

Gutachterliche Nachweisführung für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Dipl.-Ing. Jürgen Holzmüller
8.2 Ingenieurbüro Holzmüller in Aurich

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Vorstellung Referent und 8.2

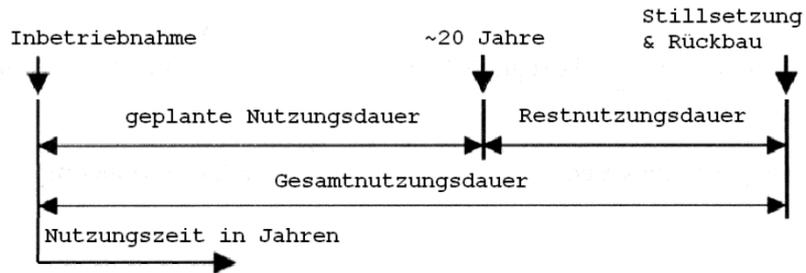


- Technische Prüfungen
(nach IBN, vor Gewährleistungsende,
zur Feststellung des Zustandes,
Wiederkehrende Prüfung)
- BPW (Nutzungsdauer)
- Schadensbegutachtung
- Gerichtsverfahren
- Wertgutachten
- Due Diligence
- Beratung

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen



Die Nutzungsdauer
der Anlage ist mit
mindestens
20 Jahren
anzunehmen.

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Der Betriebsfestigkeitsrechnung liegt eine Nutzungsdauer der WEA von 20 Jahren zu Grunde.



...em an Seilen pendelnd aufgen...
 ...n in eine Ölfüllung eintaucht.
 ... 40 mm auf und werden aus Ble...
 ... Der Turmfußflansch wird aus
 ... Turmkopfflansch wird aus kon-
 ... stellt.
 Die erste Eigenfrequenz... einschließlich der Maschine wurde für zwei
 Einspannungsverhältniss... rücksichtigung des Dämpfereinflusses, rechnerisch
 untersucht. Bei der... nmenen dynamischen Drehfederkonstante von min
 $C\varphi = 110000 \text{ MNm/rad}$ er... sich folgende Eigenfrequenzen:
 elastische Einspannung: $f_0 = 0,211 \text{ Hz}$
 starre Einspannung: $f_0 = 0,247 \text{ Hz}$
 Der Betriebsfestigkeitsrechnung liegt eine Lebensdauer der Windenergieanlage von
 20 Jahren zu Grunde.

8.2

Die Sachverständigen
 für Erneuerbare Energien
 The Experts in
 Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Die Anlagen sind 20 Jahre nach IBN stillzulegen und abzubauen, wenn nicht bis dahin durch einen Nachweis die weiter bestehende Betriebsfestigkeit und Standsicherheit nachgewiesen worden ist.

...manischer Lloyd Wind-
 ...ätter (Nr. 1), und des
 ... Baustatik der Freien
 ... rotorblätter und die Be-
 ... ene Lebensdauer von
 ... eb der Anlagen beab-
 ... sichtigt sein, ist rechtzeitig vor Ablauf der Betriebszeit die Betriebsfestigkeitsrechnung oder
 ein sonstiger zum Zeitpunkt der erforderlichen Nachweisführung dem Erkenntnisstand ent-
 sprechender anerkannter Nachweis für den Turm und die Rotorblätter zu erbringen.
 Die Anlagen sind 20 Jahre nach Inbetriebnahme stillzulegen und abzubauen, wenn nicht bis
 dahin durch einen Nachweis die weiter bestehende Betriebsfestigkeit und Standsicherheit
 nachgewiesen worden ist.

8.2

Die Sachverständigen
 für Erneuerbare Energien
 The Experts in
 Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Die Nutzungsdauer der Anlage ist mit **mindestens 20 Jahren** anzunehmen.

Der Betriebsfestigkeitsrechnung liegt eine Nutzungsdauer der WEA von **20 Jahren** zu Grunde.

...nach Ablauf **der 20 Jahre** ist ein Nachweis zur Standsicherheit vorzulegen

8.2

Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

» Windpotenzial in Deutschland

durchschnittliche Windgeschwindigkeit in 10m Höhe

Windzone IV: ca. 6 m/s
 Windzone III: ca. 5 m/s
 Windzone II: ca. 4 m/s
 Windzone I: ca. 3 m/s

8.2

Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

» Eingangsparmeter für Nachweisverfahren

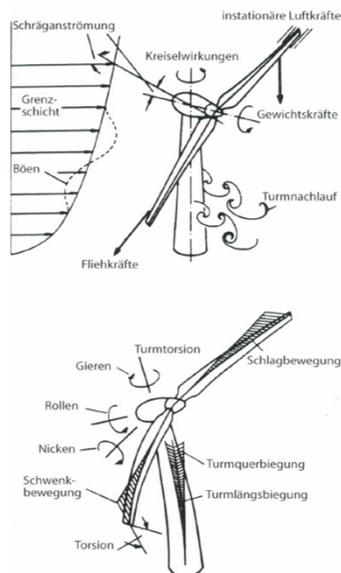
- Extreme Windgeschw. → WZ IV...III...II...I
- Mittlere Windgeschw. → WZ IV...III...II...I
- Turbulenz → 20%12%
- Zeitperiode → $\geq 175.200 \text{ h} / \geq 20\text{a}$
- Betriebsweise → Div. Lastfälle

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

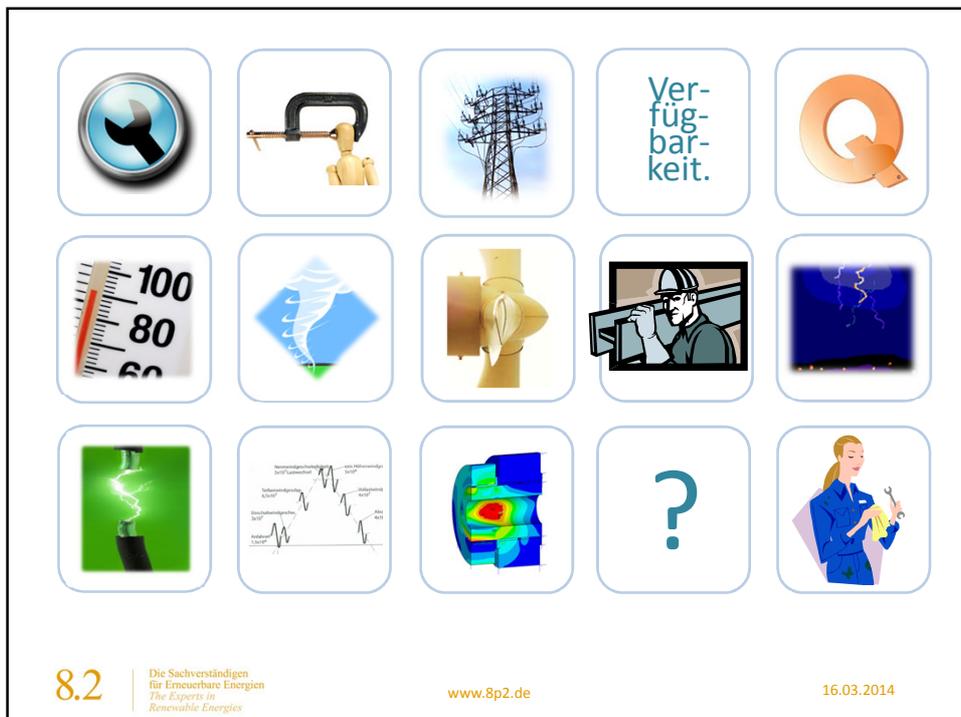
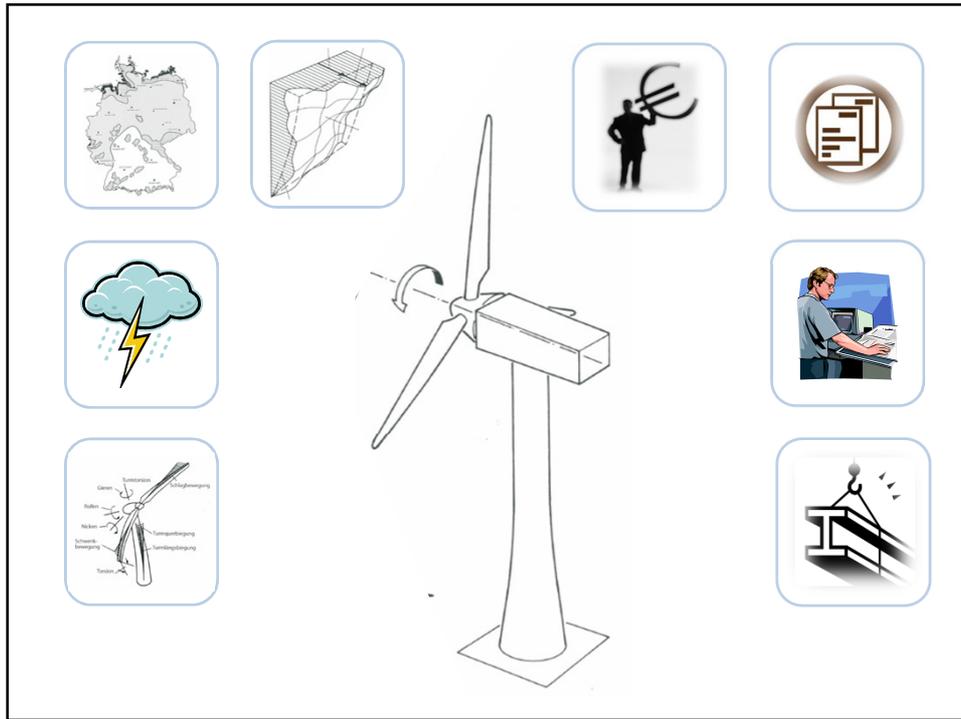
16.03.2014



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

	Luftkräfte	Massenkräfte
Stationäre Belastungen	<p>mittlere Windgeschwindigkeit</p>	<p>Fliehkräfte</p>
Instationäre Belastungen mit der Drehzahl periodisch wechselnde Belastungen	<p>Höhenprofil der Windgeschwindigkeit</p> <p>Turmschatten beim leeseitigen Rotor</p>	<p>Gewichtskräfte</p> <p>Kreisel- und Corioliskräfte</p>
nicht-periodische, stochastische Belastungen	<p>Schräganströmung</p> <p>Turmvorstau beim leeseitigen Rotor</p>	
nicht-periodische, stochastische Belastungen	<p>Windturbulenzen</p>	



Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Gutachterliche Stellungnahme

Aufgabenstellung:	Nachweis der Standsicherheit für den Weiterbetrieb der Windenergieanlage Enercon E-33 Verlängerung der Gesamtnutzungsdauer durch bisher nicht verbrauchte Betriebszeit
Daten der WEA: Standort:	Enercon E-33 / Seriennummer 32143 D -

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

7. Vorhandene Lebensdauer-Reserven / Analytische Methode

Die Windenergieanlage des Typs E33 mit der Seriennummer 32143 am Standort I _ wurde innerhalb der geplanten Nutzungsdauer von 20 Jahren nicht so effektiv ausgenutzt bzw. belastet wie theoretisch möglich. **Es verbleiben Lebensdauerreserven, die einen Weiterbetrieb um weitere 6 (sechs) Jahre über den Stichtag 23.12.2012 hinaus bis zum 31.12.2018 ermöglichen.**

8. Fehleranalyse

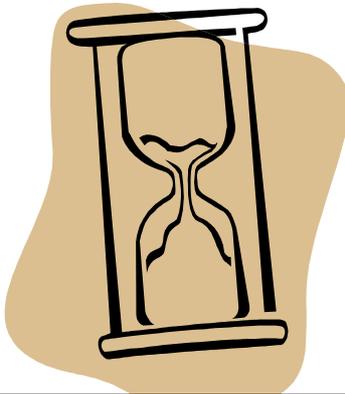
Im Rahmen einer Fehleranalyse wurde die Hauptwelle im Bereich des größten Biegemomentes (direkt am rotorseitigen Hauptlager) als kritische Komponente identifiziert. Dieser Bereich muss bei einem Weiterbetrieb regelmäßig auf Anrisse überprüft werden, um langfristig Gefährdungen auszuschließen.

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen



Geplante Betriebszeit:
20 Jahre à 8.760h = **175.200h**

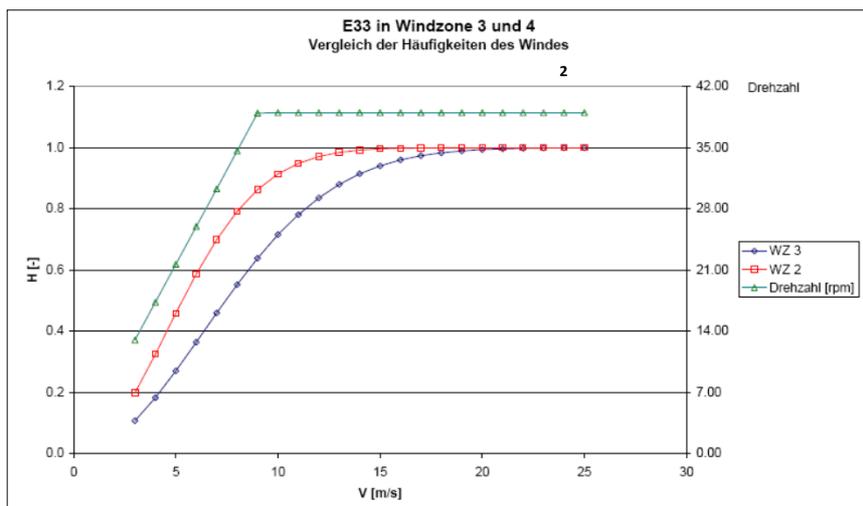
Tatsächliche Betriebszeit
20 Jahre nach Inbetriebnahme:
137.578h

Nachtrag nach Ablauf der
geplanten 20 Jahre: **37.622h**

Weitere
4 Jahre und 4 Monate

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Weitere
5 Jahre und 2,5 Monate

4. Ergebnis

Für Windzone III ergibt sich eine Lastwechselzahl von $3,069 \cdot 10^8$, für Windzone II eine Lastwechselzahl von lediglich $2,433 \cdot 10^8$.

Die Anlage hat in 20 Jahren also nur 79,28% der der Auslegung zu Grunde liegenden Lastwechsel ertragen müssen. Die noch zur Verfügung stehenden Lastwechsel von $3,069 \cdot 10^8 - 2,433 \cdot 10^8 = 0,636 \cdot 10^8$ werden in Windzone II in weiteren 5,22 Jahren erreicht.

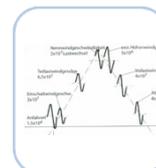
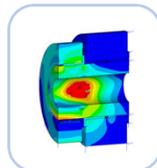
Die WEA E33 an einem DIBt WZ II-Standort mit Nabhöhe 46 m kann bis zum Erreichen der Auslegungslastwechsel weitere 5 Jahre und 2 1/2 Monate betrieben werden.

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014



- Einfache Abschätzung der gesamten Nutzungsdauer
- Absichern der Nutzungsdauer durch Typenspezifische Maßnahmen

NUTZUNGSDAUER ABSCHÄTZEN

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Expertise

Aufgabenstellung:

Abschätzen von Auswirkungen auf die Komponenten einer bestehenden Windenergieanlage bedingt durch zusätzliche Turbulenzen von einer zugebauten benachbarten Windenergieanlage

Daten der bestehenden WEA:
Standort / Windpark:

E-70 / E4
Windpark xxxxxx / Standort y

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

WEA Enercon E70 E4, NH 98m

Auslegung auf 20a:

Mittlerer Wind 8,5 m/s

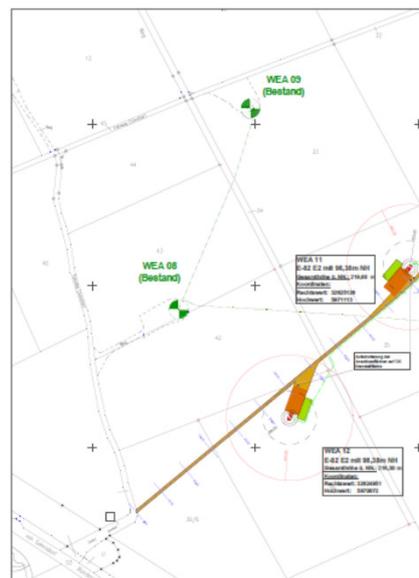
Rayleighverteilung $A = 9,59$

Windpark, errichtet 2006

Mittlerer Wind 7,4 m/s

Weibullverteilung $A = 8,2 / k = 2,4$

In 2013 Zubau von weiteren Anlagen Typ E82 mit Erhöhung der Turbulenzen



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Für die E-70 gilt:

Möglicher Jahresenergieertrag am Auslegungsstandort:	7.543 MWh
Möglicher Jahresenergieertrag am Standort xxxxxxxx:	5.587 MWh
Theoretische Abschätzung der Gesamtnutzungsdauer:	~ 27 Jahre

Für die E-82 gilt:

Möglicher Jahresenergieertrag am Auslegungsstandort:	9.287 MWh
Möglicher Jahresenergieertrag am Standort xxxxxxxx:	6.462 MWh
Theoretische Abschätzung der Gesamtnutzungsdauer:	~ 29 Jahre

Kritikpunkt: Ertrag als Basis berücksichtigt nicht die Turbulenz

8.2

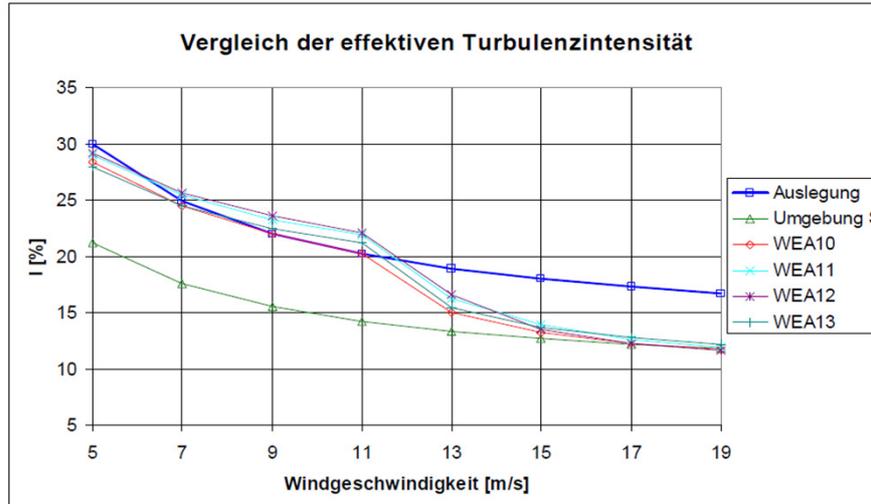
Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Vergleich der effektiven Turbulenzintensität



8.2

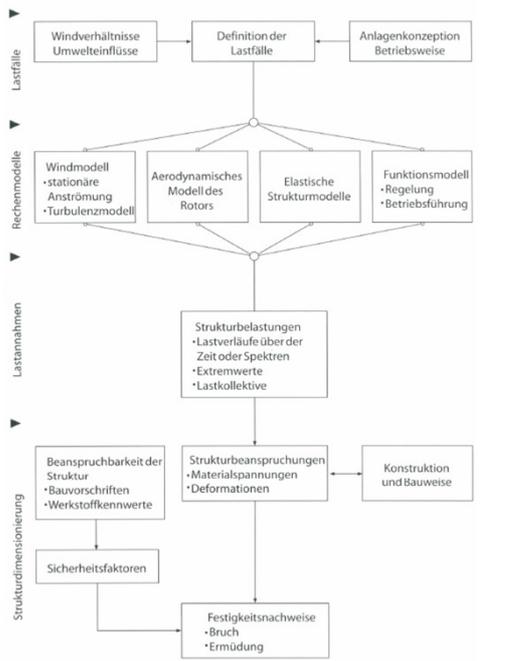
Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

- » Modellierung von Betriebsweise und einwirkenden Lasten
- » Rechenmodelle für Anlagenstruktur
- » Simulation ergibt Zeitreihen und Lastkollektive
- » Beanspruchbarkeit des Materials
- » Nachweis, Ergebnis

8.2 Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies



Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Komponente	Material	Angenom. Steigung Wöhlerkennlinie	Angenom. Lebensdauer Auslegungsstandort	Lebensdauer E70 E4 Standort xxxx ohne Zubau	Lebensdauer E70 E4 Standort xxxx mit Zubau nach 7a Betrieb
Blattwurzel	GFK	10	20a	≥ 46a	≥ 38a
Blattschrauben	Stahl	3	20a	≥ 24,3a	≥ 23,5a
Nabe	Guss	10	20a	≥ 3.427a	≥ 2.195a
Verschraubung Nabe	Stahl	3	20a	≥ 105a	≥ 68a
Turmkopf	Stahl	3	20a	≥ 105a	≥ 68a
Turmfuß	Spannstahl	5	20a	≥ 119a	≥ 66a

Abb. 03: Lebensdauerabschätzungen für die Anlage am Standort xxxxx

8.2 Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von WEA

8.2

Expertise

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen über die geplante Nutzungsdauer hinaus

Projekt:
Windpark
mit 14 Windenergieanlagen der Typen
Enercon E-70
Enercon E-82
REpower MM82

8.2 Ingenieurbüro Holzmüller Aurich
Vorabveröffentlichung

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

03.2014

Weiterbetrieb von WEA

8.2

Expertise

Fazit

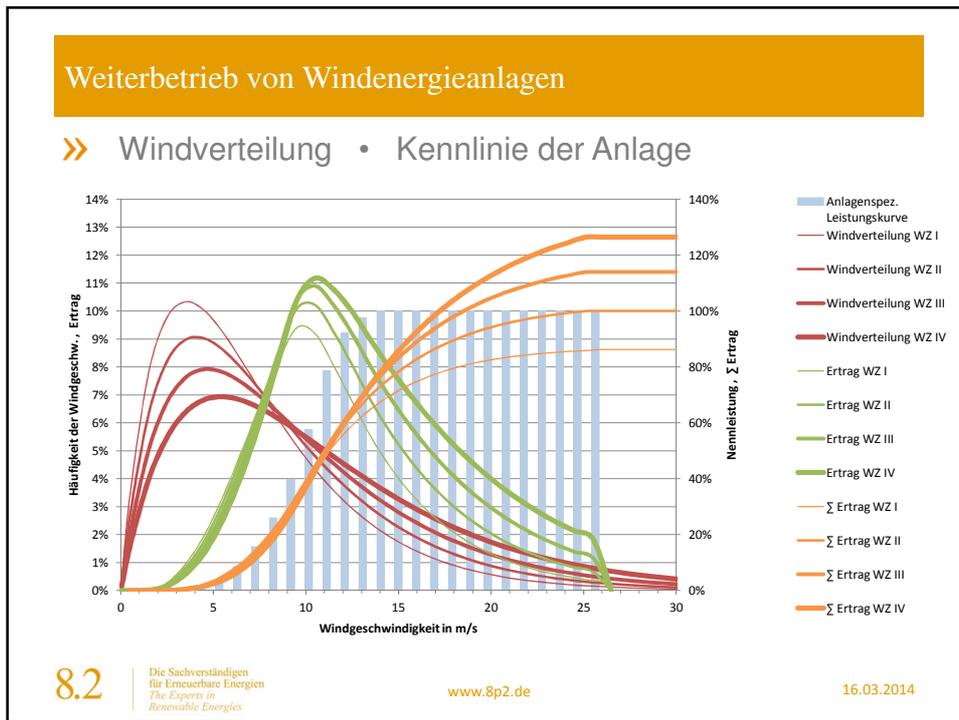
Es steht im Windpark S. [REDACTED] ein ausreichendes technisches Potenzial zur Verfügung, um die Anlagen nach Ablauf der geplanten Nutzungsdauer von 20 Jahren für zumindest fünf weitere Jahre weiter zu betreiben. Ein entsprechender Ermüdungsnachweis für eine Restnutzungsdauer von mindestens 5 Jahren muss nach Ablauf der 20 Jahre geplanter Nutzungsdauer für jede Anlage individuell geführt werden, wobei aus heutiger Sicht davon auszugehen ist, dass dieser Nachweis für alle Anlagen im Windpark gelingen wird.

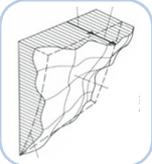
8.2 Ingenieurbüro Holzmüller Aurich
Vorabveröffentlichung

8.2

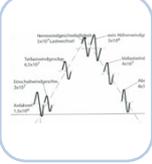
Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

03.2014



Ver-
füg-
bar-
keit.




- Abschätzen der Nutzungsdauer durch Ertragsberechnung (Berechnung der Energieerzeugungsmenge)
- Finanzierungshorizonte können erweitert werden, wenn individuelle Nutzungsdauern angewendet werden!

NUTZUNGSDAUERABSCHÄTZUNG

8.2 Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Ermitteln der konkreten Nutzungsdauer durch analytische Verfahren:

- A Tatsächliche Betriebszeit der WEA ist geringer
- B Tatsächliches Lastniveau am Standort ist geringer
- C Tatsächliche Energieerzeugungsmenge ist geringer
- D Tatsächliche Betriebslasten der WEA sind geringer



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

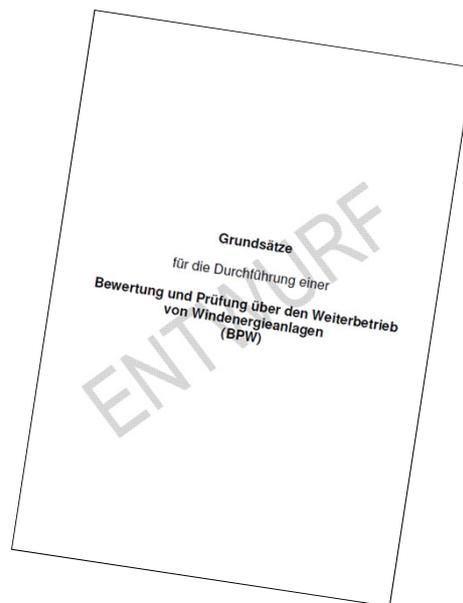
www.8p2.de

16.03.2014

Arbeitskreis „20 Jahre“ im BWE

Bewertung und Prüfung
über den Weiterbetrieb von
Windenergieanlagen
(BPW)

Freigegeben und
veröffentlicht im
Februar 2014



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Bewertung und Prüfung über den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen (BPW)

Analytischer Nachweis

Die Gesamtanlage ist durch den Sachverständigen hinsichtl. ihrer Ermüdung zu beurteilen.

+

Praktischer Nachweis

Ausgestaltung und Umfang einer Inspektion deckt i.d.R. den Umfang einer WKP ab.
Besondere Beachtung von Typen- u. Serienspezifischen Risiken

8.2

Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

» Alterungsmechanismen

The graph illustrates the cumulative effectiveness of four aging mechanisms over the operating time of a wind turbine. The y-axis represents 'Wirksamkeit' (Effectiveness) and the x-axis represents 'Laufzeit' (Operating Time). The mechanisms are: Verschleiß (orange line, linear increase), Korrosion (red line, moderate increase), Ermüdung (blue line, exponential increase), and Extremlast (green dashed vertical line, representing a sudden event). The exponential nature of the Ermüdung curve indicates that its impact grows significantly over time.

8.2

Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

8.2 | Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Wellenhöhe [-]	Wellenhöhe* [mm]	Spannungsüberhöhungsfaktor	Lebensdauer [Jahre]
0	0	1.0	85500.0
0.021	0.64	1.5	1483.0
0.036	1.08	2.0	83.5
0.051	1.52	2.5	9.0
0.067	2.00	3.0	1.4
0.082	2.46	3.5	0.3

*Die Wellenhöhe wird für eine Wellenlänge von 30mm angegeben

8.2 | Die Sachverständigen für Erneuerbare Energien
The Experts in Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

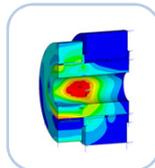
Untersuchter Querschnitt		
R [m]	4	Blatt 4509089 siehe Bild 11
D [m]	2	Annahme kreisförmiger Querschnitt
t [mm]	20	Innen- und Außenlaminat je 10 mm aus Laminatprobe Blatt 4509089
Flächenträgheitsmoment [m ⁴]	0.06097	
Biegemoment statisch [Nm]	919442	Masse Rotorblatt x Hebelarm Schwerpunkt bei R=4m
Spannung statisch [MPa]	15.08	
Spannungsüberhöhungsfaktor	3	aus /4/ fig. 10 für eine Wellenhöhe 2mmx30mm <i>Stsberechnungen</i>
Wöhlerliniensteigung	10	aus /2/ Richtlinie Germanischer LLoyd Kap. 5.5.4 für GFK und Epoxy
Sicherheitsfaktor Material	1	
Zulässige Lastwechsel	6.565E+06	/2/ Richtlinie Germanischer LLoyd: Gleichung aus Kap. 5.5.3.3
Mittl. Drehzahl [rpm]	8.63	Nenn Drehzahl 16 rpm (Datenblatt Siemens) Drehzahlvariabler Betrieb
Lebensdauer bei mittl. Drehzahl [Jahre]	1.4	

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014



- Fertigungsproblem an Komponente
- Wer hat Verlust an Nutzungsdauer zu verantworten?
- Wer hat Verlust an Nutzungsdauer zu ertragen?

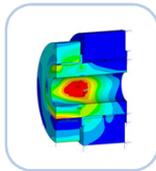
NUTZUNGSDAUERVERLUST

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014



- Materialfehler führt zur Havarie
- Hätte verbesserte Inspektion Schaden verhindert?

VERKÜRZTE NUTZUNGSDAUER

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

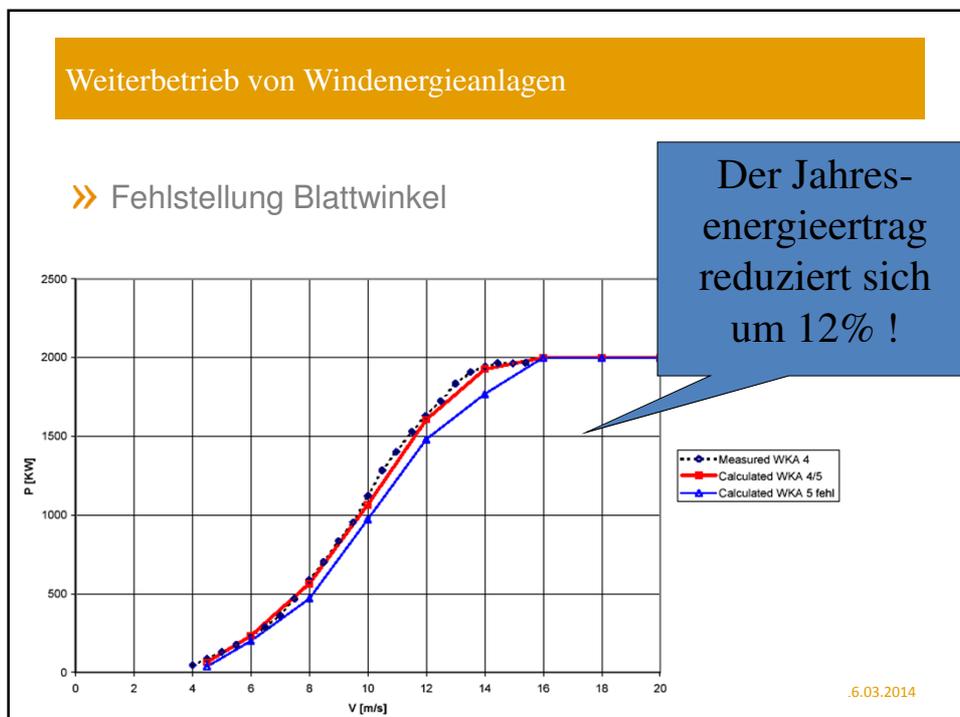
Windpark	Blatt Typ	Seriennummern von Blättern	Relative Abweichung [°]	Maximale Abweichung der Anstellwinkel [°]
Windpark 1	LM 45.3 P	0093	0	0,47
		0073	+0,45	
		0091	-0,02	
	LM 45.3 P	0075	0	0,34
		0067	-0,23	
		0089	-0,34	
LM 45.3 P	0074	0,0	0,59	
	0084	-0,59		
	0076	-0,46		
Windpark 2	LM 45.3 P	0251	0,0	0,62
		0266	-0,62	
		0267	-0,33	
Windpark 3	LM 45.3 P	0058	0,0	1,5
		0032	+0,61	
		0049	-0,89	
	LM 45.3 P	0023	0,0	0,94
		0029	+0,94	
		0060	+0,53	
Windpark 4	LM 45.3 P	0030	-1,46	1,82
		0034	0,36	
		0036	0,0	

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

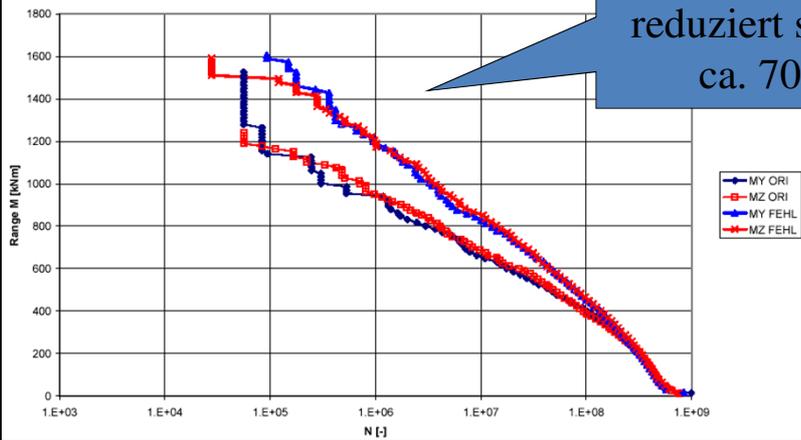
16.03.2014



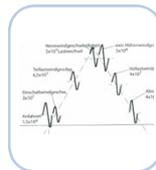
Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

» Fehlstellung Blattwinkel

Die Nutzungsdauer der Rotorwelle reduziert sich auf ca. 70% !



16.03.2014



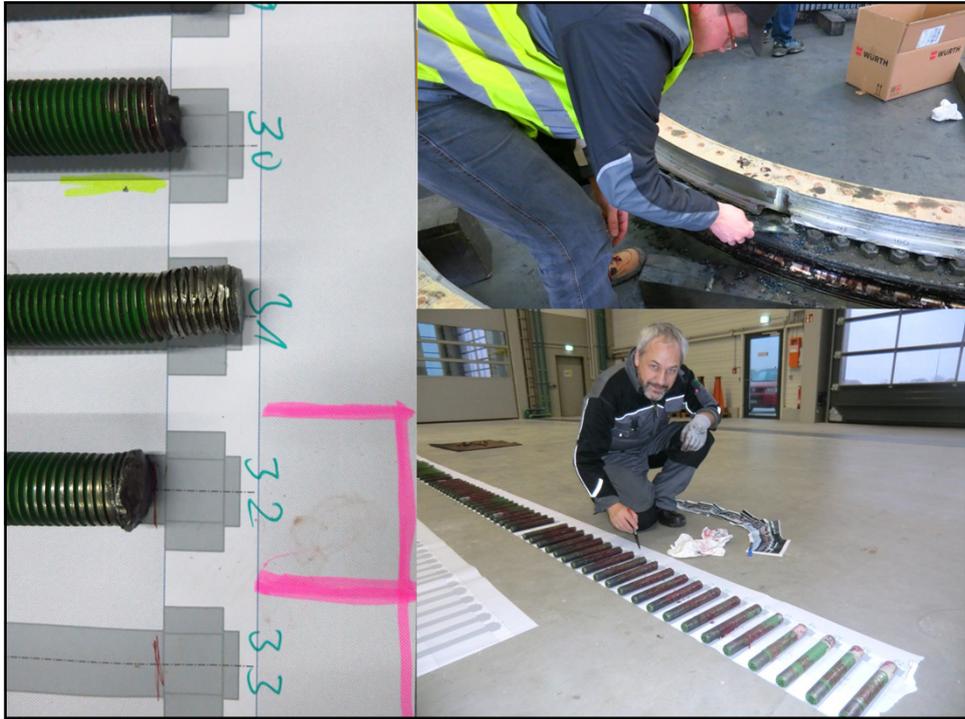
» Der Einfluss von Einstellwerten und Betriebsführung auf die Nutzungsdauer ist grundsätzlich zu beachten.

NUTZUNGSDAUER VERLUST



- Singuläre Ereignisse können zu einem plötzlichen Ende der Nutzungsdauer führen.

EXTREM VERKÜRZTE NUTZUNGSDAUER



➤ Hat Havarie einer Hauptkomponente Einfluss auf die Gesamtnutzungsdauer der Anlage?

NUTZUNGSDAUER ABSICHERN

8.2 Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Bei notwendigen Instandsetzungen von Hauptkomponenten

➔ Prüfen, ob bei einer Instandsetzung ggf. benachbarte Schwachstellen kostengünstig beseitigt werden können.

8.2 Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

www.8p2.de

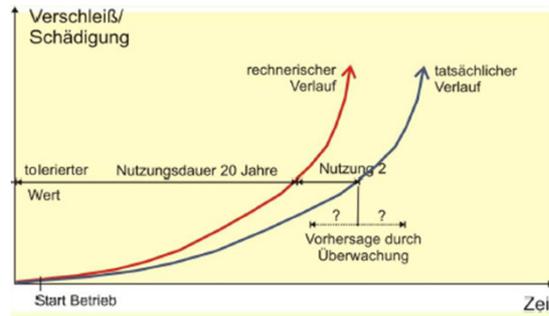
16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Schwachstellen gezielt entlasten ...



... durch eine Last-Reduzierende Betriebsweise der Anlage

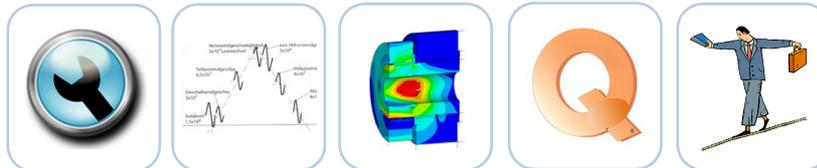


8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014



- Nutzungsdauer kann durch aktive organisatorische Maßnahmen verlängert werden.

PRÄVENTIVE MAßNAHMEN

8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
The Experts in
Renewable Energies

www.8p2.de

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Jede Anlage hat ihre
individuelle
Nutzungsdauer



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

Jürgen Holzmüller

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Berechnungsverfahren
zur Bestimmung der
Nutzungsdauer sind
in der Erprobung
(analytischer Nachweis)



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

Jürgen Holzmüller

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

Über Schwachstellenanalyse und Inspektionen die Nutzungsdauer absichern
(praktischer Nachweis)



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

Jürgen Holzmüller

16.03.2014

Weiterbetrieb von Windenergieanlagen

**Präventives Lebensdauer-
management als
Option**



8.2

Die Sachverständigen
für Erneuerbare Energien
*The Experts in
Renewable Energies*

Jürgen Holzmüller

16.03.2014