

Begutachtung eines schwingungsbasierten Eiserkennungssystems auf Basis von Mehrkörpersimulationen

**Morten Bülk, Hauke Gülzau, Frederik Lautenschlager
TÜV NORD**

**Peter Kraemer, Carsten Ebert
WÖLFEL**

**Thomas Frese
NORDEX**

Neue behördliche Forderungen



Rheinland-Pfalz

STRUKTUR- UND
GENEHMIGUNGSDIREKTION
NORD

Merkblatt für Vorhaben zur Errichtung von Windenergieanlagen hinsichtlich immissionsschutzrechtlicher und arbeitsschutzrechtlicher Anforderungen an die Antragsunterlagen in Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG (Oktober 2014)

Sicherheitsnachweise hinsichtlich Eisabwurf

- Hersteller von WEA sollen durch ein Gutachten belegen, dass ihr System (typenbezogen) Gefahren verhindert und dem Stand der Technik entspricht.
- Es geht ausschließlich um die zuverlässige Abschaltung der Anlage bei Eisansatz/Eisansatzgefahr und das sichere Anfahren.
- Wirtschaftliche Gesichtspunkte (Minderung von Stillstandzeiten) können unberücksichtigt bleiben.
- Die nationalen Anforderungen sind derzeit durch keine Normen oder Richtlinien abgedeckt.

Gefundene Eisobjekte



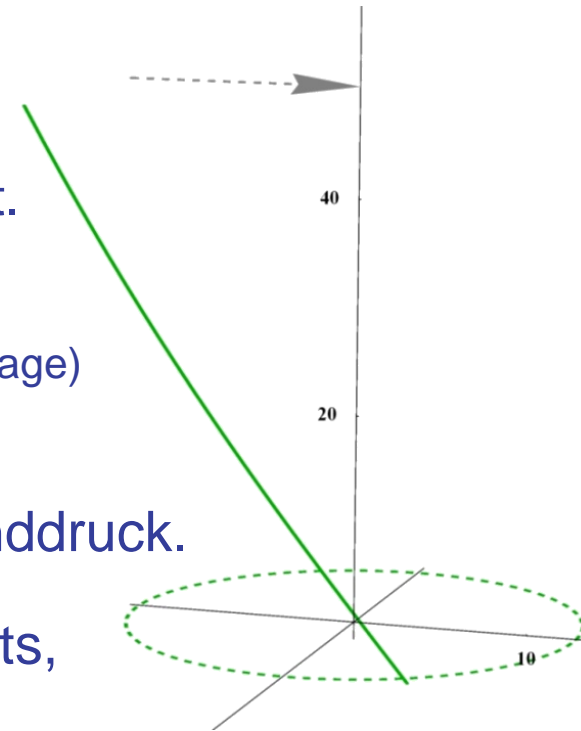
Unterscheidung Eisabwurf / Eisabfall

- Es wird lediglich der **Eisabwurf** betrachtet
 - WEA im Produktionsbetrieb
 - Startvorgang der WEA
 - Ziel: Rechtzeitiges Abschalten der Anlage zur Vermeidung von Eisabwurf

- **Eisabfall** kann nicht verhindert werden
 - WEA trudelt / parkt
 - Die Gefahr von Eisabfall geht auch von anderen Bauwerken aus
 - Die Auswirkungen von Eisabfall werden standortspezifisch bewertet

Bestimmung der kritischen Eisdicke

- Ab wann ist ein Eisobjekt als „kritisch“ anzusehen?
 - Ein Eisobjekt ist als kritisch definiert, wenn es aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt.
 - $E_{\text{krit}} = 40 \text{ Joule}$
(Green Book. Methods for the determination of possible damage)
- Flugbahn durch Überlagerung von Initialgeschwindigkeiten mit Schwerkraft und Winddruck.
- Annahme: Geometrie und Dichte des Eisobjekts, Widerstandsbeiwert.
- Parameter: Nabenhöhe, Rotordurchmesser, Drehzahl, Luftdichte, Windgeschwindigkeit, Windprofil.



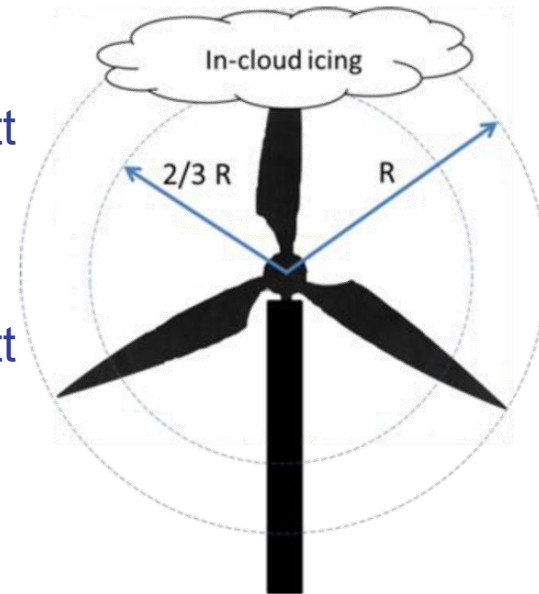
Anlagenspezifische kritische Eisdicken

	N100/2500	N117/3000	N131/3000
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	22,1	21,5	20,4
Masse [kg]	0,168	0,182	0,210
Dicke [cm]	1,2	1,3	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	25	25	20

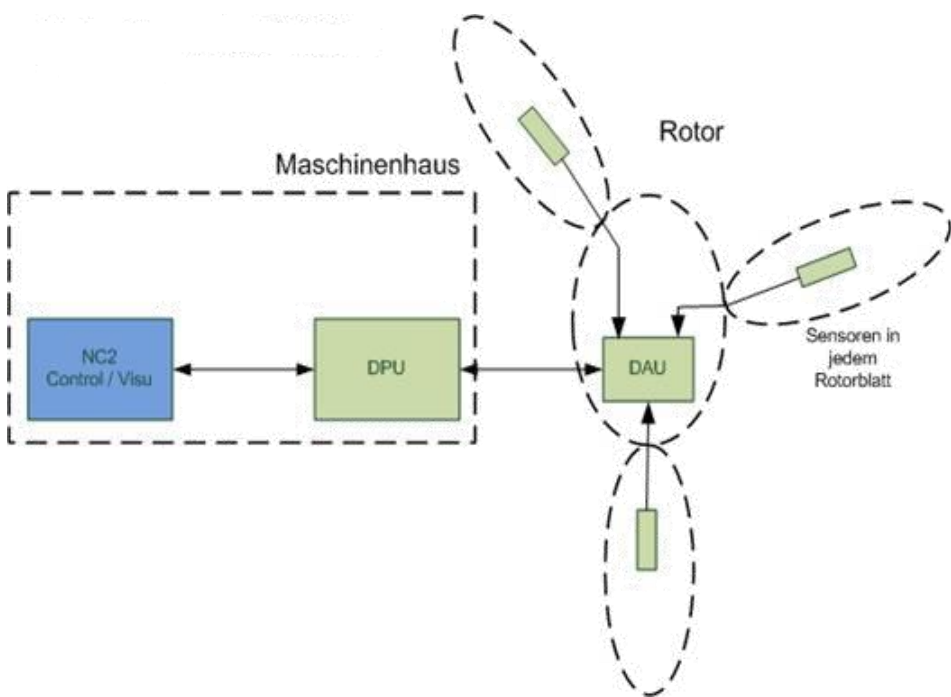
- Zusätzlich Ermittlung einer kritischen Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist.
- Annahme: etwa 1 mm/min.

Verschiedene Eiserkennungssysteme

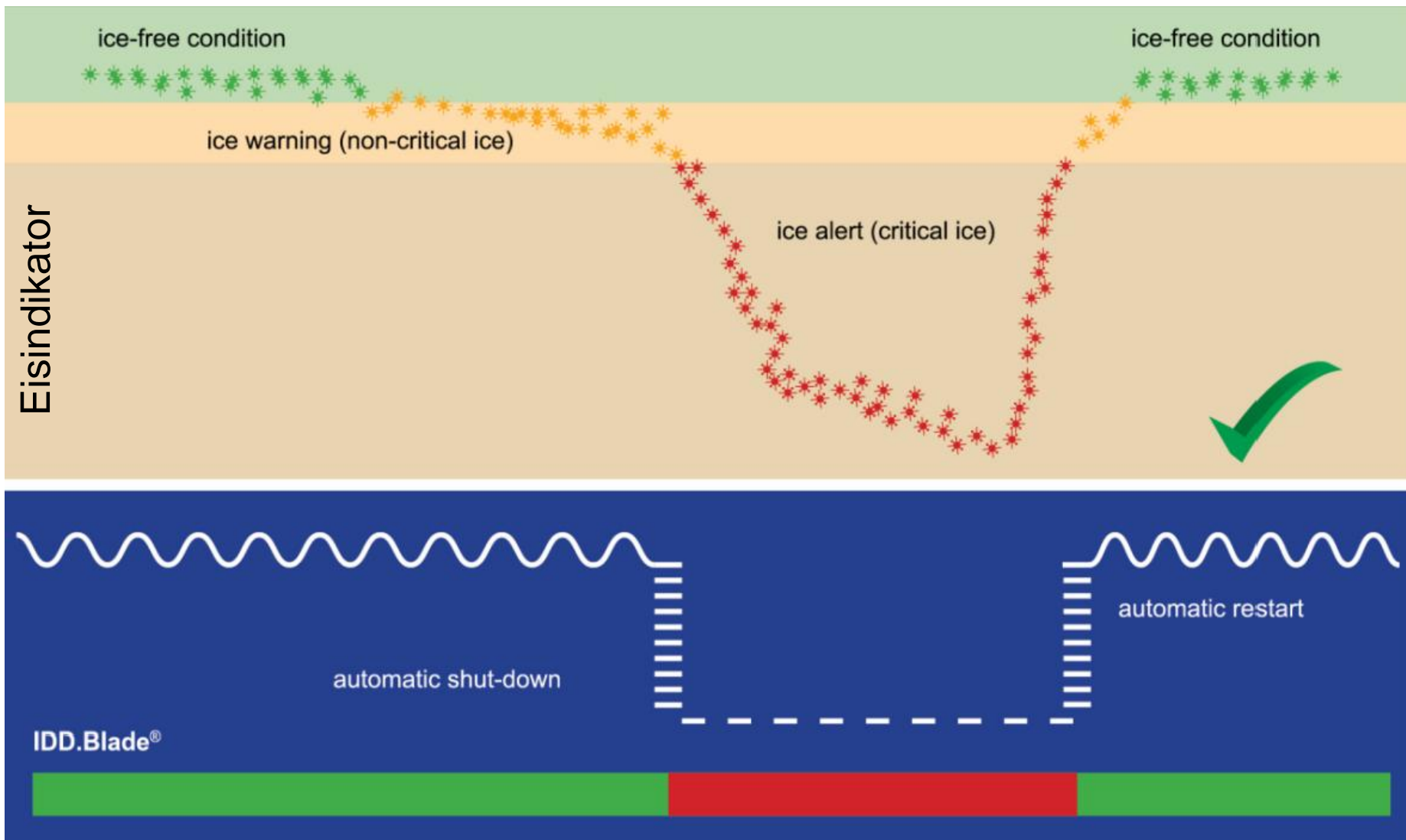
- Gondelbasierte Eiserkennungssysteme
 - Eiserkennung über Vergleich zweier Anemometer (beheizt und unbeheizt)
 - Schwingungsüberwachung eines (beheizbaren) Drahtsensors
- Überwachung der Leistungskurve
 - Eiserkennung über den Einfluss der veränderten Aerodynamik der Rotorblätter
- **Überwachung von Rotorblatteigenfrequenzen mittels Beschleunigungssensoren**
 - Eiserkennung über den Einfluss der Masse am Rotorblatt
- Überwachung von Rotorblattschwingungen mittels Faseroptischen Sensoren
 - Eiserkennung über den Einfluss der Masse am Rotorblatt
- Optische Überwachung (Kamerasysteme)
- Weitere



Aufbau des IDD.Blade[®] Eiserkennungssystems



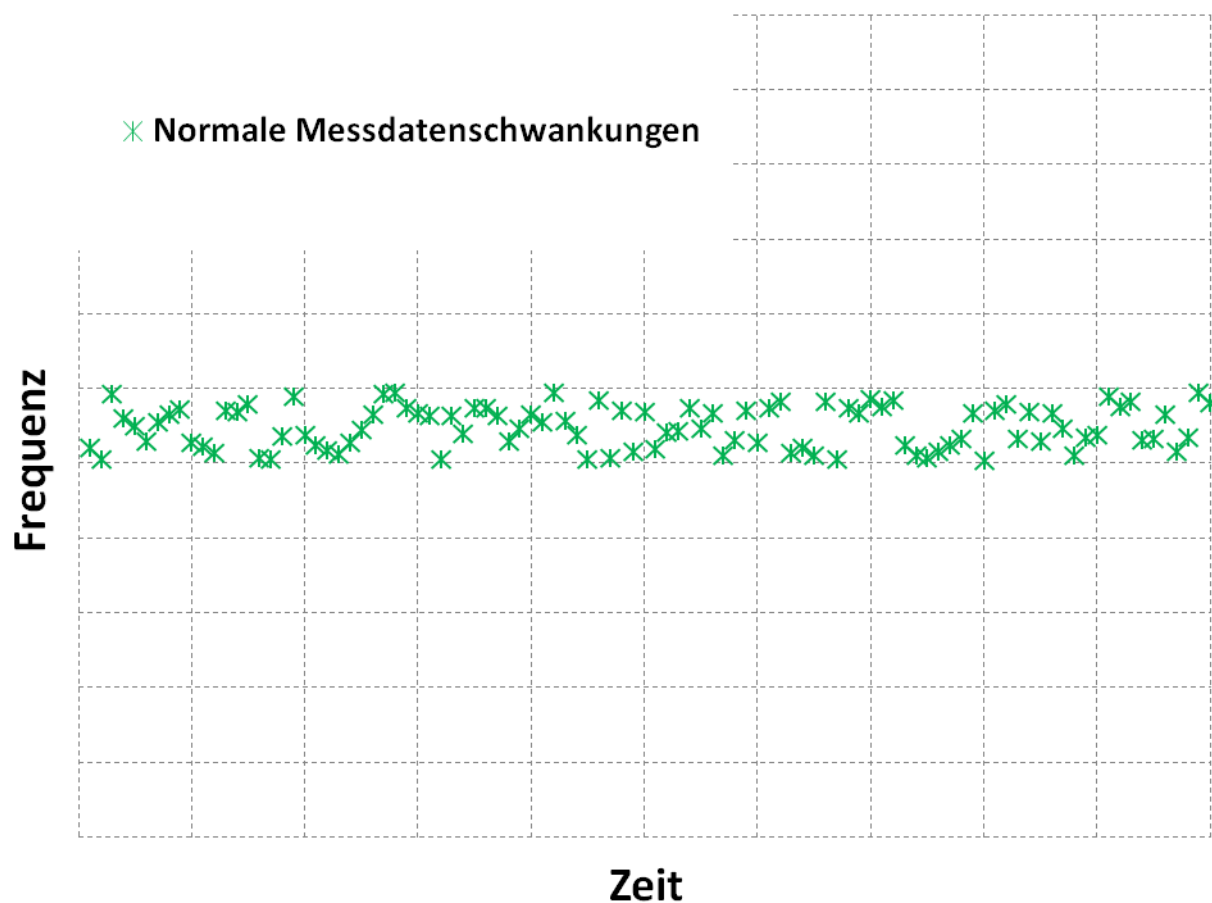
Funktionsweise des IDD.Blade® Eiserkennungssystems



Möglicher experimenteller Nachweis im Rotorblattprüfstand

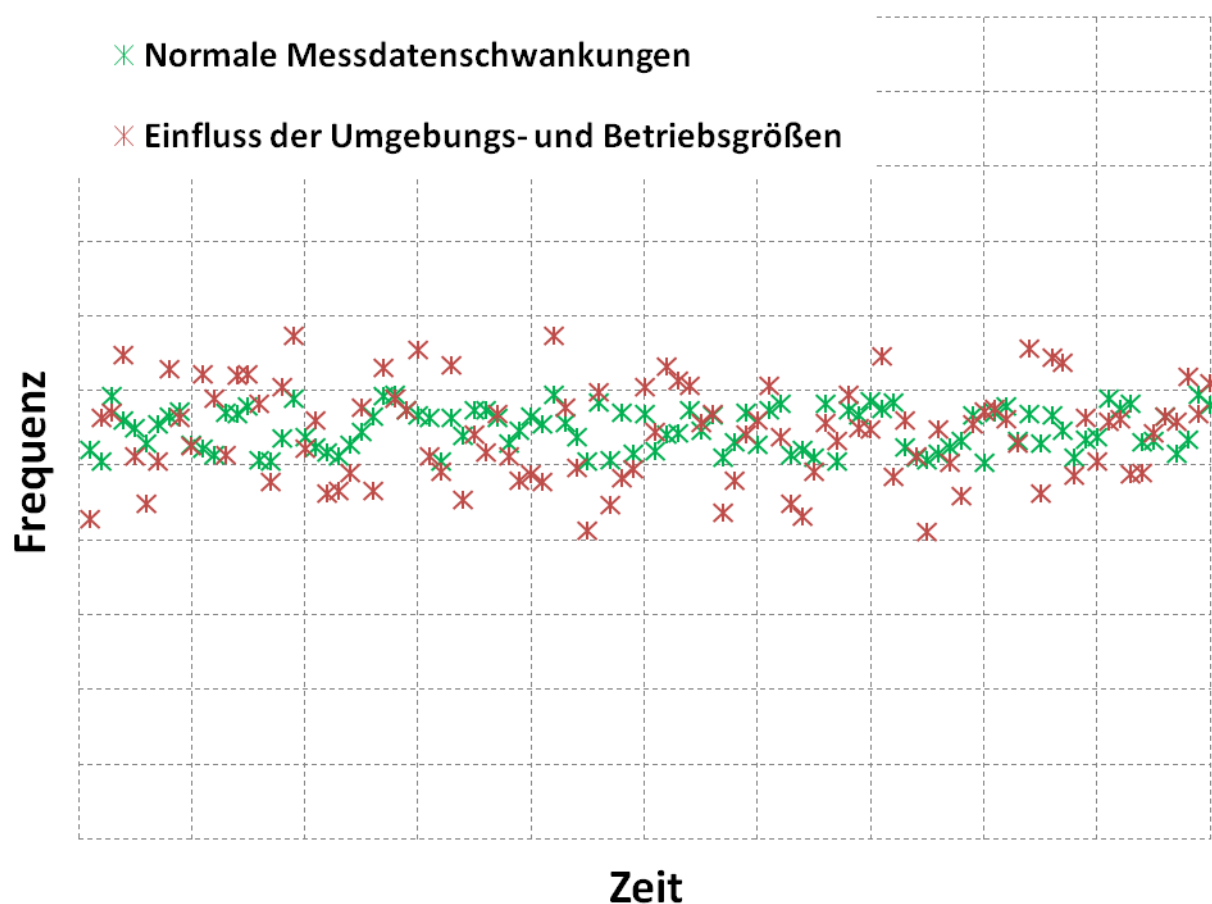


Schwankung von Messwerten



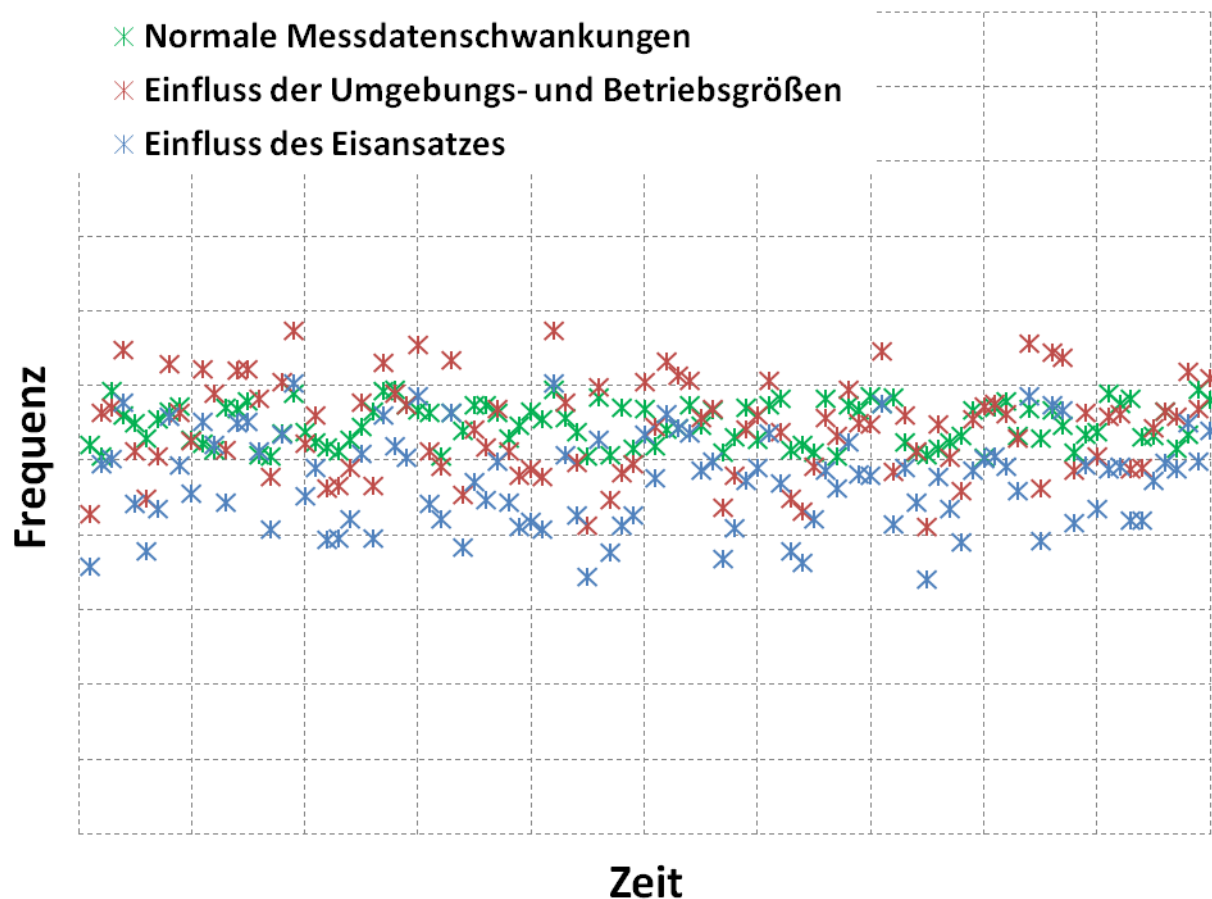
- Natürliche Schwankung von Messwerten

Schwankung von Messwerten



- Natürliche Schwankung von Messwerten
- Gemessene Werte zudem abhängig von:
 - Temperatur
 - Belastung (Drehzahl)
 - Einspannung (Pitchwinkel)
 - Ggf. Schäden am Rotorblatt

Schwankung von Messwerten



- Natürliche Schwankung von Messwerten
- Gemessene Werte zudem abhängig von:
 - Temperatur
 - Belastung (Drehzahl)
 - Einspannung (Pitchwinkel)
 - Ggf. Schäden am Rotorblatt
- Eisansatz

Möglicher experimenteller Nachweis im Feldversuch



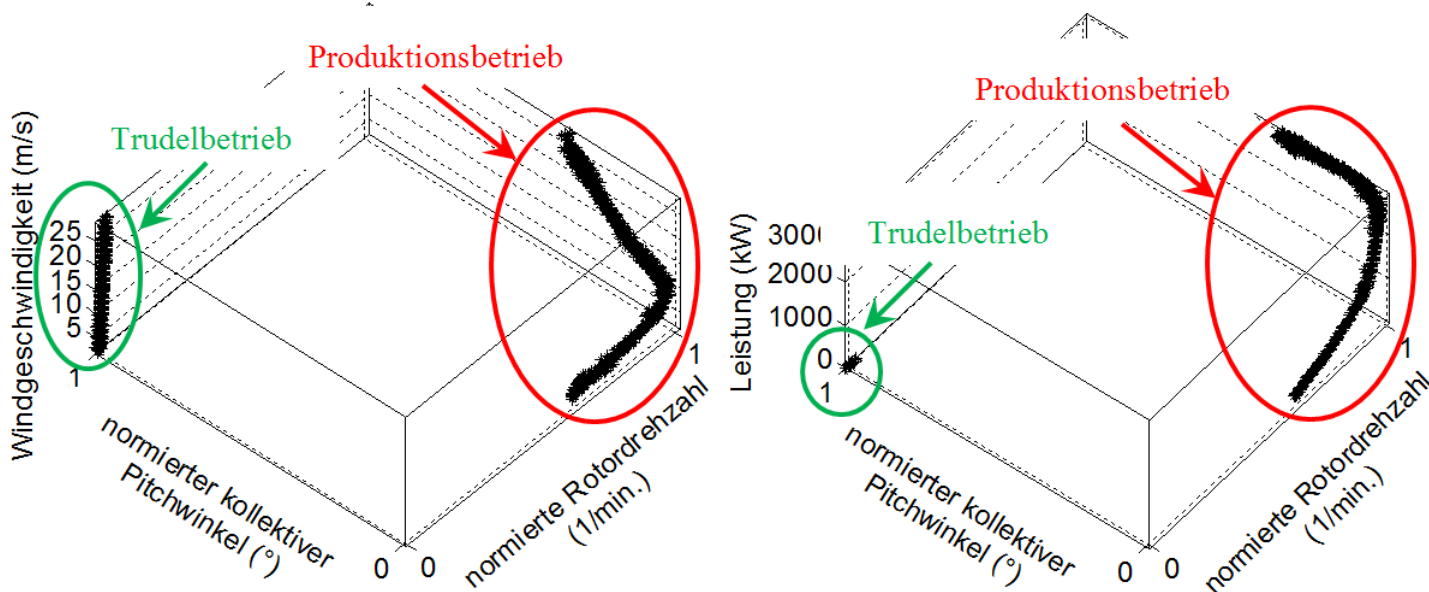
Flexibles Mehrkörpersimulationsmodell (BLADED)

- Aus der Lastberechnung bekannt.
- Validiertes, dreidimensionales, dynamisches Modell.
- Berücksichtigung von Massen, Dämpfungen, Steifigkeiten, Aerodynamik, Aeroelastizität, Regelung.
- Dreidimensionale turbulente Windfelder.
- Verschiedene Betriebszustände (Produktion / Trudeln).
- Modellierung des Eisansatzes durch Zusatzmassen.
- Prüfung auf Basis eines Black-Box-Verfahrens.
- Übergabe von anonymisierten Datensätzen:
 - Blattbeschleunigungen
 - Windgeschwindigkeit, Leistung, Drehzahl, Pitchwinkel, (Temperatur)



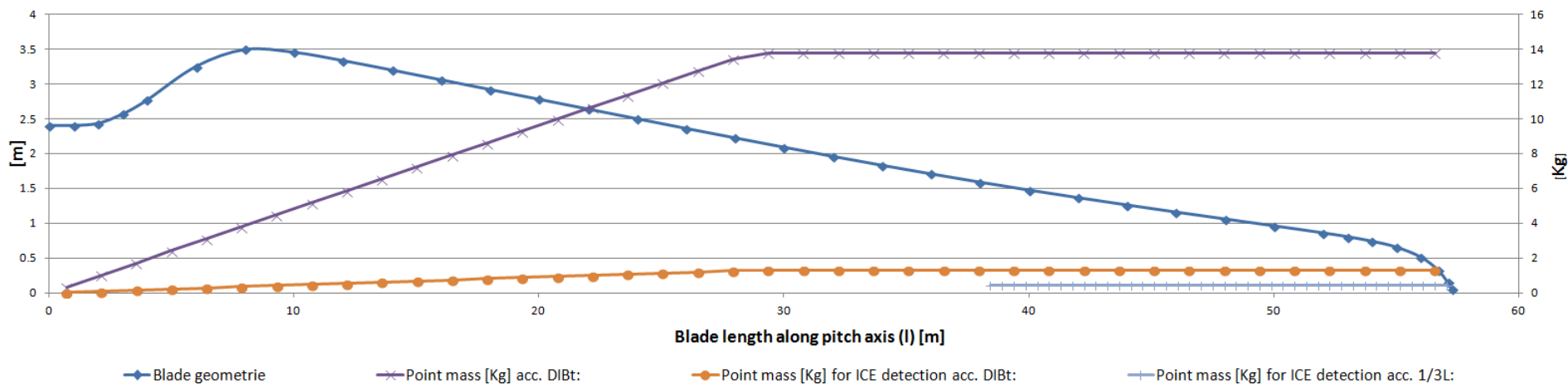
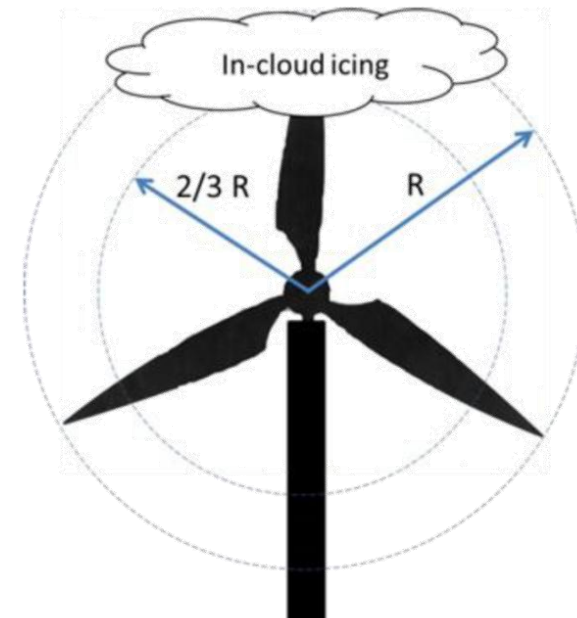
Referenzierung der Windenergieanlage

- Referenzpunkte / Referenzspektren werden über einen längeren Zeitraum (Wochen bis Monate) an der ausgerüsteten Windenergieanlage erfasst.
- Dabei wird, z.B. durch Kontrolle der Umgebungstemperatur, sichergestellt, dass kein Eisansatz an den Rotorblättern vorliegt.
- Wenn die Referenzmatrix ausreichend gefüllt ist können die Schwellwerte bestimmt und das System zur Eiserkennung freigegeben werden.



Angenommene Verteilung der Eismasse auf den Rotorblättern

- Modellierung des Eisansatzes entsprechend der ermittelten kritischen Eisdicke durch Zusatzmassen an der Blattvorderkante
- Angenommene Massenverteilungen des Eisansatzes in Anlehnung an verschiedene Normen und Richtlinien wie bspw. DIBt
- Einzelblattvereisung berücksichtigt



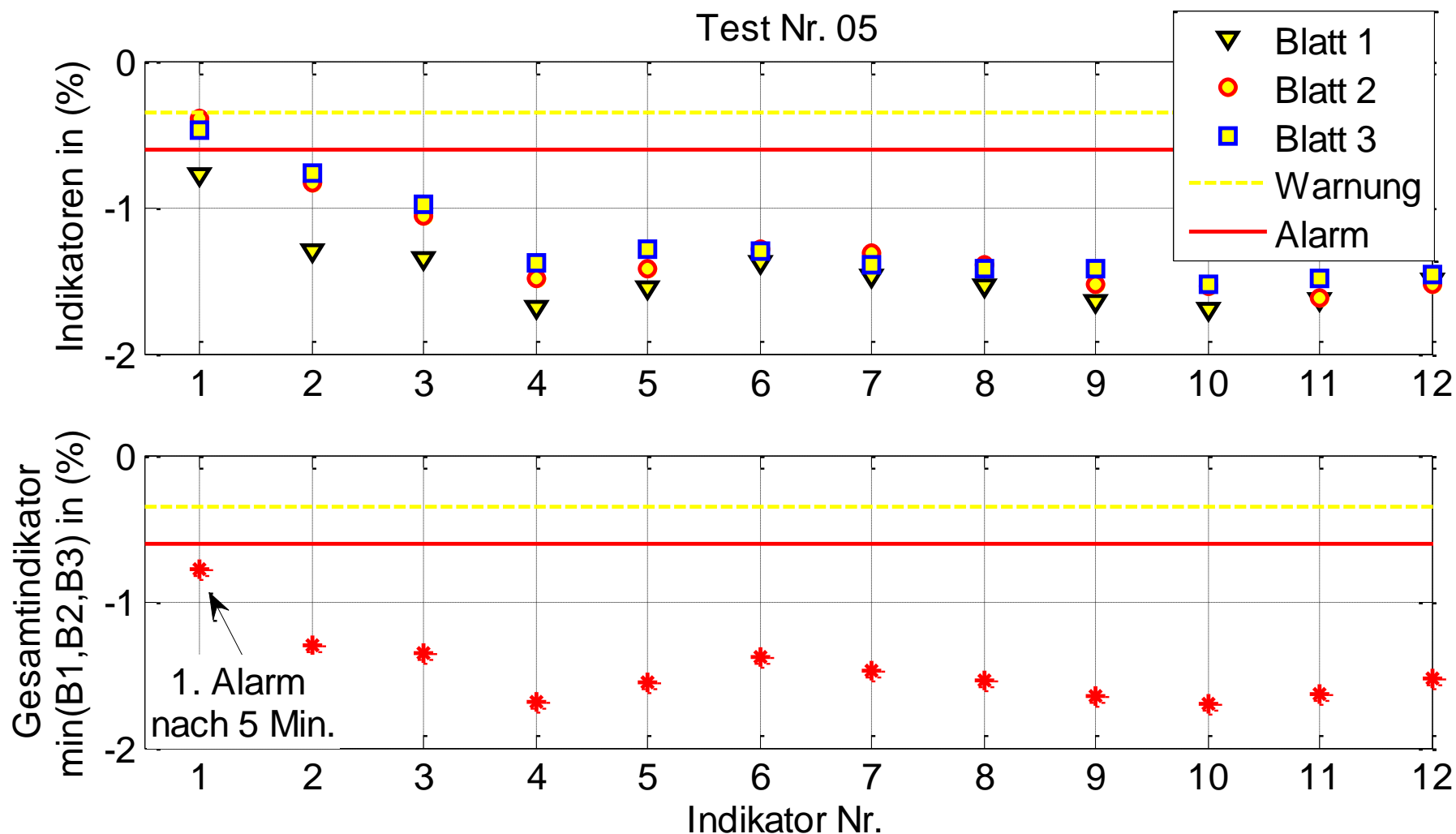
Prüfergebnisse

Test Nr.	Beurteilung	Eisindikatoren [%]				Zeit bis zu 1.	
		Blatt1	Blatt2	Blatt3	min(B1,B2,B3)	Warnung	Alarm
01	Alarm	-0,10	-0,32	-0,99	-0,99	10	15
02	Alarm	-0,89	-0,88	-0,82	-0,89	x	5
03	Normal	-0,17	-0,13	-0,06	-0,17		
04	Warnung	-0,32	-0,31	-0,59	-0,59	15	20
05	Alarm	-1,57	-1,45	-1,41	-1,57	x	5
06	Alarm	-1,18	-1,15	-1,13	-1,18	x	5
07	Normal	0,08	0,00	-0,08	-0,08		
08	Normal	-0,22	-0,09	-0,17	-0,22		
09	Normal	-0,03	0,09	0,04	-0,03		
10	Alarm	-1,47	-1,64	-1,41	-1,64	x	5
11	Normal	-0,05	-0,22	-0,15	-0,22		
12	Alarm	-0,29	-1,03	-0,22	-1,03	5	10
13	Warnung	-0,13	-0,39	-0,28	-0,39	20	x
14	Alarm	-0,49	-0,73	-0,51	-0,73	10	20
15	Alarm	-0,14	-0,71	-0,37	-0,71	10	20
16	Alarm	-0,96	-0,88	-0,79	-0,96	5	10
17	Alarm	-0,90	-0,22	-0,36	-0,90	5	10
18	Alarm	-1,46	-1,44	-1,38	-1,46	x	5
19	Alarm	-0,98	-0,92	-1,01	-1,01	x	5
20	Normal	-0,18	-0,18	-0,21	-0,21		
21	Alarm	-0,88	-0,79	-0,80	-0,88	5	10
22	Normal	0,12	0,00	-0,03	-0,03		
23	Alarm	-0,95	-0,39	-0,38	-0,95	5	10
24	Alarm	-1,30	-1,38	-1,20	-1,38	x	5

Auswertung der übermittelten Simulationsdaten durch das Eiserkennungs-system

	Grenzwerte [%]
Warnung	-0,35
Alarm	-0,6

Zeitlicher Verlauf der Zustandsindikatoren beim Eiserkennungstest



Zusammenfassung

- TÜV NORD hat in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden ein Begutachtungsablauf erarbeitet und erfolgreich umgesetzt.
- Methode zur Ermittlung einer anlagenspezifischen, standortunabhängigen kritischen Eisdicke als Begutachtungsgrundlage entwickelt.
- Erfolgreiche Prüfung des schwingungsbasierten Eiserkennungssystems IDD.Blade[®] im Black-Box-Verfahren mittels Mehrkörpersimulationen.
- IDD.Blade[®] konnte für verschiedene NORDEX WEA standortunabhängig als geeignet und dem Stand der Technik entsprechend zur Abschaltung bei kritischem Eisansatz und das automatische Wiederauffahren bestätigt werden.
- Die Prüfung weiterer Eiserkennungssysteme in Anlehnung an die beschriebene Prüfprozedur, bspw. im Rahmen von simulationsbasierten Black-Box-Verfahren oder auf Basis von Feldversuchen ist möglich.
- Weitere Informationen unter www.tuev-nord.de/windenergietage oder im Tagungsband VDI-Berichte 2242, ISBN 978-3-18-092242-3.