

Synthese realer transienter Störsignale mittels arbiträrer Signalgeneratoren für EMV-Untersuchungen

Oliver Kerfin, M. Sc., Anne Lena Vaske, M. Sc., Lukas Oppermann, M. Sc.
Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit
Braunschweig, Deutschland, {o.kerfin, a.vaske, l.oppermann}@tu-braunschweig.de

1 Einleitung

Für Störfestigkeitsprüfungen gegenüber transienten Vorgängen werden im Bereich der EMV üblicherweise standardisierte Impulsformen wie beispielsweise Burst- und Surge-Impulse [1]/[2] genutzt. Der zeitliche Verlauf solcher Impulse legt deren physikalische Eigenschaften und damit auch die EMV-Relevanz bezüglich eines möglichen Störverhaltens fest. In der EMV-Normung wird der zeitliche Verlauf durch verschiedene Parameter definiert, u. a. durch Flankenanstiegszeiten oder Wiederholraten.

Die Verwendung von standardisierten Impulsen für EMV-Untersuchungen spiegelt die Realität allerdings nur mit Einschränkungen wieder, da in der Praxis auftretende Transienten bereits bei minimaler Veränderung des untersuchten Szenarios sehr unterschiedliche Ausprägungen aufweisen können (vgl. Bild 2).

Um der hohen Variabilität der in der Realität auftretenden Störimpulse Rechnung zu tragen, wird in diesem Beitrag ein neuer Ansatz zur Bereitstellung von periodisch wiederkehrenden schnellen transienten Signalen, ähnlich einem Burst, für EMV-Prüfungen verfolgt. Dabei werden die in einem realen Szenario aufgezeichneten Transienten mit Hilfe eines leistungsfähigen arbiträren Signalgenerators (AWG, engl. *arbitrary waveform generator*) künstlich nachgebildet und können dann für Untersuchungen im EMV-Labor schnell und flexibel bereitgestellt werden. Um bestimmte Merkmale der gemessenen Transienten besonders zu modulieren, kann im Vorfeld der Signalsynthese gegebenenfalls ergänzend eine Manipulation der Signale erfolgen. Wesentliche Vorteile dieses Ansatzes sind, dass einerseits die Streubreite realer Transienten bei der Störfestigkeitsprüfung unter Laborbedingungen berücksichtigt und andererseits ein direkter Zusammenhang zwischen der Ausprägung eines Störimpulses und dem jeweiligen Störverhalten für eine EMV-gerechte Optimierung des Prüflings abgeleitet werden kann.

Als eine mögliche Anwendung wird in dieser Publikation die periodische Einspeisung der synthetisierten Signale in eine TEM-Zelle für Störfestigkeitsuntersuchungen gegenüber transienten elektrischen und magnetischen Feldern an kompakten elektronischen Geräten vorgestellt. Um die entsprechende Messumgebung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der eingespeisten Störimpulse zu bewerten, werden einzelne Referenzsignale in der TEM-Zelle mittels einer kalibrierten, geschirmten Loop-Antenne aufgezeichnet und mit dem angestrebten Zielwert für den zeitlichen Feldverlauf verglichen.

In Abschnitt 2 dieser Publikation wird die Bereitstellung realer Transienten für EMV-Untersuchungen diskutiert. Ausgehend von der Aufzeichnung der Impulse in realen Szenarien wird ein Synthesekonzept entwickelt, um die gemessenen Signale unter Laborbedingungen in verschiedenen Messumgebungen nachzubilden. Die Validierung dieses Konzepts

erfolgt in Abschnitt 3 durch Simulationen und Messungen, bei denen die Übertragung generischer Transienten in einem UHF-Band Hohlleiter untersucht wird. Eine Anwendung findet das Synthesekonzept bei der Nachbildung transienter elektrischer Feldverläufe in einer TEM-Zelle, welche in Abschnitt 4 vorgestellt wird. Die hierbei reproduzierten Impulse wurden zuvor an einer elektrischen Bahnanlage aufgezeichnet. Abschnitt 5 gibt abschließend einen Ausblick auf eine zukünftige Erweiterung des hier vorgestellten Synthesekonzepts.

2 Bereitstellung realer Transienten unter Laborbedingungen

Die Bereitstellung realer Transienten für EMV-Störfestigkeitstests beinhaltet im Wesentlichen zwei Herausforderungen: zum einen die Aufzeichnung der transienten Signale in der Messumgebung, in welcher sie in der Praxis auftreten, und zum anderen die Nachbildung der Impulsformen im EMV-Labor. In dem folgenden Abschnitt wird zunächst beispielhaft die Aufzeichnung von Transienten an einer elektrischen Bahnanlage betrachtet. Anschließend wird ein Synthesekonzept zur Erzeugung der gemessenen Impulse vorgestellt, welches in Abschnitt 3 validiert und in Abschnitt 4 zur Nachbildung eines transienten elektrischen Feldes innerhalb einer TEM-Zelle angewendet wird.

2.1 Aufzeichnung von transienten Signalen in realen Szenarien

In realen Szenarien auftretende Transienten sind im Regelfall sehr kurze, nicht periodische Ereignisse. Daher erfolgt eine Messung derartiger Signale zweckmäßigerweise im Zeitbereich mittels eines Oszilloskops. Das Setup zur Aufzeichnung realer transienter Störsignale an einer elektrischen Bahnanlage ist in Bild 1 gezeigt. In diesem Szenario erzeugt eine Diskontinuität der Oberleitung bei Zugdurchfahrten energiereiche Funkenentladungen, die wiederum zu einer transienten Änderung der elektrischen Feldverteilung am Messort führen. Als Empfangsantenne für das elektrische Feld wird hierbei eine bikonische Antenne HK 116 von Rohde & Schwarz genutzt. Die Aufzeichnung der Signale erfolgt mit einem breitbandigen Oszilloskop DSO90604A von Agilent Technologies.

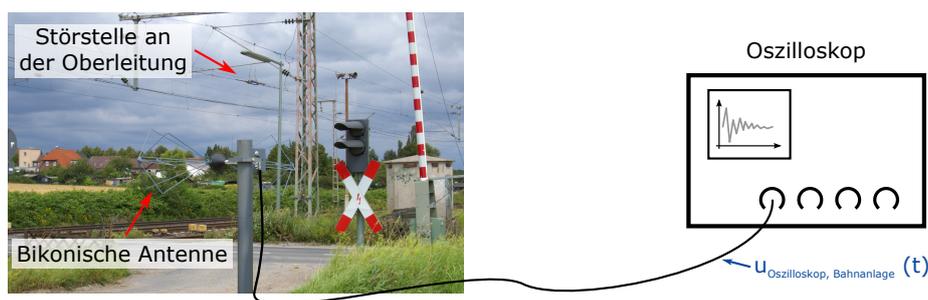


Bild 1: Messaufbau zur Aufzeichnung transienter Signale an einer elektrischen Bahnanlage

Mit dem vorgestellten Setup ist keine genaue Messung der absoluten Feldstärke möglich, da zum Beispiel die Polarisationsrichtung des einfallenden elektrischen Feldes unbekannt ist. Der Grundgedanke des Setups ist es vielmehr, das spätere EMV-Szenario, in welchem das unter Laborbedingungen zu prüfende Gerät während des regulären Betriebs platziert wird, nachzubilden. Eine tiefgehendere Diskussion zur Messung transienter Signale in realen Umgebungen ist in [3] zu finden.

In Bild 2 sind zwei transiente Störsignale gezeigt, die unter identischen Bedingungen und unmittelbar nacheinander an der elektrischen Bahnanlage aufgezeichnet wurden. Beide Transienten unterscheiden sich signifikant in ihren Flankenanstiegszeiten. Dies veranschaulicht, weshalb die Einbeziehung realer Signale in EMV-Störfestigkeitstests als Erweiterung der standardisierten Impulsformen sinnvoll ist.

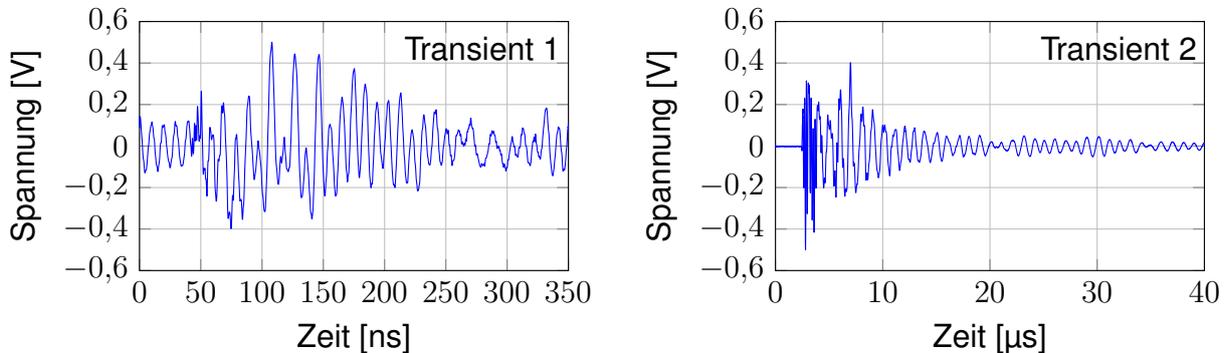


Bild 2: Streuung von Transienten bei Messungen unter identischen Bedingungen an einer elektrischen Bahnanlage

2.2 Synthese der Transienten mittels arbiträrer Signalgeneratoren

Die aufgezeichneten Transienten werden im EMV-Labor mit Hilfe eines AWG nachgebildet. Das Konzept zur Synthese realer Transienten ist in Bild 3 veranschaulicht. Dabei wird angestrebt, den zeitlichen Verlauf der in einem realen Szenario aufgetretenen Impulse $a_{\text{Zielsignal}}(t)$ unter Laborbedingungen möglichst exakt zu reproduzieren. Bei der im vorangegangenen Abschnitt betrachteten Messung an der elektrischen Bahnanlage wäre dieses Zielsignal beispielsweise das an der bikonischen Messantenne wirkende elektrische Feld.

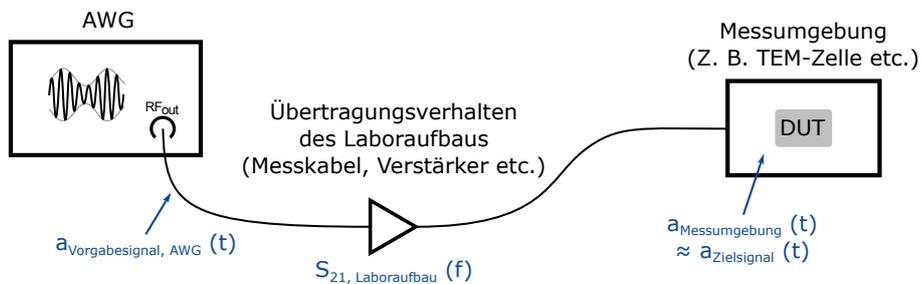


Bild 3: Synthesekonzept zur Nachbildung realer Transienten für EMV-Tests unter Laborbedingungen

Vor der Synthese mit dem AWG ist allerdings eine Aufbereitung der Signale erforderlich, da der Laboraufbau eine ungewollte Verformung des angestrebten Impulses herbeiführt. Ursachen hierfür sind beispielsweise die Signaldämpfung in koaxialen Messkabeln oder das frequenzabhängige, dispersive Übertragungsverhalten von HF-Verstärkern. Für die im Rahmen dieser Veröffentlichung betrachtete Synthese periodischer Transienten kann eine Vorverzerrung des mit dem AWG bereitgestellten Ausgangssignals durch die Korrektur der entsprechenden Frequenzspektren erfolgen. Hierzu wird das Zielsignal mit der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) in den Frequenzbereich transformiert,

$$a_{\text{Zielsignal}}(t) \quad \circ \text{---} \bullet \quad A_{\text{Zielsignal}}(f) . \quad (1)$$

Der Einfluss des Laboraufbaus wird hierbei durch die Messung des Vorwärtstransmissionsfaktors $S_{21, \text{Laboraufbau}}(f)$ mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator charakterisiert. Das Spektrum des erforderlichen Ausgangssignals des AWG ergibt sich dementsprechend zu

$$A_{\text{Vorgabesignal, AWG}}(f) = \frac{A_{\text{Zielsignal}}(f)}{S_{21, \text{Laboraufbau}}(f)}. \quad (2)$$

Durch Anwendung der inversen DFT (iDFT) folgt hieraus der zeitliche Verlauf des mit dem AWG vorgegebenen Signals, welcher in der Messumgebung am DUT das gewünschte Zielsignal hervorruft:

$$A_{\text{Vorgabesignal, AWG}}(f) \quad \bullet \text{---} \circ \quad a_{\text{Vorgabesignal, AWG}}(t). \quad (3)$$

Das in der Messumgebung hierdurch tatsächlich auftretende Signal wird in Unterscheidung zu dem angestrebten Zielsignal als $a_{\text{Messumgebung}}(t)$ bezeichnet, welches im Idealfall dem Zielsignal entspricht.

3 Validierung des Synthesekonzepts – Transienten in einem Hohlleiter

Zur Validierung des Synthesekonzepts wird die Übertragung periodischer, transienter Signale in einer generischen UHF-Band Hohlleiterstruktur simuliert, deren erste Cut-Off-Frequenz bei etwa 600 MHz liegt. Die Simulationsergebnisse werden anschließend mit Messungen an einem entsprechenden realen Hohlleiter verglichen. Zielwert bei der Simulation wie auch der Messung ist ein generischer Transient, dessen Spektrum auf den Frequenzbereich von 600 MHz bis 1200 MHz bandbegrenzt ist, sodass ausschließlich die H_{10} -Mode im Hohlleiter angeregt wird. Gegenüber dem in Abschnitt 4 für eine TEM-Zelle umgesetzten Synthesekonzept ist das Setup für die Übertragung transienter Signale im Hohlleiter besonders gut für eine Validierung geeignet: Der Hohlleiter weist ein dispersives Verhalten auf und ruft folglich eine starke Verformung des eingespeisten Signals hervor. Nur durch eine korrekte Vorverzerrung des Vorgabesignals kann am Ausgang des Hohlleiters das gewünschte Zielsignal erzielt werden. Zudem sind das tatsächliche Ausgangssignal des Hohlleiters wie auch der Vorgabe- und Zielwert Spannungen. Diese lassen sich ohne Zuhilfenahme weiterer Messantennen, die einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bei der Validierung darstellen, mit einem Oszilloskop aufzeichnen.

3.1 Feldsimulation des Hohlleiters

Das generische CST-Simulationsmodell des UHF-Band Hohlleiters ist in Bild 4 (links, oben) zu sehen. Der Hohlleiter ist als Vakuum-Quader in einem PEC-Background realisiert, die Speisung erfolgt über zwei Waveguide-Ports. Die Simulation erfolgt mit dem Time Domain Solver in einem Frequenzbereich von 600 MHz bis 1200 MHz. Die entsprechende Verteilung des elektrischen Feldes an Port 1 ist in Bild 4 (links, unten) dargestellt.

Bild 4 (rechts) zeigt den Simulations-Workflow. Im ersten Simulationsschritt wird der generische Hohlleiter an Port 1 mit einem Gauß-Signal angeregt, um dessen Vorwärtstransmissionsfaktor $S_{21, \text{Hohlleiter, CST}}(f)$ zu bestimmen. Das angestrebte Ausgangssignal $u_{\text{Zielsignal, CST}}(t)$ an Port 2 wird anschließend gemäß Gleichung (2) im Frequenzbereich mit dem Übertragungsverhalten beaufschlagt, woraus sich der vorverzerrte Transient zur

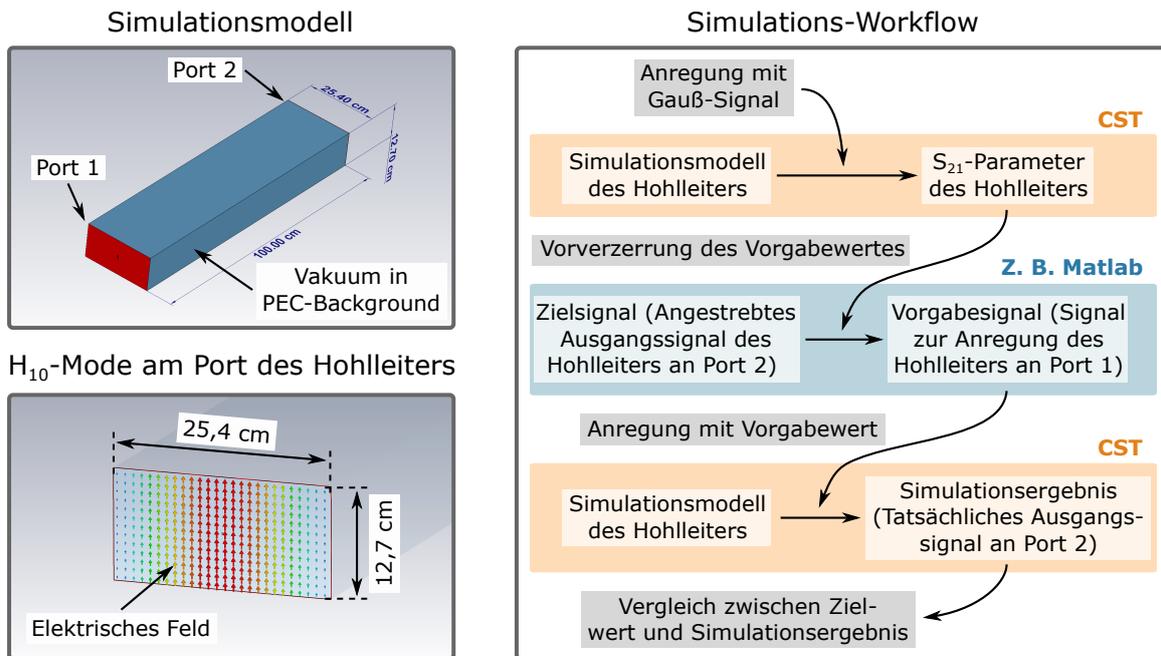


Bild 4: Simulationsmodell des Hohlleiters (links, oben), angeregte Port-Mode (links, unten) und Simulations-Workflow (rechts)

Anregung des Hohlleiters an Port 1 für den zweiten Simulationsschritt ergibt:

$$U_{\text{Vorgabesignal, CST}}(f) = \frac{U_{\text{Zielsignal, CST}}(f)}{S_{21, \text{Hohlleiter, CST}}(f)} \quad (4)$$

Dieser Vorgabewert wird in CST für die Simulation als periodisches Signal definiert. Der abschließende Vergleich zwischen dem simulierten Ausgangssignal $u_{\text{Ausgangssignal, CST}}(t)$ an Port 2 und dem angestrebten Signal $u_{\text{Zielsignal, CST}}(t)$ erfolgt in Abschnitt 3.3.

3.2 Messaufbau zur Untersuchung der Signalübertragung im realen Hohlleiter

Bild 5 zeigt den für den realen UHF-Band Hohlleiter realisierten Versuchsaufbau. Für die Synthese der vorgegebenen Signale findet ein AWG M8195A von Keysight Technologies Verwendung, welcher den Hohlleiter an Port 1 speist. Das Übertragungsverhalten des Hohlleiters wie auch der Messkabel wird mit einem vektoriiellen Netzwerkanalysator ENA5080 von Keysight Technologies charakterisiert und das Vorgabesignal wird entsprechend Gleichung (2) aufbereitet:

$$U_{\text{Vorgabesignal, realer HL}}(f) = \frac{U_{\text{Zielsignal, realer HL}}(f)}{S_{21, \text{realer HL}}(f) \cdot S_{21, \text{Messkabel AWG-HL}}(f)} \quad (5)$$

Das Ausgangssignal $u_{\text{Ausgangssignal, realer HL}}(t)$ an Port 2 kann aus dem mit dem Oszilloskop DSO90604A aufgezeichneten Signal $u_{\text{Oszilloskop, realer HL}}(t)$ berechnet werden:

$$U_{\text{Ausgangssignal, realer HL}}(f) = \frac{U_{\text{Oszilloskop, realer HL}}(f)}{S_{21, \text{Messkabel HL-Oszilloskop}}(f)} \quad (6)$$

Zusätzlich zu dem Hohlleiter-Signalfeld stellt der AWG einen direkten Pfad zum Oszilloskop für ein Referenzsignal bereit, welches während des Messvorgangs für die fortlaufende Überprüfung der Messwerte genutzt wird.

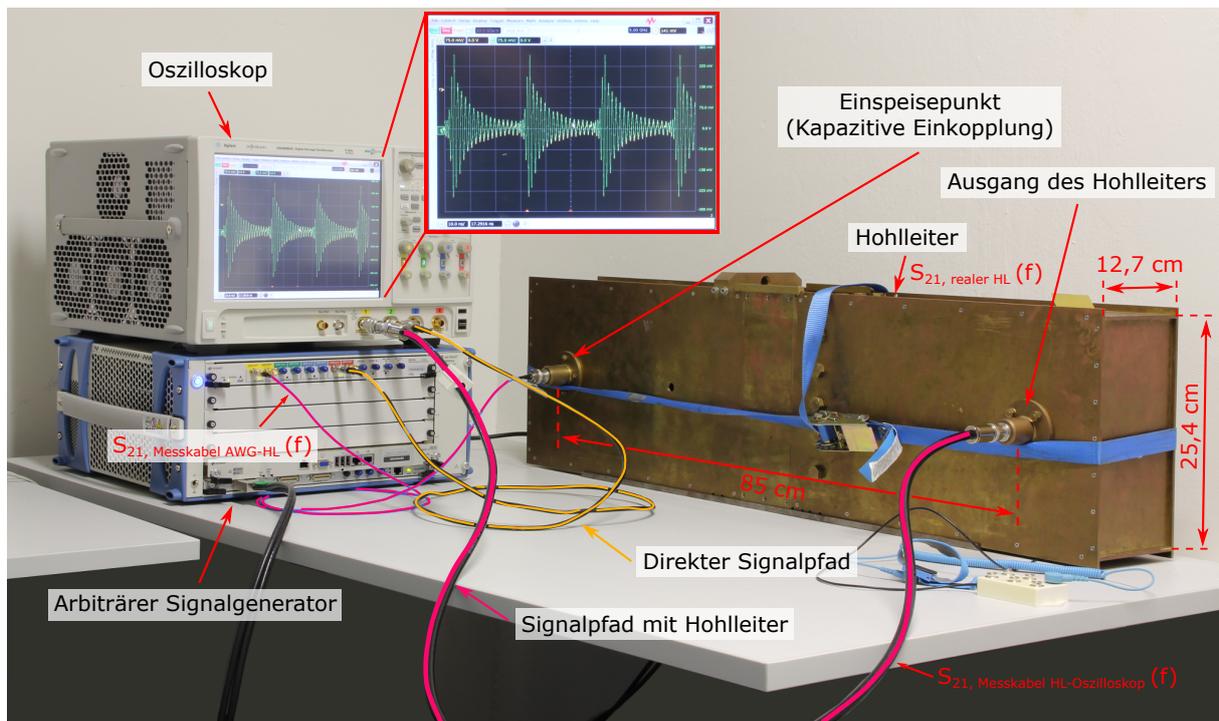


Bild 5: Setup zur messtechnischen Validierung des Synthesekonzepts an einem realen Hohlleiter

3.3 Auswertung der Feldsimulation und der Messungen an dem realen Hohlleiter

Bild 6 zeigt die Simulations- sowie Messergebnisse zur Übertragung des generischen Transienten in dem Hohlleiter. Die Amplitude der Signale für den realen Hohlleiter ist gegenüber der Simulation aus Dynamikgründen angehoben. Gut zu erkennen ist, dass die Anregungssignale $u_{\text{Vorgabesignal, CST/realer HL}}(t)$ aufgrund unterschiedlicher Signallaufzeiten in der Simulation beziehungsweise im realen Aufbau zeitlich verschoben sind. Beide Methoden liefern eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den angestrebten Ausgangssignalen $u_{\text{Zielsignal, CST/realer HL}}(t)$ und den tatsächlich ermittelten Signalverläufen am Ausgang des Hohlleiters $u_{\text{Ausgangssignal, CST/realer HL}}(t)$. Durch diese Kongruenz wird das Synthesekonzept für die Erzeugung periodischer, transientser Signale validiert.

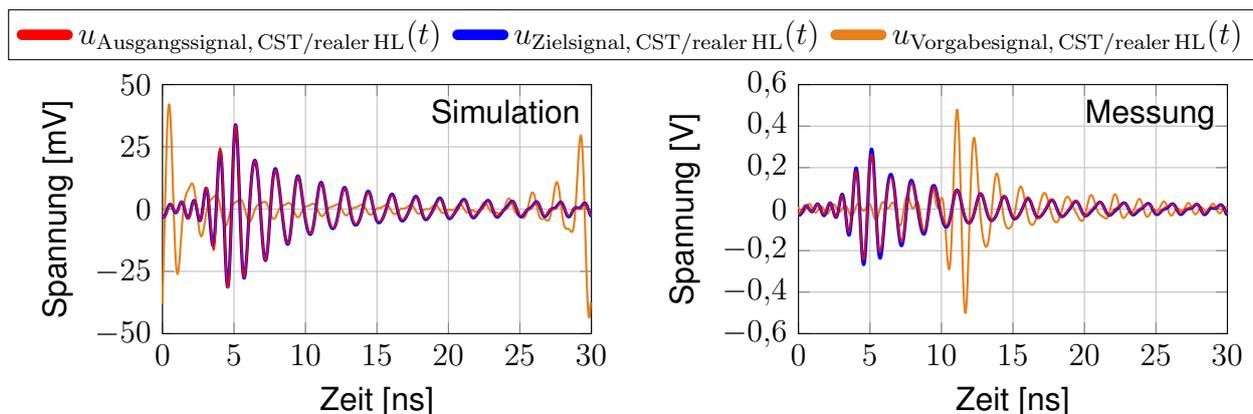


Bild 6: Generischer Transient im Hohlleiter: Simulation (links) und realer Hohlleiter (rechts)

4 Erzeugung transienter Störsignale in einer TEM-Zelle

Das in Abschnitt 2 erläuterte Synthesekonzept zur Nachbildung transienter Signale wird nun in einer TEM-Zelle umgesetzt. Als Zielsignal wird das reale an einer elektrischen Bahnanlage aufgetretene elektrische Feld genutzt, welches sich mit dem Antennenfaktor der bikonischen Messantenne aus dem Transient 1 (vgl. Bilder 1 und 2) berechnen lässt.

$$E_{\text{Zielsignal, TEM-Zelle}}(f) = AF_{\text{Messantenne}}(f) \cdot U_{\text{Oszilloskop, Bahnanlage}}(f) \quad (7)$$

Bei der Messung wird im Innenraum der TEM-Zelle ein zeitlicher Verlauf der elektrischen Feldstärke angestrebt, wie er in der realen Messumgebung gemessen wurde.

4.1 Messaufbau zur Synthese eines transienten elektrischen Feldverlaufs

Zur Erzeugung des elektrischen Feldes wird wiederum der AWG M8195A genutzt, der die TEM-Zelle über einen HF-Verstärker 50A220 von Amplifier Research speist; das entsprechende Setup ist in Bild 7 (links) gezeigt.

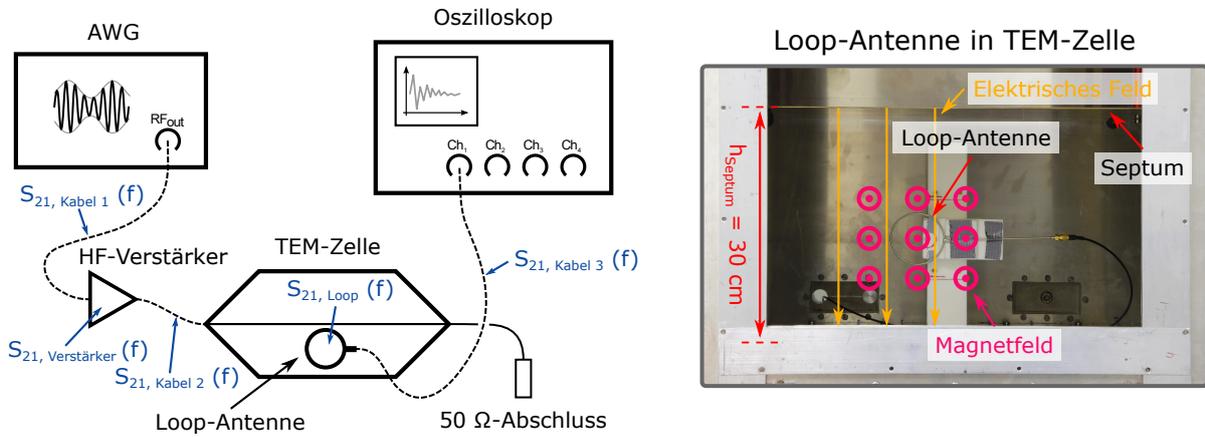


Bild 7: Setup zur Erzeugung transienter elektrischer Feldverläufe in einer TEM-Zelle (links), Positionierung der Loop-Antenne in der TEM-Zelle (rechts)

Das Ausgangssignal $u_{\text{Vorgabewert, AWG}}(t)$ des AWG ist unter Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften des Verstärkers und der verwendeten Messkabel sowie der Septumhöhe h_{Septum} der TEM-Zelle im Frequenzbereich zu ermitteln:

$$U_{\text{Vorgabewert, AWG}}(f) = \frac{E_{\text{Zielsignal, TEM-Zelle}}(f) \cdot h_{\text{Septum}}}{S_{21, \text{Kabel 1}}(f) \cdot S_{21, \text{Verstärker}}(f) \cdot S_{21, \text{Kabel 2}}(f)} \quad (8)$$

Um den tatsächlich auftretenden Verlauf der elektrischen Feldstärke $E_{\text{Messwert, TEM-Zelle}}(t)$ in der TEM-Zelle mit dem angestrebten Zielsignal vergleichen zu können, erfolgt eine Messung des Magnetfeldes $H_{\text{Messwert, TEM-Zelle}}(t)$ mittels einer kalibrierten, geschirmten Loop-Antenne. Die Positionierung der Antenne in der TEM-Zelle ist in Bild 7 (rechts) zu sehen. Das elektrische Feld in der TEM-Zelle ist dabei mit dem Magnetfeld über den Freiraumwellenwiderstand $Z_0 = 377 \Omega$ verknüpft:

$$E_{\text{Messwert, TEM-Zelle}}(f) = Z_0 \cdot H_{\text{Messwert, TEM-Zelle}}(f) \quad (9)$$

Über die Gleichung

$$E_{\text{Messwert, TEM-Zelle}}(f) = \frac{U_{\text{Oszilloskop}}(f)}{S_{21, \text{Loop}}(f) \cdot S_{21, \text{Kabel 3}}(f) \cdot h_{\text{Septum}}} \quad (10)$$

lässt sich das tatsächlich auftretende elektrische Feld in der TEM-Zelle aus der mit dem Oszilloskop am Fußpunkt der Antenne gemessenen Spannung $u_{\text{Oszilloskop}}(t)$ berechnen.

4.2 Auswertung der Messungen

Bild 8 stellt das gemessene elektrische Feld in der TEM-Zelle im Vergleich zu dem angestrebten Signalverlauf dar. Auch in dieser Messumgebung reproduzieren die synthetisierten Transienten das Zielsignal mit sehr hoher Genauigkeit. Dieses Ergebnis validiert das in Abschnitt 2 vorgestellte Synthesekonzept auch für die Nachbildung von Impulsen, welche zuvor in realen EMV-Szenarien aufgezeichnet wurden.

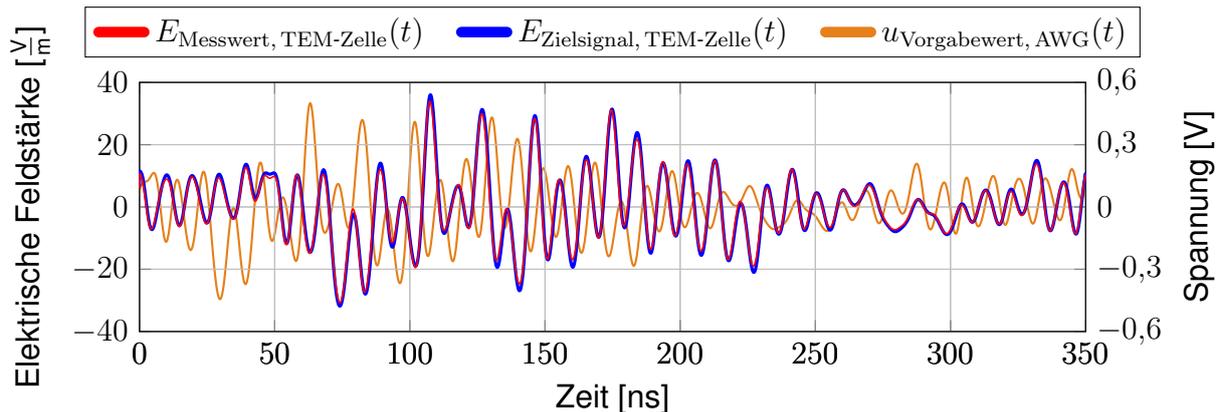


Bild 8: Elektrisches Feld in einer TEM-Zelle bei der Nachbildung eines realen Transienten

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Konzept zur Nachbildung von periodisch wiederkehrenden schnellen transienten Signalen unter Laborbedingungen wurde vorgestellt und durch Simulationen und Messungen an einem Hohlleiter validiert. In einer TEM-Zelle konnte der zeitliche Verlauf eines zuvor an einer elektrischen Bahnanlage gemessenen Transienten mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Hierdurch wurde die Eignung des Konzepts auch für die Synthese realer transienter Signale bestätigt. Zukünftige Untersuchungen beschäftigen sich mit einer Erweiterung des Synthesekonzepts, welche für die Synthese nicht-periodischer transienter Einzelimpulse erforderlich ist.

Literatur

- [1] Norm DIN EN 61000-4-4 . *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-4: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen schnelle transiente elektrische Störgrößen/Burst (IEC 61000-4-4:2012); Deutsche Fassung EN 61000-4-4:2012*
- [2] Norm DIN EN 61000-4-5 . *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen (IEC 61000-4-5:2014); Deutsche Fassung EN 61000-4-5:2014*
- [3] GEISE, R. ; KERFIN, O. ; NEUBAUER, B. ; ZIMMER, G. ; ENDERS, A.: EMC analysis including receiver characteristics – pantograph arcing and the instrument landing system. In: *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2015. – ISSN 2158–110X, S. 1213–1217