ [GL]

Klassiertes Lastkollektiv aus MU -6

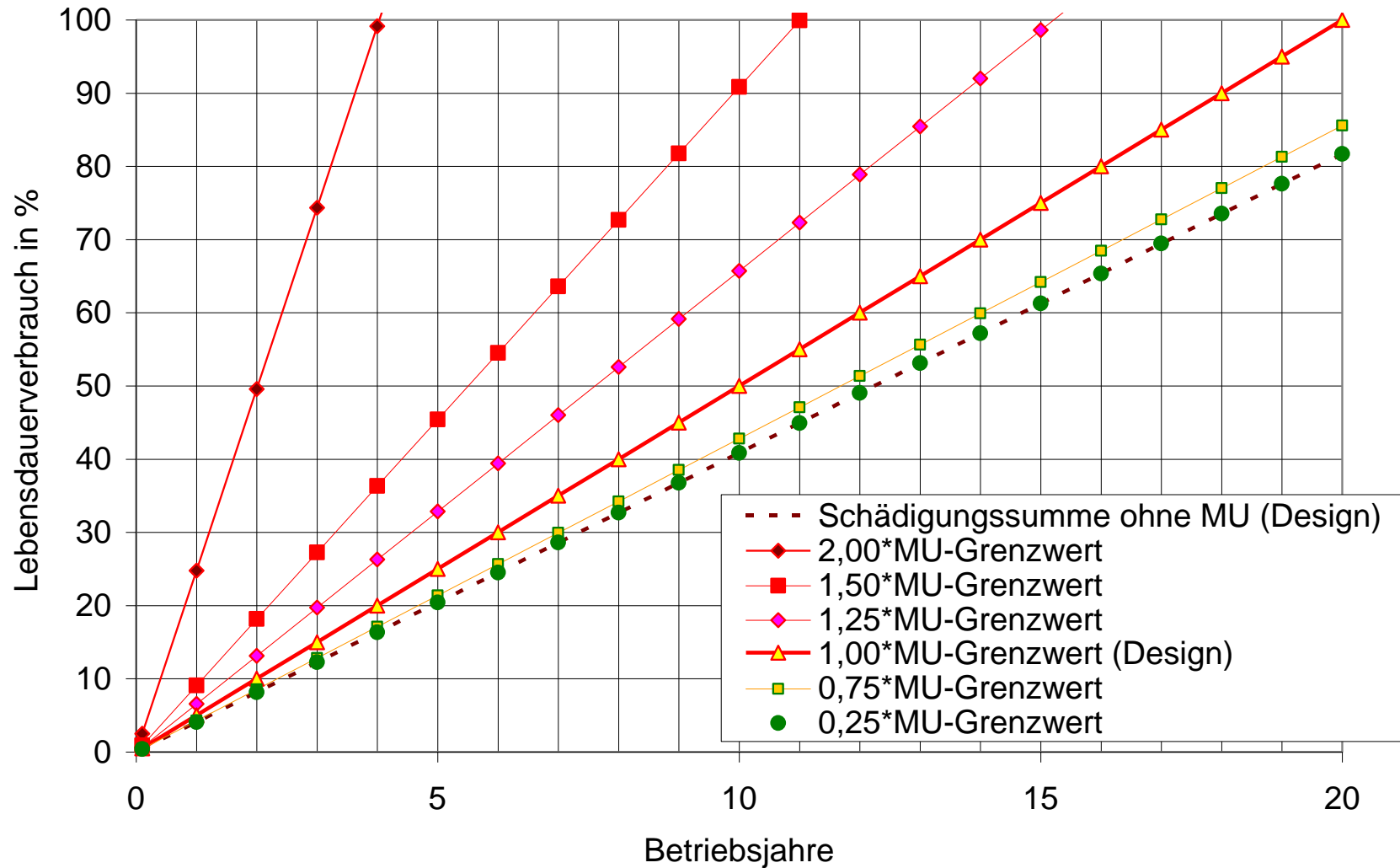
Stufenkollektiv durch MU



■ Klassierung, damit vergleichbar mit AU

Klassiertes Lastkollektiv aus MU -8

Lebensdauererbrauch durch MU



■ Stark steigender Lebensdauererbrauch bei MU über Grenzwert

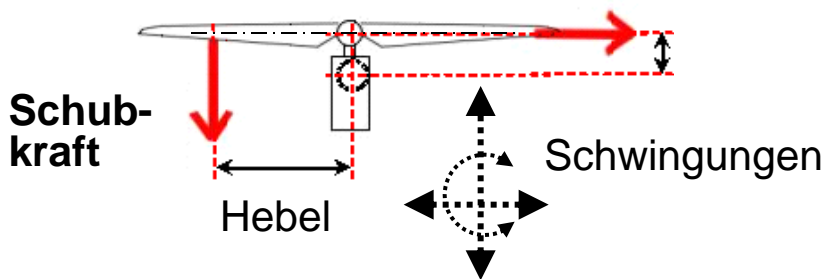
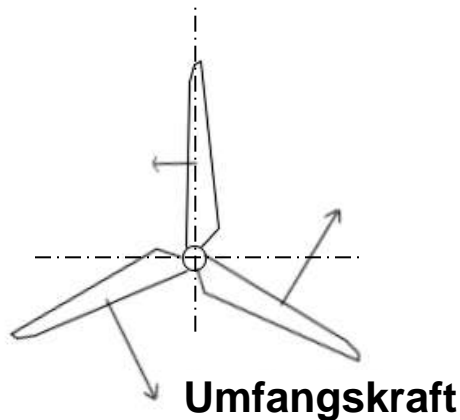
Relatives Lastkollektiv aus MU -6

Zusammenfassung

- Durch drehzahlvariablen WEA-Betrieb höchste Kräfte aus Massenunwucht bei Nenndrehzahl ($F \sim n^2$, wenn Resonanz vernachlässigt), d.h. auch höchste Materialbeanspruchung
- Durch Windhäufigkeitsverteilung und höchste Drehzahl daher höchste Lastwechselzahlen bei Maximalamplitude
- Überschreitung des Massenunwucht-Grenzwerts führt zu starker Zunahme des Lebensdauer verbrauchs, so dass vorzeitig kapitale Komponentenschäden auftreten können
- Auswuchten auf 25% des Massenunwucht-Grenzwerts schafft hohe Lastwechsel-Reserve, insgesamt 10% Reserve möglich, d.h. 2 Jahre, wenn Schädigungsanteile aus anderen Schwingungen konstant
- -> FILM von Rissarbeit bei 300% Massenunwucht und 200% Blattwinkelabweichung (1°)

Aerodynamische Unwucht -1

allgemeine Grundlagen



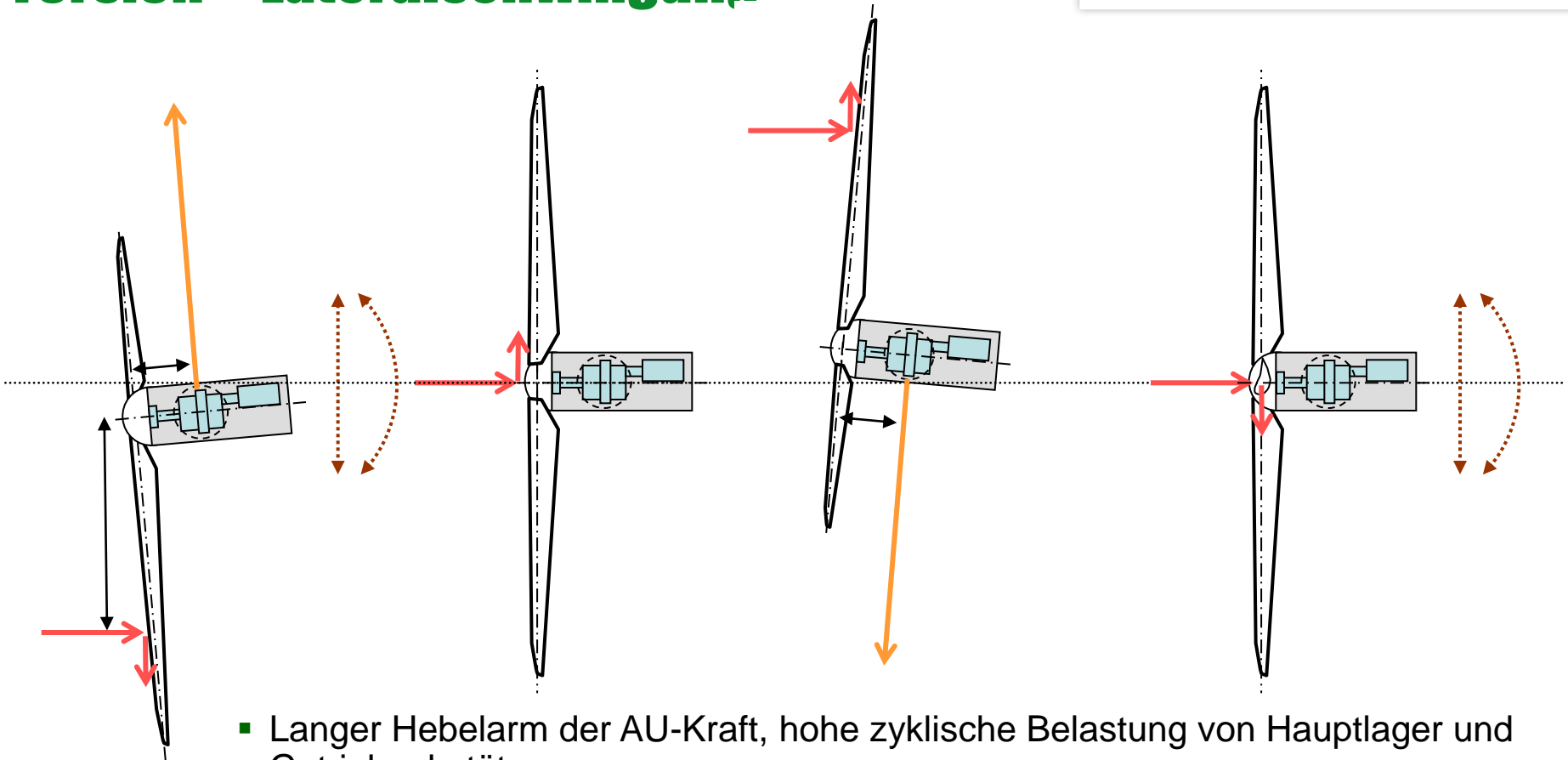
- Ursache: Abweichungen in den **aerodyn. Blatteigenschaften**
- Unterschiedliche **aerodyn. Kräfte** an den Rotorblättern => **Schubkraft-** und **Umfangskraft-** d.h. Drehmoment-Differenzen
- Einfluss von Drehzahl **und Windgeschwindigkeit**: $F \sim (u^2, v^2)$
- Wirkung: v.a. laterale, axiale und torsionale **Turm-Gondel-Schwingungen**
- **Verfälscht Auswertung der MU-Messung**

Abhilfe: Individuelle Maßnahmen nach je nach Ursache, AU ist NICHT mit Ausgleichsmassen behebbar!

Typische Unwucht-Ursachen:

Toleranzen und Fehler bei Produktion und Aufbau, Blattschäden, Verschleiß, Service, Wartung und Reparatur (bzw. Fehler dabei)

Folgen von AU: Kopplung von Torsion + Lateralschwingung



- Langer Hebelarm der AU-Kraft, hohe zyklische Belastung von Hauptlager und Getriebeabstützung
- Zyklische Fußpunkt-Erregung für alle Triebstrangkomponenten
- 3D-Orbit durch Überlagerung mit Axialschwingungen und Nicken (Gondelwhirl)
- Zyklische Torsion und Biegung im Turmkopfflansch und im Turmfuß

Aerodynamische Unwucht -2

Betriebsbedingte Arten

- Oberflächenänderung, Blatt-Erosion,
- Fehlende oder falsch installierte Strömungselemente

BERLINWIND

Vortex-
generatoren



Stall stripes und Eis



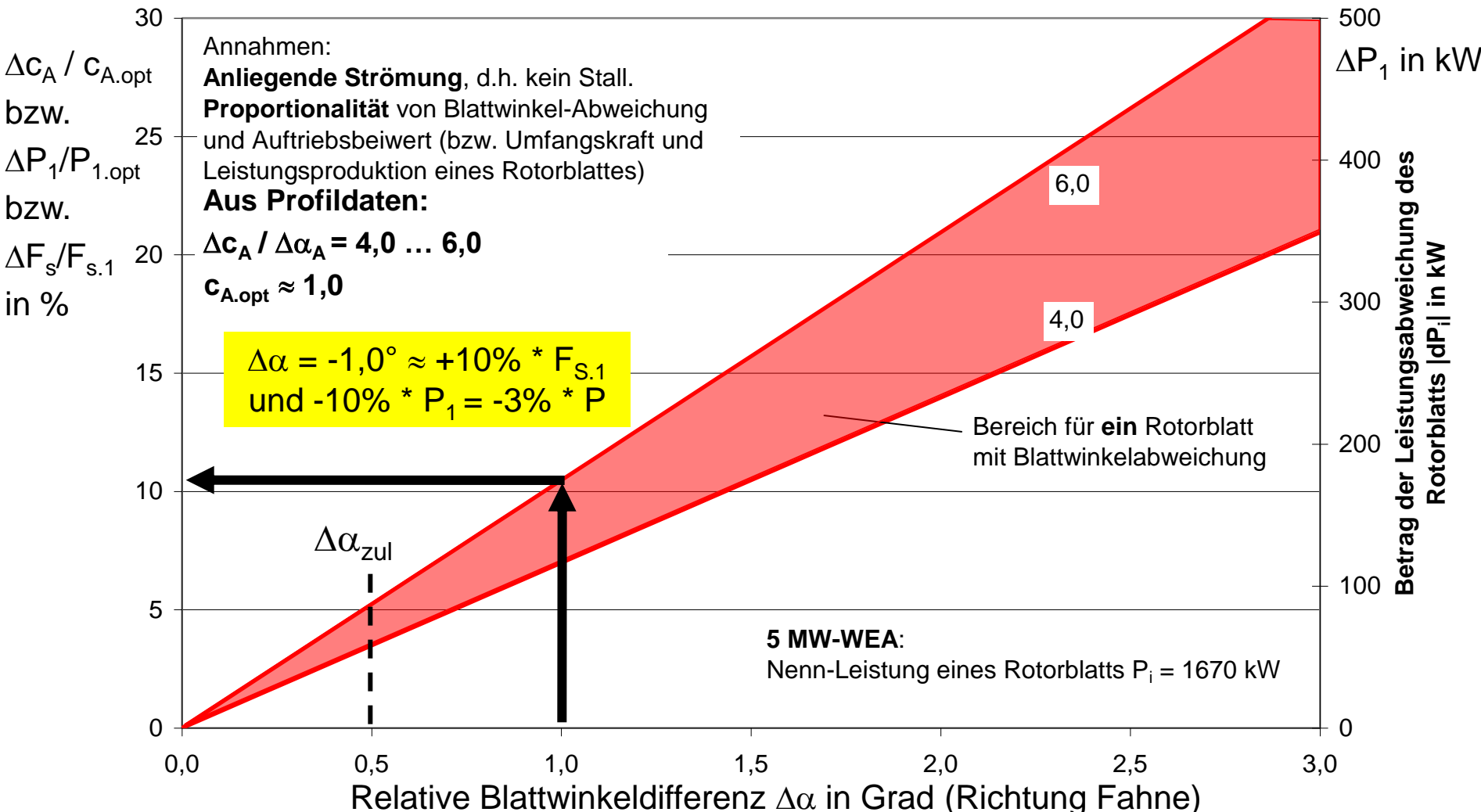
Vorderkantenerosion = (AU + MU)

Vereisung = Temporäre (AU + MU)

Abhilfe:

Abtauen, Reparieren,
Schwingungsprüfung und Auswuchten

Kräfte- und Leistungsabweichung durch Blattwinkeldifferenz (1 Blatt)

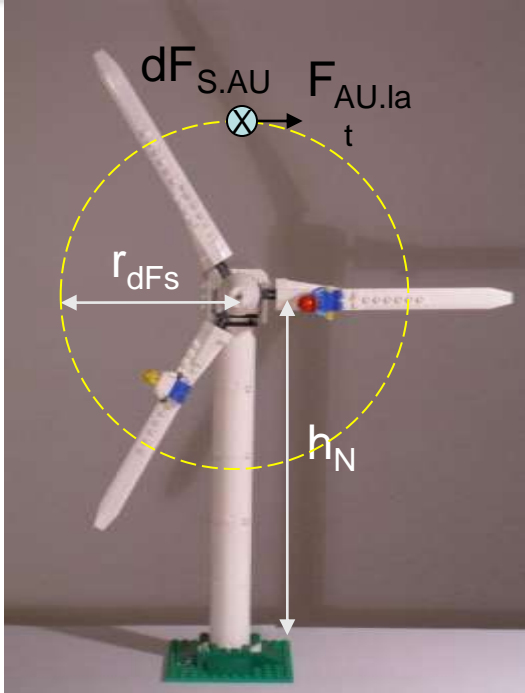


Praxis: Im gleichen Windpark bei Blattwinkelfehler 1,0...1,5° → Jahresertrag ca. 10% reduziert

Turmfußmomente aus AU (und MU)



- Kein Blattwinkelfehler: Quasi-konstanter Schub
- Schädliche Blattwinkeldifferenz $\Delta\alpha$:**
 - umlaufende axiale Schubkraft-Differenz $dF_{S,AU}$
 - d.h. (vermeidbare) zyklische Zusatzlasten:
 - Turmtorsion und Biegemoment im Turmfuß**
- Beispiel-Abschätzung: Grenzwertige 2 MW WEA**
 - Rotordurchmesser $D = 80$ m
 - Nabenhöhe $n_H = 100$ m
 - Maximalschub $F_S = 250$ kN
 - Blattwinkelgrenzwert: $\Delta\alpha = 0,5^\circ$
 - AU-Schubkraftdifferenz: $dF_{S,AU} = 5\% * F_S / 3 = 4,3$ kN
 - Kraftangriffs-Radius: $r_{dFs} = 28$ m
 - Lateralkraft aus Leistungsdifferenz: $F_{AU,lat} = 0,67$ kN

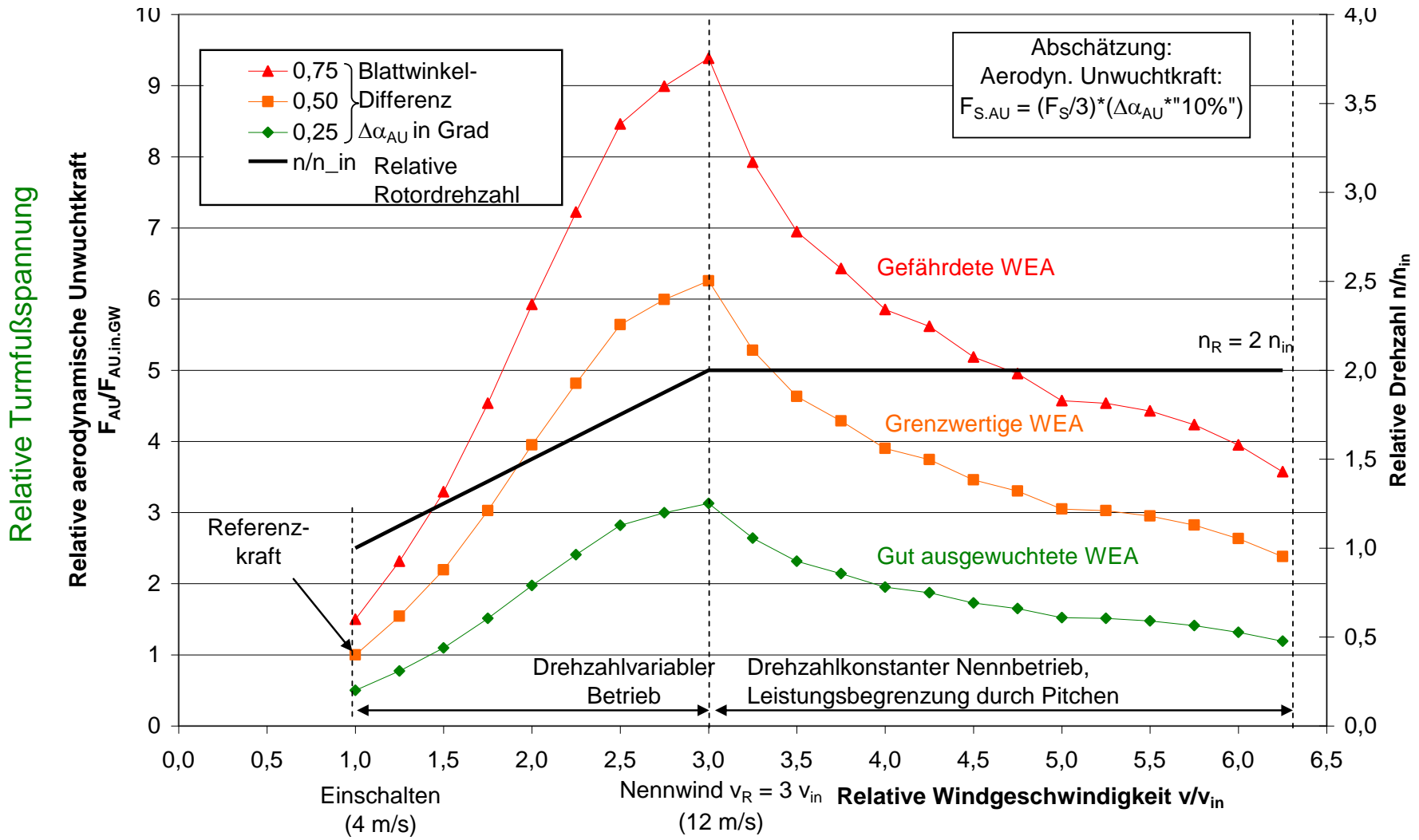


- Amplitude Turmfuß-Biegemoment aus MU-Grenzwert: ca. 100 kNm

	Grenzwert						
Blattwinkeldifferenz in Grad	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Relative Blattwinkelabweichung in %	50	100	200	300	400	500	600
Amplitude Torsionsmoment und Biegemoment am Turmfuß aus BW-Differenz in kNm	61	123	245	368	491	613	736

Relatives Lastkollektiv aus AU -1

Drehzahlvariable WEA mit und ohne AU

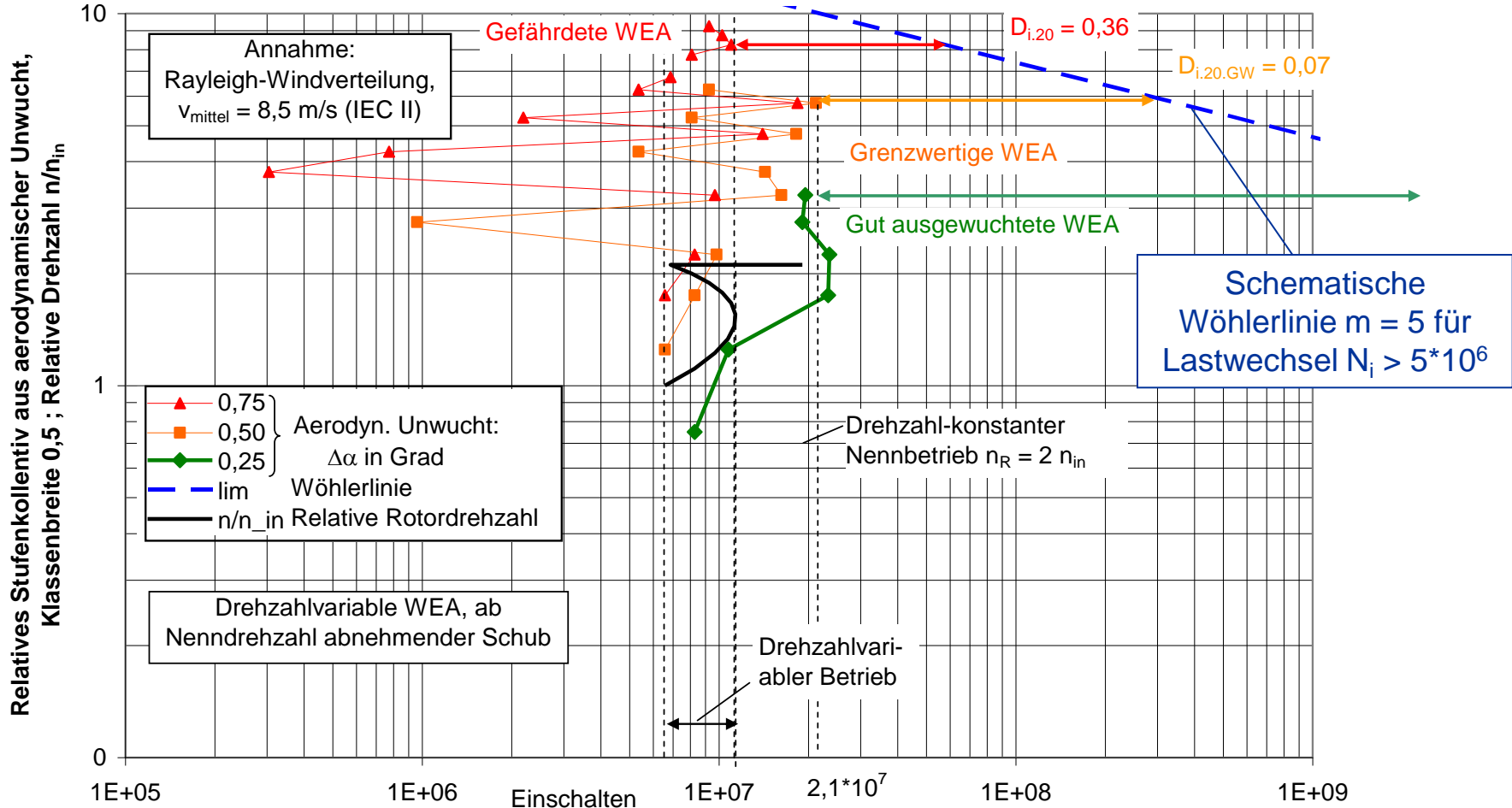


Relatives Lastkollektiv aus AU -2

Stufen-Lastkollektiv aus AU



Stufenkollektiv relative Turmfußspannung

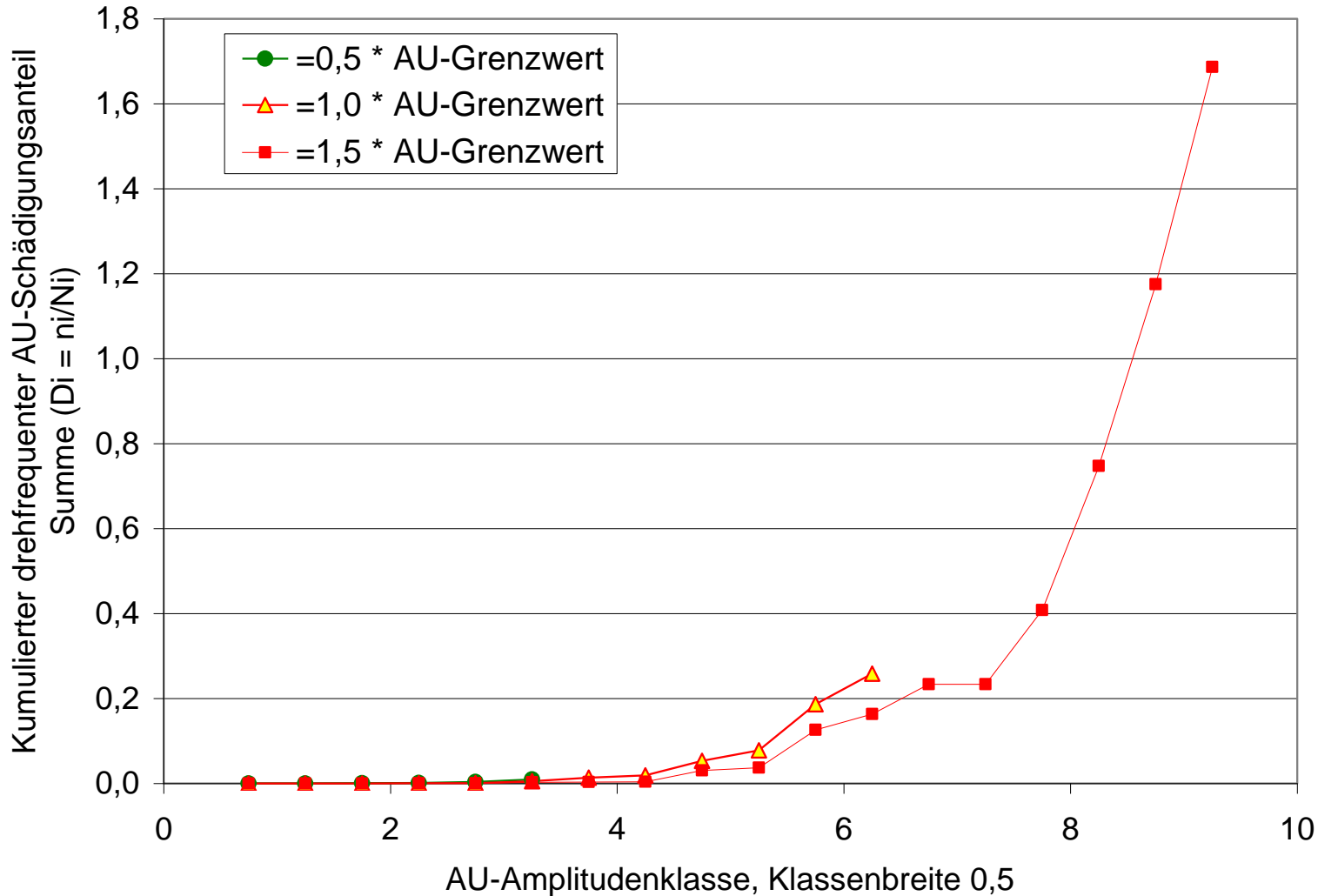


Lastwechselzahl durch Rotorumdrehungen in 20 Jahren

Annahme: $y_F = y_M = 1,25$; Stufenklassenbreite 0,5

Klassiertes Lastkollektiv aus AU -3

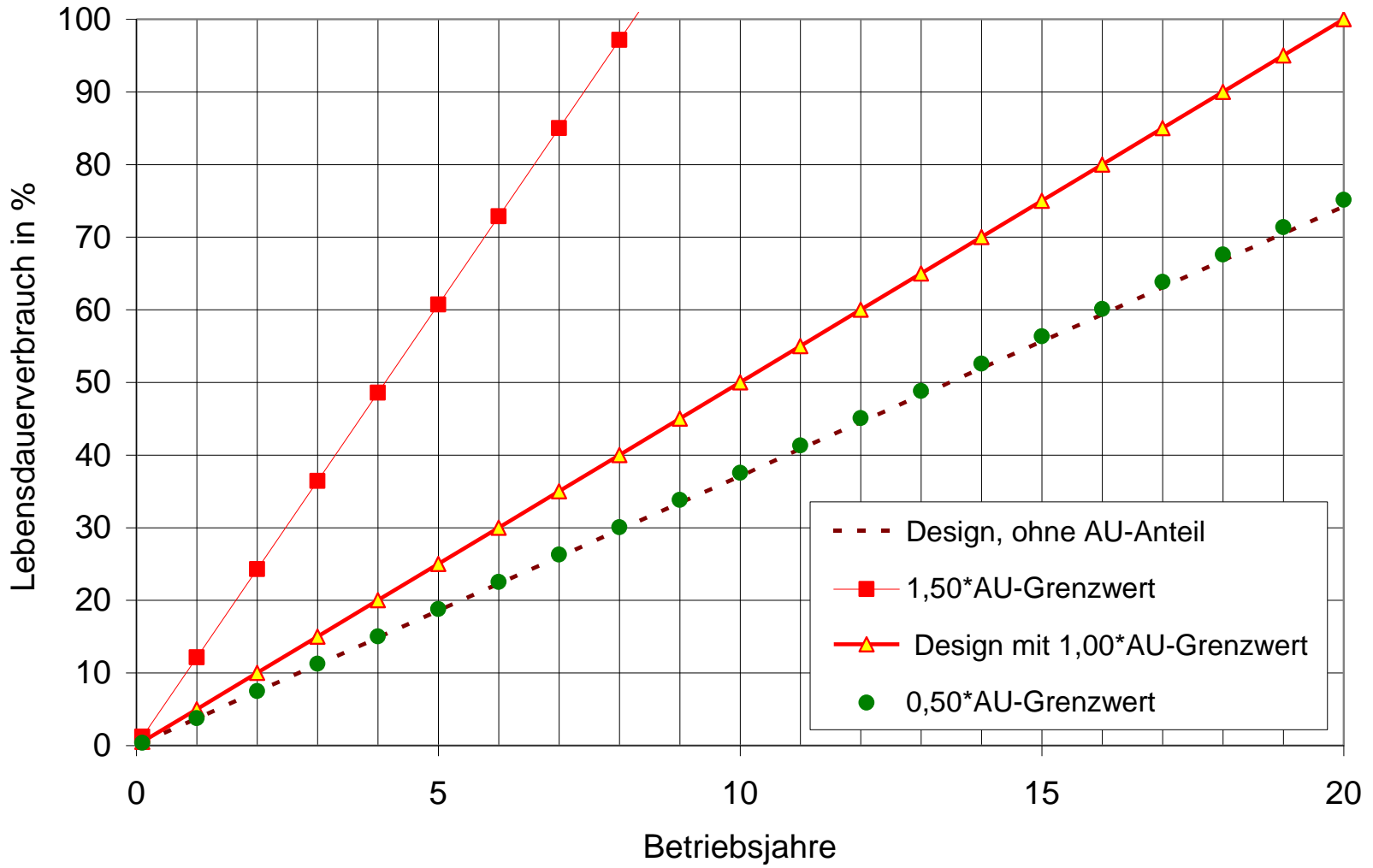
Kumulierter AU-Schädigungsanteil



■ Größter Anteil bei höchsten Klassen, stark mit AU steigend

Klassiertes Lastkollektiv aus AU-4

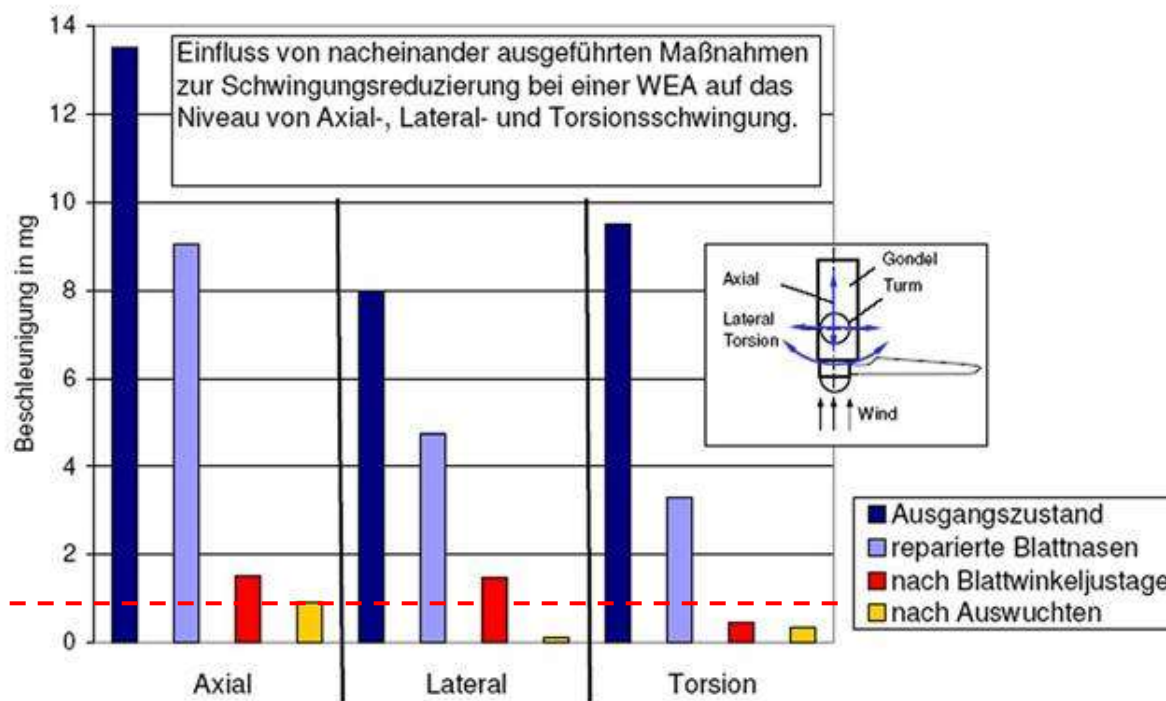
Lebensdauererbrauch durch AU



■ Stark steigender Lebensdauererbrauch bei AU über Grenzwert

Schwingungsberuhigung durch Auswuchten - Beispiele

- AU meist auf $0,2^\circ$ reduziert, d.h. 40% des Grenzwertes
- MU meist auf $< 50\%$ des Grenzwerts reduziert
- Amplitudenreduktion insgesamt typischerweise $\geq 90\%$
- Beispiel für WEA mit starker Blatterosion, Blattwinkelfehler und Massenunwucht, Erfolg nur durch richtige Reihenfolge der Maßnahmen!



Zusammenfassung

- **Entwurfs-relevante zyklische Ermüdungslasten durch Rotorunwucht**
- Reale Unwucht an der laufenden WEA ist meist unbekannt
- **Grenzwert überschreitende Rotorunwucht (RU) bei über 25% der WEA**
- Erhöhte zyklische Lasten aus **Rotorunwucht als potenzielle und vermeidbare Schadensursache bei Turm- und Fundamentproblemen** oft unbeachtet
- Beide Unwuchtarten, MU und AU erzeugen relevante – und vermeidbare (!) Turmfuß-Wechselmomente für Biegung und Torsion
- Bei WEA mit Turm- und Fundamentproblemen und –schäden ist Auswuchten dringend empfohlen, um das Lastniveau zu senken und wieder eine Lebensdauerreserve zu schaffen
- WEA-Abschaltungen und –Schäden sowie Ertragsverlust aufgrund von RU durch **regelmäßige Unwuchtprüfung ab der Inbetriebnahme** vermeidbar

Periodisches Rotor-Auswuchten vermeidet erhöhten WEA-Lebensdauerverbrauch und schont Turm und Fundament!



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>