

# Teilentladungsortung in gasisolierten Schaltanlagen im Frequenzbereich

Stefan M. Hoek, Universität Stuttgart - Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Deutschland

Uwe Riechert, ABB Schweiz AG, Gasisolierte Schaltsysteme, Zürich, Schweiz

Thomas Strehl, LEMKE DIAGNOSTICS GmbH in Volkersdorf/Dresden, Deutschland

Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart – IEH, Deutschland

Kurt Feser, Universität Stuttgart – IEH, Deutschland

## Kurzfassung

Eine neue Methode ermöglicht die kostengünstige Ortung von Teilentladungen (TE) in gasisolierten Schaltanlagen (GIS). Dabei verwendet man das Interferenzphänomen von zwei überlagerten Sensor-Signalen. Die Interferenz resultiert aus den Laufzeitunterschieden zweier Signale und äußert sich in äquidistanten Minima im Frequenzspektrum, die Hinweise auf die Zeitdifferenz geben. Mit Hilfe dieser Zeitdifferenz und der bekannten Sensorpositionen ist eine Lokalisation der TE-Quelle in der GIS möglich. Um eine Ortung im Frequenzbereich durchführen zu können, sind zwei ähnliche Sensor-Signale notwendig. Außerdem ist, aufgrund von Dispersions-effekten, hervorgerufen durch höhere Moden, nur ein bestimmter Frequenzbereich für diese Methode nutzbar.

## 1 Einführung

Durch die Liberalisierung des Energiemarktes ist es für die Verbundunternehmen sehr wichtig, Kosten in allen Bereichen zu optimieren. Eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie stellt eine Möglichkeit dar, die Betriebskosten zu reduzieren. Durch eine empfindliche TE Messung und eine schnelle und exakte Ortung der TE-Quellen können potentielle Fehlstellen frühzeitig erkannt werden. Die Art der Fehlstelle lässt sich anhand verschiedener bekannter Methoden aus phasenaufgelösten TE-Mustern ermitteln. Für die Bewertung des Risikos für den Betrieb ist die genaue Kenntnis des Ortes der Fehlstelle notwendig.

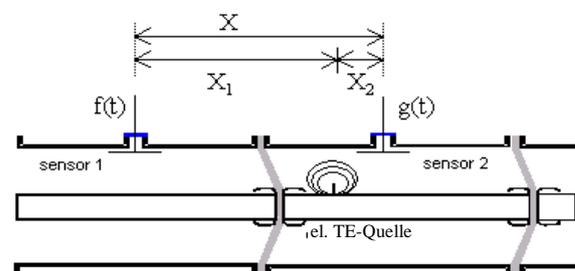
## 2 Ortung von TE

Bei der Ortung von TE in GIS können verschiedene Methoden, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen, verwendet werden. Methoden die auf unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten verschiedener Ausbreitungsmoden [1] oder auf der Richtcharakteristik von Sensoren beruhen [2], haben sich als wenig praxistauglich herausgestellt [3]. In der Praxis angewendete Methoden zur Ortung von TE sind das Zu- und Abschalten verschiedener Schaltanlage-teile (Sectionizing), die Laufzeitmessung elektromagnetischer Wellen, die akustische Messung (Laufzeit bzw. Amplitude) oder eine Kombination der genannten Verfahren. Eine neue, in diesem Beitrag vorgestellte Methode beruht auf der Messung von Interferenzen im Frequenzbereich. Messungen im Frequenzbereich haben den Vorteil, dass sie im Vergleich

zu Messungen im Zeitbereich mit deutlich geringeren Hardwarekosten realisierbar sind.

### 2.1 Ortung durch Messung von Laufzeitdifferenzen (Time-of-Flight)

Der durch eine TE-Quelle erzeugte, sehr schnelle elektrische Impuls, mit einer Anstiegszeit unter 1 ns, breitet sich als elektromagnetische Welle in alle Richtungen innerhalb der GIS aus. Eine einfache und sichere Ortung ist im Zeitbereich möglich. Mit Hilfe der Zeitdifferenz zwischen den Signalen zweier Sensoren und der geometrischen Position der Sensoren kann eine Aussage über den Ort der TE-Quelle getroffen werden (Gleichung 1). Die Zeitdifferenz liegt in der Regel in der Größenordnung von einigen 10 ns. Somit muss ein Oszilloskop mit einer hohen Abstrakte verwendet werden [3].



**Bild 1: Prinzipdarstellung der Time-of-Flight Methode**

Der Abstand zwischen TE-Sensor und TE-Quelle  $X_1$ , (siehe **Bild 1**) kann mittels Gleichung 1 ermittelt werden, vorausgesetzt die Zeitdifferenz ( $\Delta t$ ) zwischen

den beiden an den Sensoren gemessenen Signalen  $f(t)$  und  $g(t)$  ist bekannt.  $X$  ist dabei der Abstand der beiden Sensoren und  $c_0$  ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle innerhalb der GIS ( $c_0 = 0.3\text{m/ns}$ ) [3].

$$X_1 = \frac{X - (X_2 - X_1)}{2} = \frac{X - c_0 \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

Die Zeitdifferenz  $\Delta t$  wird über die Differenz der Startpunkte der beiden Signale bestimmt. Die Bestimmung des Startzeitpunktes ist nicht immer eindeutig möglich. Vor allem ein kleiner Signal zu Rauschabstand oder eine unterschiedliche Steilheit der beiden Signalflanken führt zu einer Unsicherheit bei der exakten Bestimmung des Ortes der TE-Quelle.

## 2.2 Ortung durch Interferenzmessung

Auch im Frequenzbereich ist eine Ortung von TE möglich. Das dabei genutzte Interferenzphänomen von zwei überlagerten Sensorsignalen gibt über die Laufzeitdifferenz der Signale Auskunft. Für die Ortung im Frequenzbereich ist nur ein Spektrumanalyseur notwendig, der standardmäßig für die Messung von TE im UHF Bereich angewendet wird. Auf das zusätzliche, für die Time-of-Flight Methode notwendige digitale Oszilloskop kann verzichtet werden. Die theoretische Grundlage für die Ortung im Frequenzbereich ist der Verschiebungssatz nach Fourier:

$$FFT[f(t - \Delta t)] = FFT[f(t)] \cdot e^{-j\omega\Delta t} \quad (2)$$

### 2.2.1 Messprozedur

Um eine Ortung im Frequenzbereich zu ermöglichen, sind mehrere Messungen notwendig. Dabei werden drei Leistungsspektren aufgenommen und miteinander verglichen. Das Leistungsspektrum ist der Absolutwert der komplexen FFT und kann mit einem konventionellen Spektrumanalyseur gemessen werden. Die Spektren der Signale von Sensor 1  $F(\omega)$  und Sensor 2  $G(\omega)$  werden zunächst einzeln gemessen. In einem weiteren Schritt wird das Spektrum des überlagerten Sensorsignale 1 und 2  $H(\omega)$  gemessen. Diese Signale von Sensor 1 und Sensor 2 werden dann mittels eines Power-Combiner addiert, um störende Reflexionen zu vermeiden.

$$F(\omega) = |FFT[f(t)]| \quad (3)$$

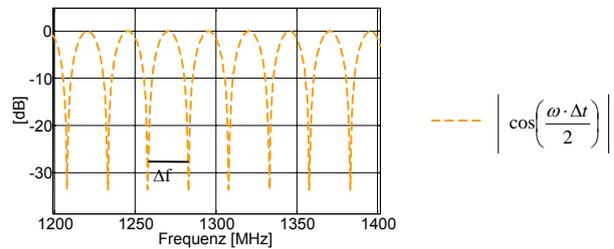
$$G(\omega) = |FFT[g(t)]| \quad (4)$$

$$H(\omega) = |FFT[g(t) + f(t - \Delta t)]| \quad (5)$$

Diese drei Messungen werden entsprechend Gleichung 6 kombiniert. Die Interferenz wird dann im Ergebnis als Kosinusfunktion sichtbar. In Gleichung 6 wurde vereinfacht angenommen, dass die Eingangsfunktionen  $f(t)$  und  $g(t)$  gleich sind. Bis zu einem bestimmten Grad ist aber auch bei ungleichen Eingangsfunktionen eine Auswertung möglich.

$$\frac{H(\omega)}{F(\omega) + G(\omega)} = \left| \cos\left(\frac{\omega \cdot \Delta t}{2}\right) \right| \quad (6)$$

Die für die Ortung wichtige Zeitdifferenz  $\Delta t$  kann aus der resultierenden Kosinusfunktion bestimmt werden. Die äquidistanten Minima der Kosinusfunktion sind durch die Interferenz bedingt. Der Abstand  $\Delta f$  dieser Minima kann durch Gleichung 7 in die Zeitdifferenz  $\Delta t$  umgerechnet werden.



**Bild 2: Resultierende Kosinusbetragsfunktion**

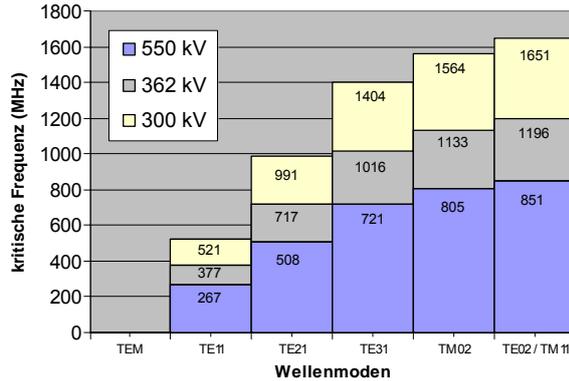
$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} \quad (7)$$

### 2.2.2. Messvoraussetzungen

Eine wesentliche Voraussetzung für eine Messung mit einem konventionellen Spektrumanalyseur sind ausreichend häufig wiederkehrende Signale. Zudem sind, wie erwähnt, sind zwei ähnliche Eingangssignale zur Bestimmung der Zeitdifferenz notwendig. Dies ist bei Messungen an einer realen GIS Anordnung oft nicht der Fall. Untersuchungen haben gezeigt, dass Signalaare, die sich nur durch die Amplitude unterscheiden bis zu gewissen Grenzen auswertbar sind. Bei unterschiedlichen Signalamplituden verringert sich die Ausprägung der Minima [4]. Schwieriger wird die Auswertung, wenn der Charakter der beiden Eingangssignale unterschiedlich ist. Daher müssen die Signalveränderungen durch Dispersion so klein wie möglich gehalten werden.

Für die Dispersion der Signale in der GIS ist hauptsächlich die Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der höheren Moden verantwortlich. Drei verschiedene Wellentypen sind in einer GIS ausbreitungsfähig. Der TM-Mode ( $H_z=0$ , wobei  $z$  die Ausbreitungsrichtung ist), der TE-Mode ( $E_z=0$ ) und

der TEM-Mode ( $E_z=0, H_z=0$ ). Jeder dieser Moden, außer dem TEM-Mode, besitzt eine kritische Frequenz, ab der der Mode in einer Anordnung ausbreitungsfähig ist. Der TEM-Mode besitzt keine kritische Frequenz und kann sich schon bei Frequenzen ab 0 Hz ausbreiten. Die kritische Frequenz  $f_c$  hängt von der Geometrie z.B. von dem Innendurchmesser des Außenleiters und dem Außendurchmesser des Innenleiters ab. Mit größeren Durchmessern (z.B. 550 kV GIS) verkleinern sich die kritischen Frequenzen der einzelnen Moden. In **Bild 3** sind die ersten Wellenmoden für GIS unterschiedlicher Spannungsebenen angegeben [5].



**Bild 3:** Cut-Off-Frequenzen ( $f_c$ ) in einer 300 kV, 362 kV und 550 kV GIS

Die Gruppengeschwindigkeit ( $v_g$ ) von den TE/TM-Wellen ist frequenzabhängig und führt damit zur Dispersion des Signals. Die Geschwindigkeit der höheren Moden lässt sich mit der jeweiligen kritischen Frequenz ( $f_c$ ) über Gleichung 8 berechnen [6].

$$v_g(f) = c_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{f_c}{f}} \quad (8)$$

Unterhalb der untersten kritischen Frequenz aller Moden (in der GIS ist dies der  $TE_{11}$ -Mode) ist also nur der TEM-Mode ausbreitungsfähig. In diesem Bereich ist die Dispersion gering und somit können in diesem Bereich die Interferenzen besser ermittelt werden. Um in diesem Frequenzbereich empfindlich zu messen, ist ein Tiefpassfilter notwendig (**Bild 4**).

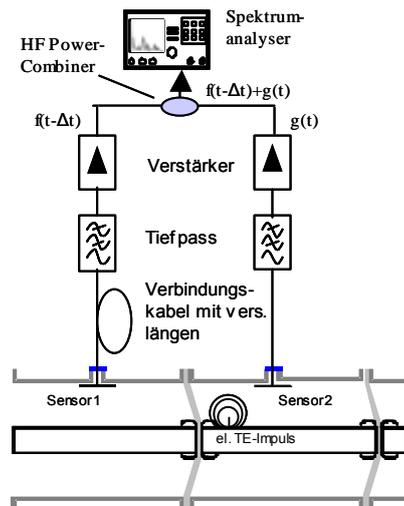
### 2.2.3 Auswertung der Messergebnisse

Zur Bestimmung des Frequenzabstandes  $\Delta f$  zwischen den einzelnen Minima müssen die Messungen, wie oben beschrieben, kombiniert werden. Handelt es sich um eine starke TE-Quelle und ist der Aufbau einfach bzw. sind wenig Reflexionsstellen vorhanden, sind die Minima über einen breiten Frequenzbereich gut zu erkennen und damit die Bestimmung des Frequenzabstandes relativ einfach möglich.

Die Genauigkeit der Auswertung kann durch die Bestimmung des Durchschnittswertes über mehrere Mi-

nima erhöht werden. Neben den Minima muss dabei auch der interessierende Frequenzbereich manuell bestimmt werden.

Eine objektivere Möglichkeit der Auswertung bietet die Nutzung der Kovarianz zwischen Messung und theoretischem Kosinus. Dabei wird die theoretische Betragskosinusfunktion mit unterschiedlichen Frequenzabständen  $\Delta f$  mathematisch erzeugt und jeweils mit der gemessenen kombinierten Funktion verglichen. Der Frequenzabstand  $\Delta f$  mit der besten Übereinstimmung liefert das Ergebnis. Im Gegensatz zum ersten Verfahren müssen die Minima nicht mehr manuell ermittelt werden. Nur der Frequenzbereich muss angegeben werden.



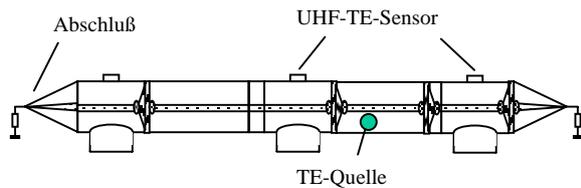
**Bild 4:** Messaufbau

Die Auswertung mit Hilfe der Wavelet-Transformation bietet den Vorteil, dass weder der Frequenzbereich noch die Position der Minima bestimmt werden muss. Die Wavelet-Transformation liefert die Intensität der einzelnen Interferenzanteile ( $\Delta f$ ) im gesamten Frequenzbereich. Um eine hohe Empfindlichkeit für die Interferenzen zu erreichen, wird aus der theoretischen Kosinusfunktion (**Bild 2**) die Mutterwavelet (Waveletfamilij) gebildet. Die gesuchte Interferenz ( $\Delta f$ ) ist im 3D-Diagramm als waagrechte Linie (konst.  $\Delta f$  über der Frequenz) mit starker Intensität ersichtlich (z.B. **Bild 7**).

### 2.2.4 Messungen an verschiedenen GIS

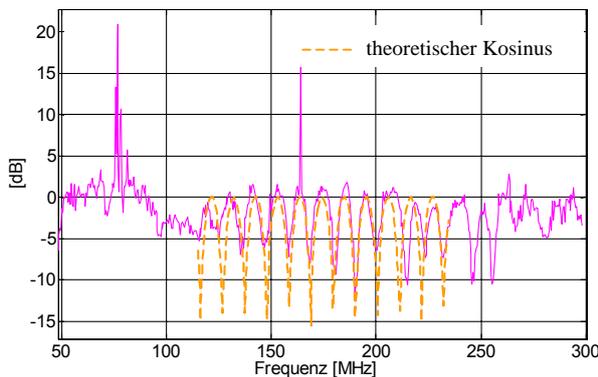
#### 2.2.4.1 550 kV GIS

Das Verfahren der Ortung von TE-Signalen im Frequenzbereich wurde an verschiedenen Testaufbauten experimentell überprüft, z.B. an einem 9 m langen 550 kV GIS Abschnitt mit verschiedenen Konfigurationen (Leitung z.T. mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen) (**Bild 5**). Als Sensoren wurden typische UHF-Sensoren verwendet.



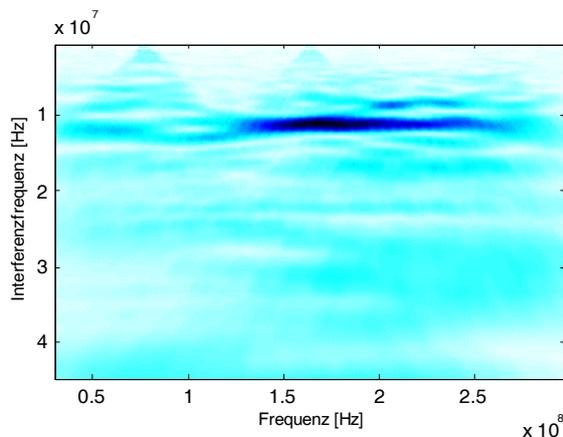
**Bild 5: 550 kV GIS mit TE-Quelle und UHF-Sensoren**

Die Verbindungskabel zwischen Messgerät und den Sensoren waren unterschiedlich lang (Bild 4). Als TE-Quelle wurde ein Pulsgenerator mit einer Amplitude von  $q \sim 50$  pC (IEC60270) eingesetzt.



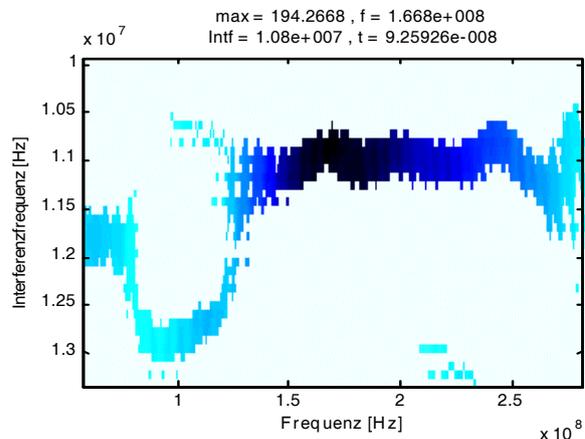
**Bild 6: Die berechnete Kombination der drei Leistungsspektren in einer 550 kV GIS**

Die Zeitdifferenz ist mit einer separaten Messung im Zeitbereich zu  $\Delta t = 95,6$  ns bestimmt worden. Das kombinierte Signal aus der Messung im Frequenzbereich ist in **Bild 6** zu dargestellt und weist im Frequenzbereich zwischen 120 MHz und 240 MHz deutlich sichtbare Interferenzen auf. Die beste Übereinstimmung (Kovarianz) mit der theoretischen Kosinusfunktion erhält man bei einem Frequenzabstand  $\Delta f = 10,54$  MHz. Dies ergibt bei Nutzung von Gleichung 8 eine Zeitdifferenz  $\Delta t$  von 94,9 ns.



**Bild 7: Wavelet-Transformation der Messung in einer 550 kV GIS (Bild 6)**

Diese Zeitdifferenz wird auch durch die Auswertung mit Hilfe der Wavelet-Transformation (Bild 7) bestätigt. In der Detailansicht (**Bild 8**) wurde durch einen Schwellwert die Bereiche mit geringer Intensität ausgeblendet um das Maximum hervorzuheben. Die maximale Intensität ergibt sich bei der Interferenzfrequenz  $\Delta f = 10,8$  MHz ( $\Delta t = 92,6$  ns) ermittelt.

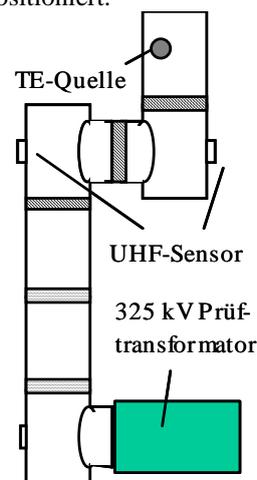


**Bild 8: Detailansicht der Wavelet-Transformation aus Bild 7 mit Bestimmung des Maximums**

Für diesen Versuchsaufbau ist die Interferenz in der Detailansicht in Bild 8 eindeutig erkennbar. Auch über die kombinierte Messung ist  $\Delta f$  genau bestimmbar.

#### 2.2.4.2 362 kV GIS

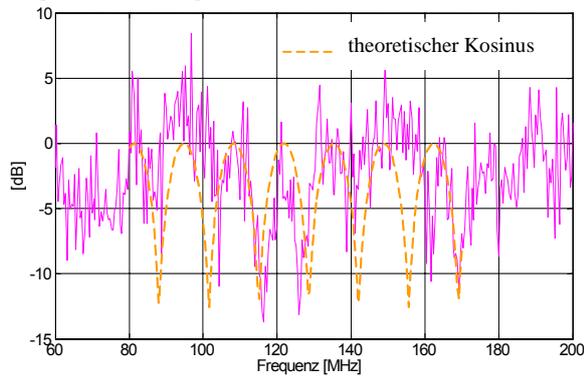
Messungen an einem 3 m langen 362 kV GIS Abschnitt zeigen, dass auch an komplexeren Anordnungen Interferenzen ausgewertet werden können (**Bild 9**). Auch in diesem Versuchsaufbau wurden typische UHF-Sensoren verwendet. Als TE-Quelle wurde eine Spitze auf dem Außenleiter mit einer Entladung von ca. 150 pC positioniert.



**Bild 9: 362 kV GIS mit TE-Quelle**

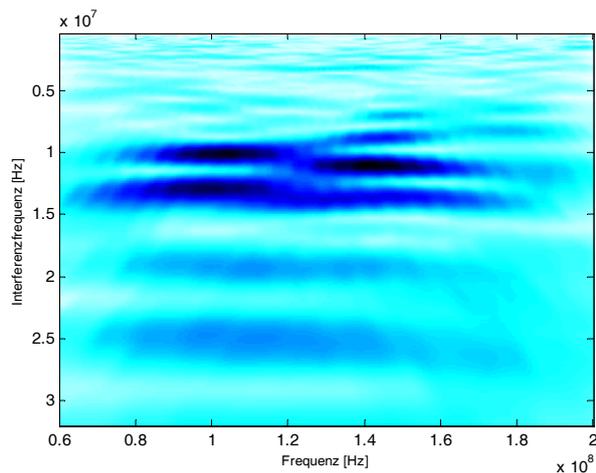
Die beste Übereinstimmung der Messergebnisse mit der theoretischen Kosinusfunktion (**Bild 10**) ergibt

sich bei einem Frequenzabstand  $\Delta f = 14,1$  MHz. Nach Gleichung 7 ist somit  $\Delta t = 70,7$  ns. Die Messung im Zeitbereich ergab mit einem Wert von  $\Delta t = 73,5$  ns ein vergleichbares Ergebnis.

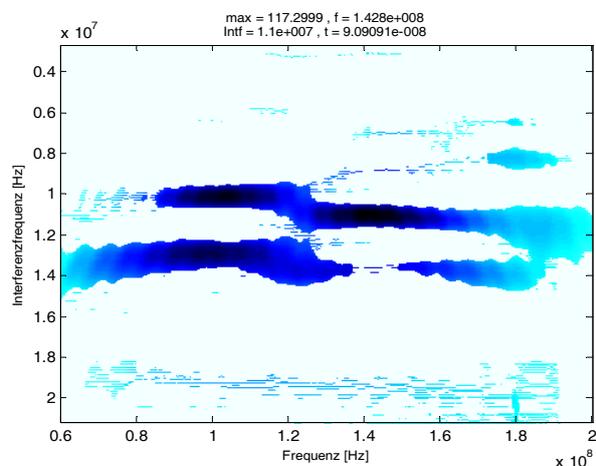


**Bild 10: Die berechnete Kombination der Leistungsspektren, gemessen an einer 362 kV GIS**

Die Auswertung mit der Wavelet-Transformation zeigt (Bild 11), dass verschiedene Frequenzabstände  $\Delta f$  vorhanden sind, die auf Reflexionen zurückzuführen sind.



**Bild 11: Wavelet-Transformation der Messung an einer 362 kV GIS aus Bild 10**

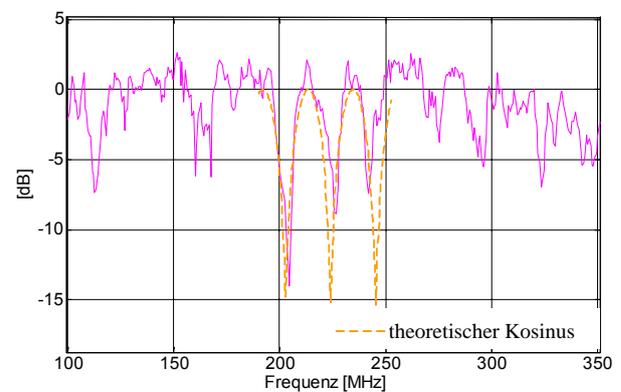


**Bild 12: Detailansicht der Wavelet-Transformation aus Bild 11 mit Bestimmung des Maximums**

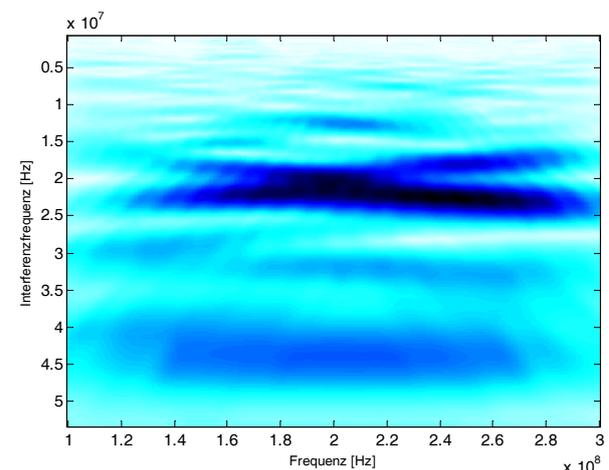
Durch Auswertung in einem geeigneten Frequenzbereich und durch die Bestimmung der maximalen Intensität lässt sich der gesuchte Frequenzabstand  $\Delta f$  ermitteln. Im optimalen Frequenzbereich bis 200 MHz, entsprechend Bild 12 ergibt sich eine Interferenzfrequenz von ca.  $\Delta f = 13,5$  MHz ( $\Delta t = 74,1$  ns). Das absolute Maximum zeigt in diesem Beispiel eine Reflexion.

### 2.2.4.3 300 kV GIS

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf komplexe Anordnungen wurde an einem kompletten 300 kV GIS Feld überprüft (Bild 13). Zwei UHF Sensoren wurden an der Sammelschiene und am Abgang montiert. Der Abstand der Sensoren entspricht dem typischen Abstand in GIS Anlagen. Als TE-Quelle wurde ein Pulsgenerator mit einer Antenne eingesetzt.



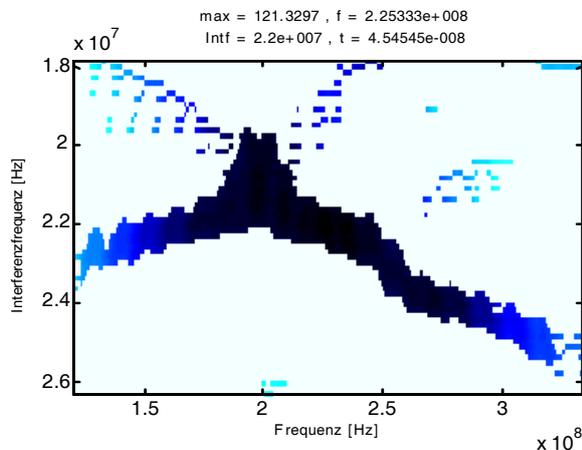
**Bild 13: Die berechnete Kombination der Leistungsspektren, gemessen an einem 300 kV GIS Feld**



**Bild 14: Wavelet-Transformation der Messung an einem 300 kV GIS Feld (Bild 13)**

Die optimale Übereinstimmung der Messergebnisse mit der theoretischen Kosinusfunktion ergibt sich bei  $\Delta f = 21,2$  MHz, welches einem  $\Delta t$  von 47 ns entspricht. Die Messung im Zeitbereich ergab ein vergleichbares Resultat mit einem  $\Delta t$  von 45 ns. Auch die

Wavelet-Transformation (**Bild 14**) zeigt deutlich im Frequenzbereich zwischen 180 MHz und 220 MHz eine Interferenz. Das Maximum kann entsprechend **Bild 15** mit  $\Delta f=22$  MHz ( $\Delta t=45.5$ .ns) angegeben werden.



**Bild 15: Detailansicht der Wavelet-Transformation aus Bild 14 mit Bestimmung des Maximums**

Mit zunehmender Komplexität der Anlagen wird die Auswertung der Messergebnisse im Frequenzbereich aufwendiger, da. zusätzliche Reflexionen und Modenanregungen aufgrund wechselnden geometrischer Verhältnisse innerhalb der Anlage die Bestimmung des Frequenzabstandes und damit die Ortung erschweren.

### 3 Resultat und Diskussion

Eine neue, in diesem Beitrag vorgestellte Methode zur Ortung von TE beruht auf der Messung von Interferenzen im Frequenzbereich. Diese Methode erlaubt eine Ortung bei geringem Kostenaufwand. Das Interferenzphänomen von zwei überlagerten Sensorsignalen gibt Aufschluss über die Zeitdifferenz  $\Delta t$  und damit über den Ort der TE-Quelle. Zwei ähnliche Sensorsignale, die eine ausreichend hohe Wiederholfrequenz besitzen, sind Voraussetzung für den optimalen Einsatz dieses Messverfahrens. Für die Messungen ist nur der Frequenzbereich bis ca. 300 MHz (je nach GIS-Geometrie) nutzbar. Im höheren Frequenzbereich sind höhere Moden ausbreitungsfähig, die für die Auswertung nicht geeignet sind.

Interferenzen konnten an allen Versuchsaufbauten experimentell nachgewiesen werden. Die Auswertung mit Hilfe der Wavelet-Transformation hat sich als geeignetes Werkzeug für die objektive Interpretation der Messergebnisse herausgestellt. Bei komplexen Anlagen ist bei der Interpretation der Ergebnisse darauf zu achten, dass zwischen Reflexionen und Nutzsignal unterschieden werden muss. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf komplette Schaltanlagen ist Gegen-

stand weiterer Untersuchungen. Dazu sind Messungen im Prüffeld bzw. Vor-Ort durchzuführen.

### 4 Literatur

- [1] M. C. Zhang, H. Li, *TEM- and T-Mode Waves Excited by Partial Discharges in GIS*, ISH London, 22.-27. August 1999, pp 5.144.P5-5.147.P5
- [2] G. Schöffner, *A Directional Coupler System for the Direction Sensitive Measurement of UH-PD Signals in GIS and GIL*, CEIDP 2000, pp 634-638.
- [3] CIGRE TF 15/33.03.05, *PD Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the Method and the Acoustic Method*, Electra No 183, April 1999
- [4] S.M. Hoek, U. Riechert, T. Strehl, S. Tenbohlen, K. Feser, *A New Procedure for Partial Discharge Localization in Gas-Insulated Switchgear in Frequency Domain*, ISH, Peking, China, 2005, Proceedings of the 14th ISH, S. 341, G-005
- [5] R. Kurrer, K. Feser, *The Application of Ultra-High-Frequency Partial Discharge Measurements to Gas-Insulated Substations*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998
- [6] Meinke, Grudlach, *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*, 4. Aufl., Springer-Verlag, 1985