

Abstrahlverhalten einer transienten Funkenstrecke – Ein grundlegender Versuch zur EMV-Abschätzung

Dr.-Ing. Robert Geise, B. Sc. Oliver Kerfin,
Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit

Dipl.-Ing. Bernd Schottel, Dipl.-Ing. Tobias Kopp,
Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, elenia

1. Einleitung

Funkenstrecken mit einer transienten Emission elektromagnetischer Störungen besitzen im Bereich der EMV eine hohe Relevanz. Als ein typisches Szenario ist der mechanische Übergang zwischen dem Fahrdraht und dem Stromabnehmer elektrischer Eisenbahnen zu nennen [1]. Bei einem Kontaktverlust entstehen Funken- und Lichtbogenentladungen, die eine Abstrahlung hochfrequenter, energiereicher Störsignale zur Folge haben.

Die Herausforderung bei transient abstrahlenden Funkenstrecken Störpegel bzw. tatsächliche Feldstärkewerte zu ermitteln besteht einerseits darin, dass der räumlich variierende Stromkanal nur sehr schwierig charakterisiert werden kann. Andererseits ist hierbei auch wesentlich, dass Antennenfaktoren zur Ermittlung der eigentlichen Feldstärkewerte üblicherweise nur im eingeschwungenen Zustand, also bei CW-Signalen, anzuwenden sind und des Weiteren eine a-priori-Kennntnis der Richtung des elektrischen und/oder magnetischen Feldvektors voraussetzen. Gerade letztere ist bei einer räumlich variablen Funkenstrecke zunächst unbestimmt. In diesem Beitrag wird einerseits ein grundsätzlicher Modellversuch vorgestellt, mit dem überhaupt reproduzierbar die Abstrahlung transienter Funkenstrecken gemessen werden kann. Andererseits soll untersucht werden, ob das genannte Abstrahlverhalten mit einem einfachen mathematischen Modell abgeschätzt werden kann. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau, mit dem überprüft werden soll, ob die Kenntnis des Stromes $I(t)$ hinreichend repräsentativ für die Stromdichte $J(r, t)$ ist, mit der ein abgestrahltes Magnetfeld über den einfachen analytischen Ausdruck für das Vektorpotential berechnet werden kann.

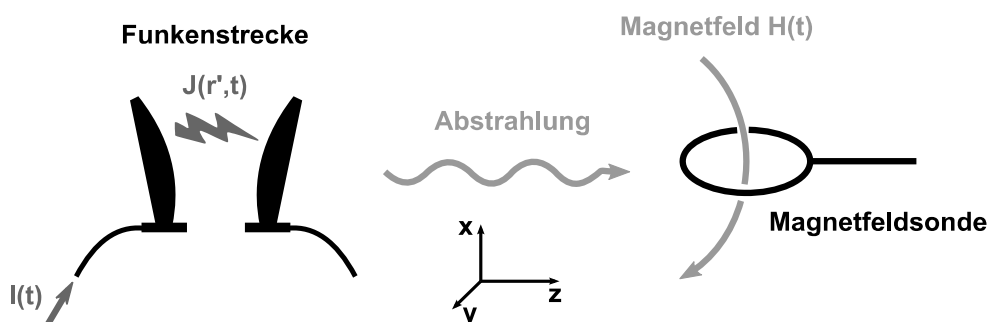


Bild 1: Schematische Darstellung zum Abstrahlverhalten einer transienten Funkenstrecke

2. Mathematische Beschreibung des Vektorpotentials

Aufgrund der Divergenzfreiheit der magnetischen Flussdichte kann diese auch als Rotation eines Vektorpotentials \vec{A} geschrieben werden: $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$. Die Einführung dieses Vektorpotentials erweist sich insbesondere deswegen als praktisch, weil es analog zum Skalarpotential ϕ entkoppelt von anderen Feldern direkt aus einer gegebenen Stromverteilung $J(r')$ berechnet werden kann [2]:

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}', t - |\vec{r} - \vec{r}'|/c)}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r'. \quad (1)$$

Da die genaue räumliche Verteilung der Stromdichte nicht bekannt ist, wird der Strompfad als beliebig dünn und innerhalb des zu integrierenden Raumgebietes als konstant angenommen. Zudem wird der Einfluss unterschiedlicher Signallaufzeiten von Quellpunkten zum Empfänger vernachlässigt, da $|\vec{r}'| \ll |\vec{r}|$ ist, was der Näherung des Hertz'schen Dipols entspricht. Mit den genannten Vereinfachungen ergibt sich für das Vektorpotential

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0 l}{4\pi r} I(t) \vec{e}_z, \quad (2)$$

wobei l die Länge des Integrationsgebietes, also der Elektrodenabstand, ist. $I(t)$ ist der Strom, der an den Elektroden makroskopisch gemessen und zunächst nur in z -Richtung (vgl. Bild 1) angenommen wird. Eben für diesen soll messtechnisch überprüft werden, ob er hinreichend repräsentativ für die Stromverteilung $J(r')$ bzw. für deren Felderzeugung ist. Das magnetische Feld kann dann aus der Rotation des Vektorpotentials berechnet werden:

$$H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A_z, \quad H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A_z, \quad H_z = 0. \quad (3)$$

Da im Messaufbau immer nur eine Vorzugsrichtung durch die Magnetfeldsonde gemessen wird, ergibt sich für das aus dem Vektorpotential eines gemessenen Stromes $I(t)$ berechnete Magnetfeld:

$$H(I(t), r)_{\text{quasi-stationär}} = \frac{I(t) l}{4\pi r^2}. \quad (4)$$

Gleichung (4) ist also der quasi-stationäre Feldanteil für einen sehr kurzen Stromfaden, wie er auch unmittelbar mit den genannten Vereinfachungen aus dem Biot-Savarts-Gesetz folgt [2]. Hierbei ist das sich ändernde Feld zwischen den Elektroden, also das Skalarpotential, vernachlässigt worden, da die Zielsetzung zunächst ist, ein einfaches mathematisches Modell, basierend nur auf einem gemessenen Strom, zu verifizieren. Das Skalarpotential kann auch nicht ohne Weiteres aus der Raumladungsdichte mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung berechnet werden, da die Divergenz der Stromdichte schlicht unbekannt ist. Dieser quasi-stationäre Ausdruck ist zur Bewertung des Abstrahlverhaltens allerdings ungeeignet. Um dieses abzuschätzen, sei folgende Betrachtung gemacht. Das elektrische Feld lässt sich aus Vektor- und Skalarpotential wie folgt berechnen:

$$\vec{E}(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{A} - \text{grad } \phi. \quad (5)$$

Bei Abstrahlung sei nun die Annahme getroffen, dass die zeitliche Änderung einen wesentlich größeren Beitrag zu der gestrahlten elektrischen Feldstärke liefert als die räumliche Änderung am Empfangsort, sodass der Gradientenanteil in Gleichung (5) vernachlässigt wird. Unabhängig von möglichen Fernfeldbetrachtungen wird darüberhinaus pragmatisch angenommen, dass das E - und das H -Feld über die Freiraumimpedanz Z_0 zusammenhängen. Für die Näherung des gestrahlten Feldes ergibt sich also

$$H(r, t)_{\text{gestrahlt}} = \frac{\mu_0 l}{4\pi r Z_0} \frac{\partial}{\partial t} I(t), \quad (6)$$

wobei die Richtungsinformation des H -Feldes in der Messkonfiguration berücksichtigt wird. Die eigentlich relevante Größe bezüglich des Abstrahlverhaltens ist also mit Gleichung (6) gegeben. Der quasi-stationäre Ausdruck in Gleichung (4) kann allerdings auch als EMV-Abschätzung für sehr niederfrequente Magnetfelder dienen und ergänzt zudem die Messergebnisse, die beide Anteile beinhalten, um entsprechende Plausibilitätsbetrachtungen. Der Messaufbau und die Messtechnik für die transiente Funkenstrecke werden im Folgenden beschrieben.

3. Messaufbau

Bei dem grundlegenden Modellversuch wird ein 8/20-Stoßstromimpuls erzeugt und mit Hilfe einer kalibrierten (siehe Abschnitt 4) Magnetfeld-Schnüffelsonde vermessen. Die Charakteristik eines solchen Stoßstromimpulses ist in der Norm DIN EN 61000-4-5 [3] festgelegt und in Bild 2 dargestellt. Der Name dieses Norm-Impulses ergibt sich aus der Steilheit seiner Signalfanken: Die Stirnzeit des Stromes beträgt $8 \mu\text{s}$ und ist durch die virtuellen Schnittpunkte einer Gerade durch 0 % und 100 % seines Maximalwertes definiert. Die Rückenhalbwertszeit ist zu $20 \mu\text{s}$ definiert. Der 8/20-Impuls wird üblicherweise bei Surge-Tests [3]/[4] eingesetzt. Im Rahmen der hier durchgeführten Abschätzung dient der Impuls als sehr gut reproduzierbares Referenzsignal für eine Funkenstrecke, wobei sowohl der Strom- als auch der Spannungsverlauf an den Elektroden der Funkenstrecke durch ein Oszilloskop messtechnisch erfassbar werden. Das von dem Impuls erzeugte Magnetfeld wird mittels einer Magnetfeld-Schnüffelsonde gemessen.

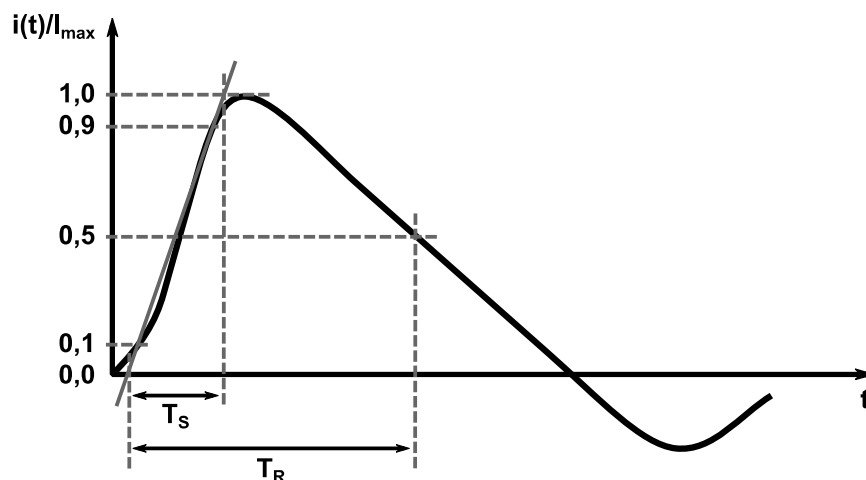


Bild 2: Signalform des 8/20-Impulses. Stirnzeit: $T_S = 8 \mu\text{s} \pm 20 \%$; Rückenhalbwertszeit: $T_R = 20 \mu\text{s} \pm 20 \%$.

Der Stoßstromimpuls wird über die in Bild 3 abgebildete Funkenstrecke mit einem Elektrodenabstand von 5 mm entladen. Der Spitzenwert des Stromes ist an dem Generator auf Werte von 5 kA, 12,5 kA und 23 kA einstellbar. Der Raum zwischen den Hauptelektroden der Funkenstrecke wird durch eine mittig angebrachte Hilfelektrode vorionisiert. Beim Auslösen des Impulses schließt eine Funkenentladung die Strecke aufgrund von Stoßionisation kurz.

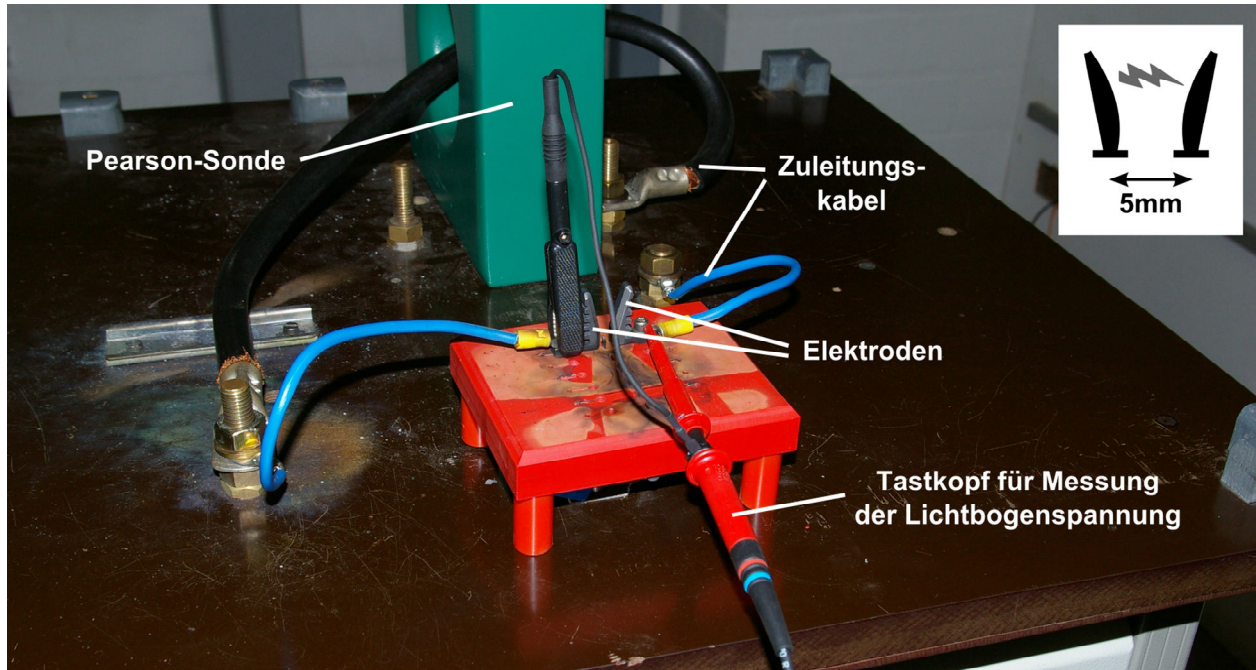


Bild 3: Funkenstrecke zur Entladung des 8/20-Impulses

An den Elektroden der Funkenstrecke wird die Lichtbogenspannung mit Hilfe eines Tastkopfes ermittelt. Die entsprechenden Spannungsmesswerte werden erst bei zukünftigen Untersuchungen der hier beschriebenen Thematik herangezogen und an dieser Stelle daher nicht weiter behandelt. Der entsprechende Einfluss des Skalarpotenzials wurde durch die in Abschnitt 2 getroffenen Abschätzungen vernachlässigt. Die Messung des Stoßstromes erfolgte mit einer Pearson-Sonde. Die Messwerte des Zuleitungsstromes $I(t)$ und der Spannung an der Magnetfeld-Schnüffelsonde werden im Zeitbereich mit einem Oszilloskop mit einer Abtastrate von 100 MHz aufgenommen.

Klar ersichtlich ist in Bild 3, dass aufgrund der vorhandenen Messtechnik nicht von idealen Ausbreitungsverhältnissen in Form des Freiraums ausgegangen werden kann. Allerdings ist es auch sinnvoll, die hier messtechnisch zu verifizierenden rechnerischen EMV-Abschätzungen unter solch eingeschränkten Idealbedingungen, wie sie in der späteren Praxis ohnehin vorkommen, durchzuführen.

Die Magnetfeldsonde wird an unterschiedlichen Positionen im Raum und mit unterschiedlicher Polarisationsrichtung bezüglich der Ausbreitungsrichtung des Funkens aufgestellt. Um den Zusammenhang zwischen der gemessenen Spannung und dem real vorliegenden Magnetfeld herzustellen, wurde die Magnetfeldsonde zuvor kalibriert. Eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierung ist im folgenden Abschnitt zu finden.

4. Kalibrierung der Magnetfeld-Schnüffelsonde

Für die Messung des erzeugten Magnetfeldes wurde aufgrund ihrer kleinen Größe eine Magnetfeld-Schnüffelsonde (*Langer EMV-Technik GmbH RF-R 400 – 1*) ausgewählt, um empfangsseitig von einer nur lokalen Betrachtung ausgehen zu können, wie sie in den Gleichungen (4) und (6) impliziert ist. Eine Kalibrierung der Magnetfeld-Schnüffelsonde ist erforderlich, um die an ihr anliegende induzierte Spannung einem Magnetfeld zuordnen zu können. Die klassische Antennenkalibrierung in Form eines frequenzabhängigen Antennenfaktors kann aufgrund der genannten Einschränkung keine Anwendung finden. Als Kalibrierumgebung wird eine TEM-Zelle verwendet, in der die Schnüffelsonde in der Mitte und genügend weit entfernt von den Rändern platziert werden kann. Die TEM-Zelle und die Ausrichtung der Schnüffelsonde für den Kalibriervorgang sind in Bild 4 schematisch dargestellt.

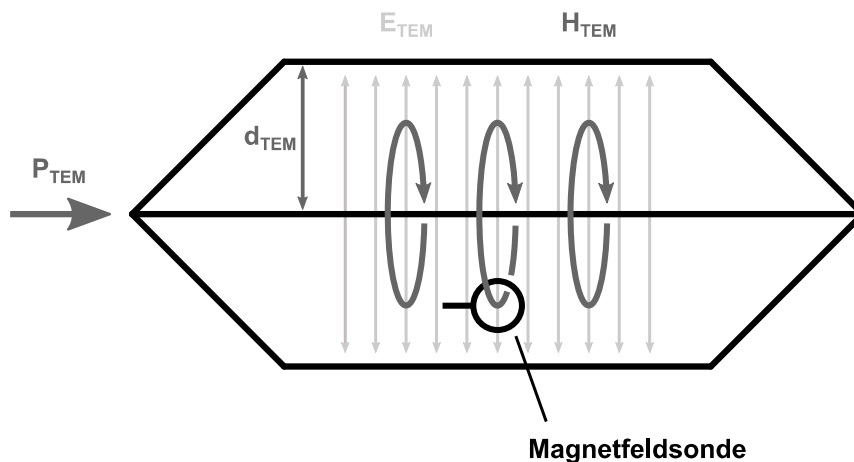


Bild 4: Schematische Darstellung des Kalibriervorgangs in der TEM-Zelle

Mit der Kalibrierung in der TEM-Zelle wird das Übertragungsmaß $S_{21}(f)$ als Quotient von der am Ausgang der Magnetfeldsonde gemessenen Spannung $U_{Sonde, TEM}(f)$ und der frequenzunabhängigen Spannung U_{TEM} am Eingang der TEM-Zelle bestimmt:

$$S_{21}(f) = \frac{U_{Sonde, TEM}(f)}{U_{TEM}} \quad (7)$$

Die Kalibriermessung erfolgte mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator über einen Frequenzbereich von 10 kHz bis 500 MHz in einer 50 Ω -Umgebung. Am Eingang der TEM-Zelle wurde eine konstante Leistung P_{TEM} von -10 dBm entsprechend 10^{-4} W durch den Netzwerkanalysator eingespeist. Für die Spannung am Eingang der TEM-Zelle gilt:

$$P_{TEM} = \frac{U_{TEM}^2}{50 \Omega} \Leftrightarrow U_{TEM} = \sqrt{P_{TEM} \cdot 50 \Omega} \quad (8)$$

Das elektrische Feld in der TEM-Zelle bestimmt sich zu

$$P_{TEM} = \frac{U_{TEM}^2}{50 \Omega} = \frac{E_{TEM}^2 \cdot d_{TEM}^2}{50 \Omega} \Leftrightarrow E_{TEM} = \sqrt{\frac{P_{TEM} \cdot 50 \Omega}{d_{TEM}^2}} \quad (9)$$

Dabei ist d_{TEM} die Septumhöhe der TEM-Zelle. Der Feldwellenwiderstand Z_0 innerhalb der TEM-Zelle verknüpft das elektrische und das magnetische Feld:

$$H_{TEM} = \frac{E_{TEM}}{Z_0} . \quad (10)$$

Die Ausgangsspannung $u_{Sonde, TEM}(t)$ ergibt sich im Zeitbereich durch die Faltung des magnetischen Feldes $H_{TEM}(t)$ mit dem Kalibrierfaktor $k(t)$ als Impulsantwort der Magnetfeldsonde,

$$u_{Sonde, TEM}(t) = H_{TEM}(t) * k(t) , \quad (11)$$

entsprechend gilt im Frequenzbereich:

$$U_{Sonde, TEM}(f) = H_{TEM}(f) \cdot K(f) \Leftrightarrow K(f) = \frac{U_{Sonde, TEM}(f)}{H_{TEM}(f)} . \quad (12)$$

Mit den zuvor besprochenen Zusammenhängen lässt sich der Kalibrierfaktor wie folgt ausdrücken:

$$\begin{aligned} K(f) &= \frac{U_{Sonde, TEM}(f)}{H_{TEM}(f)} = \frac{U_{TEM} \cdot S_{21}(f)}{H_{TEM}(f)} = \frac{\sqrt{P_{TEM} \cdot 50 \Omega} \cdot Z_0 \cdot S_{21}(f)}{\sqrt{\frac{P_{TEM} \cdot 50 \Omega}{d_{TEM}^2}}} \\ &= Z_0 \cdot d_{TEM} \cdot S_{21}(f) . \end{aligned} \quad (13)$$

Während der Vermessung des Stoßstromimpulses wurde die Ausgangsspannung der Magnetfeldsonde $u_{Sonde, Messung}(t)$ aufgezeichnet. Die Fourier-Transformation der Messwerte liefert $U_{Sonde, Messung}(f)$. Das Spektrum $H_{Messung}(f)$ des tatsächlich vorhandenen Magnetfeldes ergibt sich mit Gleichung (13) zu:

$$H_{Messung}(f) = \frac{U_{Sonde, Messung}(f)}{K(f)} = \frac{U_{Sonde, Messung}(f)}{Z_0 \cdot d_{TEM} \cdot S_{21}(f)} . \quad (14)$$

Mit dem Zusammenhang (14) wird aus den Messergebnissen die Charakteristik der Magnetfeldsonde herauskalibriert, sodass man das tatsächliche H -Feld erhält. Im Zeitbereich aufgenommene Messdaten werden für dieses Kalibrierverfahren also zunächst in den Frequenzbereich transformiert. Die so ermittelten Werte werden in dem nachfolgenden Abschnitt dargestellt und mit den rechnerischen Abschätzungen, welche in den Gleichungen (4) und (6) getroffen wurden, verglichen.

5. Messergebnisse

Von der Vielzahl der Messungen wird hier lediglich nur eine Auswahl präsentiert. In der Summe der Messungen sei allerdings bemerkt, dass die Messergebnisse sehr gut reproduzierbar waren, was einerseits für die Qualität des Messaufbaus spricht und andererseits ein Indiz dafür ist, dass räumliche Variationen der Funkenstrecke, von welchen man sicher ausgehen kann, keinen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Bild 5 zeigt zunächst ein Messwertepaar, bestehend aus dem zeitlichen Verlauf des Stromes an den Elektroden $I(t)$ und der an der Magnetfeld-Schnüffelsonde induzierten Spannung, bei der die in Abschnitt 4 beschriebene Kalibrierung noch nicht angewendet wurde. Allerdings ist schon deutlich zu erkennen, dass die gemessene Spannung durchaus den Charakter einer Ableitung des Stromes $I(t)$ hat (vgl. Gleichung (6)). Bei

Stromspitzen (Extremwerte bei etwa 22 μs und 50 μs) ist auch ein Nulldurchgang der gemessenen Spannung zu beobachten. Wendepunkte innerhalb des Stromverlaufes (beispielsweise bei 35 μs) korrespondieren zu einem Extremwert der in der Schnüffelsonde induzierten Spannung.

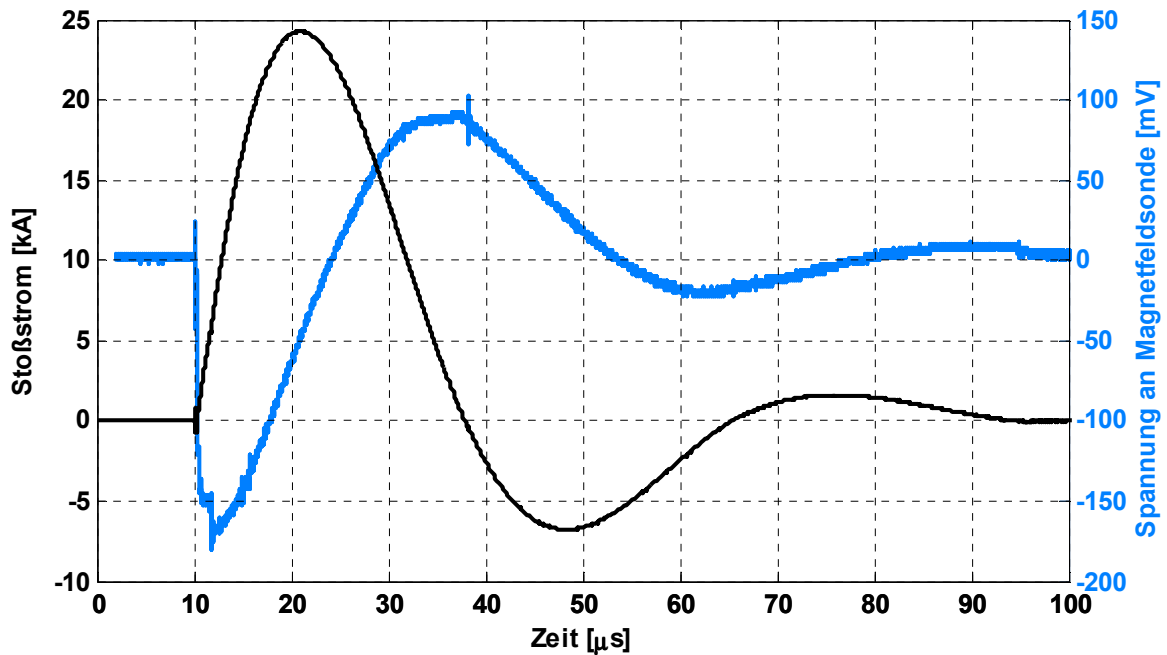


Bild 5: Stromverlauf des 8/20-Impulses und Spannung an der Magnetfeldsonde bei einem Abstand von 0,26 m zwischen der Funkenstrecke und der Magnetfeldsonde

Bild 6 zeigt das Spektrum des gemessenen magnetischen Feldes, bei der die Kalibrierung der Magnetfeld-Schnüffelsonde berücksichtigt wurde. Zum Vergleich sind die Abschätzungen gemäß Gleichung (4) und (6) aufgetragen, wie sie aus dem an den Elektroden gemessenen Strom berechnet wurden.

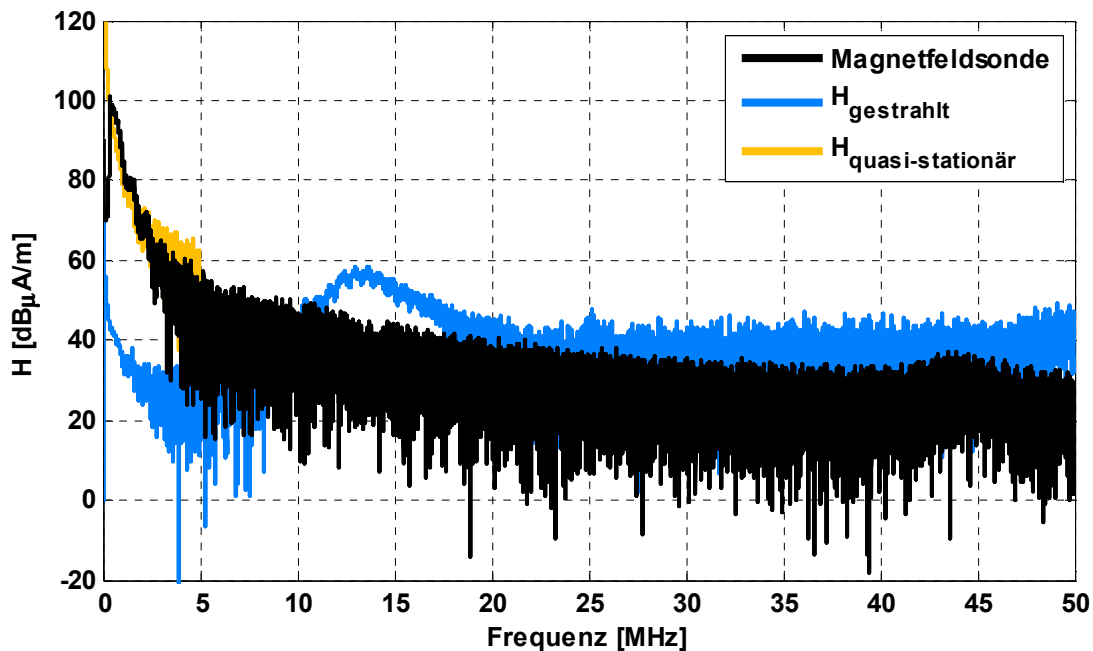


Bild 6: Spektren der gemessenen und abgeschätzten Magnetfelder bei einem Abstand von 0,26 m zwischen der Funkenstrecke und der Magnetfeldsonde ($H_{\text{quasi-stationär}}$ ist nur bis 5 MHz dargestellt)

Deutlich zu erkennen ist, dass für kleinere Frequenzen bis 5 MHz die Abschätzung des erzeugten Magnetfeldes mit dem quasi-stationären Ausdruck repräsentativer für die gemessenen Magnetfelder ist. Bei etwa 13 MHz zeigt die rechnerische Abschätzung über den gemessenen Strom eine Art Resonanz, die bei den Messungen mit der Schnüffelsonde nicht auftritt. Die rechnerische Abschätzung des erzeugten Magnetfeldes liefert Werte, die – abgesehen von genannter Resonanz – durchschnittlich etwa 10 dB über den gemessenen Werten liegen. Dies scheint plausibel, da hierfür auch ideale Ausbreitungsbedingungen angenommen wurden.

Bezüglich einer worst-case-Abschätzung bleibt als wesentliche Erkenntnis allerdings festzustellen, dass die rechnerische Abschätzung des gestrahlten Magnetfeldes immer über der gemessenen Feldstärke liegt. Für EMV-relevante Betrachtungen einer Funkenstrecke kann die vorgestellte sehr einfache Abschätzung über das Vektorpotential somit durchaus als verifiziert und anwendbar gelten.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Versuchsaufbau vorgestellt, mit dem eine transiente Funkenstrecke reproduzierbar erzeugt und ihr Abstrahlverhalten gemessen werden kann. Wesentlicher Bestandteil der Vermessung des Magnetfeldes ist dabei die Kalibrierung einer geeigneten Magnetfeld-Schnüffelsonde mit Anwendung auf Transienten. Mit diesem grundlegenden Versuch konnte eine einfache rechnerische Abschätzung für Magnetfelder, die durch eine solche Funkenstrecke erzeugt werden, verifiziert werden. Die Abschätzungen sind dabei unterteilt in einen quasistationären und einen gestrahlten Term, welche je nach Frequenzbereich Anwendung finden sollten.

Weiterhin zu untersuchen bleiben Variationen der Funkenstrecke, beispielsweise bezüglich der Anstiegszeiten des Stromes $I(t)$ und dem Abstand der Elektroden. Denkbar wäre auch eine Erweiterung der rechnerischen Abschätzung mit dem Skalarpotential unter Berücksichtigung der gemessenen Elektrodenspannung.

Interessant ist sicherlich auch eine Charakterisierung der raum- und zeitvarianten Funkenentladung selbst mit Hilfe von High-Speed-Kameras. Einige Arbeiten am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen sind diesbezüglich durchaus vielversprechend und könnten zur Verfeinerung von rechnerischen Abschätzungen beitragen.

Literaturangaben

- [1] *Bahnanwendungen – Elektromagnetische Verträglichkeit – Teil 2: Störaussendungen des gesamten Bahnsystems in die Außenwelt*, Deutsche Norm DIN EN 50121-2:2006, 2006.
- [2] A. Enders, *Basistext Elektromagnetische Felder*, 1st ed. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit, 2011, ISBN: 978-3-00-035810-4.
- [3] *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen*, Deutsche Norm DIN EN 61000-4-5:2006, 2006.
- [4] *Experimental Investigation of Short-Time Arc-Wall Interaction*, Bernd Schottel, Michael Kurrat, XIX International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 02.–07.09.2012, Beijing China.