

Hamburg, 26.04.2016

Gutachten

Bewertung „Maßnahmen bei Eisansatz“ bei Senvion Windenergieanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Funktionalität von Eiserkennungssystemen zur Verhinderung von Eisabwurf

TÜV NORD Bericht Nr.: 8112 657 628 – 2 D, Rev. 1

Gegenstand der Prüfung:

- Eiserkennung an Senvion Windenergieanlagen
- Neustart der WEA nach Vereisung

Anlagenhersteller: Senvion GmbH
Überseering 10
22297 Hamburg
Deutschland

Erstellt durch: TÜV-Nord Systec
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg
Germany

Dieser Prüfbericht umfasst 47 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen	Ersteller
0	13.11.2015	Erste Fassung	Frederik Lautenschlager, Lennart Klüppel
1	26.04.2016	Textanpassungen	Lennart Klüppel

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Ausgangssituation.....	6
1.2	Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb.....	7
1.3	Eiserkennung mit unbeheiztem Schalenkreuzanemometer	7
1.4	Gültigkeitsbereich	8
1.5	Beschreibung der Bewertungskette	9
1.5.1	Bewertungsmaßstäbe.....	9
1.5.2	Grenzen der Bewertung	9
1.5.3	Beschreibung der Vorgehensweise	9
2	Untersuchungen zur Eisdicke und zur Eiswurfweite	11
2.1	Bestimmung einer kritischen Eisdicke.....	11
2.1.1	Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf.....	11
2.1.2	Ermittlung eines kritischen Eisstückes.....	15
2.1.3	Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisstückes	18
2.2	Untersuchung der Eiswurfweiten im leistungserzeugenden Betrieb der WEA.....	19
2.2.1	Festlegung der Randbedingungen	19
2.2.2	Ermittlung der maximalen Eisabwurfweiten auf Basis der kritischen Eisdicke.....	21
2.3	Untersuchung des Anfahrvorgangs.....	23
2.3.1	Festlegung der Randbedingungen	23
2.3.2	Vergleich der Gefährdungsbereiche Eisabwurf zum Eisabfall beim Anfahrvorgang	24
3	Bewertung der Eiserkennungssysteme.....	26
3.1	Bewertung des Messprinzips beim Senvion Eiserkennungsverfahren	26
3.2	Bewertung der Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb	26
3.3	Bewertung des Anemometervergleichs.....	27
3.3.1	Messbericht zur Gutachtenerstellung	28
3.3.2	Einteilung der Vereisungskategorien	29

3.3.3	Beobachtungen und Bewertungen zum Messbericht	34
3.4	Grenzen der Bewertungskette	35
3.4.1	Geschlossenheit der Bewertungskette und Schnittstellen	35
3.4.2	Repräsentativität der Messungen	36
3.4.3	Unsicherheiten der Messung	36
3.4.4	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anlagen.....	36
3.5	Zusammenfassung der Bewertung der Eiserkennung	37
4	Bewertung der Bedingungen zum Wiederanfahren	38
4.1	Anfahren/ Wiederanfahren durch manuellen Reset	38
4.2	Automatisches Wiederanfahren nach Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen	38
4.3	Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten	39
5	Einbindung in das Betriebsführungssystem der WEA.....	40
5.1	Verwendete Technik	40
5.2	Bewertung der Einbindung in das Betriebsführungs- und	
	Sicherheitssystem	40
5.3	Automatisches Abschalten der WEA.....	41
6	Anforderungen	42
6.1	Anforderungen zur wiederkehrenden Prüfung	42
6.2	Parametrierung	42
6.3	Personalschulung	42
7	Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung	43
8	Dokumente und Literaturverzeichnis.....	45
8.1	Geprüfte Dokumente.....	45
8.2	Literatur.....	45

Tabellen

Tabelle 1.1:	Übersicht über die Senvion WEA-Varianten.....	8
Tabelle 2.1:	Gewähltes Eisstück.....	15
Tabelle 2.2:	Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel).	17

Tabelle 2.3: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisstücke. Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J.	17
Tabelle 2.4: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisstücke. Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s.	18
Tabelle 2.5: Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.....	19
Tabelle 2.6: Maximale Wurfweiten bei Eisabwurf im Betrieb (Windgeschwindigkeit Abschaltwindgeschwindigkeit).....	22
Tabelle 2.7: Wurfweiten bei Eisabwurf im Betrieb (Windgeschwindigkeit 20m/s).	22
Tabelle 2.8: Übermittelte maximale Drehzahlen des Anfahrvorganges bis zur Auslösung der Eiserkennung /6/.	24
Tabelle 2.9: Wahrscheinlichkeitszonen und Trefferhäufigkeitsbereiche.....	24
Tabelle 2.10: Ergebnisse Vergleich Eisabwurf/Eisabfall Anfahrvorgang. Drehzahl /6/.	25
Tabelle 5.1: Statuscodes Eiserkennung.....	41

Abbildungen

Abbildung 1: Abwurfwinkel Eisstück Würfel	14
Abbildung 2: Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisstück Würfel (3.2MM114, 93,0m Nabenhöhe)	16
Abbildung 3: Beispielhafte Grenzkurve Abweichung elektrische Leistung	27
Abbildung 4: Beispiel für die übermittelten Betriebsdaten	29
Abbildung 5: Keine Vereisung	30
Abbildung 6: Leichte Vereisung	31
Abbildung 7: Mittlere Vereisung	32
Abbildung 8: Schwere Vereisung	33
Abbildung 9: Darstellung der Betriebsdaten für das unerkannte Vereisungsereignis vom 11.04.2015	35

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

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

An den WEA 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 kann dann von den Rotorblättern der stehenden / trudelnden WEA abfallen (Eisabfall), bevor die WEA wieder in den Betrieb genommen wird. Eine mögliche Gefährdung durch Eisabfall muss standortspezifisch vom Betreiber nach dem Bewertungsverfahren von Servion (siehe /9/) für jede WEA durchgeführt werden.

Eiserkennungssysteme verfügen generell über eine 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, das Sensorsignal auszuwerten und daraus einen Indikator für Vereisung zu generieren. Üblicherweise gibt es einen Schwellenwert, bei dessen Überschreitung das Eiserkennungssystem ein Abschalten der Anlage initiiert. Oft ist dieser Schwellenwert 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 Eiserkennung 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 WEA und der vorliegenden Vereisung zu bewerten ist, wurden seitens der Genehmigungsbehörden, hier insbesondere durch die Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord und –Süd (Rheinland-Pfalz), die Anforderungen an die Bewertung von Eiserkennungssystemen erhöht. Es ist demnach durch genauere, teilweise quantitative Untersuchungen zu indizieren, dass das Eiserkennungssystem:

- a) dem aktuellen „Stand der Technik“ entspricht,
- b) hinsichtlich der Schwellenwerte und Parameter hinreichend sensibel und korrekt auf die Anlage eingestellt ist,
- c) sicherheitstechnisch zuverlässig funktioniert und die WEA, dort wo es gefordert ist, bei Vereisung automatisch abschaltet.

Eine Aussage hierzu 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.

1.2 Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb

Eines der von Senvion verwendeten Eiserkennungsverfahren ist eine Auswertung verschiedener Betriebsdaten.

Voraussetzung zur Aktivierung des Verfahrens ist eine Unterschreitung der direkt in Nabenhöhe an der WEA gemessenen Außentemperatur unter einen kritischen Schwellenwert von $+3^{\circ}\text{C}$.

Mit der Auswertung aktueller Betriebsdaten (Rotordrehzahl, Windgeschwindigkeit, und Blattverstellwinkel) und spezifischen Rotorkennwerten wird im Produktionsbetrieb für den gesamten Arbeitsbereich (Teil- und Vollast) eine theoretische Leistung ermittelt. Die von der Windenergieanlage erbrachte tatsächliche elektrische Leistung wird mit den gebildeten Referenzwerten des unvereisten Produktionsbetriebs bei gleicher Windgeschwindigkeit verglichen. Bei Abweichung der Leistungsabgabe gegenüber dem Referenzwert wird von einer Veränderung der aerodynamischen Beiwerte der Rotorblätter aufgrund von Vereisung ausgegangen. Die Anlage wird dann in Abhängigkeit der Risikoklasse (siehe /9/) automatisch abgeschaltet oder unter Gewährleistung des Anlagenschutzes (WEA stoppt erst bei einem kritischen Zustand für die WEA) weiterbetrieben. Vorhandene behördliche Anforderungen müssen beachtet werden.

Die Zuverlässigkeit des Eiserkennungsverfahrens ist somit von einer zuverlässigen Wind- und Temperaturmessung, auch unter Vereisungsbedingungen, abhängig.

Mit dieser Methode allein ist keine Eiserkennung bei stillstehendem oder trudelndem Rotor möglich. Im Produktionsbetrieb bei sehr niedrigen und unbeständigen Windgeschwindigkeiten nahe der Einschaltwindgeschwindigkeit kann die Zuverlässigkeit des Verfahrens sinken.

1.3 Eiserkennung mit unbeheiztem Schalenkreuzanemometer

Senvion verwendet als weiteres Eiserkennungsverfahren einen Anemometervergleich. Das Verfahren wird ebenfalls erst nach Unterschreitung des Schwellenwerts von $+3^{\circ}\text{C}$ aktiviert und beruht auf dem Vergleich zweier Anemometermesswerte.

Senvion WEA verfügen über zwei Anemometer, von denen eines ein unbeheiztes Schalenkreuzanemometer und das andere ein beheiztes Ultraschallanemometer ist. Die Messungen des Ultraschallanemometers werden im Gegensatz zum Schalenkreuzanemometer nicht durch Eisbildung beeinflusst.

Unter Vereisungsbedingungen lagert sich Raureif, Klareis, Nassschnee oder Eisregen auf den Schalen bzw. dem Schaft des Anemometers an. Dieser Eisansatz führt zu einer Verlangsamung der Rotation oder auch zum Stillstand des Schalenkreuzes. Durch Vergleich dieses Messwertes mit dem Messwert des Ultraschallanemometers und Berücksichtigung der Umgebungstemperatur, kann auf eine Vereisungssituation geschlossen werden. Die Umgebungstemperatur wird mit Hilfe eines Pt100-Sensors außerhalb der Gondel in Nabenhöhe gemessen.

Dieses Verfahren eignet sich auch dazu außerhalb des Produktionsbetriebs eine Vereisung der Anlage festzustellen. Da dieses Eiserkennungsverfahren jedoch lediglich eine Vereisungssituation, nicht jedoch direkt eine Vereisung der Rotorblätter sicher feststellen kann, eignet es sich nicht als alleiniges Eiserkennungssystem.

1.4 Gültigkeitsbereich

Dieses Gutachten betrifft alle Senvion-WEA, die in der Produktübersicht /1/ aufgeführt wurden. Zukünftige WEA-Varianten die sich innerhalb der Nabenhöhen der betrachteten Produktübersicht befinden, sind durch dieses Gutachten abgedeckt. Abweichende Nabenhöhen (größer / kleiner) sollten gesondert bewertet werden. Eine Übersicht der abgedeckten Nabenhöhen für die Senvion WEA-Varianten ist in Tabelle 1.1 zu finden.

WEA	Rotordurchmesser	Geringste Nabenhöhe	Größte Nabenhöhe
MM82	82m	59m	100m
MM92	92m	64m	100m
MM100	100m	75m	100m
3.0M122	122m	89m	139m
3.2M114	114m	93m	143m
3.4M104	104m	73m	100m
3.4M114	114m	76,5m	143m
6M126	126m	100m	117m

Tabelle 1.1: Übersicht über die Senvion WEA-Varianten

1.5 Beschreibung der Bewertungskette

1.5.1 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 liefert das von der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord veröffentlichte Merkblatt für Vorhaben zur Errichtung von Windenergieanlagen hinsichtlich immissionsschutzrechtlicher und arbeitsschutzrechtlicher Anforderungen an die Antragsunterlagen in Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG /35/.

1.5.2 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 WEA 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. Dafür nutzt Senvion das bereits vom TÜV NORD bewertete Risikoklassenkonzept (siehe /8/ und /9/).

1.5.3 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 WEA Aussagen zu treffen, ob und unter welchen Bedingungen eine Detektion einer Vereisung der Rotorblätter im Betrieb der WEA funktioniert. 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 unterteilt sich in die folgenden Schritte:

1. Bestimmung einer kritischen Eisdicke

(s. Kap. 2.1) Die Bestimmung der kritischen Eisdicke erfolgt für ausgewählte Anlagen des Senvion Produktspektrums, um eine Eisdicke festzulegen, die für alle Anlagen als kritisch einzustufen ist. Diese Eisdicke wird bei der Bewertung des Eisdetektionsverfahrens einbezogen.

2. Untersuchung der Eisabwurfweiten im leistungserzeugenden Betrieb der WEA

(s. Kap. 2.2) Im Rahmen der Untersuchung werden für kritische Eisstücke die möglichen Eisabwurfweiten ermittelt und mit der in der Musterliste der technischen Baubestimmungen angegebenen Formel zum Eisabwurf „1,5 * (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)“ verglichen /27/. Außerdem erfolgt ein Abgleich zu den von Senvion in /11/ spezifiziertem Radius zur Eisabwurffläche.

3. Untersuchung des Anfahrvorgangs der Windenergieanlage

(s. Kap. 2.3) Das Trudeln der Rotorblätter mit niedriger Drehzahl kann dazu führen, dass das Eiserkennungsanemometer eine falsche und zu niedrige Windgeschwindigkeit anzeigt. Die Ursache dafür ist ein langsam vorbeiziehendes Rotorblatt.

Damit in diesem Fall bei Temperaturen $< +3^{\circ}\text{C}$ keine Vereisung gemeldet wird, ist die Anemometereisererkennung erst ab einem definierten Schwellenwert der Getriebedrehzahl aktiv. Beim Anfahren der WEA, bei Außentemperaturen unterhalb von $+3^{\circ}\text{C}$, muss dieser Schwellenwert erst überschritten werden, damit die Anemometereisererkennung aktiv wird. Die Eiserkennung wird dahingehend untersucht, ob in diesen Fällen beim Anfahren der WEA bis zum Auslösen der Eiserkennung eine zusätzliche Gefährdung vorliegt.

4. Bewertung der Eiserkennung durch die von Senvion verwendeten Eiserkennungssystem

(s. Kap. 3) Die Bewertung basiert auf einem Messbericht und hat zum Ziel, Aussagen darüber zu treffen, ob das System funktionsfähig ist und ob die in der Anlage eingestellten Schwellenwerte und Parameter zur Erkennung der zuvor ermittelten kritischen Eisdicke führen.

5. Bewertung der Bedingungen zum Wiederanfahren

(s. Kap. 4) Die unterschiedlichen Szenarien und Bedingungen zum Wiederanfahren der Anlage nach Vereisung werden in diesem Kapitel bewertet.

6. Bewertung der Einbindung in das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem der Anlage

(s. Kap.5.2) Da das Eiserkennungssystem in die Steuerung der Anlage integriert ist und keine zusätzlichen Sensoren zur Messung von Windgeschwindigkeit, Leistung und Pitchwinkel verwendet werden, kann die sicherheitstechnische Bewertung auf den vorhandenen Typenzertifikaten der Senvion WEA aufbauen, da hier bereits eine Bewertung der Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems enthalten ist.

7. Anforderungen

(s. Kap. 6) Die Anforderungen bzgl. Parametrierung, wiederkehrende Prüfung und Personal werden aufgeführt.

2 Untersuchungen zur Eisdicke und zur Eiswurfweite

2.1 Bestimmung einer 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 Eisstücks. Ein kritisches Eisstück ist definiert als ein Eisstück, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisstück 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.

2.1.1 Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf

Verwendetes Rechenmodell:

Die Flugbahn von Eisstücken lässt sich durch Überlagerung zweier Kräfte (Schwerkraft und dem Winddruck) sowie der bei Ablösung vorhandenen Startbewegung modellieren. Die Erfahrung zeigt, dass die herabfallenden Eisstücke 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 /17/). Zur Modellierung des Winddrucks werden jedem Eisstück ein konstanter Widerstandsbeiwert $C_w /30/$ und eine konstante Projektionsfläche A zugeordnet.

Der zeitabhängige Verlauf des Eisabwurfs lässt sich mit einem dreidimensionalen Modell beschreiben (in Anlehnung an /13/):

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

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

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

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 Eisstücks s [m^2],

C_w = Luftwiderstandsbeiwert des Eisstücks und

m = Masse des Eisstücks [kg].

Anlagenbezogene Randbedingungen:

WEA-Typ:

Aus dem Anlagenportfolio /1/ wurden drei WEA-Typen ausgewählt, die als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können. Hierbei wurden eine kleiner, mittlere und großer Anlagentyp sowie der im Rahmen der Datenerhebung durch Senvion gewählte Anlagentyp /3/ berücksichtigt. Für die folgenden Betrachtungen wurde jeweils die kleinste Nabenhöhe ausgewählt, da diese nach unseren Untersuchungen für die Ermittlung der kritischen Eisdicke des Eisabwurfs konservativ ist.

- MM82 mit 59,0m und 100,0m Nabenhöhe, 82,0m Rotordurchmesser /1/
- 3.4M104 mit 73,0m und 100,0m Nabenhöhe, 104,0m Rotordurchmesser /1/
- 3.2M114 mit 93,0m und 143,0m Nabenhöhe, 114,0m Rotordurchmesser /1/
- 6M126 mit 100,0m und 117,0m Nabenhöhe, 126,0m Rotordurchmesser /1/

Drehzahl bei Eisabwurf:

Für die Drehzahl wird jeweils die windgeschwindigkeitsabhängige Anlagendrehzahl berücksichtigt /1/.

Physikalische Randbedingungen:

Luftdichte: Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /17/ 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 unsere Untersuchungen /15/) zu einer höheren Aufprallgeschwindigkeit führt.

Windgeschwindigkeit: Zur Festlegung der Windgeschwindigkeit wird in einem ersten Schritt die jeweilige anlagenbezogene Abschaltwindgeschwindigkeit auf Nabenhöhe zugrunde gelegt /1/:

- MM82 mit 25m/s
- 3.4M104 mit 25m/s
- 3.2M114 mit 22m/s
- 6M126 mit 25m/s

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 /12/ 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 Eisstück). Die hierfür gewählten Randbedingungen sind im Folgenden dargestellt („Schritt eins“). Im zweiten Schritt wurden unter anderem die Anzahl und die Objektgeometrie der zugrundegelegten Eisobjekte variiert.

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

Gewicht und Geometrie der Eisstücke: In Feldstudien /14/ hat sich gezeigt, dass das Gewicht der Eisstücke für die Fallweite von geringer Relevanz ist. Die Flugeigenschaften werden im Wesentlichen von der Geometrie und dem c_w -Wert beeinflusst. Die Gewichte der Eisstücke normieren wir unter Zugrundelegung der Kenntnisse aus /14/ (geringe Relevanz, siehe vorherigen Absatz) auf 1,0kg (zur normierten Ermittlung der Flugbahn). Die Normierung ist nach eigenen Untersuchungen bzgl. der Ermitt-

lung der Eisdicke (Eisabwurf) über die Aufprallenergie konservativ.

Auf Basis eigener Untersuchungen (siehe z.B. /26/, /27/) wird als zu betrachtendes Eisstück im ersten Schritt ein Würfel angesetzt (siehe Tabelle 2.1). Der Würfel ist gegenüber länglichen Eisstücken hinsichtlich der Aufprallgeschwindigkeit und der resultierenden Aufprallenergie als konservativ zu betrachten.

Lageparameter des Eisstückes :

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

Lageparameter des Rotorblattes (Abwurfwinkel):

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

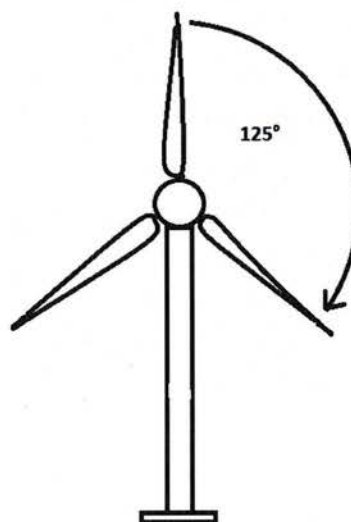


Abbildung 1: Abwurfwinkel Eisstück Würfel.

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

Tabelle 2.1: Gewähltes Eisstück.

Randbedingungen zur Schadensbewertung:

Dichte des Eises: Die Dichte des Eises wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /17/ zu 700kg/m³ festgelegt.

Kritische Aufprallenergie: Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke wird die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) gemäß /28/ 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 Eisstücks [kg] und
v: Aufprallgeschwindigkeit [m/s].

Die Masse wird hierbei vereinfacht punktförmig angenommen.

2.1.2 Ermittlung eines kritischen Eisstückes

Ein kritisches Eisstück ist definiert als ein Eisstück, welches aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für eine ungeschützte Person am Boden darstellt. Dem kritischen Eisstück 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 Eisstücks) unter Berücksichtigung der festgelegten Eisdichte und der ermittelten kritischen Eismasse.

In Abbildung 2 ist die Flugbahn eines Eisstücks unter Berücksichtigung der festgelegten Randbedingungen dargestellt. Die Randbedingungen (siehe Kapitel 2.1.1) wurden so gewählt, dass eine maximale Aufprallgeschwindigkeit vorliegt (Geometrie Würfel, Abwurfwinkel, geringer Abstand Abwurfpunkt Boden).

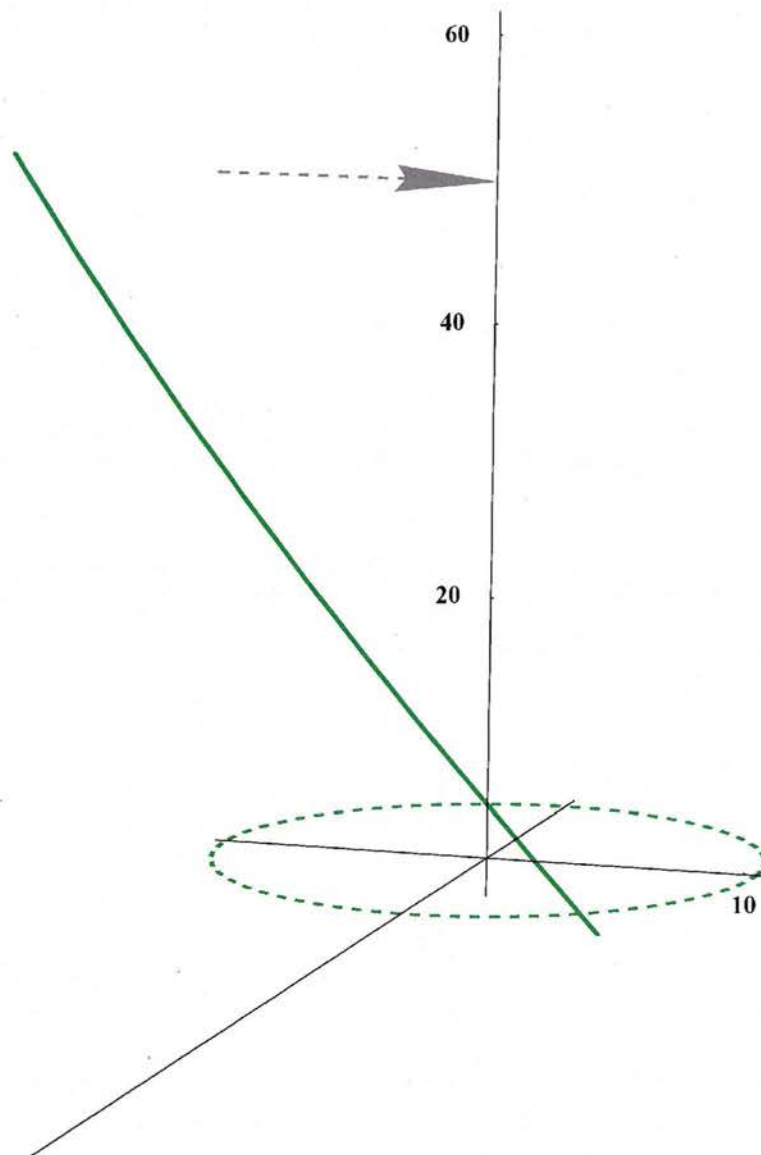


Abbildung 2: Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisstück Würfel
(3.2MM114, 93,0m Nabenhöhe)

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 2.2).

	MM82	3.4M104	3.2M114	6M126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	54,7	53,2	46,8	49,5
Kritische Eismasse [g]	26,8	28,3	36,5	32,6
Kritische Eisdicke [cm]	3,4	3,4	3,7	3,6

Tabelle 2.2: Untersuchungsergebnisse unter den gegebenen Randbedingungen (Würfel).

Vergleicht man den Würfel („Schritt eins“) mit beobachteten Eisstücken aus der Praxis (TÜV NORD Erfahrungen aus den wiederkehrenden Prüfungen und Literaturquellen /14/, /18/, /19/) sowie Modellrechnungen (Turbice /18/, /21/, /22/, /23/), so ist festzustellen, dass der Würfel als gewähltes Eisstück nicht die Bandbreite der möglichen abgeworfenen Eisstücke abdeckt. Aus diesem Grund wurden in einem zweiten Schritt etwa 144 verschiedene Eisstücke mit ihren objektspezifischen Massen generiert (Randbedingungen der Eisstücke: B; H; L: 10cm; 0,3cm bis 5cm; 5cm bis 20cm; Dichte 700kg/m³ /17/) und die Aufprallenergie unter Variation der Abwurfbedingungen ermittelt. Die folgenden Randbedingungen wurden für die Parameterstudie („Schritt zwei“) der generierten Eisstücke gegenüber dem ersten Schritt (Würfel) variiert:

- Die Windgeschwindigkeit wurde von 10m/s bis zur jeweiligen Abschaltwindgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.1.1) 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 Eisstück wurden die Aufprallgeschwindigkeit sowie die zugehörige Aufprallenergie ermittelt und mit der zugrunde gelegten kritischen Aufprallenergie von 40J verglichen (siehe Kapitel 2.1.1). In der Tabelle 2.3 sind die daraus resultierenden minimalen Eisdicken für die untersuchten WEA-Typen angegeben.

	MM82	3.4M104	3.2M114	6M126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	22,7	22,0	21,0	21,0
Masse [kg]	0,168	0,168	0,196	0,182
Dicke [cm]	1,2	1,2	1,4	1,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	25	25	22	25

Tabelle 2.3: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisstücke. Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J.

Die Ergebnisse in Tabelle 2.3 zeigen, dass die ermittelte kritische Eisdicke mit einer hohen Windgeschwindigkeit (Abschaltwindgeschwindigkeit) einhergeht. Gemäß deutschem Wetterdienst (DWD) /29/ entspricht eine Windgeschwindigkeit von 25m/s einem „schwerem Sturm“, bei dem mit brechenden Bäumen und größeren Schäden an Häusern zurechnen ist. Daher wurde für die Auswahl des kritischen Eisstückes die Windgeschwindigkeit auf kleiner gleich 20m/s begrenzt. Gemäß DWD /29/ ist bei einer Windgeschwindigkeit von 20m/s („Sturm“) immer noch mit brechenden Ästen von Bäumen (vergleichbar mit der Gefährdung durch herabfallende Eisstücke) und einem beschwerlichem Gehen zurechnen. Wir setzen daher Standortunabhängig für die Berechnung der in Tabelle 2.4 dargestellten kritischen Eisdicken die Windgeschwindigkeit von 20 m/s an.

	MM82	3.4M104	3.2M114	6M126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	20,5	20,4	20,2	20,5
Masse [kg]	0,196	0,196	0,196	0,210
Dicke [cm]	1,4	1,4	1,4	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20	20

Tabelle 2.4: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisstücke.
Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s.

Die Ergebnisse aus Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 zeigen, dass mit zunehmender Anlagengröße die kritische Eisdicke zunimmt. Dies ist unter anderem durch den längeren Flugweg und die größere Flugzeit der abgeworfenen Eisstücke begründet. Die hohe Anfangsgeschwindigkeit, die durch die Blattspitzengeschwindigkeit auf das abgeworfene Eisstück 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 /15/, zu den in Tabelle 2.4 aufgeführten Dicken festgelegt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich somit bei der Senvion MM82 (Nabenhöhe 59,0) zu 1,4cm ein.

2.1.3 Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisstückes

In der Vergangenheit gab es zum Eiswachstum verschiedene Studien auf Basis der Simulationsprogramme TURBICE /18/, /21/, /22/, /23/ (WEA – Vereisung von Rotorblättern) und LEWICE /21/ (Luftfahrt – Vereisung von Tragflächen) sowie auf Basis experimenteller Windkanalversuche /18/, /21/, /24/.

Die Studien zeigen übereinstimmend die folgenden Ergebnisse:

- Die Eiwachstumsrate von Raureif (Dicke Eis pro Zeiteinheit [mm/min]) nimmt mit zunehmender Größe der WEA (450kW bis 2MW) ab (0,75mm/min bis 0,45mm/min) /22/, /23/. Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen /22/ wurde dieses Phänomen zunächst in einem Windpark beobachtet und daraufhin näher untersucht /22/.
- Raureif wächst insgesamt dicker auf als Klareis /21/, /24/ besitzt aber eine geringere Dichte /25/ (Raureif: 600 bis 900 kg/m³, Klareis 900kg/m³).
- Die Eiwachstumsraten der unterschiedlichen Eisformen liegen in einem Bereich von 0,45mm/min /22/ bis 3mm/min /21/.

Zusammenfassend wird die Eiwachstumsrate zu 1mm/min festgelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eiwachstumsrate mit zunehmender Größe der WEA abnimmt /22/, /23/ - gemäß der Erkenntnisse aus /22/ eher unterhalb von 1mm/min liegt. Die festgelegte Eiwachstumsrate gilt in Anlehnung an /24/ (Studie DTU Wind Energy 2013) für Klareis, Raureif bzw. einer Vereisungsmischung /24/.

Auf Basis der ermittelten kritischen Eisdicken (siehe Tabelle 2.4) ergibt sich die kritische Zeit, bis zu der mit der Akkumulation der kritischen Eisdicke zu rechnen ist, ca. zu den in Tabelle 2.5 aufgeführten Werten. Innerhalb dieser Zeit sollte das Eiserkennungssystem den Eisansatz erkannt und die WEA, dort wo es gefordert ist, abgeschaltet haben, um den Eisabwurf eines kritischen Eisstücks zu verhindern.

	MM82	3.4M104	3.2M114	6M126
Detektionszeit [min]	14	14	14	15

Tabelle 2.5: Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.

2.2 Untersuchung der Eiswurfweiten im leistungserzeugenden Betrieb der WEA

Im Rahmen der Untersuchung werden für kritische Eisstücke die möglichen Eisabwurfweiten ermittelt und mit der in der Musterliste der technischen Baubestimmungen angegebenen Formel zum Eisabwurf „1,5 * (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)“ verglichen /32/. Zusätzlich findet ein Abgleich zu den von Senvion in /9/ festgelegten Sicherheitsradien statt.

2.2.1 Festlegung der Randbedingungen

Anlagenbezogene Randbedingungen:

WEA-Typ:

Aus dem Anlagenportfolio /1/ wurden drei WEA-Typen ausgewählt, die als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können. Hierbei wurden eine kleiner, mittlere und großer Anlagentyp sowie der im Rahmen der Datenerhebung durch Senvion gewählte Anlagentyp /3/ berücksichtigt. Für die folgenden Betrachtungen wurde je-

weils die kleinste Nabenhöhe ausgewählt, da diese nach unseren Untersuchungen für die Ermittlung der kritischen Eisdicke des Eisabwurfs konservativ ist.

- MM82 mit 59,0m und 100,0m Nabenhöhe, 82,0m Rotordurchmesser /1/
- 3.4M104 mit 73,0m und 100,0m Nabenhöhe, 104,0m Rotordurchmesser /1/
- 3.2M114 mit 93,0m und 143,0m Nabenhöhe, 114,0m Rotordurchmesser /1/
- 6M126 mit 100,0m und 117,0m Nabenhöhe, 126,0m Rotordurchmesser /1/

Für eine gute Abdeckung der jeweiligen Anlagenparameter wurden jeweils die höchste und die niedrigste Nabenhöhe für die Untersuchung des Eisabwurfs ausgewählt.

Drehzahl bei Eisabwurf: Für die Drehzahl wird jeweils die windgeschwindigkeitsabhängige Anlagendrehzahl berücksichtigt /1/.

Physikalische Randbedingungen:

Luftdichte: Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /17/ zu $1,225\text{kg/m}^3$ festgelegt.

Windgeschwindigkeit: Die Windgeschwindigkeit wurde von 10m/s bis zur jeweiligen Abschaltwindgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.1.1) kontinuierlich mit einer Schrittweite von 1m/s variiert. Für die Ermittlung der maximalen Wurfweite die maximalen Drehzahlen in Kombination mit hohen Windgeschwindigkeiten maßgeblich.

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 /12/ zu 0,2 festgelegt.

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

Randbedingungen zum Eisabwurf:

Gewicht und Geometrie der Eisstücke: Für Gewicht und Geometrie werden die zur Ermittlung der kritischen Eisdicke untersuchten Eisstücke (144 Eisstücke siehe Kapitel 2.1.2) herangezogen. Hierbei werden die ermittelten kritischen Eisdicken als untere Grenze für die Auswahl der Eisstücke mitberücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.2 Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4).

Mit den gewählten Eisstücken wird eine Vielzahl möglicher Eisstücke abgedeckt.

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

Lageparameter des Rotorblattes (Abwurfwinkel): Die Lage des Rotorblattes in der Rotorebene (Abwurfwinkel) wird in 10° Schritten von 0° bis 360° variiert.

2.2.2 Ermittlung der maximalen Eisabwurfweiten auf Basis der kritischen Eisdicke

Auf Basis der in Kapitel 2.2.1 festgelegten Randbedingungen wurden die Eisabwurfweiten für kritische Eisstücke ermittelt. Die Wurfweiten wurden zum jeweiligen anlagenspezifischen Abstand aus der MLTB /32/ für den Eisabwurf ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2.6 dargestellt.

WEA-Typ	D [m]	NH [m]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Max. Wurfweite [m]	Abstand MLTB 1,5 * (NH + D) [m]	Verhältnis: max. Wurfweite/ Abstand MLTB	Radius Sicherheitsbereich nach Senvion [m]
MM82	82	59	25	245,8	211,5	1,16	230
	82	100	25	298,7	273,0	1,09	290
3.4M1 04	104	73	25	282,6	265,5	1,06	273
	104	100	25	315,5	306,0	1,03	320
3.2M1 14	114	93	22	268,6	310,5	0,87	320
	114	143	22	327,6	385,5	0,85	386
6M126	126	100	25	335,4	339,0	0,99	340
	126	117	25	359,2	364,5	0,99	370

Tabelle 2.6: Maximale Wurfweiten bei Eisabwurf im Betrieb (Windgeschwindigkeit Abschaltwindgeschwindigkeit).

Die Ergebnisse in Tabelle 2.6 zeigen, dass die ermittelten maximalen Wurfweiten mit hohen Windgeschwindigkeiten (Abschaltwindgeschwindigkeit) einhergehen. Auf Basis der Herleitung und der Ergebnisse aus Kapitel 2.1.2 zu den Windbedingungen bei Eisabwurf wurde im Folgenden die Windgeschwindigkeit auf kleiner gleich 20m/s begrenzt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2.7 dargestellten Eisabwurfweiten.

WEA-Typ	D [m]	NH [m]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Max. Wurfweite [m]	Abstand MLTB 1,5 * (NH + D) [m]	Verhältnis: max. Wurfweite/ Abstand MLTB	Radius Sicherheitsbereich nach Senvion [m]
MM82	82	59	20	192,3	211,5	0,91	230
	82	100	20	232,7	273,0	0,85	290
3.4M1 04	104	73	20	219,7	265,5	0,83	273
	104	100	20	244,4	306,0	0,80	320
3.2M1 14	114	93	20	244,2	310,5	0,79	320
	114	143	20	293,3	385,5	0,76	386
6M126	126	100	20	258,7	339,0	0,76	340
	126	117	20	276,2	364,5	0,76	370

Tabelle 2.7: Wurfweiten bei Eisabwurf im Betrieb (Windgeschwindigkeit 20m/s).

Die Ergebnisse in Tabelle 2.7 zeigen, dass bei Windgeschwindigkeiten kleiner gleich 20m/s die Eisabwurfweiten niedriger sind als der in der MLTB /32/ beschriebenen anlagenspezifische Abstand für den Eisabwurf. Die maximal simulierte Wurfweite liegt bei 91% der MLTB-Wurfweite (siehe Tabelle 2.7, erste Zeile). Die von Senvion in der Standortbewertung /11/ verwendeten Radien für den Sicherheitsbereich liegen noch oberhalb der von MLTB beschriebenen Abständen. Daher sind diese als abdeckend einzustufen.

Mit /33/, /34/ hat TechnoCentre für Senvion zwei Winter Untersuchungen zur Vereisung von zwei WEA des Typs MM92 in Kanada durchgeführt. Hierbei wurde unter anderem der Eisabwurf untersucht. Für abgeworfene Eisstücke wurden sowohl die Größe als auch die Wurfweite dokumentiert. Hierbei zeigt sich, dass in den beiden beobachteten Wintern die maximale beobachtete Eisabwurfweite unterhalb der Gesamthöhe der WEA lag. Dem TÜV NORD sind darüber hinaus keine Berichte bekannt, wo ein Eisstück weiter als den in der MLTB genannten Abstand für den Eisabwurf abgeworfen wurde.

Auf Basis der Ergebnisse zur Simulation des Eisabwurfs, der Ergebnisse des untersuchten Standortes in Kanada /33/, /34/ sowie den bisher bekannten Berichten zum Eisabwurf zeigt sich, dass die Verwendung des in der MLTB genannten Abstandes und

somit auch die von Senvion festgelegten Sicherheitsradien für die Abgrenzung des maximalen Eisabwurfs geeignet ist /11/. Der Abstand ist nach derzeitigem Stand zur Vereisung von WEA und den Erfahrungen aus der Praxis als ausreichend konservativ und abdeckend anzusehen.

2.3 Untersuchung des Anfahrvorgangs

Wird die WEA ohne vorliegende Vereisung wegen Windstille oder aus anderen Gründen gestoppt, fährt sie in den Trudelbetrieb mit einer langsamen Rotordrehzahl. Der langsam drehende Rotor im Trudelbetrieb kann eine Abschattung der Anemometer zur Folge haben. Für die genannten Stillstandsbedingungen ist eine der beiden Auslösebedingungen der Anemometereisererkennung an einen Schwellenwert der Getriebedrehzahl gekoppelt (Verweis auf Kapitel 3.3).

Um eine Fehlauflösung der Eisererkennung mittels Anemometervergleich zu verhindern (wenn tatsächlich nur eine vorübergehende Abschattung vorliegt), beginnt die Eisererkennung bei einer Getriebedrehzahl von größer 300U/min. Nach einer Detektionszeit von 20 Sekunden wird eine mögliche Vereisung erkannt (siehe Kapitel 3.3). In dem Bericht /2/ wurden von Senvion insgesamt 173 Vereisungszeitpunkte (mittlere und schwere Vereisung) untersucht. Nur in einem Fall ist das beschriebene Szenario eingetreten. Der im Folgenden untersuchte Fall tritt damit relativ selten auf.

Im Rahmen der Bewertung der Eisererkennung wird für den beschriebenen Anfahrvorgang untersucht, ob dieser eine zusätzliche Gefährdung gegenüber dem Eisabfall darstellt. Eisabfall ist im Winter bei Vereisung der WEA nicht vermeidbar und kann je nach Lage des WEA-Standorts zu einer Gefährdung der Umgebung führen.

2.3.1 Festlegung der Randbedingungen

Für die Bewertung des Anfahrvorgangs wurden die selben WEA-Typen und physikalischen Randbedingungen wie in den Kapiteln 2.1 und 2.2 berücksichtigt.

Die anlagenspezifische maximale Drehzahl wurde auf Basis der übermittelten Hochlaufvorgänge der einzelnen WEA-Typen bei einer Windgeschwindigkeit oberhalb der Nennwindgeschwindigkeit /6/ ermittelt. Hierzu wurde der maximal Wert der Drehzahl, 20s nachdem die vorgegebenen 300 U/min Getriebedrehzahl /7/ überschritten wurden, aus den Diagrammen abgelesen. Da es sich um eine grafische Auswertung handelt, wurde konservativ eine Zeit von etwas über 20s berücksichtigt. Die ermittelten Drehzahlen sind in der Tabelle 2.8 dargestellt.

WEA-Typ	Getriebedrehzahl [U/min]	Getriebeübersetzung	Rotordrehzahl [U/min]
MM82	475	106	4,5
3.4M104	440	87	5,1
3.2M114	480	99,5	4,9

WEA-Typ	Getriebedrehzahl [U/min]	Getriebeübersetzung	Rotordrehzahl [U/min]
6M126	440	97	4,6

Tabelle 2.8: Übermittelte maximale Drehzahlen des Anfahrvorganges bis zur Auslösung der Eiserkennung /6/.

Mit den ermittelten Drehzahlen wurde für die unterschiedlichen WEA-Typen sowohl der Eisabwurf als auch der Eisabfall simuliert. Für eine realistische Einschätzung der Bedingungen des Anfahrvorganges wurden daraus die flächenbezogenen Trefferhäufigkeiten (Gefährdungsflächen) um die WEA ermittelt. Die Berechnung der flächenbezogenen Trefferhäufigkeit erfolgt unter Variation (Monte-Carlo-Simulation) verschiedener Parameter /26/: Position und Größe des Eisstücks, Stellung des Rotorblatts, Windrichtung (Gleichverteilt), Windgeschwindigkeit (IEC – Klasse 1 /12/) etc. Im Rahmen der Simulation werden jeweils etwa 100.000 verschiedene Flugbahnen und Trefferpunkte generiert.

Für die Einteilung der flächenbezogenen Trefferhäufigkeiten wurde die in Tabelle 2.9 dargestellte Zonierung gewählt.

Zone	Trefferhäufigkeiten [1/m ²]
1	größer 1,0E-04
2	1,0E-05 bis 1,0E-04
3	1,0E-06 bis 1,0E-05
4	1,0E-07 bis 1,0E-06
5	1,0E-08 bis 1,0E-07

Tabelle 2.9: Wahrscheinlichkeitszonen und Trefferhäufigkeitsbereiche.

2.3.2 Vergleich der Gefährdungsbereiche Eisabwurf zum Eisabfall beim Anfahrvorgang

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurden die flächenbezogenen Trefferhäufigkeiten pro m² ermittelt und in die in Tabelle 2.9 beschriebene Zonierung eingeteilt. Für die einzelnen Zonen wurden Grenzdrehzahlen für den Eisabwurf und den Eisabfall ermittelt und ins Verhältnis zueinander gesetzt. In der Tabelle 2.10 sind die berechneten Abweichungen der einzelnen Gefährdungszonen bei der jeweiligen anlagenspezifischen Drehzahl des Anfahrvorganges (siehe Tabelle 2.8, /6/) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen Abweichungen zwischen den ermittelten Grenzdrehzahlen des Eisabwurfs während des Anfahrvorganges und des Eisabfalls. Nicht für alle untersuchten Szenarien konnten Trefferhäufigkeiten größer 1,0E-04 pro m² ermittelt werden, weil sich die Treffer über einen weite-

ren Bereich unterhalb der WEA verteilt haben. Für diese Szenarien wurden die Ergebnisse ab der zweiten Zone dargestellt.

WEA-Typ	D [m]	NH [m]	Rotor-drehzahl [U/min]	Zone 1 Wurf/Fall [%]	Zone 2 Wurf/Fall [%]	Zone 3 Wurf/Fall [%]	Zone 4 Wurf/Fall [%]	Zone 5 Wurf/Fall [%]
MM82	82	59	4,5	86,8	131,3	110,7	109,7	99,4
	82	100	4,5	-	112,5	107,2	113,4	103,6
3.4M104	104	73	5,1	62,4	134,0	116,4	115,8	110,0
	104	100	5,1	-	129,0	113,8	112,1	107,0
3.2M114	114	93	4,9	-	135,5	115,9	106,3	103,8
	114	143	4,9	-	122,1	109,6	103,4	107,5
6M126	126	100	4,6	-	132,2	114,5	106,8	101,2
	126	117	4,6	-	133,5	113,4	105,3	109,3

Tabelle 2.10: Ergebnisse Vergleich Eisabwurf/Eisabfall Anfahrvorgang. Drehzahl /6/.

Die Ergebnisse der Untersuchung des Anfahrvorganges bei möglicher Vereisung zeigen,

- dass sich die gesamte Ausdehnung des Gefährdungsbereichs eines möglichen Eisabwurfs beim Anfahrvorgang gegen über dem Eisabfall nur wenig erweitert,
- dass der spezielle Fall des Anfahrens bei den durch Senvion untersuchten Vereisungsereignissen /2/ nur in einem von 173 Vereisungssituationen eingetreten ist und es sich somit um ein eher seltenes Ereignis handelt,
- dass die mögliche Gefährdung durch Eisabwurf zusätzlich in einem zeitlich sehr stark begrenzt Zeitraum eintreten würde (20 Sekunden bis zu Eiserkennung und wieder Abschaltung der WEA).

Daher ist der oben untersuchte Anfahrvorgang als unkritisch zu bewerten (siehe hierzu die Bewertung im Kapitel 4.3).

3 Bewertung der Eiserkennungssysteme

3.1 Bewertung des Messprinzips beim Senvion Eiserkennungsverfahren

Das Messprinzip der Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb basiert auf der Änderung der aerodynamischen Eigenschaften der Blattprofile durch Eisansatz, welcher sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die Geometrie des Rotorblattes so verändert, dass es zu einem signifikanten Verlust an aerodynamischer Leistungsfähigkeit kommt. Theoretisch ist die Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb in der Lage, bereits eine erhöhte Rauigkeit der Oberfläche durch Raureif zu erkennen. Diese Aussage wird gestützt durch Veröffentlichungen wie /31/, in welcher ein hoher Verlust an Auftrieb bereits bei leichter Vereisung messtechnisch gezeigt wird. Der einzustellende Schwellenwert ist deshalb so zu wählen, dass Fehldetektionen und somit unnötige Abschaltungen der WEA vermieden werden.

Das Prinzip der Eiserkennung durch das Anemometerverfahren beruht auf der Änderung des Reibungswiderstands und c_w Werts der Schalen bei einem unbeheizten, mechanischen Anemometer durch Eis, Schnee und Raureif sowie dem Vergleich zu einem Unbeeinflussten Messinstrument. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass theoretisch auch außerhalb des leistungserzeugenden Betriebs eine Vereisung erkannt werden kann.

3.2 Bewertung der Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb

Der Kern des betriebsdatenbasierten Eiserkennungssystems ist ein in der Steuerung der Anlage implementierter Algorithmus, der aus gemessenen Signalen (Drehzahl, Rotorblattwinkel, Windgeschwindigkeit) eine theoretische Leistung bildet und das Ergebnis mit der tatsächlichen Leistung vergleicht. Weichen theoretische und gemessene Leistung zu stark voneinander ab, führt dies, dort wo es gefordert ist, zum Abschalten der Anlage.

Der Schwellenwert ist abhängig von den Eigenschaften der Anlage. Im Fall des Senvion Eiserkennungssystems liegt dieser Schwellenwert für alle Anlagen bei ca. 25% der theoretischen Leistung. In Abbildung 3 ist die Grenzkurve beispielhaft dargestellt.

Eine Beschreibung des Eiserkennungsalgorithmus befindet sich im Dokument /1/.

Es ist zu indizieren, dass eine kritische Eisdicke, wie sie in Kapitel 2.1 ermittelt wurde, durch Überschreitung dieses Schwellenwertes erkannt wird. Zu diesem

Zweck wurde der Messbericht /2/ sowie die dazugehörigen Plots /3/ und Bilder eingereicht.

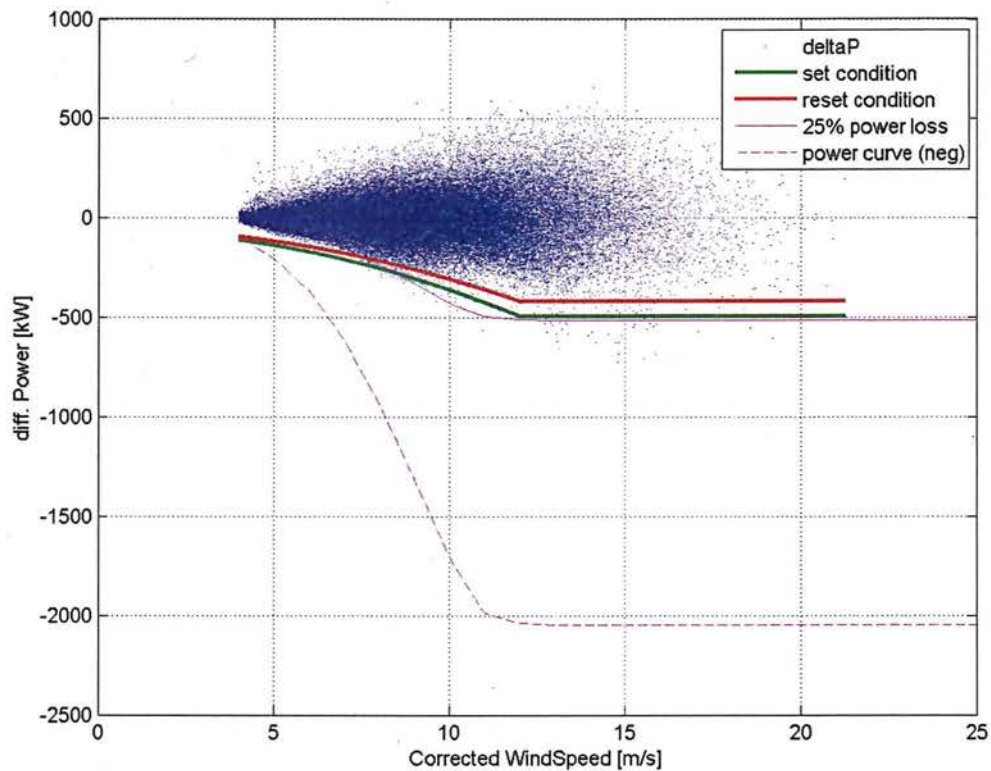


Abbildung 3: Beispielhafte Grenzkurve Abweichung elektrische Leistung

3.3 Bewertung des Anemometervergleichs

Der Kern des anemometerbasierten Eiserkennungssystems ist der Vergleich zwischen den beiden voneinander unabhängigen Anemometern.

Es gibt zwei mögliche Auslösekriterien für den Anemometervergleich.

1. Wenn das Schalenkreuzanemometer im gleitenden 600s Mittel eine Windgeschwindigkeit kleiner als 0,05 m/s und das Ultraschallanemometer eine Windgeschwindigkeit größer als 3 m/s misst.
2. Wenn die Differenz der Messwerte beider Anemometer größer als 6 m/s ist bei einer gleichzeitigen Getriebedrehzahl von mindestens 300 U/min .

Bei beiden Kriterien muss die Außentemperatur $+3^{\circ}\text{C}$ unterschreiten um einen Alarm auszulösen.

Die Bindung an eine Mindestgetriebedrehzahl beim zweiten Auslösekriterium soll verhindern, dass durch einen stehenden Rotor eines der beiden Anemometer verschattet wird und es somit zu einer Fehldetektion kommt. Senvion hat ermittelt, dass die Störzeit durch jedes Rotorblatt maximal ein Viertel des Setdelay von 20 s betragen sollte um eine störungsfreie Funktion der Eiserkennung zu gewährleisten. Daher beträgt die niedrigste einstellbare Grenzdrehzahl des Getriebes für eine Aktivierung des zweiten Auslösekriteriums der Eiserkennung 300 U/min. Dies entspricht einem schnellen Trudeln und liegt für alle Senvionturbinen unterhalb der Zuschaltdrehzahl.

Eine Beschreibung des Eiserkennungsalgorithmus befindet sich im Dokument /1/.

Es ist zu indizieren, dass eine kritische Eisdicke, wie sie in Kapitel 2.1 ermittelt wurde, durch Überschreitung dieses Schwellenwertes erkannt wird. Zu diesem Zweck wurde der Messbericht /2/ sowie die dazugehörigen Plots /3/ und Bilder eingereicht.

3.3.1 Messbericht zur Gutachtenerstellung

Zentrales Dokument zur Bewertung des Eiserkennungssystems ist der von Senvion verfasste Bericht zur Gutachtenerstellung Maßnahmen bei Eisansatz Position 3 /2/. Darin werden für den Winter 2014/15 die Ergebnisse einer Senvion 3.2M in Deutschland sowie einer Senvion MM82 in Kanada ausgewertet. Am deutschen Standort wurde lediglich das Anemometerverfahren getestet, während in Kanada beide Eiserkennungsverfahren zum Einsatz kamen. Die Daten, auf denen der Bericht basiert, liegen dem TÜV NORD vollständig vor.

Die Bewertung des Eiserkennungssystems basiert auf den folgenden Informationen. Insgesamt wurden zur Erstellung des Berichtes von Senvion ca. 60.000 Bilder und insgesamt 173 Vereisungszeitpunkte ausgewertet.

Ergebnisse zum Vereisungszustand der Rotorblätter: Von einer auf der Gondel installierten Kamera wurden in 10 minütigem Abstand Fotos der Rotorblätter aufgenommen, welche dem TÜV NORD vorliegen. Aus diesen Aufnahmen wurde auf den Vereisungszustand der Rotorblätter geschlossen.

Ergebnisse zum Vereisungszustand der Anemometer: Von einer auf der Gondel installierten Kamera wurden in 10 minütigem Abstand Fotos der Anemometer aufgenommen, welche dem TÜV NORD vorliegen. Aus diesen Aufnahmen wurde auf den Vereisungszustand auf der Gondel inklusive Wettermast geschlossen.

Aufzeichnungen der Betriebsdaten: Die Betriebsdaten der untersuchten Anlagen wurden grafisch dargestellt und liegen dem TÜV NORD vor /3/. Dargestellt sind Außentemperatur, Windgeschwindigkeit (Ultraschallanemometer, Schalenkreuzanemometer und Abweichung), Leistung, theoretische Eisdicke, Leistungsdifferenz (effektiv/ theoretisch), die Ausgangssignale der Eiserkennung (Anemometer und Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb), sowie das Verhalten der Anlage bezüglich Vereisung (siehe Abbildung 4).

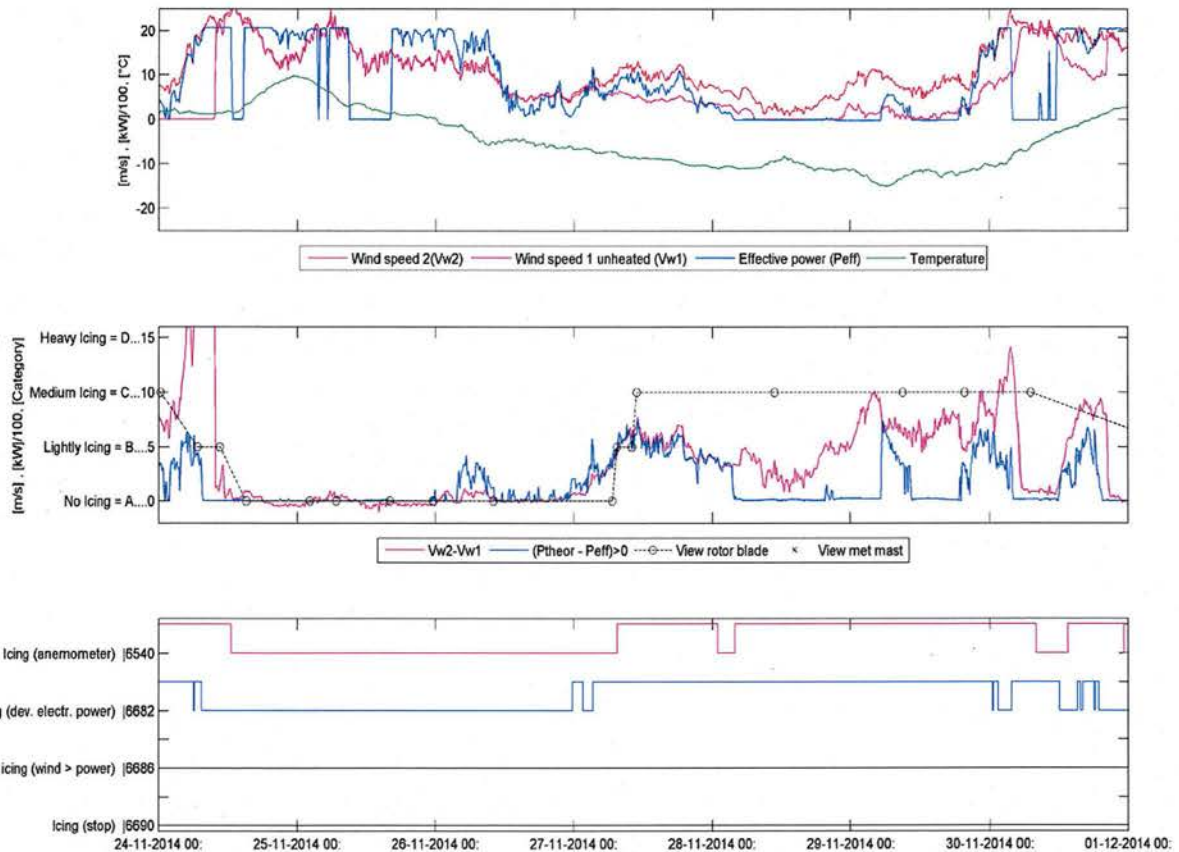


Abbildung 4: Beispiel für die übermittelten Betriebsdaten

3.3.2 Einteilung der Vereisungskategorien

Zur Auswertung der Bilder wird die Vereisung der Anlage von Senvion in vier Kategorien unterteilt, keine Vereisung (A) Abbildung 5, leichte Vereisung (B) Abbildung 6, mittlere Vereisung (C) Abbildung 7 und schwere Vereisung (D) Abbildung 8. Der TÜV NORD hält diese Einteilung für plausibel und nachvollziehbar. Dabei liegen die Schichtdicken der Vereisung in den Kategorien A und B unterhalb der ermittelten kritischen Eisdicken (Vergleich 2.1) während die Kategorien C und D dieser entsprechen bzw. sie überschreiten. Somit müssen die Eiserkennungssysteme die Kategorien C und D sicher erkennen können.

Kategorie	Beobachtung am Blatt	Beobachtung am Wettermast
A	<ul style="list-style-type: none"> • Eisfreies Rotorblatt • Kein Raureif sichtbar • Keine Reflektion von Klareis 	<ul style="list-style-type: none"> • Keinerlei Anhaftungen, • Matte Reflektionen von der Struktur (Metall)



Abbildung 5: Keine Vereisung

Kategorie	Beobachtung am Blatt	Beobachtung am Wettermast
B	<ul style="list-style-type: none">• Reste von Eis auf Vorderkante möglich.• Teilweise Eis- oder Schneeanhaftung• Oberflächenbedeckung gering <10%	<ul style="list-style-type: none">• Geringfügige Eisanhaftungen, Raureif



Abbildung 6: Leichte Vereisung



Kategorie	Beobachtung am Blatt	Beobachtung am Wettermast
C	<ul style="list-style-type: none">• Deutliche Eisanhaftungen• Keine vollständige Oberflächenbedeckung• Eisanwachs an Vorderkante	<ul style="list-style-type: none">• Raureif, Klareis oder Schnee• Teilweise Eisanwachsungen an Strukturen• Teilweise Eiszapfen
		
		

Abbildung 7: Mittlere Vereisung


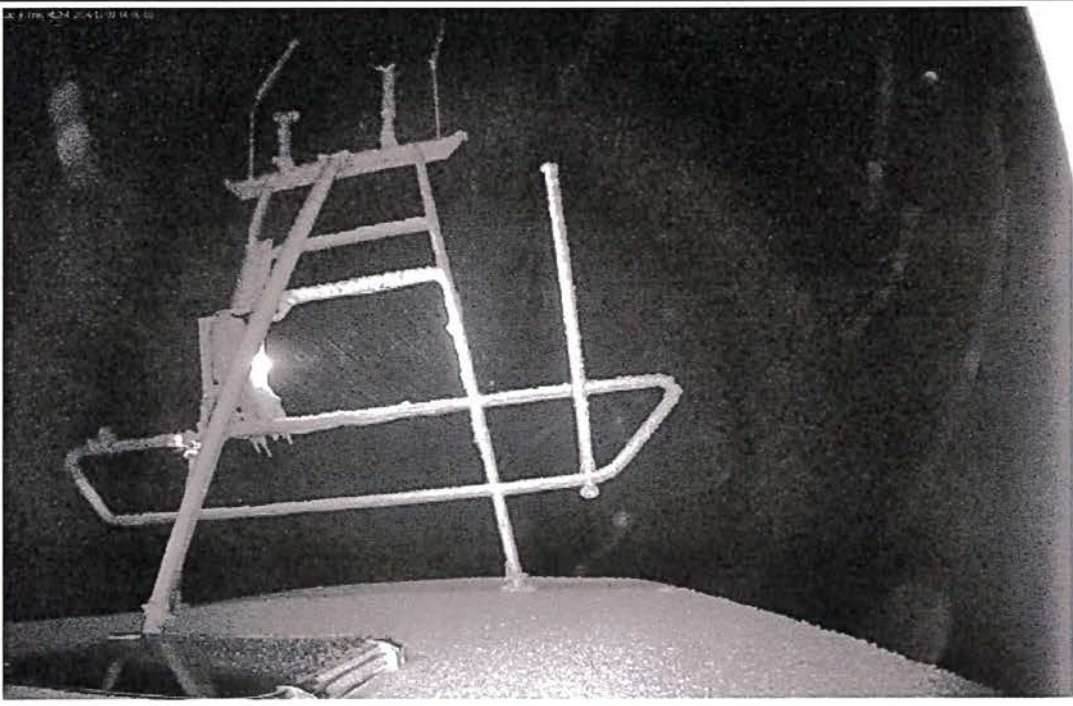
Kategorie	Beobachtung am Blatt	Beobachtung am Wettermast
D	<ul style="list-style-type: none">• Deutlicher Eisanwachs an der Vorderkante und/ oder hohe Oberflächenabdeckung >70%	<ul style="list-style-type: none">• Strukturen (fast) vollständig überwachsen
		
		

Abbildung 8: Schwere Vereisung

3.3.3 Beobachtungen und Bewertungen zum Messbericht

In diesem Abschnitt werden folgende Punkte bewertet, die sich für die Prüfung als möglicherweise kritisch herausstellen:

- Trefferquote der Eiserkennungssysteme
- Anfahrvorgang der Anlage (nicht leistungserzeugend) und Zeitverzögerung der Eiserkennung nach Zuschalten der Anlage
- Abdeckung verschiedener Betriebsbereiche
- Übereinstimmung der Beobachtungen aus der Messung mit der Spezifikation des Algorithmus.

Am deutschen Standort, an dem lediglich das Anemometerverfahren getestet wurde, wurden sämtliche Eisereignisse rechtzeitig erkannt. Das Anemometerverfahren registrierte eine Vereisung im Durchschnitt 3,8 Stunden bevor diese auf den Bildern als Vereisung der Kategorie C zu bewerten war. Beim Abtauen der Eisschicht wurde die Anlage im Durchschnitt erst 9,1 Stunden, nachdem auf den Bildern kein Eis der Kategorie C mehr vorhanden war, vom Eiserkennungssystem frei gegeben. Daraus ist die hinreichende Genauigkeit und Konservativität des Verfahrens zu erkennen.

Für den Standort in Kanada, an dem beide Eiserkenner genutzt wurden, ergab sich während des Zeitraums vom 07.10.2015 bis zum 01.06.2015 insgesamt an 110 Tagen eine Vereisung der Kategorie C oder D. Von diesen Vereisungsereignissen wurden alle bis auf eins rechtzeitig erkannt.

Bei dem unerkannten Vereisungsereignis vom 11.04.2015 handelt es sich um einen Vorfall, bei dem sich Eis an der Vorderkante des Rotorblatts gebildet hat, der Rest des Rotors jedoch weitestgehend eisfrei blieb. Dies führte nur zu geringen Abweichungen in der Aerodynamik des Rotorblattes, wodurch die Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb keine Vereisung detektierte. Die vorhandene Vereisung befand sich im Übergang zwischen leichter und mittlerer Vereisung und lag nur für einen kurzen Zeitraum vor. Wie in den Betriebsdaten für den entsprechenden Zeitraum erkennbar (siehe Abbildung 9), identifizierte der Anemometervergleich zwar eine Abweichung zwischen den beiden gemessenen Windgeschwindigkeiten, diese lag mit 5 m/s jedoch knapp unterhalb der Auslösegrenze. Dieser Vereisungsfall zeigt die vorhandene Grenze des Systems auf.

Vor dem Hintergrund der ausführlichen Messkampagne kann das Gesamtsystem als dem Stand der Technik entsprechend bewertet werden. In der Messkampagne wurden zwei Anlagen, an zwei Standorten jeweils über die gesamte Kälteperiode des Jahres ausführlich überwacht, dabei wurden 173 Vereisungsereignisse aufgezeichnet von denen lediglich eins unerkannt blieb.

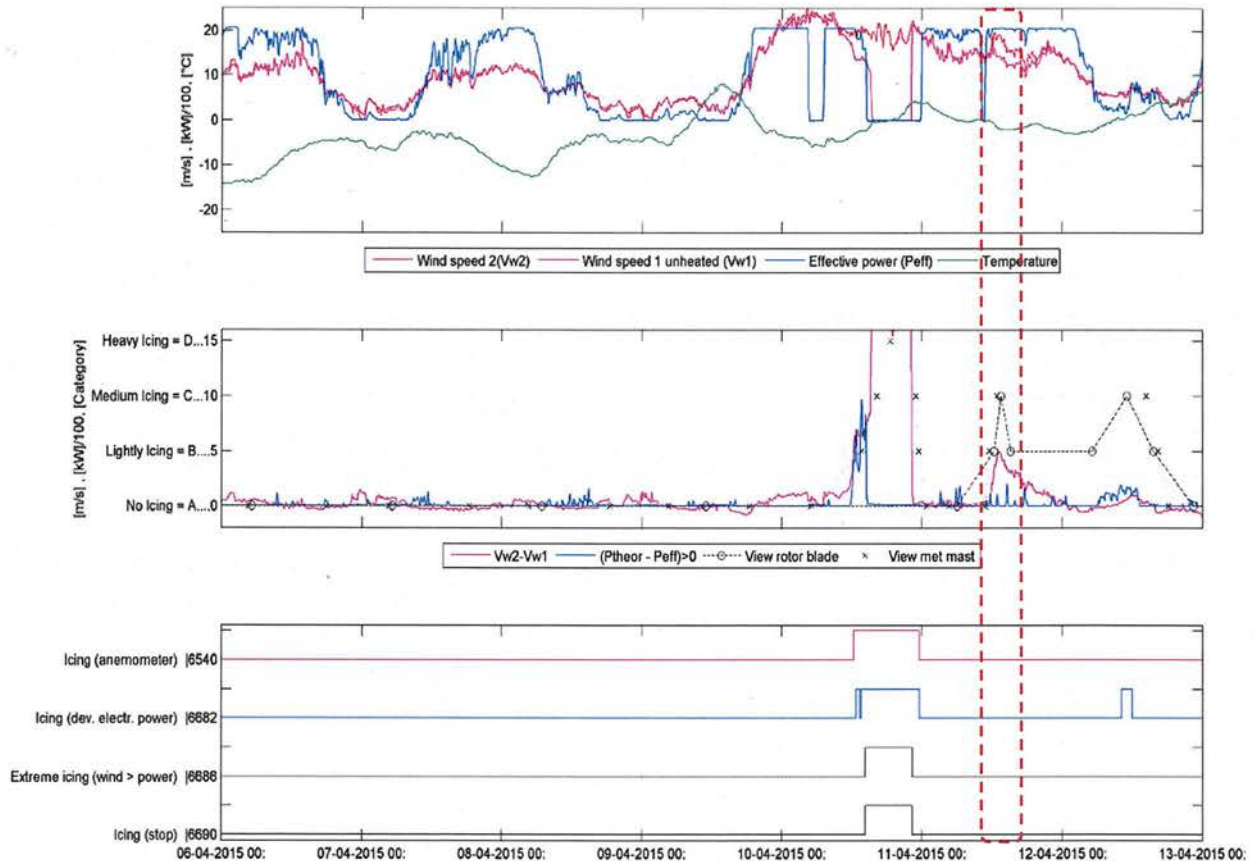


Abbildung 9: Darstellung der Betriebsdaten für das unerkannte Vereisungsereignis vom 11.04.2015

Der dem TÜV NORD vorliegende Messbericht /2/ indiziert, dass die Eiserkennungssysteme sowohl im Teillast- als auch im Vollastbetrieb mit hoher Zuverlässigkeit funktionieren. Das gemessene Verhalten des Eiserkennungssystems stimmt mit dem spezifizierten Verhalten überein.

3.4 Grenzen der Bewertungskette

3.4.1 Geschlossenheit der Bewertungskette und Schnittstellen

Für eine geschlossene Bewertungskette ist es notwendig, die kritische Eisdicke und die Einstellung des Eiserkennungssystems in Verbindung mit dem Messbericht /2/ zu bringen.

Die in Kapitel 2.1 ermittelte kritische Eisdicke für alle Senvion Anlagen beträgt 14 mm. Der Messbericht zeigt auf der anderen Seite, dass Eis sicher erkannt wird bevor die Vereisungskategorie „mittlere Vereisung“ erreicht wird, sich somit noch in der Kategorie „leichte Vereisung“ befindet. Ein zentraler Punkt der Bewertungskette ist es diese Informationen zu verknüpfen.

Wie Fotoaufnahmen der Rotorblätter zeigen, ist nur eine geringe Eisdicke bei Vereisungskategorie „leichte Vereisung“ vorhanden. Es wird dabei angenommen, dass die auf dem Foto sichtbare Eisdicke nur wenige Millimeter beträgt und geringer ist als die kritische Eisdicke von 14 mm. Ferner ist eine zentrale Annahme, dass die (subjektive) Klassifizierung der Fotoaufnahmen für alle anderen Zeitpunkte nach den gleichen Maßstäben durchgeführt wurde.

3.4.2 Repräsentativität der Messungen

Die Messungen wurden über die gesamte Kälteperiode 2014/15 an zwei Standorten mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen durchgeführt.

- Dauer der Messung: Die Dauer der Messung kann als repräsentativ angesehen werden.

- Vereisungsgrad: Die unterschiedlichen Standorte weisen deutliche Unterschiede in den Vereisungsperioden auf. Am deutschen Standort fand ein stetiger Wechsel zwischen Vereisungs- und Tauperioden, ohne „schwere Vereisung“ statt. Dadurch lässt sich gut die Reaktion des Eiserkennungssystems im Bereich der kritischen Eisdicke erkennen. In Kanada wurde darüber hinaus auch mehrere längere Vereisungsperioden mit „schwerer Vereisung“ beobachtet. Die hohe gemessene Zuverlässigkeit der Eiserkennung zeigt, dass schwere Vereisung und damit auch Vereisungsbedingungen, die Schäden verursachen können, zuverlässig erkannt werden.

Ferner ist anzumerken, dass die Fotoaufnahmen der vereisten Rotorblätter, welche dem TÜV NORD vorliegen, zum Teil eine Vereisung der Rotorblätter im Bereich der Hinterkante zeigen. Wie der Bericht /31/ anhand von Windkanalversuchen indiziert, führt eine Vereisung an der Rotorblattvorderkante zu einer stärkeren Änderung der aerodynamischen Beiwerte als eine Vereisung in der Nähe der Hinterkante. Die in der Messung vorliegende Vereisung scheint somit schwerer detektierbar als eine Vereisung der Profilvorderkante.

3.4.3 Unsicherheiten der Messung

Die Unsicherheiten der Messung können als gering eingestuft werden, da die Betriebskenndaten sehr präzise gemessen werden und die Messung der Windgeschwindigkeit ebenfalls bei entsprechenden Laufzeiten der Mittelwertbildung präzise ist.

3.4.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anlagen

Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Messungen auf andere Anlagen von Senvion gegeben. Die Messungen wurden an einer MM 82 und einer 3.2M durchgeführt. Dies entspricht der kleinsten und zweitgrößten Turbine im bewerteten Portfolio von Senvion und stellt damit einen guten Schnitt durch das gesamte Portfolio dar.

Für die Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb lässt sich grundsätzlich feststellen, dass auch bei höheren Rotordurchmessern bereits eine leichte Vereisung der Rotorblätter zu einem derart hohen Verlust an erzeugter Leistung führen, dass auch

hier die Detektierbarkeit gegeben ist. Auch wenn die Möglichkeit besteht, dass bei weiteren Anlagen von Senvion bei leichter Vereisung eine etwas geringere Differenz der Leistung auftritt, ist hier in Bezug auf die kritische Eisdicke ausreichend Reserve vorhanden.

Die Eiserkennung über den Anemometervergleich funktioniert unabhängig von der Turmhöhe oder dem Rotordurchmesser, somit sind die aus dem Messbericht gewonnenen Erkenntnisse vollständig auf die anderen Turbinen übertragbar.

3.5 Zusammenfassung der Bewertung der Eiserkennung

Sowohl die Prüfung des Eiserkennungsverfahrens als auch die Analyse der Messergebnisse zeigen, dass das von Senvion implementierte duale Eisdetektionsverfahren mit hinreichend hoher Zuverlässigkeit eine kritische Vereisung der Rotorblätter erkennen kann.

Eine wichtige Voraussetzung für diese Aussage ist, dass die kritische Eisdicke größer ist als die in der Messung vorliegende Eisdicke für „leichte Vereisung“. Diese Aussage erfolgte über die Bewertung der Fotoaufnahmen (Messkampagne mit ca. 60000 ausgewerteten Bildern). Obwohl der in den dem TÜV NORD vorliegenden Abbildungen erkennbare Vereisungsgrad eine geringere Eisdicke indiziert, als die kritische Eisdicke, liegt in diesem Schritt der Bewertungskette eine gewisse Unsicherheit.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das von Senvion verwendete Eiserkennungsverfahren dem Stand der Technik entspricht und dass mit den vorliegenden Einstellungen eine Eisdicke erkannt wird, die geringer ist als die kritische Eisdicke.

4 Bewertung der Bedingungen zum Wiederanfahren

Das Anfahren bzw. Wiederanfahren muss in drei verschiedene Fälle unterteilt werden.

1. Anfahren/ Wiederanfahren nach Vereisung durch manuellen Reset;
2. Automatisches Wiederanfahren nach erkannter Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen;
3. Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten

4.1 Anfahren/ Wiederanfahren durch manuellen Reset

Das manuelle Anfahren der WEA, nachdem die Vereisung der WEA durch eine autorisierte Person vor Ort ausgeschlossen wurde, stellt nach Meinung der Gutachter eine sichere Möglichkeit für einen eisfreien Start der Anlage dar. Voraussetzung hierfür ist, dass das Personal entsprechend geschult ist. Hierfür können die von Senvion bereitgestellten Schulungsunterlagen /10/ verwendet werden.

4.2 Automatisches Wiederanfahren nach Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen

Für das automatische Wiederanfahren nachdem eine Vereisung festgestellt wurde, verwendet Senvion die im Dokument /5/ beschriebene Abtauformel. Diese beruht auf dem Prinzip der zum Abtauen einer Eisschicht benötigten Schmelzwärme. Diese kann durch Konvektion, Wärmeleitung, Strahlenabsorption und Sublimation entstehen. Senvion beschränkt sich bei der Abtauformel auf die Schmelzwärme durch Konvektion. Die Vernachlässigung der anderen Abtaueffekte führt zu einem konservativen Rechenmodell.

Zur Berechnung der notwendigen Schmelzwärme nimmt Senvion eine theoretische Schichtdicke des Eises an. Solange die Temperaturen sich oberhalb der eisbildenden Bedingungen befinden, wird die berechnete Schichtdicke kontinuierlich um einen den Umgebungsbedingungen entsprechenden Wert verringert. Fällt die Temperatur jedoch während dieses Vorgangs unter 0°C, wird die theoretische Schichtdicke wieder erneut aufgebaut und der Vorgang startet erneut /4/.

Die resultierende Abtauzeit ist abhängig von der Umgebungstemperatur und den Windverhältnissen. Wobei eine höhere Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit die benötigte Abtauzeit verringern.

Die Abtauformel und der damit verbundene automatische Wiederanlauf der WEA nach Vereisung wird als plausibel und unkritisch bewertet.

4.3 Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten

Da die Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb nicht dazu geeignet ist, Vereisungen während des Stillstands der WEA bzw. im Trudelbetrieb festzustellen und die Eiserkennung durch Anemometervergleich unter bestimmten Konstellationen eine Mindestdrehzahl benötigt, um korrekt zu funktionieren (siehe Kapitel 3.3), kann es während des Stillstands der Turbine zu einer unbemerkten Vereisung des Rotors kommen.

Der Stillstand einer Turbine kann üblicherweise nach zwei Ursachen unterschieden werden. Zum einen Schwachwindperioden, in denen die Windgeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum unterhalb der benötigten Startwindgeschwindigkeit liegt und zum anderen Fehler in der Anlage, die zum Stillstand führen. Die beiden Fälle werden im Folgenden separat betrachtet und bewertet.

Da es in der Regel nicht innerhalb von kurzer Zeit zu Windgeschwindigkeitsänderungen von Schwachwind zu Starkwind kommt und die Detektionszeit bei der Eiserkennung durch Anemometervergleich bei 20 Sekunden liegt, kann die von Senvion gewählte Option des Anfahrens bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten durch Schwachwind als ausreichend sicher bewertet werden.

Im Gegensatz zum Anfahren nach Schwachwindperioden, können nach Behebung eines Fehlers (z.B. durch Fernreset) bereits hohe Windgeschwindigkeiten herrschen. Um zu verhindern, dass die vereiste Turbine innerhalb der Detektionszeit von 20 Sekunden auf hohe Rotationsgeschwindigkeiten kommt, wird Senvion die Grenzdrehzahl für die Detektion durch das Anemometerverfahren als Ergebnis der vorhergehenden Untersuchungen auf 300 U/min begrenzen.

Dies in Verbindung mit dem seltenen Auftreten dieser Bedingungen (Anlage vereist nach Stillsetzung und fährt bei höherer Windgeschwindigkeit wieder an, aber das Schalenkreuzanemometer ist nicht eingefroren) und der geringen Detektionszeit (20s) führt dazu, dass das Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten durch einen Fehler als ausreichend sicher bewertet wird.

5 Einbindung in das Betriebsführungssystem der WEA

5.1 Verwendete Technik

Sowohl das Verfahren zur Eiserkennung aus Messwerten des Produktionsbetriebes der WEA, als auch der Vergleich der Messwerte des unbeheizten Schalenkreuzanemometers mit dem beheizten Ultraschallanemometer, basiert auf den standardmäßig verbauten Komponenten bzw. Sensoren der Senvion WEA. Die Erfüllung der Anforderungen an die funktionale Sicherheit der Sensoren gemäß DIN EN ISO 13849-1 sind im Rahmen der Zertifizierung der WEA durch den TÜV NORD geprüft worden.

Die Umsetzung der Funktion „Eiserkennung“ erfolgt ausschließlich im Betriebsführungssystem, d.h. der Betriebsführungssoftware der WEA. Die hier bewertete Funktionalität der Eiserkennung bezieht sich auf die Softwareversion 5.1 der Senvion MM, 3.XM und 6M Baureihen, sowie zukünftige Softwareversionen, sofern Logik und Parametrisierung sich nicht grundlegend ändern.

Die Software zum Anlagenverhalten bei Vereisung für die Senvion WEA-Typen unterscheidet sich für die Gruppen MM, 3XM und 6M-Baureihe geringfügig. Die Unterschiede erklären sich vor allem aus der unterschiedlichen Nummerierung der Windmesser bei den Baureihen MM, 3XM und 6M.

5.2 Bewertung der Einbindung in das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem

Da die Sensoren, das Betriebsführungssystem und die Aktoren der WEA bereits im Rahmen der Zertifizierung / Typenprüfung geprüft wurden, führt die Funktion der Eiserkennung zu keiner Veränderung der Prüfergebnisse der Zertifizierung / Typenprüfungen, bzw. zu keiner Veränderung in den Lastberechnungen. Die Funktion „Eiserkennung“ war jedoch nicht Bestandteil der Zertifizierung, so dass es erforderlich ist, diese hier zusätzlich zu untersuchen.

Die zentralen Statuscodes zur Eiserkennung sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Statuscode	Name	BP	Kommentar
6540	Vereisung (Anemometer)	0	Info-Statuscode zur Charakterisierung der Eiserkennung mit dem unbeheiztem Anemometer
6682	Vereisung (Abw. el. Leistung)	0	Info-Statuscode zur Charakterisierung der Eiserkennung mit der theoretischen Wirkleistung
6690	Vereisung (Stopp)	52	Reagiert auf Eiserkennung und stoppt die WEA, sofern Stopp bei Vereisung aktiviert wurde.
6680	Vereisung (red. Betrieb)	0	Zeigt den reduzierten Betrieb der WEA unter Vereisungsbedingungen an.
6686	Extreme Vereis. (Wind > Leist.)	0	Die Wirkleistung ist im Vergleich zur Windgeschwindigkeit zu gering. Bei Wirkleistungsreduktion (schallreduzierter Betrieb, Power Management etc.) wird eine angepasste maximale Wirkleistung verwendet.

Tabelle 5.1: Statuscodes Eiserkennung

Damit unterschiedliche WEA-Baureihen mit unterschiedlichen Anforderungen zur Genehmigung von Windenergieanlagen konfiguriert werden können, werden bei Senvion sogenannte Parameterprodukte definiert, die sich an dem standortspezifischen Umgebungsbedingungen orientieren. Insbesondere verfügt die Software über Auswahlswitcher wie beispielsweise „Eissensor Anemometer“ und „Eissensor Anemometer relevant“ die den Wert 0 oder 1 haben können. Mit „Eissensor Anemometer“ = 1 wird der Statuscode 6540 aktiviert. Mit „Eissensor Anemometer relevant“ = 1 steuert dieser Status die Auswertung für den Anlagenbetrieb (z.B. den Stopp der Anlage).

5.3 Automatisches Abschalten der WEA

Die Statuscodes 6540, 6682 und 6686 stoppen die WEA nicht direkt, sondern lösen je nach Parametersetzung den Statuscode 6690 Vereisung (Stopp), der zu einer automatischen Abschaltung der WEA mit Bremsprogramm 52 führt oder den Statuscode 6680 Vereisung (leistungsreduzierter Betrieb) aus. Die Parameter und Auslösebedingungen sind detailliert in /1/ aufgeführt.

Eine Reihe von unabhängigen Statuscodes stellt darüber hinaus sicher, dass die WEA abschaltet, sobald Eingangswerte, die für die Auslösung von Statuscode 6540 und 6682 relevant sind, nicht mehr bereit gestellt werden können. Ein Ausfall der Funktion Eiserkennung bzw. der Temperaturmessung wird somit vom Betriebsführungssystem erkannt und führt zu einer automatischen Abschaltung der WEA mit Bremsprogramm 52.

6 Anforderungen

Neben den in Dokument /1/ beschriebenen Voraussetzungen unter denen das Gutachten gültig ist, ergeben sich die folgenden weiteren Anforderungen.

6.1 Anforderungen zur wiederkehrenden Prüfung

Zur dauerhaften Sicherstellung des Betriebs der Eiserkennung müssen die relevanten Sensoren, sowohl bei der Inbetriebnahme als auch im Betrieb wiederkehrend auf ihre Funktion überprüft werden. Die Inbetriebnahme erfolgt nach /1/ mindestens in zwei Schritten. In der Hallen-Inbetriebnahme wird die Gesamtfunktion der WEA-Gondel kurz nach Fertigstellung der Gondel überprüft. Die komplette Anlage durchläuft anschließend im Feld die Außeninbetriebnahme. Nach Übergabe der Windenergieanlage an den Kunden bzw. an den Service erfolgt die wiederkehrende, mindestens jährliche Prüfung, entsprechend den jeweiligen Serviceheften.

Mit der vorliegenden Beschreibung des Herstellers ist eine zuverlässige Einstellung und Justierung des Eiserkennungssystems gegeben. Eine weitere ortsspezifische Begutachtung oder Abnahme von Sachverständigen ist nicht erforderlich.

6.2 Parametrierung

Für Standorte die laut DIBT Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen nicht in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten errichtet wurden, müssen die Eiserkennungssysteme aktiv geschaltet werden (siehe Kap. 5.2, z. B. „Eissensor Anemometer“ = 1 und „Eissensor Anemometer relevant“ = 1).

Für die Eiserkennung mittels Anemometervergleich ist der erforderliche Grenzwert der Getriebedrehzahl auf 300 U/min einzustellen (siehe Kapitel 3.3).

Alle weiteren Parameter sind wie in Dokument /1/ aufgeführt einzustellen.

6.3 Personalschulung

Das für die manuelle Freigabe nach Vereisung der WEA verantwortliche Personal muss entsprechend geschult und hinsichtlich der möglichen Gefährdung sensibilisiert sein. Dies ist schriftlich zu dokumentieren. Hierzu kann das von Servion bereitgestellte Schulungsmaterial Dokument /10/ verwendet werden.

7 Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung

Mit dem vorliegenden Bericht wurde die Funktionalität des Eiserkennungssystems bewertet. Die Bewertung von Senvions „Maßnahmen bei Eisansatz“ /9/ erfolgte bereits in der gutachtlichen Stellungnahme /8/. Die in /8/ dargestellten Ergebnisse werden durch dieses Gutachten gestützt.

Die kritische Eisdicke und damit einhergehend die kritische Detektionszeit für verschiedene Senvion Anlagen wurde ermittelt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich bei der MM82 (Nabenhöhe 59 m) zu 1,4 cm ein (siehe 2.1.2). Diese Eisdicke wurde für die weitere Bewertung als Maßstab herangezogen.

Das duale Eiserkennungssystem aus Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb und Anemometervergleich ist plausibel und stellt durch die doppelte Kontrolle eine nach dem heutigen Stand der Technik sichere Methode der Eiserkennung dar.

Die Prüfung des Eiserkennungsverfahrens in Verbindung mit der Analyse der Messergebnisse zeigt, dass die von Senvion verwendeten Eisdetektionssysteme mit hoher Zuverlässigkeit eine kritische Vereisung der Rotorblätter erkennen können. Eine gewisse Unsicherheit in der Bewertungskette liegt zwar in der Bewertung der Fotoaufnahmen bezüglich der kritischen Eisdicke, jedoch wird diese Unsicherheit durch die hohe Zuverlässigkeit im Betrieb des Eiserkennungsverfahrens begrenzt.

Aufgrund der Randbedingungen der Eiserkennungssysteme wurde das Verhalten im Sonderfall „Anfahren mit Vereisung im niedrigen Drehzahlbereich“ untersucht. Die Eiserkennung auf Basis von Betriebsdaten funktioniert nicht während des Anlagenstillstands oder im Trudelbetrieb. Der Anemometervergleich benötigt unter bestimmten Konstellationen eine Mindestgetriebedrehzahl von 300 U/min, was einem schnellen Trudelbetrieb entspricht. Dieser Trudelbetrieb bzw. das Anfahren der WEA kann jedoch als ausreichend sicher eingestuft werden (siehe Kap. 4.3).


Die Einbindung der Eiserkennung aus Messwerten im Produktionsbetrieb in Verbund mit einem Anemometervergleich führt, aufgrund der Verwendung bereits integrierter und zertifizierter Technik, im Betriebsführungs- und Sicherheitssystem zu keinen Veränderungen. Die WEA wird bei entsprechender Parametrierung zuverlässig abgeschaltet, sobald relevanter Eisansatz erkannt wird oder das Eiserkennungssystem nicht funktionsfähig ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das von Senvion verwendete Eiserkennungssystem dem Stand der Technik entspricht und die Felddaten dafür sprechen, dass mit vorliegenden Einstellungen bzw. mit vorliegenden Parametern eine Eisdicke erkannt wird, die geringer ist als die kritische Eisdicke (siehe Kap. 3.5).

Mit den Vorgaben des Herstellers ist eine zuverlässige Einstellung und Justierung des Eiserkennungssystems gegeben. Eine weitere ortsspezifische Begutachtung oder Ab-

nahme von Sachverständigen ist nicht erforderlich. Außerdem sind die von Senvion
eingesetzten Maßnahmen zum Wiederanfahren der WEA als sicher einzustufen.

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

8 Dokumente und Literaturverzeichnis

8.1 Geprüfte Dokumente

- /1/ Senvion GmbH. Bericht zur Gutachtenerstellung Maßnahmen bei Eisansatz Position 1,2,4 gemäß Angebot, Dok.: U-0.0-SL.ST.70-A-A, Datum: 2015-08-30
- /2/ Senvion GmbH. Bericht zur Gutachtenerstellung Maßnahmen bei Eisansatz Position 3 gemäß Angebot, Dok.: U-0.0-SL.ST.70-B-B, Datum: 2015-11-03
- /3/ Senvion GmbH. Bericht zur Gutachtenerstellung Maßnahmen bei Eisansatz Position 3 Weekly Plots, Anhang zu Dok.: U-0.0-SL.ST.70-B-A
- /4/ Senvion GmbH. Blade Ice Melting Formula: Validation and Investigation, Dok.: UK-TN-036, 2015-06-11
- /5/ Senvion GmbH. Senvion Control B MM 3xM 5M 6M Spezifikation Erkennung der Eisfreiheit mit Hilfe einer Abtaufmel, Dok.: V-2.1-EL.ST.70-S-D, 2014-08-14
- /6/ Senvion GmbH. Hochlaufvorgänge bei den Senvion WEA MM und 3XM, Hochlaufen_01.doc, Stand 2015-10-30. Übermittelt durch die Senvion GmbH mit Email vom 30.10.2015.
- /7/ Senvion GmbH. Festlegung des Schwellenwertes der Getriebedrehzahl beim Anfahrvorgang bei Eiserkennung mittels Anemometervergleich. Stand 11.11.2015. Übermittelt durch die Senvion GmbH mit Email vom 11.11.2015.
- /8/ TÜV NORD. Gutachtliche Stellungnahme zu Maßnahmen bei Eisansatz bei Senvion Windenergieanlagen, Bericht Nr. 8111675678-D Rev.2, Datum: 08.04.2015
- /9/ Senvion GmbH. Maßnahmen bei Eisansatz Windenergieanlage MM / 3.XM / 6M Dok. Nr. T-0.0-SL.ST.01-A-A, Stand 06.11.2014
- /10/ Senvion GmbH. Schulung und Lernkontrolle DE-OMT-T-8.0.0.1-VA-DE_Erkennung_von_Eisansatz
- /11/ Senvion GmbH. Falling ice, Annual wind turbine site assessment SD-0 0-ES.CH.01-A-E-EN and SD-0 0-ES.CH.01-B-A-EN, Datum: 28.11.2014

8.2 Literatur

- /12/ IEC 61400-1. Wind turbines – Part 1: Design requirements. Third Edition. 2005.
- /13/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.

- /14/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.
- /15/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. 2012.
- /16/ Storck, F. Influence of wind conditions under icing conditions on the result of a risk assessment. Winterwind international wind energy conference. Piteå 2015.
- /17/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2010.
- /18/ Seifert, H. Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. St. Pölten. 1999.
- /19/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.
- /20/ Seifert, H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate. Wilhelmshaven. 2003
- /21/ Makkonen, L. et. al. Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. Wind Engineering Volume 25, No. 1. 2001.
- /22/ Wallenius, T. et. al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. Winterwind. 2008.
- /23/ Lehtomäki, V. et. al. IcedBlades - Modelling of ice accretion on rotor blades in a coupled wind turbine tool. Winterwind. 2012.
- /24/ Hudecz, A. et. al. Experimental investigation of ice accretion on wind turbine blades. Winterwind. 2013.
- /25/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.
- /26/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.
- /27/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.
- /28/ Green Book. Methods for the determination of possible damage – first edition. Voorburg 1989.
- /29/ Deutscher Wetterdienst. Online Wetterlexikon, Stand: September 2014. Offenbach. 2014.

- /30/ Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen (Hrsg.): DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg 2011
- /31/ NASA: Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils, April 2000
- /32/ DIBt. Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen – Fassung Juni 2015
- /33/ TechnoCentre, Wind Energy TechnoCentre. Analysis of icing at the RAR wind farm – REV1. Kanada September 2012.
- /34/ TechnoCentre, Wind Energy TechnoCentre. 2012-2013 Ice Mesurement Campain and Evaluation of an Active De-icing System. Kanada März 2014.
- /35/ MERKBLATT für Vorhaben zur Errichtung von Windenergieanlagen hinsichtlich immissionsschutzrechtlicher und arbeitsschutzrechtlicher Anforderungen an die Antragsunterlagen in Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG (mit Anlagen A und B), Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord, Rheinland Pfalz, Oktober 2014