

Methoden der Netzwerkmodellierung von Transferfunktionen indirekter Blitzeffekte auf Grundlage numerischer Simulation in Zeit- und Frequenzbereich

Prof. Dr. rer. nat. habil. Frank Gronwald

Dipl.-Ing. Fabian Happ

Technische Universität Hamburg, Institut für Theoretische Elektrotechnik

1. Einführung

Der Blitzschutz von Systemen mit elektrischer und elektronischer Ausrüstung ist geprägt von prinzipiell gut verstandenen und etablierten Schutzkonzepten [HWZ05]. In bestimmten Hochtechnologiebereichen, und hier ist speziell die Luftfahrtindustrie anzuführen, ist der Blitzschutz jedoch in den letzten Jahren wieder verstärkt in den Fokus von Entwicklung und Forschung gerückt. Dies ist maßgeblich mit der Einführung von *Kohlefaserverbundstoffen* verknüpft, welche vormals metallische Komponenten ersetzen. Mit dieser Ersetzung gehen mechanische und wartungstechnische Vorteile einher, aus elektrotechnischer Sicht folgen aus der Verwendung von Kohlefaserverbundstoffen aber verschlechterte Eigenschaften der Elektromagnetischen Verträglichkeit und des Blitzschutzes aufgrund verringerter elektrischer Leitfähigkeit.

Innerhalb des Blitzschutzes wird zwischen direkten und indirekten Blitzeffekten unterschieden. *Direkte Blitzeffekte* beziehen sich auf direkte Wirkungen des Blitzstromes auf ein zu schützendes System und beinhalten thermische und mechanische Wirkungen [HWZ05]. Um kohlefaserbasierte Komponenten an blitzstromgefährdeten Positionen zu schützen, werden daher häufig metallische Schichten, etwa in Form von Kupfernetzen, in das Kohlefasermaterial einlaminiert. Dieser Schutz vor direkten Blitzeffekten wird im Folgenden nicht weiter betrachtet. *Indirekte Blitzeffekte* beziehen sich auf feldgebundene Wirkungen. Modelliert wird hier üblicherweise ein Blitzstrom als Störquelle, der entweder über das zu schützende System fließt oder einen elektromagnetischen Puls auslöst, und eine an einer Störsenke definierte Störspannung. Blitzströme und dadurch induzierte Störspannungen sind über elektromagnetische Feldwirkungen verknüpft und ihre Verhältnisse definieren Transferfunktionen indirekter Blitzeffekte, deren numerische Bestimmung im Folgenden beschrieben wird. Dazu geeignete Vorgehensweisen sind prinzipiell bekannt [ADG08], doch treten in der Praxis oftmals numerische Schwierigkeiten auf, die durch die vergleichsweise lange Dauer und dem damit verbundenen niederfrequenten Spektrum der Blitzanregung begründet sind.

Im Folgenden dieses Beitrages werden Leitlinien formuliert, um mit bestehenden numerischen Feldberechnungsverfahren die für die EMV relevanten Transferfunktionen indirekter Blitzeffekte berechnen zu können. Dazu werden zunächst in Abschnitt 2 die diesen Berechnungen innewohnenden Schwierigkeiten erläutert und eine analytische Lösung zur Impedanzberechnung von streifenförmigen Leitern als Benchmarktest für numerische Feldberechnungsprogramme vorgeschlagen [GH13]. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3 die Makromodellierung von Blitztransferfunktionen beschrieben und weiterhin ein adaptives Verfahren skizziert [DPD09, AG11], welches die Berechnungsdauer von Zeitbereichsverfahren durch die Wahl geeigneter Anregungsverfahren deutlich verkürzen kann.

2. Numerische Feldberechnung für indirekte Blitzeffekte

2.1 Blitzanregungen und niederfrequente Spektren

Zentral für Blitzschutzanalysen sind normative Blitzstromverläufe, welche den Blitz als EMV- Störquelle charakterisieren. Verschiedenen Phasen der Blitzentladung sind verschiedene Stromverläufe zugeordnet. Als besonders kritisch wird der Stromverlauf der Hauptentladung von „Erde zu Wolke“-Blitzen angesehen. Im Standard [SAE05] wird dieser Stromverlauf als *Current Component A* bezeichnet und durch einen doppelt-exponentiellen Puls modelliert, siehe Bild 1. Die darin auftretenden Konstanten sind durch $I_0 = 218,81 \text{ kA}$, $\alpha = 11354/\text{s}$, $\beta = 647265/\text{s}$ gegeben. Weitere Parameter $\tau_f = 1/\alpha$ und $\tau_r = 1/\beta$ bestimmen die in Bild 1 eingezeichneten Abkling- und Anstiegszeiten zu jeweils $445,66 \mu\text{s}$ und $3,40 \mu\text{s}$. Das zugeordnete Frequenzspektrum ist in Bild 1 zusätzlich dargestellt, die für den doppelt-exponentiellen Puls charakteristischen zwei Knickfrequenzen haben die Werte $1,81 \text{ kHz}$ und $103,02 \text{ kHz}$. Daraus ist ersichtlich, dass für Blitzanalysen die Frequenzen oberhalb einiger Megahertz in der Regel nicht betrachtet werden müssen. Ausnahmen hiervon sind prinzipiell durch hochresonante Strukturen gegeben, die in der Praxis aber nur selten auftreten und erfahrungsgemäß nicht zu dominanten Effekten führen.

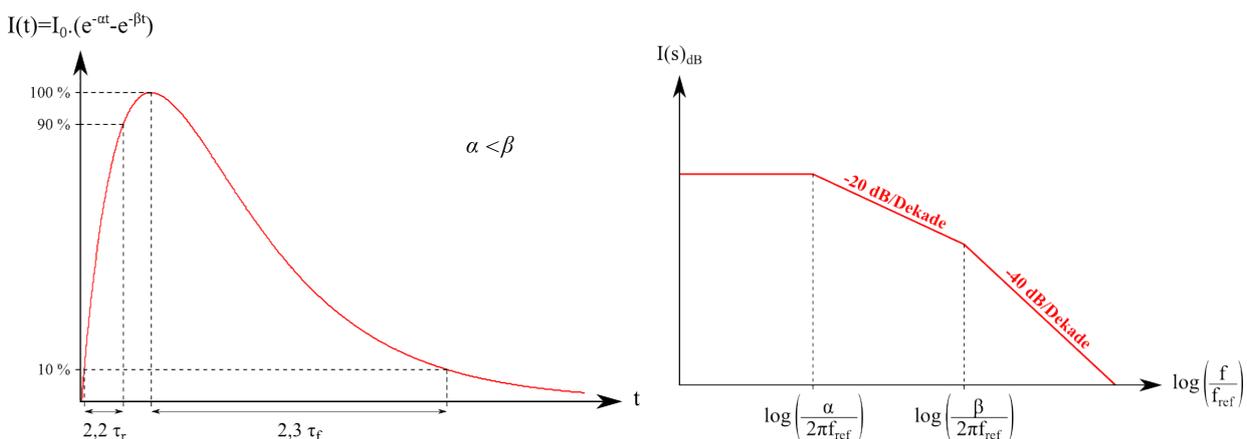


Bild 1: Zeitlicher Verlauf des doppelt-exponentiellen Pulses und zugeordnetes Frequenzspektrum. Die zugehörigen charakteristischen Werte des Blitzstromverlaufes *Current Component A* sind im Text aufgeführt.

2.2 Numerische Feldberechnungsverfahren bei niedrigen Frequenzen und ein analytischer Benchmark-Test

Adäquate numerische Berechnungen von indirekten Blitzeffekten erfordern üblicherweise Berechnungsmethoden auf der Grundlage der kompletten Maxwellschen Gleichungen. Eine Reduzierung der Analyse auf beispielsweise Phänomene der stationären Magnetfelder ist oft nicht ausreichend. Der im vorigen Abschnitt beschriebene niedrige Frequenzbereich ist für viele Berechnungsmethoden jedoch mit numerischen Schwierigkeiten verbunden. Für numerische Berechnungsverfahren im Zeitbereich sind diese Schwierigkeiten mit der vergleichsweise langen Anregungsdauer der Größenordnung Millisekunden verknüpft, deren Abarbeitung eine hohe Anzahl von Zeitschritten benötigt

und als Folge zu nicht akzeptablen Rechenzeiten und numerischen Instabilitäten führen kann. Ähnlich tendieren numerische Berechnungsverfahren in niedrigen Frequenzbereichen zu numerischen Instabilitäten. Vor dem Einsatz einer Berechnungsmethode ist daher deren Eignung bei tiefen Frequenzen zu prüfen.

Für einen Benchmark-Test, der die Fähigkeiten einer Berechnungsmethode bei direkter Stromeinspeisung und tiefen Frequenzen berücksichtigt, stehen nicht viele geeignete analytische Lösungen zur Verfügung. Eine Option ist die numerische Berechnung der Impedanz einer Materialprobe in Form eines Streifenleiters, siehe Bild 2.

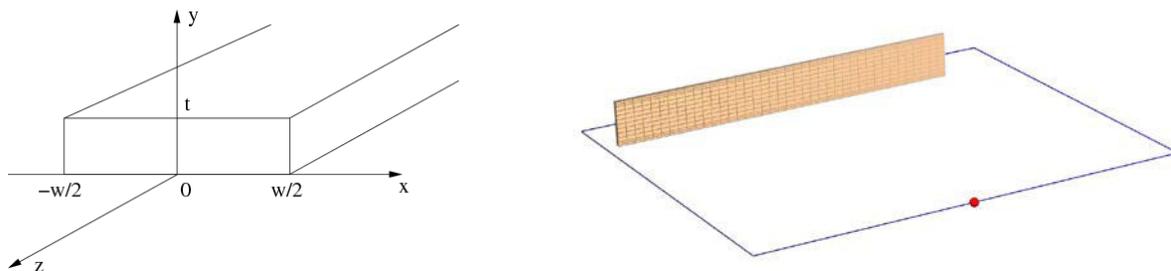


Bild 2: Links: Geometrie einer Streifenleitung mit Breite w und Höhe t . Rechts: Simulation einer Impedanzmessung, hier im Rahmen der Momentenmethode. Der Streifenleiter wurde oberflächendiskretisiert und über ideal leitende Drähte mit einer vorgegebenen Spannungsquelle verbunden. Die Simulation ergibt den Strom durch den Streifenleiter, so dass die Impedanz numerisch bestimmt werden kann.

Wird eine Spannung an die Enden des Streifenleiters gelegt, so fließt ein Strom in z -Richtung, $\vec{J} = J_z \vec{e}_z$, der durch die Diffusionsgleichung

$$\Delta J_z = \frac{2j}{\delta^2} J_z \quad (1)$$

beschrieben wird, mit $\delta = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma}$ der Skintiefe bezogen auf die Streifenleitung. Für eine dünne Streifenleitung mit $w \ll t$ kann die Diffusionsgleichung (1) analytisch gelöst werden, was den Ausdruck

$$\underline{Z}'_{in}(\omega) = \frac{1+j}{2\omega\sigma\delta} \coth\left(\frac{1+j}{\delta} \frac{t}{2}\right) =: R'(\omega) + jX'_{in}(\omega) \quad (2)$$

für den inneren Impedanzbelag ergibt. Die komplette Impedanz $\underline{Z}(\omega)$ ergibt sich aus der weiteren Addition des Beitrages der externen Induktivität, die für einen Streifenleiter der Länge l die Form

$$L_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\ln\left(\frac{2l}{w+t}\right) + \frac{0.223(w+t)}{l} + 0.5 \right) H \quad (3)$$

annimmt. Es folgt

$$\underline{Z}(\omega) = lR'(\omega) + j l X'_{in}(\omega) + j \omega L_{ext} \quad (4)$$

als analytische Lösung für die Impedanz eines vorgegebenen Streifenleiters.

Beispielhaft ist für eine spezifizierete Streifenleitung dieses Ergebnis in Bild 3 dargestellt und mit numerischen Ergebnissen verglichen.

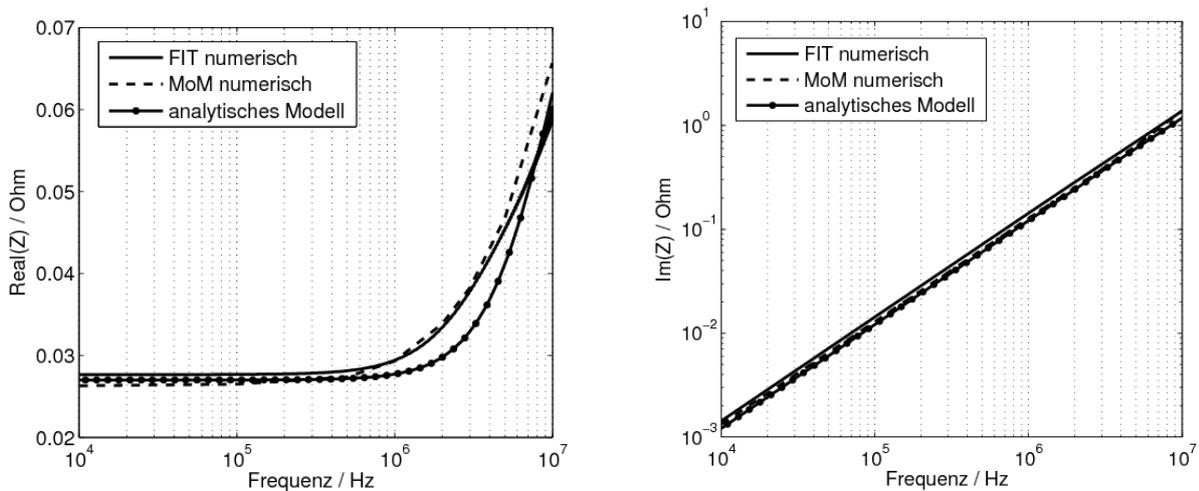


Bild 3: Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der analytisch und numerisch berechneten Impedanz eines Streifenleiters im für Blitzanalysen relevanten Frequenzbereich 10 kHz bis 10 MHz.

Konkret betrachtet wurde eine Streifenleitung mit Länge $l = 50\text{mm}$, Breite $w = 25\text{mm}$ und Höhe $t = 7.5\text{mm}$. Die Leitfähigkeit wurde im Hinblick auf gemittelte Kohlefaserverbundstoffeigenschaften auf $\sigma = 10^4\text{ S/m}$ festgelegt. Numerisch simuliert wurde die Impedanz mit der Momentenmethode (Programmpaket CONCEPT-II) [BF13] und der Finiten Integrationstechnik (Programmpaket CST Microwave Studio) [CW01], wobei darauf geachtet wurde, dass die Induktivität der Verbindungsdrähte nicht in das Ergebnis für den Streifenleiter einfließt. Die Ergebnisse in Bild 3 zeigen, dass im Frequenzbereich 10 kHz bis 10 MHz die numerisch erhaltenen Ergebnisse die analytische Lösung zufriedenstellend annähern. Offenbar lassen sich mit den verwendeten numerischen Methoden insbesondere die für den Skineneffekt verantwortlichen Diffusionseffekte angemessen modellieren, wie die Ergebnisse für den Realteil der Impedanz aufzeigen. Der Imaginärteil der Impedanz weist auf ein rein induktives Verhalten der Streifenleitung im betrachteten Frequenzbereich hin.

3. Makromodellierung von Blitztransferfunktionen

Die im vorigen Abschnitt analytische und numerische Berechnung der Impedanz einer Streifenleitung entspricht der Bestimmung einer Transferfunktion in dem für den Blitzschutz relevanten Frequenzbereich. Für reale Strukturen wird es hierfür keine analytischen Lösungen als Referenz mehr geben, so dass die Verfügbarkeit mehrerer geeigneter numerischer Berechnungsmethoden zur Modellierung und Validierung besonders wichtig ist.

Zur Interpretation von Transferfunktionen ist es oft nützlich, diese als Entwicklung

$$H(s) = \sum_{j=1}^N \frac{r_j}{s - p_j} + d + s \cdot e \quad (5)$$

mit Laplacevariable s und Parametern r_j , p_j , d und e zu schreiben. Diese Entwicklung ist von der „*Vector Fitting*“-Methode [GS99] her bekannt und erlaubt das Ablesen von Netzwerkmodellen, die auch als Makromodelle bezeichnet werden können [Ant03]. Wird beispielsweise in erster Näherung eine Blitztransferfunktion als einfaches RL-Seriennetzwerk modelliert, so kann diese in der Form (5) als Transferadmittanz

$$H(s) = \frac{1/L}{s + R/L} \quad (6)$$

ausgedrückt werden. Werden Transferfunktionen nun mit verschiedenen numerischen Verfahren berechnet, so können diese in der Form (5) bzw. (6) geschrieben und die erhaltenen Parameter für die verschiedenen Verfahren quantitativ verglichen werden.

Durch im Frequenzbereich definierte numerische Verfahren lassen sich Transferfunktionen natürlich direkt für vorgegebene Frequenzstützstellen berechnen. Zeitbereichsverfahren werden eine Anregung im Zeitbereich voraussetzen, aus deren Antwort durch Fouriertransformation eine Transferfunktion erhalten werden kann. Erwähnenswert ist dann, dass zur Berechnung einer Blitztransferfunktion kein wie in Bild 1 dargestellter Blitzstromverlauf als Anregung betrachtet werden muss, der wegen seiner relativ langen Dauer zu entsprechend langen Rechenzeiten führen würde. Vielmehr können auch kürzere Anregungspulse verwendet werden, sofern diese die im Blitzstromspektrum enthaltenen niedrigen Frequenzen mit ausreichend großer Amplitudendichte enthalten. Diese Idee wurde in einer Arbeit aus dem Bereich der Mikrowellentechnik zu einem adaptiven Verfahren formalisiert [DPD09] und nachfolgend an die Besonderheiten der Berechnung von Blitztransferfunktionen angepasst [AG11]. Die benötigte Pulsdauer lässt sich dadurch auf wenige Mikrosekunden reduzieren.

Zur Illustration ist in Bild 4 eine Struktur gezeigt, die im Wesentlichen aus einem Quader mit einem inneren Rohr besteht. Der Quader wird seitlich von einer Stromquelle I angeregt, deren Strom über eine Rückleiterstruktur zurückgeführt wird. Als Beobachtungsgröße dient die Spannung V zwischen dem inneren Rohr und dem Rand der runden Öffnung, durch den das Rohr den Quader verlässt. Der Quotient $H(\omega) = V(\omega) / I(\omega)$ definiert dann eine Transferfunktion, die im blitzschutzrelevanten Frequenzbereich berechnet werden kann.

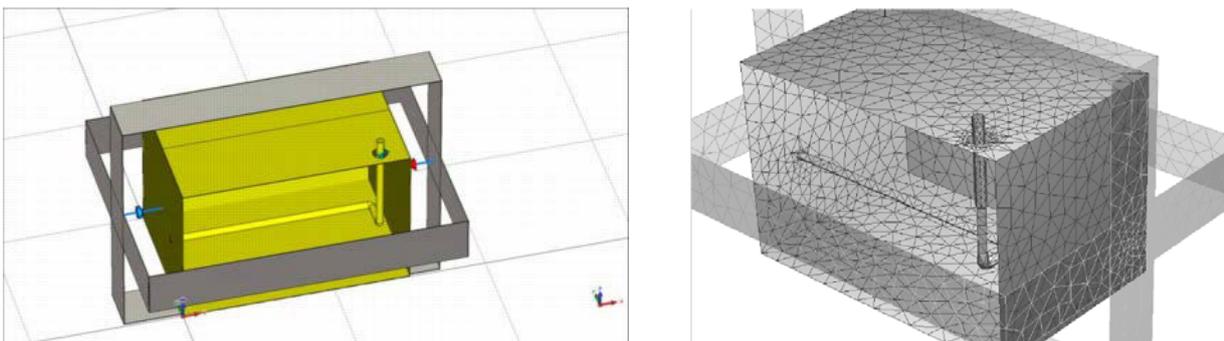


Bild 4: Eine quaderförmige Struktur, links modelliert für Berechnungen mit der Finiten Integrationstechnik, rechts modelliert für Berechnungen mit der Momentenmethode. Die Struktur wird seitlich mit einer elektrischen Stromquelle angeregt, berechnet wird dann die Spannung zwischen dem austretendem Rohr und dem Rand der Öffnung. In der Simulation ist der Quader bis auf die kreisförmige Öffnung geschlossen, in dem Bild ist jeweils eine Seite des Quaders zur besseren Sichtbarkeit des Rohres weggelassen. Die Leitfähigkeit des Quaders ist der von Aluminium entsprechend, $\sigma = 3,72 \times 10^7$ S/m.

Die Berechnungen mit Hilfe der Finiten Integrationstechnik und der Momentenmethode zeigen, ähnlich wie im Fall der Mikrostreifenleitung, ein dominant induktives Antwortverhalten. Dieses lässt sich durch die in (6) auftretenden Parameter L und R beschreiben. Es ergeben sich aus der Finiten Integrationstechnik mit einer anregenden Impulsdauer von 0,61 Mikrosekunden die Werte $L = 0,5214\text{nH}$ und $R = 2,982\ \mu\Omega$, die Momentenmethode liefert $L = 0,5192\text{nH}$ und $R = 2,889\ \mu\Omega$. Beide unabhängigen numerischen Verfahren ergeben also für das betrachtete Modell ein konsistentes Ergebnis.

Zusammenfassend ist durch das Voranstehende ausgeführt worden, dass numerische Berechnungsverfahren, die *a priori* für hochfrequenztechnische Anwendungen prädestiniert sind, auch für Blitzschutzanalysen eingesetzt werden können. Unabhängige Lösungsmethoden können verwendet werden, um die Qualität der numerischen Ergebnisse besser zu beurteilen. Für eine quantitative Beurteilung ist weiterhin die Formulierung der Ergebnisse durch Transferfunktionen der Form (5) bzw. (6) hilfreich.

4. Literaturverzeichnis

- [ADG08] M. Apra, M. D'Amore, K. Gigliotti, M.S. Sarto, and V. Volpi: "Lightning Indirect Effects Certification of a Transport Aircraft by Numerical Simulation", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 50, no. 3 (August 2008), pp. 513-523.
- [Ant03] G. Antonini: "Spice Equivalent Circuits of Frequency-Domain Responses", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 45(3), 502-512, 2003.
- [AG11] J. Anatzki and F. Gronwald: „Accelerating the Numerical Computation of Indirect Lightning Effects by means of Vector Fitting, *Advances in Radio Science*, vol. 9, (2011), pp. 323-328.
- [BF13] H.-D. Brüns and A. Freiberg: „*CONCEPT-II, Manual of the Program System 2013*, (Hamburg University of Technology).
- [CW01] M. Clemens and T. Weiland: "Discrete electromagnetism with the finite integration technique", *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 32, (2001), pp. 65-87.
- [DPD09] D. Deschrijver, D. Pissort, and T. Dhaene: „Adaptive Stopping Criterion for Fast Time Domain Characterization of Microwave Components", *IEEE Microw. Wireless. Compon. Lett.*, vol. 19, no. 12, (December 2009), pp. 765-767.
- [GH13] F. Gronwald and F. Happ: „Adaptive Macromodelling of Lightning Transfer Functions from Numerical Calculations in Time and Frequency Domain", in *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, Italy, September 9-13, 2013, 4 pages.
- [GS99] B. Gustavsen and A. Semlyen: „Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting, *IEEE Trans. Power Delivery*, 14(3), 1052-1061, 1999.
- [HWZ05] P. Hasse, J. Wiesinger und W. Zischank: „*Handbuch für Blitzschutz und Erdung*", 5. Auflage, (Pflaum Verlag, München, 2005).
- [SAE05] SAE Aerospace Recommended Practice (ARP) 5412A, *Aircraft Lightning Environment and Related Testforms*, (February 2005).