16.1.3 Windenergieanlagen: Sicherheitstechnische Einrichtungen und Vorkehrungen

Anlagen:

- D0154407-8_#_de_#_TB_ENERCON Eisansatzerkennung.pdf
- D0367983-6_#_de_#_TÜV_NORD_Gutachten_-_Eisansatzerkennung_nach_dem_Kennlinienverfahren.pdf
- D0260891-10_#_de_#_Blitzschutz.pdf
- D0884436-0_#_de_# Herstellererklärung - Anmerkungen zum Gutachten zur Eisansatzerkennung Rev. 5.pdf
- D0886203-0_#_de_# Bestätigung vom TÜV zur Herstellererklärung D0884436 z. Eisansatzerkennung Rev.5.pdf

Technische Beschreibung

ENERCON Eisansatzerkennung

ENERCON Windenergieanlagen

ENERCON
ENERGIE FÜR DIE WELT

Herausgeber

ENERCON GmbH ▪ Dreekamp 5 ▪ 26605 Aurich ▪ Deutschland
Telefon: +49 4941 927-0 ▪ Telefax: +49 4941 927-109
E-Mail: info@enercon.de ▪ Internet: http://www.enercon.de
Geschäftsführer: Hans-Dieter Kettwig
Zuständiges Amtsgericht: Aurich ▪ Handelsregisternummer: HRB 411
Ust.Id.-Nr.: DE 181 977 360

Urheberrechtshinweis

Die Inhalte dieses Dokuments sind urheberrechtlich sowie hinsichtlich der sonstigen geistigen Eigentumsrechte durch nationale und internationale Gesetze und Verträge geschützt. Die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments liegen bei der ENERCON GmbH, sofern und soweit nicht ausdrücklich ein anderer Inhaber angegeben oder offensichtlich erkennbar ist.

Die ENERCON GmbH räumt dem Verwender das Recht ein, zu Informationszwecken für den eigenen, rein unternehmensinternen Gebrauch Kopien und Abschriften dieses Dokuments zu erstellen; weitergehende Nutzungsrechte werden dem Verwender durch die Bereitstellung dieses Dokuments nicht eingeräumt. Jegliche sonstige Vervielfältigung, Veränderung, Verbreitung, Veröffentlichung, Weitergabe, Überlassung an Dritte und/oder Verwertung der Inhalte dieses Dokuments ist – auch auszugsweise – ohne vorherige, ausdrückliche und schriftliche Zustimmung der ENERCON GmbH untersagt, sofern und soweit nicht zwingende gesetzliche Vorschriften ein Solches gestatten.

Dem Verwender ist es untersagt, für das in diesem Dokument wiedergegebene Know-how oder Teile davon gewerbliche Schutzrechte gleich welcher Art anzumelden.

Sofern und soweit die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments nicht bei der ENERCON GmbH liegen, hat der Verwender die Nutzungsbestimmungen des jeweiligen Rechteinhabers zu beachten.

Geschützte Marken

Alle in diesem Dokument ggf. genannten Marken- und Warenzeichen sind geistiges Eigentum der jeweiligen eingetragenen Inhaber; die Bestimmungen des anwendbaren Kennzeichen- und Markenrechts gelten uneingeschränkt.

Änderungsvorbehalt

Die ENERCON GmbH behält sich vor, dieses Dokument und den darin beschriebenen Gegenstand jederzeit ohne Vorankündigung zu ändern, insbesondere zu verbessern und zu erweitern, sofern und soweit vertragliche Vereinbarungen oder gesetzliche Vorgaben dem nicht entgegenstehen.

Dokumentinformation

Dokument-ID	D0154407-8
Vermerk	Originaldokument

Datum	Sprache	DCC	Werk / Abteilung
2020-01-10	de	DA	WRD Management Support GmbH / Technische Redaktion

Mitgeltende Dokumente

Der aufgeführte Dokumenttitel ist der Titel des Sprachoriginals, ggf. ergänzt um eine Übersetzung dieses Titels in Klammern. Die Titel von übergeordneten Normen und Richtlinien werden im Sprachoriginal oder in der englischen Übersetzung angegeben. Die Dokument-ID bezeichnet stets das Sprachoriginal. Enthält die Dokument-ID keinen Revisionsstand, gilt der jeweils neueste Revisionsstand des Dokuments. Diese Liste enthält ggf. Dokumente zu optionalen Komponenten.

Dokument-ID	Dokument
D0160588	Technische Beschreibung Gondelpositionierung bei Eisansatz
D0258603	Technische Beschreibung Windpark-Eisansatzerkennung
D0441885	Technische Beschreibung Blattheizung

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5

2 ENERCON Kennlinienverfahren 6
2.1 Funktionsweise 6
2.2 Sicherheit 7
2.3 Grenzen 7
2.4 Anpassung der Detektionszeit 7
2.5 Einfluss einer angehaltenen Windenergieanlage auf die Detektionszeit 7
2.6 Präventiver Halt nach Störungen 8

3 Anhalten der Windenergieanlage 9

4 Wiederanlaufen der Windenergieanlage 10
4.1 Priorität von Anhalten und Wiederanlaufen der Windenergieanlage 10
4.2 Manueller Wiederanlauf 10
4.3 Automatischer Wiederanlauf nach Tauwetter 11
4.4 Automatischer 6-Stunden-Neustart 12
4.5 Automatischer Wiederanlauf mit Blattheizung 14
4.6 Automatischer Wiederanlauf nach Windpark-Eisansatzerkennung 15

5 Parameter 17

Fachwortverzeichnis 20

1 Einleitung

An Rotorblättern einer Windenergieanlage kommt es bei bestimmten Witterungsverhältnissen zur Bildung von Eis-, Reif- oder Schneeablagerungen, welche den Wirkungsgrad reduzieren und die Lärm-Emission erhöhen. Durch diese Ablagerungen entsteht eine Unwucht, welche zu erhöhter Materialbelastung führt. Die Ablagerungen können so stark werden, dass von ihnen beim Herabfallen (unvermeidbarer Eisfall, wie von jedem hohen Gebäude) oder Wegschleudern (Eiswurf) Gefahren für Personen und Sachen ausgehen.

Um die Gefahren von Eiswurf zu reduzieren, wird in allen ENERCON Windenergieanlagen serienmäßig die Eisansatzerkennung nach dem ENERCON Kennlinienverfahren eingesetzt.

Das ENERCON Kennlinienverfahren ist ein integraler Bestandteil des ENERCON Betriebsführungssystems und kann nicht deaktiviert werden. Das ENERCON Kennlinienverfahren nutzt die in der Anlagensteuerung vorhandenen Sensoren. Alle benötigten Eingangsgrößen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Drehzahl, Leistung und Blattwinkel stehen dem ENERCON Kennlinienverfahren ständig zur Verfügung. Wird ein Fehler in der Sensorik festgestellt, wird die Windenergieanlage automatisch angehalten.

Dieses Dokument gibt eine Übersicht über das ENERCON Kennlinienverfahren, dessen Einfluss auf die Start- und Haltevorgänge der Windenergieanlage und ist gültig für ENERCON Windenergieanlagen mit folgenden Steuerungstypen:

- CS48, CS82, CS101, CS126, EP3-CS-02, EP4-CS-01

2 ENERCON Kennlinienverfahren

2.1 Funktionsweise

Bei Rotorblättern werden hochwertige aerodynamische Profile eingesetzt, die in einem weiten Betriebsbereich einen optimalen Wirkungsgrad erzielen. Die aerodynamischen Eigenschaften dieser Profile reagieren sehr empfindlich auf Kontur- und Rauheitsänderungen durch Eisansatz. Die daraus resultierende signifikante Änderung des Betriebskennfelds der Windenergieanlage (Zusammenhang von Wind/Drehzahl/Leistung/Blattwinkel) wird vom Eisansatzerkennungssystem genutzt. Jede Windenergieanlage verfügt über eine Standard-Betriebskennlinie, welche während des Betriebs durch einen selbstlernenden Algorithmus automatisch an den jeweiligen Standort angepasst wird. Dazu werden bei Außenlufttemperaturen > +2 °C, witterungsgeschützt heckseitig unterhalb der Gondel gemessen, die anlagenspezifischen Betriebszusammenhänge (Wind/Leistung/Blattwinkel) als Langzeit-Mittelwerte erfasst. Bei Außenlufttemperaturen ≤ +2 °C werden die aktuellen Betriebsdaten mit den Langzeit-Mittelwerten verglichen, da es in diesem Temperaturbereich zu Eisansatz an den Rotorblättern kommen kann.

Dazu wird über die anlagenspezifische Wind-Leistungs- und Wind-Blattwinkelkennlinie ein empirisch ermitteltes Toleranzband gelegt. Dieses basiert auf Simulationen, Versuchen und mehrjähriger Erfahrung an einer Vielzahl von Windenergieanlagen der unterschiedlichen Baureihen. Wenn die Betriebsdaten von Leistung oder Blattwinkel im Rahmen einer gleitenden Mittelung außerhalb des Toleranzbands liegen, wird die Windenergieanlage mit dem Hauptstatus `14:XX Eisansatz` angehalten (Trudelbetrieb).

Die Art der Abweichung vom Toleranzband wird ebenfalls ausgewertet und in Form eines Zusatzstatus angezeigt.

Wenn die gemessene mittlere Leistung unterhalb des Leistungsfensters liegt, deutet dies auf Eisansatz an den Rotorblättern hin. Die Windenergieanlage wird dann mit dem Status `14:11 Eisansatz : Rotor (Leistungsmessung)` angehalten (Trudelbetrieb).

Bei Eisansatz an den Rotorblättern stellen sich im Regelbereich kleinere Blattwinkel ein als bei eisfreien Rotorblättern. Wenn der gemessene mittlere Blattwinkel unterhalb des Blattwinkelfensters liegt, deutet dies auf Eisansatz an den Rotorblättern hin. Die Windenergieanlage wird dann mit dem Status `14:13 Eisansatz : Rotor (Blattwinkelmessung)` angehalten (Trudelbetrieb).

Zeit bis zum Anhalten

Das Toleranzband ist relativ schmal. Deshalb erfolgt das Anhalten der Windenergieanlage erst nach Ablauf der Eisansatz-Detektionszeit (Kap. 2.4, S. 7). Die bis dahin entstandene Dicke der Eisschicht führt nicht zu einer Gefährdung der Umgebung. Auch im eisfreien Betrieb liegen regelmäßig einzelne Betriebspunkte außerhalb der Toleranz. Dies führt jedoch durch die gleitende Mittelung üblicherweise nicht zum Anhalten.

2.2 Sicherheit

Die Betriebssicherheit der Eisansatzerkennung nach dem ENERCON Kennlinienverfahren ist sehr hoch. Über voneinander unabhängige Temperatursensoren auf der Unterseite der Gondel und am Turmfuß wird ein eventueller Ausfall einer dieser Temperatur-Messstellen überwacht.

Alle relevanten Messgrößen der Windenergieanlage werden permanent durch die Steuerung auf Plausibilität überprüft. Gegebenenfalls werden unplausible Messwerte von der Steuerung aus Sicherheitsgründen als Eisansatz interpretiert, auch wenn kein Eisansatz vorliegt.

Das ENERCON Kennlinienverfahren kann Eisansatz auch dann erkennen, wenn von externen Eisansatzerkennungssystemen noch kein Eisansatz erkannt wurde.

2.3 Grenzen

Da sich der Rotor für das ENERCON Kennlinienverfahren drehen und die Windenergieanlage Leistung produzieren muss, kann dieses Verfahren im Stillstand keinen Eisansatz erkennen. Bei Windgeschwindigkeiten unterhalb von 3 m/s vermindert sich die Empfindlichkeit des Verfahrens. Bei Windgeschwindigkeiten oberhalb von 3 m/s gibt es keine Einschränkungen.

Wenn der Rotor anläuft, kann es bereits zum Eisfall/Eiswurf kommen. Da sich der Rotor jedoch lediglich mit einer geringen Geschwindigkeit dreht, wird das Eis nicht weggeschleudert, sondern fällt herunter, wie bei anderen hohen Bauwerken auch.

2.4 Anpassung der Detektionszeit

Die Detektionszeit – der Zeitraum zwischen der ersten Abweichung vom Toleranzband bis zum Anhalten der Windenergieanlage – wird wie folgt gebildet:

- Alle 60 Sekunden, in der im Mittel eine Abweichung vorliegt, wird ein Zähler um 1 auf den Wert von P4112 (Kap. 5.3, S. 18) hochgezählt. Bei Erreichen des dort eingestellten Zählerstands hält die Windenergieanlage mit einer der folgenden Statusmeldungen an:
  `14:11 Eisansatzerkennung : Rotor (Leistungsmessung)`
  `14:13 Eisansatzerkennung : Rotor (Blattwinkelmessung)`
- Alle 60 Sekunden, in der im Mittel keine Abweichung vorliegt, wird der Zähler um 1 auf minimal 0 heruntergezählt.

Mit der Standardeinstellung des Parameters wird Eisansatz ausreichend zuverlässig erkannt. Je niedriger der Parameter eingestellt wird, desto schneller detektiert die Steuerung der Windenergieanlage Eisansatz, was aber auch zu verfrühtem Anhalten führen kann. Für Windenergieanlagen an Standorten, an denen aufgrund der örtlichen Vereisungs- und Windbedingungen und der Nutzung der Umgebung ein erhöhtes Risiko durch Eiswurf zu befürchten ist, kann die Einstellung des Parameters reduziert werden.

2.5 Einfluss einer angehaltenen Windenergieanlage auf die Detektionszeit

Zusätzlich zu der beschriebenen Funktion der Detektionszeit werden die Zähler für den Status `14:11` und `14:13` bei möglichem Eisansatz und stillstehender Windenergieanlage langsam erhöht. Da die Eisanwachsrate bei stehendem Rotor geringer ist als bei laufendem, erreichen die Zähler erst nach 3 Stunden einen Wert, der 3 Minuten unterhalb der eingestellten Detektionszeit liegt. Wenn die Windenergieanlage jetzt startet, ist da-

durch die Detektionszeit der Eisansatzerkennung je nach Dauer des Stillstands auf minimal 3 Minuten verkürzt. Die Anlagensteuerung detektiert schnell möglichen Eisansatz, und die Windenergieanlage hält unmittelbar wieder an.

2.6 Präventiver Halt nach Störungen

Auch bei längerem Stillstand der Windenergieanlage aufgrund einer Störung besteht bei Temperaturen unter +2 °C und entsprechend hoher Luftfeuchtigkeit die Möglichkeit, dass die Rotorblätter vereisen. Wird die Windenergieanlage dann durch die Fernsteuerung neu gestartet, besteht das Risiko von Eiswurf. Die Wurfweite des Eises hängt dabei u. a. stark von der Drehzahl der Windenergieanlage und damit von der zum Zeitpunkt des Wiederanlaufs vorherrschenden Windgeschwindigkeit ab.

Um dieses Risiko zu minimieren, ermittelt die Steuerung die Dauer des Stillstands in Folge einer Störung. Beruhend auf Erfahrungswerten von ENERCON für Standorte im Mittelgebirge läuft die Windenergieanlage bis zu einer Stillstandsdauer von 2 Stunden und 59 Minuten nach einem Störungsreset wieder selbstständig an. Erreicht oder überschreitet die Stillstandsdauer 3 Stunden, läuft die Windenergieanlage nach dem Reset der Störung nicht automatisch wieder an, wenn die gleitende, mittlere Windgeschwindigkeit über 10 Minuten größer als 5 m/s ist.

Diese Funktion wird wie folgt realisiert: Bei einer Störung wird bei möglichem Eisansatz der Zähler für den Status `14:16 Eisansatzerkennung : Anlage praeventiv gestoppt` erhöht. Nach 3 Stunden erreicht der Zähler den vorgegebenen Wert von 180 Minuten und wird dann automatisch nochmal um weitere 5 auf 185 Minuten erhöht. Wenn die Windenergieanlage jetzt neu gestartet wird, wird bei einem 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit größer 5 m/s ein automatischer Wiederanlauf durch den Status `14:16` verhindert.

Wenn die mittlere Windgeschwindigkeit jedoch unterhalb von 5 m/s liegt, läuft die Windenergieanlage zunächst wieder an und beginnt, den Zähler für den Status `14:16` im Minutentakt zu senken. Da der Zähler in den ersten 5 Minuten größer 180 ist, wird weiterhin die Windgeschwindigkeit beobachtet. Wenn die mittlere Windgeschwindigkeit innerhalb dieser Zeit auf über 5 m/s ansteigen sollte, wird die Windenergieanlage wieder angehalten. Erst wenn der Zähler unter 180 Minuten gesunken ist, bleibt die Windenergieanlage auch bei Windgeschwindigkeiten über 5 m/s in Betrieb.

Der Zähler für den Status `14:16` wird während des Betriebs der Windenergieanlage weiterhin im Minutentakt gesenkt und erreicht somit erst nach 3 Stunden den Wert 0. Wenn die Windenergieanlage in der Zwischenzeit erneut eine Störung haben sollte, wird der Zähler vom jeweiligen aktuellen Wert aus wieder hochgezählt und erreicht entsprechend früher den Wert von 180 Minuten.

Der Status `14:16` wird automatisch quittiert, wenn der automatische Neustart nach Vereisung (Kap. 5.1, S. 17) eingeschaltet ist und der Timer für möglichen Eisansatz wieder auf 0 steht. Eventuelles Eis ist dann aufgrund von Außentemperaturen oberhalb von +2 °C abgetaut, sodass die Windenergieanlage gefahrlos starten kann.

Der Status `14:16` wird nur generiert, wenn der automatische Neustart während der Vereisung (Kap. 5.2, S. 17) ausgeschaltet ist. Wenn der automatische Neustart während der Vereisung eingeschaltet ist, wird der Zähler für den Status `14:16` bei einer Störung nicht hochgezählt und somit der Status `14:16` nicht generiert, da sich die Windenergieanlage an einem unkritischen Standort befindet.

Der präventive Halt nach Störungen kann über den Parameter 4115 (Kap. 5.4, S. 18) ein- oder ausgeschaltet werden.

3 Anhalten der Windenergieanlage

Erkennt das Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz, wird die Windenergieanlage angehalten (Trudelbetrieb). Zusätzlich erfolgt eine Signalisierung an ENERCON SCADA.

Je nach Parametrierung kann die Gondel in eine bestimmte Stellung positioniert werden. Optional wird die Blattheizung oder eine Eiswarnleuchte eingeschaltet.

4 Wiederanlaufen der Windenergieanlage

4.1 Priorität von Anhalten und Wiederanlaufen der Windenergieanlage

Das Anhalten der Windenergieanlage hat immer eine höhere Priorisierung, als das Wiederanlaufen der Windenergieanlage. Das bedeutet, dass die Windenergieanlage nicht wiederanlaufen kann, solange ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt, obwohl ein anderes Eisansatzerkennungssystem Eisfreiheit meldet.

4.2 Manueller Wiederanlauf

Ein manuell eingeleiteter Wiederanlauf nach einer Eisansatzerkennung ist nur direkt an der Windenergieanlage nach entsprechender Sichtkontrolle möglich. Der Eisreset kann durch den Taster am Steuerschrank oder über den Parkrechner vor Ort ausgelöst werden. Dabei obliegt dem Personal vor Ort die Verantwortung für die eventuell davon ausgehende Gefährdung.

Die Windenergieanlage kann nicht Wiederanlaufen, solange ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt.

4.3 Automatischer Wiederanlauf nach Tauwetter

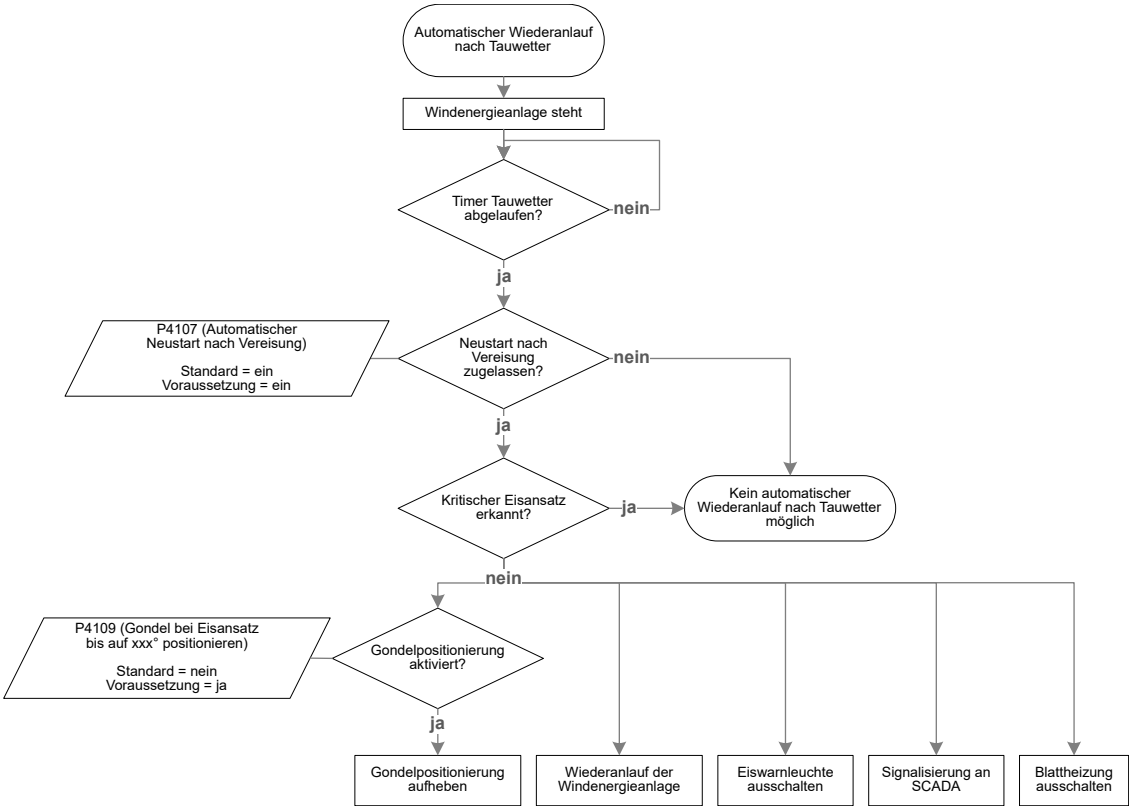

Abb. 1: Automatischer Wiederanlauf nach Tauwetter

Standardeinstellung:

- P4107 (Automatischer Neustart nach Vereisung) = ein

Voraussetzung:

✓ P4107 (Automatischer Neustart nach Vereisung) = ein

✓ Kein kritischer Eisansatz durch ein installiertes Eisansatzerkennungssystem erkannt

Wenn anhand der zurückliegenden Außentemperaturmessungen Tauwetterlage erkannt wird und ein automatischer Wiederanlauf bei Tauwetter parametriert ist, nimmt die Windenergieanlage den Betrieb wieder auf.

Wenn ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt, ist der automatische Wiederanlauf nach Tauwetter nicht möglich.

Tab. 1: Automatischer Wiederanlauf nach Tauwetter

Außentemperatur in °C	Dauer in Minuten
3	360
4	180
5	120
6	90
7	72
8	60

4.4 Automatischer 6-Stunden-Neustart

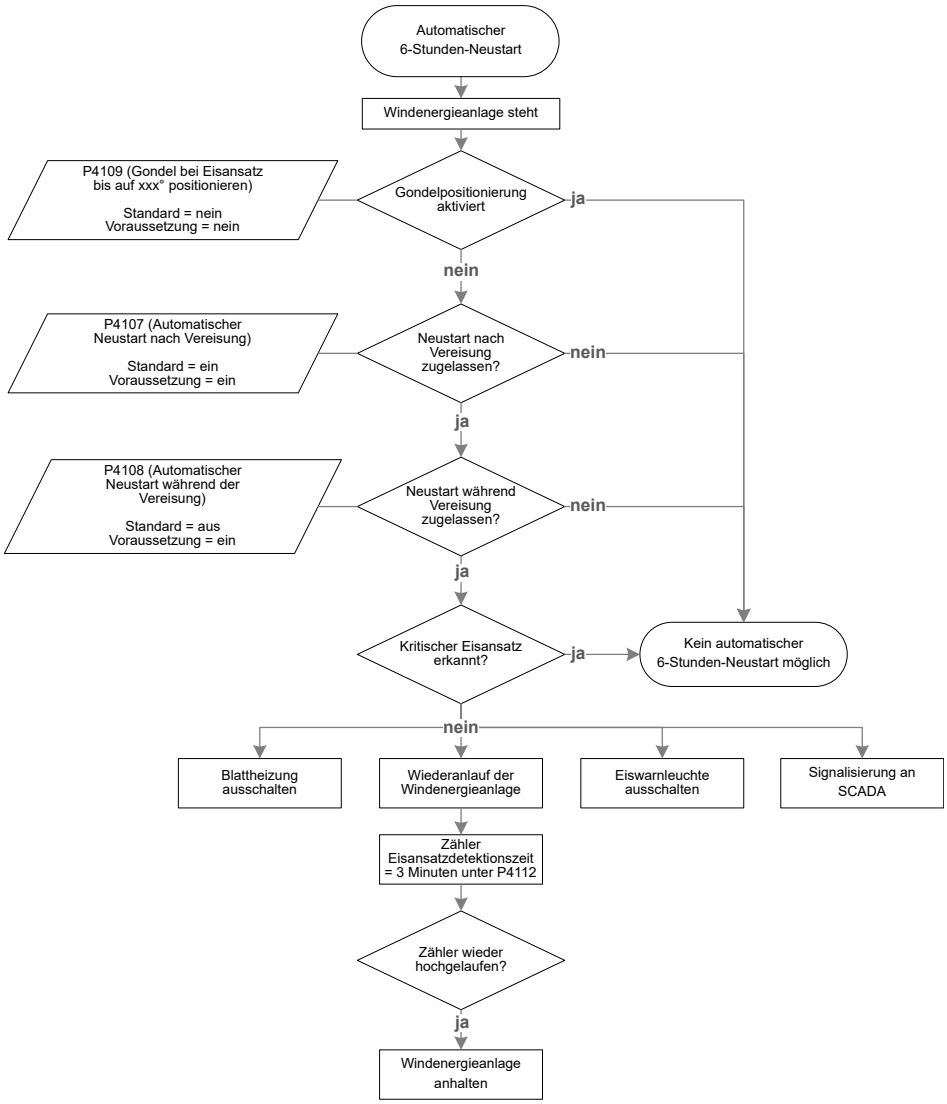

Abb. 2: Automatischer 6-Stunden-Neustart

Geltungsbereich:

- ENERCON Kennlinienverfahren

Standardeinstellung:

- P4107 (Automatischer Neustart nach Vereisung) = ein
- P4108 (Automatischer Neustart während der Vereisung) = aus

Voraussetzung:

✓ P4108 (Automatischer Neustart während der Vereisung) = ein

✓ P4107 (Automatischer Neustart nach Vereisung) = ein

✓ Kein kritischer Eisansatz durch ein installiertes Eisansatzerkennungssystem erkannt

Wenn der automatische 6-Stunden-Neustart parametriert ist, unternimmt die Windenergieanlage während der Vereisungsbedingungen (u.a. anhaltende Temperaturen unter +2 °C) im Abstand von 6 Stunden einen Startversuch.

Die Zähler der Eisansatz-Detektionszeit des ENERCON Kennlinienverfahrens werden hierbei auf einen definierten Wert gesetzt. Dieser Wert liegt 3 Minuten unter dem voreingestellten Wert der Eisansatz-Detektionszeit. Falls noch Eisansatz erkannt wird, wird die Windenergieanlage daraufhin nach wenigen Minuten wieder angehalten.

Die Windenergieanlage kann nicht Wiederanlaufen, solange ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt.

4.5 Automatischer Wiederanlauf mit Blattheizung

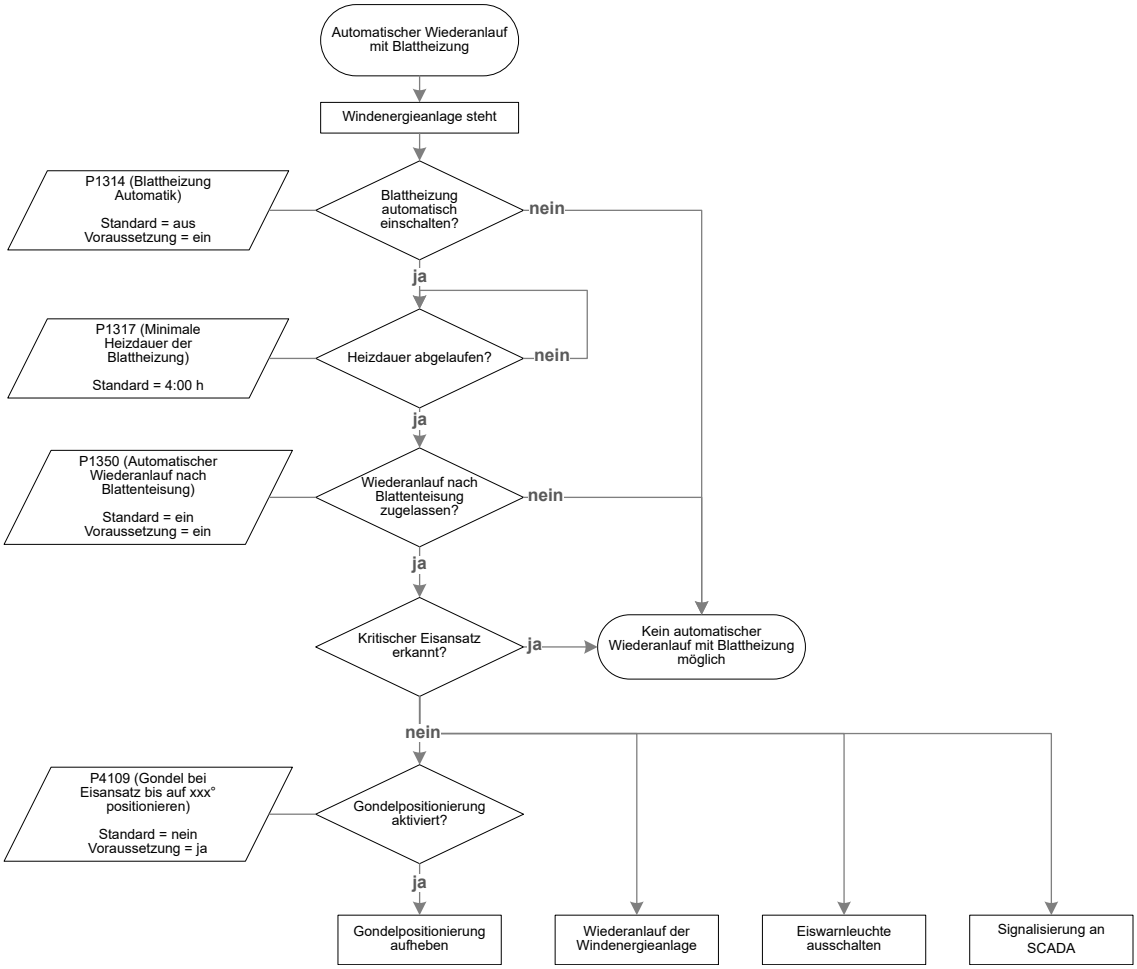

Abb. 3: Automatischer Wiederanlauf mit Blattheizung

Voraussetzung:

- ✓ P1314 (Blattheizung Automatik) = ein
- ✓ P1350 (Automatischer Wiederanlauf nach Blattenteisung) = ein
- ✓ Kein kritischer Eisansatz durch ein installiertes Eisansatzerkennungssystem erkannt

Wenn ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkannt hat und die Windenergieanlage angehalten wurde, wird die Blattheizung eingeschaltet.

Nachdem eine Blattenteisung durchlaufen wurde, nimmt die Windenergieanlage den Betrieb wieder auf.

Die Zähler der Eisansatz-Detektionszeit des ENERCON Kennlinienverfahrens werden nach dem Durchlauf der Blattenteisung auf einen definierten Wert gesetzt. Dieser Wert liegt 3 Minuten unter dem voreingestellten Wert der Eisansatz-Detektionszeit. Falls noch Eisansatz erkannt wird, wird die Windenergieanlage daraufhin nach wenigen Minuten wieder angehalten.

Dieser Funktion ist auch unter Vereisungsbedingungen möglich.

Die Windenergieanlage kann nicht Wiederanlaufen, solange ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt.

Detaillierte Informationen können der technischen Beschreibung entnommen werden:

- D0441885 „Technische Beschreibung Blattheizung“

4.6 Automatischer Wiederanlauf nach Windpark-Eisansatzerkennung

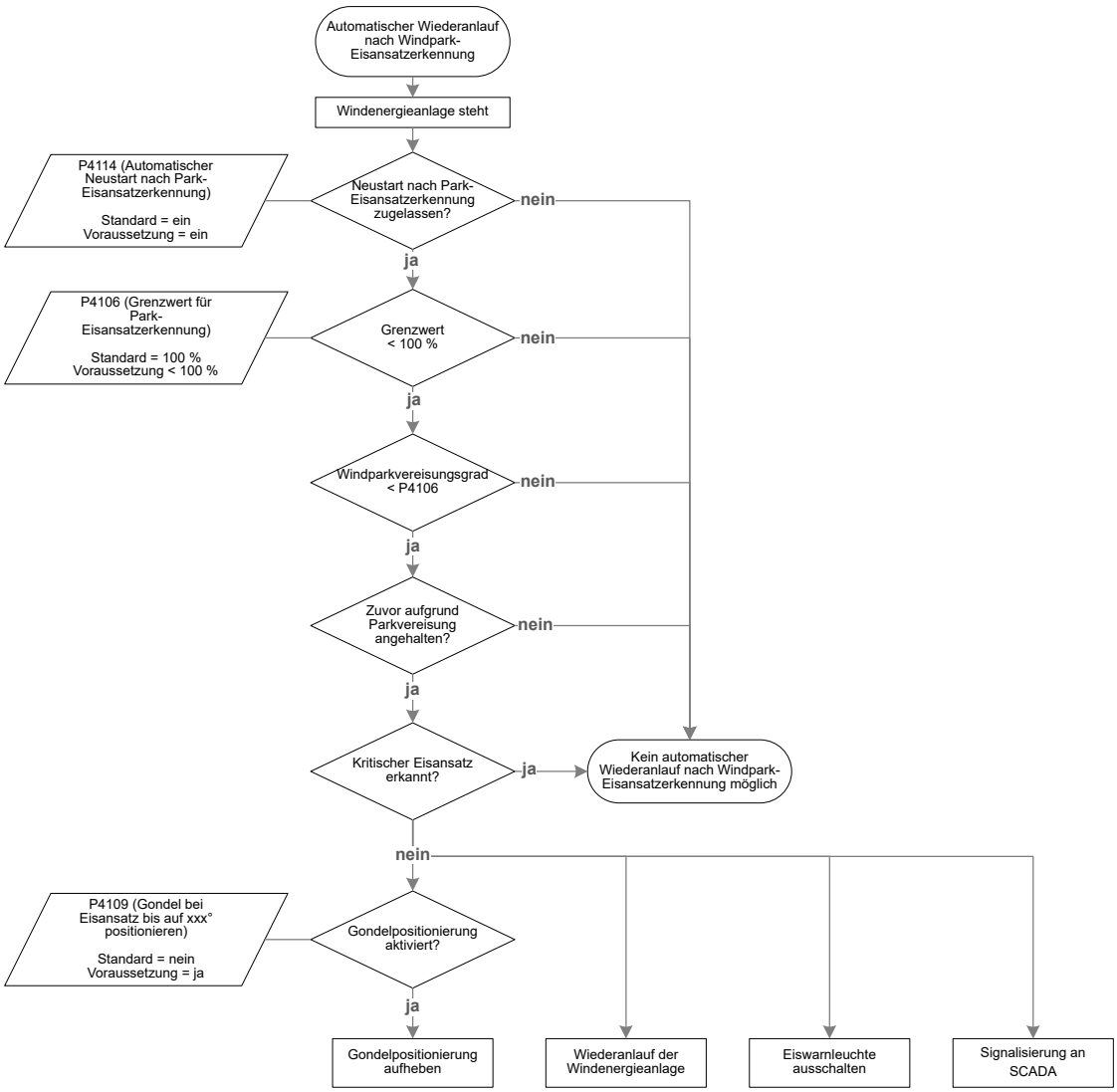

Abb. 4: Automatischer Wiederanlauf nach Windpark-Eisansatzerkennung

Standardeinstellung:

- P4114 (Automatischer Neustart nach Park-Eisansatzerkennung) = ein
- P4106 (Grenzwert für Park-Eiserkennung) = 100 %

Voraussetzung:

✓ P4114 (Automatischer Neustart nach Park-Eisansatzerkennung) = ein

✓ P4106 (Grenzwert für Park-Eiserkennung) < 100 %

✓ Kein kritischer Eisansatz durch ein installiertes Eisansatzerkennungssystem erkannt

Wird an einer Windenergieanlage kein kritischer Eisansatz mehr erkannt und die entsprechende Statusmeldung zurückgesetzt, gibt die Windenergieanlage diese Meldung über ENERCON SCADA an alle Windenergieanlagen im Windpark ab. Jede Windenergieanlage löscht die entsprechende Information und berechnet erneut den Windparkvereisungsgrad. Wenn der Windparkvereisungsgrad niedriger als der an der jeweiligen Windenergieanlage eingestellte Wert ist, wird der Startvorgang, sofern die Windenergieanlage selbst keinen kritischen Eisansatz detektiert hat oder durch längeren Stillstand bei niedrigen Temperaturen präventiv stillstehen muss, eingeleitet.

Die Windenergieanlage kann nicht Wiederanlaufen, solange ein Eisansatzerkennungssystem kritischen Eisansatz erkennt.

Detaillierte Informationen können der technischen Beschreibung entnommen werden:

- D0258603 „Technische Beschreibung Windpark-Eisansatzerkennung“

5 Parameter

Die einzustellenden Werte der nachfolgenden Parameter werden von der zuständigen Genehmigungsbehörde oder dem Betreiber vorgegeben. Sie werden von ENERCON eingestellt und dokumentiert.

5.1 P4107: Automatischer Neustart nach Vereisung

Gibt an, ob die Windenergieanlage bei ausreichend hohen Außentemperaturen automatisch wieder starten darf. Dieser Parameter bezieht sich auf das ENERCON Kennlinienverfahren sowie die Eisansatzerkennung durch externe Systeme. Das Labko Eisansatzerkennungssystem ist hiervon ausgenommen und nutzt Paramter 3102 für den automatischen Neustart nach Vereisung.

Bei Softwareversionen bis einschließlich V5.90 (I/O-Board Steuerschrank 1) wird über diesen Parameter auch gesteuert, ob eine Windenergieanlage nach Beendigung der Blattenteisung automatisch wieder starten darf.

Einstellmöglichkeiten	Standard
ein/aus	ein

5.2 P4108: Automatischer Neustart während der Vereisung

Gibt an, ob die Windenergieanlage während der Vereisung im Abstand von 6 Stunden einen Startversuch unternehmen soll. Dieser Parameter kann nur aktiviert werden, wenn der automatische Neustart nach Vereisung aktiviert ist (P4107 = ein).

Mit diesem Parameter kann ein automatischer Wiederanlauf an unkritischen Standorten erreicht werden.

Einstellmöglichkeiten	Standard
ein/aus	aus

5.3 P4112: Eisansatz-Detektionszeit

Gibt an, wie viel Zeit der Windenergieanlage zur Detektion von Eisansatz zur Verfügung gestellt werden soll.

An der Empfindlichkeit des Eisansatzerkennungssystems ändert eine kürzere Detektionszeit nichts. Die Windenergieanlage reagiert lediglich früher, wenn das Toleranzband der Kennlinie verlassen wird. Somit besteht auch ein geringfügig höheres Risiko einer unberechtigten Abschaltung.

Bei einem automatischen Neustart während der Vereisung (Parameter 4108 = ein) oder bei einem Neustart nach erfolgter Enteisung durch die Blattheizung werden die Zähler für Status `14:11` bis `14:14` (Leistungs- und Blattwinkelmessungen) jeweils definiert zurückgesetzt. Dieser Wert liegt 3 Minuten unter dem voreingestellten Wert der Eisansatz-Detektionszeit. Falls noch Eisansatz vorliegt, wird die Windenergieanlage daraufhin nach wenigen Minuten angehalten. Dies geschieht unabhängig von der eingestellten Eisansatz-Detektionszeit.

Einstellmöglichkeiten	Standard
10 – 30 Minuten	Kritischer Standort: 15 Minuten Unkritischer Standort: 30 Minuten *Ausnahmen:* *Deutschland: 15 Minuten* *BeNeLux: 15 Minuten* *Österreich: 30 Minuten (Bestandsanlagen); 15 Minuten (Neuanlagen)*

Für Windenergieanlagen an Standorten, die nicht in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten (1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)) errichtet werden, muss die Eisansatz-Detektionszeit auf 15 Minuten eingestellt werden.

5.4 P4115: Präventive Eiserk. nach 3 Std. Störung

Gibt an, ob die Windenergieanlage bei möglichem Eisansatz nach einer länger als 3 Stunden dauernden Störung mit Status `14:16 Eisansatzerkennung: Anlage präventiv gestoppt` gestoppt bleibt.

Einstellmöglichkeiten	Standard
ein/aus	ein

5.5 Sensitivität der Eisansatzerkennung

Gibt an, mit welcher Sensitivität das Toleranzband des Eisansatzerkennungssystems (ENERCON Kennlinienverfahren) eingestellt ist.

Je höher die Sensitivität, desto geringere Eismengen werden als Eisansatz erkannt.

Die Standardeinstellung entspricht dem „TÜV Nord Gutachten – Eisansatzerkennung nach dem ENERCON Kennlinienverfahren“ (D0367983).

Einstellmöglichkeiten	Standard
Geringe Sensitivität[1]	Normale Sensitivität
Verringerte Sensitivität[1]	
Normale Sensitivität	
Erhöhte Sensitivität	
Hohe Sensitivität	

[1]Diese Einstellungen sind nur nach Standortbetrachtung und Risikobeurteilung möglich. Für Windenergieanlagen an Standorten, die nicht in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten (1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe)) errichtet werden, sind diese Einstellungen unzulässig.

Fachwortverzeichnis

Eisfall	Herabfallen von Eis bei angehaltener Windenergieanlage, das sich bei bestimmten Wetterlagen an den Rotorblättern bilden kann. Die fallenden Eisstücke können Sach- und Personenschäden bewirken.
Eiswurf	Abwurf von Eis bei drehendem Rotor, das sich bei bestimmten Wetterlagen an den Rotorblättern von Windenergieanlagen bilden kann.
Kritischer Eisansatz	Entstehung von Eis, das aufgrund seiner Aufprallenergie eine Gefahr für ungeschützte Personen darstellt, wenn es herabfällt oder weggeschleudert wird.
Trudelbetrieb	Betriebsart einer ENERCON Windenergieanlage, bei der sich die Rotorblätter in einem Rotorblattwinkel von in der Regel 60° (in der sogenannten Trudelstellung) befinden, wodurch sich die Windenergieanlage im Leerlauf befindet. Der Rotor dreht nur sehr langsam. Im Trudelbetrieb wird keine Energie erzeugt und die Rotordrehzahl wird überwacht. Bei hohen Windgeschwindigkeiten wird der Rotorblattwinkel erhöht, damit die maximale Trudeldrehzahl nicht überschritten wird.

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

Gutachten

Zur Bewertung der Funktionalität von Eiserkennungssystemen zur Verhinderung von Eisabwurf an ENERCON Windenergieanlagen:

Eisansatzerkennung nach dem ENERCON-Kennlinienverfahren

TÜV NORD Bericht Nr.: 8111 881 239 Rev. 5

Gegenstand der Prüfung: Eiserkennung durch das ENERCON Kennlinienverfahren

Anlagenhersteller: ENERCON
Dreekamp 5 F&E
26605 Aurich
Germany

Aufsteller der Nachweise: TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg
Germany

Dieser Prüfbericht umfasst 42 Seiten.

Rev.	Datum	Änderungen
0	18.11.2014	Erste Fassung
1	22.08.2016	Formale Änderungen, Spezifizierung der Detektionszeit
2	20.04.2017	Ergänzung E-141 EP4, Berücksichtigung von Weiterentwicklungen
3	13.06.2017	Ergänzende Betrachtung bei vorgegebenem min. Blattwinkel (Kap. 5.3.3)
4	06.02.2018	Kombination mit Labko Eissensor, Ergänzung von Trudeldrehzahlen
5	19.09.2018	Ergänzung von Anlagenvarianten, Änderung bzgl. zusätzlicher Eiserkennungssysteme

Inhalt

1 Einleitung 5
1.1 Ausgangssituation 5
1.2 Eisansatzerkennung nach dem Kennlinienverfahren 6
1.3 Gültigkeitsbereich 6
1.4 Beschreibung der Bewertungskette 7
1.4.1 Bewertungsmaßstäbe 7
1.4.2 Grenzen der Bewertung 7
1.4.3 Beschreibung der Vorgehensweise 7
2 Untersuchungen zur Eisdicke und zur Eiswurfweite 9
2.1 Bestimmung einer kritischen Eisdicke 9
2.1.1 Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf 9
2.1.2 Ermittlung eines kritischen Eisobjektes 13
2.1.3 Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes 16
2.2 Untersuchung zum Eisabwurf beim Leerlauf (Startbetrieb) 17
2.2.1 Festlegung der Randbedingungen für den Eisabwurf beim Leerlauf 17
2.2.2 Ermittlung der Eisabwurfweite für den Leerlauf 19
2.2.3 Bewertung und Zusammenfassung der Eisabwurfweite für den Leerlauf 23
2.2.4 Ergänzende Informationen zum Trudelbetrieb 24
3 Beschreibung des Eiserkennungsalgorithmus 25
3.1 Programmablauf 25
3.1.1 Prüfung des Programmablaufs auf Plausibilität 25
3.1.2 Prüfung von Lücken/Unsicherheiten im Programmablauf 25
3.2 Bewertung des Messprinzips beim ENERCON Eiserkennungsverfahren 25
3.3 Bewertung der Algorithmen beim Kennlinienverfahren 26
3.3.1 Messbericht Meteotest: „Performance of the ENERCON ice detection system“ 26
3.3.2 Beobachtungen und Bewertungen zum Messbericht Meteotest 26
3.3.3 Messung an der Anlage „WEA 2“ 27
3.4 Grenzen der Bewertungskette 28
3.4.1 Geschlossenheit der Bewertungskette und Schnittstellen 28
3.4.2 Repräsentativität der Messung 29

3.4.3 Unsicherheiten der Messung 29
3.4.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anlagen 29
3.5 Zusammenfassung der Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus 30
4 Bewertung der Bedingungen zum Wiederanfahren 31
4.1 Anfahren/ Wiederanfahren durch manuellen Reset 31
4.2 Wiederanfahren nach Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen 31
4.3 Wiederanfahren nach erkannter Vereisung bei gesetztem Status „Vereisung möglich“ 31
4.4 Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten 32
5 Einbindung in das Betriebsführungssystem der Anlagen 34
5.1 Verwendete Technik 34
5.2 Bewertung der Einbindung ins Betriebsführungs- und Sicherheitssystem 34
5.3 Bewertung von Zusatzfunktionen 34
5.3.1 Gondelpositionierung 34
5.3.2 Park-Eisansatzerkennung 34
5.3.3 Funktionalität der Eisansatzerkennung bei Vorgabe eines minimalen Blattwinkels 35
5.3.4 Einstellung der Sensitivität der Eisansatzerkennung 36
6 Anforderungen 37
6.1 Anforderungen zur wiederkehrenden Prüfung 37
6.2 Parametrierung 37
6.3 Personalschulung 37
7 Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung 38
8 Dokumente und Literaturverzeichnis 39
8.1 Geprüfte Dokumente 39
8.2 Literatur 41
8.2.1 Literatur zu Kapitel 2.1 und 2.2 41

Tabellen

Tabelle 2.1: Gewähltes Eisobjekt. 12

Tabelle 2.2: Untersuchungsergeb. unter den geg. Randbedingungen (Würfel). 14

Tabelle 2.3: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisobjekte. Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J. 15

Tabelle 2.4: Variation der generierten Eisobjekte. Auswahlkriterium: kinetische Energie größer 40J und Windgeschwindigkeit kleiner gleich 20m/s. 16

Tabelle 2.5: Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke. 17

Tabelle 2.6: Max. Wurfweiten bei Eisabwurf Leerlauf (3m/s). 20

Tabelle 2.7: Maximale Wurfweiten bei Eisabwurf Leerlauf (5m/s). 21

Tabelle 2.7: Maximale Trudeldrehzahl 24

Abbildungen

Abbildung 1: Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel 12

Abbildung 2: Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (E-82, 78,0m Nabenhöhe) 14

Abbildung 3: Treffer Eisabwurf (Würfel) Leerlauf, Windgeschwindigkeit 3m/s. ENERCON E-82, Nabenhöhe 138,0m (Rotorradius schwarz gestrichelt, Gesamthöhe rot gestrichelt) 22

Abbildung 4: Treffer Eisabwurf (144 generierte Eisobjekte) Leerlauf, Windgeschwindigkeit 3m/s. ENERCON E-82, Nabenhöhe 138,0m (Rotorradius schwarz gestrichelt, Gesamthöhe rot gestrichelt) 22

Abbildung 6: Übersicht der aufgezeichneten Signale während der gesamten Messperiode für WEA 10 ohne RBH 28

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen, die in Regionen mit Temperaturen unter +2°C aufgestellt werden, können bei ungünstigen Bedingungen Eis ansammeln. Aus der dann entstehenden Eisschicht können sich durch Abtauen oder Blattverformung Eisbrocken ablösen, die im Betrieb der Anlage vom Rotorblatt abgeworfen werden (Eisabwurf) 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 (Eisabfall), 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, das Sensorsignal auszuwerten und daraus 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,

- sicherheitstechnisch 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 Eisansatzerkennung nach dem Kennlinienverfahren

Das ENERCON Eiserkennungsverfahren ist ein Kennlinienverfahren und unterteilt in die Erkennung über die Leistung und die Erkennung über den Blattwinkel:

Voraussetzung zur Aktivierung des Verfahrens ist eine Unterschreitung der direkt an der Windenergieanlage gemessenen Außentemperatur unter einen kritischen Schwellenwert (2°).

Die von der Windenergieanlage erbrachte elektrische Leistung wird mit 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 kontrolliert abgeschaltet.

Im Volllastbereich wird die Anlage ggf. auch mit vereisten Rotorblättern die volle elektrische Leistung erbringen, so dass anhand dieses Parameters keine Vereisung mehr zu erkennen ist. Die Anlage wird bei Erreichen der vollen elektrischen Leistung unter Anwendung des Regelalgorithmus die Rotorblattwinkel zur Leistungs- und Drehzahlregelung verstellen. Deshalb wird neben den Leistungskennwerten auch der Rotorblattwinkel mit den Referenzwerten des unvereisten Produktionsbetriebs bei gleicher Windgeschwindigkeit verglichen. Bei Abweichung im anliegenden Rotorblattwinkel gegenüber dem Referenzwert wird von einer Veränderung der aerodynamischen Beiwerte der Rotorblätter aufgrund von Vereisung ausgegangen und die Anlage wird kontrolliert abgeschaltet.

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

Mit dieser Methode 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 Gültigkeitsbereich

Dieses Gutachten ist gültig für alle ENERCON Windenergieanlagen, die in der Produktübersicht /19/ aufgeführt wurden, sowie die folgenden Enercon WEA:

E-53 E2, E-115 EP3, E-126 EP3, E-138 EP3 / E-138 EP3 E2, E141 EP4.

1.4 Beschreibung der Bewertungskette

1.4.1 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“.

1.4.2 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.

1.4.3 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 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 zur Bewertung 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 ENERCON Produktspektrums, um eine Eisdicke festzulegen, die für alle Anlagen der Produktübersicht /14/ als kritisch einzustufen ist. Diese Eisdicke wird bei der Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus einbezogen.

2. **Untersuchung zu Eisabwurf beim Leerlauf**
   (s. Kap. 2.2) Diese Untersuchung hat zum Ziel, die Eiswurfweite beim Leerlauf vor dem Starten der Anlage zu untersuchen. Damit kann eine Aussage getroffen werden, ob die beim Leerlauf abgeworfenen Eisstücke weniger weit geworfen werden als der kritische Radius für Eisabfall beträgt und somit der Leerlauf der Anlage für das Thema Eisabwurf unkritisch ist.

3. **Analyse des Programmablaufs**
   (s. Kap. 3.1) Diese Untersuchung betrifft die Prüfung des Programmablaufes auf Plausibilität, Nachvollziehbarkeit und Lücken.

4. **Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus**
   (s. Kap. 3.3) Die Bewertung des Algorithmus basiert auf einem Messbericht und hat zum Ziel, Aussagen darüber zu treffen, ob der Algorithmus funktionsfähig ist und ob die in der Anlage eingestellten Schwellwerte und Parameter des Algorithmus 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 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 basieren auf den vorhandenen Typenzertifikaten der ENERCON-Anlagen, die bereits eine Bewertung der Zuverlässigkeit des Sicherheitssystems enthalten.

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 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.

2.1.1 Festlegung von Randbedingungen für den Eisabwurf

<u>Verwendetes Rechenmodell:</u>

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 /26/). Zur Modellierung des Winddrucks werden jedem Eisobjekt ein konstanter Widerstandsbeiwert C_W /40/ und eine konstante Projektionsfläche A zugeordnet.

Der zeitabhängige Verlauf des Eisabwurfs lässt sich mit einem dreidimensionalen Modell beschreiben (in Anlehnung an /23/):

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

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

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

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].

<u>Anlagenbezogene Randbedingungen:</u>

WEA-Typ: Aus dem Anlagenportfolio /19/ wurden drei WEA-Typen ausgewählt, die als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können (kleine, mittlere und große Anlage). Es wurde jeweils die kleinste Nabenhöhe ausgewählt, da diese nach unseren Untersuchungen für die Ermittlung der kritischen Eisdicke des Eisabwurfs konservativ ist.

- E-44 mit 45,0m Nabenhöhe, 44,0m Rotordurchmesser /19/
- E-82 mit 78,0m Nabenhöhe, 82,0m Rotordurchmesser /19/
- E-126 mit 135,0m Nabenhöhe, 127,0m Rotordurchmesser /19/

Drehzahl bei Eisabwurf: Für die Drehzahl wird jeweils die maximale Anlagendrehzahl berücksichtigt /19/.

- E-44 Rotordrehzahl 34,5U/min
- E-82 Rotordrehzahl 18U/min
- E-126 Rotordrehzahl 12,1U/min

Physikalische Randbedingungen:

Luftdichte:	Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /26/ zu 1,225kg/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. 1,27kg/m^3 (siehe unsere Untersuchungen /25/) zu einer höheren Aufprallgeschwindigkeit führt.
Windgeschwindigkeit:	Zur Festlegung der Windgeschwindigkeit wird in einem ersten Schritt die jeweilige anlagenbezogene Abschaltwindgeschwindigkeit (25,0m/s) auf Nabenhöhe (ohne Sturmregelung) zugrunde gelegt /19/.
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 /22/ zu 0,2 festgelegt.
Erdbeschleunigung:	Die Erdbeschleunigung wird zu 9,81m/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 wurden unter anderem die Anzahl und die Objektgeometrie der zugrunde gelegten Eisobjekte variiert.

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

Gewicht und Geometrie der Eisobjekte:	In Feldstudien /24/ 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 /24/ (geringe Relevanz, siehe vorherigen Absatz) auf 1,0kg (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. /36/, /37/) wird als zu betrachtendes Eisobjekt im ersten Schritt ein Würfel angesetzt (siehe Tabelle 2.1). 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 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 Luftwiderstands). Unter den genannten Aspekten wird der Abwurfwinkel zu 125° ca. 4Uhr festgesetzt (ausgehend von der 0:00Uhr Position im Uhrzeigersinn).

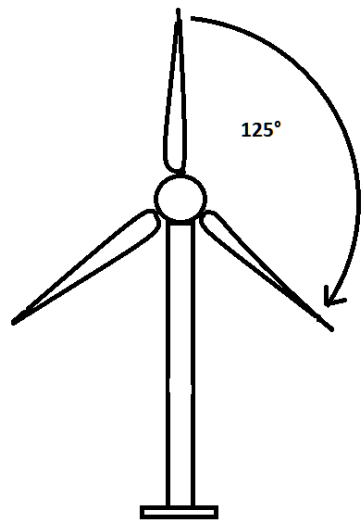

Abbildung 1: Abwurfwinkel Eisobjekt Würfel.

Masse [kg]	Dichte [kg/m³]	Form	mittlere Fläche [m²]	mittlerer C_W-Wert [-]
1,0	700	Würfel	0,013	1,11

Tabelle 2.1: Gewähltes Eisobjekt.

Randbedingungen zur Schadensbewertung:

Dichte des Eises:	Die Dichte des Eises wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /26/ zu 700kg/m^3 festgelegt.
Kritische Aufprallenergie:	Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke wird die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) gemäß /38/ auf 40J festgelegt. Die kritische Aufprallenergie (kinetische Energie) berechnet sich zu $$Ekin = 1/2 \cdot m \cdot v^2 .$$ mit Ekin: kinetische Energie [J], m: Masse des Eisobjekts [kg] und v: Aufprallgeschwindigkeit [m/s]. Die Masse wird hierbei vereinfacht punktförmig angenommen.

2.1.2 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 2.1.1) wurden so gewählt, dass eine maximale Aufprallgeschwindigkeit vorliegt (Geometrie Würfel, Abwurfwinkel, geringer Abstand Abwurfpunkt Boden).

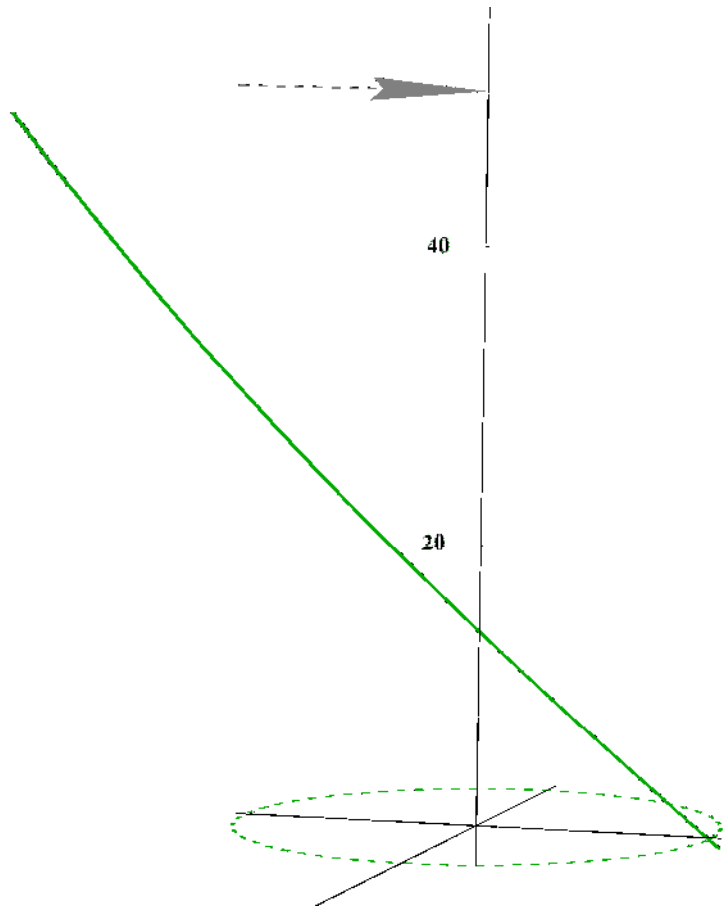

Abbildung 2: Flugbahn unter den gegebenen Randbedingungen – Eisobjekt Würfel (E-82, 78,0m Nabenhöhe)

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).

	E-44	E-82	E-126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	59,8	50,5	42,9
Kritische Eismasse [g]	22,4	31,3	43,6
Kritische Eisdicke [cm]	3,2	3,6	4

Tabelle 2.2: 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 /24/, /27/, /28/) sowie Modellrechnungen (Turbice /27/, /31/, /32/, /33/), 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: B; H; L: 10cm; 0,3cm bis 5cm; 5cm bis 20cm; Dichte 700kg/m³ /26/) 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 25m/s (Abschaltwindgeschwindigkeit ohne Sturmregelung /19/) kontinuierlich mit einer Schrittweite von 1m/s variiert. Für die Ermittlung der kritischen Eisdicke hat sich gezeigt, dass der oberen 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 2.1.1). In der Tabelle 2.3 sind die daraus resultierenden minimalen Eisdicken für die untersuchten WEA-Typen angegeben.

	E-44	E-82	E-126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	23,0	21,9	21,1
Masse [kg]	0,154	0,168	0,182
Dicke [cm]	1,1	1,2	1,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	25	25	25

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

Die Ergebnisse in Tabelle 2.3 zeigen, dass die ermittelte kritische Eisdicke mit einer hohen Windgeschwindigkeit (Abschaltwindgeschwindigkeit 25m/s) einhergeht. Gemäß Deutschem Wetterdienst (DWD) /39/ entspricht eine Windgeschwindigkeit von 25m/s einem „schwerem Sturm“, bei dem mit brechenden Bäumen und größeren Schäden an Häusern zu rechnen ist. Die Ergebnisse aus /25/ 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 /39/ ist bei einer Windgeschwindigkeit von 20m/s („Sturm“) immer noch mit brechenden Ästen von Bäumen (ver-

gleichbar mit der Gefährdung durch herabfallende Eisobjekte) und einem beschwerlichem Gehen zurechnen. Daraus ergeben sich die in Tabelle 2.4 dargestellten kritischen Eisdicken.

	E-44	E-82	E-126
Aufprallgeschwindigkeit [m/s]	21,1	20,4	20,0
Masse [kg]	0,182	0,196	0,210
Dicke [cm]	1,3	1,4	1,5
Windgeschwindigkeit [m/s]	20	20	20

Tabelle 2.4: Untersuchungsergebnisse: Variation der generierten Eisobjekte. 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 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 /25/, zu den in Tabelle 2.4 aufgeführten Dicken festgelegt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich somit bei der ENERCON E-44 (Nabenhöhe 45,0) zu 1,3cm ein.

2.1.3 Ermittlung einer kritischen Zeit zur Bildung eines kritischen Eisobjektes

In der Vergangenheit gab es zum Eiswachstum verschiedene Studien auf Basis der Simulationsprogramme TURBICE /27/, /31/, /32/, /33/ (WEA – Vereisung von Rotorblättern) und LEWICE /31/ (Luftfahrt – Vereisung von Tragflächen) sowie auf Basis experimenteller Windkanalversuche /27/, /31/, /34/.

Die Studien zeigen übereinstimmend die folgenden Ergebnisse:

- Die Eiswachstumsrate von Raureif (Eisdicke pro Zeiteinheit [mm/min]) nimmt mit zunehmender Größe der WEA (450kW bis 2MW) ab (0,75mm/min bis 0,45mm/min) /32/, /33/. Zusätzlich zu den Versuchsergebnissen /32/ wurde dieses Phänomen zunächst in einem Windpark beobachtet und daraufhin näher untersucht /32/.
- Raureif wächst insgesamt dicker auf als Klareis /31/, /34/ besitzt aber eine geringere Dichte /35/ (Raureif: 600 bis 900 kg/m^3, Klareis 900kg/m^3).

- Die Eiswachstumsrate liegt in einem Bereich von 0,45mm/min /32/ bis 3mm/min /31/.

Zusammenfassend wird die Eiswachstumsrate zu 1mm/min festgelegt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eiswachstumsrate mit zunehmender Größe der WEA abnimmt /32/, /33/ - gemäß der Erkenntnisse aus /32/ eher unterhalb von 1mm/min liegt. Die festgelegte Eiswachstumsrate gilt in Anlehnung an /34/ (Studie DTU Wind Energy 2013) für Klareis, Raureif bzw. einer Vereisungsmischung /34/.

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 abgeschaltet haben, um den Eisabwurf eines kritischen Eisobjekts zu verhindern.

	E-44	E-82	E-126
Detektionszeit [min]	13	14	15

Tabelle 2.5: Detektionszeiten bis zum Aufwachsen einer kritischen Eisdicke.

Auf Grund der sehr konservativ gewählten Eiswachstumsrate von 1mm/min kann für alle in der Produktübersicht /14/ aufgeführten ENERCON Windenergieanlagen, eine Detektionszeit von 15 Minuten angesetzt werden.

2.2 Untersuchung zum Eisabwurf beim Leerlauf (Startbetrieb)

Beim Start der ENERCON WEA vom Stillstandsbetrieb in den Leistungsbetrieb werden die WEA zunächst in einen Startbetrieb gefahren. Der Startvorgang ist insbesondere durch eine erhöhte Drehzahl gegenüber dem normalen Trudelbetrieb gekennzeichnet, sowie dadurch, dass die Windgeschwindigkeit beim Start unter möglichen Vereisungsbedingungen im Bereich von 3m/s bis 5m/s liegt (siehe 4.4).

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Leerlaufs (Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s) auf die Abwurfweiten bei Eisabwurf untersucht und mit der nicht vermeidbaren Gefährdung durch Eisabfall verglichen.

2.2.1 Festlegung der Randbedingungen für den Eisabwurf beim Leerlauf

<u>Anlagenbezogene Randbedingungen:</u>

WEA-Typ: Aus dem Anlagenportfolio /15/, /19/ wurden die folgenden WEA-Typen ausgewählt, die bzgl. der Anlagengröße und Drehzahl als repräsentativ für die Produktpalette herangezogen werden können.

- E-44 mit 45,0m und 55,0m Nabenhöhe, 44,0m Rotordurchmesser /19/

- E-48 mit 50,0m und 76,0m Nabenhöhe, 48,0m Rotordurchmesser /19/
- E-48 mit 60,0m und 73,0m Nabenhöhe, 53,0m Rotordurchmesser /19/
- E-82 mit 78,0m und 138,0m Nabenhöhe, 82,0m Rotordurchmesser /19/
- E-115 mit 92,0m und 149,0m Nabenhöhe, 115,0m Rotordurchmesser /19/
- E-126 mit 135,0m Nabenhöhe, 127,0m Rotordurchmesser /19/
- E-141 mit 129,0m und 159,0m Nabenhöhe, 141,0m Rotordurchmesser /15/

Für eine gute Abdeckung der jeweiligen Anlagenparameter wurden jeweils die höchste und die niedrigste Nabenhöhe für die Untersuchung des Leerlaufs (Startbetrieb) ausgewählt.

Drehzahl bei Eisabwurf: Für die Drehzahl wird die jeweilige Drehzahl des Leerlaufs berücksichtigt /15/, /20/:

- E-44 – 14U/min
- E-48 – 11U/min
- E-53 – 10U/min
- E-82 – 5U/min
- E-115 – 4U/min
- E-126 – 5U/min
- E-141 – 4U/min

<u>Physikalische Randbedingungen:</u>

Luftdichte: Die Luftdichte wird gemäß der GL Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen /26/ zu 1,225kg/m^3 festgelegt.

Windgeschwindigkeit: Für die Windgeschwindigkeit wird eine Einschaltwindgeschwindigkeit von 3m/s sowie 5m/s berücksichtigt (siehe /12/)

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 /22/ zu 0,2 festgelegt.

Erdbeschleunigung: Die Erdbeschleunigung wird zu 9,81m/s^2 festgelegt.

Randbedingungen zum Eisabwurf:

Gewicht und Geometrie der Eisobjekte:	Für Gewicht und Geometrie werden die zur Ermittlung der kritischen Eisdicke untersuchten Eisobjekte herangezogen. • Der Würfel (siehe 2.1.1, Tabelle 2.1, Ermittlung der kritischen Eisdicke „Schritt eins“) sowie • die 144 verschiedene Eisobjekte, mit den folgenden Randbedingungen: B; H; L: 10cm; 0,3cm bis 5cm; 5cm bis 20cm (siehe 2.1.2, Ermittlung der kritischen Eisdicke „Schritt zwei“). Hierbei werden die ermittelten kritischen Eisdicken als untere Grenze für die Auswahl der Eisobjekte mitberücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.2, Tabelle 2.4) Mit den gewählten Eisobjekten wird eine Vielzahl möglicher Eisobjekte abgedeckt.
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 Lage des Rotorblattes in der Rotorebene (Abwurfwinkel) wird in 10° Schritten von 0° bis 360° variiert.

2.2.2 Ermittlung der Eisabwurfweite für den Leerlauf

Die Eisabwurfweiten für den Leerlauf wurden auf Basis der unter Kapitel 2.2.1 genannten Randbedingungen und dem in Kapitel 2.1.1 eingeführten Rechenmodell für den Eisabwurf ermittelt. Die Ergebnisse der maximalen Wurfweite der untersuchten Eisobjekte sind in der Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7 dargestellt. Die Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Treffer der untersuchten Eisobjekte (Rotorradius schwarz gestrichelt, Gesamthöhe rot gestrichelt) beispielhaft für die ENERCON E-82 mit einer Nabenhöhe 138,0m und einer Windgeschwindigkeit von 3m/s.

WEA-Typ	Nabenhöhe [m]	Gesamthöhe [m]	Untersuchte Eisobjekte	Maximale Wurfweite [m]	Verhältnis: max. Wurfweite/Gesamthöhe [%]
E-44	45,0	67,0	144 Eisobjekte	79,3	118
E-44	45,0	67,0	Würfel	95,2	142
E-44	55,0	77,0	144 Eisobjekte	82,2	107

WEA-Typ	Naben-höhe [m]	Gesamthöhe [m]	Untersuchte Eisobjekte	Maximale Wurfweite [m]	Verhältnis: max. Wurfweite/Ge-samthöhe [%]
E-44	55,0	77,0	Würfel	99,0	129
E-48	50,0	74,0	144 Eisobjekte	73,6	100
E-48	50,0	74,0	Würfel	86,0	116
E-48	76,0	114,0	144 Eisobjekte	79,1	79
E-48	76,0	114,0	Würfel	94,2	94
E-53	60,0	86,5	144 Eisobjekte	77,1	89
E-53	60,0	86,5	Würfel	90,0	105
E-53	73,0	99,5	144 Eisobjekte	80,0	80
E-53	73,0	99,5	Würfel	94,5	95
E-82	78,0	119,0	144 Eisobjekte	76,8	65
E-82	78,0	119,0	Würfel	85,0	71
E-82	138,0	179,0	144 Eisobjekte	83,8	47
E-82	138,0	179,0	Würfel	97,0	54
E-115	92	149,9	144 Eisobjekte	95,1	63
E-115	92	149,9	Würfel	106,0	71
E-115	149	206,9	144 Eisobjekte	100,8	49
E-115	149	206,9	Würfel	115,5	56
E-126	135,0	198,0	144 Eisobjekte	118,5	60
E-126	135,0	198,0	Würfel	140,7	71
E-141	129	199,5	144 Eisobjekte	117,2	59
E-141	129	199,5	Würfel	134,6	67
E-141	159	229,5	144 Eisobjekte	119,6	52
E-141	159	229,5	Würfel	138,5	60

Tabelle 2.6: Maximale Wurfweiten bei Eisabwurf Leerlauf (Windgeschwindigkeit 3m/s).

WEA-Typ	Naben-höhe [m]	Gesamthöhe [m]	Untersuchte Eisobjekte	Maximale Wurfweite [m]	Verhältnis: max. Wurfweite/Ge-samthöhe [%]
E-44	45,0	67,0	144 Eisobjekte	79,5	119
E-44	45,0	67,0	Würfel	95,3	142
E-44	55,0	77,0	144 Eisobjekte	82,6	107
E-44	55,0	77,0	Würfel	99,0	129
E-48	50,0	74,0	144 Eisobjekte	73,8	100
E-48	50,0	74,0	Würfel	85,9	116
E-48	76,0	114,0	144 Eisobjekte	79,6	80
E-48	76,0	114,0	Würfel	94,2	94
E-53	60,0	86,5	144 Eisobjekte	77,3	89
E-53	60,0	86,5	Würfel	90,4	105
E-53	73,0	99,5	144 Eisobjekte	80,4	81
E-53	73,0	99,5	Würfel	94,5	95
E-82	78,0	119,0	144 Eisobjekte	77,0	65
E-82	78,0	119,0	Würfel	85,0	71
E-82	138,0	179,0	144 Eisobjekte	84,8	47
E-82	138,0	179,0	Würfel	97,1	54
E-115	92	149,9	144 Eisobjekte	95,3	64
E-115	92	149,9	Würfel	105,9	71
E-115	149	206,9	144 Eisobjekte	101,8	49
E-115	149	206,9	Würfel	115,7	56
E-126	135,0	198,0	144 Eisobjekte	119,7	60
E-126	135,0	198,0	Würfel	140,9	71
E-141	129	199,5	144 Eisobjekte	117,9	59
E-141	129	199,5	Würfel	134,7	68
E-141	159	229,5	144 Eisobjekte	120,8	53
E-141	159	229,5	Würfel	138,8	60

Tabelle 2.7: Maximale Wurfweiten bei Eisabwurf Leerlauf (Windgeschwindigkeit 5m/s).

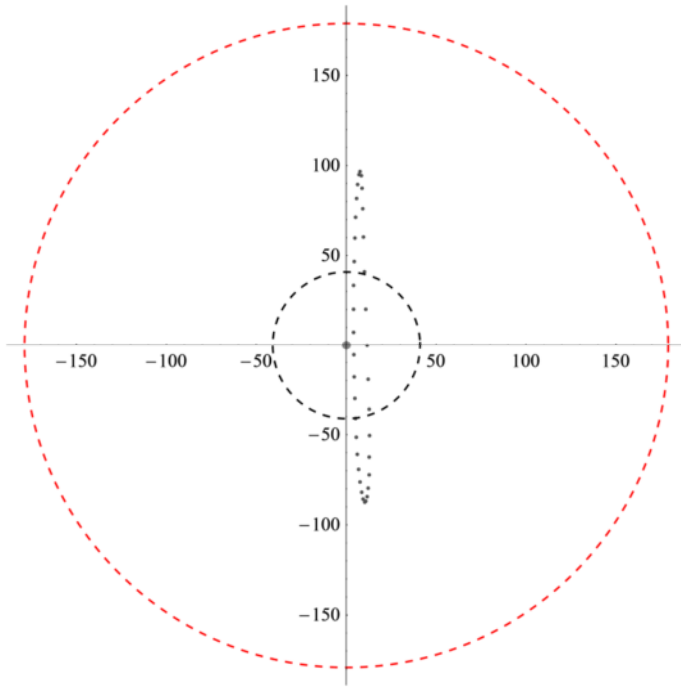

Abbildung 3: Treffer Eisabwurf (Würfel) Leerlauf, Windgeschwindigkeit 3m/s. ENERCON E-82, Nabenhöhe 138,0m (Rotorradius schwarz gestrichelt, Gesamthöhe rot gestrichelt)

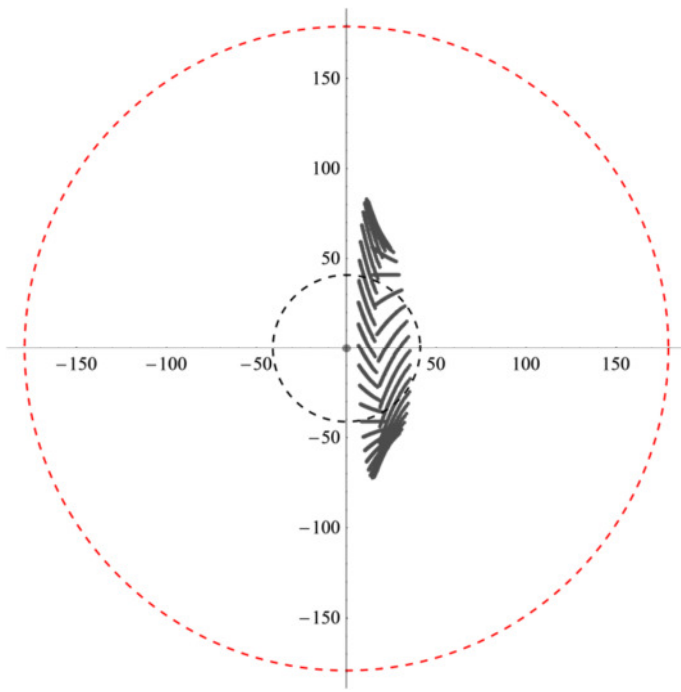

Abbildung 4: Treffer Eisabwurf (144 generierte Eisobjekte) Leerlauf, Windgeschwindigkeit 3m/s. ENERCON E-82, Nabenhöhe 138,0m (Rotorradius schwarz gestrichelt, Gesamthöhe rot gestrichelt)

Die Ergebnisse der maximalen Eisabwurfweiten beim Leerlauf für 3m/s bzw. 5m/s Windgeschwindigkeit in Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7 zeigen, dass der Würfel für alle untersuch-

ten WEA-Konfigurationen die größten Wurfweiten erzielt. Dies liegt u. a. an dem geringeren Luftwiderstand gegenüber flächigen Eisobjekten, er wird auf seiner Flugbahn weniger abgebremst. Die maximalen ermittelten Eisabwurfweiten für den Leerlauf liegen bei ca. 142% der Gesamthöhe der entsprechenden WEA (siehe Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7).

2.2.3 Bewertung und Zusammenfassung der Eisabwurfweite für den Leerlauf

Im Winter können Vereisungen (Eisansatz) an WEA bei Temperaturn um 0°C vorkommen. Eisabfall von Rotorblättern tritt dann nach jeder Vereisungswetterlage (Eisansatz) mit einsetzendem Tauwetter auf. Abgeschaltete WEA unterscheiden sich hierbei nicht wesentlich von anderen hohen Objekten wie Brücken oder Strommasten /29/. Ist kein System zur Eiserkennung und Abschaltung der WEA bei Eisansatz installiert, so werden die gebildeten Eisobjekte im Betrieb abgeworfen (Eisabwurf) und erzielen wesentlich weitere Flugweiten als bei stehender WEA (Eisabfall).

Die Beurteilung der Gefährdung durch Eisabfall (stehende WEA) ist standortspezifisch zu bewerten und unter anderem abhängig von den gefährdeten Schutzobjekten sowie den Windbedingungen am Standort. Zur ersten groben Abschätzung der Eisabfallweite kann die folgende empirische Gleichung nach Seifert /28/ herangezogen werden:

$$Eisabfallweite = Windgeschwindigkeit \cdot \frac{Rotordurchmesser/2 + Nabenhöhe}{15} \qquad /28/$$

Für die Abschätzung der möglichen maximalen Eisabfallweite bietet sich das 99,9% Quantil der Windgeschwindigkeitsverteilung am Standort an. Diese Windgeschwindigkeit ist hinreichend konservativ, da sie zu 99,9% nicht überschritten wird.

Auf Basis unserer derzeitigen Erfahrung mit standortspezifischen Untersuchungen (Risikobeurteilung Eisabfall) zum Eisabfall (>100 Projekte u.a. in Deutschland und Österreich) und den jeweils ermittelten maximalen Gefährdungsbereichen für Eisabfall, ist eine Gefährdung durch Eisabfall innerhalb eines Bereichs von ca. 75% bis 170% der Gesamthöhe der geplanten WEA möglich. Der Gefährdungsbereich für den Eisabfall ist standortspezifisch und unter anderem abhängig von den Windbedingungen (z. B. Schwachwind- oder Starkwindstandort) sowie dem geplanten WEA-Typ. Der maximal mögliche Gefährdungsbereich durch Eisabfall ist an Schwachwindstandorten kleiner als an Starkwindstandorten.

Für die untersuchten WEA ergeben sich die folgenden maximalen Eisabwurfweiten in Prozent der Gesamthöhe im Leerlauf zu (Drehzahl siehe Kapitel 2.2.1, Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s, siehe Kapitel 0, Tabelle 2.6 und Tabelle 2.7):

- E-44 – 142%
- E-48 – 116%
- E-53 – 105%
- E-82 – 71%
- E-115 – 71%
- E-126 – 71%
- E-141 – 68%

Die maximalen Eisabwurfweiten für die E-44, die E-48 und die E-53 liegen oberhalb des ermittelten minimalen Gefährdungsbereichs für Eisabfall (ca. 75% der Gesamthöhe, empirisch ermittelt). Für die E-82, die E-115 sowie die E-126 liegen die maximalen Eisabwurfweiten unterhalb des ermittelten minimalen Gefährdungsbereichs für Eisabfall.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass eine Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des Gefährdungsbereichs (Eisabfall) der WEA im Winter grundsätzlich vorliegen kann, stellt der untersuchte Betrieb des Leerlaufs (Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s) gegenüber dem Eisabfall (nach jedem Eisansatz eintretendes Ereignis) für die WEA-Typen E-44, E-48 sowie E-53 in Abhängigkeit des Standortes (Schwachwind- oder Starkwindstandort) eine mögliche zusätzliche Gefährdung dar.

Für die WEA E-82, E-115, E-126 sowie E-141, welche für die restlichen WEA der ENERCON Produktpallette /20/ als abdeckend angesehen werden können, stellt der untersuchte Betrieb des Leerlaufs (Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s) gegenüber dem Eisabfall (nach jedem Eisansatz eintretendes Ereignis) keine unzulässige zusätzliche Gefährdung dar.

2.2.4 Ergänzende Informationen zum Trudelbetrieb

Neben dem oben betrachteten Leerlauf (Startbetrieb, s. 2.2) gibt es z. Bsp. bei Windmangel, Störungen oder Eisansatzerkennung den sog. Trudelbetrieb bei geringer Drehzahl. Durch die langsame Bewegung (Trudeln) werden die Nabenlager weniger belastet als bei längerem Stillstand und eine Wiederaufnahme der Stromerzeugung bei ausreichendem Wind ist schneller möglich. Die Trudeldrehzahl ist abhängig vom Typ der Windenergieanlage und von der Windgeschwindigkeit.

- kein Wind = Rotor steht still
- schwacher Wind = niedrige Drehzahl bis max. Trudeldrehzahl
- viel Wind = max. Trudeldrehzahl

Der Blattwinkel beträgt im Trudelbetrieb mind. 60° (Fahnenstellung =92°). /16/

Windenergieanlage	Max. Trudeldrehzahl
E-44, E-48, E-53	5,0 U/min
E-70 E4, E-82 E2, E-82 E3, E-82 E4, E-92, E-103 EP2	3,5 U/min
E-101, E-101 E2, E-115, E-115 E2	3,0 U/min
E-112, E-126	2,5 U/min
E-126 EP4, E-141 EP4	2,5 U/min

Tabelle 2.8: Maximale Trudeldrehzahl

Eisabfall von einer abgeschalteten (trudelnden) WEA lässt sich nicht verhindern. Der potentielle Gefährdungsradius kann im Rahmen einer standortspezifischen Risikoanalyse ermittelt werden.

3 Beschreibung des Eiserkennungsalgorithmus

3.1 Programmablauf

3.1.1 Prüfung des Programmablaufs auf Plausibilität

Der Programmablauf wurde auf Basis des Dokuments /4/ geprüft und bewertet. Er ist in sich plausibel und kann durch den Vergleich von Leistungswerten und Blattwinkeln sowohl im Bereich der Nennleistung als auch darunter eine Vereisung erkennen.

Durch die Verwendung von Zählern wird verhindert, dass die Anlage während kurzer Vereisungsperioden –in denen die kritische Eisdicke nicht erreicht wird- sofort abschaltet. Die Anpassung der Leistungskurve an die Anlage vermeidet ein Abschalten bei zu starker Verschmutzung.
Da es bei Aktivierung der Einstellung „Automatischer Neustart während Vereisung“ zu einem Wiederanfahren einer vereisten Turbine -und somit zu Eisabwurf- kommen kann steht dieser Parameter als Default-Wert auf „aus“. Dadurch wird einen Neustart nur erlaubt, wenn eine Vereisung auf Grund der Vereisungsbedingungen nicht mehr möglich ist. Der Parameter „automatischer Neustart während Vereisung“ kann und darf erst nach schriftlicher Beauftragung durch den Betreiber und nur durch ENERCON-Mitarbeiter durch Eingabe eines persönlichen Servicecodes eingeschaltet werden.

3.1.2 Prüfung von Lücken/Unsicherheiten im Programmablauf

Für den Fall, dass eine Anlage längere Zeit stillsteht (auf Grund längerer Schwachwindperioden oder eines Defekts) und sich während dieser Zeit die Wetterbedingungen ändern, könnte es zu unbemerkten Vereisungen an der Anlage kommen. Dies geschieht von Erfahrungswerten ausgehend jedoch selten. Wenn die Anlage anschließend anfährt würden die Zähler der Eiserkennung mindestens 15 bzw. 30 min benötigen, um die Vereisung festzustellen und die Anlage zu stoppen. Um dem entgegen zu wirken und die Anlage bereits bei niedrigen Blattspitzengeschwindigkeiten zu stoppen wurde von ENERCON eine Funktion integriert, die die Zeit zur Erkennung von Vereisung nach Stillstandszeiten auf 3 min verringert /14/.

3.2 Bewertung des Messprinzips beim ENERCON Eiserkennungsverfahren

Das Messprinzip des Kennlinienverfahrens basiert auf der Änderung der aerodynamischen Eigenschaften der Blattprofile durch Eisansatz, welcher sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die Geometrie des Blattes so verändert, dass es zu einem signifikanten Verlust an aerodynamischer Performance kommt. Theoretisch ist das Kennlinienverfahren in der Lage, bereits eine erhöhte Rauigkeit der Oberfläche durch Raureif zu erkennen. Diese Aussage wird gestützt durch Veröffentlichungen wie /41/, in welcher ein hoher Verlust an Auftrieb bereits bei leichter Vereisung messtechnisch gezeigt wird. Der einzustellende Schwellwert ist deshalb so zu wählen, dass Fehldetektionen und somit unnötige Abschaltungen der WEA vermieden werden.

3.3 Bewertung der Algorithmen beim Kennlinienverfahren

Der Kern des Eiserkennungssystems ist ein im Regler der Anlage implementierter Algorithmus, der gemessene Signale (Leistung, Blattwinkel, …) verarbeitet und das Ergebnis mit einem Schwellwert vergleicht. Eine Überschreitung dieses Schwellwertes führt darauf hin zum Abschalten der Anlage.

Der Schwellwert kann dabei abhängig sein von den Eigenschaften der Anlage oder auch konstant sein und für jede Anlage den gleichen Wert annehmen. Im Fall des ENERCON Eiserkennungssystems liegt dieser Schwellwert für alle Anlagen bei 1.2m/s Windgeschwindigkeit.

Die detaillierte Beschreibung des Eiserkennungsalgorithmus befindet sich im Dokument /4/.

Es ist zu indizieren, dass eine kritische Eisdicke, wie sie in Kapitel 2.1 ermittelt wurde, durch Überschreitung dieses Schwellwertes erkannt wird. Zu diesem Zweck wurde der Messbericht /1/ eingereicht.

3.3.1 Messbericht Meteotest: „Performance of the ENERCON ice detection system“

Zentrales Dokument zur Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus ist der von Meteotest verfasste Bericht zur Vermessung einer ENERCON E-82 unter Vereisungsbedingungen im Februar 2014, /1/. Der Bericht enthält Ergebnisse einer Vermessungsperiode von 18 Tagen (20.1.2014 - 7.2.2014).

Die Bewertung des Eiserkennungssystems basiert auf den folgenden Informationen.

Ergebnisse zum Vereisungszustand der Blätter (genannt „instrumental icing“): Von einer auf der Gondel installierten Kamera wurden in regelmäßigen Zeitabständen Fotos der Blätter aufgenommen, welche dem TÜV NORD vorliegen. Aus diesen Aufnahmen wurde auf den Vereisungszustand geschlossen.

Ergebnisse zur athmosphärischen Vereisung (genannt „meteorological icing“): Diese Ergebnisse zeigen Zeitintervalle an, in denen es aufgrund der externen Bedingungen zu einem Anwachsen der Eisdicke kommen kann.

Ergebnisse des Signals des Eiserkennungssystems.

3.3.2 Beobachtungen und Bewertungen zum Messbericht Meteotest

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

- Trefferquote des Eiserkennungssystems

- Vor-Start-Betrieb 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.

Der Bericht zeigt, dass das Eisdetektionssystem mit einem Zeitanteil von 95% Eis an den Rotorblättern erkannt hat.

Aus den Aufzeichnungen ist ferner der Zeitverzug bis zur Eiserkennung nach Übergang in den leistungserzeugenden Betrieb zu erkennen. In diesem Leerlauf-Betrieb dreht sich der Rotor abhängig vom Typ und Windgeschwindigkeit mit entsprechender Drehzahl, so dass das Risiko von Eisabwurf besteht. Laut Bericht /1/ beträgt dieser Zeitverzug bis zu 0.7 Stunden. Der Auswertungsalgorithmus benötigt eine Dauer von zwar nur mindestens 3 Minuten, bevor Eis erkannt wird, jedoch ist anzunehmen, dass die Anlage während eines großen Zeitanteils der bis zu 0.7 Stunden noch keine Leistung erzeugt.

Aufgrund folgender Betrachtungen sind diese Phasen der Nicht-Detektierbarkeit als eher unkritisch einzustufen:

- Die Studie zur Abschätzung der Eisabwurfweite für den Leerlauf (Wind 3m/s, Drehzahl 5U/min) zeigt, dass die Eiswurfweite für diesen Modus geringer ist als die kritische Weite für Eisabfall.
- Üblicherweise steigt die Windgeschwindigkeit nicht derart schnell an, so dass nicht anzunehmen ist, dass Leerlauf der Anlage bei signifikant höheren Windgeschwindigkeiten auftritt.

Der dem TÜV NORD vorliegende Messbericht /1/ indiziert, dass das Eiserkennungssystem im Vollastbetrieb für Windgeschwindigkeiten über 12 m/s funktioniert und damit ebenfalls die Eiserkennung auf Basis des Pitchwinkels. Das gemessene Verhalten des Eiserkennungssystems stimmt mit dem spezifizierten Verhalten überein.

3.3.3 Messung an der Anlage „WEA 2“

Die Ergebnisse zur Messung an einer Anlage ohne RBH zeigen, dass die Anlage während der Vereisungszeit gestoppt ist (siehe Abbildung 5).

Die Messung an der Anlage ohne RBH lässt sich aufgrund der ungenauen Daten schlechter für die Bewertung verwenden als die Messung an der Anlage mit RBH.

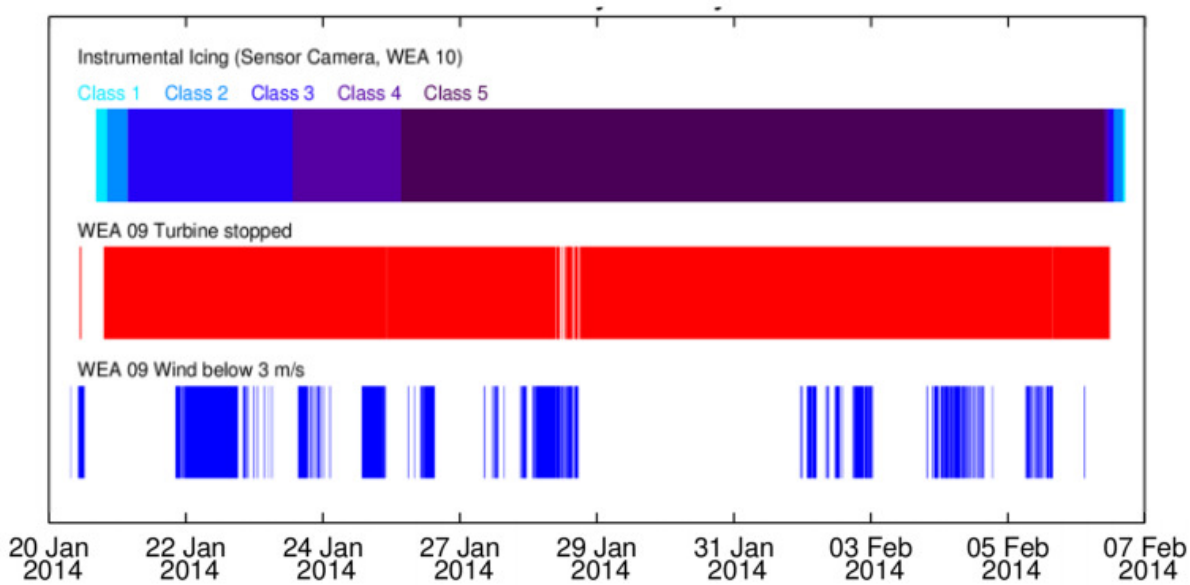

Abbildung 5: Übersicht der aufgezeichneten Signale während der gesamten Messperiode für WEA 09 ohne RBH.

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 zu bringen.

Die in Kapitel 2.1 ermittelte kritische Eisdicke für alle ENERCON Anlagen beträgt einerseits 13 mm. Auf der anderen Seite zeigt der Messbericht, dass für die Vereisungskategorie „light icing“ mit einer Zuverlässigkeit von 95% Eis erkannt wird.

Ein zentraler Punkt der Bewertungskette ist nun, diese Informationen zu verknüpfen.

Wie Fotoaufnahmen der Blätter zeigen, ist nur eine geringe Eisdicke bei Vereisungskategorie „light icing“ vorhanden. Es wird dabei angenommen, dass die auf dem Foto sichtbare Eisdicke nur wenige Millimeter beträgt und geringer ist als die kritische Eisdicke von 13 mm. Ferner ist eine zentrale Annahme, dass die (subjektive) Klassifizierung der Fotoaufnahmen in „instrumental icing“ Kategorien für alle anderen Zeitpunkten nach den gleichen Maßstäben durchgeführt wurde.

Zusätzlich wurde von ENERCON bestätigt, dass die in den vermessenen Anlagen eingestellten Schwellwerte zu Eiserkennung denen der eingereichten Spezifikation entsprechen.

3.4.2 Repräsentativität der Messung

Die Messung wurde über einen Zeitraum von 10 Tagen durchgeführt und betraf eine Periode mit hoher Vereisung. Zwei Punkte an diesem Vorgehen sind kritisch zu sehen:

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

- Vereisungsgrad: Für einen großen Teil der Messperiode lagen schwere Vereisungsbedingungen vor. Die hohe gemessene Zuverlässigkeit der Eiserkennung zeigt einerseits, dass schwere und damit auch Vereisungsbedingungen, die Schäden verursachen können, relativ zuverlässig erkannt werden. Auf der anderen Seite erreicht der Vereisungsgrad in dieser Periode selten eine so geringe Dicke, dass die Funktionsfähigkeit bei kritischer Vereisung indiziert werden kann. Wie Abbildung 5 zeigt, ist der Vereisungsgrad „light instrumental icing“ nur zu Beginn der Messperiode vorzufinden. Es wird allerdings angenommen, dass auch bei Wiederholung der Vereisungsbedingungen die Funktionsfähigkeit gewährleistet ist.

Ferner ist anzumerken, dass die Fotoaufnahmen der vereisten Blätter, welche dem TÜV NORD vorliegen, eine Vereisung der Blätter im Bereich der Hinterkante zeigen. Wie der Bericht /41/ anhand von Windkanalversuchen indiziert, führt eine Vereisung an der Blattvorderkante 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 Leistung sehr präzise gemessen werden kann und die Messung der Windgeschwindigkeit ebenfalls bei vorliegenden Längen der Mittelwertbildung präzise ist.

3.4.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anlagen

Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Messung, die lediglich an der E-82 durchgeführt wurden, auf andere Anlagen von ENERCON zu bewerten.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass auch bei höheren Rotordurchmessern bereits eine leichte Vereisung der Blätter 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 ENERCON bei leichter Vereisung einen etwas geringere Differenz der Leistung auftritt, scheint hier in Bezug auf die kritische Eisdicke ausreichend Reserve vorhanden zu sein.

3.5 Zusammenfassung der Bewertung des Eisdetektionsalgorithmus

Sowohl die Prüfung des Algorithmus als auch die Analyse der Messergebnisse deuten darauf hin, dass der von ENERCON implementierte Eisdetektionsalgorithmus mit hinreichend hoher Zuverlässigkeit eine kritische Vereisung der Blätter erkennen kann.

Eine wichtige Voraussetzung für diese Aussage ist, dass die kritische Eisdicke größer ist als die in der Messung vorliegende Eisdicke für „light icing“. Diese Aussage kann lediglich über eine Bewertung der Fotoaufnahmen erfolgen. 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. Das Kennlinienverfahren wird jedoch von ENERCON bereits seit 2003 in über 17000 Windenergieanlagen erfolgreich eingesetzt. Daher kann von einer hohen Betriebsbewährung ausgegangen werden /13/.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der von ENERCON verwendete Eiserkennungsalgorithmus dem Stand der Technik entspricht und viele Indizien dafür sprechen, dass mit vorliegenden Einstellungen / mit vorliegenden Parametern eine Eisdicke erkannt wird, die geringer ist als die kritische Eisdicke.

4 Bewertung der Bedingungen zum Wiederanfahren

Das Anfahren bzw. Wiederanfahren muss in vier verschiede Fälle unterteilt werden.

1. Anfahren/ Wiederanfahren durch manuellen Reset;
2. Wiederanfahren nach erkannter Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen;
3. Wiederanfahren nach erkannter Vereisung bei gesetztem Status „Vereisung möglich";
4. 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 eine entsprechende Schulung des verantwortlichen Personals.

4.2 Wiederanfahren nach Vereisung infolge Änderung der meteorologischen Bedingungen

Für das Wiederanfahren nachdem eine Vereisung festgestellt wurde verwendet ENERCON die im Dokument /4/ beschriebene Abtauformel, eingebunden in den Status „Vereisung möglich". Dieser beruht auf dem Zähler von 360 °Cmin (Erfahrungswert ENERCON). Dieser Zähler wird bei Überschreitung der Umgebungstemperatur von +2°C um einen bestimmten Wert pro Minute reduziert. Die Höhe der Reduzierung ist abhängig von der Differenz der Außentemperatur zu +2°C. Das Minimum ist eine Reduzierung um 1°Cmin bei 3°C, woraus eine Änderung des Status „Vereisungsbedingung" und damit einhergehend die Freigabe der WEA nach 360 min resultiert.

Der gewählte Wert von 360°Cmin erscheint plausibel. Die resultierende Zeit reicht unter Umständen nicht aus um dickeren Eisansatz des Rotorblatts komplett zu schmelzen, jedoch führt das Anschmelzen zu einer erhöhten Abfallwahrscheinlichkeit des Eises. Der untersuchte zweite Fall zum Wiederanfahren ist somit als unkritisch zu bewerten.

4.3 Wiederanfahren nach erkannter Vereisung bei gesetztem Status „Vereisung möglich"

Das Wiederanfahren nachdem die Anlage Vereisung erkannt hat, während weiterhin Vereisungsbedingungen herrschen, ist ein Spezialfall den ENERCON in den Programmablauf integriert hat. Hier gibt es zwei Möglichkeiten:

- Das Wiederanfahren nachdem eine installierte Blattheizung das Eis abgetaut hat;
- Das Wiederanfahren alle 6 Stunden um zu testen ob das Eis abgefallen oder sublimiert ist.

Für beide Fälle werden die Zähler 14:11 bis 14:14 auf drei Minuten unter den eingestellten Maximalwert zurückgesetzt, um (falls die Anlage noch vereist ist) die Zeit in der die Anlage läuft auf drei Minuten zu begrenzen.

Da die Blattheizung nicht Teil dieser Bewertung ist und auch nicht genügend Unterlagen zur weiteren Bewertung vorliegen, sollte bis zum Nachweis der Wirksamkeit auf das Wiederanfahren nach Abtauen durch die Blattheizung verzichtet werden.

Das regelmäßige Wiederanfahren (alle 6 Stunden) bei Vereisung ist bei ENERCON standartmäßig deaktiviert. Eine Aktivierung erfolgt nach Aussage von ENERCON nur auf schriftlichen Antrag des Betreibers und nur bei Anlagen die sich nach DIBt Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen /42/ in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten befinden. Nach /42/ gelten Abstände größer als 1,5 x (Rotordurchmesser + Nabenhöhe) im Allgemeinen in nicht besonders eisgefährdeten Regionen gemäß DIN 1055-5 als ausreichend.

Dies ist nach Meinung der Gutachter eine hinreichend sichere Methode, um eine Gefährdung von Personen zu vermeiden.

4.4 Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten

Da das Kennlinienverfahren nicht dazu geeignet ist Vereisungen während des Stillstands der WEA bzw. im Trudelbetrieb festzustellen, kann es während des Stillstands der Turbine zu einer unbemerkten Vereisung des Rotors kommen. Um zu verhindern, dass die Anlage bei Wiederanlaufen nicht die volle Erkennungszeit mit Eisansatz läuft, wird nach Abstimmung mit den Gutachtern für Stillstandzeiten unter Vereisungsbedingungen oberhalb der kritischen Vereisungs- bzw. Detektionszeit (siehe Tabelle 2.5) die Zähler 14:11 bis 14:14 vor dem Start auf einen Wert knapp unterhalb des Maximalwerts gesetzt. Dadurch wird im Falle einer Vereisung die Zeit bis Eis erkannt wird deutlich gesenkt, wodurch das Risiko kritische Rotationsgeschwindigkeiten zu erreichen minimiert wird. Die Gefahren durch Eis im Start- und Trudelbetrieb werden im Kap. 2.2 eingehender betrachtet.

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 nach Stillstand deutlich reduziert ist, kann die von ENERCON gewählte Option des Anfahrens bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten durch Schwachwind als weitgehend sicher bewertet werden. Es wird dennoch empfohlen bei schnellen Windgeschwindigkeitsänderungen direkt im Anschluss an den Neustart die Anlage wieder abzuschalten, um das Erreichen hoher Rotationsgeschwindigkeiten zu verhindern.

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 auf hohe Rotationsgeschwindigkeiten kommt, wird ein automatisches Anfahren der WEA nach einem Fehler nur bei gemittelten Windgeschwindigkeiten unterhalb von 5 m/s erlaubt.

Dies in Verbindung mit den verringerten Detektionszeiten nach Stillstand führt dazu, dass das Anfahren bei Vereisungsbedingungen nach Stillstandzeiten durch einen Fehler als weitgehend unkritisch zu bewerten ist.

Bei Verwendung eines zusätzlichen Eisansatzerkennungssystems kann die WEA zur Vermeidung von unnötigen Stillstandszeiten wieder anfahren, sobald das System die Eisfreiheit sicher festgestellt hat. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass das System auch im Stillstand Eisansatz sicher erkennt und das System in einem separaten Gutachten in Bezug auf ausreichende Sensibilität und Zuverlässigkeit bewertet worden ist.

5 Einbindung in das Betriebsführungssystem der Anlagen

5.1 Verwendete Technik

Wie in /5/ beschrieben, wird für das Kennlinienverfahren die in der WEA vorhandene Sensorik genutzt. Alle benötigten Eingangsgrößen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Drehzahl, Leistung oder Blattwinkel sind für die Betriebsführung der WEA notwendige Größen. Diese werden der Eiserkennung zur Verfügung gestellt. Zur Verbesserung / Optimierung der Messsicherheit der Außentemperatur auf Nabenhöhe wird seit 2014 ein zweiter Außentemperaturfühler auf der Gondel installiert. Im Rahmen der Typenzertifizierung wurde die verwendete Sensorik und ihre Einbindung in das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem somit bereits überprüft und anerkannt. Eine Liste der Zertifikate für das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem findet sich in /21/.

5.2 Bewertung der Einbindung ins Betriebsführungs- und Sicherheitssystem

Da die genutzten Sensoren bereits in die Anlage integriert und zertifiziert sind führt die Verwendung des Kennlinienverfahrens zu keinen relevanten Veränderungen in den zertifizierten Betriebsführungs- und Sicherheitssystemen und somit auch zu keiner Veränderung in den Lasten.

Die Anforderungen der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen (Ausgabe 2012) sowie der DIN EN 61400-1:2011, in Bezug auf das Betriebsführungs- und Sicherheitssystem, werden auch bei Einbindung des ENERCON Eiserkennungssystems erfüllt.

5.3 Bewertung von Zusatzfunktionen

5.3.1 Gondelpositionierung

Standardmäßig wird die Gondel auch im Trudelbetrieb bei erkanntem Eisansatz in Windrichtung positioniert. Durch die Funktion „Gondelpositionierung bei Eisansatz“ kann die Gondel der WEA, nachdem die WEA wegen Eisansatz angehalten wurde, automatisch in eine vorgegebene Position gedreht werden. An Standorten in unmittelbarer Nähe von Straßen, Wegen oder Gebäuden kann der Rotor der WEA dadurch so positioniert werden, dass sich der Gefährdungsbereich durch herabfallendes Eis weiter von den Schutzobjekten entfernt. Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten wird die Gondelpositionierung aus Gründen des Anlagenschutzes wieder aufgehoben.
Die Funktion der Eiserkennung wird hierdurch nicht beeinflusst. Die Gondelpositionierung bei Eisansatz erfolgt nur in bestimmten Fällen auf ausdrücklichen Kundenwunsch.

5.3.2 Park-Eisansatzerkennung

Mit der Funktion Park-Eisansatzerkennung können alle bzw. ausgewählte WEA innerhalb des Windparks angehalten werden, wenn eine bzw. mehrere andere WEA im Park Eisansatz melden. Folgende Voraussetzungen müssen hierfür erfüllt sein:

- Der Windpark besteht ausschließlich aus WEA mit den Steuerungstypen CS48, CS82, CS101, CS126 und/oder EP4-CS-01 (Mischungen sind zulässig)
- Die Version ≥1.99 des ENERCON SCADA Systems muss installiert sein

Über den Parameter P4106 kann eingestellt werden, ab welchem Prozentsatz der WEA im Park die Eisansatz erkannt haben, die WEA abgeschaltet werden soll, auch wenn diese WEA selbst noch kein Eisansatz detektiert hat.
Die standardmäßige Einstellung ist 100%, d.h. die Funktion ist deaktiviert. Durch Aktivierung dieser Funktion (bspw. P4106=10%) kann die Sensibilität und Sicherheit der Eiserkennung für einen Windpark erhöht werden, es kann im günstigsten Fall für einzelne WEA bereits vor einer Vereisung präventiv abgeschaltet werden.

5.3.3 Funktionalität der Eisansatzerkennung bei Vorgabe eines minimalen Blattwinkels

Prinzipiell findet durch die Eiserkennung ein kontinuierlicher Abgleich der Soll- und Ist-Werte der Leistungsparameter statt. In schalloptimierten Betriebsmodi wird entsprechend der zeitabhängig eingestellten Schall-Leistungskennlinie die Eiserkennung vorgenommen. Dieser Leistungskennlinie ist bei reduzierter Nennleistung auch bei Erreichen der Nenndrehzahl ein entsprechender Blattwinkel zugeordnet, über welche die Regelung der Leistung und Drehzahl maßgeblich gesteuert wird. Lediglich der Windgeschwindigkeitsbereich, in dem die Eiserkennung anstelle des Vergleiches über die Leistungskurve über den Blattwinkel erfolgt, ist gegenüber dem Nennleistungsbetrieb verändert.

Bei Einstellung einer Blattwinkelvorgabe im Rahmen des Sektor-Managements wird der minimale Blattwinkel vorgegeben, auf den das Rotorblatt eingestellt wird. Der optimale Leistungspunkt beim minimalen Blattwinkel wird in diesem Fall nicht erreicht. Für die Eiserkennung bedeutet dies, dass die aerodynamischen Eigenschaften des Blattes künstlich schlechter sind, als es gemäß Leistungskennlinie möglich wäre. Eine sektorielle Umschaltung der Leistungskennlinie erfolgt nicht. Die ungünstigeren aerodynamischen Eigenschaften führen zu einer früheren Abschaltung im Fall einer Eisansatzgefahr. Eine zusätzliche Gefährdung ist nicht ersichtlich, es erhöhen sich lediglich die Stillstandszeiten.

Wird mit zunehmendem Wind trotz des ungünstigeren Blattwinkels die Nennleistung erreicht, wird der Blattwinkel genau wie im Betrieb ohne Blattwinkelvorgaben entsprechend der Leistungskennlinie erhöht, d.h. die Auftriebswirkung reduziert. Durch das sektorielle Blattwinkelmanagement wird lediglich der Windgeschwindigkeitsbereich, ab der vom Leistungskurvenvergleich auf den Blattwinkelvergleich gewechselt wird, verändert. Da sich durch die Blattwinkelvorgaben die aerodynamischen Eigenschaften künstlich verschlechtern, wird jede Abweichung von der Leistungskurve tendenziell früher als Eisansatz bewertet. Eine zusätzliche Gefährdung ist nicht ersichtlich, es erhöhen sich lediglich die Stillstandszeiten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Abschaltung der Anlagen bei Vereisung durch die Vorgabe eines minimalen Blattwinkels nicht beeinträchtigt wird.

5.3.4 Einstellung der Sensitivität der Eisansatzerkennung

Die Sensitivität der Eisansatzerkennung kann über die Änderung der Toleranz zu den Erwartungswerten der Leitungskennlinie bzw. der Blattwinkel eingestellt werden. Die hier bewertete Sensitivität gilt für die Standardeinstellung „Normale Sensitivität“. Für kritische Standorte lässt sich die Sensitivität der Eisansatzerkennung weiter erhöhen, d.h. es kann dann bereits bei geringeren Eismengen abgeschaltet werden.
Die Einstellung einer geringeren Sensitivität ist erst nach einer Standortbetrachtung und Risikobeurteilung nur für Standorte zulässig, die als unkritisch bewertet wurden /14/.

6 Anforderungen

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

6.1 Anforderungen zur wiederkehrenden Prüfung

- Die Eiserkennungslogik sollte bei Inbetriebnahme und anschließend mindestens einmal im Jahr wie in /10/ beschrieben von dafür ausgebildetem Personal getestet werden.

6.2 Parametrierung

- Für Standorte die laut DIBT Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen nicht in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten errichtet wurden, müssen die Maximalwerte der Zähler 14:11 bis 14:14, wie in Dokument /14/ angegeben, auf den Wert 15 gesenkt werden. Dieser Zähler steht für die Detektionszeit (siehe Kapitel 2.1.3).
- Die Aussagen zur Messgenauigkeit gelten für die Standardeinstellung „Normale Sensitivität“ der Eiserkennung. Für Standorte die laut DIBT Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen nicht in ausreichendem Abstand zu Schutzobjekten errichtet wurden, ist die Einstellung einer geringeren Sensitivität nicht zulässig /14/.

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.

7 Zusammenfassung und Ergebnis der Bewertung

Die kritische Eisdicke und damit einhergehend die kritische Detektionszeit für verschiedene ENERCON Anlagen wurde ermittelt. Die dünnste ermittelte kritische Eisdicke stellt sich bei der ENERCON E-44 (Nabenhöhe 45,0) zu 1,3cm ein (siehe 2.1.2). Diese Eisdicke wurde für die weitere Bewertung als Maßstab herangezogen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass eine Gefährdung durch Eisabfall innerhalb des Gefährdungsbereichs für Eisabfall von der WEA im Winter grundsätzlich vorliegen kann, stellt der untersuchte Betrieb des Leerlaufs (Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s) gegenüber dem Eisabfall (nach jedem Eisansatz eintretendes Ereignis) für die WEA-Typen E-44, E-48 sowie E-53 in Abhängigkeit des Standortes (Schwachwind- oder Starkwindstandort) eine mögliche zusätzliche Gefährdung dar.

Für die WEA E-82, E-115, E-126, sowie E-141 welche für die restlichen WEA der ENERCON Produktpalette (s. Kap. 1.3) als abdeckend angesehen werden können, stellt der untersuchte Betrieb des Leerlaufs (Windgeschwindigkeit 3m/s bzw. 5m/s) gegenüber dem Eisabfall (nach jedem Eisansatz eintretendes Ereignis) keine unzulässige zusätzliche Gefährdung dar.

Der Eiserkennungsalgorithmus ist plausibel und stellt durch die doppelte Kontrolle über Leistungs- und Blattwinkelkennlinie eine sinnvolle Methode der Eiserkennung dar.

Die Prüfung des Algorithmus in Verbindung mit der Analyse der Messergebnisse zeigt, dass der von ENERCON implementierte Eisdetektionsalgorithmus mit hoher Zuverlässigkeit eine kritische Vereisung der Blätter erkennen kann. Eine gewisse Unsicherheit in der Bewertungskette liegt zwar in der Bewertung der Fotoaufnahmen bezüglich der kritischen Eisdicke, jedoch kann diese Unsicherheit deutlich durch die hohe Betriebsbewährung des Kennlinienverfahrens reduziert werden /13/.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der von ENERCON verwendete Eiserkennungsalgorithmus, insbesondere in Kombination mit einem zusätzlichen Eissensor, dem Stand der Technik entspricht und viele Indizien 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).

Erstellt	Geprüft
Dipl.-Ing. O. Raupach	Dipl.-Ing. L. Klüppel

An der Prüfung beteiligt:

B.Sc. F. Lautenschlager

8 Dokumente und Literaturverzeichnis

8.1 Geprüfte Dokumente

/1/ Meteotest, Bericht zur Funktionsfähigkeit des Eiserkennungssystems für ENERCON
"Performance of the ENERCON ice detection system"
Dok.-Name: 140610_report_ice_detection.pdf, Rev. 0.1,
Datum: 06.06.2014

/2/ ENERCON, Mitteilung
"Antworten zum Status Report ENERCON ice detection TÜV-NORD Sys Tec GmbH & Co. KG vom 22.7.2014"
Dok.-Name: D0342023-0.pdf, Rev. 0,
Datum: 05.08.2014

/3/ T. Wallenius (VTT Technical Research Center of Finland) and further authors:
"The relationship between chord length and rime icing on wind turbines"

/4/ ENERCON
Technische Beschreibung, ENERCON Eiserkennung Programmablauf
Dok.-Name: ENERCON Eiserkennung – Flussdiagramm.pdf
Dok. Nr.: D0337087-2, Datum: 06.08.2014

/5/ ENERCON
Technische Beschreibung ENERCON Eiserkennung Sensorik
Dok.-Name: D0332210-0 Flussdiagram.pdf
Dok. Nr.: D0332210-0, Datum: 27.06.2014

/6/ ENERCON
Statusbeschreibung, 14 Eisansatzerkennung, 11 Rotor (Leistungsmessung)
Dok.-Name: 014_0011_Status_CS48_CS82_CS101_CS126.pdf
Revision: 004, Datum: 26.06.2012

/7/ ENERCON
Statusbeschreibung, 14 Eisansatzerkennung, 12 Anemometer (Leistungsmessung)
Dok.-Name: 014_0012_Status_CS48_CS82.pdf
Revision: 004, Datum: 26.06.2012

/8/ ENERCON
Statusbeschreibung, 14 Eisansatzerkennung, 13 Rotor (Blattwinkelmessung)
Dok.-Name: 014_0013_Status_CS48_CS82_CS101_CS126.pdf
Revision: 004, Datum: 26.06.2012

/9/ ENERCON
Statusbeschreibung, 14 Eisansatzerkennung, 14 Anemometer (Blattwinkelmessung)
Dok.-Name: 014_0014_Status_CS48_CS82.pdf
Revision: 003, Datum: 26.06.2012

/10/ ENERCON
Funktionsbeschreibung Eisansatzsimulation
Dok.-Name: Eisansatzsimulation_Funktionsbeschreibung_V1 2.pdf
Revision: 002, Datum: 24.02.2014

/11/ ENERCON: Mitteilung
„Antworten zum Status Report ENERCON ice detection TÜV-NORD Sys Tec GmbH & Co. KG vom 22.07.2014“, 05.08.2014

/12/ ENERCON: email
„AW: Anmerkungen zur ENERCON Eiserkennung“
Harald Wegmann, Datum: 09.09.2014

/13/ ENERCON: Erklärung
Vermeidung von eiswurfbedingten Personenschäden durch das ENERCON Kennlinienverfahren
Dok. Nr.: D0353125-0
S. Janssen, H. Wegmann, Datum: 14.10.2014

/14/ ENERCON
Technische Beschreibung ENERCON Windenergieanlagen Eisansatzerkennung
Dok. Nr.: D0154407-4 / DA
Datum: 09.12.2016

/15/ ENERCON
Betriebsanleitung ENERCON Windenergieanlage E-141 EP4 / 4200kW
Dok. Nr.: D0496591-0
Datum: 30.06.2016

/16/ ENERCON
Technische Beschreibung, Anhalten der Windenergieanlage
Dok. Nr.: D0630561-0
Datum: 25.10.2017

/17/ ENERCON
Technische Beschreibung, Übersicht Eisansatzerkennungssysteme
Dok. Nr.: D0666949-0
Datum: 29.01.2018

/18/ VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
Customer Report, Pre-Certification of Labkotec LID-3300IP ice detector for wind energy applications
Dok. Nr.: VTT-CR-03658-16
Datum: 14.12.2016

8.2 Literatur

8.2.1 Literatur zu Kapitel 2.1 und 2.2

/19/ ENERCON GmbH. ENERCON Produktübersicht, Stand September 2016. Übermittelt durch die ENERCON GmbH mit Email vom 02.03.2017.

/20/ ENERCON GmbH. ENERCON Produktübersicht inkl. Drehzahlen zum Leerlaufbetrieb für die WEA E-44, E-48 sowie E-53. Übermittelt durch die ENERCON GmbH mit Email vom 15.09.2014.

/21/ ENERCON GmbH. Übersicht „Zertifikate für Control and Safety Systeme ENERCON WEAs“, D0342021-0. Übermittelt durch die ENERCON GmbH mit Email vom 08.08.2014.

/22/ IEC 61400-1. Wind turbines – Part 1:Design requirements. Third Edition. 2005.

/23/ Morgan, C. et al. Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk? Wind Energy Production in Cold Climates. Bristol. 1996.

/24/ Cattin, R. et al. WIND TURBINE ICE THROW STUDIES IN THE SWISS ALPS. European Wind Energy Conference, Milan, Italy. 2007.

/25/ Lautenschlager, F. Studie zum Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ereignis Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik. 2012.

/26/ Germanischer Lloyd. Vorschriften und Richtlinien. IV Industriedienste. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2010.

/27/ Seifert, H. Betrieb von Windenergieanlagen unter Vereisungsbedingungen. St. Pölten. 1999.

/28/ Seifert, H. et al. Risk analysis of ice throw from wind turbines, BOREAS VI. Pyhä, Finland. 2003.

/29/ Seifert, H. Technische Ausrüstung von Windenergieanlagen an extremen Standorten. St. Poelten. 2002.

/30/ Seifert, H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate. Wilhemlshaven. 2003

/31/ Makkonen, L. et. al. Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines. Wind Engineering Volume 25, No. 1. 2001.

/32/ Wallenius, T. et. al. The relationship between chord length and rime icing on wind turbines. Winterwind. 2008.

/33/ Lehtomäki, V. et. al. IcedBlades - Modelling of ice accretion on rotor blades in a coupled wind turbine tool. Winterwind. 2012.

/34/ Hudecz, A. et. al. Experimental investigation of ice accretion on wind turbine blades. Winterwind. 2013.

/35/ Cattin, R. Alpine Test Site Guetsch, Handbuch und Fachtagung. Genossenschaft METEOTEST. Bern. 2008.

/36/ Hauschild, J. et al. Monte-Carlo-Simulation zur probabilistischen Bewertung der Gefährdung durch Eisabwurf bei Windenergieanlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2146. 2011.

/37/ Hauschild, J. et al. Ermittlung von Trefferwahrscheinlichkeiten in der Umgebung einer Windenergieanlage: Eisabfall, Rotorblattbruch und Turmversagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI-Bericht 2210. 2013.

/38/ Green Book. Methods for the determination of possible damage – first edition. Voorburg 1989.

/39/ Deutscher Wetterdienst. Online Wetterlexikon, Stand: September 2014. Offenbach. 2014.

/40/ Karl-Heinrich Grote, Jörg Feldhusen (Hrsg.): DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg 2011

/41/ NASA: Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils, April 2000

/42/ DIBt. Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen – Fassung September 2013

Technische Beschreibung

Blitzschutz

ENERCON Windenergieanlagen EP1, EP2, EP3

ENERCON
ENERGIE FÜR DIE WELT

Herausgeber

ENERCON GmbH ▪ Dreekamp 5 ▪ 26605 Aurich ▪ Deutschland
Telefon: +49 4941 927-0 ▪ Telefax: +49 4941 927-109
E-Mail: info@enercon.de ▪ Internet: http://www.enercon.de
Geschäftsführer: Hans-Dieter Kettwig
Zuständiges Amtsgericht: Aurich ▪ Handelsregisternummer: HRB 411
Ust.Id.-Nr.: DE 181 977 360

Urheberrechtshinweis

Die Inhalte dieses Dokuments sind urheberrechtlich sowie hinsichtlich der sonstigen geistigen Eigentumsrechte durch nationale und internationale Gesetze und Verträge geschützt. Die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments liegen bei der ENERCON GmbH, sofern und soweit nicht ausdrücklich ein anderer Inhaber angegeben oder offensichtlich erkennbar ist.

Die ENERCON GmbH räumt dem Verwender das Recht ein, zu Informationszwecken für den eigenen, rein unternehmensinternen Gebrauch Kopien und Abschriften dieses Dokuments zu erstellen; weitergehende Nutzungsrechte werden dem Verwender durch die Bereitstellung dieses Dokuments nicht eingeräumt. Jegliche sonstige Vervielfältigung, Veränderung, Verbreitung, Veröffentlichung, Weitergabe, Überlassung an Dritte und/oder Verwertung der Inhalte dieses Dokuments ist – auch auszugsweise – ohne vorherige, ausdrückliche und schriftliche Zustimmung der ENERCON GmbH untersagt, sofern und soweit nicht zwingende gesetzliche Vorschriften ein Solches gestatten.

Dem Verwender ist es untersagt, für das in diesem Dokument wiedergegebene Know-how oder Teile davon gewerbliche Schutzrechte gleich welcher Art anzumelden.

Sofern und soweit die Rechte an den Inhalten dieses Dokuments nicht bei der ENERCON GmbH liegen, hat der Verwender die Nutzungsbestimmungen des jeweiligen Rechteinhabers zu beachten.

Geschützte Marken

Alle in diesem Dokument ggf. genannten Marken- und Warenzeichen sind geistiges Eigentum der jeweiligen eingetragenen Inhaber; die Bestimmungen des anwendbaren Kennzeichen- und Markenrechts gelten uneingeschränkt.

Änderungsvorbehalt

Die ENERCON GmbH behält sich vor, dieses Dokument und den darin beschriebenen Gegenstand jederzeit ohne Vorankündigung zu ändern, insbesondere zu verbessern und zu erweitern, sofern und soweit vertragliche Vereinbarungen oder gesetzliche Vorgaben dem nicht entgegenstehen.

Dokumentinformation

Dokument-ID	D0260891-11
Vermerk	Originaldokument

Datum	Sprache	DCC	Werk / Abteilung
2019-10-28	de	DA	WRD Management Support GmbH / Technische Redaktion

Mitgeltende Dokumente

Der aufgeführte Dokumenttitel ist der Titel des Sprachoriginals, ggf. ergänzt um eine Übersetzung dieses Titels in ( ). Die Dokument-ID bezeichnet stets das Sprachoriginal. Enthält die Dokument-ID keinen Revisionsstand, gilt der jeweils neueste Revisionsstand des Dokuments. Diese Liste enthält ggf. Dokumente zu optionalen Komponenten.

Dokument-ID	Dokument
DIN EN 50308*VDE 0127-100	Windenergieanlagen - Schutzmaßnahmen - Anforderungen für Konstruktion, Betrieb und Wartung; Deutsche Fassung EN 50308
DIN EN 50522*VDE 0101-2	Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV; Deutsche Fassung EN 50522
DIN EN 61400-24*VDE 0127-24	Windenergieanlagen - Teil 24: Blitzschutz (IEC 61400-24); Deutsche Fassung EN 61400-24
DIN EN 62305-1*VDE 0185-305-1	Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (IEC 62305-1); Deutsche Fassung EN 62305-1
DIN EN 62305-2*VDE 0185-305-2	Blitzschutz - Teil 2: Risiko-Management (IEC 62305-2); Deutsche Fassung EN 62305-2
DIN EN 62305-3*VDE 0185-305-3	Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen (IEC 62305-3); Deutsche Fassung EN 62305-3
DIN EN 62305-4*VDE 0185-305-4	Blitzschutz - Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen (IEC 62305-4); Deutsche Fassung EN 62305-4
DIN EN 62561-1*VDE 0185-561-1	Blitzschutzsystembauteile (LPSC) - Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile (IEC 62561-1); Deutsche Fassung EN 62561-1
DIN EN 62561-2*VDE 0185-561-2	Blitzschutzsystembauteile (LPSC) - Teil 2: Anforderungen an Leiter und Erder (IEC 62561-2); Deutsche Fassung EN 62561-2
DIN IEC 60364-5-54*VDE 0100-540	Errichtung von Niederspannungsanlagen Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Erdungsanlagen, Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter (IEC 64/2370); Deutsche Fassung EN 60364-5-54

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines 6

2 Äußerer Blitzschutz 8

2.1 Fangeinrichtungen 8

2.1.1 Maschinenhaus 8

2.1.2 Rotorblatt 8

2.2 Ableitungen 9

2.2.1 Blattanschluss - Rotor 9

2.2.2 Rotor - Maschinenträger 9

2.2.3 Maschinenträger - Turm 9

2.2.4 Turm 10

2.2.5 Turm - Fundament 10

2.3 Erdungsanlage 11

3 Innerer Blitzschutz 12

4 Übersicht der äußeren Blitzschutzkomponenten in Windenergieanlagen 14

5 Zugrundeliegende Normen 15

Abkürzungsverzeichnis

GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LPL	Lightning protection level (Blitzschutzklasse)
LPZ	Lightning protection zone (Blitzschutzzone)

1 Allgemeines

Blitzschläge können Teile von Gebäuden in Brand setzen und zerstören. Zudem können die hohen Blitzströme direkt durch leitende Verbindungen oder indirekt durch induktive, kapazitive oder galvanische Kopplung ins Gebäudeinnere übertragen werden und dort zu weiteren Beschädigungen führen. Windenergieanlagen sind aufgrund ihrer exponierten Lage besonders gefährdet.

Um mögliche Schäden durch Blitzschläge zu vermeiden und einen sicheren Anlagenbetrieb zu gewährleisten, werden Windenergieanlagen mit einem Blitzschutz ausgestattet. Ein Blitzstrom wird dabei kontrolliert von den Fangeinrichtungen über die Ableitungen zur Erdungsanlage geführt.

Dieses Dokument beschreibt den Blitzschutz in Windenergieanlagen der Plattformen EP1 bis EP3 (E-44, E-48, E-53, E-70 E4, E-82 E2, E-82 E4, E-92, E-103 EP2, E-115 E2, E-115 EP3 E3, E-126 EP3, E-138 EP3, E-138 EP3 E2).

Äußerer Blitzschutz

Zum äußeren Blitzschutz gehören alle Maßnahmen, die zur Verhinderung von Beschädigungen der Windenergieanlagen durch Blitzschläge getroffen werden. Fangeinrichtungen an den Rotorblättern, Ableitungen, die Erdungsanlage und anlagenspezifische Metallteile sind Bestandteile des äußeren Blitzschutzes. Der äußere Blitzschutz reduziert zudem die durch Blitzströme erzeugten Störfelder im Inneren der Windenergieanlagen.

Innerer Blitzschutz

Zum Schutz der elektrischen und elektronischen Einrichtungen werden weitere Maßnahmen ergriffen, die als innerer Blitzschutz bezeichnet werden. Hierzu zählen ein Potentialausgleichssystem sowie Überspannungsableiter.

Blitzschutzklasse – Lightning protection level

Das LPL wird von IV (niedrig) bis I (hoch) eingestuft. Alle Windenergieanlagen sind dafür ausgelegt, die Anforderungen an das LPL I zu erfüllen, ggf. sind Anpassungen an der Erdungsanlage erforderlich. Dies ist von der Leitfähigkeit des Erdreichs am Standort abhängig und wird als Teil der Baugrunduntersuchung projektspezifisch geprüft.

Blitzschutzzonen

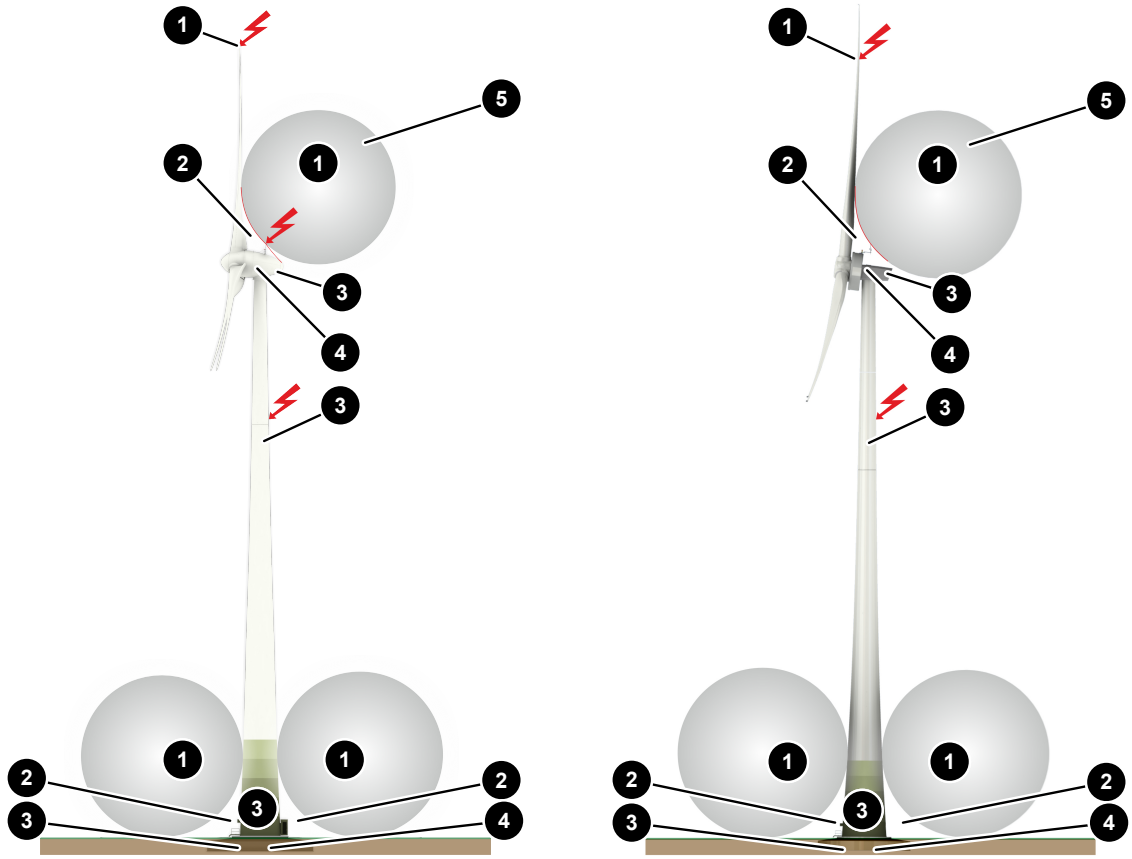

Abb. 1: Blitzschutzzonen, Gondel in Tropfenform (links) und Gondel in Kompaktform (rechts)

1	LPZ 0_A	2	LPZ 0_B
3	LPZ 1	4	LPZ 2
5	Blitzkugel (Radius 20 m)		

2 Äußerer Blitzschutz

2.1 Fangeinrichtungen

2.1.1 Maschinenhaus

Am Maschinenhaus befinden sich, in Abhängigkeit von der Größe des Maschinenhauses, mehrere Fangstangen aus Rundstahl. Die Fangstangen fangen den Blitz. Die Positionierung findet entsprechend des Blitzkugelverfahrens mit dem Radius der Blitzschutzklasse I statt. Hierdurch werden die restliche Struktur sowie die Komponenten im Außenbereich (z. B. Anemometer) vor unkontrollierten Blitzschlägen geschützt.

2.1.2 Rotorblatt

In den Rotorblättern ist ein Blitzschutz integriert, der den Blitzstrom von der Einschlagstelle an den Fangeinrichtungen über den Ableitpfad zur Erdungsanlage führt. Der Blitzschutz des Rotorblatts besteht aus den folgenden Elementen:

- Blattspitze aus Aluminiumguss
- ggf. zusätzliche Rezeptoren
- Blitzableiter (Kupfer oder Aluminium)
- Ableitring an der Blattwurzel

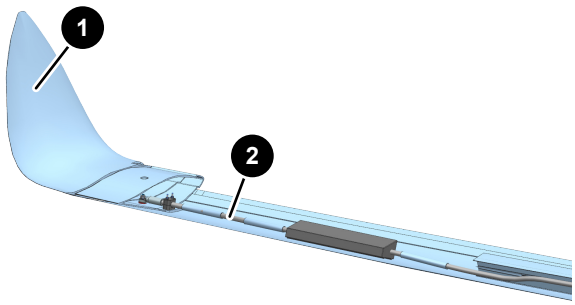

Abb. 2: Blattspitze mit Blitzableiter

1	Blattspitze	2	Blitzableiter

Die Blattspitze aus Aluminiumguss ist leitend. Sie ist durch einen Blitzableiter mit dem Ableitring an der Blattwurzel verbunden. Der Ableitring befindet sich in ausreichendem Abstand zu den leitenden Teilen im Blattanschlussbereich, so dass ein unerwünschter Überschlag verhindert wird.

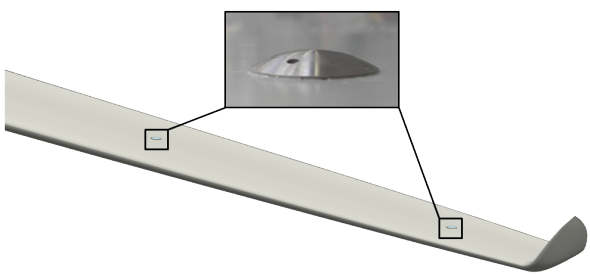

Abb. 3: Rotorblatt mit Rezeptoren auf der Druck- und Saugseite

Je nach Länge und Aufbau des Rotorblatts sind ggf. zusätzlich Rezeptoren auf der Druck- und Saugseite angeordnet. Die Rezeptoren sind an den Ableitpfad angeschlossen.

Rezeptoren sind definierte Solleinschlagsstellen, welche blitzstromtragfähig dimensioniert sind.

2.2 Ableitungen

2.2.1 Blattanschluss - Rotor

Die Ableitung des Blitzstroms vom Blattanschluss zum Rotor wird mit Rollenblitzabnehmern oder Kohlebürsten realisiert. Die im Rotor installierten Rollenblitzabnehmer oder Kohlebürsten werden durch eine Federwirkung auf einen am Blattanschluss angebrachten Ableitring gedrückt.

Rollenblitzabnehmer werden bei Windenergieanlagen mit Spinnerverkleidung verbaut. Bei Windenergieanlagen ohne Spinnerverkleidung werden Kohlebürsten eingesetzt.

2.2.2 Rotor - Maschinenträger

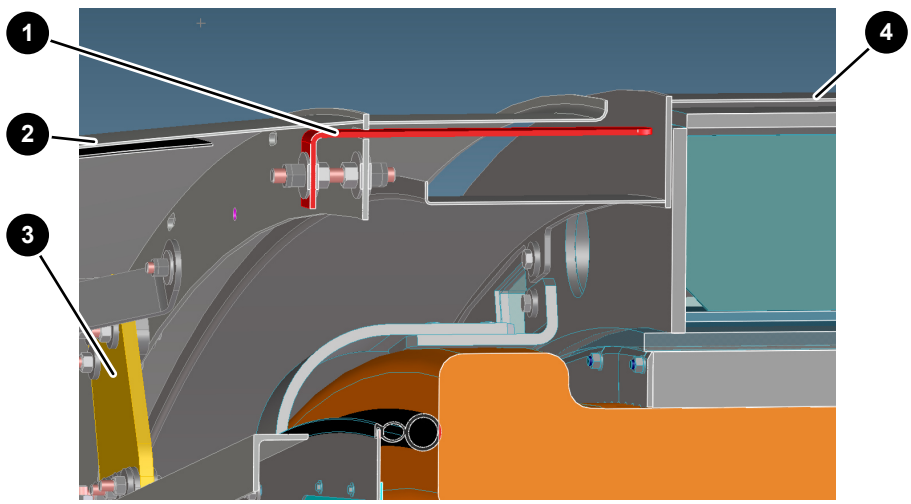

Abb. 4: Blitzfangwinkel am Beispiel der E-92

1	Blitzfangwinkel	2	Spinner
3	Spinnerisolierung	4	Maschinenhausverkleidung

Bei allen Windenergieanlagen führen drei symmetrisch angeordnete Funkenstrecken den Blitzstrom unabhängig von dem momentanen Rotorblattwinkel und der Stellung des Rotors zur tragenden Struktur.

Bei Maschinenhausverkleidungen aus Aluminium führen die Funkenstrecken den Blitzstrom vom Spinner auf die Verkleidung. Von dort aus wird der Blitzstrom in den Maschinenträger abgeleitet.

Bei Verkleidungen aus GFK führen die Funkenstrecken den Blitzstrom auf den Stator und dann zum Maschinenträger.

2.2.3 Maschinenträger - Turm

Die Verbindung zwischen Maschinenträger und Turm wird durch das großflächige Azimutlager sichergestellt. Zusätzlich sind im Gondelkeller weitere Funkenstrecken vorhanden, welche die Ableitung vom Maschinenhaus sicherstellen.

2.2.4 Turm

Stahlturm

Der Stahlturm selbst ist leitfähig, so dass ein Blitzstrom über diesen abgeleitet wird. Zwei am Turm angeschweißte Laschen dienen dem Anschließen der Anschlussfahnen des Fundamenterders. Wenn das unterste Segment aus mehreren Teilen besteht, werden diese jeweils mit einem zusätzlichen, inneren Erdungsring verbunden, an welchem die zwei Anschlussfahnen des Fundamenterders angeschlossen werden.

Betonturm

Jedes Betonsegment verfügt über 4 vertikal geführte Bandstähle, welche mit der inneren Bewehrung verbunden sind. Die Enden des Bandstahls sind mit Gewindehülsen versehen, an welchem die Verbindungslaschen angebunden werden und den Spalt zwischen den Segmenten überbrücken. Abschließend dienen 4 Gewindehülsen, jeweils um 90° versetzt, als Erdungsfestpunkte zum Anschluss des Fundamenterders.

Hybridturm

Der Hybridturm besteht aus Betonsegmenten, die im oberen Turmbereich um Stahlsegmente ergänzt werden. Die Ableitung wird durch die Verbindungslaschen des Fundaments aufwärts bis zu den Stahlturmsegmenten realisiert. Der Übergang zu den Stahlturmsegmenten erfolgt mit 4 Leitungen, jeweils um 90° versetzt, mit mind. 50 mm^2 Querschnitt.

2.2.5 Turm - Fundament

Der Anschluss des Turms an das Fundament erfolgt über Laschen und Anschlussfahnen. Die an den Turm angeschweißten Laschen werden mit den Anschlussfahnen der Erdungsanlage verbunden. Die Erdungsanlage ist mit der Bewehrung des Fundaments verbunden. Somit wird eine großflächige Potentialsteuerung erreicht.

2.3 Erdungsanlage

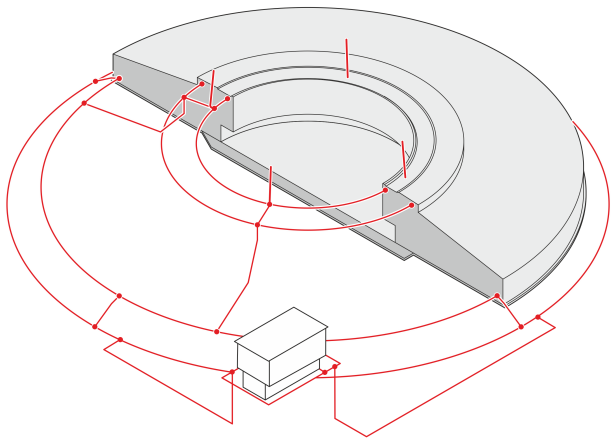

Abb. 5: Erdungsanlage, Beispiel

Erdungsanlagen schützen Lebewesen und Sachwerte vor Gefahren, die durch Kurz- bzw. Erdschlüsse und transiente Vorgänge, wie Blitzschläge und Schalthandlungen, entstehen können. Sie stellen eine effektive Wirkung der (Fehlerstrom-)Schutzeinrichtungen und eine Bereitstellung eines Referenzpotenzials für elektrische Komponenten sicher. Bei einem Blitzschlag entsteht im stromdurchflossenen Bodenbereich ein Potentialanstieg in Richtung Windenergieanlage. Die Höhe der Berührungs- und Schrittspannung ist u. a. abhängig vom Erdungswiderstand des Fundamenterders und der äußeren Erdungsanlage.

Um alle Anforderungen an das LPL I zu erfüllen und die Einhaltung von Schritt- und Berührungsspannungen im Fehlerfall sicherstellen zu können, müssen in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstands am Standort ggf. erdungsverbessernde Maßnahmen realisiert werden. Der spezifische Erdwiderstand muss gemäß normativer Anforderung im Rahmen der Baugrunduntersuchung messtechnisch erfasst werden.

Die Erdungsanlage im Fundament besteht aus mehreren, radial installierten Erdungsleitern. Um eine gezielte Potentialsteuerung zu erzielen, sind die Erdungsleiter gestaffelt mit der Bewehrung verbunden. Der außerhalb des Fundamentes liegende Ringerder integriert die Erdungsanlage der Windenergieanlage in das umgebende Potential.

Nach Errichtung der Erdungsanlage wird abschließend der erreichte Erdungswiderstand gemessen und mit den ermittelten Grenzwerten verglichen. Bei Nichteinhaltung können erdungsverbessernde Maßnahmen wie z. B. zusätzliche Tiefenerder oder Ersatzmaßnahmen wie z. B. eine Standortisolierung erforderlich sein, um die Sicherheit für Lebewesen im Umfeld der Windenergieanlage sicherzustellen.

Je nach vereinbartem Lieferumfang werden die erforderlichen Maßnahmen vom Kunden oder von ENERCON durchgeführt. Die Regelung ist vertraglich festzuhalten.

3 Innerer Blitzschutz

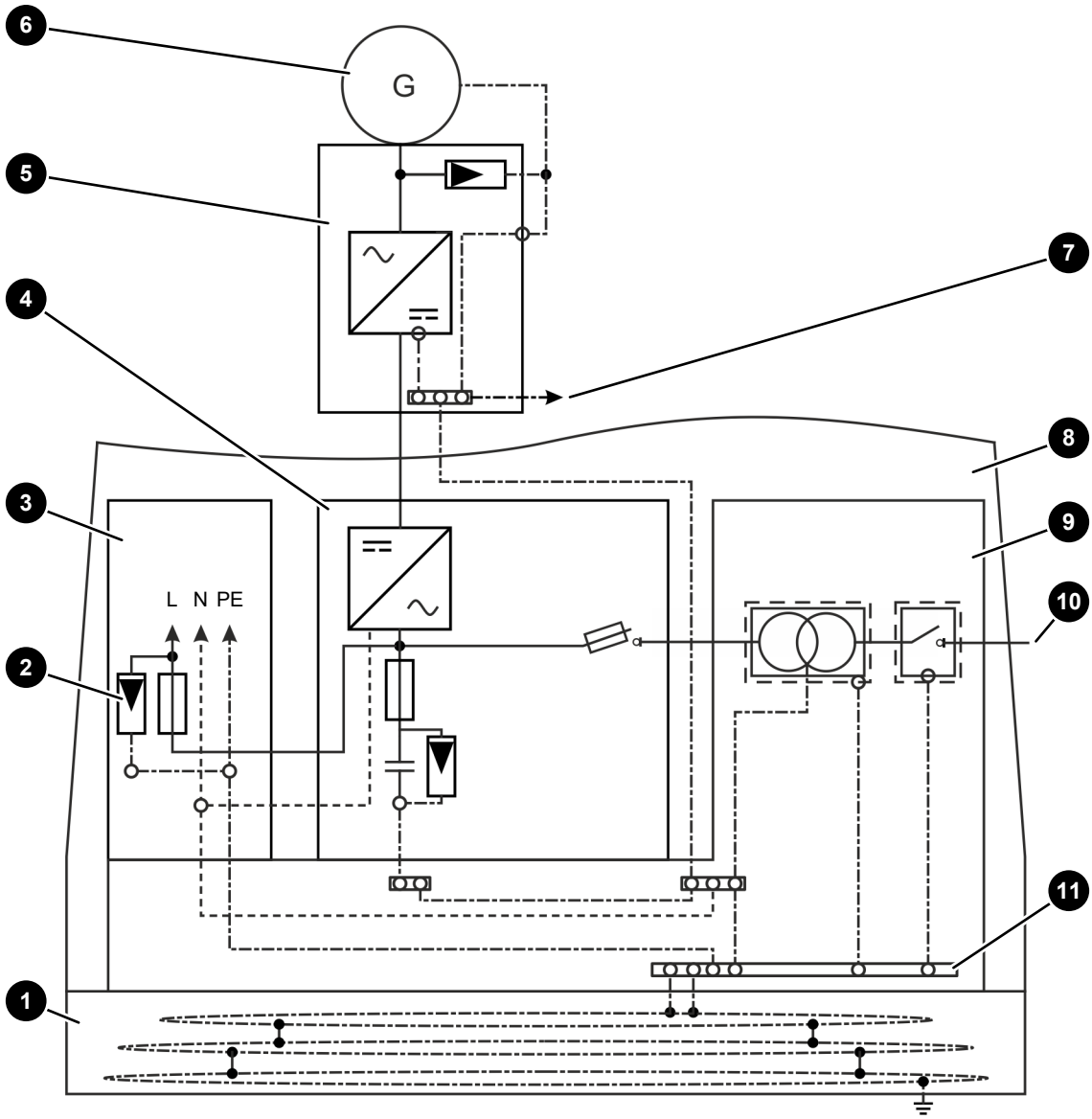

Abb. 6: Potentialausgleichssystem und Überspannungsableiter

1	Erdungsanlage	2	Überspannungsableiter
3	Steuerschrank	4	Leistungsschrank
5	Maschinenträger	6	Generator
7	Schleifringübertrager	8	Turm
9	Transformator	10	Versorgungsnetz
11	Potentialausgleichsschiene		

Potentialausgleichssystem

Das Potentialausgleichssystem verbindet alle leitfähigen Hauptkomponenten wie z. B. die Rotornabe, die Gondel, den Turm und die Schaltschränke mit dem Hauptpotentialausgleich. Der Zusammenschluss des Niederspannungs- und Hochspannungspotentialausgleichs verhindert Potentialdifferenzen.

Überspannungsableiter

Überspannungsableiter schützen elektrische Komponenten nicht nur vor durch Blitzschlag hervorgerufene elektromagnetische Impulse, sondern auch vor anderen transienten Störgrößen, welche durch Schalthandlungen von induktiven oder kapazitiven Lasten entstehen. Des Weiteren schützen die Überspannungsableiter vor den Folgen von elektrostatischen Entladungseffekten.

Damit wird sichergestellt, dass jederzeit eine Überwachung, Regelung und Steuerung der Windenergieanlage möglich ist.

4 Übersicht der äußeren Blitzschutzkomponenten in Windenergieanlagen

Tab. 1: Übersicht der äußeren Blitzschutzkomponenten in Windenergieanlagen

	Rollenblitzab-nehmer	Kohlebürsten	Funkenstrecke - Blitzfangwinkel	Funkenstrecke - Blitzfangstangen
E-44	X	-	x	-
E-48	x	-	x	-
E-53	x	-	x	-
E-70 E4	x	-	x	-
E-82 E2	x	-	x	-
E-82 E4	x	-	x	-
E-92	x	-	x	-
E-103 EP2	x	-	x	-
E-115 E2	x	-	x	-
E-115 EP3 E3	-	x	-	x
E-126 EP3	x	-	-	x
E-138 EP3	x	-	-	x
E-138 EP3 E2	-	x	-	x

5 Zugrundeliegende Normen

Bei der Konstruktion und der Umsetzung des Blitzschutzes für Windenergieanlagen wurden folgende Normen und Standardisierungen in der jeweils aktuellsten Fassung beachtet.

- DIN EN 50308*VDE 0127-100
- DIN EN 50522*VDE 0101-2
- DIN EN 61400-24*VDE 0127-24
- DIN EN 62305-1*VDE 0185-305-1
- DIN EN 62305-2*VDE 0185-305-2
- DIN EN 62305-3*VDE 0185-305-3
- DIN EN 62305-4*VDE 0185-305-4
- DIN EN 62561-1*VDE 0185-561-1
- DIN EN 62561-2*VDE 0185-561-2
- DIN IEC 60364-5-54*VDE 0100-540

Herstellererklärung

Hersteller:

ENERCON GmbH
Dreekamp 5
26605 Aurich
Deutschland

Anmerkungen zum Gutachten zur Eisansatzerkennung (8111 881 239 Rev. 5)

Folgendes bezieht sich auf das Gutachten zur Eisansatzerkennung 8111 881 239 Rev. 5:

- Das Enercon-Kennlinienverfahren ist im Hinblick auf die zuverlässige Eisansatzerkennung und Abschaltung der Windenergieanlage ausreichend sicher und entspricht dem aktuellen Stand der Technik. Die Sensibilität, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems wurde vom TÜV NORD bei der Bewertung berücksichtigt.
- Sofern zur Vermeidung von unnötig langen (evtl. zu konservativen) Stillstandszeiten ein automatisches Anfahren der Windenergieanlage auch bei Windgeschwindigkeiten oberhalb 5 m/s ermöglicht werden soll, ist eines der drei optionalen, zusätzlichen Eiserkennungssysteme (eologix-, fos4X-, Wölfel-Eisansatzerkennungssystem) erforderlich.
- Grundsätzlich erhöht die Kombination von verschiedenen Eisansatzerkennungssystemen an einer Windenergieanlage die Sicherheit der Eisansatzerkennung weiter. Hieraus lässt sich nicht generell ableiten, dass der Stand der Technik nur unter Verwendung aller oder mehrerer Systeme erreicht wird. Für bestimmte Standorte kann jedoch bei Bedarf die Sicherheit durch den Einsatz von verschiedenen Eisansatzerkennungssystemen über das übliche Maß hinaus erhöht werden.

Bis zur Freigabe von Rev. 6 des TÜV-NORD-Gutachtens kann Rev. 3 des Gutachtens zugrunde gelegt werden. Rev. 6 wird so schnell wie möglich nachgereicht.

Aurich, 21.10.2019
Ort, Datum

ENERCON
ENERGIE FÜR DIE WELT
ENERCON GmbH
Dreekamp 5 · 26605 Aurich

Harald Wegmann
Functional Safety Manager

Aurich, 21.10.2019
Ort, Datum

ENERCON
ENERGIE FÜR DIE WELT
ENERCON GmbH
Dreekamp 5 · 26605 Aurich

Ingo Arendt
Head of Technical Support

© ENERCON GmbH. Alle Rechte vorbehalten.

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG • Postfach 54 02 20 • 22502 Hamburg

WRD Wobben Research and Development GmbH
Competence Center Certification
Herrn Harald Wegmann
Innovationszentrum
Borsigstraße 26
D-26607 Aurich

Standort Hamburg
Große Bahnstraße 31
22525 Hamburg
Telefon +49 40 8557-0
Telefax +49 40 8557-2429
renewables@tuev-nord.de
www.tuev-nord.de

TÜV®

		Verteiler (ext.):	Verteiler (int.):
Ihr Zeichen, Ihre Nachricht vom	Unser Zeichen	Telefon, Name	Datum
D0884436-0 / DA, 22.10.2019	8111 881 239	+49 40 8557- 2829 Herr Raupach	22.10.2019

ENERCON Eisansatzerkennung, unser Gutachten 8111 881 239 Rev.5

Sehr geehrter Herr Wegmann,

hiermit kann ich bestätigen, dass die ENERCON Herstellererklärung D0884436-0 / DA in Bezug zu unserem Gutachten zur Eisansatzerkennung nach dem ENERCON-Kennlinienverfahren, 8111881239 Rev. 5, in allen drei Punkten der Ansicht der an der Erstellung des Gutachtens beteiligten Sachverständigen entspricht.

Für weitere Fragen hierzu stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Dipl.-Ing. O. Raupach
Senior Engineer Safety Systems Renewables

TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
OBS Erneuerbare Energien