

# Messung und Dämpfung von sehr schnellen Transienten (VFT) in gasisolierten Schaltanlagen

## Measurement and damping of Very Fast Transient Overvoltages (VFT) in gas insulated switchgears

Simon Burow, Dr. Wolfgang Köhler, Prof. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Deutschland, simon.burow@ieh.uni-stuttgart.de  
Dr. Ueli Straumann, ABB Schweiz AG, Schweiz

### Kurzfassung

Während Schaltvorgängen von Trennschaltern in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) kommt es zu zahlreichen Vor- und Rückzündungen über dem sich öffnenden oder schließenden Schalterkontakt. Dadurch entstehen sehr steile Spannungsanstiege (very fast transient overvoltages – VFT), die sich als Wanderwellen in der GIS ausbreiten und überlagern. Zur Messung dieser hochfrequenten Spannungstransienten mit Amplituden von mehreren hundert Kilovolt wurden spezielle kapazitive Sensoren entwickelt. Die Untersuchung der Übertragungseigenschaften ergab eine Bandbreite von über 100 MHz. Die Entwicklung und Eigenschaften der Sensoren, die bei Versuchen zur Dämpfung von VFT eingesetzt werden, sind in diesem Beitrag beschrieben.

### Abstract

During disconnecter operations in a gas insulated switchgear (GIS) lot of re- and prestrikes can occur and cause very fast transient overvoltages (VFT), which propagate as travelling waves through the whole GIS and get reflected on each discontinuity of the line impedance. VFT can have very high frequency components and can reach amplitudes of several hundred kilovolts. For the measurement of these transient overvoltages special capacitive sensors with an analog bandwidth of over 100 MHz were developed. They are used for experiments to damp VFT. Construction and investigation of the sensor properties are described in this paper.

## 1 Einleitung

Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) sind bereits seit mehreren Jahrzehnten zuverlässige Komponenten elektrischer Übertragungsnetze. Durch den Einsatz von Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) als Isoliermedium ist der Platzbedarf bei GIS deutlich geringer als bei luftisolierten Schaltanlagen (AIS). Auch eine sehr hohe Zuverlässigkeit und ein geringer Wartungsaufwand zeichnen GIS aus, da durch die Kapselung aller spannungsführenden Teile Störungen durch äußere Einflüsse nahezu ausgeschlossen sind.

Sehr schnelle transiente Überspannungen (VFT) entstehen in GIS vor allem bei Trennerschaltungen, wenn bei geringem Abstand der Schaltkontakte zahlreiche Vor- bzw. Rückzündungen über der Schaltstrecke entstehen. Aber auch Isolationsfehler, die einen Überschlag zwischen spannungsführendem Innenleiter und geerdeter Kapselung zur Folge haben, können als Ursache für VFT in Betracht gezogen werden. Da Durchschläge in  $\text{SF}_6$  sehr schnelle Vorgänge sind, verursachen sie Wanderwellen mit sehr steilen Flanken, die sich in der GIS ausbreiten. Durch vielfache Reflexionen an Stellen, an denen sich die Leitungsimpedanz der GIS ändert, entstehen komplexe Wellenformen, die vom jeweiligen Design und Schaltzustand der Schaltanlage abhängig sind. Typischerweise besitzen

VFT Amplituden von bis zu dem Dreifachen der Nennspannung. Weitere Eigenschaften sind Anstiegszeiten im Bereich von wenigen Nanosekunden und Frequenzanteile von 100 kHz bis hin zu 100 MHz [1], [2].

Aufgrund ihrer Eigenschaften können diese transienten Überspannungen Isolationssysteme in der GIS und angrenzende Betriebsmittel schädigen. Ebenso sind Betriebsstörungen auf Grund von hochfrequenten Störsignalen durch VFT möglich. Bei Anlagen in Höchstspannungsnetzen mit Nennspannungen von 800 kV und mehr können die Amplituden von VFT die Nennstehblitzstoßspannung (LIWV) von GIS überschreiten. Für Isolationssysteme solcher GIS können die VFT-Amplituden zum limitierenden Designkriterium werden.

Im Rahmen von Studien zu unterschiedlichen Dämpfungsmöglichkeiten von VFT sind Sensoren und ein spezieller Messaufbau entwickelt worden, die es ermöglichen diese hochfrequenten transienten Überspannungen zu messen [3]. Mit Hilfe einer auf beiden Seiten mit Kupfer beschichteten Leiterplatte sind kapazitive Sensoren zum Einbau in Erderflansche einer 550 kV Anlage gefertigt worden. Ein speziell angepasster Burch-Abschluss am Ende der Messleitung sorgt für eine Kompensation der Kabelkapazität. In diesem Beitrag wird das entwickelte Messsystem sowohl theoretisch betrachtet, als auch des-

sen Aufbau, die Kalibrierung und die Eigenschaften vorgestellt.

## 2 Theoretische Grundlagen des Messsystems

Zur Messung von VFT ist eine breitbandige Messanordnung nötig. Da eine direkte Messung der Hochspannung mit Messinstrumenten nicht möglich ist, wird mit Hilfe eines Feldsensors der Verschiebungsstrom erfasst, der durch das elektrische Feld der VFT verursacht wird. Der Sensor besteht aus einer definierten Kapazität  $C_2$ . Über die Streukapazität  $C_1$  zwischen Sensor und spannungsführendem Innenleiter wird der Verschiebungsstrom in den Feldsensor eingekoppelt. Betrachtet man die Kapazität  $C_2$  des Sensors und die Streukapazität  $C_1$  als eine Reihenschaltung zweier Kapazitäten, kann die Anordnung auch als kapazitiver Spannungsteiler aufgefasst werden (**Bild 1**) [4]. Es ergibt sich eine in weiten Frequenzbereichen konstante Überübertragungsfunktion von

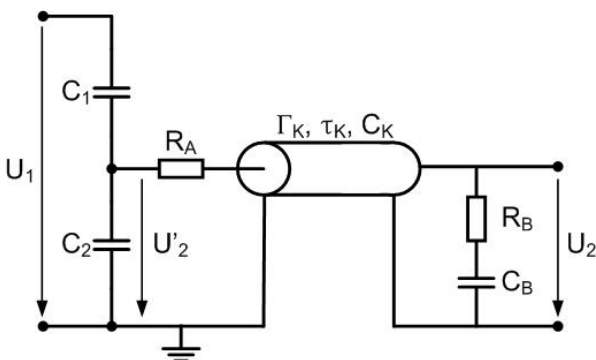
$$\frac{U'_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Bei der räumlichen Ausdehnung von GIS sind längere Messkabel notwendig um verschiedene Messstellen zu erreichen. Legt man 100 pF/m Kabelkapazität der Messleitungen zu Grunde, ist bereits bei einem wenige Meter langen Kabel dessen Kapazität  $C_K$  nicht mehr deutlich kleiner als  $C_2$ . Dies würde zu einem Überschwingen steiler Spannungssignale führen und kann nicht vernachlässigt werden. Mit Hilfe eines auf das Kabel abgestimmten Burch-Abschlusses (**Bild 1** rechts) kann das Überschwingen vermieden werden. Die Abgleichbedingungen sind [5]:

$$R_B = \Gamma_K$$

$$C_1 + C_2 = C_K + C_B$$

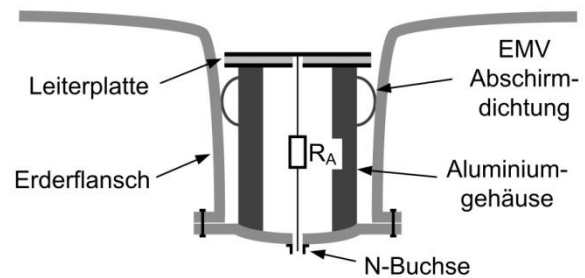
Durch den Abschlusswiderstand  $R_A$  werden Reflexionen auf dem Kabel vermieden. Er entspricht dem Wellenwiderstand  $\Gamma_K$  des Kabels.



**Bild 1:** Ersatzschaltbild des kapazitiven Sensors mit Messkabel und Burch-Abschluss

## 3 Aufbau des Messsystems

Eine beidseitig mit Kupfer beschichtete Leiterplatte bildet die Kapazität  $C_2$  des Sensors. Als Dielektrikum zwischen beiden Kupferschichten dient dabei eine mit Epoxidharz getränkte Glasfasermatte (FR 4). Um eine möglichst große Kapazität des Sensors zu erreichen, wurde ein möglichst geringer Abstand beider Kupferschichten angestrebt und eine lediglich 0,5 mm dicke Leiterplatte verwendet. Ein kreisförmiger Zuschnitt der Leiterplatte ermöglicht die Platzierung des Sensors in einem Erderflansch. Wie in **Bild 2** dargestellt, befindet sich dadurch der gesamte Sensor im Feldschatten des Flansches und ist vor direkten Überschlägen geschützt. Eine ausreichende Sensitivität für die elektrischen Felder der VFT ist dennoch gewährleistet.



**Bild 2:** Skizze des kapazitiven Sensors in einem Erderflansch mit Buchse Typ N, Abschlusswiderstand  $R_A$  und EMV-Abschirmdichtung

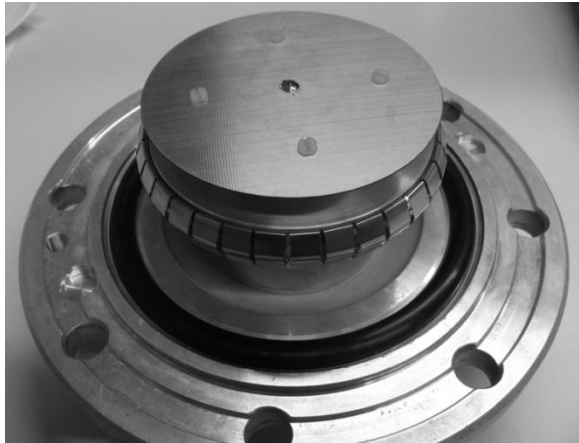
Die obere Schicht der Leiterplatte bildet die Streukapazität  $C_1$  zum Innenleiter der GIS. Während die Größe von  $C_1$  durch den Abstand zum Innenleiter und die geometrischen Verhältnisse in der GIS beeinflusst werden, wird die Kapazität  $C_2$  vor allem durch die Abmessungen der Leiterplatte und das Dielektrikum definiert. Da die Leiterplatte als kreisförmiger Plattenkondensator betrachtet werden kann, lässt sich die Kapazität mit

$$C = \epsilon_r * \epsilon_0 * \frac{A}{d}$$

berechnen. Dabei ist  $A$  die Fläche der Leiterplatte und  $d$  die Dicke des Dielektrikums. Für den entwickelten Sensor ergab die Berechnung der Kapazität  $C_2 = 668$  pF. Dieser Wert konnte auch durch eine Messung, bei der der Sensor nicht im Erderflansch eingebaut war, bestätigt werden. Durch Streukapazitäten zur GIS-Kapselung erhöhte sich  $C_2$  im eingebauten Zustand auf rund 735 pF.

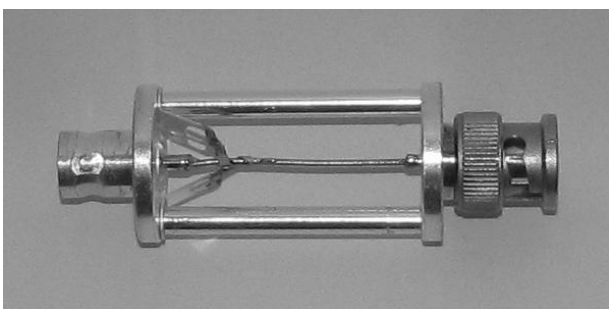
Die untere Schicht der Leiterplatte ist über ein massives Aluminiumgehäuse mit der geerdeten GIS-Kapselung verbunden. Um das Spannungssignal an der oberen Kupferschicht abgreifen zu können, wird ein Kupferleiter durch eine Bohrung in der Mitte der Platine isoliert hindurchgeführt und auf der Oberseite der Leiterplatte mit der Kupferschicht verlötet. Ein 50  $\Omega$  Widerstand in Reihe geschaltet bildet den Abschlusswiderstand  $R_A$ . Durch eine druckdichte Durchführung in der GIS-Kapselung wird das

Signal nach außen geführt und kann dort an einer Buchse vom Typ N abgegriffen werden. Um störende Hohlraumresonanzen im Spalt zwischen GIS-Kapselung und Sensorgehäuse zu vermeiden, ist direkt unterhalb der Leiterplatte eine flexible EMV-Abschirmdichtung am Sensorgehäuse angebracht. Dadurch ist der Spalt leitend überbrückt und kann nicht angeregt werden. **Bild 3** zeigt einen Sensor, der auf einem Deckel eines Erderflansches fixiert ist.



**Bild 3:** Kapazitiver Sensor mit Leiterplatte und EMV-Abschirmdichtung auf einem Deckel eines Erderflansches

Um Einkopplungen auf die Messleitungen zu minimieren wird ein doppelt geschirmtes Hochfrequenzkabel (RG 214) zur Anbindung des Sensors an ein Oszilloskop verwendet. Das Oszilloskop muss in einer Schirmkabine betrieben werden, um Funktionsstörungen zu vermeiden. Die Kapazität des Kabels wird durch einen Burch-Abschluss kompensiert. Dazu werden SMD-Bauteile entsprechend der Abgleichbedingung in ein BNC-Adaptergehäuse gelötet. Um die Abgleichbedingung möglichst exakt zu erfüllen, werden mehrere parallele Zweige mit jeweils einer baugleichen Kapazität und einem Widerstand in Reihe verwendet. **Bild 4** zeigt den Burch-Abschluss.



**Bild 4:** Symmetrischer Aufbau des Burch-Abschluss in einem geöffneten BNC-Adaptergehäuse

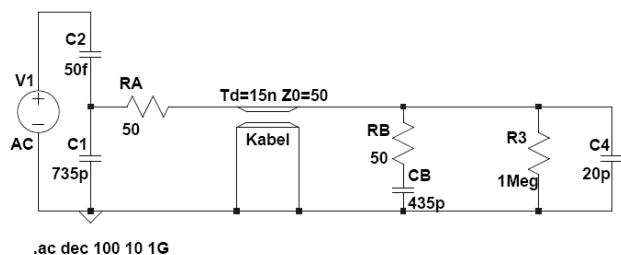
Ein möglichst symmetrischer Aufbau des Sensors und des Burch-Abschlusses soll eine niedrige Induktivität gewährleisten und die Empfindlichkeit gegen unerwünschte Einkopplungen reduzieren.

## 4 Eigenschaften und Kalibrierung des Messsystems

Die Eigenschaften des Messsystems wurden mit unterschiedlichen Methoden untersucht. Zum einen wurde der Frequenzgang des Übertragungsverhaltens simuliert und gemessen. Des Weiteren wird die Sprungantwort des Systems auf einen Niederspannungsimpuls mit knapp einer Nanosekunde Anstiegszeit betrachtet. Schließlich wurde die Übertragungsfunktion noch bei Blitzstoß- und Wechselspannung ermittelt. Dazu wurde der Sensor in eine 550 kV GIS eingebaut und mit verschiedenen Spannungsformen getestet. Während 50 Hz Wechselspannung und Blitzstoßspannung direkt über eine Hochspannungsdurchführung in die GIS eingespeist wurden, ist für die Frequenzgangmessung des Sensors und den schnellen Spannungsimpuls ein spezieller Aufbau verwendet worden. Die Kalibrierung des Sensors zur Messung von VFT wurde schließlich mit Blitzstoßspannung durchgeführt.

### 4.1 Simulierung der Übertragungseigenschaften

Mit Hilfe eines SPICE-Modells werden die Eigenschaften der Messanordnung aufgezeigt. **Bild 5** zeigt ein Modell, bestehend aus kapazitivem Teiler (links), Kabel mit Burch-Abschluss (Mitte) und Oszilloskop (rechts).

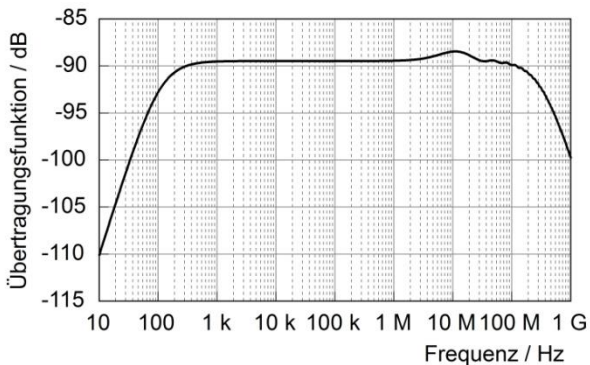


**Bild 5:** Spice Modell des Messsystems bestehend aus Spannungsteiler (links), Leitung und Burch-Abschluss (Mitte) und Oszilloskop (rechts)

Für die Kapazität  $C_2$  wird der gemessene Wert von 735 pF verwendet. Die Streukapazität  $C_1$  wird mit 50 fF abgeschätzt. Für das 3 m lange Messkabel wird eine Laufzeit von 15 ns und eine Kabelkapazität von  $C_K$  von 300 pF angenommen. Es wird mit dem SPICE-Modell „tline“ als verlustlose Leitung dargestellt. Kabelimpedanz und Abschlusswiderstände betragen jeweils 50  $\Omega$ . Nach der Abgleichbedingung des Burch-Abschluss muss die Kapazität  $C_B$  435 pF betragen. Der Oszilloskopeingang wird mit einem Widerstand von 1 M $\Omega$  und einer Kapazität von 20 pF abgebildet. Die Anregung der Schaltung erfolgt durch eine 50 Hz – Wechselspannung mit einer Amplitude von 1 V.

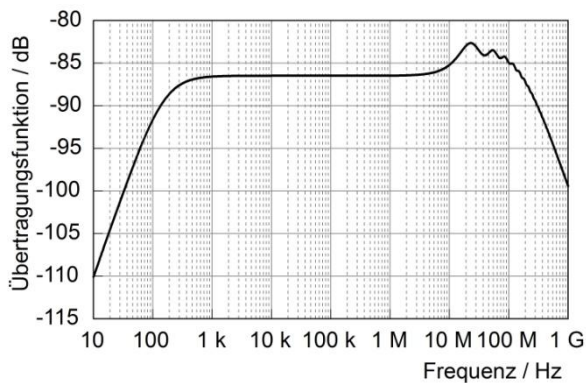
**Bild 6** zeigt die Übertragungsfunktion des Messsystems im Frequenzbereich von 10 Hz bis 500 MHz. Die simulierte untere und obere 3 dB Grenzfrequenz beträgt je etwa 100 Hz bzw. 300 MHz. In diesem Frequenzbereich besitzt diese Messanordnung eine relativ konstante Über-

tragungsfunktion, wodurch eine exakte Messung der VFT möglich ist. Die leichte Abweichung bei etwa 100 MHz ist auf die relativ kleine Kapazität  $C_2$  des Sensors im Verhältnis zur Kabelkapazität  $C_K$  zurückzuführen.



**Bild 6:** Simulierter Frequenzgang der Übertragungsfunktion mit Burch-Abschluss

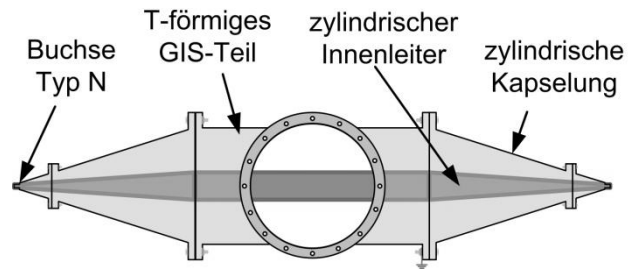
Der Einfluss des Burch-Abschlusses wird in **Bild 7** deutlich. Die Simulation der Übertragungsfunktion der Anordnung ohne Burch-Abschluss zeigt, dass bereits ab 10 MHz Resonanzen auftreten. Eine zuverlässige Messung im für VFT wäre daher nicht möglich.



**Bild 7:** Simulierter Frequenzgang der Übertragungsfunktion ohne Burch-Abschluss

## 4.2 Frequenzgangmessung mit Network-analyzer

Zur Messung des Frequenzgangs mit einem Network-analyzer wurde der Sensor in einen Erderflansch eines T-förmigen GIS-Stücks gebaut. Auf zwei Öffnungen des GIS-Stücks wurden zylinderförmige Abschlussteile montiert. Der gerade Innenleiter wird ebenfalls auf beiden Seiten mit zylindrischen Endstücken verjüngt um das Radienverhältnis von GIS-Kapselung und Innenleiter konstant zu halten. Dadurch werden Impedanzsprünge in der GIS minimiert. Auf beiden Seiten sind in den Zylinderspitzen jeweils Durchführungen angebracht, so dass der Innenleiter über N-Buchsen von außen kontaktiert werden kann (siehe **Bild 8**).

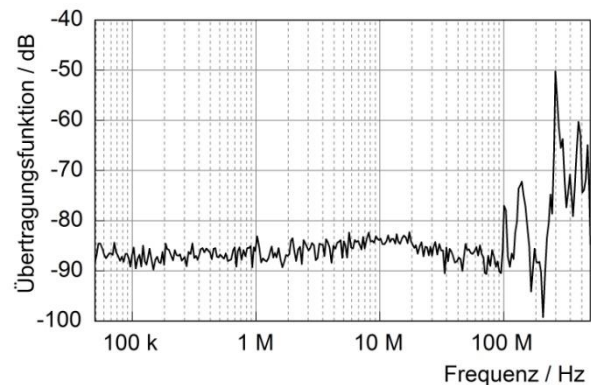


**Bild 8:** T-förmiges GIS-Stück mit zylindrischen Abschlüssen zur Sensorkalibrierung

Auf einer Seite des Aufbaus wurde ein Drehpotentiometer angeschlossen. Um die GIS reflexionsfrei abzuschließen wurde das Potentiometer an den Wellenwiderstand der GIS angepasst. Dazu wurde auf der gegenüberliegenden Seite ein Rechtecksimpuls eingespeist und das Signal gemessen. Durch Variation des Potentiometers kann der Abschlusswiderstand so eingestellt werden, dass auf der gegenüberliegenden Seite nahezu keine Reflexionen mehr erkennbar sind und Anpassung vorliegt.

Mit einem Network-analyzer wurde der Frequenzgang der Übertragungsfunktion gemessen. Dazu wurde ein Port des Network-analyzers direkt mit dem zylindrischen Abschlussstück der GIS verbunden. Am anderen Port wurde über einen aktiven Tastkopf das Signal am Ausgang des Sensors gemessen. Da der Burch-Abschluss hochohmig belastet werden muss, wurde ein aktiver Tastkopf verwendet, um das Signal des Sensors zu messen.

Während der Kalibrierung wurde der aktive Tastkopf innerhalb der GIS direkt mit dem Innenleiter verbunden. Somit werden Einflüsse der Messleitungen und der GIS auf die Übertragungsfunktion des Sensors minimiert. **Bild 9** zeigt den Frequenzgang von 50 kHz bis 500 MHz der Übertragungsfunktion des kompletten Messsystem bestehend aus Sensor, ca. 3 m Messkabel und Burch-Abschluss.



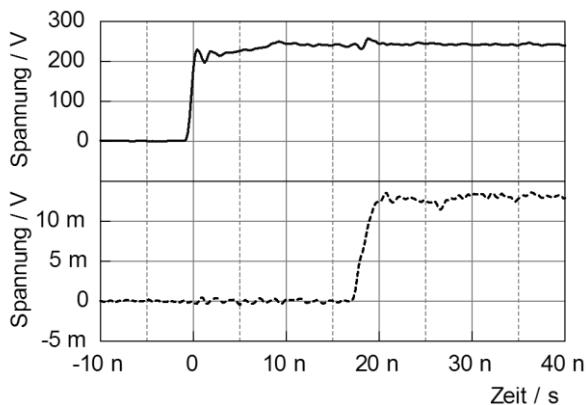
**Bild 9:** Frequenzgang der Übertragungsfunktion des Sensors incl. ca. 6 m Kabel und Burch-Abschluss

Die Messung der Übertragungsfunktion bestätigt das Ergebnis der Simulation. Im für die Messung von VFT relevanten Frequenzbereich von 100 kHz bis hin zu 100 MHz weist der Frequenzgang ein überaus flaches Verhalten auf. Die Übertragungsfunktion in diesem Bereich ist rela-

tiv konstant und das Messsystem zur Messung von VFT gut geeignet. Oberhalb von etwa 100 MHz treten deutliche Resonanzen im Frequenzgang auf, die eine zuverlässige Messung von höheren Frequenzanteilen verhindern. Höhere Moden, die sich in der GIS ausbreiten können, sowie Reflexionen innerhalb der GIS können als Ursachen dafür heran gezogen werden.

### 4.3 Sprungantwort des Messsystems

Zur Messung der Sprungantwort wurde die in Bild 8 dargestellte Versuchsanordnung, die auf einer Seite mit Hilfe des Drehpotentiometers passend abgeschlossen war, verwendet. Am nicht abgeschlossenen Ende wurde mit Hilfe eines Signalgenerators ein Spannungsimpuls eingespeist, der eine Anstiegszeit von knapp einer Nanosekunde und eine Amplitude von rund 240 V hat. Der Sensor ist über ein etwa 6 m langes Kabel und den oben beschriebenen Burch-Abschluss an ein Oszilloskop angeschlossen. Dabei war die Eingangsimpedanz des Oszilloskops hochohmig eingestellt und die analoge Bandbreite auf 1 GHz begrenzt. In Bild 10 ist der Spannungsimpuls des Impulsgenerators (oben) und die Sprungantwort des Messsystems (unten) dargestellt. Die Übertragungsfunktion von gemessener Spannung zur angelegten Spannung beträgt etwa 1:18000 oder rund -85 dB. Auf Grund der Kabellänge wird die Sprungantwort etwa 20 ns verzögert gemessen.



**Bild 10:** Spannungsimpuls des Impulsgenerators (oben); Sprungantwort des Messsystems (unten)

Die Anstiegszeit  $T_A$  des gemessenen Signals beträgt 2,2 ns. Sie ist die geometrische Summe aus der Anstiegszeit des Eingangssignals  $T_{AE}$  und des Messsystems  $T_{AM}$ . Nimmt man für  $T_{AE} = 1$  ns an, erhält man für  $T_{AM}$  rund 1,95 ns. Für die 3 dB-Bandbreite  $B$  ergibt sich mit

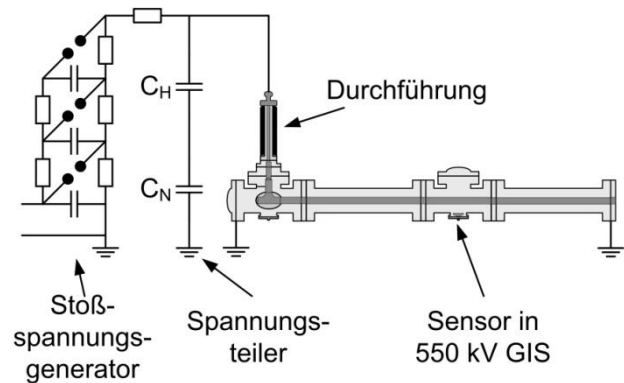
$$B = \frac{0,35}{T_{AM}}$$

für das vorliegende Messsystem ein Wert von rund 180 MHz. Untersuchungen, bei denen das Messsignal direkt am Sensor mit einem Tastkopf abgegriffen und auf das lange Messkabel sowie den Burch-Abschluss verzichtet wurde, ergaben eine deutlich kürze Anstiegszeit. Die

Bandbreite des kompletten Messsystems wird also auch durch das Messkabel und den Burch-Abschluss reduziert.

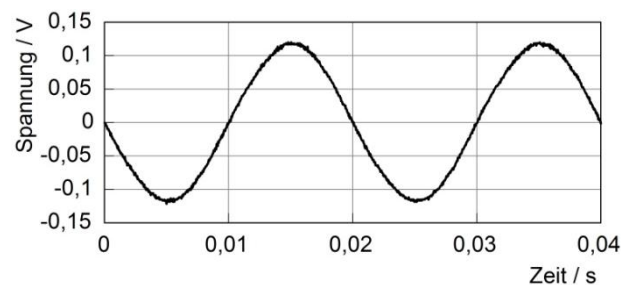
### 4.4 Kalibrierung mit Wechsel- und Blitzstoßspannung

In Bild 11 ist der Aufbau zur Kalibrierung mit Stoßspannung dargestellt. Mit Hilfe eines Stoßspannungsgenerators werden normgerechte Blitzstoßspannungen erzeugt und über eine Hochspannungsdurchführung in die GIS eingespeist. Aus der mit einem externen Spannungsteiler gemessenen Spannung außerhalb der GIS und dem am Sensor gemessenen Signal kann die Übertragungsfunktion des Sensors gewonnen werden. Mehrere Vergleichsmessungen wurden durchgeführt und ergaben ein Teilverhältnis von rund 1:17500 oder knapp -85 dB. Dieser Faktor stimmt mit der Übertragungsfunktion im relevanten Teil des gemessenen und simulierten Frequenzgangs (von 100 kHz bis 100 MHz) recht gut überein. Um die in der GIS anliegende Spannung zu erhalten, muss das Sensorsignal mit diesem Faktor dividiert werden.



**Bild 11:** Aufbau zur Kalibrierung der Sensoren in der GIS mit Stoßspannungsgenerator und Spannungsteiler

Da der simulierte Frequenzgang der Übertragungsfunktion bei 50 Hz bereits eine Abweichung von rund 7 dB aufweist, wurden die Eigenschaften des Messsystems bei 50 Hz zusätzlich überprüft. Dazu wurde der in Bild 11 gezeigte Versuchsaufbau verwendet. Über die Durchführung des Aufbaus wurde 50 Hz Wechselspannung mit einer Amplitude von rund 4,25 kV eingespeist. Das am Sensor gemessene Ausgangssignal ist in Bild 12 dargestellt und hat eine Amplitude von 0,12 V.

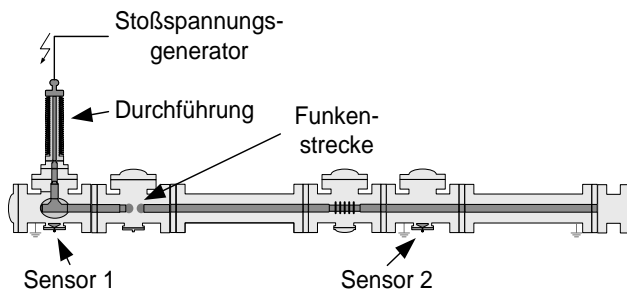


**Bild 12:** Ausgangssignal am Sensor bei 50 Hz Wechselspannungsmessung

Die Übertragungsfunktion bei Wechselspannung ergibt sich somit zu 1:35500 oder -91 dB und weicht um 6 dB von der Übertragungsfunktion bei Stoßspannung ab. Bei Messungen in diesem Frequenzbereich muss ggf. eine Phasenverschiebung berücksichtigt werden.

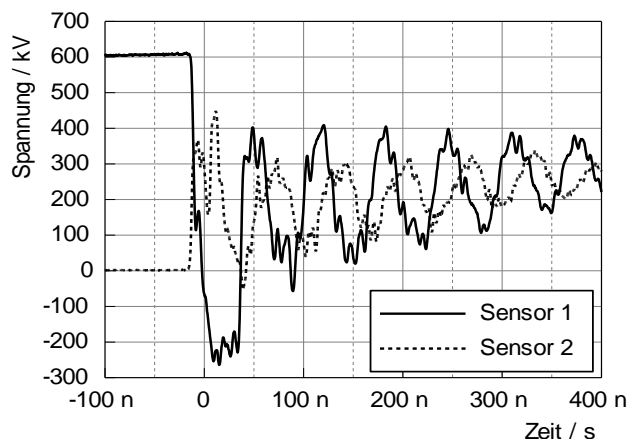
## 5 VFT Messung und Dämpfung

Der Versuchsaufbau, in dem verschiedene Dämpfungsmöglichkeiten von VFT untersucht werden, ist in **Bild 13** dargestellt. Über eine Hochspannungsdurchführung wird Blitzstoßspannung in die GIS eingeführt. Dadurch wird an einer Funkenstrecke in SF<sub>6</sub> ein Überschlag erzeugt, der zu VFT führt.



**Bild 13:** Versuchsaufbau zur Untersuchung verschiedener VFT-Dämpfungsmöglichkeiten

Mit zwei der oben beschriebenen Sensoren wird die Spannung an unterschiedlichen Orten gemessen. Dabei wird durch den Sensor 1 die Spannung vor der Funkenstrecke und mit dem Sensor 2 die Spannung nach der Funkenstrecke aufgezeichnet. **Bild 14** zeigt die gemessenen VFT beider Sensoren.



**Bild 14:** VFT-Beispielmessung mit zwei Sensoren an unterschiedlichen Orten

In diesem Versuchsaufbau wurden die Dämpfungseigenschaften unter anderem von Ringen aus Ferrit- und nanokristallinen Materialien sowie von Hohlraumresonatoren untersucht. Während Ferritringe durch die hohen Ströme in Sättigung geraten und dadurch ihre Dämpfungseigenschaften nahezu verlieren, kann mit den beiden anderen Optionen eine VFT-Dämpfung erzielt werden. Als eine sehr effektive Möglichkeit stellte sich der Einsatz von nanokristallinen Ringen heraus. Bereits mit einigen dieser

Ringe, die um den Innenleiter angeordnet werden, können VFT um etwa 5 bis 10 % gedämpft werden [3].

## 6 Zusammenfassung

Zur Messung von VFT in gasisolierten Schaltanlagen ist ein Messsystem entwickelt worden, mit dessen Hilfe transiente Hochspannungen bis zu einer Grenzfrequenz von mehr als 100 MHz gemessen werden können. Die aus einer beidseitig beschichteten Leiterplatte bestehenden Sensoren sind im Erderflansch angeordnet und bilden mit der Streukapazität zum Innenleiter der GIS einen kapazitiven Spannungsteiler. Das Ausgangssignal wird über ein Messkabel mit passendem Burch-Abschluss zu einem Oszilloskop übertragen.

Der Frequenzgang der Übertragungsfunktion des Teilers wurde mit LTSpice simuliert und konnte durch eine Messung mit einem Networkanalyzer bestätigt werden. Im für die zur Messung von VFT relevanten Frequenzbereichen weißt das Übertragungssystem ein sehr konstantes Übertragungsverhalten auf. Die 3 dB-Grenzfrequenzen der Simulation liegen bei 100 Hz bzw. 300 MHz.

Die Sprungantwort des Messsystems auf einen Spannungsimpuls mit weniger als einer Nanosekunde Anstiegszeit zeigt, dass Spannungen mit Frequenzanteilen von bis zu 180 MHz gemessen werden können.

Das Übertragungsverhältnis eines Nenn-Blitzstoßes beträgt etwa 1:17500 und stimmt damit mit der gemessenen und simulierten Übertragungsfunktion im Frequenzbereich von 100 Hz bis 300 MHz überein. Bei 50 Hz ist die untere 3 dB-Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion bereits unterschritten. Für eine netzfrequente Wechselspannung muss daher ein Übertragungsverhältnis von 1:35500 angewandt werden.

Anhand eines GIS-Versuchsaufbaus, in dem unterschiedliche Methoden zur Dämpfung von VFT untersucht werden, wird beispielhaft das Messergebnis vorgestellt. An zwei unterschiedlichen Stellen sind baugleiche Sensoren eingebaut und messen den Verlauf der VFT zuverlässig.

## 7 Literatur

- [1] CIGRÉ Brochure 456 Working Group A3.22: Background of Technical Specifications for Substation Equipment Exceeding 800 kV AC, April 2011
- [2] CIGRÉ Brochure 362 Working Group A3.22: Technical Requirements for Substations Equipment Exceeding 800 kV - Field experience and technical specifications of Substation equipment up to 1200 kV", December 2008
- [3] Burow, S.; Riechert, U.; Köhler, W.; Tenbohlen S.: New mitigation methods for transient overvoltages in gas insulated substations. Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2012
- [4] Kühler, A.: Hochspannungstechnik. 2. Aufl., Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2005
- [5] Schon, K.: Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2010