

Gefährdung der Fahrzeugelektronik durch Blitzeinschlag

Dr.-Ing. Stephan Frei, AUDI AG, Ingolstadt
Prof. Dr. Roman Jobava, Tbilisi State University, Tbilisi, Georgien
Anna Gheonjan, Tbilisi State University, Tbilisi, Georgien

Kurzfassung

Blitzeinschlag ist ein wichtiges Thema der allgemeinen EMV. Im Kraftfahrzeugbereich wird dieser Bedrohung bislang keine große Aufmerksamkeit geschenkt. Die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags wird als gering angesehen. Auch wenn Fahrzeuginsassen und auch die Elektronik aufgrund der metallischen Karosserie kaum gefährdet sind, direkt vom Blitz getroffen zu werden, so können die entstehenden elektromagnetischen Felder an der Fahrzeugelektronik Schaden anrichten. Gerade wegen des zunehmenden Einsatzes von komplexer Elektronik ist es wichtig, auch diese EMV-Bedrohung näher zu untersuchen.

Der Beitrag liefert einige Grundlagen zu Blitzen und versucht Abschätzungen zur Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags in Fahrzeuge zu geben. Mit Hilfe der numerischen Berechnung und Literaturdaten zu Blitzeinschlägen wurde bestimmt, in welcher Größenordnung die transienten Felder im Fahrzeug liegen können. Für verschiedene Konfigurationen wurden die entstehenden Störströme auf Leitungen berechnet. Es werden Überlegungen angestellt, wie weit die heute üblichen Prüfungen die Bedrohung durch Blitze berücksichtigen.

1 Einführung

Die Bedrohung durch Blitzeinschläge ist ein wichtiges Thema bei der Planung von Gebäuden oder der Entwicklung von Flugzeugen. Gebäude sind aufgrund ihrer Größe und Flugzeuge aufgrund ihrer Flughöhe besonders durch Blitzeinschläge gefährdet. Diese extremen Risikofaktoren existieren bei Kraftfahrzeugen nicht. Dennoch besteht natürlich auch für einen Pkw die Gefahr, durch einen Blitz getroffen zu werden. Die Fahrgastzelle verhindert zwar, dass der Blitzstrom Personen gefährden kann (auch ein direkter Einschlag in die Verkabelung oder Steuergeräte ist eher unwahrscheinlich, wenn man von Stabantennen absieht), durch den transienten Strom können jedoch sehr hohe Felder generiert werden.

Da die Versuchstechnik zu Blitzströmen sehr aufwendig ist, wird in diesem Beitrag eine Untersuchung dargestellt, die nahezu rein auf numerischen Berechnungen beruht.

2 Statistik von Blitzeinschlägen

Sowohl die Häufigkeit als auch die Intensität von Blitzen lässt sich nur statistisch erfassen. Der folgende Abschnitt soll eine grobe Abschätzung geben, wie hoch statistisch gesehen die Belastung von Kraftfahrzeugen ist.

2.1 Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags in ein Kraftfahrzeug

Im mitteleuropäischen Raum kann mit etwa 15 bis 35 Gewittertagen im Jahr und etwa 1 bis 5 Blitzeinschlägen pro Quadratkilometer und Jahr gerechnet werden, wobei die niedrigeren Werte für die nördlichen und die höheren Werte für die südlichen Regionen gelten [1].

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Blitzeinschlags in eine Struktur hängt sehr stark von deren Größe und Form ab. Über Faustformeln [2] lässt sich die Wahrscheinlichkeit von direkten Einschlägen abschätzen. Die mittlere jährliche Häufigkeit N_d , für eine Struktur von einem Blitz getroffen zu werden, berechnet sich zu:

$$N_d = N_g A_e C_e 10^{-6} \quad \text{pro Jahr} \quad (1)$$

Hierbei gibt N_g die Anzahl der Blitzeinschläge pro km^2 pro Jahr für ein betrachtetes Gebiet an (in Mitteleuropa: 1-5, in Japan beispielsweise deutlich höher). A_e ist die äquivalente Sammelfläche einer isolierten Struktur definiert als die Fläche mit ebener Oberfläche, welche die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweist, von einem Blitzschlag getroffen zu werden, wie die betrachtete Struktur. C_e ist ein Faktor, der die Oberflächenstruktur der Umwelt berücksichtigt.

Die Norm IEC 1024-1-1 gibt für die Berechnung der äquivalenten Sammelfläche A_e die folgende Formel an:

$$A_e = LW + 6H(L+W) + 9\pi H^2 \quad (2)$$

Unbekannt ist der Strukturfaktor C_e . Nur für absolut ebene Umgebungen kann dieser Faktor zu 1 gesetzt werden. In der Regel sind andere Strukturen in der Umgebung von Kraftfahrzeugen, so dass C_e niedriger angesetzt werden muss.

Um nun abzuschätzen, wie oft in Deutschland Fahrzeuge von Blitzen getroffen werden können sind weitere Zahlen notwendig. Im Jahr 2000 gab es etwa 51 Millionen Kraftfahrzeuge in Deutschland davon etwa 43 Millionen Pkw (Quelle: Statistisches Bundesamt Deutschland).

Betrachtet man nur die Pkw in Deutschland und nimmt die folgenden mittleren Abmessungen an: $L=4,5$; $W=1,8$; $H=1,5$, so kommt man in Abhängigkeit von dem Strukturfaktor C_e auf die in Bild 1 dargestellten Zahlen für direkte Blitzeinschläge in Pkw in Deutschland.

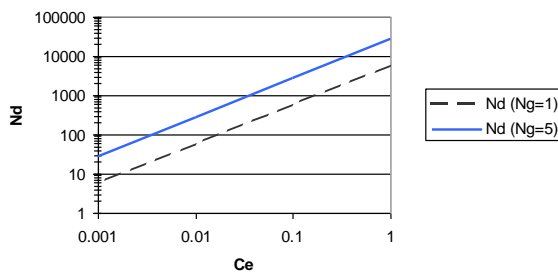


Bild 1 Abschätzung der jährlichen Anzahl von direkten Blitzeinschlägen in PKW in Deutschland in Abhängigkeit von C_e

Problematisch an den Schätzungen für die Häufigkeit von direkten Einschlägen sind die unbekanntenen Strukturparameter C_e . In einer Ebene ohne Bäume oder anderen hohen Strukturen ist C_e zu eins zu setzen. In der Stadt beispielsweise ist C_e eher niedrig zu wählen.

Indirekte Blitzeinschläge, d.h. der Blitz schlägt in der Nähe des Fahrzeugs ein, sind deutlich wahrscheinlicher als direkte Einschläge.

2.2 Blitzstromparameter

Die Blitzentladung geschieht in den meisten Fällen über eine Sequenz von Strompulsen. Der zeitliche Verlauf eines einzelnen Strompulses läßt sich über eine doppel-exponentielle Funktion annähern [3,4]:

$$i_0(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

Die Amplitude \hat{I} wird durch die folgende Gleichung bestimmt:

$$\hat{I} = I_0 \left(\left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{a}{a-b}} - \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{b}{a-b}} \right) \quad (4)$$

Die Anstiegszeit hängt von dem Parameter b folgendermaßen ab:

$$2,2/b; \quad b \gg a \quad (5)$$

Der Parameter a bestimmt die 50% Pulsbreite:

$$0,69/a; \quad b \gg a \quad (6)$$

Über 90% der Blitzströme haben eine Stromamplitude von mehr als 10 kA. 5% der Blitzströme haben eine Stromamplitude von mehr als 100 kA. Das maximale di/dt liegt bei 99% aller Stromverläufe bei mehr als 20 kA/ μ s und etwa 5% bei mehr als 100 kA/ μ s [1].

3 Grundlagen

3.1 Wirkungen von Blitzströmen

Blitzströme können auf verschiedene Weise Schäden hervorrufen:

- Der Blitzstrom kann zu einer deutlichen Potentialanhebung führen. Der kritische Parameter ist hier der Scheitelwert des Blitzstroms. Da bei Fahrzeugen i.d.R. die Masse über die Karosserie geführt wird, ist das Massenetz betroffen. Die Karosseriequerschnitte sind aber meist so groß, dass hier selbst bei hohen Strömen keine wesentlichen Potentialunterschiede zu erwarten sind. Eine Ausnahme bildet hier nur die Antenne, die oft am Dach an Masse angebunden ist.
- Die Steilheit des Blitzstroms di/dt führt zu hohen Feldern, die in Leiterschleifen Spannungen induzieren können. Die Anstiegszeiten im Mikrosekunden-Bereich führen auch zu recht großen Pulsbreiten.
- Die Ladung und Energie eines Blitzstroms kann zu Aufschmelzungen von Blechen und Drähten führen. Aluminiumbleche von 5 mm Dicke können beispielsweise perforiert werden [1].

3.2 Blitzstromkanal

Eine Blitzstromentladung tritt auf, wenn in einer Region der Atmosphäre eine elektrische Ladung erreicht wird, die ausreichend groß ist, dass das resultierende elektrische Feld einen elektrischen Durchbruch in der Luft verursacht. Der Blitzstromkanal hat in der Regel

eine Länge von einigen Kilometern [5]. In Bild 2 ist ein Modell für einen einfachen Blitzstromkanal dargestellt.

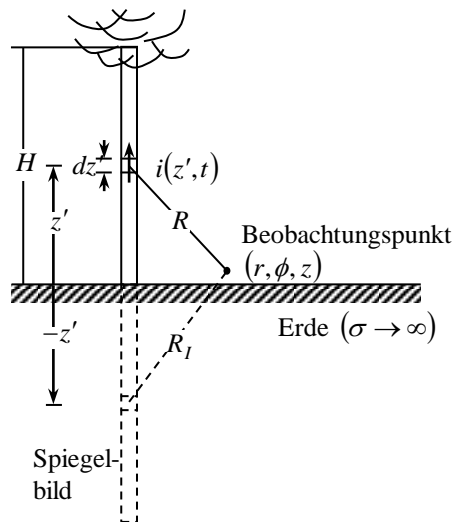


Bild 2 Modell für einen Blitzstromkanal

Nähert man den Blitzstromkanal durch eine Übertragungsleitung an, so hängt der Strom im Kanal mit der Quelle über die folgende Gleichung zusammen:

$$i(z', t) = i_0(t - z'/v)$$

In der Literatur findet sich auch häufig die Näherung durch eine sich bewegende Quelle. Damit sind genauere Betrachtungen möglich [6]. Hier wurde der Einfachheit halber nur die Übertragungsleitungsnaheung verwendet.

4 Berechnungsmodell

4.1 Methode

Berechnungen eines Blitzeinschlags können entweder direkt im Zeitbereich mit geeigneten Zeitbereichsverfahren oder durch Fourier-Transformationen im Frequenzbereich durchgeführt werden. Bei den hier gezeigten Untersuchungen wurde die Momentenmethode verwendet und die Berechnungen zunächst im Frequenzbereich durchgeführt.

4.2 Fahrzeugmodelle

Für die Berechnungen wurden verschiedenen Fahrzeugmodelle verwendet bei denen die Metallflächen mit Dreieckselementen nachgebildet wurden. Der Boden wurde näherungsweise als ideal leitend angesehen

und durch das Modellspiegelbild berücksichtigt. Bei direktem Blitzeinschlag wurde angenommen, dass der Blitz in das Fahrzeugdach einschlägt und an der Fahrzeugunterseite wieder austritt und in den Boden einschlägt. Versuche mit einem Fahrzeug, die an der TU-Berlin mit einem Blitzstromsimulator durchgeführt wurden, bestätigen dieses Verhalten.

Einfache Modelle mit nur wenigen Dreiecken (3.918 für eine Limousine bzw. 3.480 für ein Cabrio, inklusive Spiegelmodell), die aber den Diskretisierungsregeln der Momentenmethode entsprechen, wurden für die grundsätzlichen Untersuchungen eingesetzt. Diese einfachen Modelle haben den Vorteil, dass Berechnungen sehr schnell durchgeführt werden können. Da die Untersuchung nur eine grobe Abschätzung der Gefährdung liefern soll, stellt dies keine Einschränkung dar.

Ein realistischeres Modell mit höherem Detailierungsgrad (ca. 18.000 Dreiecke, inklusive Spiegelmodell) wurde nur z.T. zur Kontrolle der Untersuchungen verwendet. Aufgrund der N^3 -Abhängigkeit der Rechenzeit von der Anzahl der Unbekannten N , waren die Berechnungszeiten in diesem Fall sehr hoch.

Im Innenraum des Fahrzeugs wurde eine Leitung mit einem Radius von 1 mm und einer Länge von 3,4 m in einem Abstand von 5 cm vom Blech im Bereich des Schwellers modelliert. Die Leitung wurde mit verschiedenen Widerständen (5, 50 und 500 Ohm) abgeschlossen.

In Bild 3 ist das grobe Modell für die Limousine dargestellt. Bild 4 zeigt das feine Modell.

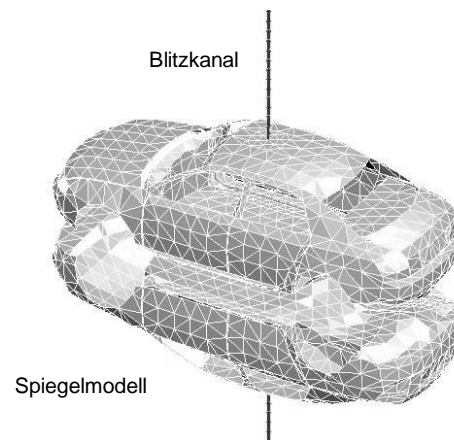


Bild 3 Einfaches Fahrzeugmodell mit Blitzstromkanal und Spiegelmodell zur Berücksichtigung eines ideal leitfähigen Erdbodens

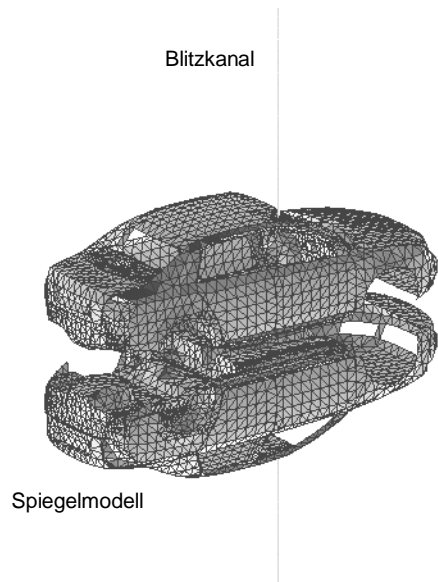


Bild 4 Detaillierteres Fahrzeugmodell mit Blitzstromkanal und Spiegelmodell zur Berücksichtigung eines ideal leitfähigen Erdbodens

4.3 Blitzkanalmodell

Der Blitzstromkanal wurde durch eine Leitung von 100 m Länge nachgebildet. An den Enden beider Leitungen (Kanal- und Spiegelleitung) befindet sich jeweils eine Spannungsquelle zur Erzeugung des Blitzstroms. Zur Umwandlung in eine Stromquelle wurden Kanalsegmente hochohmig ausgelegt. Die Elementanzahl im Kanal wurde durch eine inhomogene Segmentierung minimiert.

Für die Untersuchungen wurde ein Stromverlauf nach Gleichung 3 mit den folgenden Parametern angesetzt:

$$I_{Max}=100 \text{ kA} \rightarrow I_0=27.5e6 \text{ kA}$$

$$t_r \approx 0,57 \mu\text{s} \rightarrow a=1x10^6$$

$$t_{50\%} \approx 3x10^{-6} \text{ s} \rightarrow a=1,01x10^6$$

Die abfallende Flanke des Pulses entspricht in ihrer Zeitkonstante nicht einem realen Blitzimpuls. Reale Blitzpulse haben typischerweise eine Pulsbreite von einigen 100 μs . Dies heißt aber auch, dass das Frequenzspektrum breiter ist und sehr viele Frequenzschritte notwendig sind, um eine stabile Lösung zu erhalten. Da die indirekten Effekte, die hier hauptsächlich betrachtet wurden, nur von der Ableitung des Pulsstroms abhängen, ist die langsame fallende Flanke ohne Einfluß.

Bei den Untersuchungen zum indirekten Einschlag ging der Blitzstromkanal nicht durch das Fahrzeug, sondern lag hinter dem Fahrzeug in 2 m Abstand.

Der hier verwendete Blitzstromkanal wurde für die Momentenmethode ungleichmäßig diskretisiert und bestand aus ca. 500 Elementen.

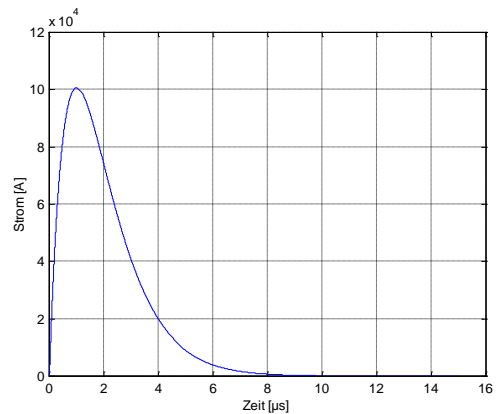


Bild 5 Anregender Blitzstrompuls

5 Ergebnisse

Die Auswirkungen von direkten und indirekten Blitzeinschlägen wurden untersucht. Bestimmt wurde die Schirmwirkung der Karosserie, und es wurde abgeschätzt, wie groß der Strom im Leitungssatz aufgrund von Feldkopplung sein kann.

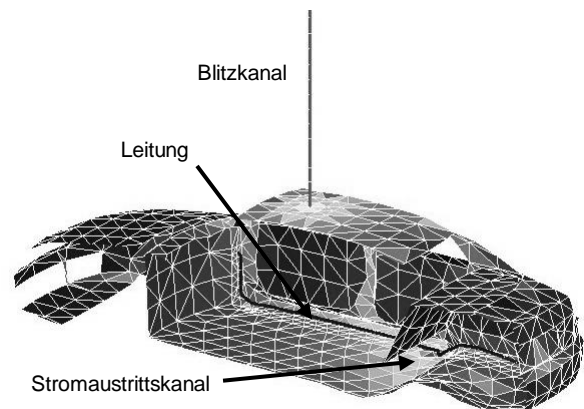


Bild 6 Stromdichteverteilung auf der Karosserie, helle Flächen \rightarrow hohe Stromdichte (Schnittbild Limousine)

5.1 Direkter Blitzeinschlag

Bei dem direkten Blitzeinschlag wurde angenommen, dass der Blitzkanal bei der Limousine im Fahrzeugdach, bei dem Cabrio in der Mitte des Frontscheibenrahmens mündet und in beiden Fällen an der Unterseite des Fahrzeugs wieder austritt. In Abhängigkeit vom genauen Ort des Stromeintritt- oder Stromaustritts-

nals kann die Wirkung variieren. Liegt der Stromaustrittskanal in der Nähe von kritischen Leitungen so wird die Einkopplung groß sein. Liegt der Austrittskanal weiter weg, d.h. die Stromdichte unter der Leitung ist geringer, wirkt sich dies auch auf die in einem Abschluss induzierte Spannung aus (Bild 10).

5.1.1 Spannungen an den Leitungsabschlüssen

In Bild 7 ist für die Limousine dargestellt, wie die Spannung an den Abschlüssen der Leitung in Abhängigkeit von der Impedanz aussehen kann. Der Stromaustrittskanal befand sich direkt unter dem Leiter. Dies stellt den kritischsten Fall dar. Spannungspulse mit einer Pulsbreite von etwa einer μs und einer Amplitude von einigen 100 Volt sind möglich.

In Bild 8 ist für ein Cabrio dargestellt, wie die Spannung an den Abschlüssen der Leitung in Abhängigkeit von der Impedanz aussehen kann. Auch hier ist der Stromaustrittskanal direkt unter der Leitung. Die Einkopplung ist deutlich höher. Die Spannungspulse können eine Amplitude von über 1000 Volt erreichen.

Bild 9 zeigt am Beispiel der Limousine für einen 50 Ohm Abschluss, wie die Spannungsamplitude von der Anstiegszeit beeinflusst wird. Eine lange Anstiegszeit führt zu einer geringen Pulsamplitude.

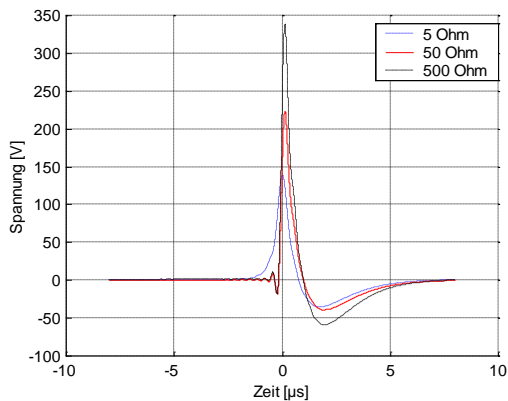


Bild 7 Berechnete Spannung über Leitungsabschluss vorne in Abhängigkeit von der Abschlussimpedanz (Limousine)

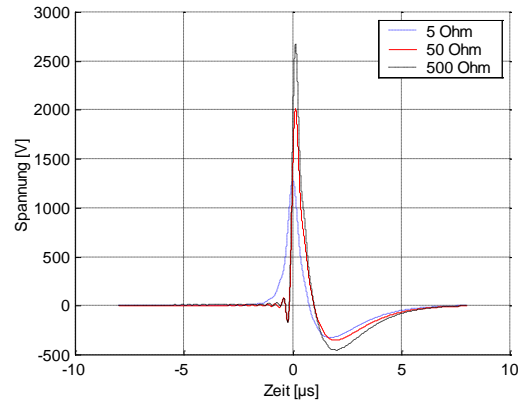


Bild 8 Berechnete Spannung über Leitungsabschluss vorne in Abhängigkeit von der Abschlussimpedanz (Cabrio)

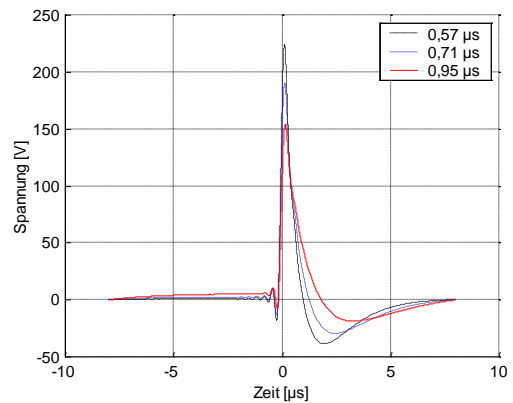


Bild 9 Berechnete Spannung über Leitungsabschluss vorne in Abhängigkeit von Pulsanstiegszeit (Limousine)

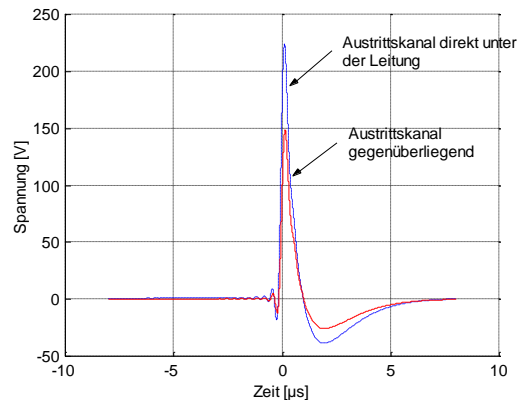


Bild 10 Berechnete Spannung über Leitungsabschluss vorne 50 Ohm in Abhängigkeit vom Stromaustrittskanal (Limousine)

5.2 Indirekter Blitzeinschlag

Bei dem untersuchten indirekten Blitzeinschlag wurde angenommen, dass der Blitzkanal in etwa 2 m Entfernung vom Fahrzeugende verläuft (Bild 11).

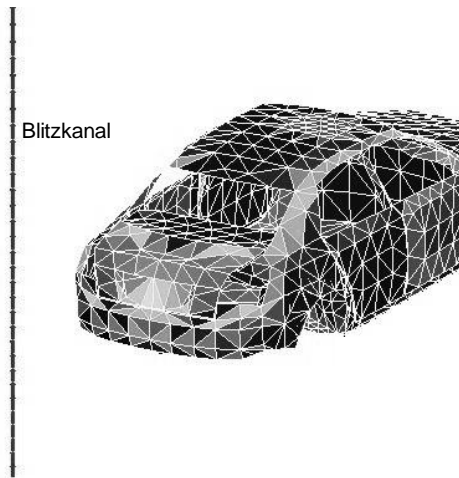


Bild 11 Einfaches Fahrzeugmodell mit Blitzstromkanal in 2 m Entfernung vom Fahrzeugende

5.2.1 Schirmwirkung der Karosserie

Eine geschlossene Karosserie bietet trotz der Fensteröffnungen und Türschlitze bei niedrigen Frequenzen eine gute Schirmdämpfung des E-Feldes. Die E-Feld-Schirmdämpfung wird folgendermaßen bestimmt:

$$a_s = 20 \lg \frac{E_1}{E_2}$$

E_2 stellt die elektrische Feldstärke im Fahrzeug am Punkt P dar. Anschließend wird das Fahrzeug aus dem Berechnungsmodell entfernt und die Feldstärke E_1 wird an Punkt P erneut berechnet.

Die Schirmdämpfungen wurden für die Limousine und das Cabrio in der Mitte des Fahrgastraums in Bodennähe bestimmt. Für die Limousine erhält man zwischen 100 kHz und 1 MHz ca. 20 dB Schirmdämpfung. Für das Cabrio ergibt sich eine Schirmdämpfung von etwa 10 dB.

5.2.2 Spannungen an den Leitungsabschlüssen

In Bild 12 ist für die Limousine dargestellt, wie die Spannung an den Abschlüssen der Leitung in Abhängigkeit von der Impedanz bei indirektem Blitzeinschlag aussehen kann. Bild 13 zeigt die Spannungen an den Abschlusswiderständen für das Cabrio.

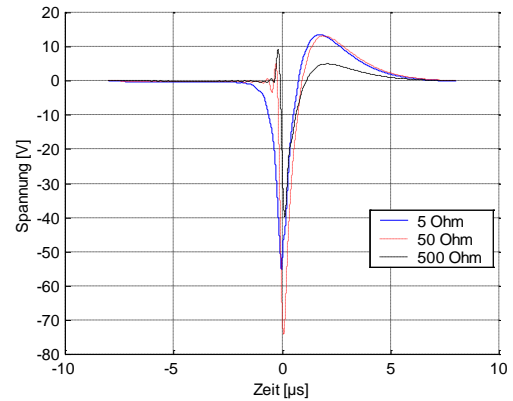


Bild 12 Berechnete Spannungen über Leitungsabschluss vorne in Abhängigkeit von der Abschlussimpedanz (Limousine); Einschlag in 2 m Entfernung vom hinteren Ende des Fahrzeugs

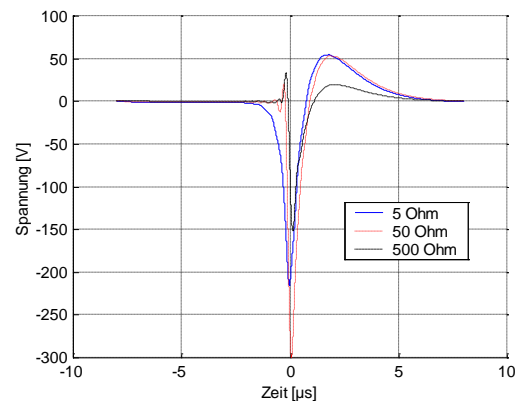


Bild 13 Berechnete Spannungen über Leitungsabschluss vorne in Abhängigkeit von der Abschlussimpedanz (Cabrio); Einschlag in 2 m Entfernung vom hinteren Ende des Fahrzeugs

6 Diskussion

Die Untersuchungen zeigen, dass die Felder eines Blitzeinschlags sowohl in einem offenen als auch in einem geschlossenen Fahrzeug Schaden anrichten können. Die Wirkungen in einem offenen Fahrzeug sind aufgrund der nur geringen Schirmwirkung noch deutlich größer, wie in Bild 14 zu sehen ist.

Die im Blitzstrom überwiegend enthaltenen niederfrequenten E-Feld-Anteile werden durch eine geschlossene Fahrzeugkarosserie recht gut gedämpft. Sobald bei einem Cabrio das Dach geschlossen ist sollten aufgrund des Gestänges die Schirmdämpfungswerte nur geringfügig schlechter als bei einer Limousine sein. Die üblichen Prüfungen gegen Spannungspulse auf dem Bordnetz nach ISO 7637 sehen ähnliche Pulse

vor, wie sie durch die Felder von Blitzströmen auf Leitungen verursacht werden können. Diese gelten aber nur für niederohmige Versorgungsleitungen. Sensorleitungen beispielsweise werden nicht geprüft. Die bei Sensoren zum Teil verwendeten Schutzbeschaltungen sind bei den geringen Frequenzen eines Blitzeinschlags noch nicht wirksam.

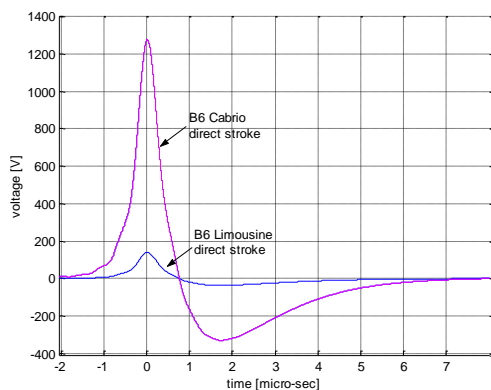


Bild 14 Vergleich Cabrio – Limousine (Direkteinschlag)

Da die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlags nicht allzu hoch ist, ist es fraglich, ob Systeme grundsätzlich gegen diese Belastung ausgelegt werden sollten.

Für Systeme mit sehr hohen Anforderungen ist eine Prüfung gegen Strompulse, wie sie durch Blitze auf Leitungen entstehen können, sinnvoll.

7 Zusammenfassung

Eine große Anzahl von PKW wird jedes Jahr in Deutschland direkt von einem Blitz getroffen. Blitzeinschläge in unmittelbarer Umgebung treten mit großer Wahrscheinlichkeit noch wesentlich häufiger auf.

Die Wirkung durch Felder von Blitzen wurde durch numerische Berechnungen untersucht. Eine direkte galvanische Einkopplung des Blitzstroms in die Fahrzeugelektronik wurde nicht betrachtet. Besonders in offenen Fahrzeugmodellen können hohe Störspannungen sowohl durch direkte als auch indirekte Blitzeinschläge verursacht werden. Hier sind in Abhängigkeit u.a. von der Blitzstromform, dem Verlauf des Stroms durch das Fahrzeug und der Impedanz der Abschlüsse Spannungen von über 1000 V an Steuergeräten möglich.

Bei scheinbar unerklärlichen, seltenen Fehlern durch Überspannung im Fahrzeug kann also durchaus ein Blitzeinschlag die Ursache gewesen sein.

8 Literatur

- [1] Habiger, Ernst: Elektromagnetische Verträglichkeit, Hüthig-Verlag, 1998
- [2] Finlay, G. S.: Prediction of the Annual Rate of Lightning Flashes to an Electricity Power Line
- [3] Uman, M. A., McLain, D. K., Krider, E. P.: The Electromagnetic Radiation from a Finite Antenna, AM. J. Phys., 1975, 43
- [4] Master, M. J., Uman, M. A.: Transient Electric and Magnetic Fields Associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole', Am J Phys., 1983, 51
- [5] Uman, M. A.: Lightning, Dover, 1984
- [6] Heidler, Friedolin: Some Deductions from the Traveling Current Source Model, International Wroclaw Symposium on EMC, 1986