Transienten- und Oberwellenmessungen

mit unkonventionellen Wandlern

Dr. Thomas Brügger
Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH
bruegger@fkh.ch
Schweiz

KURZFASSUNG
Die FKH hat in den letzten Jahren eine zunehmende Anzahl an Transienten- und Oberwellenmessungen (PQ-Messungen) bis in die höchsten Netzebenen durchgeführt. Konventionelle induktive Spannungswandler sind für Netzfrequenz ausgelegt und haben aufgrund von tiefen Resonanzstellen in der Regel keine ausreichende Bandbreite für die präzise Messung dieser höherfrequenten Netzphänomene. Die FKH hat daher Methoden erprobt und eingesetzt, wie mit unkonventionellen Wandlern (bzw. Teilern) temporäre Transienten- und Oberwellenmessungen an vielen Stellen im Hoch- und Höchstspannungsnetz mit geringem Aufwand möglich sind. Die kapazitiven Messprinzipien dieser Methoden weisen im Vergleich zu den induktiven Betriebswandlern wesentlich höhere Bandbreiten auf und ermöglichen damit auch die Messung von transienten Spannungen bis in den MHz-Bereich.
Der Beitrag stellt die verschiedenen Messmethoden vor und enthält eine Auswahl an Anwendungsbeispielen der FKH.

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren hat die FKH eine zunehmende Anzahl Netzqualitätsmessungen (PQ-Messungen) in den höchsten Netzebenen durchgeführt (Abbildung 1).

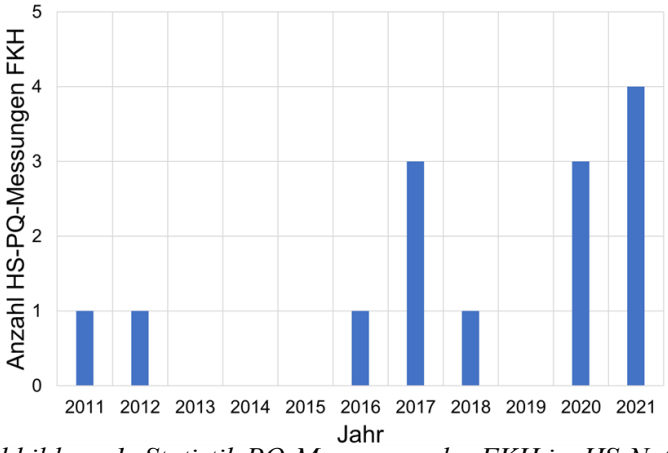

Abbildung 1: Statistik PQ-Messungen der FKH im HS-Netz

Treiber dieser Entwicklung ist die zunehmende Verbreitung von Betriebsmitteln, die über Leistungselektronik mit nicht-linearer Strom-Spannungskennlinie an die Übertragungs- und Verteilnetze angeschlossen werden. Auf der Quellenseite gab es im europäischen Verbundnetz einen enormen Zuwachs an Windkraft- und PV-Anlagen, die ihre Leistung über Wechselrichter einspeisen. Auf der Verbraucherseite sind zu den klassischen nicht-linearen Lasten wie z.B. Lichtbogen-Öfen oder Gleichrichteranlagen ebenfalls eine Vielzahl "elektronischer" Geräte (Frequenzumrichter-gespeiste Motoren in Industrie und Verkehr, LED-Leuchtmittel, Schaltnetzgeräte etc.) dazu gekommen. Daneben gibt es im Übertragungsnetz selbst immer mehr Leistungselektronik, z.B. in Form von HGÜ-Konverterstationen und statischen Frequenzumrichtern zur Netzkopplung oder Blindleistungs-kompensation. Weitere Trends, welche die Sicherstellung der Netzqualität auf der Hoch- und Höchstspannungsebene herausfordernd machen, sind die Abnahme von netzstabilisierender rotierender Masse mit damit verbundener Abnahme von Kurzschlussleistungen, Zunahme von Harmonischen höherer Ordnung (Supraharmonische) und ein zunehmender Verkabelungsgrad.
Vor diesem Hintergrund sind insbesondere Oberwellen von Interesse, welche zu erhöhten thermischen Verlusten in Transformatoren, Kabeln oder Generatoren, sowie zu Isolations- oder EMV-Problemen führen können. Daneben gibt es immer wieder Fälle, in denen transiente Spannungen im HS-Netz untersucht werden müssen, z.B. zur Validierung von Simulationen oder weil Probleme auftreten, bei denen transiente (Über-)Spannungen als Ursache vermutet werden.

2 FREQUENZBEREICH KONVENTIONELLER INDUKTIVER SPANNUNGS-WANDLER

Konventionelle induktive Spannungswandler sind für die präzise Messung bei Netzfrequenz ausgelegt und haben aufgrund von tiefen Resonanzstellen in der Regel keine ausreichende Bandbreite für Oberschwingungs- geschweige denn für Transientenmessungen.
Abbildung 2 zeigt die Frequenzabhängigkeit induktiver Spannungswandler verschiedener Spannungsebenen. Vergleicht man dies mit den Anforderungen aus IEC 61000-4-7, ist leicht ersichtlich, dass sich mit induktiven Wandlern wegen der durch Resonanzstellen verursachten Abweichungen der Übersetzung nur Harmonische niedriger Ordnung messen lassen. Als Faustregel gilt, dass mit induktiven Spannungswandlern Messungen bis ungefähr zur dreizehnten Harmonischen machbar sind.

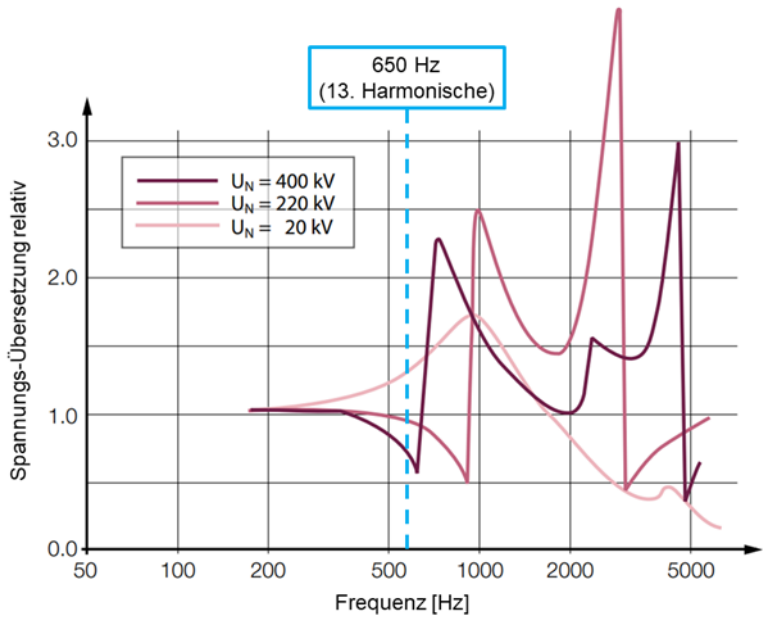

Abbildung 2: Frequenzabhängigkeit der Uebersetzung induktiver Wandler (Quelle: CIGRE WG 36)

3 NICHT-KONVENTIONELLE SPANNUNGSWANDLER

3.1 Kapazitiv gesteuerte (Transformator-)Durchführungen

Eine elegante Art einer temporären breitbandigen Spannungsmessung im Hochspannungsnetz ist, den kapazitiven Messabgriff einer bestehenden Transformatordurchführung als primäre Kapazität zu verwenden [1, 2, 3]. Dieser Messabgriff ist mit dem äussersten kapazitiven Steuerbelag in der Durchführung verbunden und wird normalerweise für diagnostische Messungen der Durchführungskapazität und des Verlustfaktors (C/tanδ), sowie für TE-Messungen verwendet (Abbildung 3).

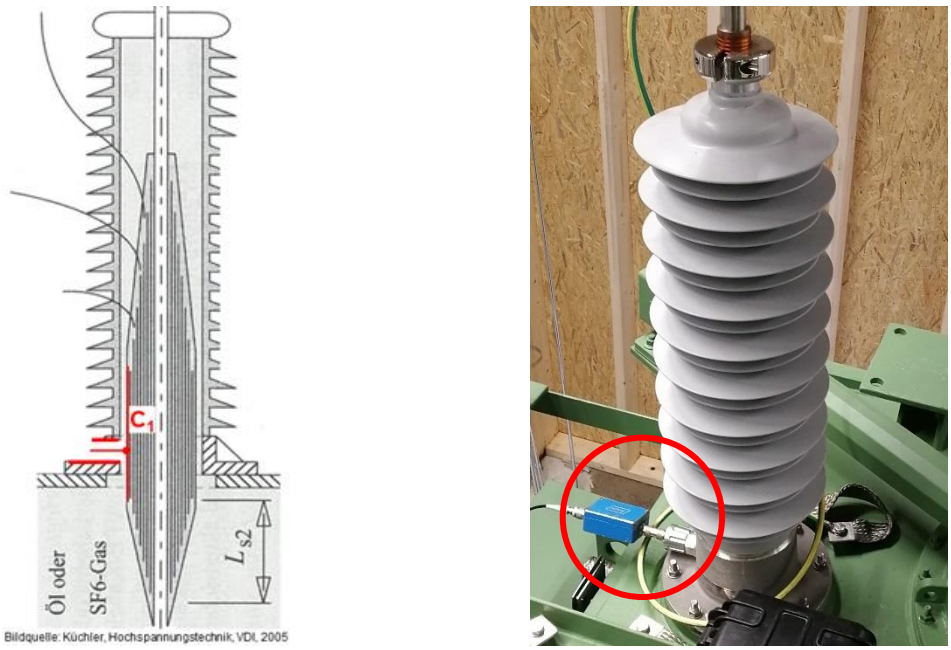

Abbildung 3: Kapazitiver Messabgriff Transformator-Durchführung

Durch Beschaltung des Messabgriffs mit einer Sekundärkapazität wird ein kapazitiver Teiler gebildet, der die Messung der Hochspannung bis in den hohen dreistelligen Kilohertz-Bereich erlaubt, was

sowohl Spannungsqualitätsmessungen nach EN/IEC bis zur 50. Harmonischen als auch die Messung von transienten Spannungen (z.B. Schalttransienten) ermöglicht.
Falls auch Stromharmonische gemessen werden sollen, bieten sich breitbandige Rogowskispulen an, die ebenfalls bei den Durchführungen installiert werden können.
Ein grosser Vorteil der Methode ist, dass weder am Transformator noch im Unterwerk bauliche Änderungen nötig sind. Für die Installation und den Rückbau des Messsystems muss der Transformator nur für je ca. eine Stunde ausgeschaltet und geerdet werden.
Abbildung 4 zeigt ein Schema des ganzen Messaufbaus.

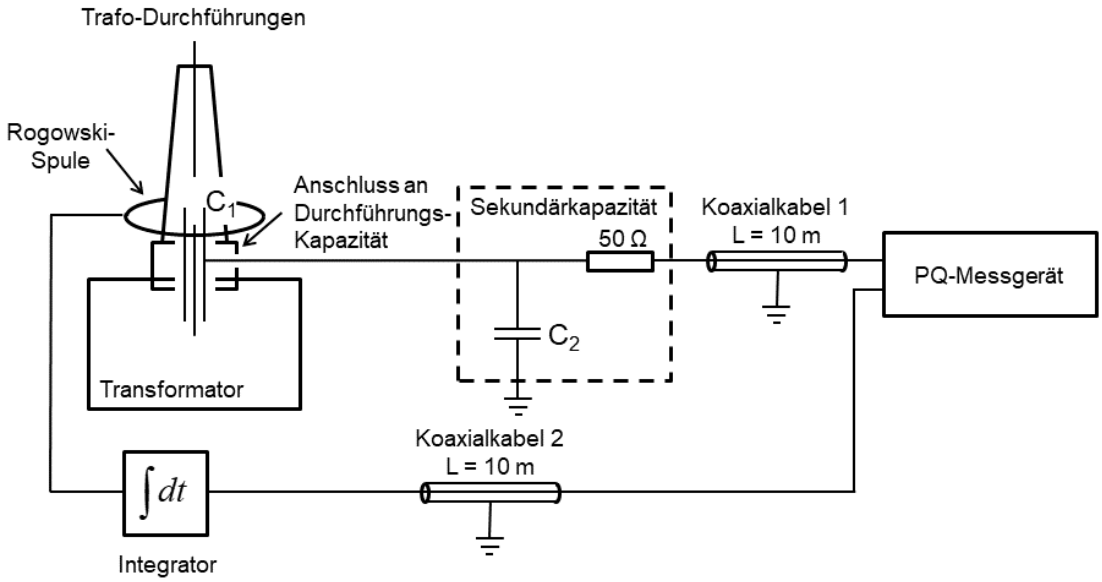

Abbildung 4: Messaufbau für PQ-Messung an einem Leistungs-Transformator (schematisch)

Der Frequenzgang der kapazitiven Spannungsmessung wurde im FKH-Labor gemessen Die Durchführungskapazität wurde dazu mit einem Kondensator nachgebildet.
Der gemessene Frequenzgang (Abbildung 5) zeigt eine konstante Übersetzung von -32.6 dB (entsprechend dem Teilerverhältnis) zwischen 50 Hz and 2.5 kHz (50. Harmonische). Die obere 3-dB-Frequenz liegt bei ca. 1 MHz, womit auch transiente Spannungen im Netz messbar sind.

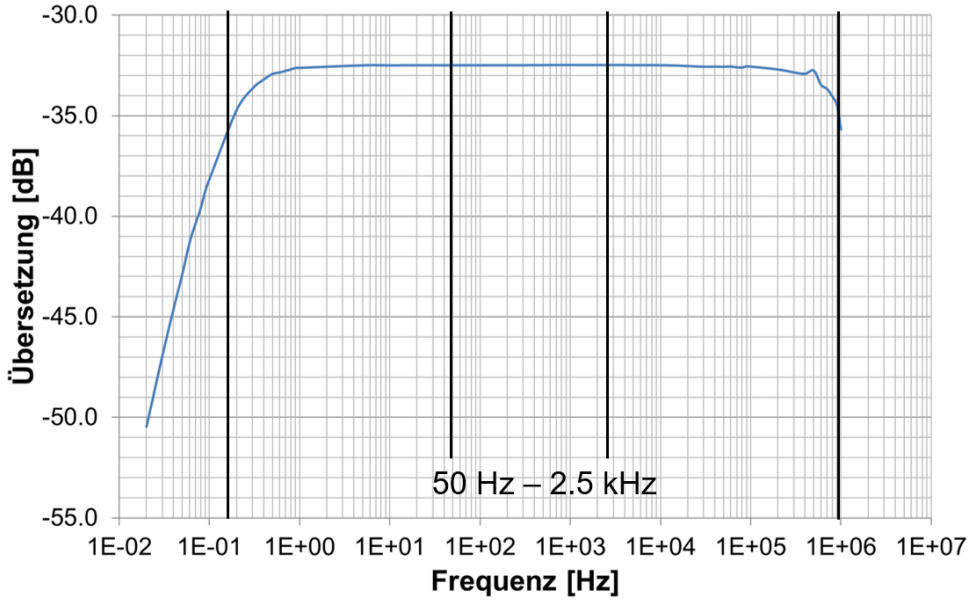

Abbildung 5: Gemessener Frequenzgang der kapazitiven Spannungsmessung

3.2 UHF-TE-Sensoren in gasisolierten Schaltanlagen

Die FKH hat bei Netzqualitätsmessungen auch schon Spannungen mithilfe von Feldsonden gemessen, die in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) zur UHF-Teilentladungsmessung eingebaut werden. Durch die Beschaltung der Feldsonde mit einer Sekundärkapazität erhält man ebenfalls einen kapazitiven Spannungsteiler, der sich für Netzqualitäts- oder auch Transientenmessungen eignet (Abbildung 6).
Die Installation und den Rückbau des Messsystems kann während des Betriebs erfolgen.

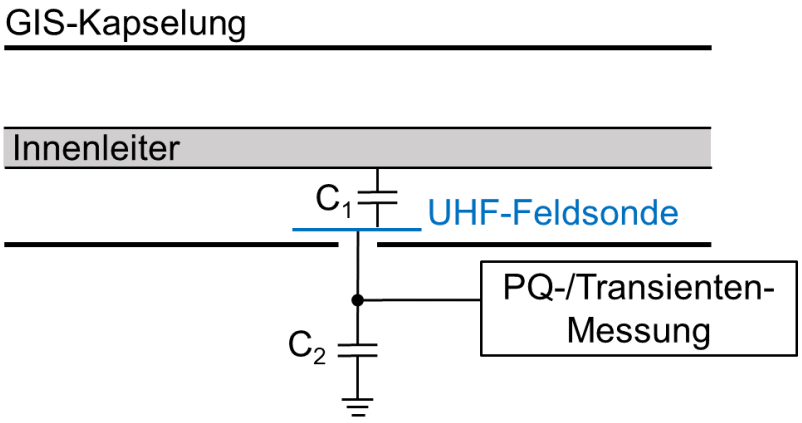

Abbildung 6: Kapazitive Spannungsmessung an einer GIS-UHF-Feldsonde

3.3 C-/RC-Teiler

Bei Messungen in den unteren Netzebenen (bis ca. 50 kV) setzt die FKH vorzugsweise C-/RC-Teiler ein. Als Primärkapazität werden Netzkomponenten wie z.B. Stützisolatoren oder GIS-Steuerkondensatoren verwendet (Abbildung 7).
Mit den von der FKH verwendeten RC-Teilern lassen sich auf der MS-Ebene Bandbreiten bis ca. 10 - 20 MHz erreichen, womit ebenfalls Spannungsqualitäts- und Transientenmessungen mit geringem Installationsaufwand möglich sind.

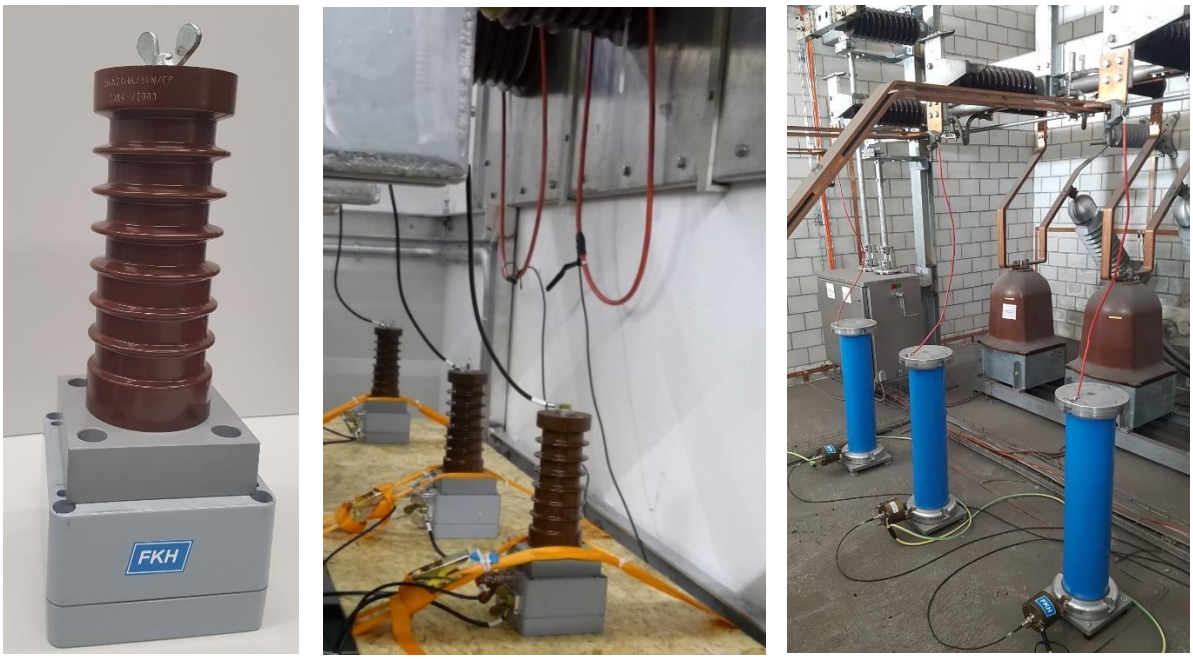

Abbildung 7: 24-kV-Teiler mit Stützisolator als C1 (links, Mitte), 50-kV-Teiler mit GIS-Steuer-kondensatoren (rechts)

Übertragungsnetz-Betreiber setzen zunehmend auch fest installierte RC-Teiler ein, um an wichtigen Netzknoten die Netzqualität zu überwachen. Dazu sind von verschiedenen Herstellern Produkte bis zur Höchstspannungsebene verfügbar (Abbildung 8).

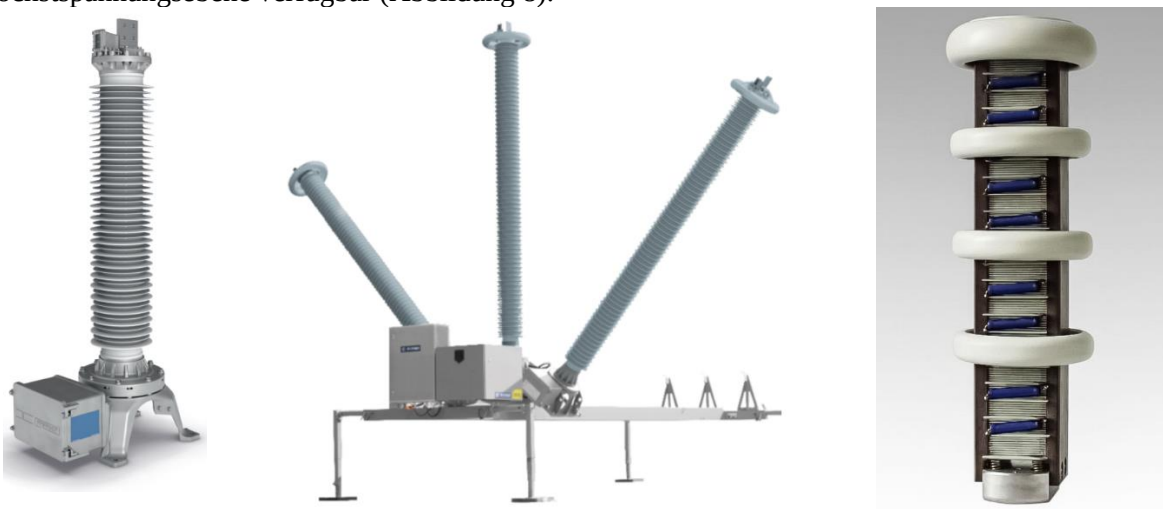

Abbildung 8: Verschiedene kommerzielle RC-Teiler

3.4 Feldplatten in luftisolierten Anlagen

Eine weitere Möglichkeit zur kapazitiven Spannungsmessung sind Feldplatten, d.h. grössere metallische Platten, die in der Nähe von geeigneten spannungführenden Teilen, z.B. luftisolierten Sammelschienen, aufgestellt werden und so dem elektrischen Feld ausgesetzt sind (Abbildung 9).
Durch Beschaltung der isoliert aufgestellten Feldplatten mit Sekundärkapazitäten kann auch so ein breitbandiges Spannungssignal gewonnen werden, welches für eine Netzqualitätsmessung verwendet werden kann.

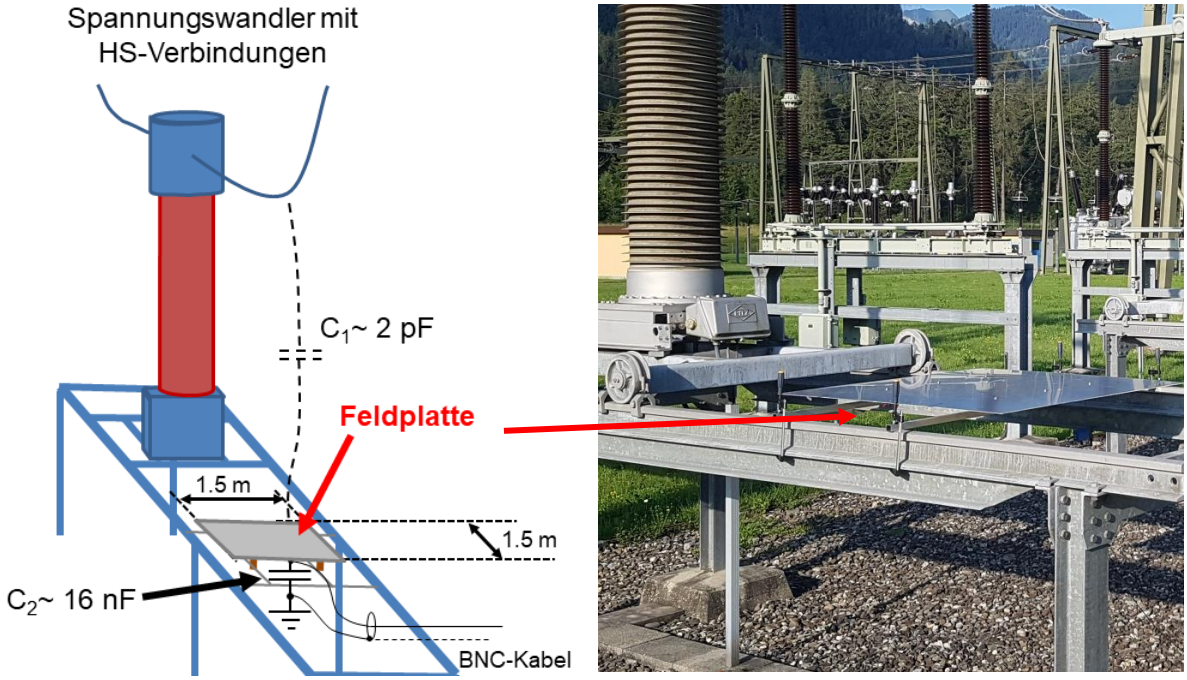

Abbildung 9: Aufstellung der Feldplatte schematisch (links) und bei einer Messung der FKH (rechts)

4 ANWENDUNGSBEISPIELE DER FKH

4.1 Oberwellen-Messung an 380-kV-Trafodurchführung

In Abbildung 10 ist ein 380/150-kV-Transformator zu sehen, dessen Durchführungen für eine einwöchige Netzqualitätsmessung ausgerüstet wurden. Neben den Sekundärkapazitäten für die Spannungsmessung wurden Rogowskispulen um den Flansch der Durchführung gelegt, womit auch die fliessenden Ströme mit hoher Bandbreite (ca. 20 kHz) erfasst wurden. Die Installation bzw. der Rückbau der bedingte dabei jeweils eine Ausschaltung und Erdung für je ca. eine Stunde.

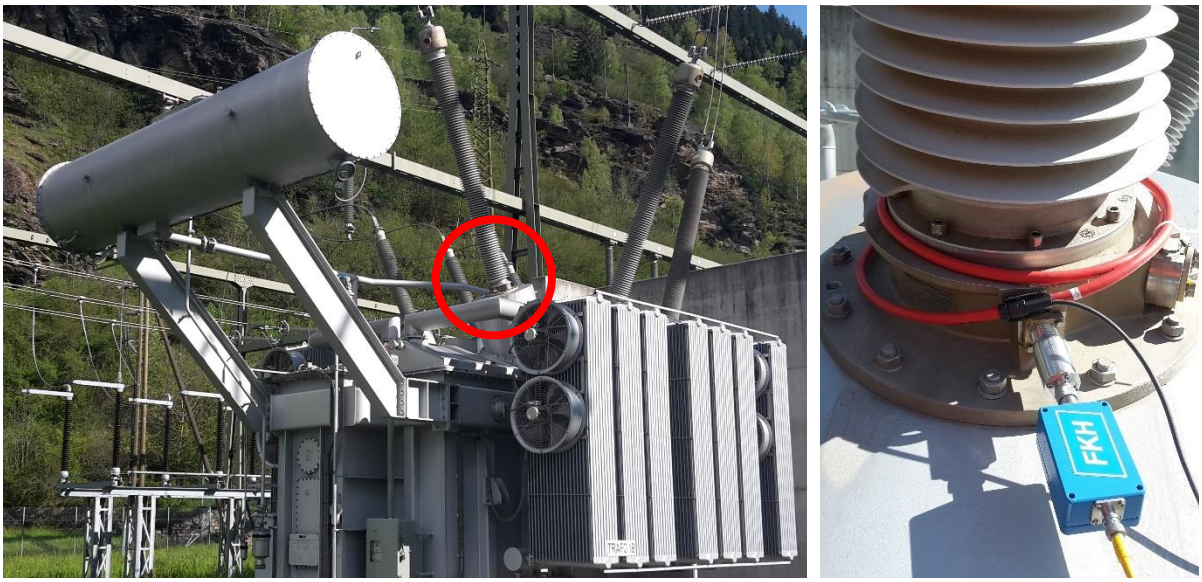

Abbildung 10: Links: 380/150-kV-Transformator mit 380-kV-Durchführungen (roter Kreis markiert die Position der Messanschlüsse). Rechts: Messanschluss mit angeschlossener Sekundärkapazität und Rogowskispule.

Die aufgezeichneten Daten werden nach der Messung analysiert und dargestellt. In Abbildung 11 ist beispielsweise das harmonische Spektrum der einwöchigen Messperiode dargestellt. Weitere Auswertungen können den Zeitverlauf der Harmonischen und die Abhängigkeit von ausgewählten Netzzuständen umfassen.

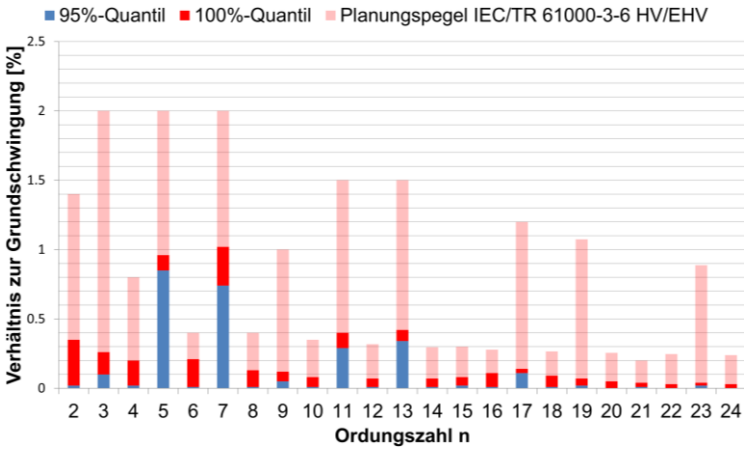

Abbildung 11: Spektrum der harmonischen Spannungen

4.2 Oberwellen-Messung an den UHF-TE-Sensoren einer 380-kV-GIS

Abbildung 12 zeigt den Abgriff eines UHF-TE-Sensors an einer 380-kV-GIS mit angeschlossener Sekundärkapazität. Die Installation des Messsystems erfolgte während des Betriebs der Anlage.

Das an die Spannungsmessung angeschlossene Netzqualitäts-Messgerät zeichnete auch den Frequenzabfall im europäischen Verbundnetz am 8. Januar 2021. Die Netzfrequenz sank auf unter 49.75 Hz, was die Aufspaltung des Verbundnetzes in zwei Teilnetze zur Folge hatte.

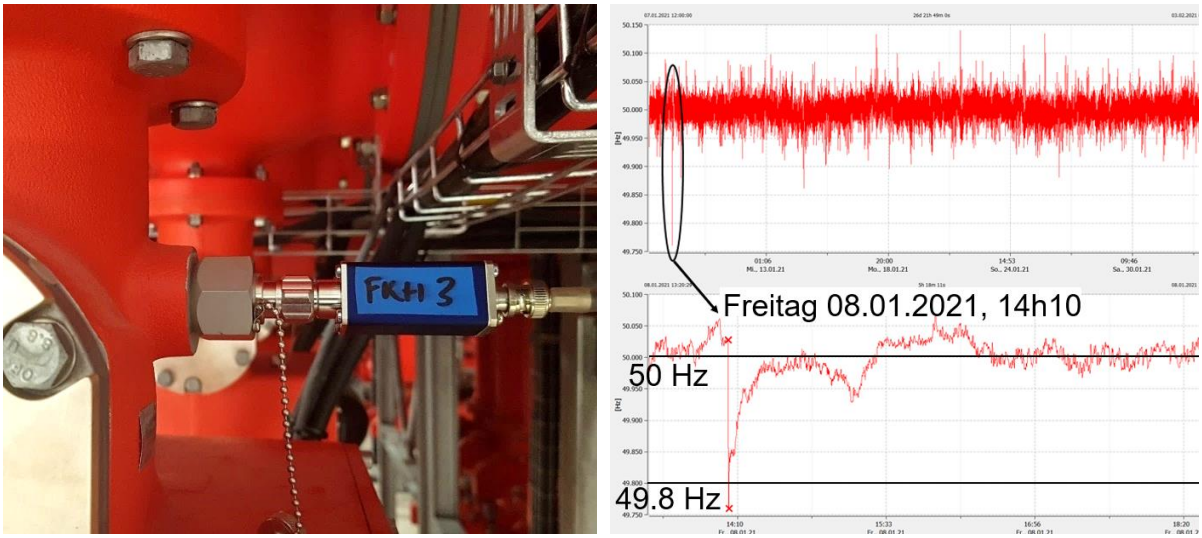

Abbildung 12: UHF-TE-Sensor mit angeschlossener Sekundärkapazität (links), Frequenzeinbruch gemessen am 08.01.2021 (rechts)

4.3 Transientenmessungen beim Schalten eines Vakuum-Generatorschalters

Beim Schalten eines 160-MVA-Motorgenerators (Un = 18 kV) in einem Pumpspeicherkraftwerk trat am Wickelkopf des Stators zwischen zwei Phasen ein Isolationsfehler auf. Da der Generatorschalter mit Vakuum-Schaltkammern aufgebaut ist, bestand der Verdacht, dass vorzeitige Stromabrisse zu hohen Schalt-Überspannungen führten und so den Schaden verursachten.
Die drei Phasenspannungen und -ströme wurden direkt am Generatorabgang erfasst (Abbildung 13). Dazu wurden kapazitive Spannungsteiler mit einer oberen 3-dB-Grenzfrequenz von 3 MHz und mit Rogowskispulen mit einer Bandbreite von 10 Hz bis 20 kHz verwendet.

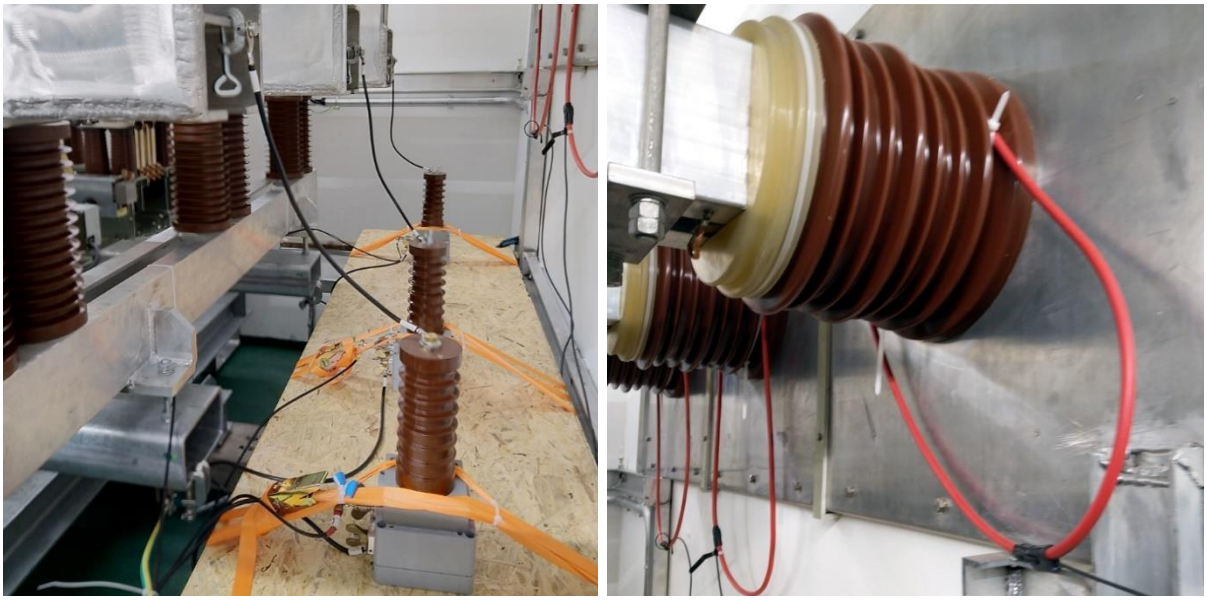

Abbildung 13: Messeinrichtungen für die Ströme und Spannungen beim Generatorschalter. Links: Aufstellung der der drei Spannungsteiler, rechts: Rogowski-Stromwandler an den Isolatoren der Wanddurchführungen.

Die durchgeführten Schaltversuche umfassten die Ausschaltungen bei den üblichen Übergangsmanövern vom Generator- in den Pumpbetrieb und umgekehrt, sowie auch Ausschaltungen bei Unter- und Übererregung im Phasenschieberbetrieb der Maschine.
Es zeigte sich, dass bei keiner einzigen Ausschaltung eine relevante Überspannung festgestellt werden konnte. Alle Stromunterbrüche erfolgten im Nulldurchgang. Es konnten keine Stromabrisse festgestellt werden. Die gemessenen Spannungsverläufe zeigten während der Stromunterbrüche im Nulldurchgang lediglich kleine Spannungssprünge mit kurzen Nachschwingungen welche maximal 20 % der Nennspannung erreichten (Abbildung 14).
Der Verdacht, dass Überspannungen den Isolationsfehler am Stator ausgelöst hätten, konnte damit nicht bestätigt werden.

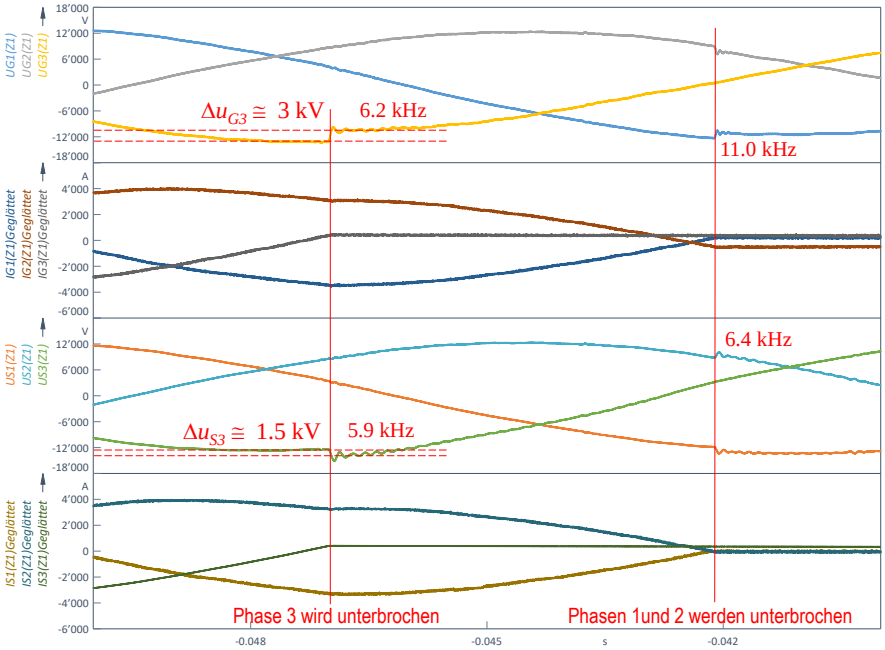

Abbildung 14: Auschalten aus Turbinenbetrieb mit 0MW und 76 MVAr kapazitiv

4.4 VFT-Messung in 220-kV-GIS

Die FKH hat für eine VFT-Messung (Very Fast Transients) in einer 220-kV-GIS Sekundärteile entwickelt, die an die in der GIS eingebauten UHF-TE-Sensoren angeschlossen werden können.
Vor der eigentlichen Messung wurde die Bandbreite der VFT-Messkette im Labor untersucht. Dazu wurde das Signal eines UHF-Kalibrators (Anstiegszeit gemäss Datenblatt: ca. 550 ps) mit einem schnellen Oszilloskop direkt resp. über die VFT-Messkette gemessen. Zur Simulation der Primärkapazität (GIS-Leiter – Feldsonde) wurde ein Keramikkondensator mit 20 pF verwendet (Abbildung 15).

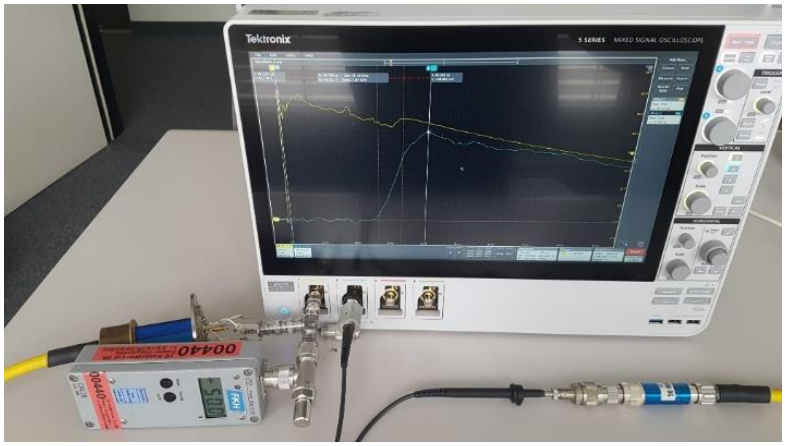

Abbildung 15: Messung zur Bestimmung der Bandbreite

Abbildung 16 zeigt das aufgezeichnete Oszillogramm. Die Anstiegszeit des Kalibrators wurde mit ca. 370 ps gemessen. Mit der Anstiegszeit der VFT-Messkette von 7.4 ns ergibt sich eine ungefähre Bandbreite von 0.35 / 7.4 ns = 47 MHz.

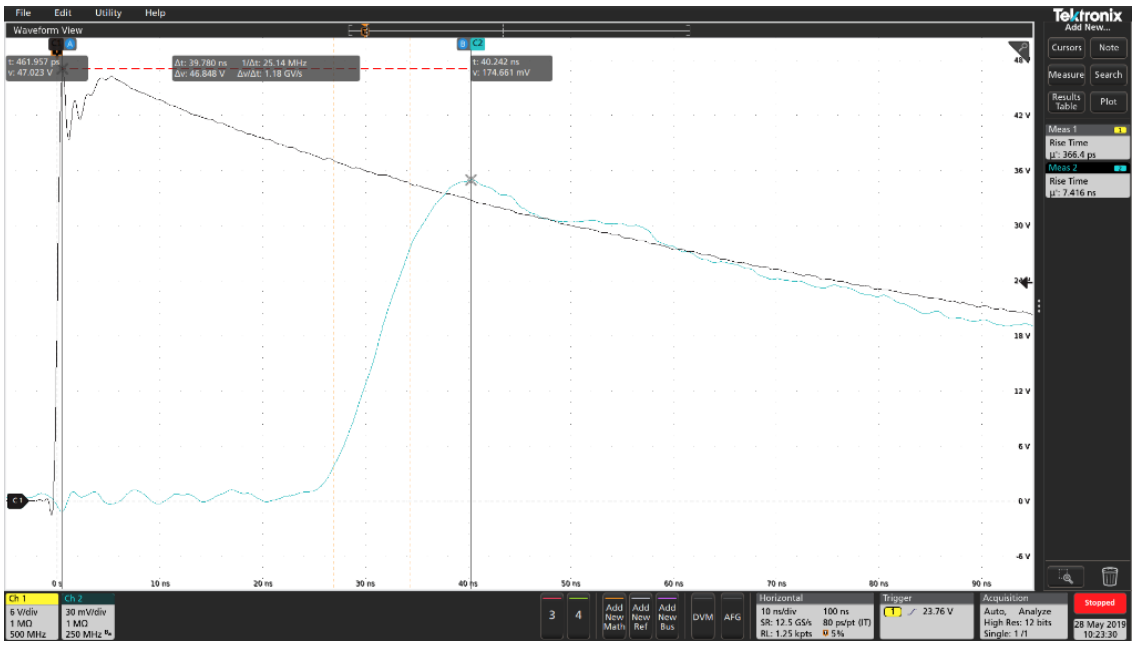

Abbildung 16: Messungen der Anstiegszeiten (Ch1 direkt, Ch2 über VFT-Messkette

Die Bandbreite von ca. 47 MHz genügt damit den Anforderungen der durchgeführten VFT-Messung (bei VFT-Messungen in GIS wird eine obere Grenzfrequenz von ca. 50 MHz angestrebt).
Abbildung 17 zeigt den Messaufbau an der GIS. Um die Messung gegen abgestrahlte EM-Störungen zu härten, wurde das Oszilloskop in einer Schirmbox aufgestellt und die Messleitungen in Drahtgeflecht-Schläuchen verlegt.

Abbildung 17: Messaufbau an der GIS. Links Oszilloskop in Schirmbox, rechts: Anschluss des Sekundärteils an UHF-TE-Sensor der GIS (geschirmt mit Drahtgeflecht-Schlauch)

Abbildung 18 zeigt eine gemessene VFT, die in der negativen Halbwelle bei einer momentanen Spannung von -117 kV auftrat und mit einer Amplitude von 101 kV einen ersten Überspannungs-Peak von -220 kV aufwies.

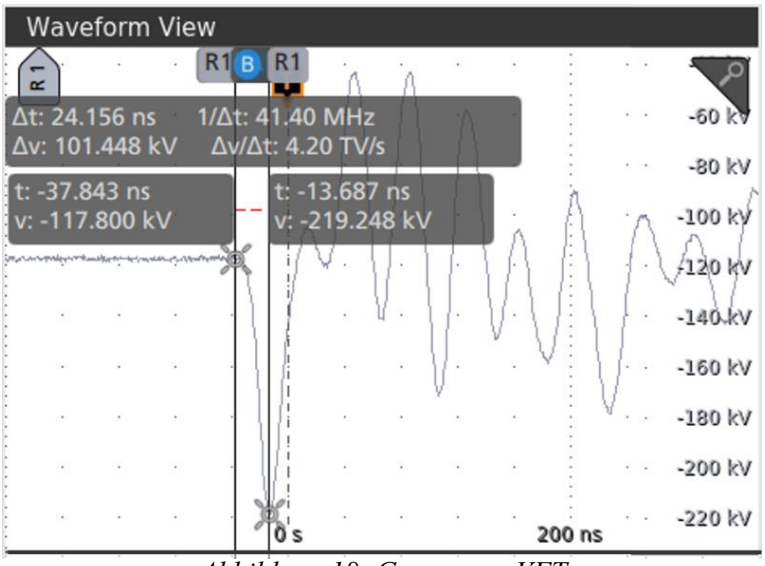

Abbildung 18: Gemessene VFT

5 ZUSAMMENFASSUNG

Konventionelle induktive Spannungswandler sind für die präzise Messung bei Netzfrequenz ausgelegt und haben aufgrund von tiefen Resonanzstellen in der Regel keine ausreichende Bandbreite für Oberschwingungs- und Transientenmessungen.
Die FKH hat Methoden entwickelt und in der Praxis erprobt, wie mit unkonventionellen Wandlern temporäre Netzqualitäts-(PQ-)Messungen an vielen Stellen im Hoch- und Höchstspannungsnetz mit geringem Installationsaufwand und ohne bauliche Änderungen in den jeweiligen Unterwerken durchgeführt werden können.
Auch Messungen von transienten Phänomenen (z.B. Überspannungen bei Schalthandlungen) sind möglich, da die auf einer kapazitiven Messung beruhenden Methoden im Vergleich zu induktiven Betriebswandlern wesentlich höhere Bandbreiten aufweisen.

LITERATUR

[1] T. Brügger: “PQ-Messungen mit unkonventionellen Wandlern” Omicron Diagnoseforum, online, 2021

[2] S. Tenbohlen, C. Kattmann, T. Brügger, M. Siegel, M. Konermann, E. Junge, J. Christian, "Power Quality Monitoring in Power Grids focusing on Accuracy of High Frequency Harmonics", Cigré Session, Paris, 2018

[3] C. Kattmann, M. Siegel, T. Brügger, S. Tenbohlen, "Messung der Spannungsqualität in der Hochspannungsebene an Transformatordurchführungen", VDE Hochspannungstechnik, Berlin, 2018