

Gutachten

Zur Bewertung der Funktionalität eines Eiserkennungssystems zur Verhinderung von Eisabwurf an NORDEX Windenergieanlagen

TÜV NORD Bericht Nr.:	8111 327 215 Rev.2
Gegenstand der Prüfung:	Untersuchung der Funktionalität und Zuverlässigkeit des in NORDEX Windenergieanlagen installierten Eiserkennungssystems IDD.Blade der Firma Wölfel
Anlagenhersteller:	NORDEX Energy GmbH Langenhorner Chaussee 600 22419 Hamburg Germany

Dieser Prüfbericht umfasst 49 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen
0	13.10.2014	Erste Fassung
1	11.05.2016	Ergänzung N131/3300 PH134 und PH164 und N90/2500 R70opt.
2	15.06.2017	Redaktionelle Änderung zum Trudelbetrieb, Ergänzung der N117 3600

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangssituation.....	5
1.2	Gegenstand der Untersuchungen	6
1.3	Untersuchtes Eiserkennungssystem IDD.Blade.....	7
2	Beschreibung der Bewertungskette	10
2.1	Bewertungsmaßstäbe	10
2.2	Grenzen der Bewertung	10
2.3	Beschreibung der Vorgehensweise	10
3	Ermittlung der kritischen Eisdicke	12
3.1	Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf	12
3.2	Ermittlung eines kritischen Eisobjektes	16
3.3	Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes	20
4	Test der Eiserkennung auf Basis von numerischen Simulationen	21
4.1	Testbeschreibung	21
4.2	Beschreibung der modellierten Windenergieanlagen.....	22
4.2.1	N100/2500 gamma	22
4.2.2	N117/3000 delta	23
4.3	Modellaufbau	24
4.4	Referenzierung der Anlagenmodelle.....	25
4.5	Modellierung der Anlagenvereisung.....	26
4.6	Simulation der Testszenarien.....	27
4.7	Auswertung der Testszenarien	27
4.8	Bewertung der Testergebnisse	31
4.9	Übertragbarkeit der Testumgebung auf die Realität	32
4.10	Übertragbarkeit der Testergebnisse der repräsentativ gewählten Windenergieanlagen auf die weiteren Windenergieanlagen.....	34
5	Sicherheitstechnik.....	36
5.1	Qualitative Bewertung.....	36
5.2	Einbindung in das Nordex Betriebsführungssystem.....	37
5.3	Einbauverfahren und Parametrierung	39

5.4	Inbetriebnahme und Wiederkehrende Prüfungen	41
5.5	Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung	42
6	Anforderungen	44
7	Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung	45
8	Dokumente und Literaturverzeichnis.....	47
8.1	Bewertete Dokumente.....	47
8.2	Dazugehörige Dokumente	47
8.3	Literatur & Quellen	48

Tabellen

Tabelle 1.1	NORDEX Windenergieanlagen, an denen das IDD.Blade Eiserkennungssystem zum Einsatz kommen soll.....	6
Tabelle 3.1:	Gewähltes Eisobjekt.....	16
Tabelle 3.2:	Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel). 18	18
Tabelle 3.3:	Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J.	18
Tabelle 3.4:	Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s. 19	19
Tabelle 3.5:	Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.....	20
Tabelle 4.1:	Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N100/2500	22
Tabelle 4.2:	Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N117/3000	23
Tabelle 4.3	Festlegung von Randbedingungen für die numerischen Simulationen.....	25
Tabelle 5.1:	Parameter der Eiserkennung	40

Abbildungen

Abbildung 1:	Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel.....	15
Abbildung 2:	Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (N117/3000 delta, 91,0m Nabenhöhe).....	17

Abbildung 3: Ergebnisse der Auswertung der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000	29
Abbildung 4: Auswertung des Testblocks 02 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000	30
Abbildung 5: Auswertung des Testblocks 04 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000	30
Abbildung 6: Auswertung des Testblocks 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000	30
Abbildung 7: Einbindung des Eisdetektionssystems in NORDEX WEA	38
Abbildung 8: Schema zur Position des SNS im Rotorblatt	39

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen, die in Regionen mit Temperaturen unter 3°C aufgestellt werden, können bei ungünstigen Bedingungen Eis ansammeln. Aus der dann entstehenden Eisschicht können sich beispielsweise durch Abtauen oder Blattverformung Eisbrocken ablösen, die im Betrieb der Anlage vom Rotorblatt abgeworfen werden und zu Personen- oder Sachschäden im Wurfbereich der Anlage führen können. Ab einer bestimmten Masse der abgeworfenen Brocken besteht damit eine zu beachtende Gefahr. Beobachtungen zeigen abgeworfene Brocken mit einer Masse von mehreren kg, jedoch sind dem TÜV NORD bisher keine Personenschäden bekannt geworden.

An den Anlagen installierte Eiserkennungssysteme dienen dem Zweck, dass die Anlage bei erkannter Vereisung der Rotorblätter abgeschaltet wird und somit keine Gefahr von Eisabwurf mehr besteht. Das Eis wird dann von den Blättern der stehenden / trudelnden Anlage abfallen, bevor die Anlage wieder in den Betrieb genommen wird.

Eiserkennungssysteme verfügen generell über einen Sensor und eine Auswerteeinheit. Das Sensorsignal wird durch vereiste Rotorblätter beeinflusst und kann beispielsweise die Leistung der Anlage oder die Blattbeschleunigung sein. Die Auswerteeinheit übernimmt die Aufgabe, aus dem Sensorsignal einen Indikator für Vereisung zu generieren. Üblicher Weise gibt es einen Schwellwert, bei dessen Überschreitung das Eiserkennungssystem ein Abschalten der Anlage initiiert. Oft ist dieser Schwellwert spezifisch für jeden Anlagentyp oder gar jede Anlage einzustellen.

Die Bewertung von Eiserkennungssystemen erfolgte bisher in Gutachterlichen Stellungnahmen über Plausibilitätsprüfungen. Es wurde Stellung bezogen zum physikalischen Prinzip der Erkennung bzw. zu der Frage, ob die durch den Eisansatz hervorgerufene Veränderung der Anlageneigenschaften zu einer detektierbaren Veränderung des Sensorsignals führt. Außerdem wurde Stellung bezogen zu auftretenden Lücken der Messung im Betriebsbereich der Anlage. Die Bewertung beschränkte sich jedoch auf eine rein qualitative Bewertung bzw. Plausibilitätsprüfung.

Gerade vor dem Hintergrund, dass ein Eiserkennungssystem immer im Zusammenhang mit der Anlage und der vorliegenden Vereisung zu bewerten ist, wurden seitens der Genehmigungsbehörden die Anforderungen an die Bewertung von Eiserkennungssystemen in den letzten Monaten erhöht. Es ist durch genauere, teilweise quantitative Untersuchungen zu indizieren, dass das Eiserkennungssystem

- dem „Stand der Technik“ entspricht,
- hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlage eingestellt ist und
- sicherheitstechnisch zuverlässig funktioniert.

Eine Aussage zum Stand der Technik erfolgt über die Untersuchung, ob das Eiserkennungssystem in der Lage ist, eine vorher definierte, kritische Eisdicke zu detektieren und ob das System hinsichtlich der Hardware die notwendigen Voraussetzungen hinsichtlich Zuverlässigkeit erfüllt.

In diesem Sinne ist das vorliegende Gutachten aufgebaut.

1.2 Gegenstand der Untersuchungen

Die folgende Begutachtung befasst sich mit der Bewertung der Funktionsweise und der Eignung des IDD.BLADE Eiserkennungssystems der Firma Wölfel bezüglich der zuverlässigen Eiserkennung bei Einsatz auf den folgenden Windenergieanlagen:

Tabelle 1.1 NORDEX Windenergieanlagen, an denen das IDD.Blade Eiserkennungssystem zum Einsatz kommen soll

Anlagentyp	Rotorblatt	Rotor-durchmesser [m]	Nabenhöhe [m]	Ein-schalt-windgeschwindigkeit [m/s]	Abschalt-windgeschwindigkeit [m/s]	Nenn-drehzahl [1/min]
N90/2500 gamma	NR45, LM43.8P	90	65, 70, 80	3	25	16,3
N100/2500 gamma	NR50 -1, LM48.8P	100	75, 80, 100	3	25	14,98
N117/2400 gamma	NR 58.5 -1	117	91, 120, 141	3	20	11,8
N100/ 3300 delta	NR 50 -2	100	75, 85, 100	3	25	14,3
N117/3000 delta	NR 58.5 -2	117	91, 120, 141	3	25	12,6
N131/3000 delta	NR 65.5	131	99, 114, 134, 144	2,5	20	10,27
N131/3300 delta	NR 65.5	131	134, 164	3	20	10,9
N117/3600 delta	NR 58.5 -2	117	91, 106, 120, 141	3	25	14,36

Bei den Windenergieanlagen handelt es sich jeweils um Anlagen mit aktiver Windrichtungsnachführung und einem luvseitig angeordneten Dreiblattrotor. Die Leistungsbe-

grenzung erfolgt durch Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter. Die Anlagen werden auf verschiedenen Türmen mit variierender Nabenhöhe verbaut, wie Tabelle 1.1 zu entnehmen ist. Im Rahmen der vorliegenden Begutachtung wurden drei der in Tabelle 1.1 verzeichneten Anlagenkonfigurationen als repräsentativ ausgewählt und die Funktionsfähigkeit des IDD.Blade Eiserkennungssystem auf Basis der ausgewählten Anlagen genauer betrachtet. Die Kriterien zur repräsentativen Auswahl können den folgenden Kapiteln 3 und 4 entnommen werden. In Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind die ausgewählten Anlagen mit ihren wichtigsten technischen Hauptdaten beschrieben.

1.3 Untersuchtes Eiserkennungssystem IDD.Blade

Das Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel ist ein System zur Erfassung und Analyse von Messdaten, mit dem Eisansatz an Rotorblättern von WEA erkannt werden kann. Grundsätzlich detektiert IDD.Blade durch Vereisung verursachte Zustandsveränderungen, die das strukturdynamische Verhalten eines Rotorblattes über ein spezifisches Mindestmaß hinaus beeinflussen. Es beruht auf dem physikalischen Grundprinzip, dass messbare, bauteilcharakteristische Kennwerte wie die Eigenfrequenz eines Rotorblatts von einer Änderung der Bauteilsteifigkeit oder der Bauteilmasse, beispielsweise durch Eisansatz, beeinflusst werden.

Dieser Zusammenhang wird exemplarisch aus dem vereinfachten Modell eines sog. Einmassenschwingers ersichtlich, dessen Eigenfrequenz proportional zur Wurzel des Verhältnisses der Steifigkeit zur Masse ist:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}$$

mit: f_0 = Eigenfrequenz
 c = Steifigkeit
 m = Masse

Um die Veränderungen der bauteilcharakteristischen Kennwerte zu detektieren, werden beim Eiserkennungssystem IDD.Blade Beschleunigungen direkt in den Rotorblättern einer WEA erfasst und ausgewertet. Die Messung erfolgt mit sogenannten *Structural Noise Sensoren* (SNS), welche in der Regel im Bereich von 18 m Rotorradius in den Rotorblättern installiert werden und neben den Beschleunigungen auch die aktuelle Bauteiltemperatur zur Verfügung stellen. Da die charakteristischen Frequenzen eines Rotorblatts neben der Bauteilmasse und Temperatur (temperaturabhängige Materialversteifung) ebenfalls von weiteren Einflussgrößen wie beispielsweise der Rotordrehzahl (Fliehkraftversteifung) und dem aktuellen Blattpitchwinkel abhängig sind, ist für die weitere Auswertung ein Abgleich mit den aktuellen Betriebsbedingungen der WEA notwendig. Hierzu werden die folgen Umwelt- und Betriebsdaten, welche auch zur Klassifizierung der Messdaten verwendet werden, von der WEA-Steuerung über eine sogenannte EOC Schnittstelle (*Environmental and Operational Conditions*) an das IDD.Blade Eiserkennungssystem übergeben:

- Windgeschwindigkeit Anemometer (Auflösung 1 Hz)
- Elektrische Wirkleistung (Auflösung 1 Hz)

- Generator- oder Rotordrehzahl (Auflösung 1 Hz)
- Pitch-Winkel (Auflösung 1 Hz)

Weitere Informationen können optional berücksichtigt werden, z.B.:

- Azimutwinkel,
- Lufttemperatur und -druck,
- Anlageninformationen (Servicezustände etc.)
- etc.

Da die Datenauswertung zu großen Teilen auf einem statistischen Verfahren beruht, das auf einem ausreichenden Datenpool aufbaut, erfolgt die Datenerfassung und Auswertung kontinuierlich. Die Messdatenanalyse, welche sowohl im Produktionsbetrieb als auch im Trudelzustand der WEA eingesetzt wird, verwendet zur Eiserkennung im Wesentlichen Systemidentifikationsverfahren im Zeitbereich an, insbesondere Verfahren der Operational Modal Analysis (OMA). Grundsätzlich detektieren die Systeme globale, strukturdynamische Veränderungen in Bezug auf zuvor referenzierten, eisfreien Zustände.

Um den Bezug zu den eisfreien Zuständen herstellen zu können, ist nach Inbetriebnahme zunächst eine Lernphase zum Referenzieren der individuellen Blatteigenschaften notwendig, um eine ausreichend hohe Sensitivität der Detektion zu gewährleisten. Dies ist unter anderem erforderlich, um fertigungsbedingte Streuungen der Rotorblattmassen und Rotorblattsteifigkeiten von der weiteren Beurteilung auszuschließen. Während dieser Lernphase, die vollautomatisch und ohne Eingriffe von außen durch das System selbstständig durchgeführt wird, erfolgt ein Vergleich von aktuellen Blattzuständen mit fest hinterlegten Referenzgrößen, die im Rahmen von Prototypentests bestimmt wurden. Da die strukturdynamischen Rotorblatteigenschaften, wie bereits erwähnt, zusätzlich von der Betriebsweise (z.B. Drehzahl) und den Umgebungsbedingungen (z.B. Temperatur) abhängig sind, sind diese Parameter ebenfalls zu berücksichtigen und deren Einfluss ist vom Eiserkennungssystem zu kompensieren.

Nach erfolgreicher Referenzierung des Eiserkennungssystems werden im laufenden Betrieb als Ergebnis der Zustandsüberwachung Zustandsindikatoren bereitgestellt, anhand derer eine Beurteilung über den aktuellen Vereisungszustand der Rotorblätter vorgenommen werden kann. Diese Zustandsindikatoren werden prinzipiell auf Basis der kontinuierlich erfassten Messdaten fortlaufend bestimmt. Da eine Klassifikation nach Betriebs- und Umweltbedingungen vorgenommen werden muss und die Sensordaten einer statistischen Auswertung zugeführt werden, ergeben sich die aktualisierten Zustandsinformationen jedoch rhythmisch. Dieser Rhythmus ist vom Rotorblatttyp, vom Anlagentyp, von den aktuell herrschenden Betriebs- und Umweltbedingungen sowie weiteren Einflussgrößen abhängig, bewegt sich jedoch in der Regel zwischen ca. 5 und 60 Minuten. Referenz- sowie eisfreie Zustände werden dabei mit Indikatoren im Toleranzbereich von Null abgebildet. Im Falle von Vereisungen weichen die Indikatoren – proportional zur Stärke der Veränderungen – von Null ab.

Durch die Vorgabe von zwei Schwellwerten ist es möglich, automatische Warn- und Alarmmeldungen (Ampelfunktion grün, gelb, rot) zu generieren. Die Bestimmung der Schwellwerte selbst erfolgt mit statistischen Methoden im Rahmen eines Prototypentests sowie ggf. mit weiteren numerischen Untersuchungen im Rahmen der rotorblatt- und anlagenspezifischen Anpassung (Referenzierungsphase) und kann bei Bedarf kunden- bzw. standortspezifisch angepasst werden.

Auf Basis des ampelbasierten Alarmkonzeptes ist eine aktive Beeinflussung der WEA-Steuerung möglich. Im Falle von Vereisungen kann die WEA automatisch gestoppt bzw. nach Abtauen wieder gestartet werden.

Es gibt Betriebszustände, bei denen die Bereitstellung von Zustandsindikatoren nicht möglich ist. Dies ist der Fall bei

- Windgeschwindigkeiten < 2 bis 3 m/s
- Drehzahl- und Pitchwinkelveränderungen außerhalb des normalen Betriebsbereichs (Starten und Stoppen der WEA)
- Ggf. einzelne Betriebsdrehzahlen, bei denen eine Auswertung nicht möglich ist (anlagenspezifisch)

In diesen Fällen wird vom IDD.Blade Eiserkennungssystem eine entsprechende Meldung ausgegeben, sodass die sicherheitstechnische Steuerung der WEA darauf reagieren und die Anlage ggf. nach verstreichen einer kritischen Zeit abschalten kann um den Abwurf von unerkanntem Eisansatz zu verhindern.

2 Beschreibung der Bewertungskette

2.1 Bewertungsmaßstäbe

Die Bewertung erfolgt in Bezug auf das sichere Abschalten der WEA bei kritischem Eisansatz an den Rotorblättern. Weil es keine Richtlinie gibt, nach der Eiserkennungssysteme zu bewerten sind, ist die Form dieser Bewertung ein Gutachten, in dem die einzelnen Schritte der Bewertung beschrieben werden. Anhaltspunkte zur Bewertung liefern die von der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord herausgegebenen Papiere „Anforderungsprofil für ein Gutachten gemäß Merkblatt „Sicherheitsnachweise hinsichtlich Eisabwurf – Rheinland-Pfalz“ – Arbeitsentwurf 09.08.2013“ sowie „Sicherheitsnachweise hinsichtlich Eisabwurf – Arbeitsentwurf Stand 09.08.2013“.

2.2 Grenzen der Bewertung

Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf die Funktionalität der Systeme bezüglich Verhinderung von *Eisabwurf*. Eine Untersuchung bezüglich Eisabfall wird hier nicht behandelt, denn Eisabfall von einer stehenden/trudelnden Anlage kann nicht verhindert werden. Die Gefahr bezüglich Eisabfall sollte immer standortspezifisch in Abhängigkeit gefährdeter Objekte im für Eisabfall kritischen Radius um die Anlage bewertet werden.

2.3 Beschreibung der Vorgehensweise

Die Bewertung der Eiserkennungssysteme hat zum Ziel, quantitative Aussagen zur Detektionsfähigkeit der Systeme zur Eiserkennung zu treffen und damit in Hinblick auf die Windenergieanlage (WEA) Aussagen zu treffen, ob und unter welchen Bedingungen eine Detektion einer kritischen Vereisung der Rotorblätter im Betrieb der WEA funktioniert. Aufgrund der Komplexität des vorliegenden Eiserkennungssystems in der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der relevanten Zustandsdaten wurde mit dem Systemhersteller Wölfel ein auf numerischen Anlagensimulationen basierender Systemtest im Rahmen eines „Black-Box“ Verfahrens abgestimmt. Hierzu werden von unabhängiger gutachterlicher Seite die von dem Eiserkennungssystem verwendeten Eingangsgrößen simuliert und anonymisiert an den Systemhersteller (Wölfel) übermittelt. Dieser wertet die übermittelten Daten aus und meldet die vom System ermittelten Ausgangsgrößen zurück an den Gutachter. Die Auswertung der Rückmeldungen auf Basis der auf gutachterlicher Seite bekannten Rahmenbedingungen der Eingangsgrößen ermöglicht sodann eine Bewertung der Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Eiserkennung bezogen auf die vorliegenden, simulierten Eisdicken und die Schwellwerte des Systems. Weiterhin werden qualitative Aussagen zur Einbindung der Systeme in die Steuerung der WEA getroffen, um die sichere Abschaltung der WEA bei Eiserkennung und das Wiederanfahren nach Vereisung zu bewerten.

Das Vorgehen zur Bewertung unterteilt sich in die folgenden Schritte:

1. Bestimmung einer kritischen Eisdicke

(s. Kap.3) Die Bestimmung der kritischen Eisdicke erfolgt für ausgewählte Anlagen des NORDEX Produktspektrums (Tabelle 1.1), um repräsentative Eisdicken festzulegen, die für die abzudeckenden Anlagen als kritisch einzustufen sind. Diese Eisdicken werden bei der Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus einbezogen.

2. Test der Erkennung der kritischen Eisdicken auf Grundlage von numerischen Simulationen

(s. Kap.4) Dieser Abschnitt befasst sich mit der Erzeugung von Testdaten auf Basis von numerischen Simulationen zum Systemtest im „Black-Box“ Verfahren, sowie mit der Beschreibung des Testablaufs und der Auswertung der Testergebnisse. Darauf basierend werden Aussagen darüber getroffen, ob der Algorithmus funktionsfähig ist und ob die im System eingestellten Schwellwerte und Parameter des Algorithmus zur Erkennung der zuvor ermittelten kritischen Eisdicke in der kritischen Zeit auf der entsprechenden Windenergieanlage führen. Anschließend werden der Einfluss gegebenenfalls bestehender Abweichungen der verwendeten Testumgebung gegenüber der Realität und die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf alle abzudeckenden Windenergieanlagen betrachtet und eingeschätzt.

3. Bewertung der Einbindung des Eiserkennungssystems in das Sicherheitssystem der Anlage

(s. Kap.5) In diesem Abschnitt wird das Eiserkennungssystem hinsichtlich sicherheitstechnischer Kriterien geprüft und bewertet. Dazu zählt die Einbindung ins Sicherheitssystem, regelmäßige wiederkehrende Prüfungen, die Parametrisierung des Systems sowie das sichere Wiederanfahren der WEA nach Eiserkennung.

3 Ermittlung der kritischen Eisdicke

Gegenstand der Untersuchung ist die Bewertung, inwieweit das zu betrachtende Eiserkennungssystem geeignet ist, Eisabwurf im Betrieb der Anlage durch frühzeitiges Abschalten der Anlage zu verhindern, bevor sich eine kritische Eisdicke am Blatt akkumuliert hat. Es ist somit erforderlich in einem ersten Schritt eine kritische Eisdicke festzulegen. Dies erfolgt in einzelnen Arbeitsschritten:

- Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf.
- Ermittlung eines kritischen Eisobjektes. Ein kritisches Eisobjekt ist definiert als ein Eisobjekt, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisobjekt werden eine kritische Eismasse und eine kritische Eisdicke zugeordnet.
- Ermittlung einer kritischen Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist.

3.1 Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf

Verwendetes Rechenmodell:

Die Flugbahn von Eisobjekten lässt sich durch Überlagerung zweier Kräfte modellieren, der Schwerkraft und dem Winddruck. Die Erfahrung zeigt, dass die herabfallenden Eisobjekte eine sehr unregelmäßige Form besitzen und deshalb praktisch wenig Auftrieb erfahren, so dass in vertikaler Richtung im Wesentlichen die Schwerkraft und der Luftwiderstand wirken. Der Winddruck wirkt horizontal in x-Richtung (Achsenkonvention nach der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/). Zur Modellierung des Winddrucks werden jedem Eisobjekt ein konstanter Widerstandsbeiwert C_w /33/ und eine konstante Projektionsfläche A zugeordnet.

Der zeitabhängige Verlauf des Eisabwurfs lässt sich mit einem dreidimensionalen Modell beschreiben (in Anlehnung an /16/):

$$\ddot{x} = -\frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot (\dot{x} - v) \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2}, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -\frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot \dot{y} \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2} \quad \text{und} \quad (2)$$

$$\ddot{z} = -g - \frac{\rho \cdot A \cdot C_w}{2 \cdot m} \cdot \dot{z} \cdot \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2 + (\dot{x} - v)^2} \quad (3)$$

mit

x = horizontale Koordinate (senkrecht zur y-z-Ebene) [m]

y = horizontale Koordinate [m],

z = vertikale Koordinate (y-z-Ebene entspricht der Rotationsebene) [m],

v = Windgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s],

g = Erdbeschleunigung [m/s^2],

ρ = Luftdichte [kg/m^3],

A = Projektionsfläche des Eisobjekts [m^2],

C_w = Luftwiderstandsbeiwert des Eisobjekts und

m = Masse des Eisobjekts [kg].

Anlagenbezogene Randbedingungen:

WEA-Typ:

Aus dem Anlagenportfolio Tabelle 1.1 wurden drei WEA-Typen ausgewählt, die als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können. Es wurde jeweils die kleinste Nabenhöhe ausgewählt, da diese auf Basis von Untersuchungen für die Ermittlung der kritischen Eisdicke des Eisabwurfs konservativ ist.

- N100/2500 gamma mit 75,0 m Nabenhöhe, 100,0 m Rotordurchmesser
- N117/3000 delta mit 91,0 m Nabenhöhe, 117,0 m Rotordurchmesser
- N131/3000 delta mit 99,0 m Nabenhöhe, 131,0 m Rotordurchmesser

Drehzahl bei Eisabwurf:

Für die Drehzahl wird jeweils die Nenndrehzahl der jeweiligen WEA berücksichtigt, siehe Tabelle 1.1.

- N100/2500 gamma, Rotordrehzahl 14,98 rpm
- N117/3000 delta, Rotordrehzahl 12,6 rpm
- N131/3000, Rotordrehzahl 10,27 rpm

Physikalische Randbedingungen:

Luftdichte: Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu $1,225\text{kg/m}^3$ festgelegt.

Die gewählte Luftdichte ist für den betrachteten Eisabwurf als konservativ zu betrachten, da sie gegenüber der bei Eisansatzbedingungen zu erwartenden Luftdichte von ca. $1,27\text{kg/m}^3$ (siehe Untersuchungen /18/) zu einer höheren Aufprallgeschwindigkeit führt.

Windgeschwindigkeit: Zur Festlegung der Windgeschwindigkeit wird in einem ersten Schritt die jeweilige anlagenbezogene Abschaltwindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe zugrunde gelegt, siehe Tabelle 1.1.

Abschaltwindgeschwindigkeit:

- 25m/s N100/2500 gamma
- 25m/s N117/3000 delta
- 20m/s N131/3000 delta

Höhenabhängigkeit: Die Windgeschwindigkeit wird als Funktion der Höhe modelliert, hierzu wird das exponentielle Windprofil verwendet. Der Höhenexponent α wird gemäß der IEC 61400-1 ed. 3 /14/ zu 0,2 festgelegt.

Erdbeschleunigung: Die Erdbeschleunigung wird zu $9,81\text{m/s}^2$ festgelegt.

Die kritische Eisdicke wurde in zwei getrennten Schritten mit unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt. In einem ersten Schritt wurde für die Ermittlung der kritischen Eisdicke ein Würfel untersucht (kompaktes Eisobjekt). Die hierfür gewählten Randbedingungen sind im Folgenden dargestellt („Schritt eins“). Im zweiten Schritt wurde unter anderem die Anzahl und die Objektgeometrie der zugrundegelegten Eisobjekte variiert.

Randbedingungen zum Eisabwurf („Schritt eins“, Würfel):

Gewicht und Geometrie der Eisobjekte: In Feldstudien /17/ hat sich gezeigt, dass das Gewicht der Eisobjekte für die Fallweite von geringer Relevanz ist. Die Flugeigenschaften werden im Wesentlichen von der Geometrie und dem c_w -Wert beeinflusst. Die Gewichte der Eisobjekte normieren wir unter Zugrundelegung der Kenntnisse aus /17/ (geringe Relevanz, siehe vorherigen Absatz) auf 1,0 kg (zur normierten Ermittlung der Flugbahn). Die Normierung ist nach eigenen Untersuchungen bzgl. der Ermittlung der Eisdicke (Eisabwurf) über die Aufprallenergie konservativ.

Auf Basis eigener Untersuchungen (siehe z.B. /29/, /30/) wird als zu betrachtendes Eisobjekt im ersten Schritt ein Würfel angesetzt (siehe Tabelle 3.1). Der Würfel ist gegenüber länglichen Eisobjekten hinsichtlich der Aufprallgeschwindigkeit und der resultierenden Aufprallenergie als konservativ zu betrachten.

Lageparameter des Eisobjekts:

Die maximale Umfangsgeschwindigkeit ist an der Rotorblattspitze gegeben. Im Rahmen der Modellierung wird angesetzt, dass sich das Eisobjekt zum Zeitpunkt des Abwurfs an der Rotorblattspitze befindet und somit die größtmögliche Startenergie besitzt.

Lageparameter des Rotorblattes (Abwurfwinkel):

Die Aufprallgeschwindigkeit des Eisobjekts ist auf Basis eigener Untersuchungen im Wesentlichen von der Lage des Eisobjekts zum Zeitpunkt des Abwurfs (gegeben durch die Lage des Rotorblattes in der Rotorebene und der Lage des Eisobjekts auf dem Rotorblatt) und von der Höhe der WEA abhängig (die Aufprallgeschwindigkeit reduziert sich mit zunehmender Höhe – Einfluss des Luftwiderstandes). Unter den genannten Aspekten wird der Abwurfwinkel auf 125° (ca. 4Uhr) festgesetzt (ausgehend von der 0:00Uhr Position im Uhrzeigersinn).

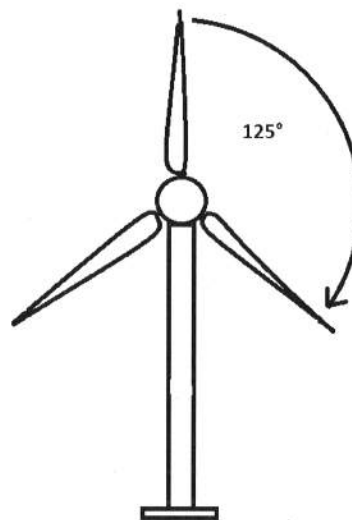


Abbildung 1: Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel.

Masse [kg]	Dichte [kg/m ³]	Form	mittlere Fläche [m ²]	mittlerer C _w -Wert [-]
1,0	700	Würfel	0,013	1,11

Tabelle 3.1: Gewähltes Eisobjekt.

Randbedingungen zur Schadensbewertung:

Dichte des Eises: Die Dichte des Eises wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu 700kg/m³ festgelegt.

Kritische Aufprallenergie: Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke wird die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) gemäß /31/ auf 40J festgelegt. Die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) berechnet sich zu

$$E_{kin} = 1/2 \cdot m \cdot v^2 .$$

mit

E_{kin}: kinetische Energie [J],
m: Masse des Eisobjekts [kg] und
v: Aufprallgeschwindigkeit [m/s].

Die Masse wird hierbei vereinfacht punktförmig angenommen (konservative Vereinfachung).

3.2 Ermittlung eines kritischen Eisobjektes

Ein kritisches Eisobjekt ist definiert als ein Eisobjekt, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisobjekt werden eine kritische Eismasse und eine kritische Eisdicke zugeordnet. Zur Ermittlung sind die folgenden Arbeitsschritte erforderlich:

- Ermittlung der Aufprallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen.
- Ermittlung der kritischen Eismasse unter Berücksichtigung der ermittelten Aufprallgeschwindigkeit und der festgelegten kritischen Aufprallenergie.
- Ermittlung der kritischen Eisdicke für einen Würfel (gewählte Geometrie des Eisobjekts) unter Berücksichtigung der festgelegten Eisdichte und der ermittelten kritischen Eismasse.

In Abbildung 2 ist die Flugbahn eines Eisobjekts unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen dargestellt. Die Randbedingungen (siehe Kapitel 3.1) wurden so

gewählt, dass eine maximale Aufprallgeschwindigkeit vorliegt (Geometrie Würfel, Abwurfwinkel, geringer Abstand Abwurfpunkt Boden).

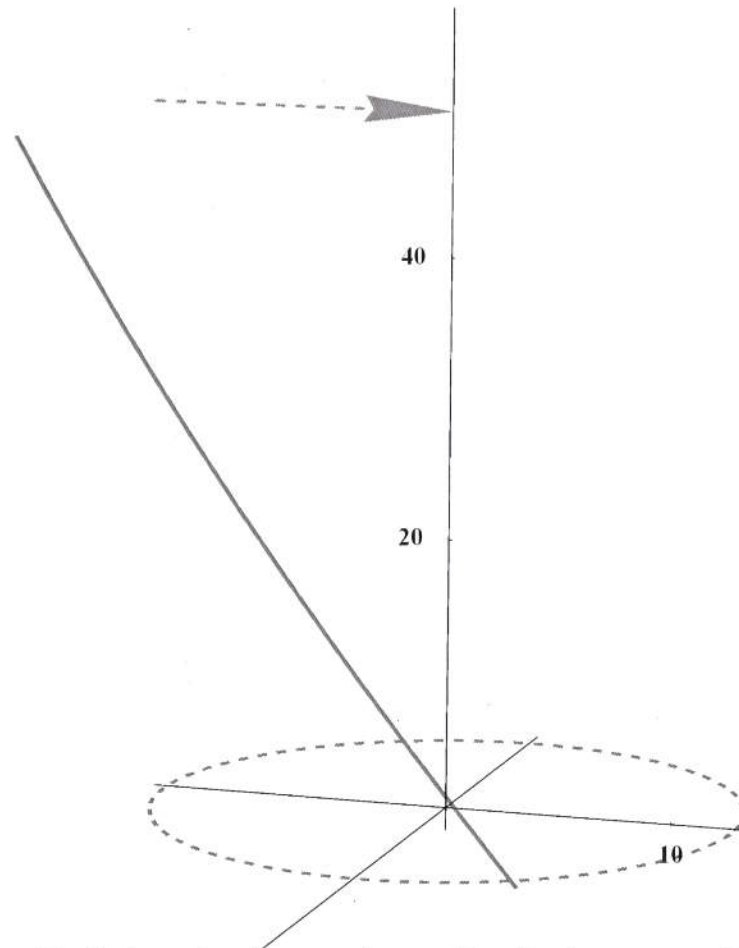


Abbildung 2: Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (N117/3000 delta, 91,0m Nabenhöhe)

Aufgrund der gewählten Randbedingungen ist die erzielte Wurfweite minimal – im Sinne einer „Worst Case“ Betrachtung sind die Aufprallgeschwindigkeit und die resultierende Aufprallenergie für die Ermittlung der kritischen Eisdicken entscheidend. Auf Basis der ermittelten Aufprallgeschwindigkeiten wurden für die untersuchten WEA-Typen die kritischen Eismassen unter Berücksichtigung der festgelegten kritischen Aufprallenergie von 40J und die daraus resultierenden kritischen Eisdicken ermittelt (siehe Tabelle 3.2).

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	10,6	12,6	15,9
Kritische Eismasse [g]	27,7	32,1	38,2
Kritische Eisdicke [cm]	3,4	3,6	3,8

Tabelle 3.2: Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel).

Vergleicht man den Würfel („Schritt eins“) mit beobachteten Eisobjekten aus der Praxis (TÜV NORD Erfahrungen aus den wiederkehrenden Prüfungen und Literaturquellen /17/, /20/, /21/) sowie Modellrechnungen (Turbice /20/, /24/, /25/, /26/), so ist festzustellen, dass der Würfel als gewähltes Eisobjekt nicht die Bandbreite der möglichen abgeworfenen Eisobjekte abdeckt. Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Schritt etwa 144 verschiedene Eisobjekte mit ihren objektspezifischen Massen generiert (Randbedingungen der Eisobjekte: Breite; Höhe; Länge: 10cm; 0,3cm bis 5cm; 5cm bis 20cm; Dichte 700kg/m³ /19/) und die Aufprallenergie unter Variation der Abwurfbedingungen ermittelt. Die folgenden Randbedingungen wurden für die Parameterstudie („Schritt zwei“) der generierten Eisobjekte gegenüber dem ersten Schritt (Würfel) variiert:

- Die Windgeschwindigkeit wurde von 15m/s bis zur Abschaltwindgeschwindigkeit (siehe Kapitel 3.1) der jeweiligen WEA kontinuierlich mit einer Schrittweite von 1m/s variiert. Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke hat sich gezeigt, dass der obere Windgeschwindigkeitsbereich maßgeblich ist.
- Die Lage des Rotorblattes in der Rotorebene (Abwurfwinkel) wurde in 10° Schritten von 0° bis 360° variiert.

Für jedes abgeworfene Eisobjekt wurden die Aufprallgeschwindigkeit sowie die zugehörige Aufprallenergie ermittelt und mit der zugrunde gelegten kritischen Aufprallenergie von 40J verglichen (siehe Kapitel 3.1). In der Tabelle 3.3 sind die daraus resultierenden minimalen Eisdicken für die Untersuchten WEA-Typen angegeben.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
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

Tabelle 3.3: Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J.

Die Ergebnisse in Tabelle 3.3 zeigen, dass die ermittelte kritische Eisdicke mit einer hohen Windgeschwindigkeit (Abschaltwindgeschwindigkeit 25m/s) einhergeht. Gemäß deutschem Wetterdienst (DWD) /32/ entspricht eine Windgeschwindigkeit von 25m/s einem „schwerem Sturm“, bei dem mit brechenden Bäumen und größeren Schäden an Häusern zurechnen ist. Die Ergebnisse aus /18/ und weiteren internen Studien zeigen, dass an den überwiegenden Standorten in Deutschland bei Eisansatz überwiegend mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten, bezogen auf die Ganzjahreswindstatistik, zu rechnen ist. Auf dieser Basis wurde für die Auswahl des kritischen Eisobjektes die Windgeschwindigkeit auf kleiner gleich 20m/s begrenzt. Gemäß DWD /32/ ist bei einer Windgeschwindigkeit von 20m/s („Sturm“) immer noch mit brechenden Ästen von Bäumen (vergleichbar mit der Gefährdung durch herabfallende Eisobjekte) und einem beschwerlichem Gehen zurechnen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3.4 dargestellten kritischen Eisdicken.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	20,3	20,2	20,4
Masse [kg]	0,196	0,196	0,210
Dicke [cm]	1,4	1,4	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20

Tabelle 3.4: Untersuchungsergebnisse Variation der generierten Eisobjekte, Auswahlkriterium kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s.

Die Ergebnisse aus Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 zeigen, dass mit zunehmender Anlagengröße die kritische Eisdicke zunimmt. Dies ist unter anderem durch den längeren Flugweg und die größere Flugzeit der abgeworfenen Eisobjekte begründet. Die hohe Anfangsgeschwindigkeit, die durch die Blattspitzengeschwindigkeit auf das abgeworfene Eisobjekt wirkt, wird über den Flugweg durch den Luftwiderstand zunehmend abgebremst. Daraus folgt, dass mit zunehmendem Flugweg (größere Anlage) die Aufprallgeschwindigkeit sinkt und damit die kritische Masse sowie die kritische Eisdicke steigen.

Abschließend werden die kritischen Eisdicken, unter Berücksichtigung einer niedrigeren Windgeschwindigkeit bei Eisansatz /18/, zu den in Tabelle 3.4 aufgeführten Dicken festgelegt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich somit bei der N100/2500 gamma (Nabenhöhe 75,0) zu 1,4 cm ein.

3.3 Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes

In der Vergangenheit gab es zum Eiswachstum verschiedene Studien auf Basis der Simulationsprogramme TURBICE /20/, /24/, /25/, /26/ (WEA – Vereisung von Rotorblättern) und LEWICE /24/ (Luftfahrt – Vereisung von Tragflächen) sowie auf Basis experimenteller Windkanalversuche /20/, /24/, /27/.

Die Studien zeigen übereinstimmend die folgenden Ergebnisse:

- Die Eiswachstumsrate von Raureif (Dicke Eis pro Zeiteinheit [mm/min]) nimmt mit zunehmender Größe der WEA (450kW bis 2MW) ab (0,75 mm/min bis 0,45 mm/min) /25/, /26/. Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen /25/ wurde dieses Phänomen zunächst in einem Windpark beobachtet und daraufhin näher untersucht /25/.
- Raureif wächst insgesamt dicker auf als Klareis /24/, /27/ besitzt aber eine geringere Dichte /28/ (Raureif: 600 bis 900 kg/m³, Klareis 900 kg/m³).
- Die Eiswachstumsrate liegt in einem Bereich von 0,45 mm/min /25/ bis 3 mm/min /24/.

Zusammenfassend wird die Eiswachstumsrate zu 1 mm/min festgelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eiswachstumsrate mit zunehmender Größe der WEA abnimmt /25/, /26/ - gemäß der Erkenntnisse aus /25/ eher unterhalb von 1 mm/min liegt. Die festgelegte Eiswachstumsrate gilt in Anlehnung an /27/ (Studie DTU Wind Energy 2013) für Klareis, Raureif bzw. einer Vereisungsmischung /27/.

Auf Basis der ermittelten kritischen Eisdicken (siehe Tabelle 3.4) ergibt sich die kritische Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist, ca. zu den in Tabelle 3.5 aufgeführten Werten. Innerhalb dieser Zeit sollte das Eiserkennungssystem den Eisansatz erkannt und die WEA abgeschaltet haben, um den Eisabwurf eines kritischen Eisobjekts zu verhindern.

	N100/2500 gamma	N117/3000 delta	N131/3000 delta
Detektionszeit [min]	14	14	15

Tabelle 3.5: Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.

4 Test der Eiserkennung auf Basis von numerischen Simulationen

4.1 Testbeschreibung

Die grundsätzliche, anlagenunabhängige Eignung der vom IDD.Blade System verwendeten Sensorik und Auswerteeinheiten sowie die allgemeine Funktionsfähigkeit des Systemaufbaus bezüglich der zuverlässigen Detektion von globalen, strukturdynamischen Zustandsveränderungen wurde bereits im Rahmen einer früheren Begutachtung durch die Zertifizierungsstelle des Germanischen Lloyd entsprechend der Richtlinie /11/, unter anderem auf Basis eines experimentellen Nachweises im Rotorblatttestprüfstand , /12/, geprüft und bestätigt, siehe /3/. Darüber hinausgehend soll in der hier vorliegenden Begutachtung durch genauere, quantitative Untersuchungen überprüft werden, ob das Eiserkennungssystem hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlagen eingestellt ist und die im vorherigen Kapitel ermittelten kritischen Eisdicken innerhalb der ermittelten kritischen Detektionszeiten zuverlässig erkennen und melden kann.

Aufgrund der Komplexität des vorliegenden Eiserkennungssystems in der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der relevanten Zustandsdaten wurde mit dem Systemhersteller Wölfel ein auf numerischen Anlagensimulationen basierender Systemtest im Rahmen eines „Black-Box“ Verfahrens abgestimmt. Hierzu werden von unabhängiger gutachterlicher Seite die von dem Eiserkennungssystem verwendeten Eingangsgrößen simuliert und anonymisiert an den Systemhersteller übermittelt. Dieser wertete die übermittelten Daten mit dem IDD.Blade Eiserkennungssystem aus und meldete die vom System ermittelten Ausgangsgrößen zurück an den Gutachter. Die Auswertung der Rückmeldungen auf Basis der auf gutachterlicher Seite bekannten simulierten Umgebungsbedingungen und Eisdicken der Eingangsgrößen ermöglichte sodann eine Bewertung der Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Eiserkennung bezogen auf die vorliegenden Schwellwerte des Systems.

Die numerischen Simulationen wurden auf Basis von Mehrkörpersimulationsmodellen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden aus den in Tabelle 1.1 genannten Windenergieanlagen die folgenden zwei Anlagen repräsentativ ausgewählt (siehe auch Kapitel 4.10), modelliert und näher untersucht:

- N100/2500 gamma, Rotorblatt NR50
- N117/3000 delta, Rotorblatt NR58.5 -2

Bei den Windenergieanlagen handelt es sich um Anlagen mit aktiver Windrichtungsnachführung und einem luvseitig angeordneten Dreiblatt-Rotor. Die Leistungsbegrenzung erfolgt durch die Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter. Die Anlagen werden auf verschiedenen Türmen mit variierender Nabenhöhe verbaut, wie Tabelle 1.1 zu entnehmen ist.

Im Folgenden werden die ausgewählten Anlagen mit ihren wichtigsten technischen Hauptdaten beschrieben.

4.2 Beschreibung der modellierten Windenergieanlagen

4.2.1 N100/2500 gamma

Tabelle 4.1: Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N100/2500

Elektrische Nennleistung	2500 kW
Nabenhöhe	75 – 100 m
Rotordurchmesser	100 m
Rotornennendrehzahl	14,98 U/min
Rotordrehzahl im Produktionsbetrieb	9,8 – 16,9 U/min
Getriebeübersetzung	77,44
Netzfrequenz	50 Hz
Rotorüberhang (vor Turmachse)	3,98 m
Rotorachsneigung	5°
Rotor-Konuswinkel	3,5° upwind
Einschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	3 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	12 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	25 m/s
Rotorblatt	NR50
Rotorblattmasse	10700 kg
Pitch-Verstellbereich	-5° bis 90°
Max. Pitchgeschwindigkeit	±8 °/s
Auslegungslebensdauer	20 Jahre

4.2.2 N117/3000 delta

Tabelle 4.2: Technisch Hauptdaten der untersuchten WEA NORDEX N117/3000

Elektrische Nennleistung	3000 kW
Nabenhöhe	91 – 141 m
Rotordurchmesser	117 m
Rotornennendrehzahl	12,6 U/min
Rotordrehzahl im Produktionsbetrieb	8,1 – 14,1 U/min
Getriebeübersetzung	92,29
Netzfrequenz	50 Hz
Rotorüberhang (vor Turmachse)	3,915 m
Rotorachsneigung	5°
Rotor-Konuswinkel	3,5° upwind
Einschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	3 m/s
Nennwindgeschwindigkeit	12 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit (10 Minuten Mittelwert)	25 m/s
Rotorblatt	NR58.5 -2
Rotorblattmasse	10551 kg
Pitch-Verstellbereich	-5° bis 90°
Max. Pitchgeschwindigkeit	±10 °/s
Auslegungslbensdauer	20 Jahre

4.3 Modellaufbau

Zur Begutachtung der Funktion des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurde jeweils ein dreidimensionales dynamisches Simulationsmodell für die in Kapitel 4.2 beschriebenen Anlagen unter Berücksichtigung der Anlagendynamik und der Aeroelastizität aufgestellt. Für die numerischen Simulationen wurde das speziell für die Berechnung von Windenergieanlagen entwickelte und auf dem Mehrkörpersimulationsansatz basierende Programm DNV-GL Bladed in der Version 4.5 verwendet. Das Berechnungsmodell berücksichtigt alle für das Schwingungsverhalten der WEA wesentlichen Massen, Dämpfungen und Steifigkeiten, die Blattwinkel- und Umrichterregelung sowie alle lastrelevanten Eigenschaften des Betriebsführungs- und Sicherheitssystems. Die Aerodynamik der Rotorblätter basiert auf der Blattelementtheorie und berücksichtigt die Blatt- und Turmdeformationsgeschwindigkeit, den Stall-Effekt sowie den Turmvorstau. Eine aerodynamische Asymmetrie der Blätter durch Blattwinkelfehler ($\pm 0.3^\circ$) und eine Massenexzentrizität des Rotors von 145 kg wirkend im Blattschwerpunkt wurden in dem Berechnungsmodell als strukturelle Unwucht für alle Berechnungen berücksichtigt. Die Lastberechnungen wurden unter Berücksichtigung einer elastischen Einspannung des Turmfußes durchgeführt.

Als Ergebnis der numerischen Simulationen können die vom IDD.Blade verwendeten Eingangsgrößen der Anlagenbetriebsführung, bestehend aus

- Windgeschwindigkeit
- Leistung
- Rotordrehzahl
- Pitchwinkel der drei Rotorblätter

im Zeitbereich bereitgestellt werden.

Aus simulationstechnischen Gründen ist eine Ausgabe der benötigten Blattbeschleunigungen an den Positionen der vom Eiserkennungssystem verwendeten Sensoren nicht direkt möglich. Stattdessen wurde mit Wölfel die Übermittlung der Blattverschiebungen an den entsprechenden Positionen über der Zeit vereinbart, welche im Rahmen der Auswertung in einem vorgeschalteten Prozess zunächst manuell durch ein Finite-Differenzen-Verfahren 2. Ordnung zu den benötigten Beschleunigungen abgeleitet wurden.

Durch die in diesem Absatz beschriebene Modellierung ist es möglich den Test des Eiserkennungssystems, anders als bei experimentellen Tests in Rotorblattprüfständen, unter Einbeziehung der Gesamtanlagendynamik und realistischer externer Bedingungen durchzuführen. Hierbei werden das Eiserkennungssystem beeinflussende Faktoren und Effekte wie die Versteifung der Rotorblätter durch den Fliehkrafteffekt, oder die blattwinkelabhängige Kopplung der Blatteigen- und Triebstrangfrequenz direkt berücksichtigt und einbezogen.

4.4 Referenzierung der Anlagenmodelle

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, muss das IDD:Blade Eiserkennungssystem an neuen Windenergieanlagen zunächst durch eine Lernphase im unvereisten Zustand referenziert werden. Im Rahmen dieser Referenzierung werden die zur Detektion geeigneten Eigenfrequenzen der einzelnen Rotorblätter und deren Beeinflussung durch den Betriebszustand der Windenergieanlage sowohl im Produktions- als auch im Trudelbetrieb festgestellt.

Zu diesem Zweck wurden für beide im vorherigen Kapitel ausgewählten repräsentativen Anlagen (N100/2500 gamma und N117/300 delta) zunächst eine zur Referenzierung ausreichende Anzahl von Anlagensimulationen im unvereisten Zustand ausgeführt und an Wölfel übermittelt. Im Folgenden werden die Randbedingungen zu diesen Simulationen dargelegt.

Tabelle 4.3 Festlegung von Randbedingungen für die numerischen Simulationen

Luftdichte:	Die Luftdichte wurde gemäß der Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /19/ zu $1,225\text{kg/m}^3$ festgelegt.
Turbulentes Windmodell:	Die zur Anlagensimulation verwendeten turbulenten Windfelder, welche eine dreidimensionale, zeitlich und räumlich variierende Windgeschwindigkeit repräsentieren, wurden mittels des in der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ aufgeführten Kaimal Turbulenzmodell erstellt. Die windgeschwindigkeitsabhängige Turbulenzintensität der Windfelder wurde entsprechend der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ auf die Turbulenzkategorie C festgelegt, was einem Erwartungswert der Turbulenzintensität von 0,12 bei 15m/s Windgeschwindigkeit entspricht.
Windgeschwindigkeiten:	Im Rahmen der Simulationen wurden Windfelder mit einer zeitlichen Ausdehnung von 600 Sekunden (entspricht 10 Minuten) verwendet. Die mittleren Windgeschwindigkeiten von Einschalt- bis Ausschaltwindgeschwindigkeit (jeweils 3 bis 25m/s) wurden mit einer Auflösung von 1m/s in einzelnen Windfeldern umgesetzt. Für jede der daraus resultierenden 23 Windgeschwindigkeiten wurden sechs Windfelder mit unterschiedlichen Turbulenzseeds erstellt und verwendet.
Höhenabhängigkeit:	Die Windgeschwindigkeit wurde als Funktion der Höhe modelliert, hierzu wird das exponentielle Windprofil verwendet. Der Höhenexponent α wurde gemäß der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ zu 0,2 festgelegt.

Im Rahmen der Referenzierungsphase wurden Wöfel pro Windenergieanlage jeweils 138 Zeitreihen a 600 Sekunden Länge (10 Minuten) im Trudelbetrieb und 138 Zeitreihen im Produktionsbetrieb übermittelt.

Es wurde sich auf Simulationen unter normalen, fehlerfreien Produktions- bzw Trudelbedingungen der Windenergieanlagen entsprechend der Auslegungslastfallgruppen DLC1.1 und DLC6.4 der Richtlinie IEC 61400-1 ed. 3 /14/ beschränkt. Extreme atmosphärische Bedingungen wie starke Windgeschwindigkeitsänderungen in Form von deterministischen Böen oder starke Windrichtungsänderungen sowie Fehlerzustände der Anlage wie das Erreichen der Überdrehzahl oder starke Gierfehler als auch Fehler des Übertragungsnetzes sind in der Regel von kurzer und somit zur Eiserkennung irrelevanter Dauer und führen in der Regel ohnehin zu einem Abschalten der Anlage.

4.5 Modellierung der Anlagenvereisung

Nach erfolgter Einstellung des IDD.Blade Eiserkennungssystems auf die numerischen Anlagenmodelle im Rahmen der Referenzierung wurden die Modelleigenschaften abgeändert um den Vereisungszustand der Anlagen in den folgenden Simulationen abzubilden. Da das IDD.Blade Eiserkennungssystem, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, Eisansatz am Rotorblatt indirekt durch eine Massenzunahme des Rotorblatts und die dadurch bedingte Veränderung der Bauteileigenfrequenz detektiert, wurde eine Manipulation der Rotorblattmasse durch Zusatzpunktmassen im numerischen Simulationsmodell vorgenommen. Die Stärke der Vereisung als auch die Eisverteilung über dem Rotorblatt kann unter Anwendung dieser Methode anhand der Variation von Position und Größe der einzelnen Zusatzmassen eingestellt werden.

Die kritischen Eisdicken für den jeweiligen Windenergieanlagentyp wurden in Kapitel 3 ermittelt. Bei der Modellierung der Eisdicken wurde sich maßgeblich auf die ermittelten kritischen Eisdicken beschränkt. Da das Eiserkennungssystem eine stärkere Vereisung als die ermittelte kritische Eisdicke aufgrund des hinterlegten physikalischen Grundprinzips besser und einfacher detektieren kann als die kritische Vereisung, ist dieser Ansatz als konservativ anzusehen. Eine Umrechnung der ermittelten kritischen Eisdicken auf entsprechende Punktmassen erfolgte unter Einbeziehung der in Kapitel 3 festgelegten Rahmenbedingungen. Es wurde bei der Modellierung die Annahme zugrunde gelegt, dass der Eisansatz bis zum Erreichen der kritischen Eisdicke lediglich im Bereich der Profilverderkannte ansetzt, womit auch die Positionen der Zusatzmassen entsprechend an der Profilverderkannte festgelegt wurden. Für die spannweiteige Verteilung des Eises über der Rotorblattlänge wurden drei unterschiedliche Ansatzformen ausgewählt:

1. Die Eisdicke steigt linear von null Millimetern am Rotormittelpunkt bis zur kritischen Dicke am halben Rotorradius an und verläuft von dort aus bis zur Rotorblattspitze konstant, entsprechend der DIBt Richtlinie 2012 /15/
2. Die Eisdicke steigt linear von null Millimetern am Rotormittelpunkt bis zur kritischen dicke an der Rotorblattspitze an, entsprechend /34/
3. Die Eisdicke verläuft mit konstanter, kritischer Dicke von der Rotorblattspitze ausgehend über ein Drittel der Blattlänge. Diese partielle Eisverteilung soll das

sogenannte „in-cloud icing“ repräsentieren, bei dem lediglich der äußere Teil des Rotorblattes, beispielsweise aufgrund des Durchlaufens tiefhängender Wolken und Nebelschichten, von den Vereisungsbedingungen betroffen ist.

Zusätzlich wurde bei der Modellierung der Vereisungsszenarien zwischen Vereisung aller drei Rotorblätter zur gleichen Zeit und nur einzeln vereisten Rotorblättern des Rotors variiert.

4.6 Simulation der Testszzenarien

Die Simulation der Testszzenarien fand unter den in Kapitel 4.4 beschriebenen Randbedingungen statt. Die Luftdichte wurde dabei z.T. zwischen den im Kapitel 4.4 angegebenen $1,225\text{kg/m}^3$, was einer Umgebungstemperatur von 15°C bei Standardbedingungen auf Meereshöhe entspricht, und $1,3163\text{ kg/m}^3$, was einer Umgebungstemperatur von -5°C bei Standardbedingungen auf Meereshöhe entspricht, variiert.

Zur Simulation der Testszzenarien wurden neue Windfelder unter den in Kapitel 4.4 beschriebenen Randbedingungen im gesamten Betriebsbereich der Windenergieanlagen, von Einschalt- bis Ausschaltgeschwindigkeit erstellt. Somit entsprechen die Windbedingungen der Testszzenarien bezüglich der charakteristischen Werte wie mittlere Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität zwar den Windbedingungen der Referenzierungsphase, unterscheiden sich jedoch im zeitlichen Verlauf, welches als eine wichtige Voraussetzung für eine realitätsnahe Testumgebung angesehen wird.

Zum Test der Eiserkennungsfunktionalität wurden insgesamt 384 Zeitreihen mit jew. 600 Sekunden Länge (10 Minuten) sowohl im Produktions- als auch im Trudelbetrieb der Anlagen erstellt. Jeweils 6 Zeitreihen (entspricht 60 Minuten Testzeit) unter verschiedenen Windbedingungen, jedoch gleichen Vereisungsbedingungen, wurden dabei zu einem sogenannten Testblock zusammengestellt und anonymisiert an Wölfel übermittelt. Zur Abdeckung der Prüfung auf Zuverlässigkeit und Plausibilität waren in den an Wölfel übermittelten Daten auch Testblöcke enthalten, in denen gegenüber der kritischen Eisdicke deutlich abgeschwächte oder z.T. gar keine Vereisung der Anlagen vorlag. Die Testblöcke decken somit eine repräsentative Auswahl an individuellen Kombinationen der Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der begutachteten Anlagen ab, welche vom Systemanbieter Wölfel mit dem IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet wurden.

4.7 Auswertung der Testszzenarien

Die Übermittlung der Simulationsdaten an Wölfel erfolgte testblockweise als anonymisierte ASCII Dateien, in denen lediglich die in Kapitel 4.3 beschriebenen Betriebsbedingungen und Blattverschiebungen über der Zeit enthalten waren. Anonymisiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zwar der Anlagentyp bekannt ist, jedoch keinerlei Information zum Vereisungszustand der Blätter. Somit wurde sichergestellt, dass für Wölfel kein direkter Rückschluss von den Testdaten auf die Vereisungszustände der Wind-

energieanlagen möglich war und sich zudem keine Verzerrung des Testergebnisses aufgrund von Informationen einstellen konnte, welche dem Eiserkennungssystem im Feldbetrieb nicht vorliegen. Wölfel hat im Zuge der Auswertung schriftlich bestätigt, dass die Auswertung der Testdaten ausschließlich auf Basis der im IDD.Blade umgesetzten Methodik und Auswertelgorithmen stattgefunden hat und keine relevanten Modifikationen an dem System im Vergleich zum realen Feldbetrieb vorgenommen wurden /35/. Lediglich die in Kapitel 4.3 beschriebene manuelle Ableitung der übermittelten Blattverschiebungen zu Blattbeschleunigungen wurde der Auswertung als manueller Prozess vorgeschaltet.

Um die IDD.Blade Eiserkennungsfunktionen im Originalzustand nutzen zu können wurden die übermittelten Testblockdaten dem Eiserkennungssystem in einminütigen Teilabschnitten zugeführt, wobei immer fünf Einminutenabschnitte einen Zustandsindikator repräsentieren. Da IDD.Blade einen Vereisungszustand anhand der Überschreitung eines Schwellwertes durch den Zustandsindikator detektiert, konnte die zur Detektion eines Vereisungszustandes benötigte Zeit somit im Rahmen von fünf Minuten (kleinste Zeiteinheit zur Ermittlung eines Vereisungsindikators) bis 60 Minuten (maximal in einem Testblock zur Verfügung gestellte Messdaten) liegen. Im Zuge der Testdatenauswertung wurde von Wölfel -neben der Meldung von ggf. in einem Testblock vorliegender kritischer Vereisung -ebenfalls die zur Detektion benötigte Zeit pro Testblock zurück übermittelt.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems von Wölfel zurück übermittelte Auswertung der Testdatenblöcke einer Testschleife an der N117/3000 Windenergieanlage. Die Festlegung der Schwellwerte der Zustandsindikatorabweichung wurde auf Basis der in Kapitel 4.4 beschriebenen Simulationsdaten als anlagenspezifischer Systemparameter festgelegt und liegt bei -0,35% für eine Eiswarnung und -0,6% für einen Eisalarm. Diese Schwellwerte wurden von Wölfel in den weiteren Tests ebenfalls für die N100/2500 Windenergieanlage festgelegt und angewendet. Die Beurteilung, ob eine Warnung bzw. ein Alarm gemeldet wird, basiert auf dem zusammengefassten Zustandsindikator aller drei Blätter, welcher sich als Minimum der pro Blatt ermittelten Zustandsindikatorabweichungen ermittelt. Die aufgeführten Zustandsindikatoren der einzelnen Blätter entsprechen dem Mittelwert der Abweichung eines gesamten Testblocks (60 Minuten) gegenüber dem referenzierten Anlagenzustand.

Test Nr.	Beurteilung	Eisindikatoren [%]				Zeit bis	
		Blatt1	Blatt2	Blatt3	min(B1,B2,B3)	Warnung	Alarm
01	Alarm	-2,23	-2,24	-2,28	-2,28	x	5 Min.
02	Alarm	-1,45	-1,46	-1,44	-1,46	x	5 Min.
04	Alarm	-0,72	-0,66	-0,89	-0,89	5 Min.	10 Min.
05	Alarm	-0,51	-0,52	-0,62	-0,62	5 Min.	20 Min.
07	Normal	-0,12	-0,13	-0,31	-0,31		
08	Normal	-0,09	-0,02	-0,05	-0,09		
11	Normal	-0,07	-0,26	-0,23	-0,26		
12	Alarm	-1,36	-1,47	-1,33	-1,47	x	5 Min.
13	Normal	-0,06	-0,29	-0,08	-0,29		
14	Alarm	-0,64	-0,77	-0,69	-0,77	5 Min.	10 Min.
15	Alarm	-1,03	-1,07	-1,26	-1,26	x	5 Min.
18	Normal	-0,21	-0,08	-0,03	-0,21		
19	Alarm	-1,14	-1,09	-1,02	-1,14	x	5 Min.
21	Normal	-0,06	-0,16	-0,16	-0,16		
22	Alarm	-1,48	-1,49	-1,67	-1,67	x	5 Min.
24	Alarm	-1,10	-1,08	-1,18	-1,18	x	5 Min.

Abbildung 3: Ergebnisse der Auswertung der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

Die zur Detektion benötigte Zeit pro Testblock entspricht der Zeit, nach der ein entsprechender Schwellwert zum ersten Mal überschritten wurde. Dabei wurde jeweils von einem aus der Anlagenreferenzierung bekannten, eisfreien Zustand ausgegangen, an den sich der jeweilige Testdatensatz anschließt.

Abbildung 4 bis Abbildung 6 zeigen exemplarisch die zeitlichen Verläufe der Zustandsindikatoren aus den Testblöcken Nr. 02, 04 und 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung der N117/300 Windenergieanlage.

Ein Indikator ergibt sich aus der Berechnung von 5 jeweils 60 Sekunden langen Zeitreihen (12 Indikatoren je Stunde). Die Identifikationszeiten bis zur ersten Warnung bzw. Alarmierung sind in den beiden letzten Spalten der Abbildung 3 aufgeführt. Ein x bei der Warnung bedeutet dabei, dass das Eiserkennungssystem bereits mit der Auswertung des ersten Zustandsindikators eine Überschreitung des Alarmschwellwerts festgestellt hat, sodass nach 5 Minuten Detektionszeit sofort ein Alarm ausgelöst wird.

Anhand der Rückmeldungen pro Testblock kann eine Bewertung der Funktion und der Eignung des IDD.BLADE Eiserkennungssystems auf Basis der in Kapitel 3.2 ermittelten Eisdicken und der in Kapitel 3.3 ermittelten Detektionszeiten bezüglich der zuverlässigen Eiserkennung bei Einsatz auf den betrachteten Windenergieanlagen vorgenommen werden.

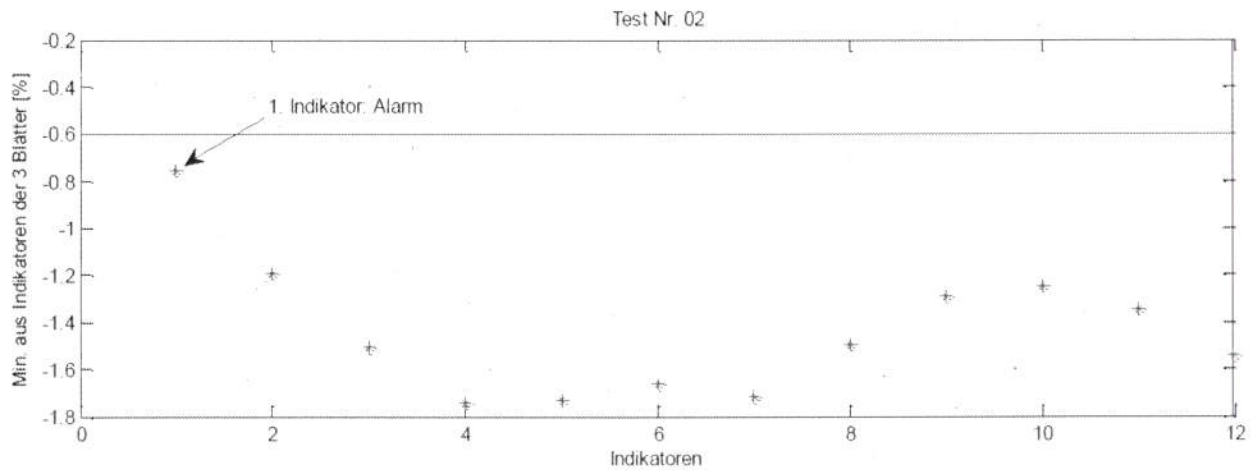


Abbildung 4: Auswertung des Testblocks 02 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

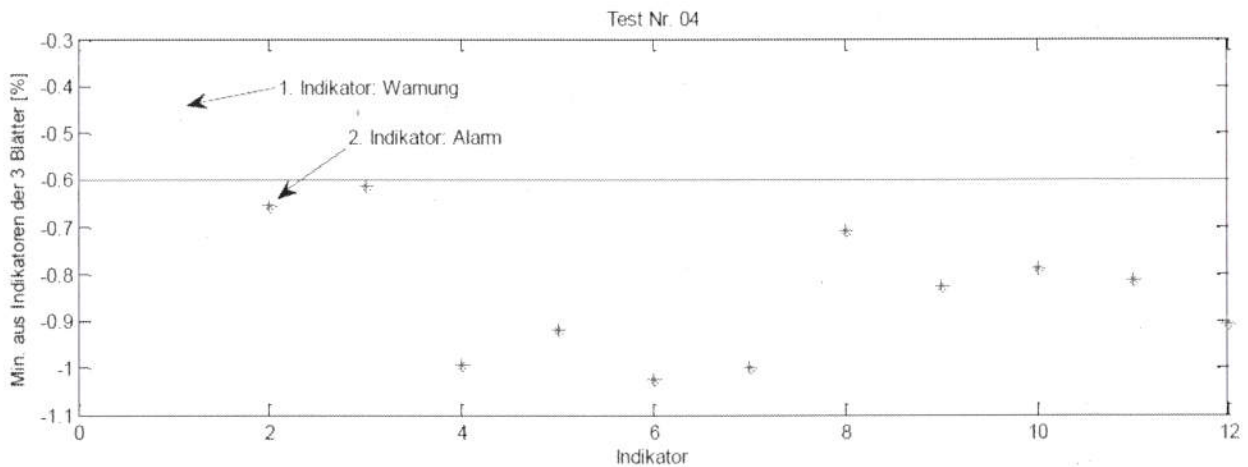


Abbildung 5: Auswertung des Testblocks 04 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

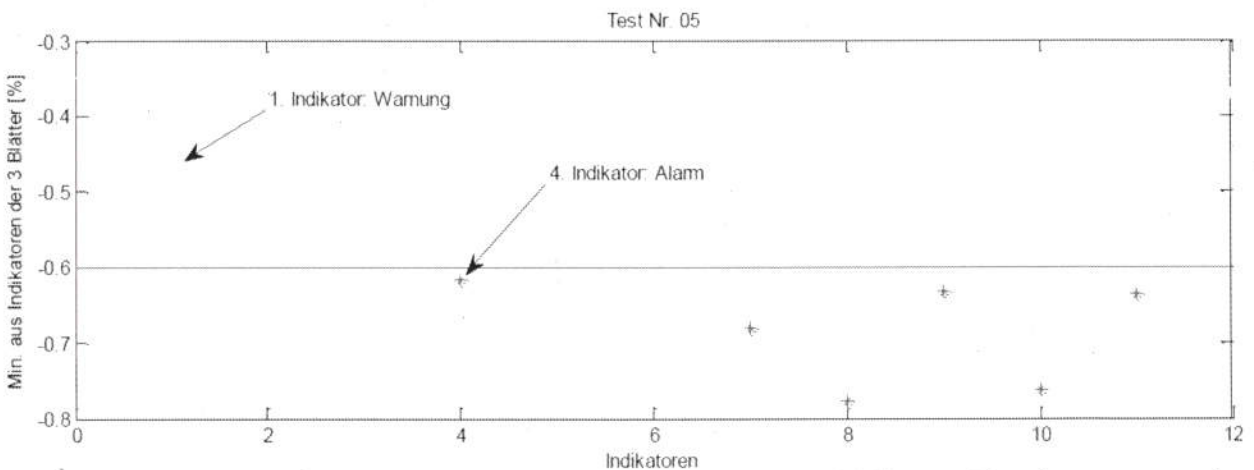


Abbildung 6: Auswertung des Testblocks 05 der ersten Testschleife zur Eiserkennung an der N117/3000

4.8 Bewertung der Testergebnisse

Im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Testprozedur wurde das IDD.Blade Eiserkennungssystem anhand von numerischen Simulationsmodellen, welche auf den zwei repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen N100/2500 gamma und N117/3000 delta basieren, referenziert. Anschließend wurden verschiedene, maßgeblich auf den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken basierende Vereisungsszenarien mittels Massenmanipulationen der Anlagenmodelle simuliert und vom IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet. Im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurden auf diese Weise 60 Testblöcke, welche Testszenarien als repräsentative Kombinationen von Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der betrachteten Windenergieanlagen darstellen, abgeprüft.

Die Auswertung der Testblöcke, unter denen auch eine repräsentative Anzahl von unvereisten Testblöcken vorhanden war, ergab, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem mit sehr guter Zuverlässigkeit alle Testblöcke, welche mit den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken versehen waren, detektiert hat. Dabei wurde bei keinem der Testblöcke mit unvereistem Anlagenzustand ein Fehlalarm und lediglich bei einem Testblock, entspricht ca. 5% aller unvereisten Testfälle, eine Fehlwarnung ausgegeben, womit zusätzlich eine hohe Anlagenverfügbarkeit bei eisfreiem Zustand indiziert wurde. Die Auswertung der Testblöcke mit schwächerer Vereisung als der jew. ermittelten kritischen Eisdicke zeigte, dass z.T. auch deutlich geringere Eisdicken, als die kritische Eisdicke gut detektiert werden können.

Im Rahmen der Begutachtung wurde innerhalb von höchstens 15 Minuten eine Eiswarnung bei 100% und ein Eisalarm bei 71% aller Testblöcke mit kritischer Vereisung gemeldet. Bei den übrigen 21% der Testblöcke mit kritischer Vereisung wurde der Eisalarm nach höchstens 20 Minuten gemeldet. Eine detaillierte Betrachtung der zeitlichen Verläufe der Einzelindikatoren der oben genannten 21% der Testfälle auf Basis von Grafiken entsprechend den in Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellten Beispielen hat darüber hinaus ergeben, dass sich zumeist schon nach 15 Minuten ein dem Alarmschwellwert sehr nahe liegender Zustandsindikator eingestellt hat.

Auf Grundlage der oben beschriebenen Auswertung liegt ein starker Indikator dafür vor, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem ohne Einschränkungen in der Lage ist, die in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Zeiten zuverlässig und reproduzierbar in der in Kapitel 4 beschriebenen Testumgebung an den repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu detektieren. Es wird zudem davon ausgegangen, dass bei fortschreitender Entwicklung der Genauigkeit der Datenerfassung und Auswertung des Eiserkennungssystems und ggf. weiterer Anpassung der Schwellwerte zukünftig auch deutlich geringere Eisdicken als die in dieser Begutachtung ermittelten kritischen Eisdicken bei gleichzeitig hoher Anlagenverfügbarkeit in unvereistem Zustand zuverlässig detektiert werden können. Zusätzlich gilt bei weiterer Entwicklung des Auswertalgorithmus und einer ggf. gleichzeitigen Verringerung der minimalen Ausgabezeit der aktualisierten Zustandsindikatoren eine weitere Reduzierung der oben genannten Überschreitungen der Eisalarmmeldezeiten in 21% der kritischen Testfälle als sehr wahrscheinlich. Aufgrund der guten Übereinstimmung der in Kapitel 3.3 ermittelten kritischen Detektionszeiten mit den im Rahmen der Begutachtung

festgestellten Detektionszeiten für Eiswarnung bei einer gleichzeitig geringen Fehlwarnungsquote von ca. 5% wird davon ausgegangen, dass die Zuverlässigkeit der Eisdetektion bezüglich der kritischen Detektionszeit schon heute durch Abschaltung der Anlagen bei Eiswarnung erhöht werden kann.

4.9 Übertragbarkeit der Testumgebung auf die Realität

Eine modellgestützte Testprozedur ist immer mit einer gewissen Abweichung gegenüber der Realität verbunden, wie sie annähernd bei einem Langzeitfeldtest bei ausreichend häufiger, repräsentativer, natürlicher Vereisung und wechselnden natürlichen Umgebungsbedingungen aufgenommen werden könnte. Da sich solche Feldtests in der Regel als nicht praktikabel darstellen, müssen gewisse Annahmen und Modelle, sowohl in realisierbaren Feldtests, mit beispielsweise künstlicher Eismodellierung, als auch in numerischen Simulationsumgebungen zugrunde gelegt werden.

Die in dieser Begutachtung zur Simulation der Windenergieanlagen verwendete Software gilt als Stand der Technik für die aus der Zertifizierung von Windenergieanlagen nach den Richtlinien /11/, /14/ und /15/ geforderten Lastrechnungen. Hierbei zeigt sich regelmäßig im Rahmen von Prototypenvermessungen und Modellvalidierungen die gute Übereinstimmung der Simulationssoftware zu den realen Bedingungen. Für die in dieser Begutachtung herangezogene Windenergieanlage N100/2500 gamma liegt ebenfalls eine gültige Prototypenvermessung vor, anhand derer eine Validierung des numerischen Simulationsmodells stattfinden konnte /36/.

Die in Kapitel 4.3 beschriebene numerische Testumgebung ermöglicht es, den Test des Eiserkennungssystems durch die dazugehörige Modellierung, anders als bei experimentellen Tests in Rotorblattprüfständen, unter Einbeziehung der Gesamtanlagendynamik und realistischer externer Bedingungen und mit einer hohen Modellierungsfreiheit von Vereisungsszenarien durchzuführen. Hierbei werden das Eiserkennungssystem beeinflussende Faktoren und Effekte wie die Versteifung der Rotorblätter durch den Fliehkrafteffekt, oder die blattwinkelabhängige Kopplung der Blatteigen- und Triebstrangfrequenz direkt berücksichtigt und einbezogen.

Die oben genannten Gesichtspunkte begründen die Annahme, dass die hier gewählte numerische Testumgebung grundsätzlich für die Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems geeignet ist.

Im Folgenden sollen die das Eiserkennungssystem beeinflussenden Abweichungen der Testumgebung gegenüber der Realität betrachtet werden.

Bauteilsteifigkeitsbeeinflussende Effekte:

Der Elastizitätsmodul, welcher eine wichtige Materialkenngröße für die Steifigkeit eines Bauteils darstellt, wurde in dieser Begutachtung als konstant vorausgesetzt. Eine Vergrößerung des Elastizitätsmoduls würde zu einer höheren Bauteileigenfrequenz führen und umgekehrt. Aus diesem Grund sind aus sicherheitstechnischer Betrachtung im Zuge der zuverlässigen Eiserkennung elastizitätsmodulvergrößernde Effekte als kritisch

einzuschätzen, da diese dem Effekt der Eigenfrequenzabnahme durch Eismassenzunahme entgegenlaufen.

Der Effekt der temperaturabhängigen Materialversteifung ist beispielsweise durch brüchig werdende Kunststoffe bei sehr niedrigen Temperaturen bzw. weich werdenden Kunststoffen bei sehr hohen Temperaturen bekannt. Von diesem Effekt sind auch Rotorblätter von Windenergieanlagen in gewissem Maße betroffen, was zu höheren Eigenfrequenzen bei niedrigen Temperaturen aufgrund der Materialversteifung führt. Im Zuge der vorliegenden Begutachtung wurde der Temperatureffekt anhand verschiedener, von Wölfel eingereichter Messdaten zur Veränderung der Rotorblattfrequenz über der Temperatur, sowohl aus Testprüfständen als auch aus Feldmessungen bewertet. Es wurde plausibel dargelegt, dass die im Eiserkennungsalgorithmus hinterlegte Methode geeignet ist, den Temperatureinfluss zu kompensieren.

Eine weitere mögliche Beeinflussung des Elastizitätsmoduls durch Belastungen und Verformungen des Rotorblattes im Betrieb wird, wenn überhaupt, sowohl während der Anlagenreferenzierung als auch im Eiserkennungsbetrieb auftreten, und somit ist diese Beeinflussung durch die Anlagenreferenzierung abgedeckt.

Eine zeitabhängige Veränderung des Elastizitätsmoduls kann beispielsweise durch betriebsbedingte Materialdegradation aufgrund kleiner Strukturschäden als auch altersbedingter Materialversprödung aufgrund von Umwelteinflüssen verursacht werden. Diese gegenläufigen Effekte, deren Einfluss als gering eingeschätzt wird, werden sich der Erfahrung nach jedoch zu einer Eigenfrequenzverringerung aufsummieren, womit keine Verschlechterung der Eisdetektionsfunktion zu erwarten ist.

Veränderung der Anlagenaerodynamik aufgrund von Eisansatz:

Bei Eisansatz wird sich in der Regel auch ein gravierender Einfluss der Vereisung der Rotorblätter auf die aerodynamischen Eigenschaften der Windenergieanlage bemerkbar machen. Dieser Effekt, welcher unter anderem zu einer Verschiebung des Zusammenhangs zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und produzierter Leistung an der Windenergieanlage führt, wurde bei dieser Begutachtung nicht modelliert. Die beiden Größen Windgeschwindigkeit und Leistung gehen zwar als Eingangsgrößen in das IDD.Blade Eiserkennungssystem ein, werden dort jedoch individuell weiterverarbeitet und nicht in Beziehung zueinander gesetzt, sodass von der Modellierung der eisbedingten Anlagenaerodynamik abgesehen wurde.

Angenommene Eisanwuchsgeometrien:

Durch die in Kapitel 4.5 beschriebenen Kombinationen von möglichen Vereisungsszenarien wird von einer guten Abdeckung der in der Realität auftretenden Anlagenvereisung ausgegangen. Dennoch kann ein Restrisiko, welches von einer deutlich davon abweichenden und somit nicht von der angewendeten Kombination abgedeckten Anlagenvereisung ausgeht, nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Kontinuierlich anwachsende Eisdicke:

Die zu Testzwecken modellierten Vereisungsszenarien wachsen im Gegensatz zur Realität nicht langsam, von null Millimeter beginnend, auf eine kritische Eisdicke an, son-

dern sind in den entsprechend simulierten Testdaten direkt vorhanden. Bei der Auswertung der Testdaten wurde, wie in Kapitel 4.7 beschrieben, jeweils von einem aus der Anlagenreferenzierung bekannten eisfreien Zustand ausgegangen, an den sich der jeweilige Testdatensatz anschließt. Dieser Umstand dürfte zu einer gegenüber der Realität leicht verfälschten Detektionszeit führen, dessen Einfluss auf das Testergebnis jedoch als gering eingeschätzt wird.

4.10 Übertragbarkeit der Testergebnisse der repräsentativ gewählten Windenergieanlagen auf die weiteren Windenergieanlagen

Im Rahmen der vorliegenden Begutachtung wurden die folgenden zwei der in Tabelle 1.1 verzeichneten abzudeckenden Anlagenkonfigurationen repräsentativ ausgewählt:

- N100/2500 gamma, Rotorblatt NR50
- N117/3000 delta, Rotorblatt NR58.5 -2

Anhand dieser ausgewählten Anlagen wurden die Eignung und die Funktionsfähigkeit des IDD.Blade Eiserkennungssystems bezüglich der eingestellten Schwellwerte und der zuverlässigen Eiserkennung getestet.

Alle in Tabelle 1.1 aufgeführten Windenergieanlagen basieren auf einem vergleichbaren Anlagenkonzept mit aktiver Windrichtungsnachführung, einem luvseitig angeordneten Dreiblatt-Rotor, aktiver Leistungsbegrenzung durch Blattwinkelverstellung aller drei Rotorblätter und Leistungsübertragung durch einen Triebstrang mit Getriebe.

Im Zuge der Ermittlung der in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Detektionszeiten wurden sehr vergleichbare und teilweise übereinstimmende kritische Werte für die verschiedenen in Tabelle 1.1 aufgeführten Windenergieanlagen festgestellt.

Die für das Eiserkennungssystem grundlegenden physikalischen Größen sind, entsprechend der Beschreibung in Kapitel 1.3, die Rotorblattsteifigkeit und die Rotorblattmasse, aus der sich die Eigenfrequenzen ableiten. Die zur Begutachtung repräsentativ ausgewählten Anlagenkonfigurationen N100/2500 gamma mit dem NR50 Rotorblatt und N117/3000 delta mit dem NR58.5 -2 Rotorblatt setzen zwei sehr unterschiedliche Rotorblatttypen ein, was deutlich wird, wenn man die geometrische Ausdehnung auf die zugehörige Rotorblattmasse bezieht. Das NR58.5 -2 Rotorblatt ist mit 10551 Kg Rotorblattmasse (siehe Tabelle 4.2) bei ca. 57,3 Metern Rotorblattlänge etwa 150 Kg leichter, als das etwa 48.7 Meter lange Rotorblatt NR50 mit seinen 10700 Kg Rotorblattmasse (siehe Tabelle 4.1). Aufgrund dieser gravierenden Unterschiede im Blattaufbau kann davon ausgegangen werden, dass durch die Begutachtung dieser beiden Anlagenkonfigurationen die in Tabelle 1.1 aufgeführten Bandbreite an Anlagenkonfigurationen abgedeckt wird.

Aufgrund der oben genannten Beziehungen der repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu den restlichen in Tabelle 1.1 verzeichneten Anlagen werden die während der Begutachtung gewonnenen Erkenntnisse, welche zur Bewertung des IDD.Blade Eiserkennungssystems herangezogen werden, als gleichermaßen gültig für alle in Tabelle 1.1 verzeichneten Windenergieanlagenkonfigurationen angesehen.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse auch auf Nabenhöhen oberhalb der in Tabelle 1.1 genannten kleinsten Nabenhöhe für den jeweiligen Anlagentyp übertragbar sind (s. 3.2)

5 Sicherheitstechnik

5.1 Qualitative Bewertung

Für das von NORDEX verwendete IDD.Blade System liegt eine Produktzertifizierung nach *GL Rules and Guidelines -IV Part 4, Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Ed. 2013 vor 13/*. Das System wurde darin im Hinblick auf die Eignung für den Einsatz als Condition Monitoring System in WEA bewertet. Im Einzelnen wurden das System-Design, ein Prototypen-Test sowie das Qualitätssystem des Herstellers Wölfel bewertet. Es wurden keine Abweichungen zu den Anforderungen der zugrunde gelegten Richtlinie festgestellt. Allerdings beinhaltet die zugrundegelegte Richtlinie /11/ nicht die spezifischen Belange von Eiserkennungssystemen.

Um die Frage nach der zuverlässigen Abschaltung der WEA nach Erkennung von Eisansatz ganzheitlich zu beurteilen, sind weitere Prüfungen erforderlich. Es wird daher im Folgenden

- die technische Einbindung des IDD.Blade Systems in das Betriebsführungssystem der Nordex-WEA in Bezug auf die sichere Abschaltung bei Eiserkennung,
- die praktische Installation und Parametrierung,
- die Testmöglichkeiten bei Inbetriebnahme bzw. wiederkehrenden Prüfungen, sowie
- die technischen und organisatorischen Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung des (wieder-) Anfahrens bei Vereisung

untersucht und bewertet.

Weiterhin muss beachtet werden dass es Betriebszustände gibt, bei denen die Eiserkennung nicht möglich ist. Dies ist der Fall bei

- Windgeschwindigkeiten $< 2-3$ m/s, da die Anregungsenergie der Rotorblätter nicht erreicht wird, dies ist erst bei Windgeschwindigkeiten $> 2-3$ m/s der Fall.
- Drehzahl- und Pitchwinkelveränderungen außerhalb des normalen Betriebsbereiches (z. B. während des Start- oder Stoppvorganges der WEA);
- Arbeiten an der WEA (insbesondere bei aktiver Triebstrangbremse und / oder eingelegtem Rotor-Lock);
- ggf. begrenzten Betriebsdrehzahlbereichen, bei denen die Rotorblattschwingungen von Schwingungen der gesamten WEA überlagert werden, so dass eine Auswertung nicht möglich ist. Abhängig vom WEA-Typ und dessen individuellem dynamischen Verhalten können diese unterschiedlich liegen.

Kann dadurch kein aktueller Indikator gebildet werden, so wird ein Systemfehler an die Betriebsführung (NC2 Control) ausgegeben, was je nach Parametereinstellung nach einer einstellbaren Verzögerung ebenfalls zu einem WEA-Stopp führt /2/. Der dafür vorgesehene Zeitraum liegt, in Anlehnung an die kritische Detektionszeit (siehe Kap. 3.3), bei 15 Minuten.

5.2 Einbindung in das Nordex Betriebsführungssystem

Das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem der Nordex K08 gamma und delta Plattformen wurde im Rahmen der Anlagen-Zertifizierungen nach IEC 61400-1 Ed. 3 vom TÜV NORD geprüft. Das Betriebsführungssystem umfasst die Sensoren, die Softwarelogik und die Aktoren, bspw. Pitchmotoren. Es wurde hinsichtlich seiner Fähigkeit geprüft, die WEA im normalen Betriebsbereich zu steuern, zu regeln und zu überwachen. Sofern sicherheitsrelevante Grenzwerte überschritten werden oder das Betriebsführungssystem ausfällt oder der Not-Halt betätigt wird, wird das unabhängige und übergeordnete Sicherheitssystem aktiviert und die WEA automatisch abgeschaltet.

In Bezug auf das Sicherheitskonzept besteht in der IEC 61400-1 Richtlinie die grundsätzliche Anforderung der Einzelfehlersicherheit, d.h. ein beliebiger Einzelfehler einer Komponente darf nicht zum Versagen der Sicherheitsfunktion führen. Für das hier zu bewertende optionale IDD.Blade System wird analog dazu derselbe Bewertungsmaßstab zugrunde gelegt.

In Abbildung 7 ist die Einbindung des IDD.Blade Systems in die Nordex WEA dargestellt. Es wird je Rotorblatt ein Sensor installiert. Die Signale der Sensoren werden per Kabel in die Rotornabe und dort von der *Data Acquisition Unit* (DAU) via Ethernet zur *Data Processing Unit* (DPU) in das Maschinenhaus übertragen. In der DPU findet die Analyse der Schwingungsmessdaten der Rotorblätter in Verbindung mit den Betriebs- und Umgebungsdaten, die von der NC2 Control bereitgestellt werden, statt. Aus den Analyseergebnissen wird beim Überschreiten zweier unterschiedlicher Schwellen eine Eis-Warnung oder ein Eis-Alarm gebildet. Diese werden zusammen mit Systemstatusmeldungen an die NC2 Control übergeben. In der DPU steht ein Web-Server zur Konfiguration und Systemdiagnose zur Verfügung /2/.

Die Sensorsignale werden ständig auf Plausibilität überprüft, so dass fehlerhafte Messwerte nicht in die Analyse eingehen. Bei Ausfall einzelner Messkanäle oder eines gesamten Sensors kann bei der Eiserkennung jedoch von den zwei Rotorblättern mit den verbleibenden Sensoren auf das dritte geschlossen werden, so dass die Funktion des Systems weiter besteht. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann.

Die DAU und die DPU verfügen über Selbstüberwachungsfunktionen. Der aktuelle Systemzustand wird fortlaufend protokolliert. Sie sind selbststartfähig, so dass sie z. B. auch nach einem Stromausfall automatisch neu starten. Außerdem meldet das System permanent aktiv seinen Status an die WEA-Steuerung, die so einen Ausfall sofort erkennt /2/. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann.

Die Übergabe von Betriebs- und Umgebungsdaten (EOC) erfolgt über eine bereitgestellte Modbus-TCP-Schnittstelle (ab NC2 Rev. 22). Über dieselbe Modbus-TCP-Schnittstelle werden u. a. folgende Warnungen und Alarmmeldungen des IDD.Blade an die WEA NC2 Control übergeben:

- System Fehler (kein Eisindikator verfügbar)

- Eisansatz Warnung
- Eisansatz Alarm

Bei Eisansatz Alarm und bei einem Systemfehler unterhalb der in Parameter P47.16 festgelegten Außentemperatur erfolgt eine Abbremsung mit dem Bremsprogramm BP1 („Sanftbremsung“).

Damit die Signale in der Betriebsführung richtig verarbeitet werden, müssen die dazugehörigen Parameter eingestellt sein (s. hierzu Kap. 5.3).

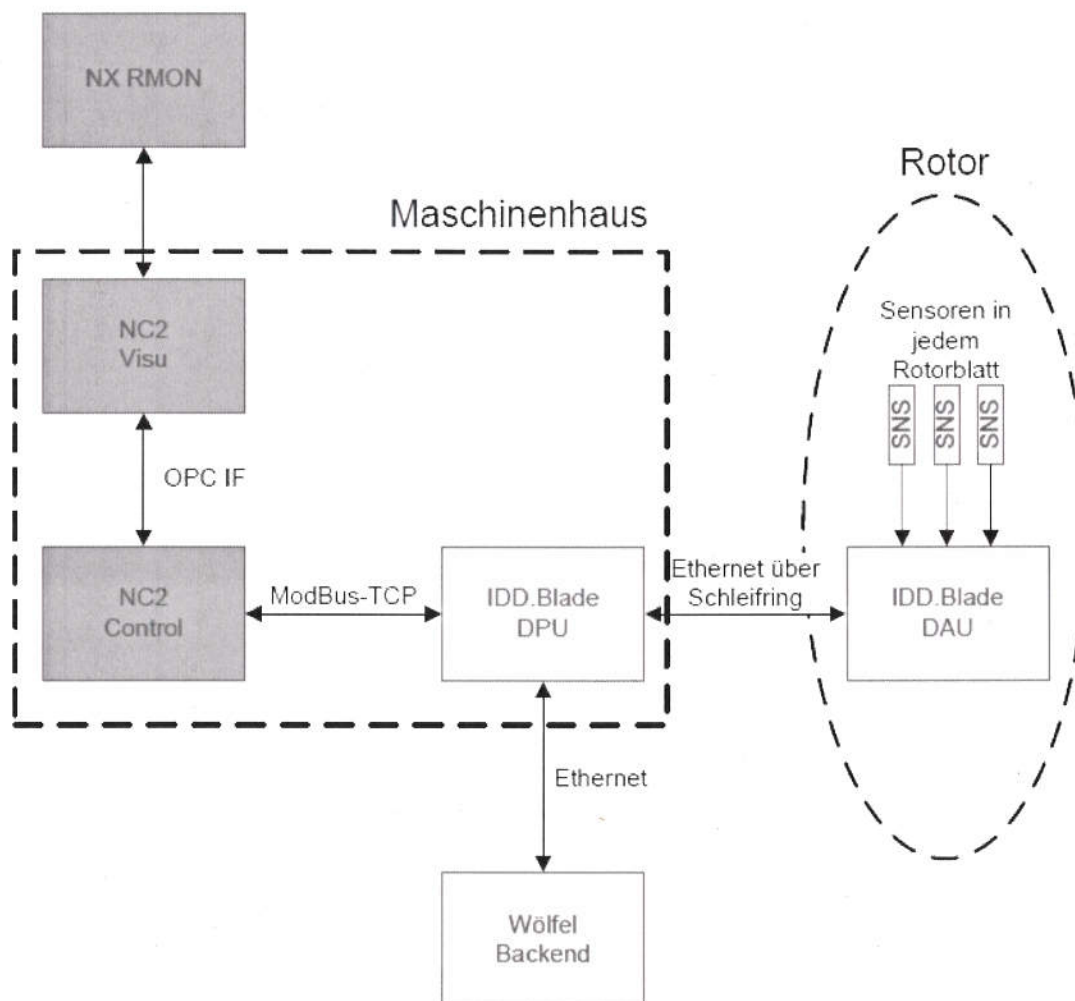


Abbildung 7: Einbindung des Eisdetektionssystems in NORDEX WEA

5.3 Einbauverfahren und Parametrierung

Für das Verfahren müssen die sogenannten Structural Noise Sensoren (SNS) in den Rotorblättern installiert werden. Sie Sensoren sind bei etwa 1/3 der Länge des jeweiligen Rotorblattes montiert. Dies entspricht bei den betrachteten WEA der Typen N100 und N117 ca. 18m vom Nabenmittelpunkt ausgehend.

Die Sensoren werden auf einer Montageplatte befestigt, die mit geeignetem Klebstoff von innen zwischen dem Hauptsteg und dem Fahnensteg auf der Rotorblatthülle angebracht sind (siehe Abbildung 8).

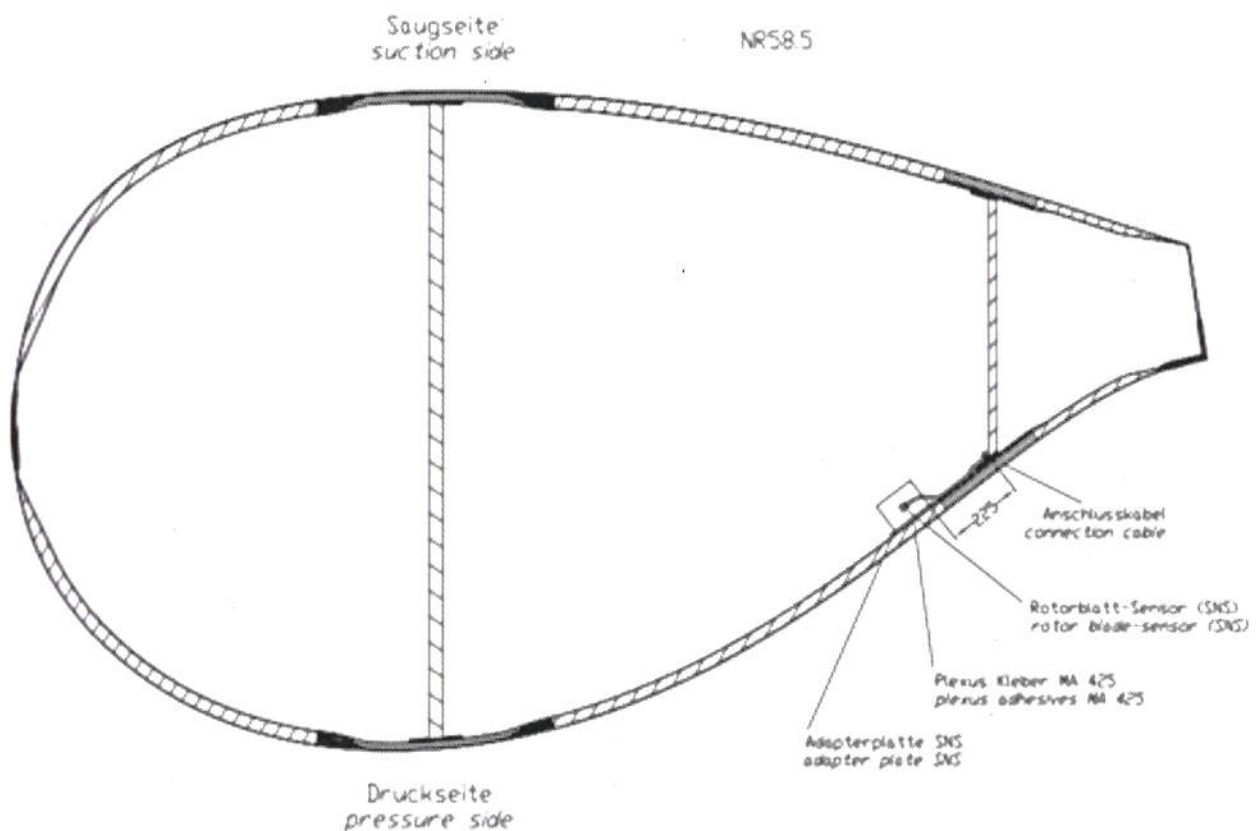


Abbildung 8: Schema zur Position des SNS im Rotorblatt

Die Sensorkabel werden in einem Leerrohr von den Sensoren zur Blattwurzel verlegt und durch die Bodenplatte geführt. Die Connection Box ist auf der Außenseite der Bodenplatte neben der Wartungsöffnung angeklebt. Dort werden die Sensorkabel eingeführt und angeschlossen.

Die Montage der SNS und der Connection Box erfolgt zweckmäßig während der Rotorblattfertigung im Werk, alternativ bei Produktnachrüstungen direkt auf der WEA.

Die Montage erfolgt gemäß der Montage- und Wartungsanleitung /4/. Im Anschluss an die Montage werden von den verantwortlichen Mitarbeitern die Montageprotokolle /5/, /6/ und /7/ ausgefüllt und unterzeichnet.

Die Sensoren und Kabel sind anhand von Blitzschutzzonen so angeordnet, dass sie keine Auswirkungen auf das vorhandene Blitzschutzsystem haben. Aufgrund ihrer Positionen kann ein direkter Blitzeinschlag in das IDD.Blade ausgeschlossen werden. Die Systemkomponenten sind mit Überspannungsschutzmodulen ausgerüstet. Eine strukturelle Gefährdung der Rotorblätter oder WEA insgesamt durch Einwirkung auf Komponenten des IDD.Blade durch einen Blitzschlag in benachbarte Bauteile der WEA wird nicht angenommen.

Die Masse der im Rotorblatt eingebauten Komponenten ist mit je SNS von ca. 1,5 kg im Vergleich zur Gesamtmasse des Rotorblattes sowie deren Fertigungsstreuung vernachlässigbar klein. Sie haben somit keinen Einfluss auf die mechanischen Lasten der WEA.

Die folgenden Parameter sind im Rahmen des Eiserkennungssystems einstellbar:

Tabelle 5.1: Parameter der Eiserkennung

Parameter	Beschreibung	Einheit	Default	Min	Max
P35.18	Modb Kommunikation	-	0	0	1
P03.18	CMS ICE Version	-	00000	00000	11111
	0000x => Eis Alarm/Warnung => 0 = deaktiviert / 1 = aktiviert 000x0 => Eis Alarm => 0 = ohne BP / 1 = mit BP 00x00 => Eis Alarm => 0 = ohne AutoReset / 1 = mit AutoReset 0x000 => Eis Alarm => 0 = ohne FernReset / 1 = mit FernReset x0000 => Eis Alarm => 0 = ohne VorortReset / 1 = mit VorortReset				
P03.19	CMS Intervallzeit	S	900	0	86400
P34.15	CMS Timeout	S	5	0	600
P47.16	Met Eisalarm Freig. Außentemp.	°C	5	-50	50

Der Parameter P35.18 aktiviert den Signalaustausch via Modbus, somit muss dieser Parameter bei allen Anlagen mit Eiserkennungssystem aktiviert werden. P03.18 ist der definierende Parameter des Eiserkennungssystems und besteht aus fünf einstellbaren Positionen. Die letzte bzw. fünfte Position schaltet die Eiserkennung aktiv bzw. deaktiviert sie. Diese Position sollte bei allen Anlagen mit Eiserkennung aktiviert sein. Die vierte Position bestimmt, ob bei Eisalarm eine Bremsung erfolgt. Diese Option sollte bei allen WEA, die ein Eiserkennungssystem benötigen, aktiviert werden.

Die vorderen drei Positionen bestimmen wie die Anlage nach einem Eisalarm wieder in Betrieb genommen werden darf.

Wie in 5.1 beschrieben gibt es Betriebszustände, in denen der Vereisungszustand nicht erfasst werden kann. P03.19 legt fest, nach welchem Zeitraum in einem solchen Zustand ein Fehler gemeldet und die Anlage gestoppt wird. Nach dem Stopp kann im Trudelbetrieb, bei ausreichend hoher Windgeschwindigkeit, der Vereisungszustand festgestellt werden. In Absprache mit dem TÜV NORD wird dieser Parameter von NORDEX auf den Defaultwert von 900 Sekunden gesetzt, in Anlehnung an die kritische Vereisungszeit.

Das Eiserkennungssystem prüft sich regelmäßig selbst auf Fehler. Anhand des Parameters P34.15 kann die Häufigkeit, mit der dies geschieht, eingestellt werden. P47.16 definiert die Außentemperatur, ab der ein Eisalarm möglich ist. Bei Temperaturen oberhalb der Parametereinstellung wird eine Veränderung in der Blattfrequenz nicht als Eisansatz erkannt und somit kein Alarm ausgegeben. Somit kann das Herabsetzen der im Parameter festgelegten Temperatur dazu führen, dass der Vereisungszustand nicht mehr erkannt wird.

Sämtliche Parameter dürfen nur von Personen mit den entsprechenden Zugangsrechten parametrisiert werden. Dabei sind die Standortbedingungen und Behördenauflagen zu beachten. Die benötigten Zugangsrechte werden erst nach einer entsprechenden Schulung durch Nordex erteilt.

5.4 Inbetriebnahme und Wiederkehrende Prüfungen

Im Zuge der Inbetriebnahme wird das Eiserkennungssystem an die Windenergieanlage angepasst. Die Inbetriebnahme des Systems erfolgt gemäß der Inbetriebnahmeanleitung /8/, in der die erforderlichen Arbeitsschritte und Berechtigungen definiert sind. Im Anschluss der Inbetriebnahme wird ein Inbetriebnahmeprotokoll /9/ erstellt und unterschrieben.

Die Wartung wird gemäß der Montage- und Wartungsanleitung /4/ und den darin definierten Intervallen durchgeführt. Demnach werden folgende Wartungsarbeiten jährlich durchgeführt:

- Prüfung Funktionsfähigkeit und gegebenenfalls Austausch Überspannungsschutz in der DAU und DPU
- Prüfung der Haltbarkeit der Klebeverbindungen

Nach Abschluss der Wartungsarbeiten wird ein Funktionstest und gegebenenfalls eine Fehlersuche und Störungsbeseitigung durchgeführt. Mögliche Fehler, die während des Betriebs von IDD.Blade auftreten, sind in der Bedienungsanleitung näher beschrieben. Die durchgeführten Wartungsarbeiten sind im Wartungsprotokoll /10/ zu notieren. Das Protokoll ist im Anschluss von den verantwortlichen Mitarbeitern zu unterzeichnen.

Die Messdaten der drei Sensoren werden permanent untereinander abgeglichen und auf Plausibilität überprüft. Zur korrekten Funktion des Eiserkennungssystems werden lediglich zwei Sensoren benötigt, somit führt der Ausfall eines Sensors nicht zum Systemausfall. Im Fehlerfall erfolgt eine Fehlermeldung, so dass eine Diagnose und Reparatur eingeleitet werden kann. DAU und DPU melden fortlaufend ihre Aktivität an die

WEA-Steuerung, so dass ein Ausfall sofort erkannt wird. Die Funktion von DAU und DPU können auch über den Webserver auf ihre Konfiguration und Funktion getestet werden.

5.5 Vermeidung des Anfahrens bei Vereisung

Das Wiederanfahren der WEA nach Abschaltung aufgrund von Vereisung darf nur unter der Voraussetzung der Eisfreiheit geschehen. Von NORDEX sind hierzu drei verschiedene Verfahren vorgesehen:

- AutoReset; das automatische Wiederanfahren der Anlage nach Änderung Erkennung der Eisfreiheit aller drei Blätter im Trudelbetrieb.
- FernReset; durch eine autorisierte Person über das Netzwerk
- VorortReset; durch eine autorisierte Person vor Ort

Beim AutoReset obliegt es dem Eiserkennungssystem, Eisfreiheit zu erkennen und die WEA zum Start freizugeben. Wie in Kapitel 4.7 beschrieben wird bereits im Trudelbetrieb der Anlage, bei Windgeschwindigkeiten über 2-3 m/s, eine Vereisung vom Eiserkennungssystem sicher und innerhalb ausreichend kurzer Zeit erkannt (für die kritische Eisdicke stets kleiner der kritischen Detektionszeit siehe Kap. 3.3).

Im vollständigen Stillstand oder bei Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s kann vom Eiserkennungssystem kein Eis erkannt werden. Dieser Zustand wird vom System erkannt und gemeldet. Um den Start einer vereisten WEA nach vollständigem Stillstand zu verhindern, bleibt die WEA so lange im Trudelbetrieb, bis das System einen eisfreien Zustand erkannt und die Anlage freigegeben hat.

Im Trudelbetrieb bei Windgeschwindigkeiten < 3 m/s ist aufgrund der sehr geringen Rotationsenergie keine Gefährdung durch Eiswurf gegeben und bei Windgeschwindigkeiten ≥ 3 m/s (Startgeschwindigkeit) greift das Eiserkennungssystem zuverlässig ein und verhindert das Anfahren der WEA und somit eine Gefährdung durch Eiswurf.

Beim FernReset werden die vom Eiserkennungssystem ermittelten und per Netzwerk übertragenen Vereisungsdaten von qualifizierten Personen bewertet und anhand derer über ein Wiederanfahren der Anlage entschieden.

Im Hinblick auf die indizierte Zuverlässigkeit des Eiserkennungssystems ist das AutoReset Verfahren gegenüber dem FernReset und dem VorortReset vorzuziehen, da eine mögliche Fehlinterpretation der Verhältnisse durch Personen als Fehlerquelle ausgeschlossen wird.

FernReset und AutoReset sind standardmäßig ausgeschaltet und dürfen nur von einer Person mit den entsprechenden Zugangsrechten parametrisiert werden und nur dann, wenn eine entsprechende Vereinbarung mit dem Betreiber besteht. Dabei sind die Standortbedingungen und Behördenauflagen zu beachten. Die benötigten Zugangsrechte werden erst nach einer entsprechenden Schulung durch Nordex erteilt.

Zusammenfassend können alle drei Arten des Wiederanfahrens als hinreichend sicher bewertet werden.

6 Anforderungen

Aus der Bewertung sich ergebende Forderungen, unter denen das Gutachten gültig ist

1. Die vorliegende Begutachtung baut auf dem GL Zertifikat /3/ auf und setzt dessen Gültigkeit voraus. Die Anmerkungen und Bedingungen gelten, sofern zutreffend, auch für dieses Gutachten.
2. Dieses Gutachten gilt für die geprüfte Version des IDD.Blade. Wenn grundlegende Systemänderungen vorgenommen werden, ist das Fortbestehen der Gültigkeit des Gutachtens vom TÜV NORD oder einer vergleichbaren Sachverständigenstelle zu überprüfen.
3. Eine nachträgliche Beeinflussung des Eiserkennungssystems durch die in Kapitel 1.3 beschriebene kundenspezifische Einstellung der Schwellwerte darf lediglich hin zur sensibleren Eisdetektion gegenüber den im Test dieser Begutachtung angewendeten Maßstäben erfolgen.
4. Dieses Gutachten gilt abdeckend für die in Tabelle 1.1 aufgeführten Anlagen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse auch auf Nabenhöhen oberhalb der in Tabelle 1.1 genannten kleinsten Nabenhöhe für den jeweiligen Anlagentyp übertragbar sind. Wenn darüberhinausgehend weitere Anlagenkonfigurationen aufgenommen werden sollen muss eine Überprüfung auf Abdeckung der neuen Anlagenkonfigurationen von dem vorliegenden Gutachten vom TÜV NORD oder einer vergleichbaren Sachverständigenstelle vorgenommen werden.
5. Es muss sichergestellt werden, dass das Eiserkennungssystem ausreichend gut referenziert ist, bevor die Anlage unter 3°C Außentemperatur betrieben werden darf.
6. Inbetriebnahme und Wartung sind gemäß den Anleitungen auszuführen und zu protokollieren.
7. Die Positionen vier und fünf des Parameters P03.18 müssen auf 1 gesetzt werden.
8. Der Parameter P47.16 darf nicht unter 3°C eingestellt werden.
9. Der Parameter P03.19 darf nicht über 900 Sekunden eingestellt werden.

7 Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden kritische Eisdicken und dazu gehörige kritische Detektionszeiten für ausgewählte, repräsentative Anlagen der in Tabelle 1.1 aufgeführten Anlagen ermittelt.

Die grundsätzliche, anlagenunabhängige Eignung der vom IDD.Blade System verwendeten Sensorik und Auswerteeinheiten sowie die allgemeine Funktionsfähigkeit des Systemaufbaus bezüglich der zuverlässigen Detektion von globalen, strukturdynamischen Zustandsveränderungen wurde bereits im Rahmen einer früheren Begutachtung durch die Zertifizierungsstelle des Germanischen Lloyd entsprechend der Richtlinie /11/, unter anderem auf Basis eines experimentellen Nachweises im Rotorblatttestprüfstand /12/, geprüft und bestätigt, siehe /3/. Darüber hinausgehend wurde in der hier vorliegenden Begutachtung durch genauere, quantitative Untersuchungen überprüft, ob das Eiserkennungssystem hinsichtlich der Schwellwerte und Parameter korrekt auf die Anlagen eingestellt ist und die ermittelten kritischen Eisdicken innerhalb der ermittelten kritischen Detektionszeiten zuverlässig erkennen und melden kann.

Im Rahmen der in Kapitel 4 beschriebenen Testprozedur wurde das IDD.Blade Eiserkennungssystem anhand von numerischen Simulationsmodellen, welche auf den zwei repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen N100/2500 gamma und N117/3000 delta basieren, referenziert. Anschließend wurden verschiedene, maßgeblich auf den in Kapitel 3.2 ermittelten kritischen Eisdicken basierende Vereisungsszenarien mittels Massenmanipulation der Anlagenmodelle simuliert und vom IDD.Blade Eiserkennungssystem ausgewertet. Im Zuge der Begutachtung des IDD.Blade Eiserkennungssystems wurden auf diese Weise 60 Testblöcke abgeprüft, welche Testszenarien als repräsentative Kombinationen von Wind-, Vereisungs- und Betriebsbedingungen der betrachteten Windenergieanlagen darstellen.

Auf Grundlage dieser Auswertungen wurde stark indiziert, dass das IDD.Blade Eiserkennungssystem ohne Einschränkungen in der Lage ist, die in Kapitel 3.2 festgelegten kritischen Eisdicken in der im Kapitel 3.3 festgelegten kritischen Zeiten zuverlässig und reproduzierbar in der in Kapitel 4 beschriebenen Testumgebung an den repräsentativ ausgewählten Windenergieanlagen zu detektieren. Es wird zudem davon ausgegangen, dass bei fortschreitender Entwicklung der Genauigkeit der Datenerfassung und Auswertung des Eiserkennungssystems und ggf. weiterer Anpassung der Schwellwerte zukünftig auch deutlich geringere Eisdicken als die in dieser Begutachtung ermittelten kritischen Eisdicken bei gleichzeitig hoher Anlagenverfügbarkeit in unvereistem Zustand zuverlässig detektiert werden können. Aufgrund der in Kapitel 4.8 dargelegten Verhältnisse wird in der Verwendung der Eiswarnung als Abschaltkriterium der Windenergieanlagen das Potential gesehen, die Zuverlässigkeit der Eisdetektion bezüglich der kritischen Detektionszeit weiter zu erhöhen.

Das Eiserkennungssystem ist für die untersuchten Anlagen kompatibel mit den vorhandenen NORDEX Betriebsführungs- und Sicherheitssystemen und erfüllt das für diese Systeme maßgebliche Einzelfehlerkriterium. Die Parametrisierung der Anlage erfolgt im Rahmen der geregelten Inbetriebnahme und darf nur von autorisierten und dafür ausgebildeten Mitarbeitern vorgenommen werden.

Die möglichen Verfahren zur Vermeidung des Wiederauffahrens nach Vereisung werden als ausreichend sicher bewertet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die in Tabelle 1.1 aufgeführten NORDEX Windenergieanlagen in Verbindung mit dem Eiserkennungssystem IDD.Blade der Firma Wölfel hinsichtlich der Eiserkennung dem Stand der Technik entsprechen und alle Ergebnisse dafür sprechen, dass unter den genannten Bedingungen eine Eisdicke erkannt wird, die geringer ist als die individuelle kritische Eisdicke.

Erstellt

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "L. Klüppel".

Dipl.-Ing. L. Klüppel

Geprüft

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "O. Raupach".

Dipl.-Ing. O. Raupach

An der Erstellung beteiligte Sachverständige

Dipl.-Ing. M. Bülk

B.Sc. F. Lautenschlager

8 Dokumente und Literaturverzeichnis

8.1 Bewertete Dokumente

- /1/ NORDEX Energy GmbH
Technische Beschreibung Systembeschreibung Rotorblatt Eisdetektionssystem
Dok. Nr.: K0803_054354_DE, Rev. 01, Datum: 25.08.2014
- /2/ NORDEX Energy GmbH
Technische Beschreibung Integration Rotorblatt Condition Monitoring System
Dok. Nr.: K0803_052496_DE, Rev. 00, Datum: 15.08.2013

8.2 Dazugehörige Dokumente

- /3/ GL Germanischer Loyd
Type Certificate Ice Detection System IDD.Blade
Cert. Nr.: TC-GL-015A-2013, Datum 26.11.2013
- /4/ Wölfel
Montage- und Wartungsanleitung SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Anleitung_MontageWartung_Rev02,
Datum: 12.07.2013
- /5/ Wölfel
Montageprotokoll DPU SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Protokoll_Montage_DPU_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /6/ Wölfel
Montageprotokoll DAU SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Protokoll_Montage_DAU_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /7/ Wölfel
Montageprotokoll SNS SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Protokoll_Montage_SNS_Rev01, Datum: 02.09.2013
- /8/ Wölfel
Inbetriebnahmeanleitung SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Anleitung_Inbetriebnahme_Rev01, Datum: 12.09.2013
- /9/ Wölfel
Inbetriebnahmeprotokoll SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Protokoll_Inbetriebnahme_Rev01, Datum: 03.09.2013
- /10/ Wölfel
Wartungsprotokoll SHM.Blade
Dok. Name: SHMB_01_Protokoll_Wartung_Rev01, Datum: 02.09.2013

8.3 Literatur & Quellen

- /11/ GL Rules and Guidelines – IV Industrial Services – Part 4 – Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Edition 2013
- /12/ Wölfel, Testprotokoll Experimenteller Nachweis zur Erkennung von Massenveränderungen, Dok.-Name: shmb-01-expnach-protokoll-rev01, 21.10.2013 Rev. 03
- /13/ Nordex SE. Schreiben, Einsatz des Eiserkennungssystem IDD Blade der Firma Wölfel auf Nordex Windturbinen der Klasse K08 Gamma und Delta. Hamburg. 14.07.2014.
- /14/ IEC 61400-1. Wind turbines – Part 1: Design requirements. Third Edition. 2005.
- /15/ Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt: Richtlinie für Windkraftanlagen, Auswirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Fassung Oktober 2012
- /16/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.
- /17/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /18/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. 2012.
- /19/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2010.
- /20/ Seifert, H. Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. St. Pölten. 1999.
- /21/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /22/ Seifert, H. Technische Ausrüstung von Windenergieanlagen an extremen Standorten. St. Poelten. 2002.
- /23/ Seifert, H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate. Wilhelmshaven. 2003
- /24/ Makkonen, L. et. al. Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. Wind Engineering Volume 25, No. 1. 2001.
- /25/ Wallenius, T. et. al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. Winterwind. 2008.

- /26/ Lehtomäki, V. et. al. IcedBlades - Modelling of ice accretion on rotor blades in a coupled wind turbine tool. Winterwind. 2012.
- /27/ Hudecz, A. et. al. Experimental investigation of ice accretion on wind turbine blades. Winterwind. 2013.
- /28/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /29/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /30/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /31/ Green Book. Methods for the determination of possible damage – first edition. Voorburg 1989.
- /32/ Deutscher Wetterdienst. Online Wetterlexikon, Stand: September 2014. Offenbach. 2014.
- /33/ Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen (Hrsg.): DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg 2011
- /34/ Henry Seifert: Rotorblätter, eiskalt erwischt – Glacial Period for Rotor Blades, DEWI Magazin Nr. 8, Februar 1996
- /35/ Wölfel, Aktennotiz / Memorandum: IDD.Blade®: Nachweis der Funktionalität zur Eiserkennung anhand von numerisch simulierten Zeitverläufen durch den TÜV NORD; Ergebnisse für N117-3000; TEST01 vom 15.09.2014
- /36/ TÜV NORD, Type Test Conformity Statement, Registration-No. 44 220 10990180-T-IEC, Rev 1