

Prädiktion von Blitzeinschlagsbereichen bei Multimegawatt-Windkraftanlagen

M. Sc. Sebastian Koj, Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover,
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik,
Fachgebiet Elektromagnetische Verträglichkeit

1 Einleitung und Motivation

Mit dem politisch erklärten Ziel, regenerative Energiequellen zu fördern und ihren Anteil an der gesamten Energieversorgung deutlich zu steigern, haben die Windkraftanlagen (WKAs) in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung erfahren. Neben dem Ausbau von Standorten – sowohl onshore als auch offshore – ist die Entwicklung durch eine ständige Vergrößerung der Dimensionen von WKAs (Nabenhöhe und Rotordurchmesser) und eine stetige Leistungssteigerung auf heute mehrere Megawatt (Multimegawatt) gekennzeichnet.

Die mit der Leistungssteigerung einhergehende Wertkonzentration führt zu dem Wunsch die Verfügbarkeit von WKAs zu steigern und die Stillzeiten durch unbeabsichtigte Ausfälle von Teilkomponenten zu minimieren. Dies ist durch geplante und gezielte Wartung der WKA Komponenten möglich, vorausgesetzt der Ermüdungszustand der Teilkomponente sei bekannt. Zur Überwachung des Zustandes der kritischen Komponenten werden sogenannte Condition Monitoring Systems (CMS) eingesetzt, die zum einem aus diversen, über die gesamte Anlage verteilten Sensoren und zum anderen aus elektrischen Mess- und Steuereinheiten bestehen. Eine der wertvollsten und gleichzeitig für den Betrieb unabdingbaren Komponenten jeder WKA sind die Rotorblätter. Hierdurch wird insbesondere die Überwachung der Rotorblätter motiviert, z. B. mithilfe von Beschleunigungssensoren auf Ermüdung. Allerdings halten somit vermehrt metallische und damit leitfähige Gegenstände Einzug in die Rotorblätter moderner WKAs.

WKAs sind aufgrund der exponierten Lage ihrer Standorte und ihrer Gesamtbauhöhe von über 100 Metern direkten Blitzeinwirkungen ausgesetzt. Ein direkter Blitzeinschlag, dessen Energie zu einem längeren und ungeplanten Stillstand einer WKA führen kann, stellt ein stochastisch vorkommendes Ereignis dar und kann nur mit einer gewissen Auftretswahrscheinlichkeit vorhergesagt werden. Schätzungen zufolge werden moderne Multimegawatt-WKAs etwa alle 12 Monate von einem direkten Blitzeinschlag getroffen [1]. Hieraus wird ersichtlich, dass neben dem CMS ein konformes Blitzschutzsystem unabdingbar für einen stillstandarmen Betrieb von modernen WKAs ist.

Die Aufgabe des (äußeren) Blitzschutzsystems besteht darin, den Blitzstrom über entsprechende, exponiert platzierte Fangeinrichtungen (Rezeptoren) aufzunehmen und mittels definierten leitfähigen Strukturen in das Erdreich abzuleiten. Bei Rotorblättern werden die Rezeptoren üblicherweise in Blattspitzen verbaut. Jedoch stellt auch das CMS mit seinen in metallischen Gehäusen eingeschlossenen und mit elektrischen Leitern zu Netzwerken verbundenen Sensoren ebenfalls potentielle Blitzeinschlagsbereiche auf den Rotorblättern dar und muss beim Blitzschutzkonzept gemäß der normativen Lage [2], [3] und [4] berücksichtigt werden.

Zur Prädiktion solcher Blitzeinschlagsbereiche auf den Rotorblättern von modernen WKAs wird in diesem Beitrag zunächst in Kapitel 2 auf die physikalische Natur des Blitzes

eingegangen und daraus die Höhe der elektrischen Feldstärke als charakteristisches Merkmal für ein Blitzeinschlagort abgeleitet. Anschließend wird in Kapitel 3 der Blitzschutz moderner WKAs nach dem Stand der Technik durchleuchtet. In Kapitel 4 wird ein numerisches Modell einer WKA mit einem in den Rotorblättern integrierten Sensornetz samt zugehöriger Materialparameter beschrieben. Dieses Modell wird mittels einer Simulationssoftware in einem elektrostatischen Feld untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liefern die Feldverteilungen für das elektrische Potential und die Feldstärke in direkter Umgebung der WKA. Diese werden in Kapitel 5 vorgestellt und in Hinblick auf die Prognose von Blitzeinschlagsbereiche auf Rotorblättern diskutiert. Eine Zusammenfassung schließt diesen Beitrag ab.

2 Kurze Blitzkunde

Die Naturerscheinung Blitz hat den Menschen schon immer begleitet und fasziniert. Die Entstehung der am häufigsten vorkommenden Blitze ist heute weitestgehend erforscht und beschrieben, z. B. in [1], [5] und [6]. An dieser Stelle wird nur auf die wesentlichen, für diesen Beitrag essentiellen Aspekte des Blitzes eingegangen.

Bevor es zu einem Blitzeinschlag kommt muss zunächst in den Wolken aufgrund von Wetterphänomenen zur Ladungstrennung kommen. Ein Blitz entsteht, wenn sich diese Ladung gegen einen Bereich mit einer Ladung der entgegengesetzten Polarität entlädt. Der Bereich mit der entgegengesetzten Ladung kann sich hierbei entweder in den benachbarten Wolken oder aber auf der Erde befinden. Für die Blitzeinschläge an WKAs sind nur die Blitzentladungen gegen Erde von Interesse. Hierbei werden zwei Grundarten von Blitzen unterschieden:

- der Abwärtsblitz (Wolken-Erde-Blitz), der an einer Wolke beginnt und hin zur Erde gerichtet ist;
- der Aufwärtsblitz (Erde-Wolke-Blitz), der an einer exponierten Stelle der Erde, z.B. Berggipfel oder aber an der Spitze von hohen Bauwerken beginnt und hin zur einer Wolke gerichtet ist.

Wegen der Bauhöhen der modernen WKAs von über 100 Metern ist an ihnen sowohl das Auftreten der Abwärts- als auch der Aufwärtsblitzentladungen möglich.

Beide Blitzarten haben gemeinsam, dass sie jeweils mit einem Leitblitz beginnen. Voraussetzung für das Entstehen der Leitblitze sind lokale elektrische Feldstärken von mehreren 100 kV/m [1], wobei die Spitze des Leitblitzes gegenüber der Erde ein Potential von mehr als 10 MV hat [2]. Nähert sich z.B. der Leitblitz eines Abwärtsblitzes der Erde, so erhöht das Potential der Leitblitzspitze die elektrische Feldstärke auf der Erdoberfläche soweit, bis der Durchbruchwert von Luft überschritten wird. Ab dieser Feldstärke entstehen vom Erdreich hin zu der Leitblitzspitze orientierte Blitz- oder Verbindungskanäle, über die nach der Verbindung mit dem Leitblitz die Blitzentladung erfolgt. Der weitere zeitliche Verlauf der Blitzentladung hängt von der Grundart und der Polarität des Blitzes ab und wird z.B. in [7] betrachtet.

Zusammenfassend soll gesagt werden, dass zum einen erhöhte elektrische Felder als Ursache der Initiierung von Leitblitzen sind. Zum anderen bestimmen lokale Erhöhungen der elektrischen Feldstärke den Entstehungsort von Verbindungskanälen und somit auch den Blitzeinschlagort, weil dort die notwendige Durchbruchfeldstärke am ehesten erreicht wird. Dabei können die Verbindungskanäle auch nichtleitende Oberflächen durchbrechen, wenn unter ihnen leitenden Elemente verbaut sind, die zur lokalen Erhöhung der elektrischen Feldstärke beitragen. Somit kann mit der Kenntnis der lokalen Erhöhungen der elektrischen Feldstärken auf den Blitzeinschlagsbereich geschlossen werden.

3 Blitzschutz bei Windkraftanlagen

Mit der Erkenntnis, dass Blitzentladungen an Orten mit erhöhten lokalen Feldstärken auftreten, wurden im Laufe der Jahre Blitzschutzkonzepte entwickelt, immer weiter verbessert und genormt. Hierbei wird zwischen direkten und indirekten Blitzschutz unterschieden. Der äußere Blitzschutz hat die Aufgabe, den Blitzstrom über definierte Wege in das Erdreich abzuleiten, sodass das geschützte Objekt keinen Schaden nimmt. Hingegen ist die Aufgabe des inneren Blitzschutzes, die im geschützten Objekt installierten elektrischen und elektronischen Geräte vor Überspannungen zu schützen, die durch den Blitzstrom hervorgerufen werden. Der äußere Blitzschutz, auch bei WKAs, kann vereinfacht in drei Komponenten unterteilt werden: Fangeinrichtungen, Ableitungen und Erdungsanlage. Hierbei müssen die Fangeinrichtungen an Orten platziert werden, an denen es zur lokalen Erhöhung der elektrischen Feldstärke kommen kann, weil dort die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlages am größten ist. Zur Festlegung dieser Orte werden üblicherweise vereinfachte Methoden angewendet: das Blitzkugel-, Maschen- oder Schutzwinkelverfahren [1]. Bei geometrisch komplizierten Anwendungsfällen, wie bei WKAs, eignet sich das Blitzkugelverfahren besonders gut für diese Aufgabe. Gemäß [2] ist das Blitzkugelverfahren jedoch nicht für die Rotorblätter anwendbar. Die Lage und Art der Fangeinrichtungen auf den Rotorblättern ist aktueller Gegenstand der Forschung, siehe z. B. [8] und [9]. Im informativen Anhang C von [2] sind die am häufigsten vorkommenden Ausführungen von Fangeinrichtungen und Ableitungen in Rotorblättern angegeben, siehe Bild 1. Die dargestellten Ausführungen der Fang- und Ableitsysteme lassen sich in zwei Arten unterteilen. Zum einen sind es Systeme, bei denen die Blitzableiter die Blattoberfläche in Nähe der Blattspitze durchstoßen und die Ableitungen im Inneren des Blattes vom Aufnehmer hin zur Blattwurzel verlaufen, siehe Bild 1 (Bauarten A und B).

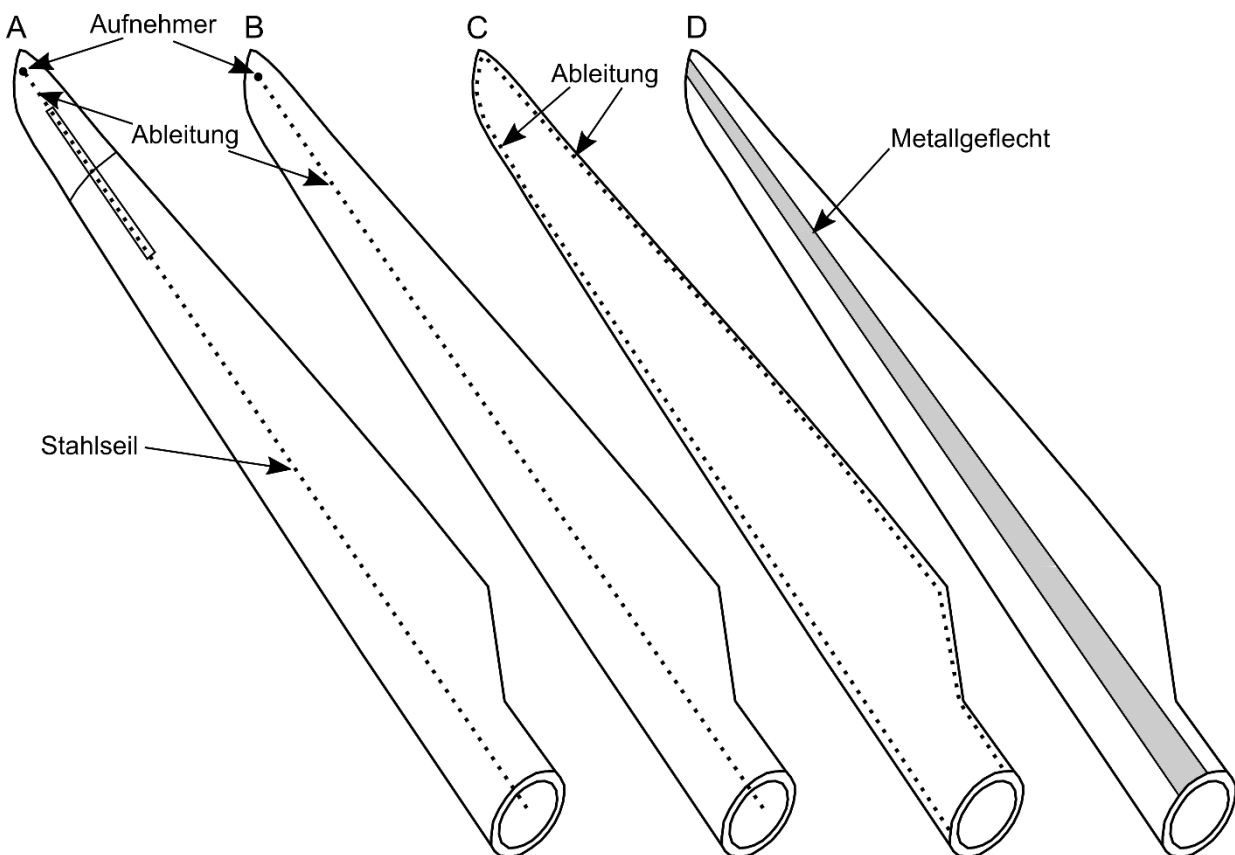


Bild 1: Blitzschutzkonzeptionen für große moderne WKA-Rotorblätter nach [2]

Zum anderen werden die Ableitungen an der Blattoberfläche entlang der Vorderkante angeordnet oder in die Hinterkante eingebettet, Bild 1 (Bauart C). Eine weitere Ausführung der Fang- und Ableitungseinrichtung, die an der Blattoberfläche angebracht wird, ist in Bild 1 als Bauart D dargestellt. Hier wird ein Metallgeflecht entlang der gesamten Blattlänge angebracht, das sowohl die Aufnahme als auch das Ableiten des Blitzstromes gewährleisten soll. Bei den Oberflächensystemen muss stets ein Kompromiss zwischen der ausreichenden Stromtragfähigkeit und der Beeinflussung der strömungsmechanischen Eigenschaften des Blattes gefunden werden. Des Weiteren stellen Geräuschentwicklung und die Befestigungsmethoden der Oberflächensysteme enorme Herausforderungen dar.

Die Bauart A im Bild 1 stellt eine Blattausführung mit Blattspitzenbremse dar. Zur Betätigung der Bremse wird ein Stahlseil verwendet, welches bei ausreichender Dimensionierung auch die Aufgabe der Blitzableitung übernehmen kann. Bei modernen WKAs werden üblicherweise die gesamten Rotorblätter um ihre Achse drehbar montiert (Pitchsystem) und bei Bedarf kann das komplette Blatt zur Abbremsung des Rotors genutzt werden. Somit kann die Blattspitzenbremse entfallen. Aus den genannten Gründen wird im weiteren Teil dieses Beitrages lediglich die Bauart B betrachtet.

4 Numerische Untersuchung

4.1 Ansatz zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke

Zur Prädiktion von Blitzeinschlagsbereichen auf den Rotorblättern von Multimegawatt WKAs muss die Verteilung des elektrischen Feldes bekannt sein. Dazu wird ein CAD Modell einer WKA im elektrostatischen Feld mittels der Finite Elemente Methode (FEM) numerisch untersucht. Zur Berechnung des elektrostatischen Feldes wird zunächst das skalare Potentialfeld φ gemäß der Poisson-Gleichung ermittelt

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (1)$$

mit der Ladungsverteilung ρ , der Permittivität ε und den Laplace-Operator Δ . Durch Vorgabe von Potentialen am Rand des untersuchten ladungsfreien Gebietes kann Gleichung (1) zur Laplace-Gleichung vereinfacht werden:

$$\Delta\varphi = 0. \quad (2)$$

Anhand einer hohen Dichte der Äquipotentiallinien können bereits Bereiche mit hoher Feldstärke identifiziert werden. Die elektrische Feldstärke \vec{E} kann schließlich über den Gradienten des Potentialfeldes gewonnen werden gemäß

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi. \quad (3)$$

Im nächsten Abschnitt wird die Modellbildung erläutert.

4.2 Numerische Implementierung

Die Gleichungen (1) bis (3) werden mit dem elektrostatischen Solver einer gängigen FEM Software für einen ladungsfreien Quader nach Bild 2 gelöst, wobei als Randbedingung das elektrische Potential der unteren Seitenfläche zu $\varphi = 0 \text{ V}$ und das der oberen zu $\varphi = 50 \text{ MV}$ angenommen wird. Im Quader ist das untersuchte Modell einer WKA platziert.

In jedem Rotorblatt des Modells ist jeweils ein Netzwerk eingebaut, welches aus ideal leitenden (PEC) Quadern und Leitern besteht (siehe Bild 3 links und rechts), um die Beschleunigungssensoren samt ihren Zuleitungen nachzubilden. Weiterhin ist in jeder Blattspitze ein ideal leitender Blitzableiter gemäß Bauart B aus Bild 1 modelliert, welcher über Ableitungen mit der Nabe verbunden ist (Bild 3 rechts). Die Zuleitungen der Sensoren werden, ähnlich wie die Blitzableitungen, mit der Nabe verbunden und somit über die Gondel und dem Turm mit der Unterseite des Quaders, welche das Potential $\varphi = 0 \text{ V}$ trägt. Die Dimensionen und Materialparameter des Modells sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

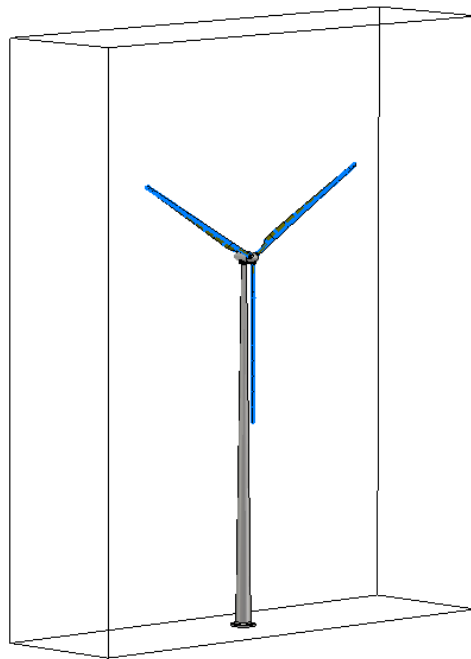


Bild 2: Simulationsmodell einer WKA im Ladungsfreien Quader. Das elektrische Potential der unteren Seitenfläche beträgt $\varphi = 0 \text{ V}$, das der oberen $\varphi = 50 \text{ MV}$.

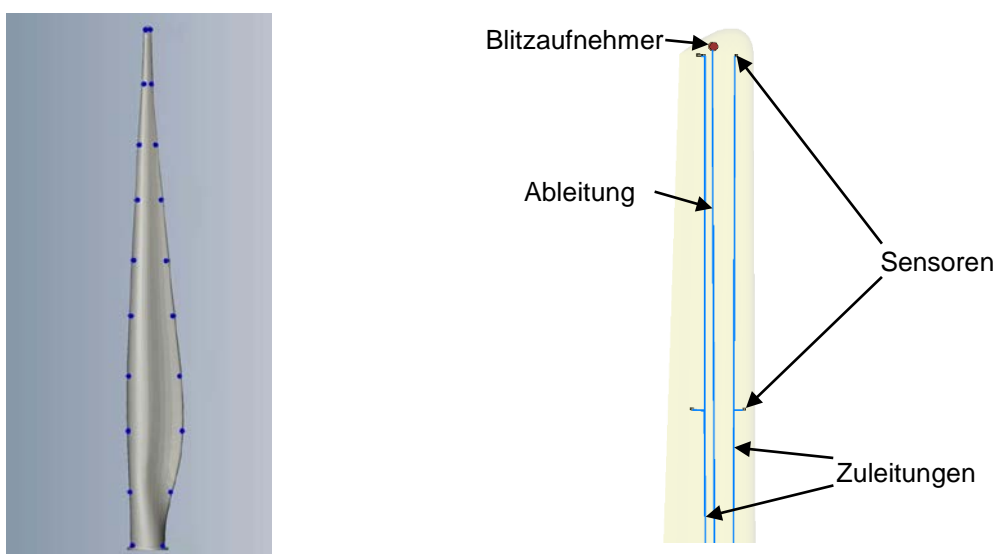


Bild 3: Links: Überblick über die Positionen der Beschleunigungssensoren entlang des Rotorblattes. **Rechts:** Blitzaufnehmer samt Ableitung und Teil des Sensornetzwerkes im Rotorblatt.

Tabelle 1: Dimensionen und Materialparameter des untersuchten WKA Modells

Turmhöhe	100 m
Rotorblattlänge	45 m
Material des Turms, der Gondel und der Nabe	PEC
Material der Sensoren und deren Zuleitungen	PEC
Material der Blitzaufnehmer und Ableitungen	PEC
Material der Rotorblätter	Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) mit $\epsilon_r = 4$, $\mu_r = 1$, $\kappa = 0$

5 Simulationsergebnisse und deren Interpretation

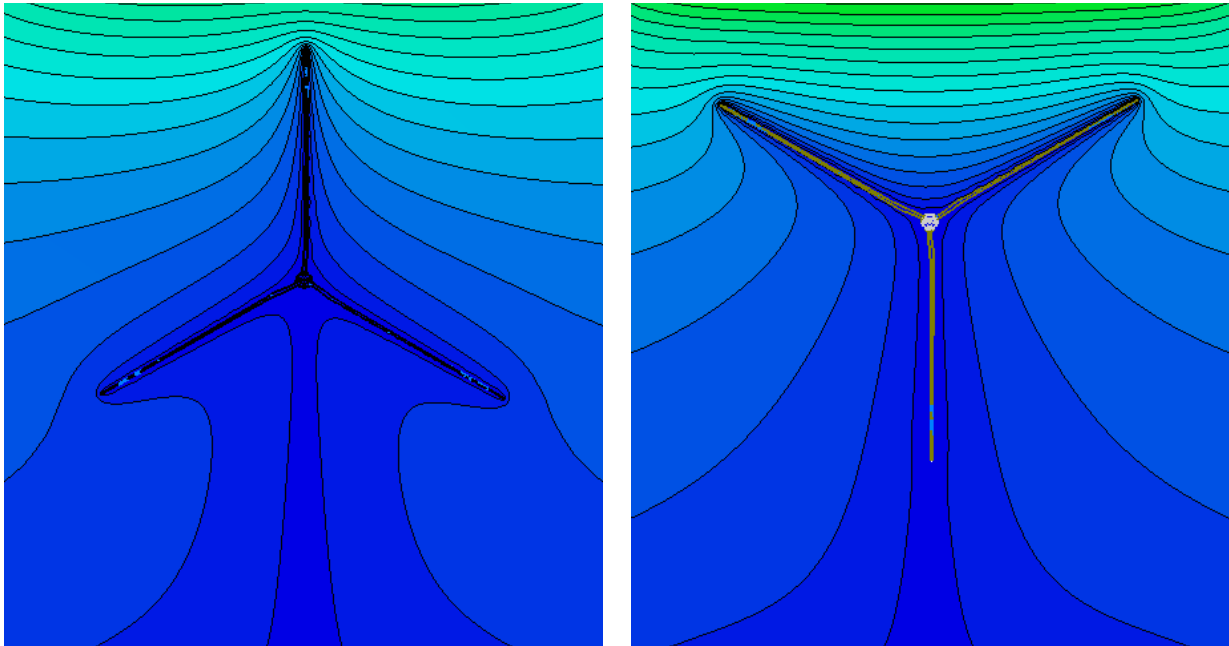


Bild 4: Potentialfelder in einer Ebene durch die Rotorblätter für zwei Extrempositionen des Rotors.
Links: die λ -Position, **Rechts:** die Y-Position des Rotors.

In Bild 4 sind numerisch berechneten Potentialfelder in einer Ebene durch den Rotor exemplarisch für zwei Extrempositionen dargestellt. In beiden Fällen ist die größte Dichte der Äquipotentiallinien jeweils in der Nähe der nach oben gerichteten Blattspitzen zu finden. Somit müssen an diesen Stellen auch die größten elektrischen Feldstärken auftreten. Des Weiteren ist gut zu sehen, dass in der Y-Position des Rotors (Bild 4 rechts) die Dichte der Äquipotentiallinien entlang der oberen Seite der beiden oberen Blätter größer ist als entlang des oberen Rotorblattes in der λ -Position (Bild 4 links). Das bedeutet, dass entlang der beiden Rotorblätter in Y-Position die lokalen Extremwerte der elektrischen Feldstärke ähnliche Größen erreichen. In Hinblick auf die Prädiktion der Blitzeinschlagsbereiche kann geschlussfolgert werden, dass bei der λ -Position der Blitzeinschlag in die Spitze des obersten Blattes am wahrscheinlichsten ist. Im Falle der Y-Position ist ein Blitzeinschlag in die Blattspitzen der beiden oberen Blätter ebenfalls sehr wahrscheinlich, jedoch wird hier aufgrund der hohen Dichten der Äquipotentiallinien entlang der beiden oberen Rotorblätter noch zusätzlich die Verteilung der elektrischen Feldstärke auf der Blattoberfläche in Bild 5 betrachtet. Dort sind lokale Erhöhungen der elektrischen Feldstärke an denjenigen Stellen zu erkennen, an denen auch die Sensoren installiert sind.

Besonders sichtbar ist dies in der Nähe der Blattwurzel. Weiterhin kann zwischen der Blattspitze und näherungsweise der Blattmitte ein Bereich mit teilweise konstanter Feldstärke beobachtet werden, welcher in Bild 5 ist mit einer Ellipse gekennzeichnet ist. Die bereits anhand der Potentialbilder getroffenen Annahmen werden hierdurch bestätigt. Die maximale elektrische Feldstärke tritt auf der Blattspitze auf. Zu besseren Übersicht ist dieser Bereich in Bild 6 vergrößert dargestellt.

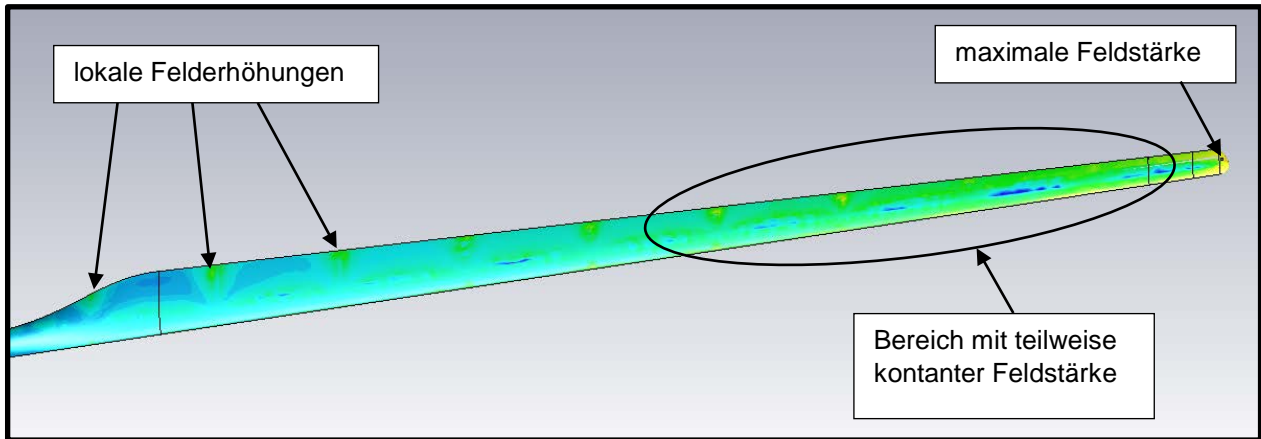


Bild 5: Verteilung der elektrischen Feldstärke auf der Oberfläche eines Rotorblatts in Y-Position des Rotors. Auf das Maximum normierte Darstellung. Es gilt die Skala in Bild 6.

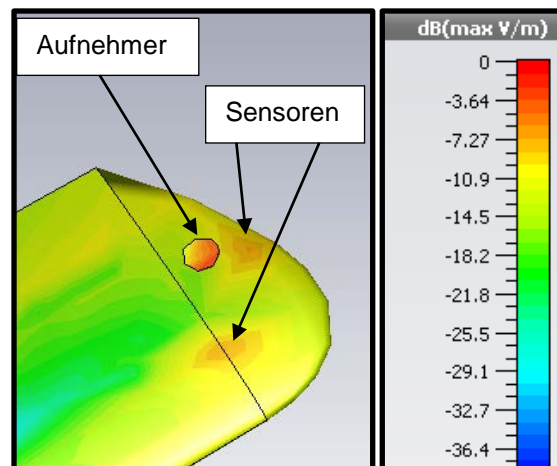


Bild 6: Verteilung der elektrischen Feldstärke auf der Blattspitze.

Die höchste Feldstärke tritt wie erwartet am Blitzableiter auf. Interessanterweise wird auf der Blattoberfläche in unmittelbarer Nähe des Ableiters lediglich eine ca. 6 dB kleinere Feldstärke berechnet (Faktor 2). An diesen Stellen befinden sich die im Inneren des Rotorblattes verbauten Sensoren, die trotz der nichtleitenden Oberfläche des Blattes eindeutig eine Felderhöhung an der Oberfläche des Blattes verursachen. Somit können auch an diesen Stellen Verbindungskanäle für eine Blitzentladung entstehen, was eine Zerstörung der Blattspitze zur Folge haben kann. Die einfachste Abhilfe in diesem Fall ist eine andere, von der Blattspitze entfernte Platzierung der Sensoren. Bei den restlichen Sensoren sollten aufgrund der lokalen Felderhöhungen weitere Blitzableiter entlang des Blattes installiert werden.

6 Zusammenfassung

Zur Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit werden in modernen Windkraftanlagen (WKAs) verstärkt Condition Monitoring Systems (CMS) verbaut. CMS bestehen aus einer Vielzahl an Sensoren, die den Zustand der unterschiedlichen Komponenten und Teilsysteme der WKA überwachen. Da die Rotorblätter eine wesentliche und für den Betrieb der WKA unverzichtbare Komponente darstellen, werden auch diese mit Sensoren versehen. Eine Besonderheit bei der Komponente Rotorblatt besteht darin, dass diese wie auch die in ihr verbaute Sensorik vor direkten Blitzeinschlag geschützt werden muss. Eine Bestimmung von Blitzeinschlagsbereichen mittels des klassischen Blitzkugelverfahrens ist gemäß [2] für die Rotorblätter nicht anwendbar. Deswegen wird in dieser Arbeit zunächst die elektrische Feldstärke als entscheidende Größe für den Blitzeinschlagort motiviert. Anschließend wird die normative Lage für den Blitzschutz von WKAs durchleuchtet und die gängigste Aufnahme- und Ableiteinrichtung definiert, um diese in einem Simulationsmodell zur Vorhersage von Blitzeinschlagstellen auf Rotorblättern mit integrierten Sensornetzen nachzubilden. Dieses Modell wird schließlich in einer elektrostatischen Umgebung mittels numerischer Feldberechnungen untersucht. Aus den gewonnenen Verteilungen der Potentialfelder in der Umgebung einer WKA werden Erhöhungen des elektrischen Feldes auf der Oberfläche einer WKA ermittelt. Diese Feldverteilungen zeigen, dass bei bestimmten Rotorpositionen lokale Erhöhungen der elektrischen Feldstärke entlang der gesamten Blattlänge entstehen und an diesen Stellen Blitzentladungen möglich sind. Diese Information kann bei der Auslegung der Rotorblätter genutzt werden. Die hier vorgestellte Methode stellt ein einfaches Hilfsmittel beim Entwurf des Blitzschutzsystems einer modernen WKA dar.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich bei Herrn Dr. Demming-Janssen von der CST AG für inspirierende Gespräche über Simulationen mit Windkraftanlagen. Herrn Axel Hoffmann gehört der Dank für tatkräftige Unterstützung bei Durchführung der Simulationsarbeiten. Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes DFWind (<http://dfwind.de>). Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, FKZ 0325936A-E.

Literaturangaben

- [1] Dehn + Söhne: Blitzplaner, 3. Auflage, Dehn, 2013
- [2] IEC 61400-24:2010: Wind turbines - Part 24: Lightning protection
- [3] Germanischer Lloyd, GL 2010 IV: Guideline for the Certification of Wind Turbines
- [4] DIN EN 62305-1 bis 4: Blitzschutz, Teil 1 bis 4
- [5] Hasse, P., Wiesinger, J., Zischank, W.: Handbuch für Blitzschutz und Erdung, 5. Auflage, Pflaum, 2006
- [6] Rakov, V.A., Uman, M.A.: Lightning Physics and Effects, Cambr. Univ. Pr., 2003
- [7] Smorgonskiy, A., Rachidi, F., Rubinstein, M., Korovkin, N. V., Vassilopoulos A.P.: Are Standardized Lightning Current Waveforms Suitable for Aircraft and Wind Turbine Blades Made of Composite Materials? IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 59, No. 4, August 2017
- [8] Madsen, S.F., Holboll, J., Henriksen, M., Bertelsen, K., Erichsen, H. V.: New test method for evaluating the lightning protection system on wind turbine blades, Proc. 28. Int. Conf. on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 2006
- [9] Wang, Y., Hu, W.: Investigation of the Effects of Receptors on the Lightning Strike Protection of Wind Turbine Blades, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 59, No. 4, August 2017