

# Auswirkungen multipler Rückzündungen in vakuumisolierten Leistungsschaltern auf die EMV von Mittelspannungsschaltanlagen

Dipl. -Ing. Dennis Burger, Universität Stuttgart, IEH, Stuttgart, Germany  
Prof. Dr. -Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, IEH, Stuttgart, Germany  
Dr. -Ing. Wolfgang Köhler, Universität Stuttgart, IEH, Stuttgart, Germany  
Dr. -Ing. Werner Ebbinghaus, ABB AG, PPMV-ES, Ratingen, Germany

## 1 Einleitung

Multiple Rückzündungen (engl.: multiple restrikes) sind mehrfach auftretende Lichtbogenentladungen zwischen zwei sich öffnenden oder bereits vollständig geöffneten Leistungsschalterkontakten.

Rückzündungen dieser Art entstehen vornehmlich beim Abschalten induktiver Lasten (z.B. leerlaufender Transformatoren, Motoren oder Blindleistungskompensationspulen) durch sehr schnell dielektrisch wiederverfestigende Schaltstrecken in SF<sub>6</sub>- oder vakuumisolierten Leistungsschaltern. Aus der Praxis ist ebenfalls bekannt, dass das Schalten von Kapazitätsbänken zu vergleichbaren, mehrfach auftretenden Rückzündungen führen kann.

Die beim Abschalten von Induktivitäten generierten Störgrößen sind in ihrer Amplitude höher und folglich kritischer als im kapazitiven Lastfall. Deshalb wurde der in Abbildung 1 dargestellte Lastfall im Labor nachgebildet und analysiert.

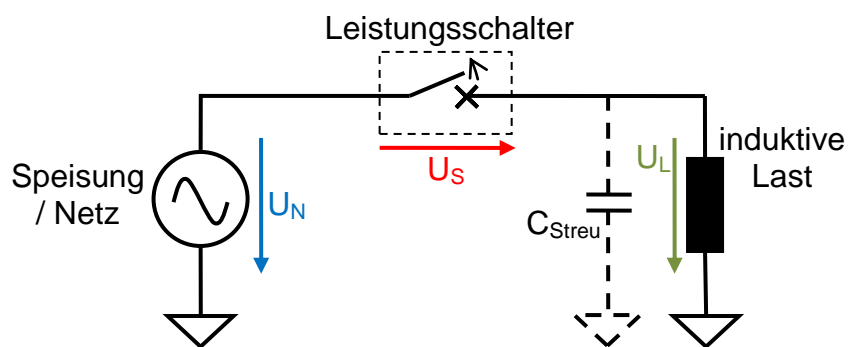


Abbildung 1: Ersatzschaltbild der Anordnung

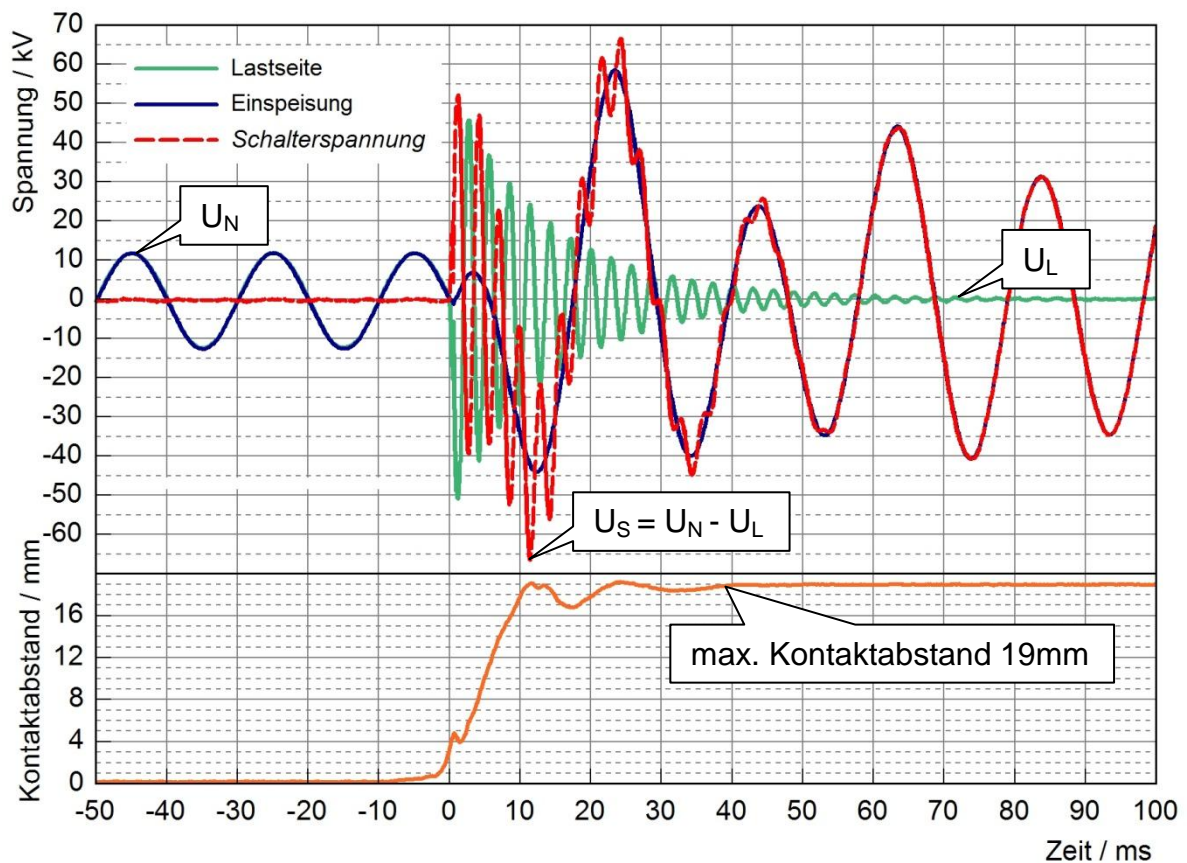
### 1.1 Entstehungsprozess

Der Entstehungsprozess mehrfach auftretender Rückzündungen beginnt mit der rein mechanischen Öffnung der Schaltkontakte. Die elektrische Verbindung der beiden Seiten bleibt durch einen unmittelbar zündenden Lichtbogen vorerst erhalten. Sobald der Lichtbogenstrom (= Laststrom) kurz vor seinem natürlichen Nulldurchgang den kritischen Abreißwert der Schaltkontakte erreicht, erlischt der Lichtbogen sehr rasch.

Die sehr häufig verwendeten CuCr - Schaltkontakte in vakuumisolierten Schaltstrecken reißen typischerweise bei Strömen im Bereich von 3 bis 5 A und innerhalb weniger Nanosekunden ab.

Der Abriss des induktiven Laststroms hat zur Folge, dass eine Restenergiemenge  $W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$  in der Lastinduktivität des abgeschalteten Kreises zurückbleibt. Diese Energiemenge oszilliert zwischen der induktiven Last (Energiespeicherung im magnetischen Feld) und der Streukapazität des abgeschalteten Anlagenteils (Energiespeicherung im elektrischen Feld). Sofern keine Rückzündungen stattfinden wird dem Schwingkreis, hauptsächlich durch die ohmsche Dämpfung der Primärleiter, durch den Skineneffekt und durch Magnetisierungsverluste in der Lastinduktivität Energie entzogen.

Es entsteht so für den Fall einer nicht rückzündenden Schaltstrecke ein gedämpft oszillierender Spannungsverlauf im LC - Schwingkreis. Die Resonanzfrequenz des abgeschalteten Schwingkreises liegt typischerweise im Bereich von einigen hundert Hertz bis zu wenigen 10 kHz.

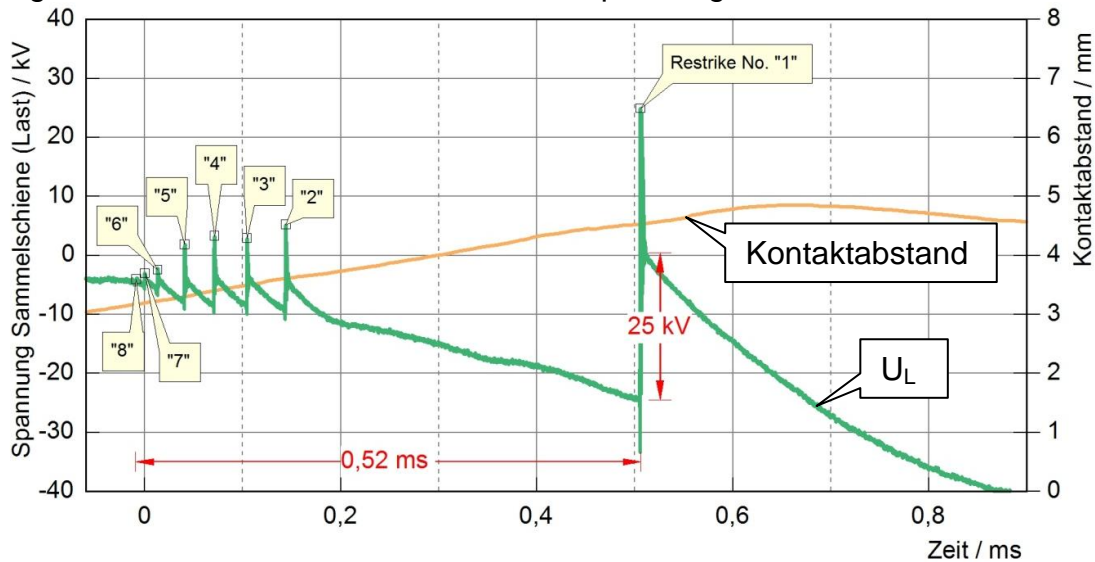


**Abbildung 2: Messung ohne Rückzündungen am Vakuumschalter**

Die relativ hohe Resonanzfrequenz bewirkt, dass die Spannung im Schwingkreis rascher ansteigt als die dielektrische Verfestigung (durch den größer werdenden Kontaktabstand) der Schaltstrecke voranschreitet. Sobald die Spannung im Schwingkreis die Überschlagsspannung der Schaltstrecke erreicht hat, findet in Form einer Rückzündung ein Potenzialausgleich zwischen beiden Kontaktseiten statt.

Die dem Spannungssprung auf der Lastseite entsprechende Energiemenge  $W = \frac{1}{2} C \cdot U_{\text{Streu}}^2$  wird dabei aus der Streukapazität, sprich aus dem Schwingkreis, abgeführt.

Bei dieser Potenzialanpassung handelt es sich um einen transienten Ausgleichsvorgang, der so lange stattfindet, bis die Löschbedingung für den Lichtbogen (sowohl die Lichtbogenspannung als auch die zeitliche Änderung  $di/dt$  des Lichtbogenstroms müssen jeweils unter einen kritischen Abreißwert fallen) erfüllt ist und dieser erneut abreißt. Die in der induktiven Last verbleibende Restenergie beginnt erneut zu oszillieren, so dass die Spannung im LC - Kreis abermals ansteigt.



**Abbildung 3: Messung der Rückzündungen und des Kontaktabstands**

Wird die Zündbedingung erneut erfüllt, findet eine zweite Rückzündung statt, wobei jetzt eine höhere Zündspannung aufgrund des inzwischen größeren Kontaktabstands erforderlich ist. Die Rückzündungen finden so lange statt, bis die Energiemenge im Schwingkreis hinreichend abgesunken ist, dass die maximal auftretende Spannung nicht mehr ausreicht, um die Zündbedingung der Schaltstrecke zu erfüllen ( $U > U_{\text{Zünd}}$ ). Abbildung 3 zeigt eine reale Messung mit Rückzündungen bei gleichzeitigem Monitoring des Kontaktabstands nach der Leistungsschalteröffnung. In dieser Messung, die auch allen weiteren Untersuchungen zugrunde liegt, sind insgesamt acht Rückzündungen zu erkennen. Sieben davon bei einem Kontaktabstand von 3,2 - 3,6 mm und relativ geringen Zündspannungen und eine bei einem Abstand von 4,5 mm und einer Zündspannung von 25 kV.

## 1.2 Elektromagnetische Folgen von multiplen Rückzündungen

Jeder transiente Ausgleichsvorgang in Form einer Rückzündung kann als breitbandiger Störimpuls auf der Hochspannungsseite der Schaltanlage aufgefasst werden. Durch die Ausbreitung über verschiedene Kopplungspfade (galvanisch, kapazitiv, induktiv und elektromagnetisch gestrahlt) beaufschlagen die Störimpulse nahezu jede in der Schaltanlage vorkommende elektronische Komponente in gewissem Maße. Grundsätzlich kann festgehalten werden:

- Je kompakter die Schaltanlagen aufgebaut sind, desto geringer wird der Abstand zwischen Störquelle und Störsecke und somit größer wird Kopplung.
- Jeder Anlagentyp sowie jede einzelne Anlageninstallation hat ihre spezifischen Resonanzfrequenzen, die je nach Beobachtungsort der Störgröße sehr dominant wiederzufinden sind.

## 2 Nachbildung im Labor

### 2.1 Versuchsaufbau

Zur Nachbildung der Störgrößen im Labor wurde eine 40,5 kV Mittelspannungsschaltanlage, bestehend aus drei Schaltfeldern inklusive eines vakuumisolierten Leistungsschalters, installiert. Als induktive Last dient ein 100 kV Prüftransformator. Die Einspeisung erfolgt mit 8 kV<sub>eff</sub> (einphasig) über ein 10 m langes Energiekabel aus einem SF<sub>6</sub>-isolierten Prüftransformator. Bei dieser Speisespannung ergibt sich eine (induktive) Stromamplitude von 46 mA<sub>eff</sub>. Abbildung 4 zeigt das einpolige Ersatzschaltbild der Anordnung.

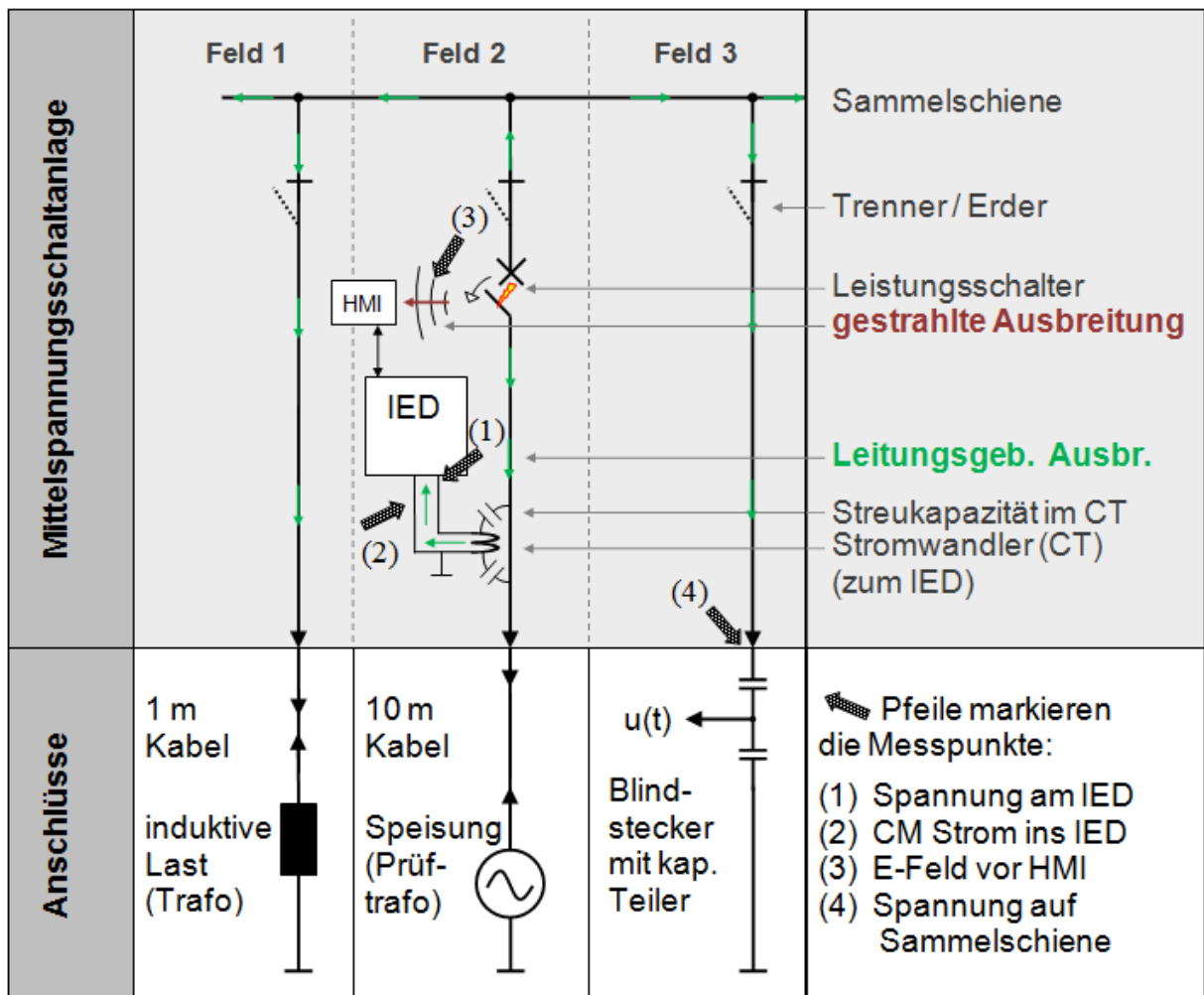


Abbildung 4: Einpoliges Ersatzschaltbild der Anordnung

## 2.2 Typische Koppelpfade der Störgrößen innerhalb der Schaltanlage

Wie in Abbildung 4 ersichtlich existieren zwei Hauptausbreitungspfade. Zum einen werden die elektronischen Komponenten mit gestrahlten Störgrößen beaufschlagt. Als Strahlungsquelle fungiert in diesem Fall sämtliche Primärtechnik, da sowohl der Zündfunke im Leistungsschalter elektromagnetische Wellen emittiert als auch die an ihn angeschlossenen Leiter angeregt werden und (in erster Linie mit ihren Resonanzfrequenzen und deren Harmonischen) abstrahlen. Weiterhin werden durch die breitbandige Anregung mehrere Hohlraumresonanzen der metallgekapselften Gasräume entlang des Primärleiters angeregt und somit ebenfalls elektromagnetische Störstrahlung emittiert.

Der zweite wichtige Ausbreitungspfad betrifft alle elektronischen Betriebsmittel der Sekundärtechnik, die (hauptsächlich kapazitiv) an die Primärtechnik der Schaltanlage angekoppelt sind, zum Beispiel kapazitive Spannungsanzeigesysteme oder die Strom- und Spannungswandlerkreise von Schutz- und Messgeräten. Im zweiten Fall erfolgt die wesentliche (kapazitive) Ankopplung an die Primärtechnik rein parasitär über die Streukapazität zwischen Primär- und Sekundärseite der Schutz- / Messwandler. Die auf kapazitive Weise auf die Niederspannungsleiter eingekoppelten Störgrößen sind maßgeblich für das erforderliche Suszeptibilitätsniveau der Geräteschnittstellen, tragen jedoch durch die Abstrahlung der Verkabelung auch zur gestrahlten Beanspruchung der in der Schaltanlage befindlichen Elektronikkomponenten bei.

## 2.3 Auswahl charakteristischer Messgrößen

Um Aussagen sowohl über die gestrahlte sowie auch über die galvanische Beaufschlagung durch schalthandlungsbedingte Störgrößen treffen zu können, werden folgende Messgrößen zur Beurteilung herangezogen:

- Elektrische Feldkomponente der gestrahlten Störung direkt an der abgesetzten Bedieneinheit des Schutzgeräts (Human Machine Interface).
- Störspannung am Stromwandlereingang des Schutzgeräts.
- Gleichtakt - Störstrom auf der Stromwandlerleitung (ins Schutzgerät).

Zur Messung des elektrischen Felds dient eine eindimensionale Feldsonde mit kapazitiver Auskopplung des Messsignals und optischer Signalübertragung. Die Bandbreite (-3dB - Wert) der Feldsonde beträgt 400 MHz.

Die Störspannung am Schutzgerät wird mit einem kommerziellen Hochspannungstastkopf (Typ: Testec TT-HV 250) gemessen. Seine Bandbreite beträgt 300 MHz.

Der Gleichtakt – Störstrom, der in die analoge Stromwandlerschnittstelle des Schutzgeräts fließt, wird mit einer HF-Stromzange (Typ: FCC F-65, Bandbreite 1 GHz) erfasst.

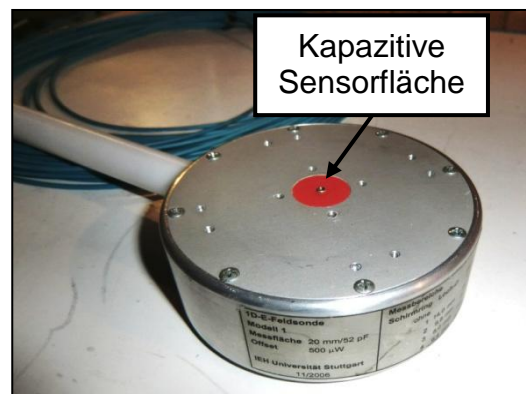


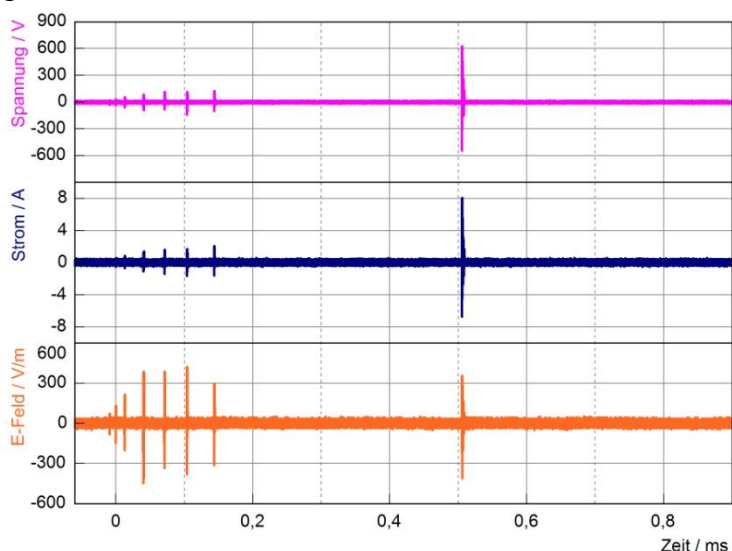
Abbildung 5: Eindimensionale E-Feldsonde



### 3 Messungen der Störgrößen

Die nachfolgende, exemplarische Messung der Störgrößen wurde während des in Abbildung 3 dargestellten Öffnungsvorgangs aufgezeichnet. Der Abriss des (induktiven) Stroms erfolgte in dessen Minimum, bei einem Wert von circa -45 mA.

Die Messung enthält 10 Mio. Messwerte bei einer Aufzeichnungslänge von 1  $\mu$ s (Samplerate = 5 GS/s), somit kann im Nachgang jede Einzelzündung sehr gut zeitlich aufgelöst werden. Abbildung 6 zeigt die Störgrößenmessungen an den oben genannten Messstellen:



Die Messungen zeigen, dass jede Rückzündung aus Abbildung 3 je einen transienten Impuls in jedem der drei Störsignale zur Folge hat. Für die galvanisch gekoppelten Störgrößen (Spannung / Strom) ist festzuhalten: Je größer die Zündspannung, desto größer ist auch die Amplitude des Störimpulses.

Abbildung 6: Gesamte Zeitsignale der Störgrößen ( $10^7$  Samples)

Die nächste Abbildung (7) zeigt die zeitlich weiter aufgelösten Störsignale während der Rückzündung mit der größten Zündspannung (Restrike „1“). Es können folgende Kenngrößen daraus abgelesen werden:

- Die Pulsdauer beträgt ungefähr 1  $\mu$ s.
- Die Störspannung am Stromwandleranschluss des IED beträgt maximal 600 V.
- Der maximale Gleichtakt - Störstrom ins IED beträgt 8 A.
- Die elektrische Feldkomponente im Steuerschrank der Sekundärtechnik erreicht Werte bis 430 V/m.

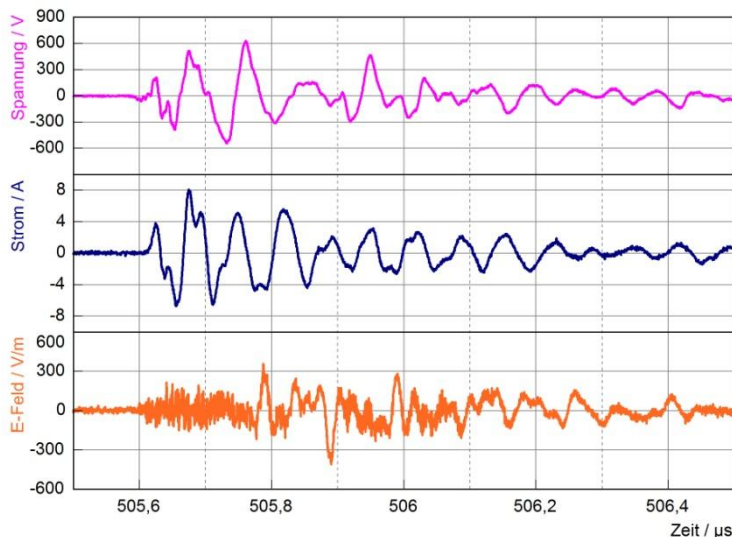
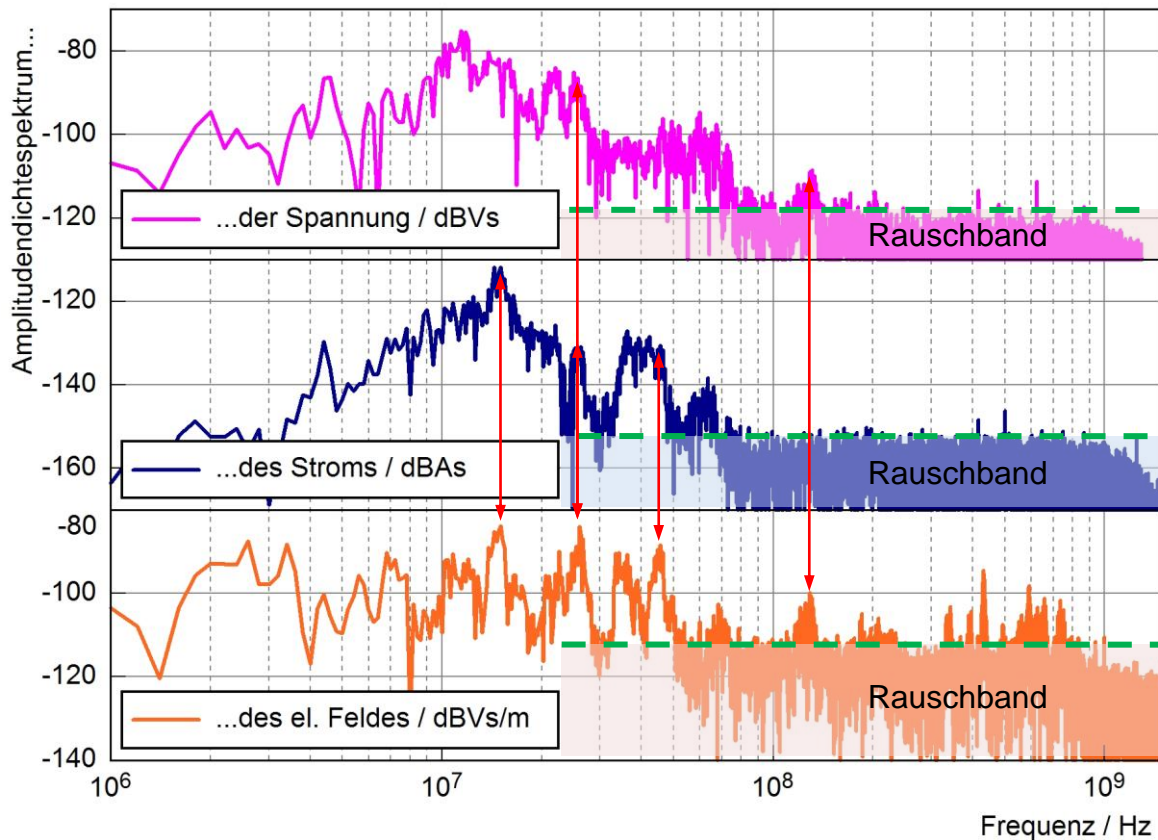


Abbildung 7: Zeitsignale gezoomt auf den Restrike mit der größten Amplitude ( $10^4$  Samples)

Zur detaillierteren Analyse sind die impulsförmigen Störgrößen aus Abbildung 6 nachfolgend im Frequenzbereich als (einseitiges, bzw. physikalisches) Amplitudendichtespektrum dargestellt. Die in grün gestrichelt eingezeichneten Linien markieren jeweils die Rauschgrenzen, bedingt durch die begrenzte vertikale Auflösung des Messgeräts.



**Abbildung 8: Amplitudendichtespektren der Störimpulse (5000 Samples)**

Die Spektren zeigen, dass die leitungsgebundene Ausbreitung der Störgrößen in der Bandbreite begrenzt ist. Bei der Störspannung am IED kann von einer breitbandigen Anregung bis circa 200 MHz, beim Störstrom bis 80 MHz, gesprochen werden. Hingegen die Funkstörfeldstärke im Niederspannungsraum der Schaltanlage besitzt ein sehr breitbandiges Spektrum mit wesentlichen Anteilen bis 750 MHz.

Beim Vergleich der Spektren fällt auf, dass nahezu jede signifikante Störfrequenz der Spannung und des Stroms auch im E-Feldspektrum deutlich wiederzufinden ist (Die roten Pfeile zeigen einige Beispiele.). Das Störspektrum des elektrischen Feldes kann somit als globaler Indikator zur Abschätzung der Bandbreite der Entladungen im Vakuumschalter herangezogen werden.

**Hinweis:**

Die Amplitude der elektrischen Feldkomponente ist im Frequenzbereich über 400 MHz aufgrund der begrenzten Bandbreite der Feldsonde nicht korrekt gemessen, jedoch wird auch dieser Bereich, wenngleich auch gedämpft, noch erfasst.

## 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die von mehrfach auftretenden Rückzündungen erzeugten Störgrößen sind aufgrund der steilen Zündflanken sehr breitbandig. Sie sind nahezu an jeder Stelle innerhalb des Schaltfelds messtechnisch nachweisbar. Betrachtet man die resultierende galvanische Störgrößenbeaufschlagung der elektronischen Komponenten, sind vor allem Resonanzfrequenzen (wie zum Beispiel Leitungsresonanzen von verschiedenen Primär- und Sekundärleitern) stark ausgeprägt. Die höheren Frequenzanteile der Zündimpulse ( $> 200$  MHz) sind, bedingt durch die Dämpfungseigenschaften der Schaltanlagenstruktur, an den Anschlussklemmen der elektronischen Komponenten kaum mehr als Störgrößen wahrnehmbar. In elektromagnetisch gestrahlter Form wiederum, verursacht jede Rückzündung eine breitbandige Störgrößenbeaufschlagung mit starken Frequenzanteilen im Bereich einer hundert Kilohertz bis ungefähr 750 MHz.

Im Fall der galvanisch auftretenden Störgrößen ist die Amplitude proportional abhängig von der Zündspannung im Leistungsschalter. Die maximal erreichbare Zündspannung wiederum hängt ab von der im lastseitigen Schwingkreis vorkommenden Induktivität  $L$ , der Streukapazität  $C$  sowie der zum Zeitpunkt des Stromabbrisses in der Induktivität gespeicherten Energie. Grundsätzlich können bei entsprechenden Werten für  $L$  und  $C$  und bei einem typischen Stromabbrisswert von 3 bis 5 Ampere in dem abgeschalteten Schwingkreis somit nahezu beliebig hohe Spannungen entstehen (bis mehrere 100 kV).

Folglich kann die maximal mögliche Störampplitude abgeschätzt werden durch die Skalierung der gemessenen Störgrößen mit dem Verhältnis aus der gemessenen Zündspannung und der maximalen Durchbruchspannung des Vakuumschalters bei voll geöffneten Schaltkontakten (Spitzenwert der Nenn-Steh-Wechselspannung des Leistungsschalters).

## 5 Schlussfolgerung

Multiple Rückzündungen an vakuumisolierten Leistungsschaltern sind sehr schnelle, mehrfach innerhalb weniger Millisekunden auftretende, Entladungsprozesse. Sie haben das Potenzial, die Elektronikkomponenten in den Schaltanlagen über die durch einschlägige Normen (zum Beispiel IEC 60255-1) definierten Störfestigkeitsschwellen hinaus zu beanspruchen. Folglich muss die Störgrößenerzeugung durch multiple Rückzündungen in der EMV - Planung von Mittelspannungsschaltanlagen unbedingt berücksichtigt werden. Dies gilt besonders für Anlagen, die über sehr kurze Leitungsstücke oder Kupferschienen verbundene, induktive Lasten schalten.

## 6 Referenzen

- [1] ABB AG, Hennig Gremmel, Gerald Kopatsch, 2006, *Schaltanlagen Handbuch*, Cornelsen, Berlin, Germany, 233-252.
- [2] Edgar Dullni, Wenkai Shang, Dietmar Gentsch, Ingmar Kleberg, Kaveh Niayesh, 2006, "Switching of Capacitive Currents and the Correlation of Restrike and Pre-ignition Behavior", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol. 13, 65-71.