

Elektromagnetische Verträglichkeit eines instrumentierten Rotorblattes

Dr.-Ing. Olaf Berndt, WaveTec Engineering Ingenieurbüro Dr. Berndt, Möskenweg 21, 17454 Zinnowitz, oberndt@wavetec-engineering.de

Dipl.-Ing. Birgit Wieland, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland, birgit.wieland@dlr.de

Dipl.-Ing. Michael Przybilla, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland, michael.przybilla@dlr.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias Hampe, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel, m.hampe@ostfalia.de

1 Abstract

In dieser Arbeit wird der Einfluss eines Blitzeinschlages auf Messsensoren und Messleitungen untersucht, die sich im Rotorblatt einer Windkraftanlage befinden. Weiterhin wird die Wirksamkeit wichtiger Schutzmaßnahmen beurteilt, insbesondere die Verdrillung oder Schirmung von Signalleitern. Abschließend wird der Trennungsabstand analytisch berechnet, bei dem kein Überschlag vom Schutzleiter auf die vorhandenen Signalleiter mehr erfolgt.

2 Einleitung

Im Folgenden wird die elektromagnetische Verträglichkeit eines instrumentierten Rotorblattes gemäß Abbildung 1 untersucht. In die Windkraftanlage schlägt annahmegemäß ein Blitz ein, der von der Spitze des Rotorblattes vollständig über einen vorhandenen Schutzleiter zur Masse hin abfließt. In der Nähe dieses Blitzableiters befinden sich weitere Leitungen, die mit Messsensoren im Inneren des Rotorblattes verbunden sind und der Datenübertragung dienen. Es ist die Frage zu beantworten, ob eine unzulässig hohe Überkopplung elektromagnetischer Energie vom Schutzleiter auf die Datenleitungen erfolgt.

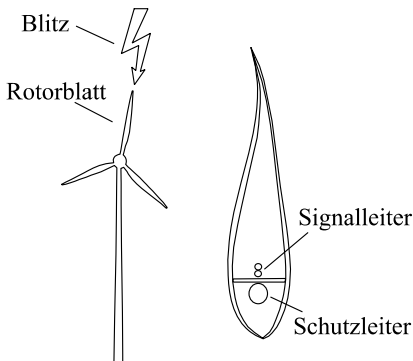


Bild 1: Blitzeinschlag in einer Windkraftanlage. Im Rotorblatt befinden sich in der Nähe des Schutzleiters weitere Signalleiter zur Datenübertragung

Bei der vorliegenden Analyse wird die Annahme getroffen, dass der Blitzstrom eine transversal-elektromagnetische Welle auf dem Schutzleiter ausbildet, was in der Regel als zulässig erachtet werden kann [1]. In diesem Fall ist eine analytische Berechnung der elektromagnetischen Verkopplung möglich, eine ausführliche Beschreibung findet sich in [2], [3].

3 Normblitz

Die für Analysezwecke anzuwendende Zeitfunktion des Stromes $i(t)$ auf dem Blitzableiter lautet [4]

$$i(t) = \frac{I}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (1)$$

Die eingeführten Größen sind hier der Stromsichelwert I , der Korrekturfaktor k , die Zeit t , die Stirnzeitkonstante τ_1 und die Rückenzeitkonstante τ_2 . Im Folgenden wird der Normblitz $1/200 \mu\text{s}$ (erster negativer Stromstoß) betrachtet, da er die höchste Bedrohung durch Induktionswirkung hat [4], [5]. Er hat eine Stirnzeit $T_1 = 10 \mu\text{s}$ und eine Rückenzeit $T_2 = 200 \mu\text{s}$, mit den Parametern $I = 100 \text{ kA}$, $k = 0,986$, $\tau_1 = 18 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 285 \mu\text{s}$. Bild 2 zeigt a) den zeitlichen Verlauf und b) das Einseitenamplitudenspektrum $|I(f)|$ des Normblitzes nach (1). Wie in der Literatur üblich beschränkt sich die folgende Untersuchung auf Frequenzen bis $20,0 \text{ MHz}$ [6]-[8].

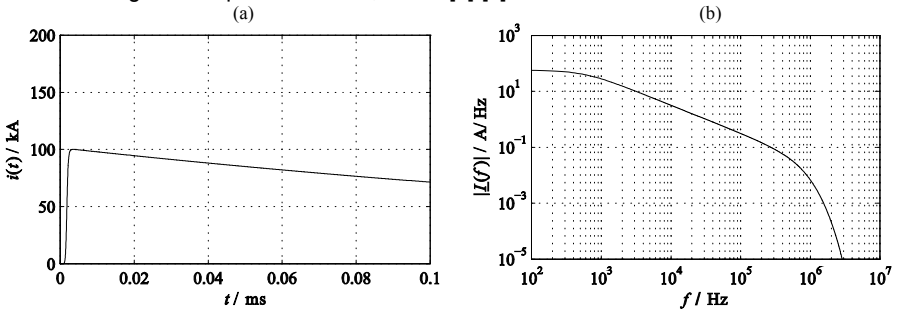


Bild 2: Normblitz $1/200 \mu\text{s}$ a) Erster negativer Stromstoß; b) Einseitenamplitudenspektrum $|I(f)|$.

4 Modellierung des instrumentierten Rotorblattes

Das instrumentierte Rotorblatt wird durch ein Vierleitersystem gemäß Bild 3 modelliert. Der Leiter 1 stellt den Schutzleiter im Rotorblatt dar, über den der Blitz zur Masse hin abfließt. Bei den Leitern 2 und 3 handelt es sich um Signalleitungen innerhalb des

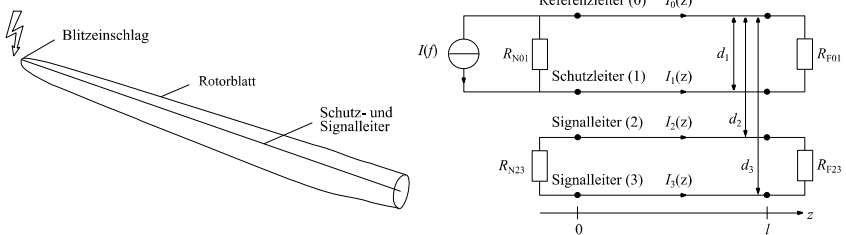


Bild 3: Modellierung eines Blitzeinschlags in der Spitze eines Rotorblattes. Der Blitzstrom $I(f)$ fließt über einen Schutzleiter 1 ab, in dessen Nähe sich zwei Signalleiter 2 und 3 befinden. Am nahen und fernen Ende der Leiter befinden sich die Abschlüsse R_{N01} , R_{N23} , R_{F01} , R_{F23} , die Abstände zum fiktiven Referenzleiter 0 sind d_1 , d_2 , d_3 .

Rotorblattes, deren Störfestigkeit im Folgenden zu untersuchen ist. Zudem wird in größerem Abstand ein Referenzleiter 0 eingeführt, der in der Realität nicht vorhanden ist und ausschließlich der Modellierung des Blitzes durch eine Stromquelle dient. Die Leiter sind in einer Ebene parallel zueinander angeordnet und befinden sich im Vakuum. Grundsätzlich werden bei der gewählten Anordnung die höchsten induzierten Ströme zu beobachten sein. In der Praxis hingegen ist möglichst darauf zu achten, die beiden Signalleiter 2 und 3 mit gleichem Abstand in einer Ebene orthogonal zum Schutzleiter 1 anzubringen. Schließlich sollte angemerkt werden, dass der Strom durch den Referenzleiter 0 die induzierten Ströme auf den Signalleiter 2 und 3 tendenziell vermindert. Dieser Effekt ist umso stärker, je näher der Referenzleiter 0 und die Signalleiter 2 und 3 zueinander angeordnet sind.

Im betrachteten Modell sind mehrere Parameter vorhanden, die jederzeit an die tatsächlichen Verhältnisse im Rotorblatt angepasst werden können. Für eine erste Analyse wird die Länge aller Leitungen gewählt zu $l = 50 \text{ m}$. Die kreisrunden Leiter 0 und 1 weisen den Radius $r_0 = r_1 = 15 \text{ mm}$ auf, die Leiter 2 und 3 den Radius $r_2 = r_3 = 0,1 \text{ mm}$. Die Abstände der Leiter 1, 2, 3 bezogen auf den Leiter 0 sind $d_1 = 100 \text{ mm}$, $d_2 = 100,5 \text{ mm}$ und $d_3 = 100,5 \text{ mm}$. Die Leiter bestehen aus Kupfer mit der Leitfähigkeit $\sigma_{\text{Cu}} = 59 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Am nahen Leitungsende bei $z = 0$ ist zwischen Referenzleiter 0 und Schutzleiter 1 eine nahezu ideale Stromquelle angeschlossen, die den Innenwiderstand $R_{N01} = 10^8 \Omega$ aufweist und einen Blitzimpuls mit dem Spektrum $\underline{I}(f)$ einspeist. Das ferne Ende dieser Leiter ist bei $z = l$ niederohmig mit dem Widerstand $R_{F01} = 100 \Omega$ abgeschlossen. Die Signalleiter 2 und 3 sind am nahen und fernen Ende schließlich über die Widerstände $R_{N23} = R_{F23} = 100 \Omega$ miteinander verbunden.

5 Vierleitersystem: Rechnung

Die analytische Berechnung von Mehrleitersystemen wird ausführlich behandelt in [2], [3]. Die hinlaufenden und rücklaufenden Stromwellen \mathbf{I}_m^+ und \mathbf{I}_m^- lassen sich aus der Beschaltung am nahen und fernen Leiterende bestimmen, man erhält sie als Lösung der Gleichung [2]

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Y}_N \mathbf{Z}_C + 1) \mathbf{T}_1 & (\mathbf{Y}_N \mathbf{Z}_C - 1) \mathbf{T}_1 \\ (\mathbf{Y}_F \mathbf{Z}_C - 1) \mathbf{T}_1 e^{-\gamma l} & (\mathbf{Y}_F \mathbf{Z}_C + 1) \mathbf{T}_1 e^{\gamma l} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathbf{I}_m^+ \\ \mathbf{I}_m^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_N \\ \mathbf{I}_F \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Die Quellen und Lasten werden dabei einerseits abgebildet durch die Stromvektoren \mathbf{I}_N , \mathbf{I}_F sowie andererseits durch die Admittanzmatrizen \mathbf{Y}_N , \mathbf{Y}_F . In der untersuchten Anordnung gibt es lediglich den eingepprägten Blitzstrom $\underline{I}(f)$ zwischen den Leitern 0 und 1, somit folgt

$$\mathbf{I}_N = \begin{bmatrix} \underline{I}(f) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Die Admittanzmatrizen ergeben sich aus der Verschaltung der Leiter gemäß Bild 3. Nach einer kurzen Analyse erhält man

$$\mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} 1/R_{N01} & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_{N23} & -1/R_{N23} \\ 0 & -1/R_{N23} & 1/R_{N23} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_F = \begin{bmatrix} 1/R_{F01} & 0 & 0 \\ 0 & 1/R_{F23} & -1/R_{F23} \\ 0 & -1/R_{F23} & 1/R_{F23} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Neben der Einheitsmatrix 1 ist zur Lösung von (2) schließlich noch die charakteristische Impedanz Z_C erforderlich mit [2]

$$Z_C = Z' T_1 \gamma^{-1} T_1^{-1} \quad (5)$$

und T_1 und γ als Lösung des Eigenwertproblems

$$T_1^{-1} Y' Z' T_1 = \gamma^2, \quad (6)$$

mit der Admittanz- und der Impedanzbelagsmatrix Y' und Z' gemäß

$$Y' = G' + j\omega C', \quad Z' = R' + j\omega L'. \quad (7)$$

Bild 4 zeigt die berechneten Ergebnisse für das Modell gemäß Abschnitt 4. Dargestellt ist der Betrag der induzierten Stromamplitude $|I_2(z)|$ auf Leiter 2 bezogen auf den eingepprägten Blitzstrom $|I(f)|$ am nahen Ende $z = 0$ und am fernen Ende $z = l$. Für den Strom auf Signalleiter 3 gilt $|I_2(0)| = |I_3(0)|$ und $|I_2(l)| = |I_3(l)|$. Die induzierten Ströme nehmen zunächst mit der Frequenz zu, bei höheren Frequenzen kommt es zu Resonanzeffekten auf den Leitungen, wobei am fernen Leitungsende insgesamt die höheren Amplituden zu beobachten sind. Die Verläufe in Bild 4 lassen sich als Übertragungsfunktion interpretieren. Die Einseitenamplitudenspektren $|I_2(f)|$ erhält man durch Multiplikation der Übertragungsfunktion aus Bild 4 mit dem Spektrum des Normblitzes aus Bild 2. Die

entsprechenden Zeitsignale $i_2(t)$ ergeben sich mittels der inversen Fourier-Transformation der Spektren.

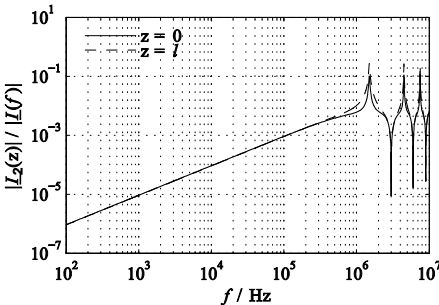


Bild 4: Übertragungsfunktion $|I_2(z)|/|I(f)|$ des induzierten Stromes auf Signalleiter 2 am nahen Ende $z = 0$ und am fernen Ende $z = l$. Für die untersuchte Anordnung gilt $|I_2(0)| = |I_3(0)|$ und $|I_2(l)| = |I_3(l)|$.

6 Vierleitersystem: Simulation

In einem nächsten Schritt wurde die untersuchte Anordnung mit der Simulationssoftware FEKO analysiert. Die Simulation bietet den Vorteil, dass sich auch mögliche EMV-Maßnahmen wie eine Verdrillung oder Schirmung der Signalleiter relativ einfach untersuchen lassen. Bild 5 zeigt das Simulationsmodell, bei dem zusätzlich zum Schutzleiter 1 und den Signalleitern 2 und 3 eine durchgehende Masselage im Abstand $d_1/2$ zum Schutzleiter definiert wurde. Diese Masselage ersetzt den Referenzleiter 0 aus der Rechnung, dient demnach also als Rückleiter für den eingepprägten Strom. Nur mit einer solchen Masselage ist es in FEKO möglich, auf einfache Art und Weise die Schirmung und Verdrillung der Signalleiter mittels einer Softwareoption zu implementieren. In Bild 5 b) ist ein Ausschnitt des Simulationsmodells am nahen Leitungsende $z = 0$ dargestellt. Als Anregung wurde dabei eine Spannungsquelle genutzt, die Umrechnung auf den eingepprägten Strom $|I(f)|$ erfolgt über den Widerstand R_{N01} . Ebenso wie die analytische Rechnung wird die Simulation im Frequenzbereich bis 20,0 MHz durchgeführt.

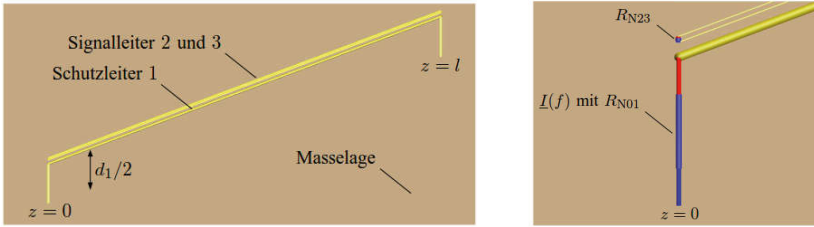


Bild 5: a) Dreidimensionale Ansicht des untersuchten Simulationsmodells mit dem Schutzleiter 1, den Signalleitern 2 und 3 sowie einer Masselage im Abstand $d_1/2$ zum Schutzleiter 1; b) Ausschnittsweise Vergrößerung des Simulationsmodells am nahen Ende $z = 0$ mit der Spannungsquelle $I(f)$ und den Widerständen R_{N01} , R_{N23} .

Bild 6 a) zeigt den berechneten und simulierten Strom auf Signalleiter 2 am fernen Leitungsende $z = l$ bei Einspeisung des Normblitzes $1/200 \mu\text{s}$. Betrachtet wird die Anordnung gemäß Abschnitt 4 mit dem Abstand $d_{23} = 20 \text{ mm}$ und $d_{12} = 50 \text{ mm}$. Die Ergebnisse der Simulation liegen leicht unterhalb denen der Rechnung, auch ist eine leichte zeitliche Verschiebung zu erkennen. Insgesamt weisen beide jedoch eine sehr gute Übereinstimmung auf. In Bild 6 b) sind die Auswirkungen einiger EMV-Maßnahmen auf den zeitlichen Verlauf des induzierten Stromes $i_2(t, l)$ am fernen Leitungsende $z = l$ dargestellt. In der Simulation wurde eine Verdrillung und eine Schirmung der Signalleiter 2 und 3 untersucht. Es ist klar zu erkennen, dass beide Maßnahmen den induzierten Strom deutlich vermindern. Allerdings greift auch die Simulation auf die Mehrleitertheorie zurück, weshalb eine mögliche Kopplung über die Stirnflächen der Schirmung unberücksichtigt bleibt. Zudem wird die Schirmung an beiden Enden der Signalleiter nicht durchgehend bis zu den Lasten ausgeführt werden können, freiliegende Leiterstücke erhöhen dann den induzierten Strom. Die zuvor genannten Aspekte sollten in weiterführenden Arbeiten näher analysiert werden.

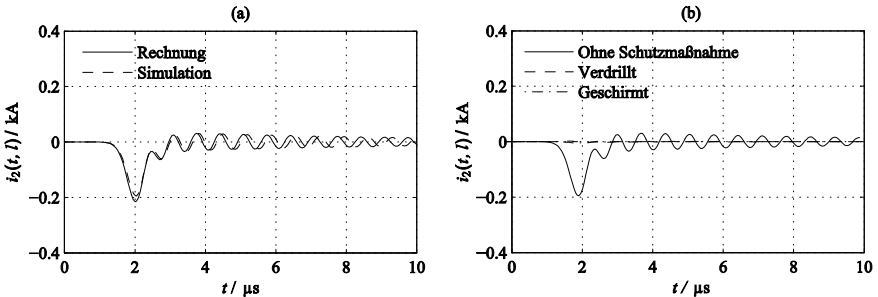


Bild 6: Strom $i_2(t, l)$ auf Signalleiter 2 am fernen Ende $z = l$ mit $d_{23} = 2,0 \text{ mm}$ und $d_{12} = 50,0 \text{ mm}$; a) Vergleich von berechnetem und simuliertem Strom; b) Simulation von EMV-Maßnahmen: Signalleiter ungeschützt, verdrillt, geschirmt;

7 Trennungsabstand

Neben einer Minderung der induzierten Ströme auf den Signalleitern ist es zudem erforderlich, dass ein definierter Trennungsabstand s zwischen dem Schutzleiter 1 und den Signalleitern 2 und 3 gewährleistet wird. Hierunter wird der Abstand zwischen zwei

leitenden Teilen verstanden, bei dem keine gefährliche Funkenbildung eintreten kann [9]. In der Literatur finden hierzu sich vielfältige Berechnungsbeispiele, häufig sind dort Werte im Bereich $s = 0,15 \text{ m} \dots 0,5 \text{ m}$ angegeben [5], [10], [11], es gilt allgemein

$$s = \frac{k_i k_m l}{k_c} \quad (8)$$

mit der Länge l sowie den Koeffizienten für Schutzklasse k_i , Isolierstoff k_m und Blitzstrom k_c . Die jeweiligen Werte der Koeffizienten sind dabei geeigneten Tabellen zu entnehmen. In der Praxis ermöglicht Gleichung (8) eine erste Näherung des Trennungsabstandes, im Folgenden soll dieser jedoch für eine einfache Anordnung analytisch exakt bestimmt werden. Betrachtet wird hierzu die Anordnung gemäß Bild 7.

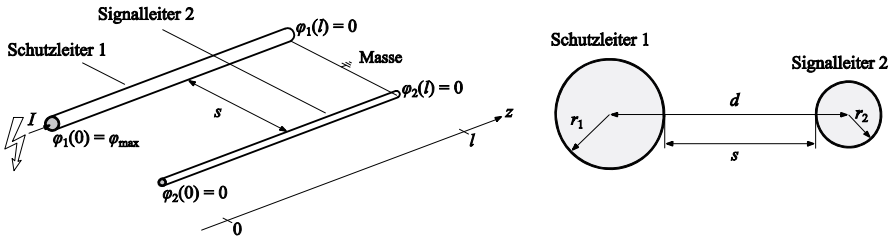


Bild 7: Definition des Trennungsabstandes s zwischen Schutzleiter 1 und Signalleiter 2. Die kreisrunden Leiter haben die Radien r_1 und r_2 , die Mittelpunkte haben den Abstand d . Am fernen Ende $z = l$ sind beide Leiter geerdet mit $\varphi_1(l) = \varphi_2(l) = 0$, am nahen Ende $z = 0$ weist Schutzleiter 1 aufgrund des Blitzstromes I das maximale Potenzial $\varphi_1(0) = \varphi_{\max}$ auf.

Ausgegangen wird von zwei kreisrunden Leitern, die auf die Leitermittelpunkte bezogen den Abstand d zueinander aufweisen. Die Leiter sind an ihrem fernen Ende $z = l$ mit Masse verbunden, besitzen dort demnach das Potenzial $\varphi_1(l) = \varphi_2(l) = 0$. Auf dem Schutzleiter fließt ein konstanter Blitzstrom I , der einen Potenzialunterschied zwischen nahem und fernem Leiterende bewirkt. Es erfolgt also eine statische Betrachtung, weiterführende Arbeiten sollten zeitveränderliche Ströme umfassen. Am nahen Ende $z = 0$ wird das Potenzial auf dem Schutzleiter 1 maximal,

$$\varphi_1(0) = \varphi_{\max} = \frac{I l}{\sigma_{\text{Cu}} \pi r_1^2} \quad (9)$$

Auf dem Leiter 2 fließt kein Strom, dort gilt für das Potenzial überall $\varphi_2(z) = 0$. Die höchste Spannung tritt demnach am nahen Ende $z = 0$ der Leiter auf, dort werden folglich auch die elektrischen Feldstärken maximal. Um einen Überschlag von Leiter 1 auf Leiter 2 ausschließen zu können, darf das elektrische Feld E zwischen diesen Leitern in keinem Punkt größer sein als die Durchschlagfestigkeit von Luft,

$$|\vec{E}|_{\max} \leq 3300,0 \frac{\text{kV}}{\text{m}} \quad (10)$$

Das elektrische Feld $|\vec{E}|$ lässt sich nach Bild 8 in der Schnittebene $z = 0$ durch zwei Linienladungen $+Q'$ und $-Q'$ an den Orten $x = -\delta$ und $x = +\delta$ beschreiben [2], [3], [12],

$$\vec{E} = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{(x+\delta)^2 + y^2} \cdot \begin{pmatrix} x+\delta \\ y \end{pmatrix} - \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{(x-\delta)^2 + y^2} \cdot \begin{pmatrix} x-\delta \\ y \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$Q' = \frac{2\pi\epsilon\varphi_{\max}}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}\right)}, \quad \delta = \frac{\sqrt{(d^2 - r_1^2 - r_2^2)^2 - 4r_1^2 r_2^2}}{2d} \quad (12)$$

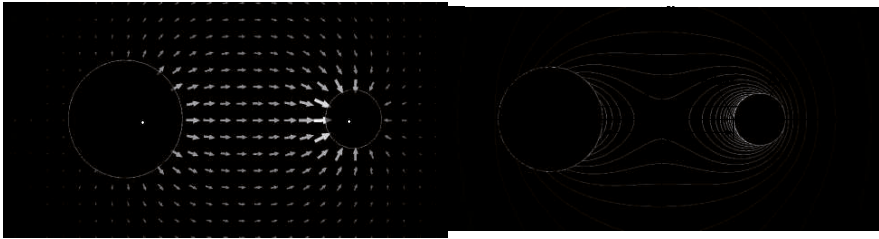


Bild 8. Elektrische Feldverteilung zwischen zwei kreisrunden Leitern in der Ebene $z = 0$, beschrieben durch zwei Linienladungen $+Q'$ und $-Q'$ an den Orten $x = -\delta$ und $x = +\delta$ mit den Abständen Δr_1 und Δr_2 zu den jeweiligen Leitermittelpunkten.

Die maximale Feldstärke $|\vec{E}|_{\max}$ berechnet sich dann auf dem dünneren Leiter 2 am Ort $x = \delta + \Delta r_2 - r_2, y = 0$ zu

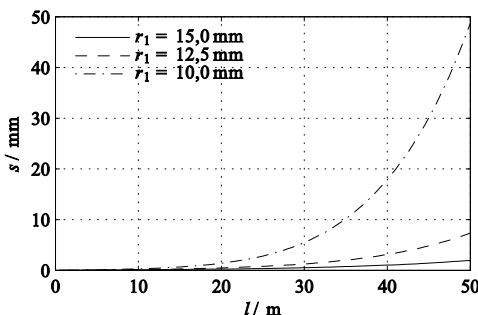
$$|\vec{E}|_{\max} = \frac{Q'}{2\pi\epsilon} \cdot \left[\frac{1}{2\delta + \Delta r_2 - r_2} - \frac{1}{\Delta r_2 - r_2} \right] \quad (13)$$

mit dem Abstand Δr_2 der Linienladung $-Q'$ zum Mittelpunkt des Leiters 2 [12],

$$\Delta r_2 = \frac{d^2 - r_1^2 + r_2^2 - 2d\delta}{2d} \quad (14)$$

Aus Gleichung (13) lässt sich schließlich für gegebene Werte von r_1, r_2, I, l und $|\vec{E}|_{\max}$ der Trennungsabstand s bestimmen. Dabei muss man allerdings auf numerische Lösungsverfahren zurückgreifen, da insbesondere die Ladung Q' stark nichtlinear vom Abstand d und somit auch von $s = d - r_1 - r_2$ abhängt. Großen Einfluss auf die Ergebnisse hat hier der Radius r_1 des Schutzleiters 1, da dieser sowohl das Potenzial φ_{\max} als auch den Kapazitätsbelag der Anordnung beeinflusst. Weiterhin ist der Strom I von Bedeutung, die größten Ströme fließen beim positiven Erstblitz [4].

Bild 9 zeigt die mit dem Newton-Verfahren berechneten Trennungsabstände s als Funktion der Leiterlänge l für drei unterschiedliche Radien r_1 . Dabei wurde der Strom nach oben abgeschätzt mit $I = 1000 \text{ kA}$, dieser Wert wird mit einer Wahrscheinlichkeit $P = 0\%$ nicht überschritten. Bei der Überlagerung mehrerer Blitze sind jedoch durchaus höhere Ströme möglich [4]. Der Radius des Signalleiters 2 wurde gewählt zu $r_2 = 0,1 \text{ mm}$, für die maximale Feldstärke gilt $|\vec{E}|_{\max} = 3300 \text{ kV/m}$. Wird der Radius des Schutzleiters



groß genug gewählt mit $r_1 > 100 \text{ mm}$, gilt für den Trennungsabstand $s < 500 \text{ mm}$.

Bild 9: Mit dem Newton-Verfahren berechneter Trennungsabstand s als Funktion der Leiterlänge l für drei unterschiedliche Radien r_1 . Die weiteren Größen sind $r_2 = 0,1 \text{ mm}$, $I = 1000 \text{ kA}$, $|\vec{E}|_{\max} = 3300,0 \text{ kV/m}$.

8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Elektromagnetische Verträglichkeit eines instrumentierten Rotorblatts untersucht. Insbesondere wurde dabei berechnet, inwieweit ein auf dem Schutzleiter fließender Strom auf Signalleitungen überkoppelt. Die Rechnungen wurden mit Simulationen verglichen, es ergab sich eine gute Übereinstimmung. Es konnte gezeigt werden, dass Maßnahmen wie eine Verdrillung oder Schirmung der Signalleiter die EMV deutlich verbessert. In einem weiteren Schritt wurde der Trennungsabstand zwischen Schutz- und Signalleiter analytisch berechnet. In weiterführenden Arbeiten sollte die Analyse für den zu realisierenden Aufbau wiederholt werden, beispielsweise sollten die Lastwiderstände vermessen und entsprechend modelliert werden. Auch ließe sich der Einfluss leitender Materialien im Rotorblatt untersuchen wie beispielsweise Grafit. Ein wichtiger Aspekt ist zudem das jeweils realisierte Schirmkonzept und dessen Güte. Neben der Stromtragfähigkeit ist dabei die Schirmdämpfung von zentraler Bedeutung. Die Berechnung des Trennungsabstandes sollte zusätzlich erweitert werden auf zeitlich veränderliche Ströme. Abschließend ist anzumerken, dass in der vorliegenden Arbeit von einem Einschlag des Blitzes in die Spitze des Schutzleiters ausgegangen wird. Offen ist demnach der Einfluss des Blitzes, sobald dieser direkt auf die Signalleiter einkoppelt.

9 Literatur

- [1] V. Cooray: *Lightning Electromagnetics*, London: The Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [2] C.R. Paul: *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, 2. Auflage, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [3] C.R. Paul und A.E. Feather: "Computation of the Transmission Line Inductance and Capacitance Matrices from the Generalized Capacitance Matrix", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 18, no. 4, pp. 175-183, Nov. 1976.
- [4] DIN EN 62305-1: *Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*, Deutsche Fassung, 2011.
- [5] Dehn + Söhne: *Blitzplaner*, 3. Auflage, Neumarkt: Dehn + Söhne, 2013.
- [6] U. Sonnadara, V. Cooray, und M. Fernando: "The Lightning Radiation Field Spectra of Cloud Flashes in the Interval From 20 kHz to 20 MHz", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.48, no. 1, pp. 234-239, Feb. 2006.
- [7] C. Willett, J. C. Bailey, C. Leteinturier, und E. P. Krider: "Lightning electromagnetic radiation field spectra in the interval from 0.2–20 MHz", *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 20367–20387, 1990.
- [8] C. D. Weidman und E. P. Krider: "The amplitude spectra of lightning radiation fields in the interval from 1 to 20 MHz", *Radio Sci.*, vol. 21, pp. 964–970, 1986.
- [9] DIN EN 62305-3: *Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen*, Deutsche Fassung, 2012.
- [10] A. Küchler: *Hochspannungstechnik*, 3. Auflage, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [11] P. Hasse, J. Wiesinger, und W. Zischank: *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*, 5. Auflage, München: Richard Pflaum Verlag, 2006.
- [12] P. Leuchtman: *Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie*, München: Pearson Studium, 2005.