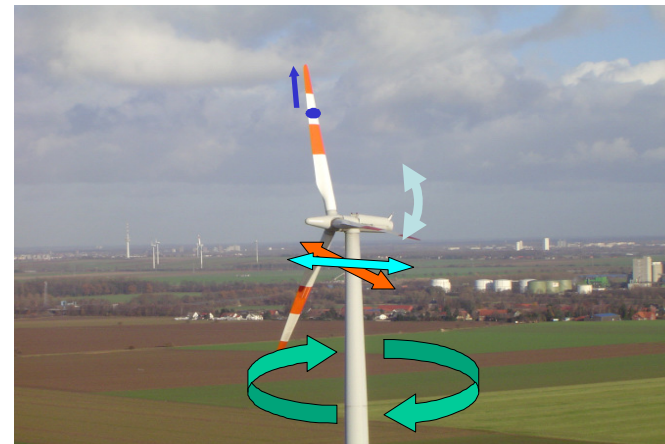


Vorstellung und Bewertung verschiedener Auswuchtstrategien für den WEA-Rotor hinsichtlich ihres Nutzens für den Betreiber

BERLINWIND



Dr.-Ing. C. Heilmann

BerlinWind GmbH, Bundesallee 67,
12161 Berlin, www.berlinwind.com

22. Windenergietage, Maritim Hafenhôtel Rheinsberg, 13.-14.11.2013

Forum 3 – Technik und Innovationen aus Brandenburg und Berlin

- **Rotorunwucht im WEA-Design und in der WEA-Realität**
- Technische Kriterien für Beurteilung des WEA-Auswuchtens nach ISO 21940 – Überblick und Details
- Technische und ökonomische Bewertung von Auswuchtstrategien
- Schlussfolgerungen

„Geduldete“ erhöhte Betriebslasten – WEA-Auslegung mit Unwucht-Grenzwerten

- Entwurfs-relevante **zyklische Ermüdungslasten durch Rotorunwucht**, da erhöhtes Lastniveau und beschleunigte Ermüdung aller Komponenten
- **WEA-Betriebslastenrechnung** für 20 Jahre **muss Grenzwerte (GW) für Massenunwucht (MU) und aerodynamische Unwucht (AU) definieren und verwenden** (IEC/DIN/EN 61400-1 sowie GL- und DIBt-Richtlinie)
- **In Typenprüfung manchmal explizite Forderung der GW-Einhaltung**
- **Fehlende Forderung eines messtechnischen Nachweises** an der realen WEA, nicht einmal bei Inbetriebnahme, daher selten Vertragsgegenstand
- **Reale Unwucht** der WEA meist unbekannt, und unüberwacht, obwohl es ein Rotormangel ist
- **Betriebsbedingte Zunahme der RU** im WEA-Leben ab Inbetriebnahme durch Erosion, Pitchzylinderleckagen usw. in Normen und Richtlinien sowie Siting und O&M unberücksichtigt, obwohl bekannt
- **RU durch Schwingungsmessung und Blattwinkelprüfung detektierbar**, lange bevor Risse sichtbar werden und die Schäden da sind
- **WEA- und Rotordesign erschwert** effizientes Auswuchten und Blattwinkeleinstellung und macht dadurch seine eigenen Vorteile zunichte

Jede Unwucht-Grenzwertüberschreitung bewirkt unzulässig erhöhte Betriebslasten und beschleunigten Lebensdauerverbrauch!

REALITÄT: Rotorunwucht-Statistik 2013 für verdachtslos geprüfte MW-WEA

BERLINWIND

Häufigkeit in %



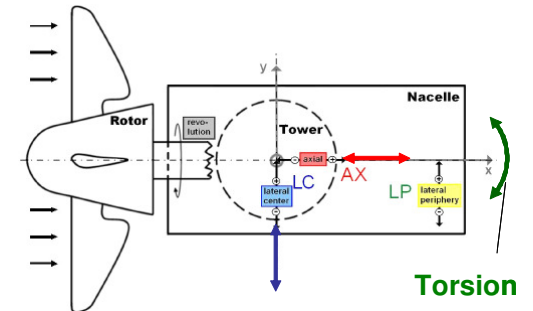
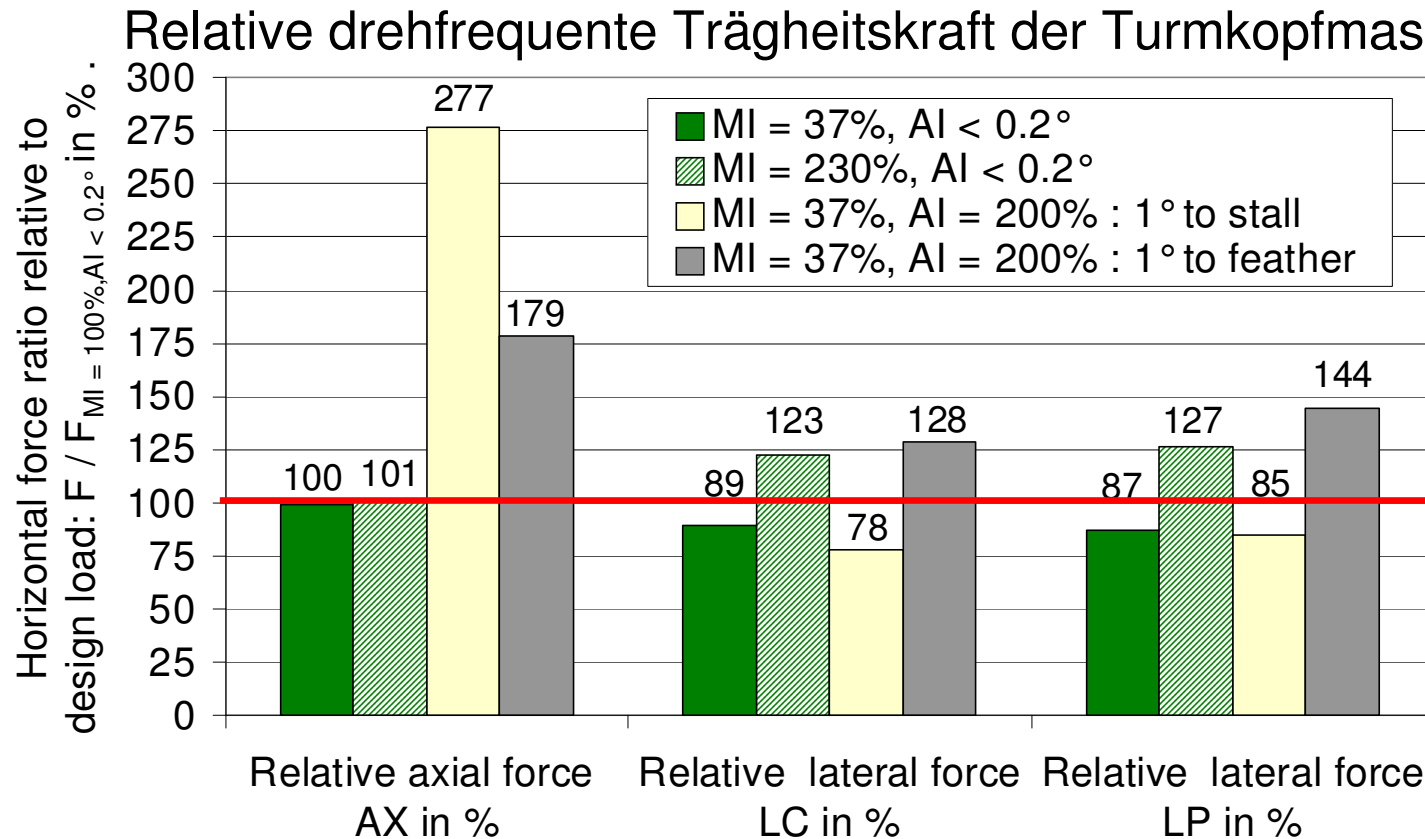
- Auswertung von ca. 250 verdachtslos geprüften WEA aus Auswuchtmessungen und RU-Prüfungen an ca. 1000 WEA

Welches Unwuchtniveau ist bei betroffenen WEA zu erwarten?

- Zu erwartende Grenzwert-Überschreitung um **XYfaches des Grenzwerts** bei ... % der von Unwucht betroffenen WEA

Anteil an betroffenen WEA	50%	25%	10%
Unwuchtart			
Massenunwucht	<i>1,45</i>	<i>2,0</i>	<i>3,5</i>
Aerodyn. Unwucht durch rel. Blattwinkeldifferenz	<i>2,25</i> <i>(1,1°)</i>	<i>2,75</i>	<i>3,4</i>

REALITÄT: Unwucht erhöht drehfrequente Turmkopfschwingung, 1.5 MW Pitch WEA bei Nenndrehzahl

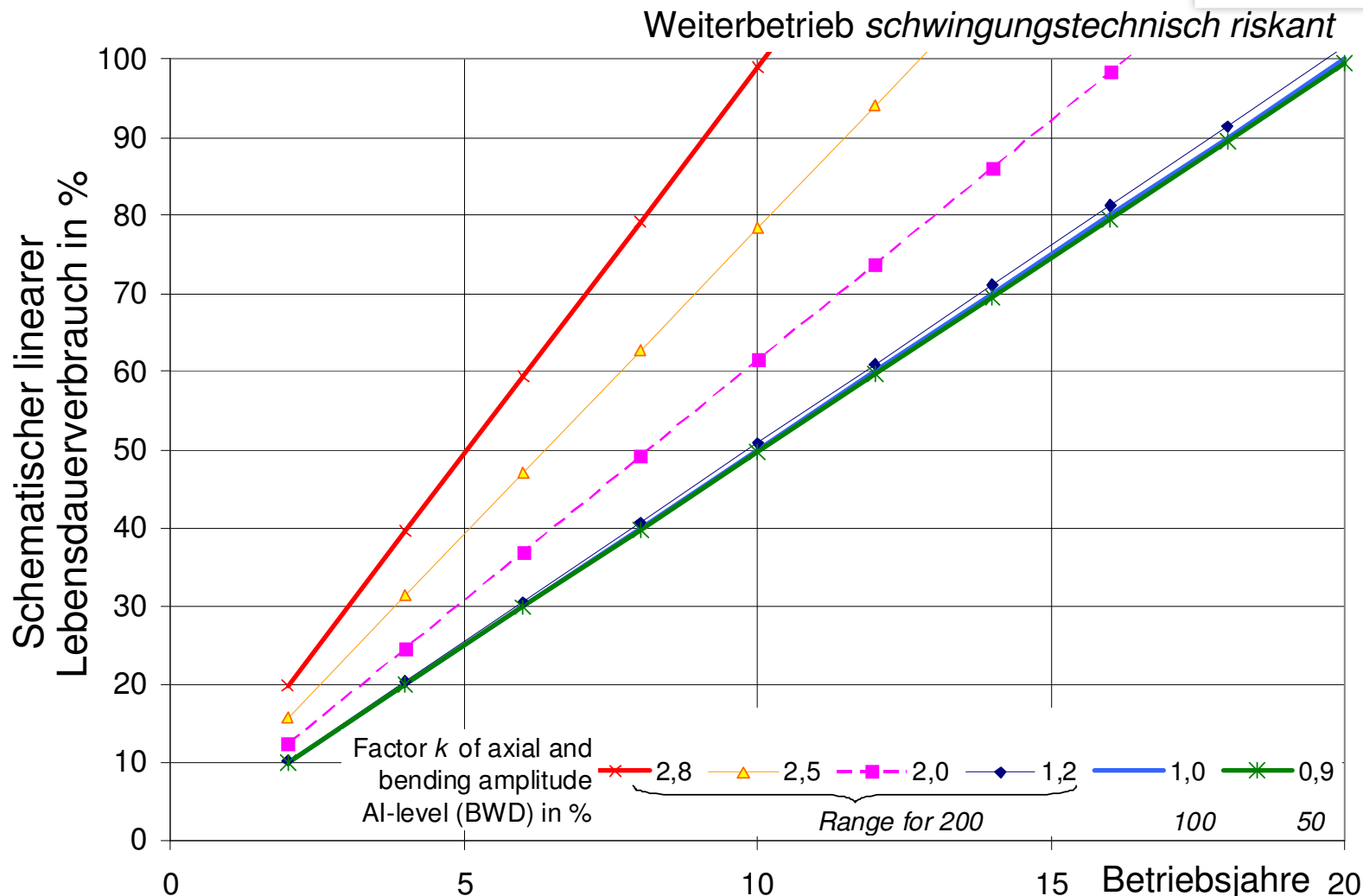


Design load case
 "100%" beinhaltet:
 100% MU und 100% AU

- 200% RU bewirkt Überscheidung der Auslegungs-Amplitude um Faktor $k = 1,23...2,77$
- Teilsicherheitsbeiwert der Betriebslasten: $\gamma_f = 1,0$ [GL]
- Teilsicherheitsbeiwert des Materials bei Ermüdungsrechnung: $\gamma_M = 1,25$ (Stahl, [GL])

Erhöhter Lebensdauererbrauch durch Rotorunwucht

BERLINWIND



- Bei der Ermüdung zählt JEDE Rotorumdrehung ab Inbetriebnahme.
- Ermüdungsschäden oft nach Ende der Garantiezeit
- Das schwächste Glied im Lastfluss versagt zuerst und ist meist WEA-Typ-spezifisch (incl. Lager, Getriebe, Pitch- u. Yaw-System und -bremsen, ...)

- Schadensausmaß und -häufigkeit durch RU kann variieren, wenn...
 - WEA/Material mit mehr oder weniger Reserven (teurer Stahl) ausgelegt/gebaut
 - andere Lastfälle noch kritischer als Normalbetrieb

Folgen erhöhter Rotorunwucht

BERLINWIND

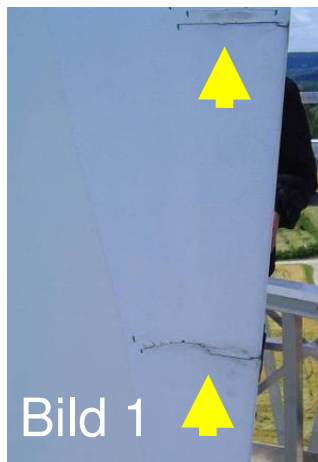


Bild 1

- Schäden an allen Komponenten bis hin zum Fundament
- Lebensdauerverbrauch und Reparaturkosten steigen
- Verfügbarkeit und Ertrag sinken

- 1) Hinterkantenrisse am Blatt
- 2) Durch MU und Stall-Vibration (AU) gebrochene Blätter von Pitch-WEA
- 3) Gebrochener Maschinenträger (6xGW)



Bild 2

- 4) AU-Torsion schädigt Azimut-Bremsen

- 5) Fundamentrisse nach 1 Jahr mit AU (12xGW)

- 6) Totalverlust von WEA wegen MU und AU nach wenigen Jahren

- 7) *Ertragsverlust durch AU (Bsp. ca. 2° (4x GW) -> 10% des Jahresertrags) sowie Stillstandsverlust*

- 8) Drehfrequent pumpender Fundamentriss (AU+MU)



Bild 6

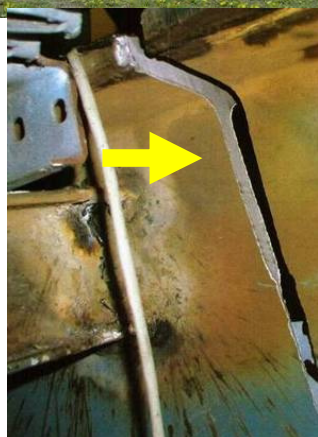


Bild 5

Bild 4



Bild 3



Betriebskosteneinfluss von Rotorunwucht

- Vorsichtiges Basisszenario für Binnenland, 100x 2 MW-WEA
-8600 € pro Jahr pro 2 MW WEA durch:
 - # erhöhte Schadenskosten und
 - # Ertragsverlust wegen Blattwinkelfehlstellung
(Ertragsverlust durch Stillstand nicht eingerechnet!)
- **Äquivalent zu -2% der Jahresstromproduktion**
- Bei 1,5% aller WEA Minderung der Jahresstromproduktion größer -10% (zzgl. Stillstandsverluste)
- Bei 31,4 GW installierter Leistung in D:
„Minderleistung“ wegen Rotorunwucht ca. 500 MW !
- **IST DAS ALLES KOSTENEFFIZIENT VERMEIDBAR?**

- Rotorunwucht im WEA-Design und in der WEA-Realität
- **Technische Kriterien für Beurteilung des WEA-Auswuchtens nach ISO 21940 – Überblick und Details für WEA**
- Technische und ökonomische Bewertung von Auswuchtstrategien
- Schlussfolgerungen

Wie Effizienz und Nutzen verschiedener Auswuchtstrategien beurteilen?

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

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 $D > 100\text{ m}$ und > 23000 WEA allein in Deutschland, fehlen WEA in der ISO.*

Technische Kriterien für Beurteilung des WEA-Auswuchts 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, 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

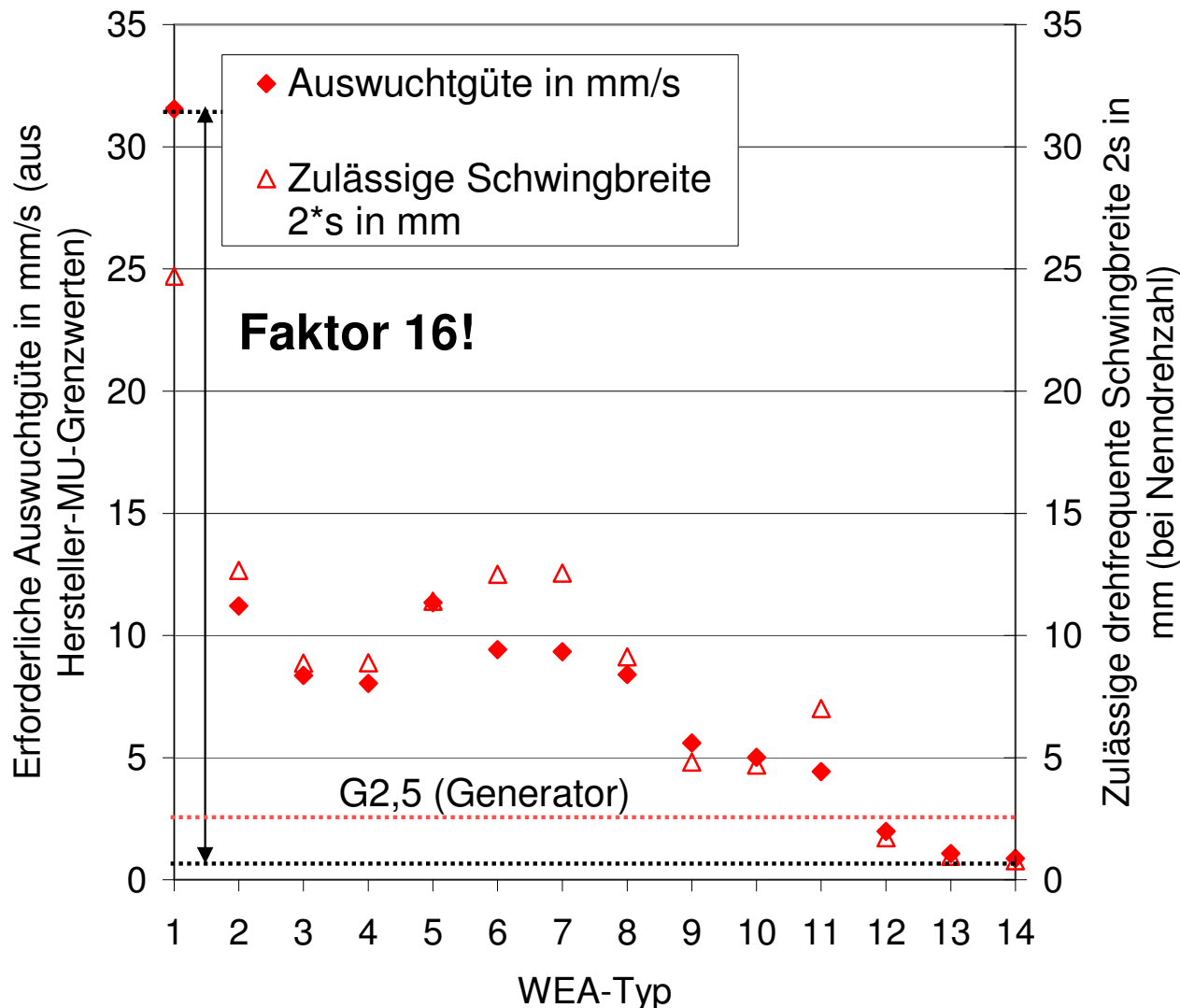
Kriterium A, B: Massenunwucht durch Schwingungsmessung sicher bestimmen

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 je WEA-Typ verwenden

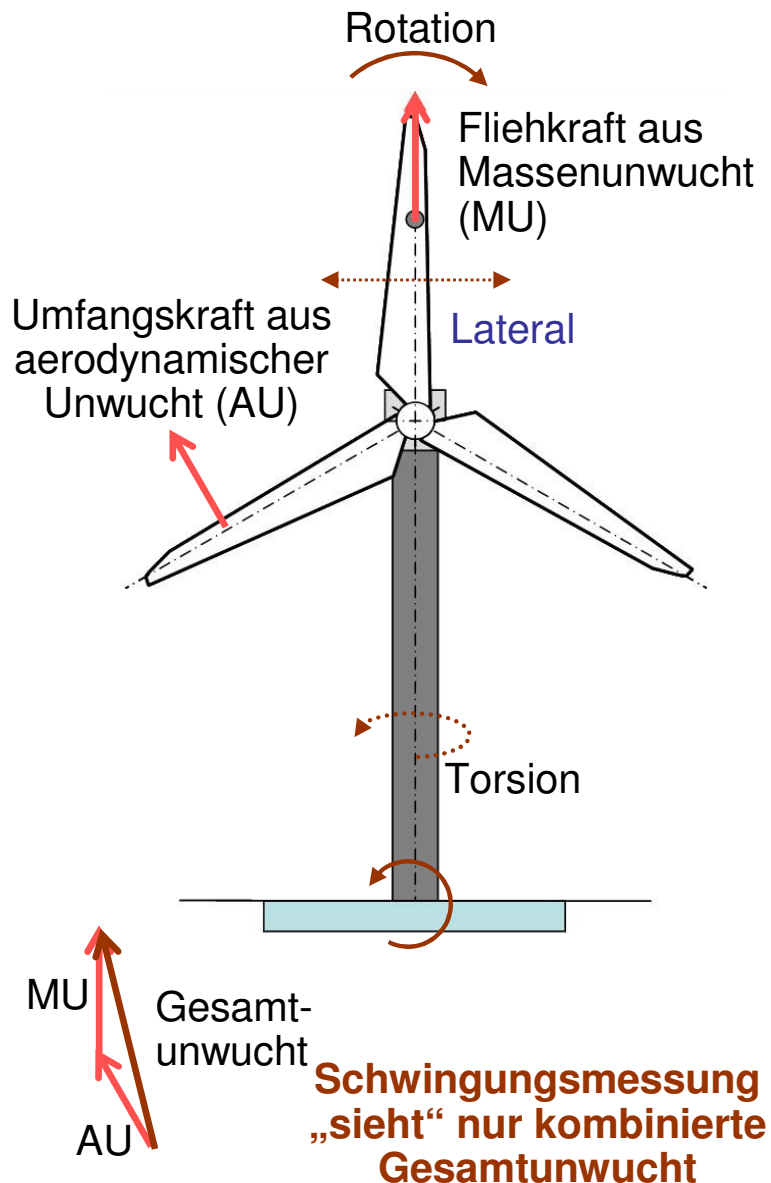


- **Auswuchtgüte in mm/s nach DIN ISO 1940** berechnet:

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

$$[kg\ m]^* \Omega / m_{Rotor} [kg]$$
- **Auswuchtgütestufe für WEA-Rotor nicht standardisierbar, da hoher Einfluss von 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 $5\ mm/s^2 \approx 5/1000\ g$

Kriterium C: Überlagerung mit anderen Schwingungsursachen

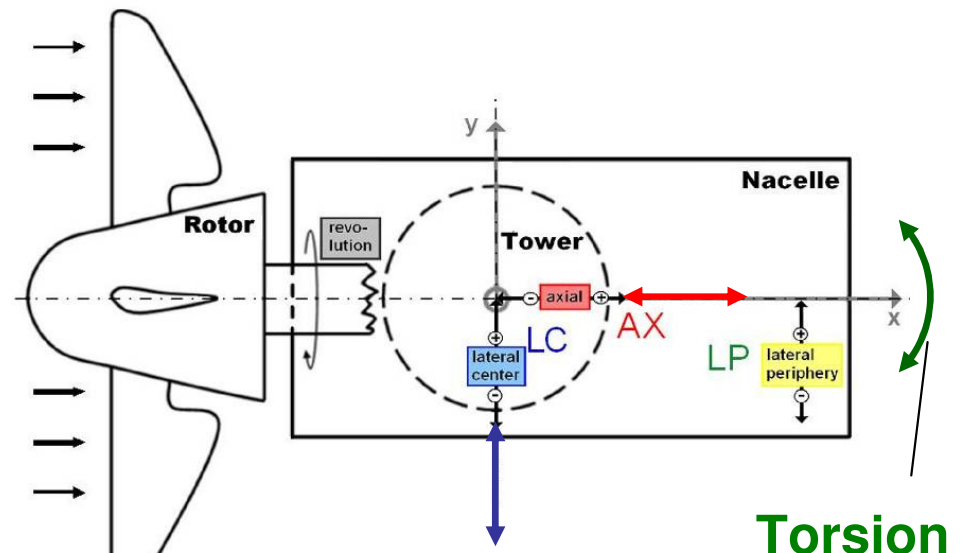
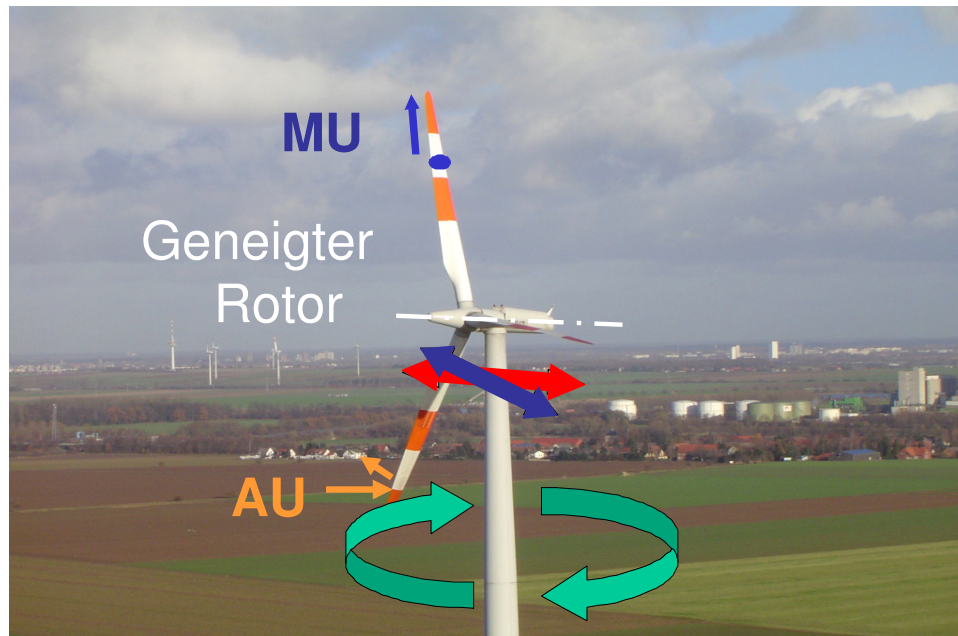
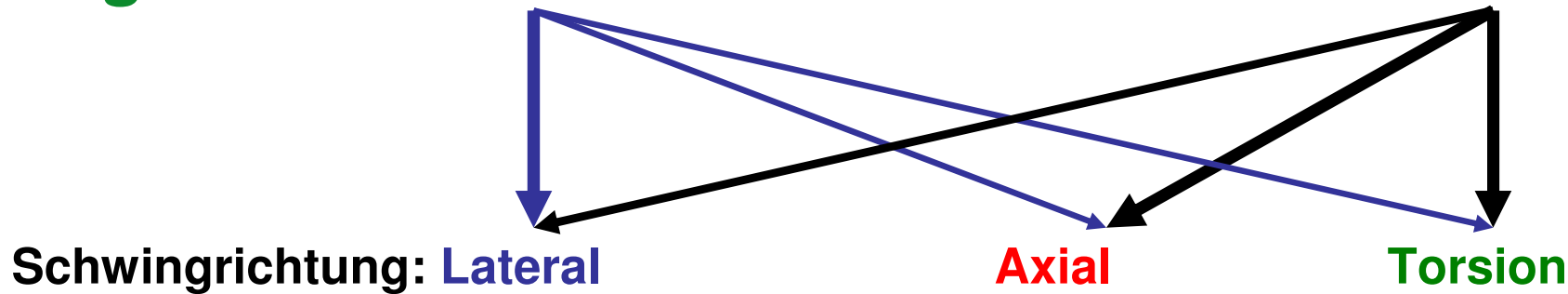


- Zwei **Rotorunwucht-Arten** mit unterschiedlichen physikalischen Ursachen:
- **Massenunwucht (MU):** Schädliche Fliehkraft durch ungleiche Massen, bzw. -verteilung im Rotor
- **Aerodynamische Unwucht (AU):** Schädliche Schubkraft- und Umfangskraft-Differenzen durch abweichende aerodynamische Eigenschaften 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
- + Stochastische Windanregung = **RU-Niveau nicht fühlbar**

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

Massenunwucht

Aerodynamische Unwucht

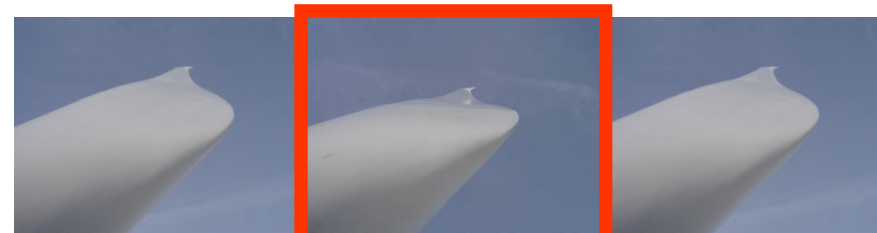


- Erhöhte “Fußpunkterregung” aller Rotor- und Gondelkomponenten – Gondel-Erdbeben
- Erhöhte Biege- und Torsionsmomente in Turm und Fundament

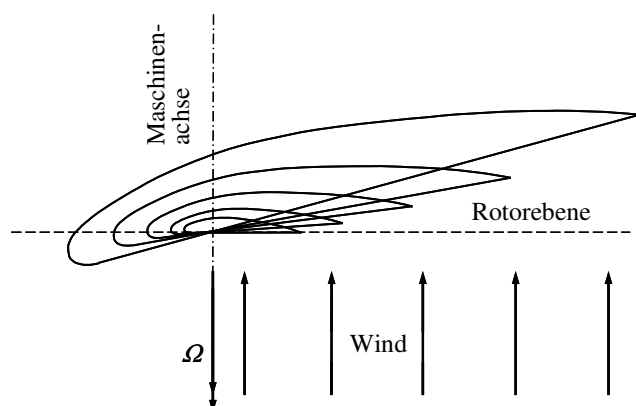
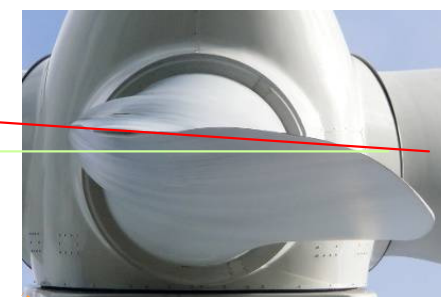
Aerodynamische Unwucht – Blattwinkelfehler und Grenzwerte

BERLINWIND

- **Relative Blattwinkeldifferenz der Blätter zueinander:** typ. Grenzwert $0,5-0,6^\circ$
Abhilfe: *Relative Blattwinkeljustage*
- **Absolute Blattwinkelabweichung** zum Referenzwert des Blattherstellers: GL: max. $\pm 0,3^\circ$
Abhilfe: *Absolute Blattwinkeljustage*
- **Blattverwindung:** Twist von Blattspitze bis größte Blattiefe, meist nur interner Hersteller-Grenzwert aus Blattfertigung
Abhilfe: Keine möglich, außer Blatttausch oder schwingungstechnisch optimierte Blattjustage



So sichtbare Abweichung ist Vielfaches des Grenzwerts



[Gasch-Twele:
Windkraftanlagen, Kap. 5]

Einzig sinnvolle Abhilfe:
Optische Blattwinkelprüfung und
Validierung der Einstellung mit
Schwingungsmessung

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

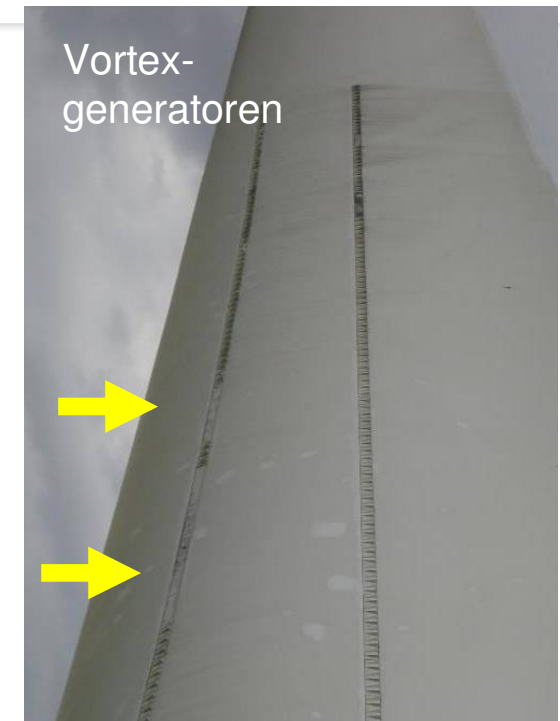
- Eis
- Blatt-Erosion
- Fehlende oder falsch installierte Strömungselemente (0,5 m in Schwingung sichtbar)



Vorderkantenerosion = (AU + MU)
Vereisung = Temporäre (AU + MU)

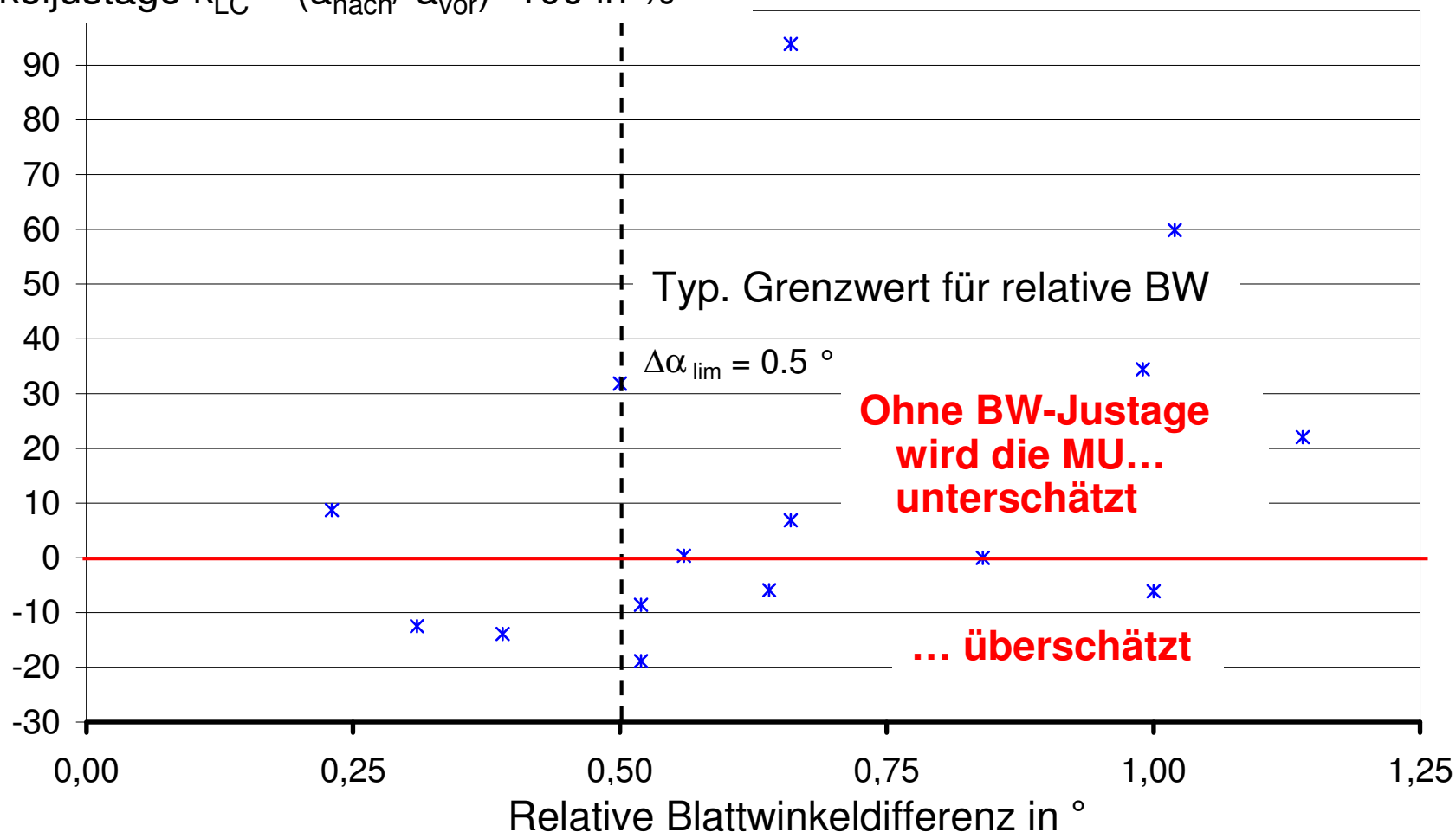
Abhilfe:
Abtauen, Reparieren,
Schwingungsprüfung und Auswuchten

BERLINWIND



Kriterium C: Verfälschung der MU-Messung durch AU

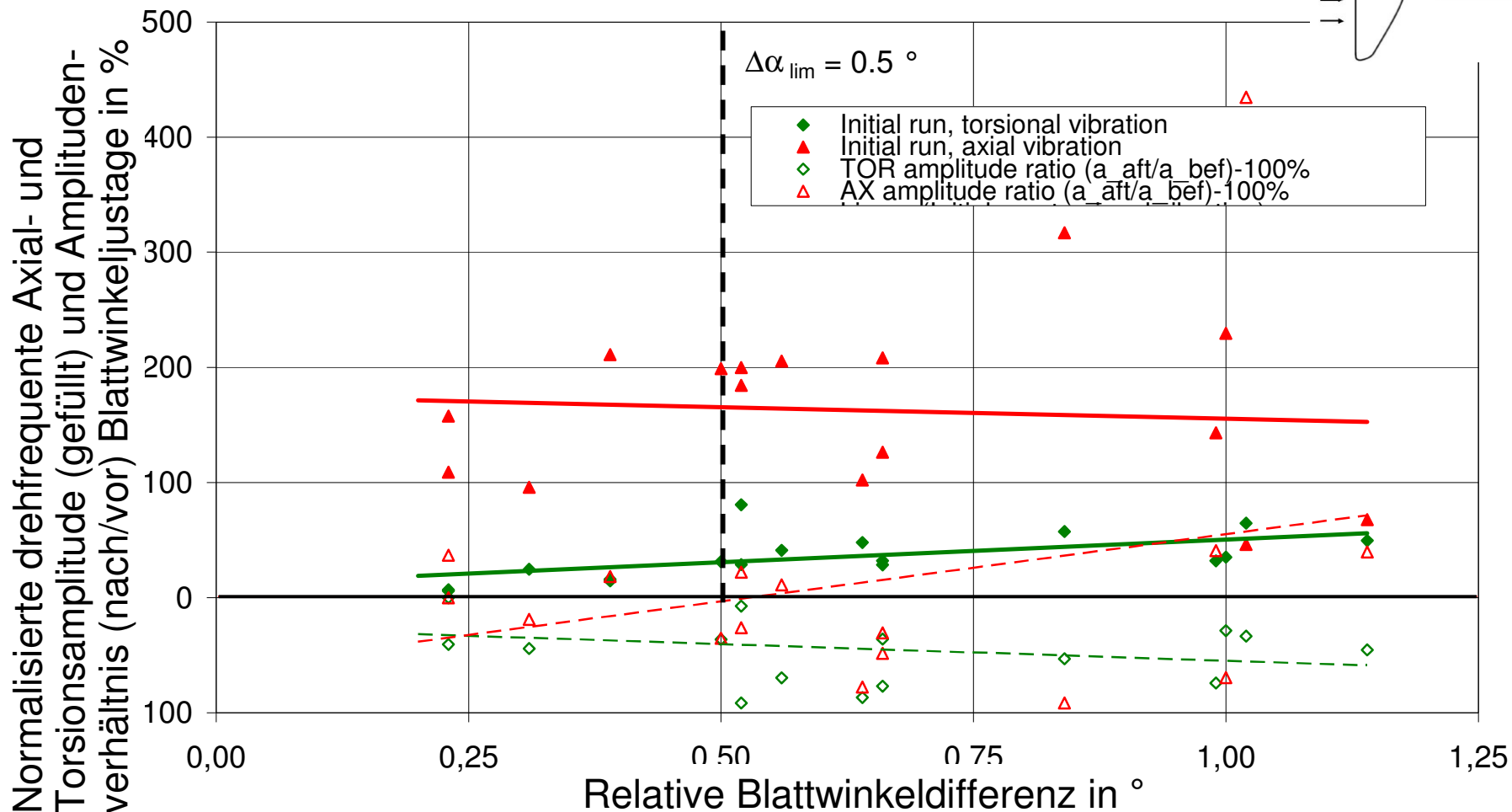
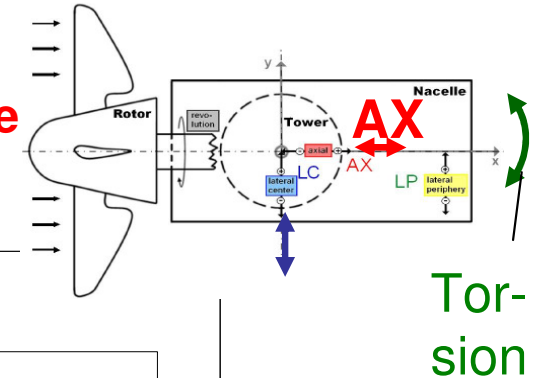
Verhältnis der lateralen drehfrequenten Amplitude (nach/vor) Blattwinkeljustage $k_{LC} = (a_{nach} / a_{vor}) - 100$ in %



- 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

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

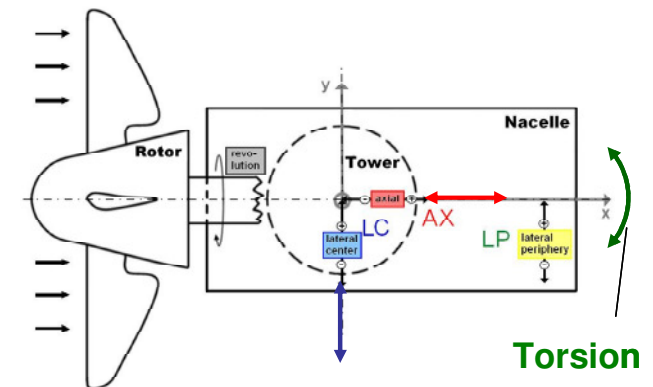
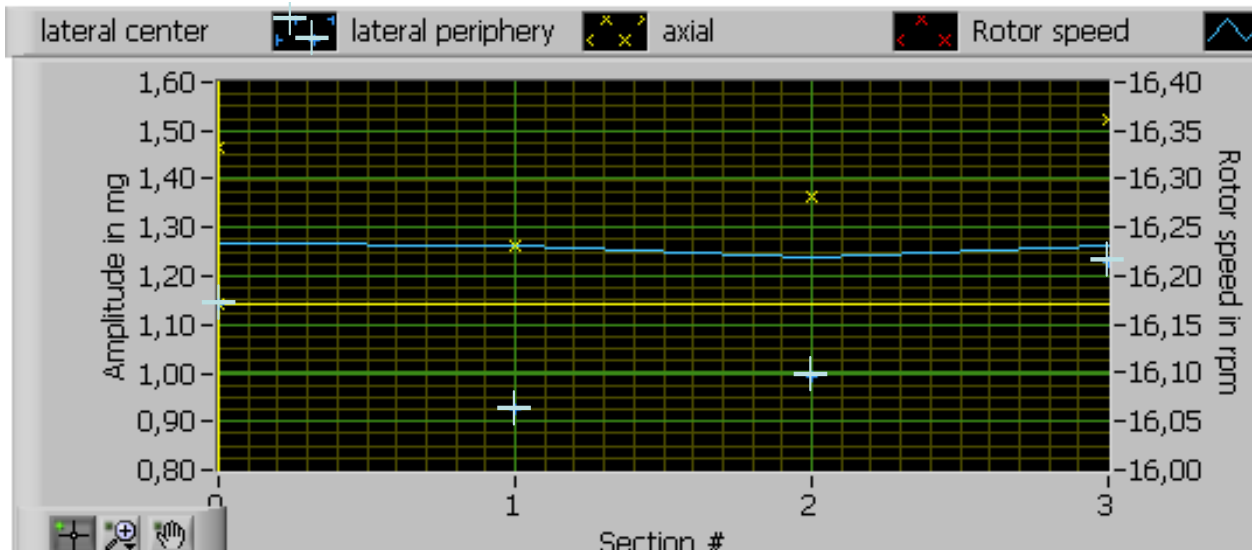
- Kein statistischer Zusammenhang zwischen Axialschwingung und relativer Blattwinkeldifferenz
→ **2-Sensor-Schwingungsmesssystem ungeeignet für AU-Diagnose**
- Jedoch: Blattwinkeleinstellung reduziert Torsionsschwingung



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

BERLINWIND

Auswertung längerer Messung mit 4x10-min-Fenstern

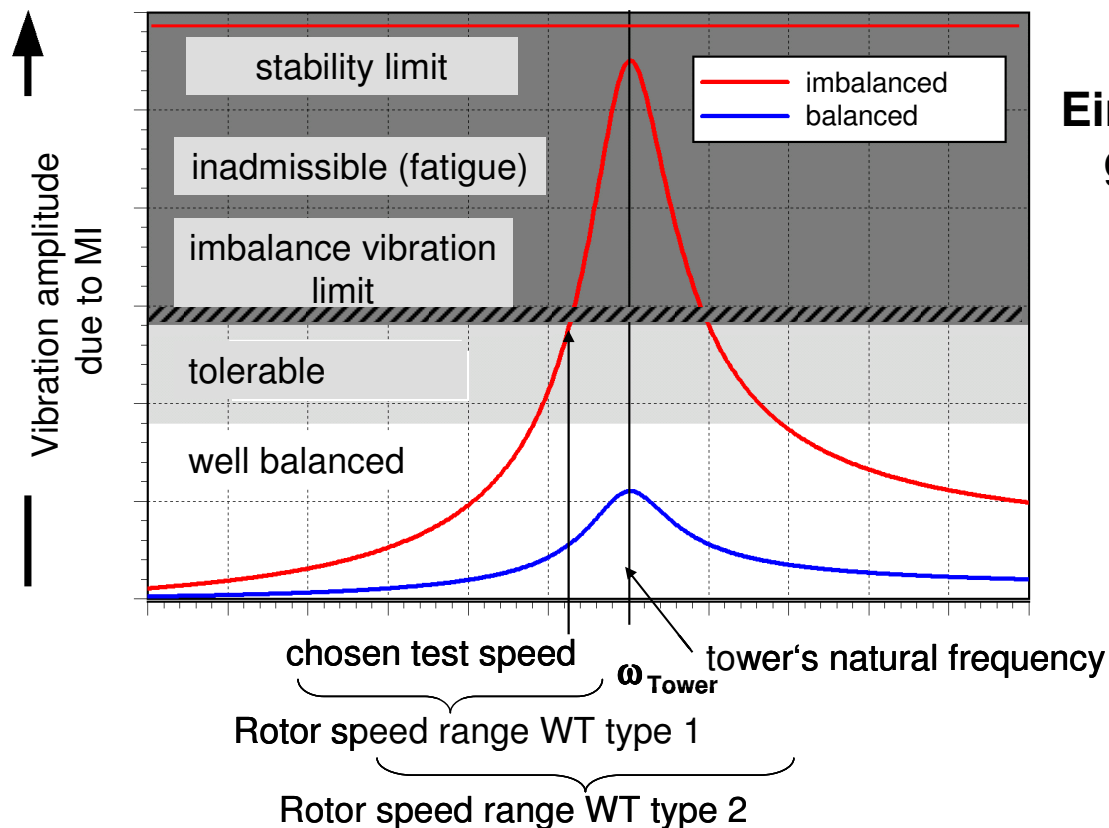


Zu kurze Messzeit von 10 min: Rotordrehzahl nahezu konstant, aber wegen wechselndem Wind **Variation der LC-Amplitude (MU-Maß) um > 30%**

- **Statistisch sichere Messzeit** erforderlich
- Meist **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 A, E, F: MU-Messung reproduzierbar, kalibriert und validiert?

- Jedes Auswuchten erfordert geeignete Testmassen – auch bei WEA!
- Prüfläufe für QC zum Nachweis der Schwingungsberuhigung
- **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 $f > 0,5 \text{ Hz}$
- **Schätzung der MU-Niveaus (MU-Check)** mittels Schwingungskennwert möglich, wenn exakte Reproduzierbarkeit identischer Testbedingungen und höchste Sorgfalt angewandt

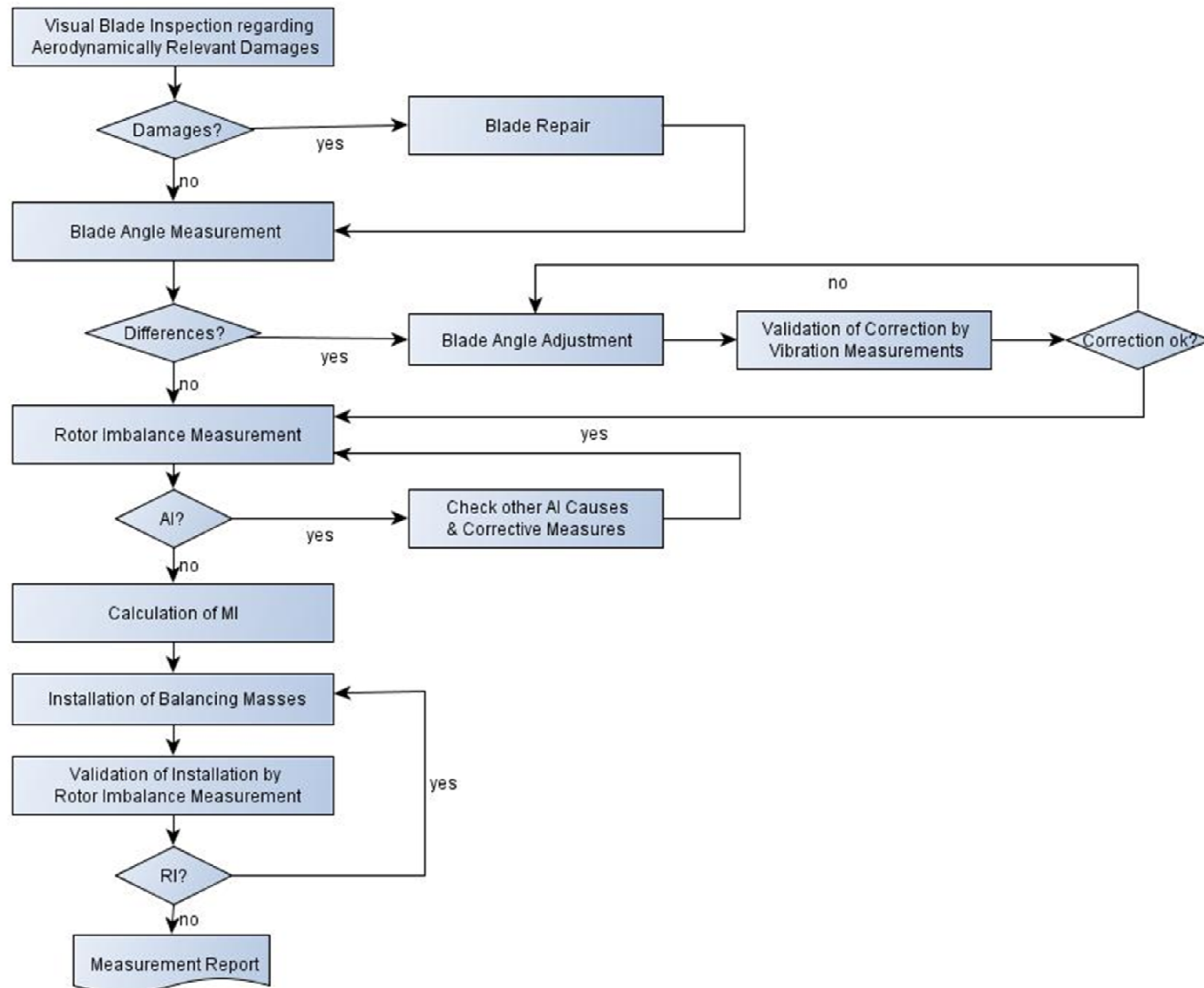


Einfluss der Prüfdrehzahl auf gemessene Amplitude

Geeignete Testmasse



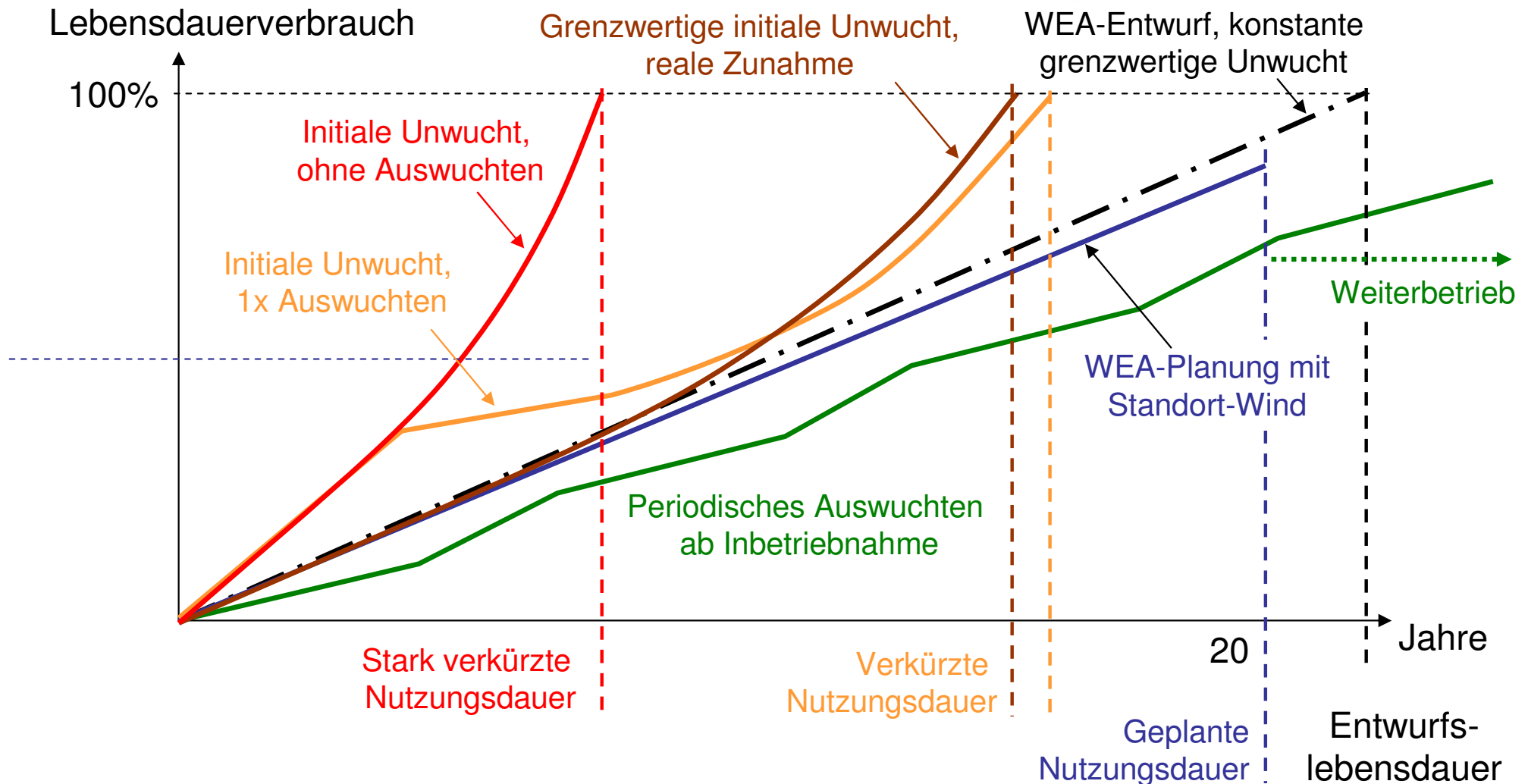
Kriterium B: Angemessene, ursachengerechte Gesamtstrategie



- *AU-Bestimmung und -minimierung:*
 - a) Erosion + aerodyn. Strömungselemente
 - b) Blattwinkel

- *MU-Bestimmung und -minimierung*
 - c) Massenunwuchtmessung

- *Wiederholte Validierung mit Schwingungsmessung für QC*



- Auswuchten ab Inbetriebnahme und periodisches Nachwuchten senkt den Lebensdauerverbrauch**

- Rotorunwucht im WEA-Design und in der WEA-Realität
- Technische Kriterien für Beurteilung des WEA-Auswuchtens nach ISO 21940 – Überblick und Details für WEA
- **Technische und ökonomische Bewertung von Auswuchtstrategien**
- **Schlussfolgerungen**

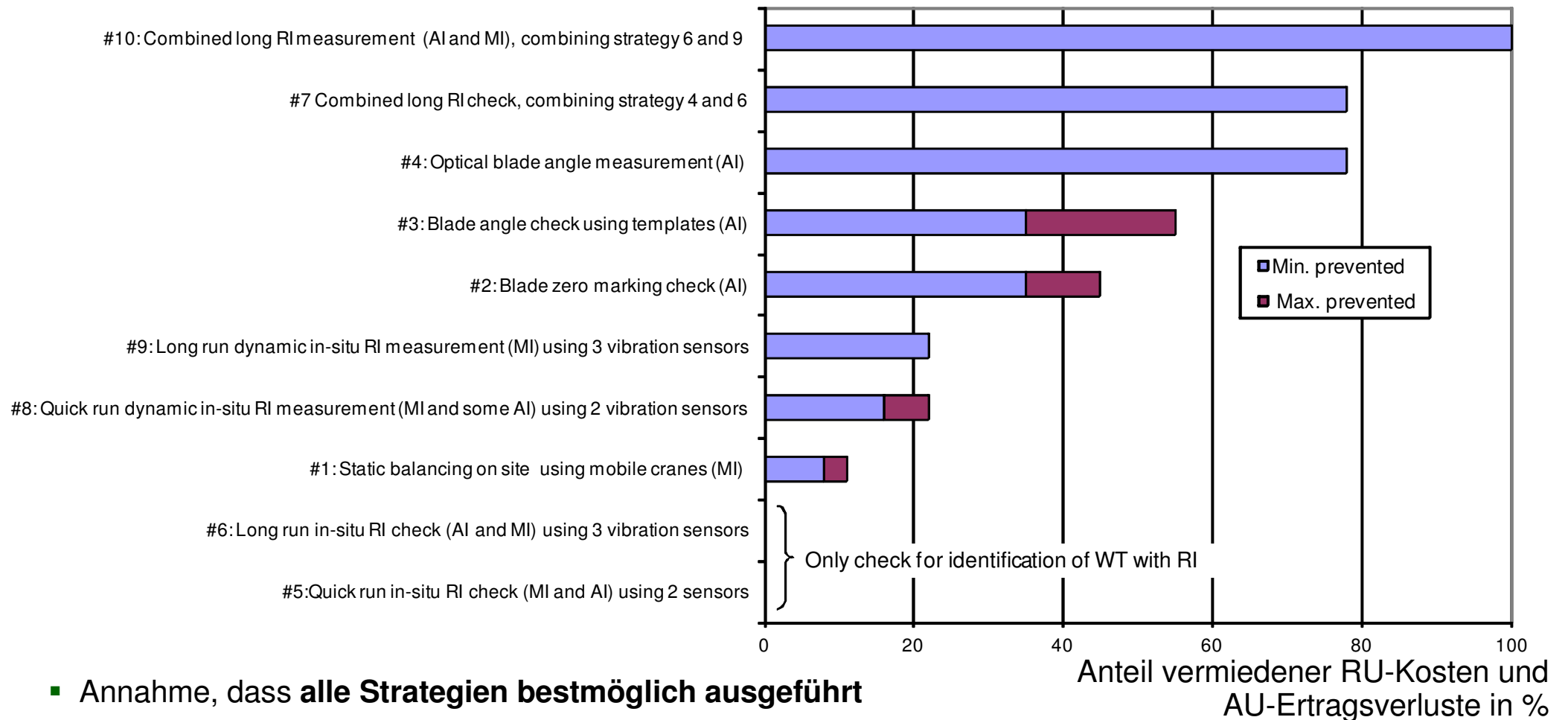
Technische Bewertung verschiedener Vor-Ort-Auswuchtstrategien

#	Kriterium Strategie	A	B	C	D	E	F	Summe Σ	Faktor X	Score $\Sigma * X$
1	Statisches Auswuchten mit Moblikran (etwas MU, keine AI)	0	1	0	1	1	0	3	10	30
2	Blattjustage mit 0° -Blattmarke (einige AU, keine MU)	0	1	1	1	1	0	4	20	80
3	Blattwinkelprüfung mit Template (einige AU, keine MU)	0	2	1	1	1	0	5	40	200
4	Optische Blattwinkelmessung (alle AU, keine MU)	0	2	2	2	2	1	9	66	594
5	Schnelle RU-Schwingungsprüfung mit 2 BSS-Sensoren (einige MU, keine AU)	2	1	1	1	1	1	7	15	105
6	Lange RU-Schwingungsprüfung mit 3 BSS-Sensoren (viele MU, AU Indikatoren)	3	2	2	2	2	2	13	25	325
7	Kombinierte AU-MU-Schwingungsprüfung (Strategie 4+ 6)	3	3	3	2	3	2	16	94	1504
8	Dyn. Schnellwuchten mit 2 BSS-Sensoren (einige MU, keine AU)	2	2	1	2	1	1	9	20	180
9	Dyn. Komplett-Auswuchten mit 3 BSS-Sensoren (alle MI, AI Indikatoren)	3	2	2	2	3	3	15	33	495
10	Kombiniertes dyn. AU+MU Komplett-Auswuchten, Strategie 6+9 (alle AU und MI)	3	3	3	3	3	3	18	100	1800

- Bewertung von 0 = schwach/nicht bis 3 = sehr gut;
- Gewichtungsfaktor X als Multiplikator berücksichtigt den mögl. Anteil erfolgreicher RU-Detektion bei betroffenen WEA
- Annahme, dass jede Strategie bestmöglich ausgeführt wird, z.B. Blattmarke korrekt installiert
- Statisches Blattwiegen bei Produktion keine Vor-Ort-Methode

Ökonomische Bewertung verschiedener Auswuchtstrategien

BERLINWIND



- Annahme, dass **alle Strategien bestmöglich ausgeführt**
- **Nur ursachengerechte, kombinierte Auswuchtstrategie #10 kann alle RU-Kosten und Mindererträge vermeiden**
- **Zusätzlich negative Kosten wegen falschen Empfehlungen** nicht eingerechnet bei "Schnellwuchtern"

Quelle: BerlinWind:
Rotor-Balancing Payback analysis,
EWEA 2013

- Rotorunwucht im WEA-Design berücksichtigt – in der Praxis unterschätzt und vernachlässigt
- Kriterien für das WEA-Auswuchten aus der ISO 21940 zum Betriebsauswuchten großer Rotoren ableitbar – bei anderen Turbinen ähnliche Probleme mit MU-Verfälschung
- WEA-Besonderheit des instationären Antriebs erfordert größte sorgfalt bei den Messungen
- Schwingungsmesssystem mit 2 Sensoren für MU+Au-Beurteilung unzureichend
- Geeignete Messprozedur und geeignetes Messsystem vorhanden
- Zeitsparen und Geld an „falscher Stelle“ beim Messen produziert falsche Messergebnisse, und Empfehlungen, die die WEA-Schwingungen im Zweifel noch erhöhen
- Nur direkt an der Blattkontur bestimmte Blattwinkel sind vertrauenswürdig, Schwingungsmessung validiert Blattjustage aber mittels gesunkenen Amplituden
- Nur ein kombiniertes Rotor-Auswucht-Verfahren kann die gesamten RU-Kosten vermeiden (Optische Blattwinkelmessung + MU-Schwingungsmessung)
- *Nebeninfo: Die Revision der VDI3834 zur Schwingungsbeurteilung bei WEA wird ein Beiblatt zum Rotorauswuchten besitzen!*

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>