



*Fachkommission für Hochspannungsfragen
Commission d'étude des questions relatives à la haute tension*

Jahresbericht

2020





Bild Titelseite: TE-Messung 220 kV-GIS
Bild links: 150 k-Kabelprüfung

Inhalt

Vorwort des Präsidenten und des Geschäftsführers	4
Struktur und Leitbild der FKH	6
FKH-Vorstand	7
FKH-Geschäftsstelle	8
Dienstleistungen der FKH	9
Auftragsarbeiten und statistische Übersicht	10
40 Jahre Resonanzprüfungen, Entwicklungsschritte und Erfahrungen	12
Sternpunktverlagerung im gelöschten MS-Netz durch induktive Beeinflussung	16
Diagnosemessungen an Trafodurchführungen	19
Netzqualitätsmessungen als Grundlage für die Netzplanung	21
Hochstromprüfung additiv gefertigter Anschlussklemmen	25
Limiten der Quantifizierung von Teilentladungen	26
Erneuerung der 150 kV-GIS-Katz von ewz – Abnahmeprüfung vor Ort	30
MS-Prüfungen: Gegenüberstellung Resonanzanlage / Prüftransformator	32
FKH-Labor für Isolierölanalysen	34
Neue Prüfadapter	35
Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung	36
Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen	37
Mitgliedschaft / Mitarbeit in Fachgremien und Kommissionen	38
FKH-Mitglieder	39
Zufahrtspläne für die FKH-Standorte	42

Vorwort des Präsidenten und des Geschäftsleiters

Die FKH blickt auf ein besonders erfolgreiches Jahr 2020 zurück. Trotz der schwierigen Randbedingungen aufgrund der Covid-19-Pandemie wurden in den Hochspannungsnetzen viele Erneuerungsprojekte abgewickelt, für welche die FKH zu Abnahmeprüfungen vor Ort beigezogen wurde. Wie gewöhnlich standen die Prüfungen an Hochspannungskabelstrecken, Schaltanlagen und Transformatoren im Vordergrund. Die durchgeführten Aufträge umfassten die ganze Breite der Testmethoden, sodass fast alle Prüfmittel und Diagnose-techniken der FKH zum Einsatz kamen. Auftragsprüfungen wurden auf allen Versorgungsebenen an Betriebsmitteln von der Mittel- bis Höchstspannung durchgeführt.

Ausserdem ist eine grosse Zahl an elektrotechnischen Fragestellungen der Mitglieder von der FKH in Studien bearbeitet worden. Die Problemstellungen betrafen Neu- und Weiterentwicklungen der Industrie, aber auch Fragen, die sich im Rahmen von Projekten der Energieversorgungsunternehmen oder im Netzbetrieb ergeben haben.

Wie überall in der Wirtschaft war das Arbeitsjahr auch bei der FKH geprägt durch die Massnahmen zur Eindämmung der Covid-19-Pandemie. Besonders bedauerlich waren die Einschränkungen beim geschätzten persönlichen Kontakt zu den Mitgliedern und Kunden. So musste die Generalversammlung, welche auf den 14. Mai angesetzt war, schriftlich abgehalten werden und die Fachtagung im November wurde um ein Jahr verschoben.

Im vergangenen Jahr ist eine Erneuerungskampagne an wichtigen Teilen der Prüfinfrastruktur angelaufen. Das Kernstück der Wechselfspannungsprüfquellen der FKH stellt heute in den allermeisten Fällen einen Frequenzumrichter dar. Umrichterspeisungen werden für ein- und dreiphasige Hochspannungstests, insbesondere für Resonanzprüfungen, aber auch für Transformatorprüfungen sowie für Erdungs- und Impedanzmessungen eingesetzt. Zusammen mit einem externen Entwickler, wird in einem umfassenden Projekt ein Grossteil der Frequenzumrichter der FKH modernisiert und in der Funktionalität erweitert. Mit dieser Entwicklung neuer elektronischer Quellen werden unsere Prüfmöglichkeiten erweitert. Auch werden die Bedienung der Prüfanlagen und die Qualität der Prüfdienstleistungen dadurch verbessert. Die Entwicklungen einer neuen Umrichter-gespeisten Stromquelle für Erdungsmessungen, konnte im letzten Jahr bereits erfolgreich abgeschlossen werden.

Aufträge für die Abnahmeprüfung von Mittelspannungsanlagen haben in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Das gestiegene Bedürfnis nach Überprüfung der Isolationsqualität, auch auf den tieferen Netzebenen, begründet sich durch die wachsenden Anforderung an die Gesamtverfügbarkeit der Stromversorgung. Dieser Trend hängt mit der steigenden Bedeutung der IT-Infrastruktur, der dezentralen Energieerzeugung und der Elektromobilität zusammen. Im vergangenen Jahr wurde deshalb ein erster Teil einer modularen kleineren Serie-Resonanzprüfanlage für Mittelspannungsnetzbetriebsmittel mit einer Prüfspannung bis 70 kV beschafft und in Betrieb genommen.

Der FKH-Vorstand und die Geschäftsleitung danken allen Mitgliedern und Kunden für das grosse Vertrauen, aber auch für die angenehme Zusammenarbeit, die auch in der erschwerenden Pandemiesituation stets hervorragend funktioniert hat. Den Mitarbeitern der Kunden, aber auch dem FKH-Personal, sprechen wir grosse Anerkennung aus.

Ungeachtet der unsicheren Entwicklung betreffend der Covid-19-Pandemie, freuen wir uns, Ihnen für Prüfdienstleistungen und für die Bearbeitung von Problemstellungen auch weiterhin zur Seite stehen zu dürfen.



Christian Lindner
Präsident



Dr. Reinhold Bräunlich
Geschäftsleiter

Struktur und Leitbild der FKH

Struktur der FKH



Abbildung 1: Struktur der FKH

FKH-Leitbild

Die FKH-Geschäftsstelle besteht aus einer Gruppe neutraler Sachverständiger, die über eigene Prüf- und Messeinrichtungen verfügt. Sie betreibt selbst **Entwicklungen** und steht ihren Mitgliedern sowie Dritten für **Dienstleistungen** zur Verfügung.

Die FKH übt eine **Brückenfunktion** zwischen den schweizerischen Hochschulen und den Unternehmungen der Elektrotechnik aus. Durch aktive Kontakte zur ETH Zürich und ETH Lausanne sowie den Fachhochschulen, und durch Beteiligung an der Forschung, leistet sie einen Beitrag zur Förderung der Attraktivität der energietechnischen Disziplinen.

Die FKH offeriert – im Sinne der **Nachwuchsförderung** – Studenten und Absolventen der Hochschulen die Mitarbeit an praxisorientierten Arbeiten.

Sie betätigt sich in **Normen- und Fachgremien** und macht ihren Mitgliedern das Wissen der Fachstellen und Hochschulen zugänglich.

FKH-Vorstand

Präsident

Christian Lindner | Axpo Grid AG

Vizepräsident

Adrian Häsler | Swissgrid AG

Mitglieder

Dr. Josep Aniceto | Schweizerische Bundesbahnen

Dr. Reinhold Bräunlich | Fachkommission für Hochspannungsfragen ¹

Yves-André Bagnoud | Services Industriels Lausanne

Markus Burger | Electrosuisse

Anja Burkhard | ABB Power Grids Switzerland AG

Andri Casura | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Andreas Degen | Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Prof. Dr. Drazen Dujic (ab Mai 2020) | Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Prof. Dr. Christian Franck | Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Michael Junghans | Brugg Kabel AG

Prof. Dr. Farhad Rachidi (bis Mai 2020) | Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Prof. Dominique Rolle | Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg

Daniel Riesen | BKW Energie AG

Dr. Michael Walter | GE Grid (Switzerland) GmbH

Martin Weibel | Bouygues E&S EnerTrans AG

Kontrollstelle

Aaron Durrer | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Oliver Junker | Axpo WZ-Systems AG

¹ Mitglied mit beratender Stimme

FKH-Geschäftsstelle

Leiter	Dr. Reinhold Bräunlich , dipl. El.-Ing. ETH	braeunlich@fkh.ch
Stellvertreter	Günther Storf , dipl. El.-Ing. ETH	storf@fkh.ch
Sekretariat	Saskia Muraro	muraro@fkh.ch
Mitarbeiter	Dr. Thomas Brügger , dipl. El.-Ing. ETH Dr. Vahe Der Houhanessian , dipl. El.-Ing. ETH Pascal Fehlmann , El.-Ing. FH Tobias Felber , Netzelektriker Peter Frey , Chemielaborant Diego Friedli , Msc Elektrotechnik FH Mario Gobeli , El.-Ing. FH Dr. Thomas Heizmann , dipl. El.-Ing. ETH Leiter Labor für Isolierölanalysen Dominic Kleger , Bsc El.-Ing. FH Adamo Mele , Elektromechaniker Simon Mutter , Energieelektroniker Dr. Stefan Neuhold , dipl. El.-Ing. ETH Franziska Schenker , Chemielaborantin Martina Stadelmann , Msc ETH ETIT (ab 1. Juni 2020) Markus von Arx , Elektromonteur Toni von Deschwanden , Elektromechaniker	bruegger@fkh.ch houhanessian@fkh.ch fehlmann@fkh.ch felber@fkh.ch frey@fkh.ch friedli@fkh.ch gobeli@fkh.ch heizmann@fkh.ch kleger@fkh.ch mele@fkh.ch mutter@fkh.ch neuhold@fkh.ch schenker@fkh.ch stadelmann@fkh.ch vonarx@fkh.ch deschwanden@fkh.ch
Betriebsstätten	FKH-Geschäftsstelle Hagenholzstrasse 81 8050 Zürich	Tel. 044 253 62 62 Fax 044 253 62 60
	FKH-Versuchsstation 4658 Däniken	Tel. 062 288 77 95 Fax 062 288 77 94
	FKH-Labor für Isolierölanalysen 4658 Däniken Notfallnummer Isolieröl- und Buchholzgasanalysen	Tel. 062 288 77 99 Fax 062 288 77 90 Tel. 062 288 77 99 oellabor@fkh.ch
Kontaktadresse für die Westschweiz	Pascal Fehlman Le Verney 10 1483 Montet (Broye)	Tel. 026 665 07 20 Natel 079 275 91 50 fehlmann@fkh.ch
Internet-Adresse	www.fkh.ch	

Dienstleistungen der FKH

Als neutrale Institution bietet die FKH ihren Mitgliedern und Kunden Dienstleistungen gemäss unten stehender Zusammenstellung an. Die FKH verfügt über eigene stationäre und mobile Hochspannungsprüfanlagen, Messeinrichtungen sowie über ein Prüflabor und ein Freiluftprüffeld.

Die angebotenen Dienstleistungen können vor Ort in elektrischen Anlagen, bei Apparateherstellern oder in der Versuchsstation Däniken ausgeführt werden.

Die wichtigsten Dienstleistungen der FKH sind in den Informationsbroschüren beschrieben, die auf der Internetseite der FKH (www.fkh.ch) abgerufen werden können. Sie sind an unseren Anlässen und auch auf Anfrage in Papierform erhältlich.

Folgende Dienstleistungen bietet die FKH an:



Auftragsarbeiten und statistische Übersicht

Neben diversen Entwicklungsprojekten und der Behandlung aktueller Fragestellungen der FKH-Mitglieder wurden im Berichtsjahr 2020 insgesamt 182 Auftragsarbeiten und 171 Aufträge für Isolierölanalysen für FKH-Mitglieder und Dritte ausgeführt, mit welchen ein Umsatz gemäss Tabelle 1 bzw. Abbildung 1 erzielt wurde.

Erlös aus Auftragsarbeiten für FKH-Mitglieder*	CHF	3'875'826	(3'405'317)
Erlös aus Auftragsarbeiten für Nichtmitglieder	CHF	737'303	(697'475)
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	CHF	950	(-)
Total gemäss FKH-Erfolgsrechnung 2020	CHF	4'614'079	(4'102'792)

Tabelle 1: Erlös aus Auftragsarbeiten (Vorjahr in Klammern)

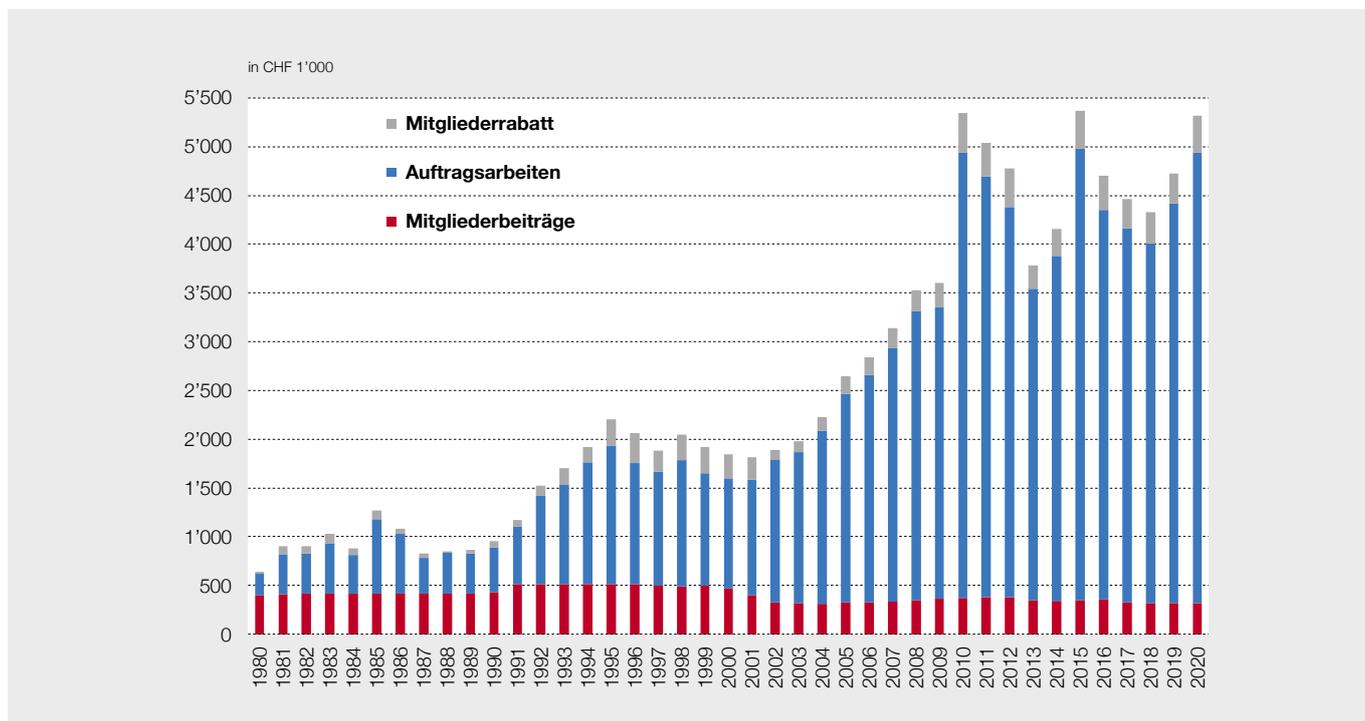


Abbildung 1: Erlös aus Auftragsarbeiten und Mitgliederbeiträgen im Zeitraum von 1980–2020

* Nettoerlös, 10% Mitgliederrabatt abgezogen

Die Auftragstätigkeit der FKH-Arbeitsgruppe für Mitglieder und Dritte im Berichtsjahr 2020 kann folgenden Gebieten zugeordnet werden. Tabelle 2 und Abbildung 2: Prozentuale Verteilung bezogen auf den erzielten Nettoerlös. Angaben aus dem Vorjahr in Klammern:

Prüfung von Hochspannungskabelanlagen	37%	(36%)
Prüfung von Transformatoren	13%	(10%)
Prüfung von Hochspannungsapparaten und Generatoren	2%	(5%)
Prüfung von GIS und Schaltanlagen	13%	(19%)
Erdungsmessungen / Nachweis von Blitzschutzmassnahmen	7%	(6%)
Typenprüfungen / Spezialversuche	1%	(4%)
Umweltfragen / EMF / Korona / EMV / Transiente Vorgänge	2%	(0%)
Beratungs- und Betreuungsaufgaben	5%	(2%)
Isolierölanalysen	20%	(18%)
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0%	(0%)

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Auftragsarbeiten im Jahr 2020 nach Dienstleistungssparten aufgeschlüsselt (Vorjahr in Klammern)

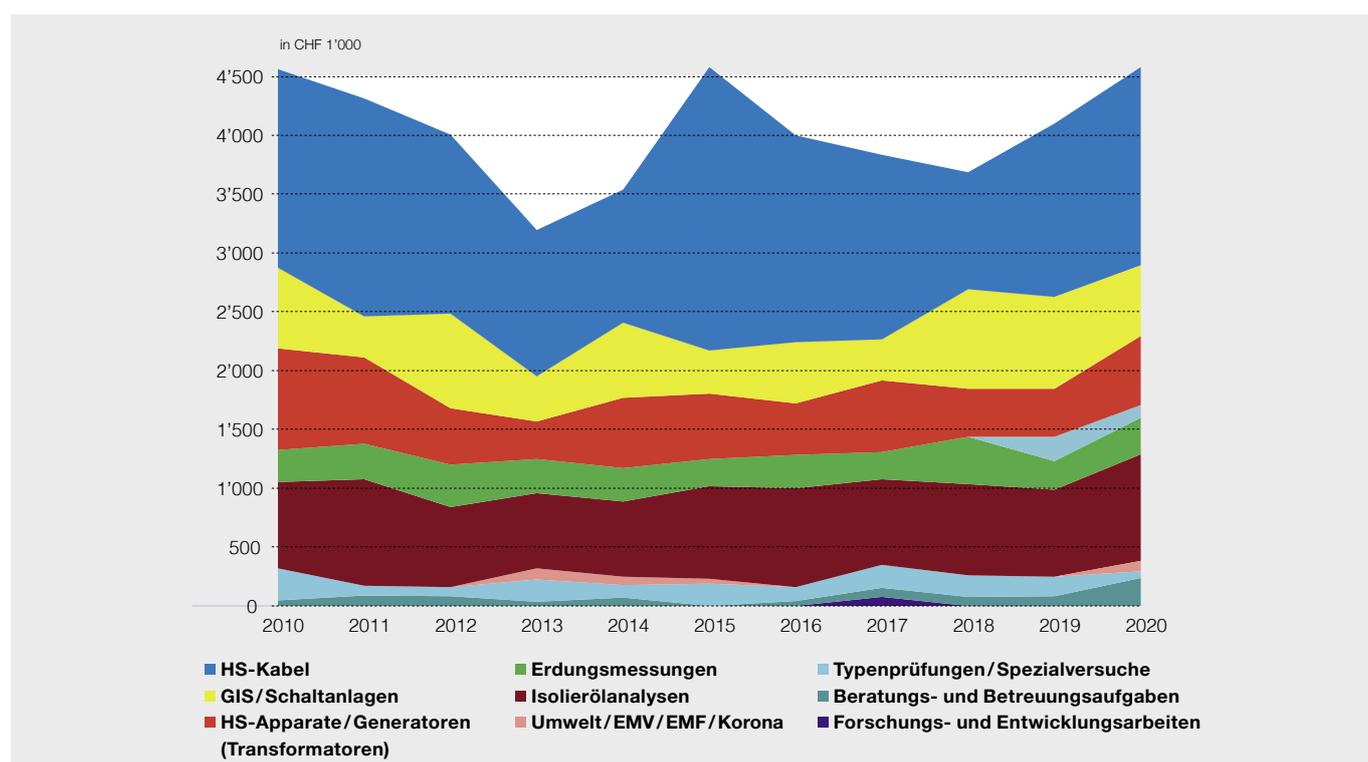


Abbildung 2: Entwicklung des Erlöses aus Auftragsarbeiten nach einzelnen Dienstleistungssparten (in CHF 1'000) über den Zeitraum von 2010–2020

40 Jahre Resonanzprüfungen, Entwicklungsschritte und Erfahrungen

Die Wechselspannungsprüfungen an Hochspannungsanlagen und -Kabelstrecken nach dem Prinzip eines Hochspannungsresonanzkreises mit abstimmbarer Frequenz wurde vor 40 Jahren gemeinsam von der ETH Zürich und der FKH entwickelt und in den folgenden Jahren von der FKH eingeführt. In diesem Beitrag wird über die Erfahrungen und die Weiterentwicklung in den vergangenen vier Jahrzehnten berichtet.

Ursprünglich war die Hochspannungs-Resonanz-Prüftechnik für Spannungstests an gasisolierten Schaltanlagen konzipiert worden. Aufgrund der hohen realisierbaren Prüfscheinleistung wurde sie aber in zunehmendem Masse auch an Kabelstrecken eingesetzt. Heute werden Serie-Resonanzprüfungen standardmässig vor Inbetriebnahme neuer Kabelanlagen, oder nach Abschluss von grösseren Umbauarbeiten, zur Kontrolle der Isolationsqualität nach der Montage durchgeführt. Insbesondere bei Kabeln der oberen Spannungsebenen, werden in Ergänzung zur Spannungsprüfung, zusätzlich Teilentladungsmessungen (TE) mit angeboten. Mit den Prüfungen sollen insbesondere Montagefehler bei Endverschlüssen oder

Kabelmuffen oder allenfalls Beschädigung des Kabelmantels oder des Halbleiterbelags ausgeschlossen werden.

Die FKH besitzt heute insgesamt ca. 35 Resonanzdrosseln mit Prüfspannungen pro Drossel zwischen 40 und 260 kV, die von der schweizerischen Firma AGEA Kull AG hergestellt worden sind. Abbildung 1 zeigt die Etappen der Entwicklung und die kontinuierliche Steigerung der Prüfkapazitäten seit der Inbetriebnahme der ersten Resonanzprüfanlage vor 40 Jahren.

Seit dem Ende des 20. Jahrhunderts werden Serie-Resonanzprüfanlagen mit abstimmbarer Frequenz auch ausserhalb der Schweiz hergestellt und betrieben. Die globale Verbreitung der Prüftechnik hat sich im Zeitraum 1995 bis 2005 vollzogen. Mit der breiten Anwendung und internationalen Anerkennung der Prüfmethode, wurden zunächst in Deutschland und schliesslich weltweit, verschiedene mobile Serie-Resonanzanlagen gebaut. Für die Prüfung von langen Hochspannungskabelstrecken mit mehreren Kilometern Länge wurden auch

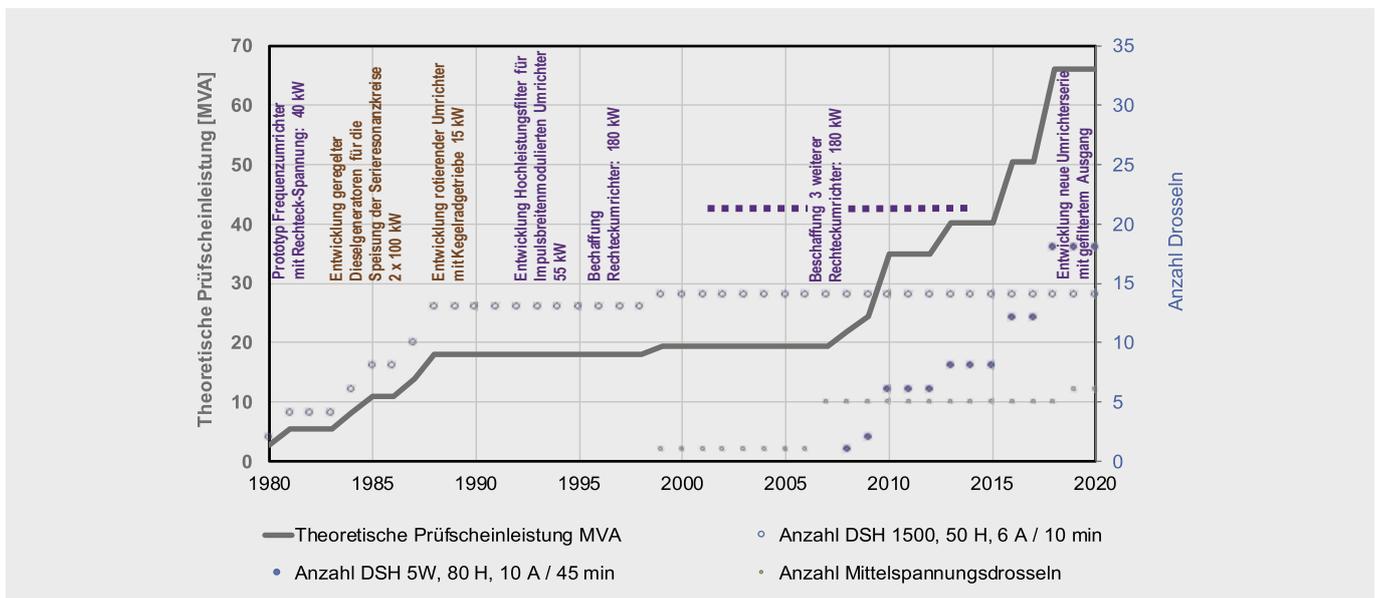


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der modularen Serie-Resonanzprüfanlagen in den vergangenen vierzig Jahren; Frequenzvariable Speisequellen, Resonanzdrosselbeschaffungen und theoretisch erreichbare maximale Prüfscheinleistung

wesentlich grössere Resonanzdrosseln in Kesselbauweise realisiert (Einheiten mit Prüfscheinleistungen bis ca. 20 MVA).

Für schweizerische Verhältnisse, insbesondere wegen der alpinen Gebiete, haben sich für die FKH die kleineren modular zusammenstellbaren Einheiten als vorteilhaft erwiesen. Entscheidend ist dabei die flexibel an die Prüfaufgabe anpassbare Drosselzahl mit der Möglichkeit von Serie- und Parallelschaltungen.

Im Jahr 2001 wurde in der Norm IEC 62067 «Extrudierte Hochspannungskabel mit U_m über 170 kV bis 550 kV» eine erste Empfehlung für Resonanzprüfungen vor Ort herausgegeben. Wohl aufgrund der Spannungsbegrenzung der grossen verfügbaren Drosseln, wurde im Verhältnis zum Isolationsdesignpegel eine sehr tiefe Prüfspannung von $1,7 U_0$ und eine Stundenprüfung festgelegt. Aus Sicht vieler Netzbetreiber, und auch der FKH, wird nach dieser Norm die Qualität der Systemisolation und der Montagearbeit nicht befriedigend überprüft.

Aufgrund langjähriger Prüferfahrung empfiehlt die FKH, Kabel in Abweichung zu IEC 60840 bzw. 62067 und in Anlehnung an CENELEC HD 632 mit höherer Prüfspannung, dafür aber während reduzierter Prüfdauer zu belasten (siehe Tabelle 1).

U / U_0	$U_{\text{prüf}}$	$U_{\text{prüf}} / U_0$	Prüfzeit
45 / 26 kV	57 kV	2,2	15 Min.
60 / 36 kV	80 kV	2,2	15 Min.
110 / 64 kV	140 kV	2,2	15 Min.
132 / 76 kV	167 kV	2,2	15 Min.
150 / 87 kV	190 kV	2,2	15 Min.
220 / 127 kV	254 kV	2,0	15 Min.
275 / 160 kV	320 kV	2,0	15 Min.
380 / 220 kV	400 kV	1,8	15 Min.

Tabelle 1: Empfohlenes Prüfverfahren in Abhängigkeit der Systemspannung

Nach diesen Regeln wurden bisher hauptsächlich in der Schweiz in wachsender Anzahl über 1'200 Resonanzprüfungen an Kabeln durchgeführt (Abbildung 2). In den Anfängen wurde ein grosser Teil auch von ausländischen EVUs bestellt. Durch die globale Verfügbarkeit der Resonanzprüfmethode, auch im Ausland, ist seit ca. 1995 zumindest der prozentuale Anteil im Ausland gesunken.

Der grösste Anteil der Kabelprüfungen betrifft über alle dargestellten Fünfjahresperioden die Spannungsebene 110/123 kV, was durch die grosse Zahl der verlegten Kabel, deren Investitionswert und die Ansprüche an die Zuverlässigkeit begründet ist. Seit 15 Jahren steigen die Prüfaufträge an, sowohl in den höheren als auch in den tieferen Spannungsebenen.

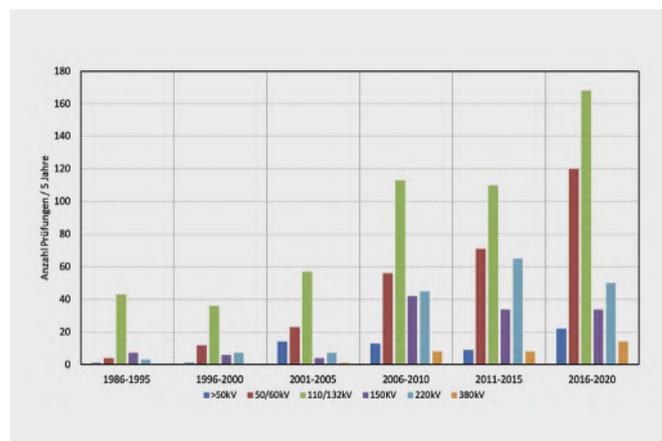


Abbildung 2: Anzahl Hochspannungskabel-Resonanzprüfungen innerhalb von 5 Jahren seit 1985 aufgeschlüsselt in Spannungsebenen

Die allermeisten Kabelprüfungen sind erfolgreich (Abbildung 3). In den letzten zwanzig Jahren wurde die Vor-Ort-Prüfspannung im Mittel von über 95% der Kabelphasen gehalten. Allfällige Durchschläge traten fast ausschliesslich aufgrund von Montagefehlern in Endverschlüssen und Muffen auf (Abbildung 4). In wenigen Fällen waren es auch Anlagenkomponenten, die bei der Kabelprüfung mitgeprüft wurden. Bei den fünf Durchschlägen direkt im Kabel war nur in einem Fall ein neues, im Kabelrohrblock verlegtes Kabel betroffen. In allen anderen Fällen wurden die Kabel schon vor der Prüfung durch äussere, mechanische Einwirkung beschädigt.

Seit den Anfängen in den Achtzigerjahren bis zur Jahrtausendwende hat sich der Anteil der Durchschläge bei Kabelprüfungen mehr als halbiert. Bemerkenswert ist allerdings der leichte Anstieg der Fehlerhäufigkeit von 3,5 auf 5,5 Prozent in den Jahren 2000 bis 2015. Dieser wird mit einem steigenden Einsatz von Steckendverschlüssen, aber auch mit dem wachsenden Preisdruck, vor allem auch bei der Montage von Kabelanlagen, in Zusammenhang gebracht. In den letzten Jahren wird tendenziell wieder eine Qualitätsverbesserung festgestellt.

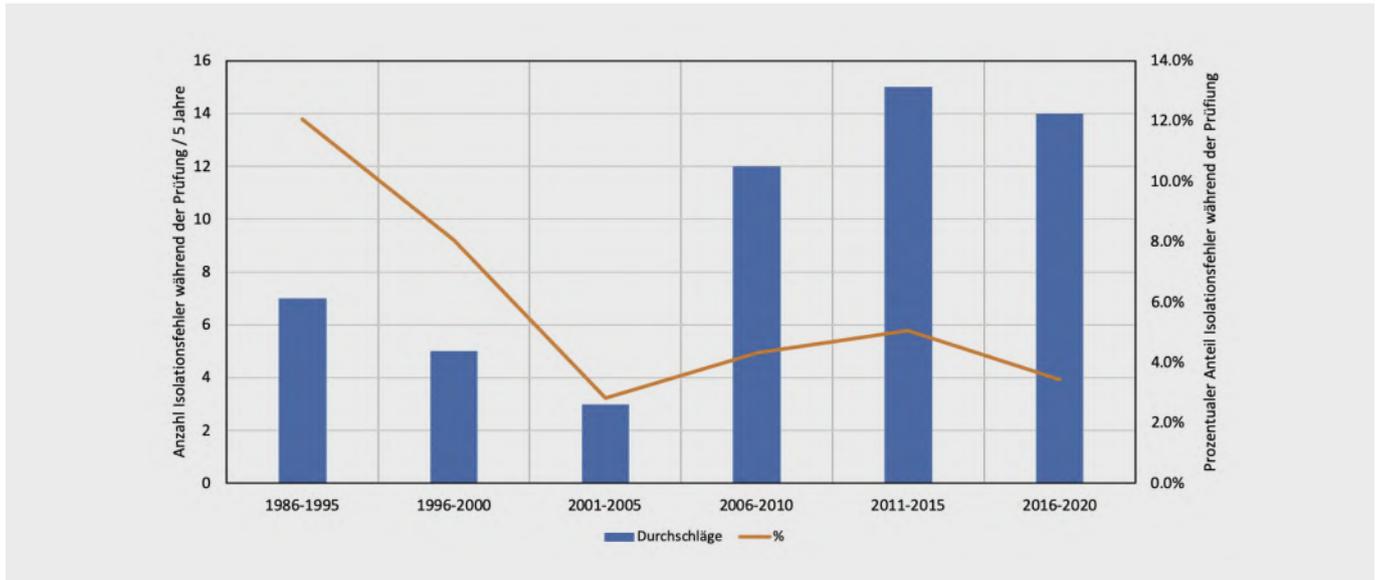


Abbildung 3: Anzahl Isolationsversagen pro geprüftes System innerhalb der dargestellten Fünfjahresperioden seit 1985 und prozentualer Anteil der Fehler

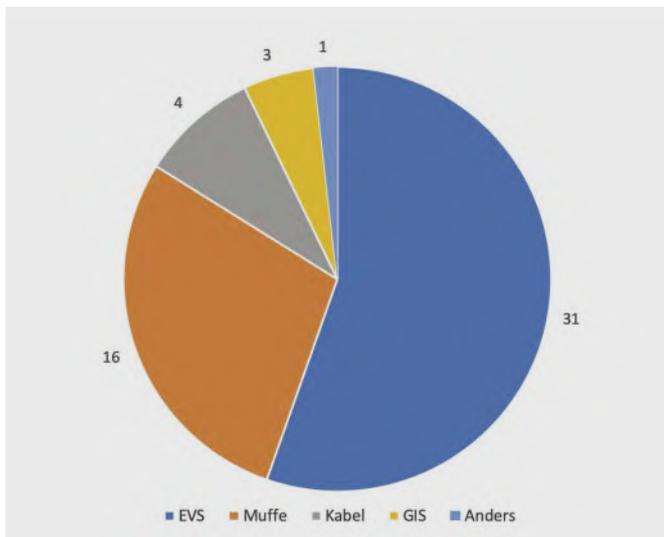


Abbildung 4: Betroffene Bestandteile einer Kabelanlage beim Durchschlag während der Serie-Resonanzprüfung einer Kabelphase

Vor allem bei Systemspannungen ab 150 kV werden Teilentladungsmessungen an den Garnituren von Hochspannungskabelsystemen empfohlen. Es ist bekannt, dass Teilentladungen in oberen Spannungen weniger tolerierbar sind und schneller zu einer Zerstörung der Isolation führen als bei niedrigeren Spannungen. Ausserdem wird aufgrund der höheren Betriebsfeldstärken nicht mehr mit einem Überspannungsfaktor von 2,2, sondern mit 2,0 ab 220 kV und 1,8 bei 400 kV geprüft. Mit einer TE-Messung wird versucht, die geringere Reserve im Nachweis der Spannungsfestigkeit durch das Sicherstellen der Teilentladungsfreiheit auch bei temporär überhöhter Spannung zu kompensieren. Aus Abbildung 5 sind die Zahlen der Teilentladungsmessungen bei

Resonanzprüfungen zu entnehmen. Erstmals angewendet wurde die TE-Prüfung an Kabelstrecken vor Ort Ende der Neunzigerjahre, nachdem auch in den hohen Spannungsniveaus eine allgemeine Ablösung der Öl-isolierten Kabel durch Kunststoffkabel stattgefunden hatte. Für kunststoffisolierte Kabel und Garnituren stellen Teilentladungen ein wesentlich höheres Ausfallsrisiko dar als für Öl-isolierte Kabel.

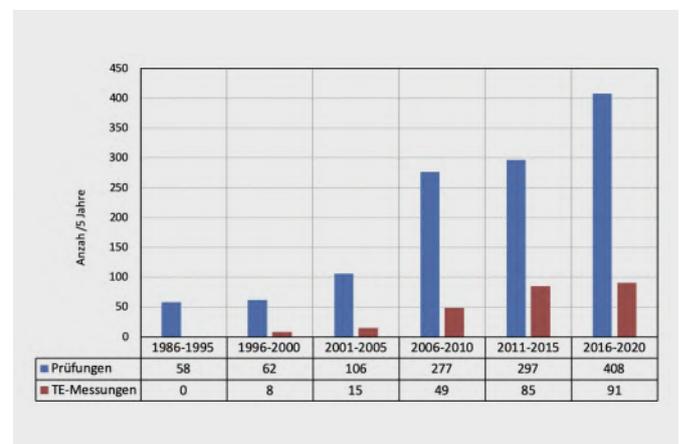


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Anzahl durchgeführter Resonanzprüfungen und der Anzahl dabei durchgeführter Teilentladungsmessungen

Tabelle 2 zeigt die Teilentladungsbefunde an den Garnituren von Kabelanlagen, wobei als Bezugswerte für die Prozentangaben nicht die Anzahl Prüfungen, sondern die Zahl der Endverschlüsse und Muffen herangezogen wurden. Durch die zunehmende Länge der verlegten Kabeltrassen nimmt auch die Anzahl Muffen über die Jahre zu. Als Teilentladungsbefunde werden solche bezeichnet, die auch eine Reparatur zur Folge hatten. Bei Endverschlüssen ist ein

Jahr	Endverschlüsse			Muffen		
	Mit TE-Messung geprüft	TE-Befunde	% Fehlerrate	Mit TE-Messung geprüft	TE-Befunde	% Fehlerrate
1986 – 1995	0	0	–	0	0	–
1996 – 2000	66	7	10,6%	18	0	0,0%
2001 – 2005	111	6	5,4%	90	0	0,0%
2006 – 2010	320	4	1,3%	87	2	2,3%
2011 – 2015	588	5	0,9%	330	0	0,0%
2016 – 2020	657	25	3,8%	429	8	1,9%

Tabelle 2: Künstliche Berechnung mit kontrollierten Parametern (Menge, Richtung und Wasserleitfähigkeit) während der AC-Spannungsprüfung

höherer prozentualer Anteil mit Befunden zu verzeichnen als bei Muffen. Dies könnte allerdings auch daran liegen, dass die Messankopplung an den allermeisten Endverschlüssen vorhanden war, dass dies aber nicht bei jeder geprüften Muffe der Fall war, weshalb die Muffen im Mittel mit einer etwas geringeren Empfindlichkeit geprüft wurden.

Von den nach den Empfehlungen in Tabelle 1 geprüften Kabelsystemen, sind innerhalb der vergangenen Jahrzehnte sehr seltene Betriebsausfälle infolge Isolationsversagen zu verzeichnen. Die Ausfallzahlen liegen im tiefen Promillebereich, bezogen auf ein Kabelsystem. Angesichts der zahlreichen Montagefehler, die bei der Inbetriebsetzungsprüfung behoben werden konnten, wird somit ersichtlich festgestellt, dass die Kabel-Resonanzprüfungen zu einer unverzichtbaren Qualitätssicherung verholfen haben, welche die Fachleute weltweit überzeugt hat.



AUTOR

Diego Friedli

Msc Eng. HES-SO
Projektingenieur



AUTOR

Günther Storf

Dipl. El.-Ing. ETH
Stv. Geschäftsführer
Projektingenieur



AUTOR

Reinhold Bräunlich

Dr. sc. techn. ETH
Geschäftsführer

Sternpunktverlagerung im gelöschten MS-Netz durch induktive Beeinflussung

Sternpunktverlagerungen in gelöschten (bzw. kompensierten) Mittelspannungsnetzen im Normalbetrieb sind ein häufiger Nachteil dieser Sternpunktbehandlung. Sie werden in unterschiedlicher Ausprägung durch asymmetrische Verteilung der Erdkapazitäten der drei Phasen oder durch kapazitive Beeinflussungen bei Freileitungen mit mehreren Übertragungssystemen hervorgerufen. In letzterem Fall entstehen je nach Abstimmung der Kompensationsdrosseln auch Resonanzüberhöhungen im Schwingkreis, der aus der Drossel und der Erdkapazität des Netzes besteht. Dies führt zu einer Verstärkung der Sternpunktverlagerung gegenüber nicht kompensierten Netzen.

Im Berichtsjahr hat die FKH einen Fall untersucht, wo erhebliche Sternpunktverlagerungen durch induktive Beeinflussung in einem kompensierten Mittelspannungskabelnetz aufgetreten waren.

Bisher sind induktive Beeinflussungen mit Resonanzerscheinungen im gelöschten Mittelspannungsnetz wenig bekannt geworden. Das Problem kann sich aber zukünftig akzentuieren, wenn vermehrt Hochspannungsleitungen verkabelt werden und streckenweise gemeinsam im Rohrblock mit Mittelspannungskabeln verlegt werden. Die auf der Hochspannungsebene eingesetzten Einleiterkabel führen zu einer wesentlichen magnetischen Beeinflussung des Mittelspannungskabels (Abbildung 1).

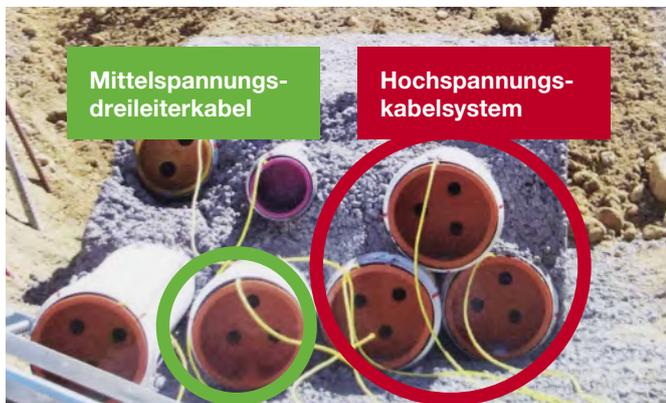


Abbildung 1: Beispiele eines Rohrblocks mit gemeinsam verlegten Mittel- und Hochspannungskabelstrecken

Abbildung 2 zeigt das Beispiel einer Situation, welche zu grossen Sternpunktverlagerungen im Mittelspannungsnetz führen kann. Auf einer längeren Mittelspannungsleitung (violett) wird von der benachbarten Hochspannungsleitung (rot strichpunktiert) eine Längsspannung induziert. Auf beiden Seiten dieser beeinflussten Strecke befinden sich Teilnetze mit den Erdkapazitäten C_1 und C_2 . Die Kompensationsdrossel befindet sich im Unterwerk (UW) auf der Seite der Erdkapazität C_2 .

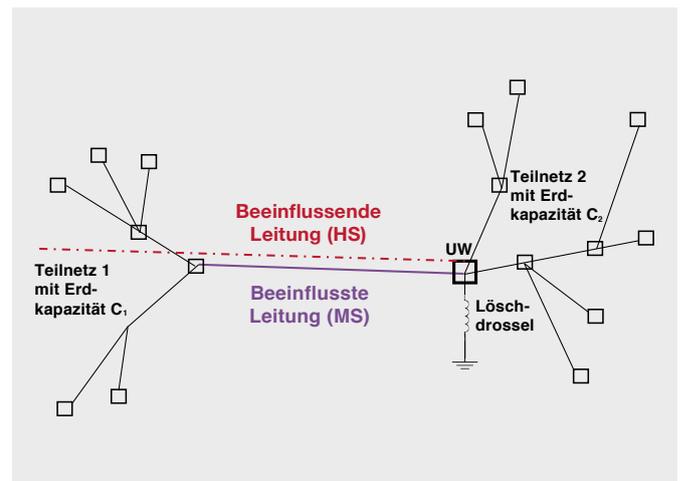


Abbildung 2: Beispiel eines kompensierten Mittelspannungsnetzes mit einer längeren Kabelstrecke, welche durch ein parallel verlegtes Hochspannungskabel magnetisch beeinflusst wird

Eine vereinfachte Ersatzschaltung hierzu wird in Abbildung 3 (links) dargestellt. Die beeinflusste Mittelspannungsstrecke wird durch eine Spannungsquelle in Serie ersetzt. Auf den ersten Blick ist nicht offensichtlich, dass hierdurch der Resonanzkreis aus Kompensationsdrossel LK und der Kapazität C_1 und C_2 angeregt wird. Die Schwingkreisenergie wird allerdings sofort ersichtlich, wenn U_i und C_1 als Spannungsquelle mit Innenimpedanz aufgefasst und diese in eine äquivalente Stromquelle umgewandelt wird (Abbildung 3, rechts). Dabei ist zu beachten, dass bei Resonanzabstimmung die Sternpunktverlagerungsspannung im ganzen Netz etwa gleich hoch ist, da diese gegenüber der induzierten Längsspannung um 90° phasenverschoben ist.

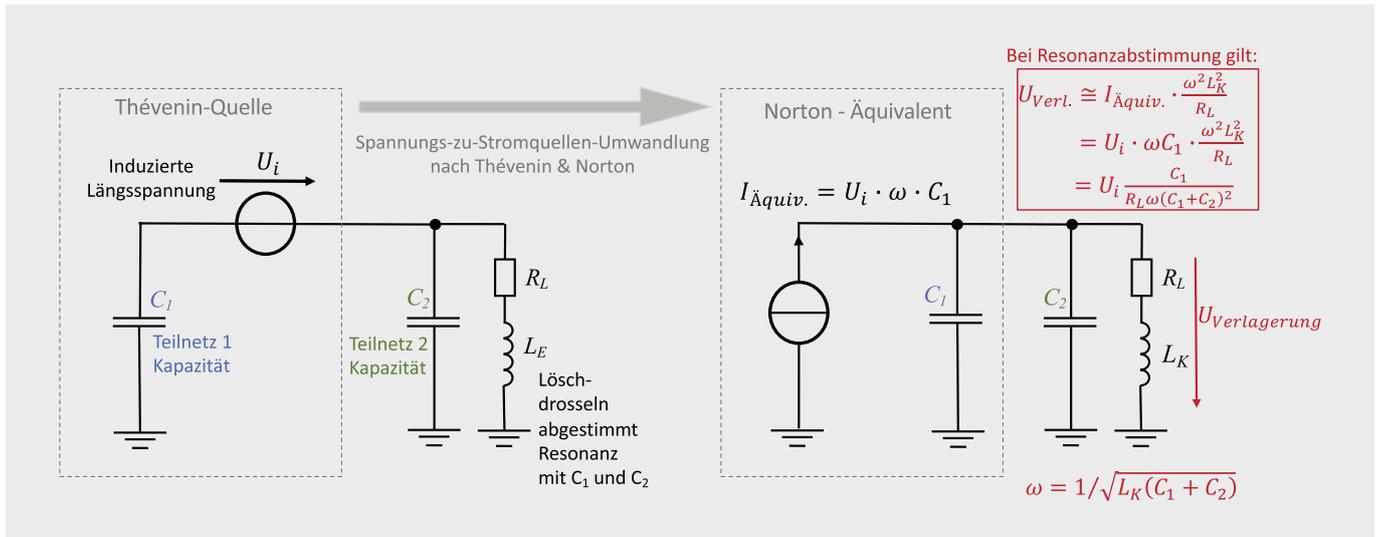


Abbildung 3: Ersatzschema der Netzkonfiguration mit magnetischer Beeinflussung von Abbildung 2 und Erklärung des Anregungsmechanismus, der zur Resonanzüberhöhung führt (vgl. auch Text)

Die Näherungsbeziehung in Abbildung 3 zeigt, dass die Verlagerungsspannung des gesamten Netzes einerseits mit der Länge der beeinflussten Leitung (steigender Wert von U_i) und andererseits mit der Teilkapazität C_1 zunimmt. Hier ist zu beachten, dass das Verhältnis von C_1 zu C_2 ausschlaggebend ist.

Es kann gezeigt werden, dass ein optimaler Netzzustand ohne Resonanzüberhöhung erreicht würde, wenn auf beiden Seiten einer beeinflussten Strecke jeweils das zugeschaltete Teilnetz, d.h. dessen Erdkapazität durch eine separate Drossel kompensiert würde.

Die Engadiner Kraftwerke AG (EKW) hat in den letzten Jahren ihre Hoch- und Mittelspannungsleitungen verkabelt, sodass rund 1'200 Strommasten rückgebaut werden können. Im Jahr 2020 wurden entsprechende Beeinflussungssituationen mit erheblicher Sternpunktverlagerung durch Resonanzüberhöhung an mehreren Stellen in den Mittelspannungsnetzen der EKW im Unterengadin untersucht. Diese traten auf, nachdem die EKW eine Hoch- und Mittelspannungskabelverbindung zwischen dem Kraftwerk Pradella bei Scuol und dem Unterwerk in Zernez in Betrieb genommen hat.

Das Phänomen trat nach der Inbetriebnahme der 110 kV-Kabelleitung zwischen Scuol-Pradella und Zernez in Erscheinung. Es waren mehr als nur zwei Teilnetze und verschiedene Netzzustände zu betrachten. Zur Ermittlung der ungünstigsten Zustände wurden deshalb auch Messkampagnen durchgeführt. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Abhängigkeiten von folgenden drei Einflussparametern:

- Einfluss der ein- oder zweiseitigen Erdung der Schirme der beeinflussten Mittelspannungskabelstrecke: Bei beidseitiger Schirmerdung ergab sich eine Reduktion der Sternpunktverlagerungsspannung von bis zu einem Faktor 3 (Abbildung 4 und 5).
- Ausmass der Über- oder Unterkompensation mit der Löschdrossel(n): Verstimmungen der Löschdrossel führen zu einer raschen Abnahme der Verlagerungsspannung (Abbildungen 4 und 5).
- Verteilung der zugeschalteten Netzgrösse (Erdkapazitäten) auf beiden Seiten der beeinflussten Strecke. (Vergleich zwischen den Abbildungen 4 und 5).

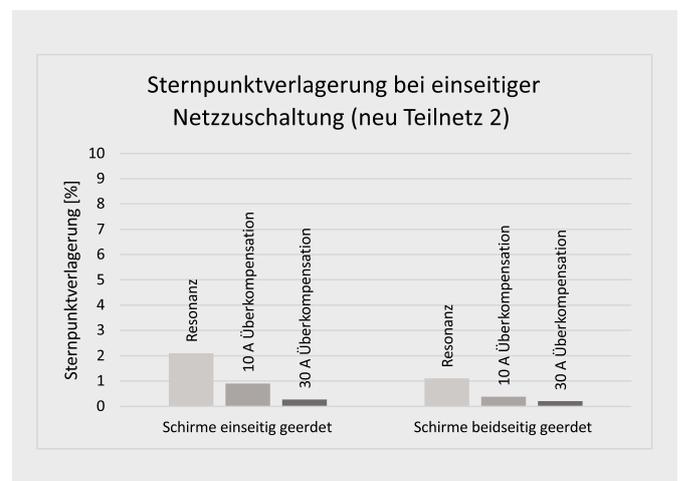


Abbildung 4: Gemessene Sternpunktverlagerungen bei ein- und zweiseitig geerdeten Kabelschirmen an der beeinflussten Strecke bei unterschiedlicher Löschdrosselverstimmung, für den Fall, dass das Teilnetz 1 auf der Seite ohne Kompensationsdrossel abgetrennt ist, das heisst, dass die Erdkapazität C_1 nur aus einem Teil der beeinflussten Leitung selbst besteht

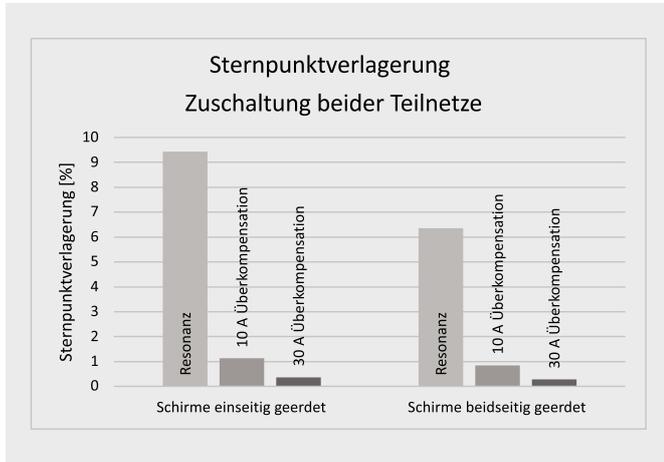


Abbildung 5: Gemessene Sternpunktverlagerungen bei ein- und zweiseitig geerdeten Kabelschirmen an der beeinflussten Strecke bei unterschiedlicher Löschrösselverstimmung für den Fall, dass die Netz-Erdkapazitäten auf beiden Seiten der beeinflussten Strecke (C_1 und C_2) ähnlich gross sind



Abbildung 6: Elektronische Quelle zur Einspeisung eines Messstroms in das Hochspannungskabel

Um reproduzierbare Beeinflussungsmessungen durchführen zu können, wurde beim ausgeschalteten Hochspannungskabel mit der elektronischen Stromquelle für Erdschlussmessströme in das Hochspannungskabel ein definierter Messstrom von ca. 100 A eingespeist. Abbildung 6 zeigt den Messanhänger mit der Stromquelle. Der Messabgriff der drei Phasenspannungen im Mittelspannungsnetz ist in Abbildung 7 zu sehen.

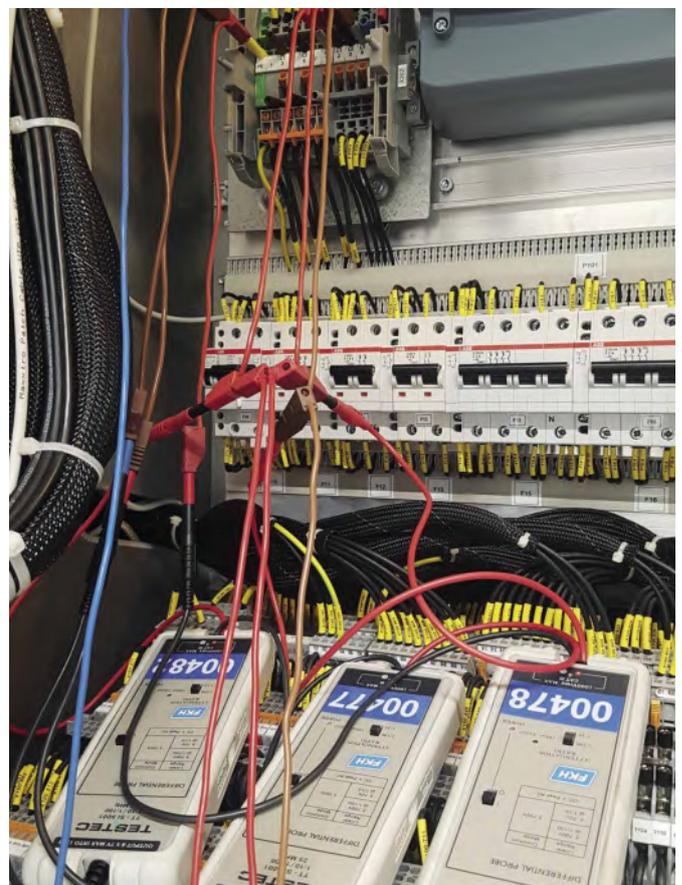


Abbildung 7: Abgriff der drei Phasenspannungen an Spannungswandlern des Mittelspannungsnetzes zur Messung der Sternpunktverlagerung



AUTOR

Martina Stadelmann
Msc ETH ETIT
Projektingenieurin

Diagnosemessungen an Trafodurchführungen

Die FKH beschäftigt sich seit bald 30 Jahren mit der Diagnostik von Leistungstransformatoren. In Zusammenarbeit mit den Hochschulen, und unterstützt durch den Forschungsfonds der Elektrizitätswerke PSEL, hat die FKH neue Diagnoseverfahren erprobt und praxistaugliche Vorgehensmethoden entwickelt. Die wichtigsten Beispiele waren die induzierten Spannungsprüfungen mit Teilentladungsmessungen (Aufdecken von möglichen dielektrischen Fehlerstellen), die



Abbildung 1: Messung des Verlustfaktors und der Kapazität an der Durchführung eines 420 kV-Maschinentransformatorpols

Frequenzganganalyse (FRA, Überprüfung geometrischer Veränderungen in den Transformatorwicklungen) und die Polarisations- und Depolarisationsstrommessung (PDC, Bestimmung der Feuchte im Zelluloseanteil der Isolation). Im Zusammenhang mit den Prüfungen am Transformatoraktivteil beschäftigt sich die FKH auch mit dem Test von Transformatordurchführungen.

Diverse Studien (wie z.B. aus der CIGRE¹) zeigen, dass ca. 15% der Ausfälle von Netz- oder Maschinentransformatoren auf Versagen der Durchführungen zu verzeichnen sind. Mit der C-tan δ -Messung können Fehlerstellen oder Alterungserscheinungen frühzeitig erkannt werden. Mit der Kapazitätzunahme können z.B. Kurzschlüsse von einer oder mehreren Lagen entdeckt werden, während die tan δ -Erkenntnisse über den Isolationszustand, die Feuchtigkeit oder schlechte Kontakte gibt.

Die Zustandsdiagnose setzt die präzise Messung der Kapazität und des Verlustfaktors voraus.

Die stetigen Bemühungen der Energieversorger die Betriebssicherheit von Hochspannungsapparaten zu erhöhen, der Trend zu zustandsorientierter Instandhaltung, und nicht zuletzt auch die Entwicklungen von portablen Messgeräten, fördern die Nachfrage für Vor-Ort-Diagnosen. Dazu gehören u.a. Prüfquellen mit hochpräzisen Messbrücken, welche C-tan δ -Messungen mit Spannungen bis zu 15 kV ermöglichen. Mit diesen Messgeräten lassen sich Transformator-Durchführungen vor Ort mit relativ geringem Aufwand prüfen. Abbildung 1 zeigt Beispiele von Prüfquellen.

¹CIGRE Brochure 642: Transformer Reliability Survey, December 2015

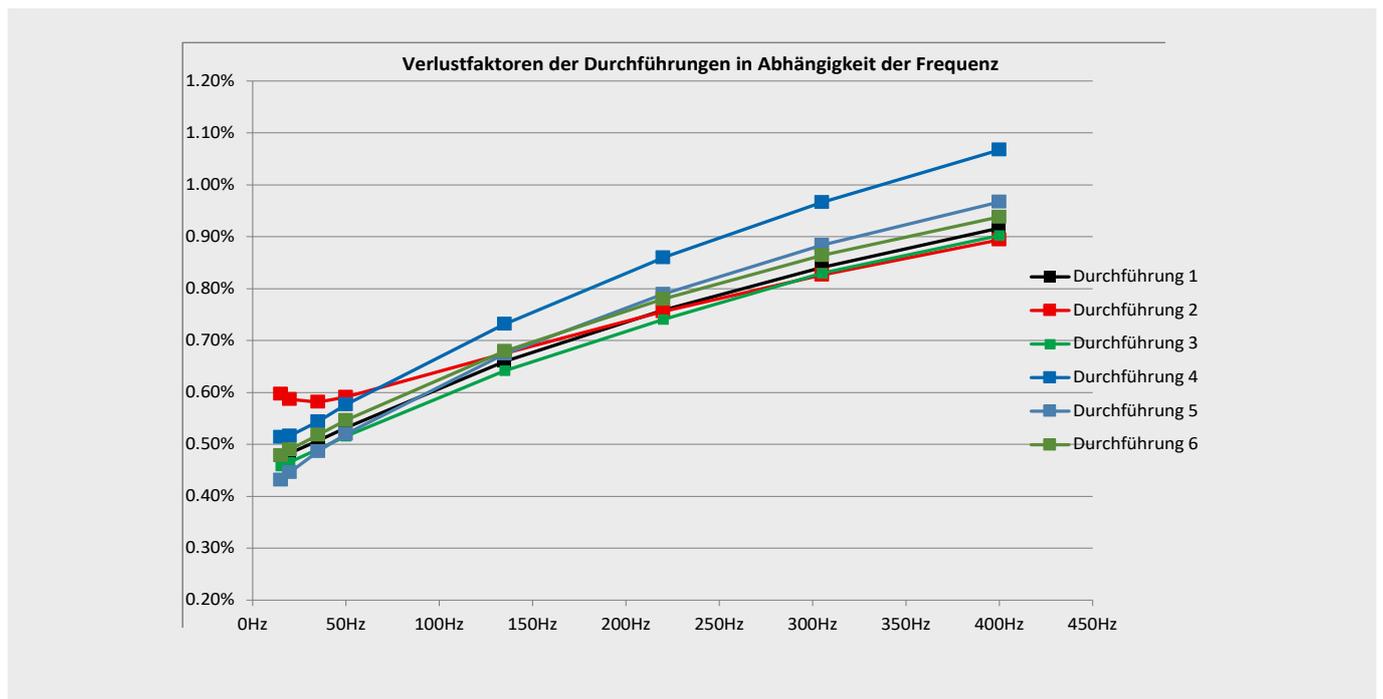


Abbildung 2: Verlustfaktoren in Abhängigkeit der Frequenz

Um die Messung durchführen, und den Zustand möglichst präzise einschätzen zu können, müssen folgende Rahmenbedingungen erfüllt sein:

- Die Durchführungen müssen über einen Messanschluss verfügen, der auch zugänglich ist (nicht immer der Fall bei Öl-Öl-Durchführungen!).
- Die Durchführungsoberfläche muss sauber sein.
- Es müssen trockene Bedingungen herrschen.
- Die Referenzwerte aus der Werksabnahme müssen bekannt sein.

Ein Beispiel in Abbildung 2 zeigt die Verlustfaktoren von sechs baugleichen Durchführungen von gleichem Alter. Der Verlauf des Verlustfaktors der Durchführung 2 (rote Kurve) deutet auf eine leichte Zunahme der Feuchte hin. In diesem Fall wird die Durchführung aber weiterhin noch als betriebssicher eingestuft.



AUTOR

Pascal Fehlmann

Dipl. El.-Ing. FH
Projektingenieur



AUTOR

Vahe Der Houhnessian

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur

Netzqualitätsmessungen als Grundlage für die Netzplanung

In den letzten Jahren gab es bei der FKH einen wachsenden Bedarf an Netzqualitätsmessungen in den höchsten Netzebenen. Der hauptsächliche Treiber dieser Entwicklung ist die zunehmende Verbreitung von Betriebsmitteln, die über Leistungselektronik mit nicht-linearer Stromspannungskennlinie 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. Lichtbogenöfen oder Gleichrichteranlagen ebenfalls eine Unzahl «elektronischer» Geräte (Frequenzumrichter-gespeiste Motoren in Industrie und Verkehr, LED-Leuchtmittel, Schaltnetzgeräte usw.) dazugekommen. Daneben gibt es im Übertragungsnetz selbst immer mehr Leistungselektronik, z.B. in Form von HGÜ-Konverterstationen oder statischen Frequenzumrichtern zur Netzkopplung oder Blindleistungskompensation. Weitere Trends, welche die Sicherstellung der Netzqualität auf der Hoch- und Höchstspannungsebene herausfordernd machen, sind Abnahme von netzstabilisierender, rotierender Masse mit damit verbundener möglicher Abnahme von Kurzschlussleistungen, Zunahme von Harmonischen höherer Ordnung (Supraharmonische), zunehmender Verkabelungsgrad und Leistungsübertragung über grosse Distanzen.

Vor diesem Hintergrund sind insbesondere Oberwellen von Interesse, die zu erhöhten thermischen Verlusten in Transformatoren, Kabeln oder Generatoren, sowie zu Isolations- oder EMV-Problemen führen können.

Konventionelle induktive Spannungswandler sind in der Regel für eine präzise Messung bei Nennfrequenz ausgelegt, haben aber aufgrund von tiefen Resonanzstellen keine ausreichende Bandbreite für die Oberschwingungsmessung (Abbildung 1).

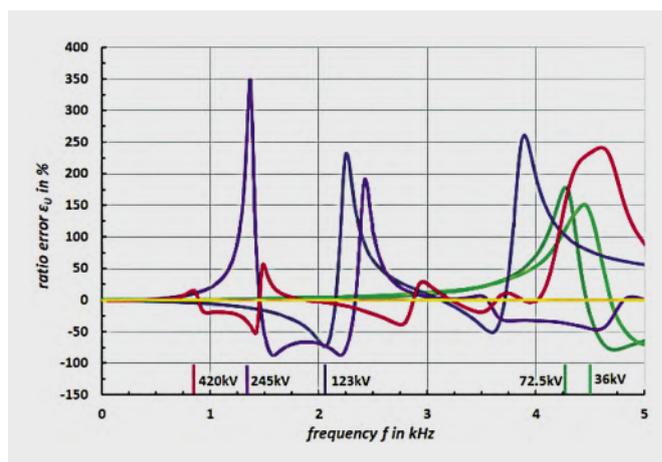


Abbildung 1: Frequenz-Abhängigkeit der Spannungsübersetzung von induktiven Spannungswandlern mit maximalen Abweichungen in Resonanzstellen (Quelle: Pfiffner)

RC-Teiler können auch höhere Frequenzen übertragen und werden deshalb an wichtigen Netzknotenpunkten schon eingesetzt.

Eine breitbandige Spannungsmessung ist auch an den in vielen Unterwerken vorhandenen Transformator-Durchführungen mit kapazitiven Messabgriffen möglich. Durch geeignete Beschaltung des Messabgriffs mit einer Sekundärkapazität, wird ein kapazitiver Teiler gebildet, der die sichere Messung der Hochspannung mit grosser Bandbreite bis in den hohen kHz-Bereich erlaubt. Die Installation und der Rückbau des Messsystems sind temporär und ohne bauliche Änderungen am Transformator möglich.

In Abbildung 2 ist ein 380/150 kV-Transformator zu sehen, dessen Durchführungen für eine einwöchige Netzqualitätsmessung ausgerüstet wurden. Neben den Sekundärkapazitäten für die Spannungsmessung wurden Rogowski-Spulen

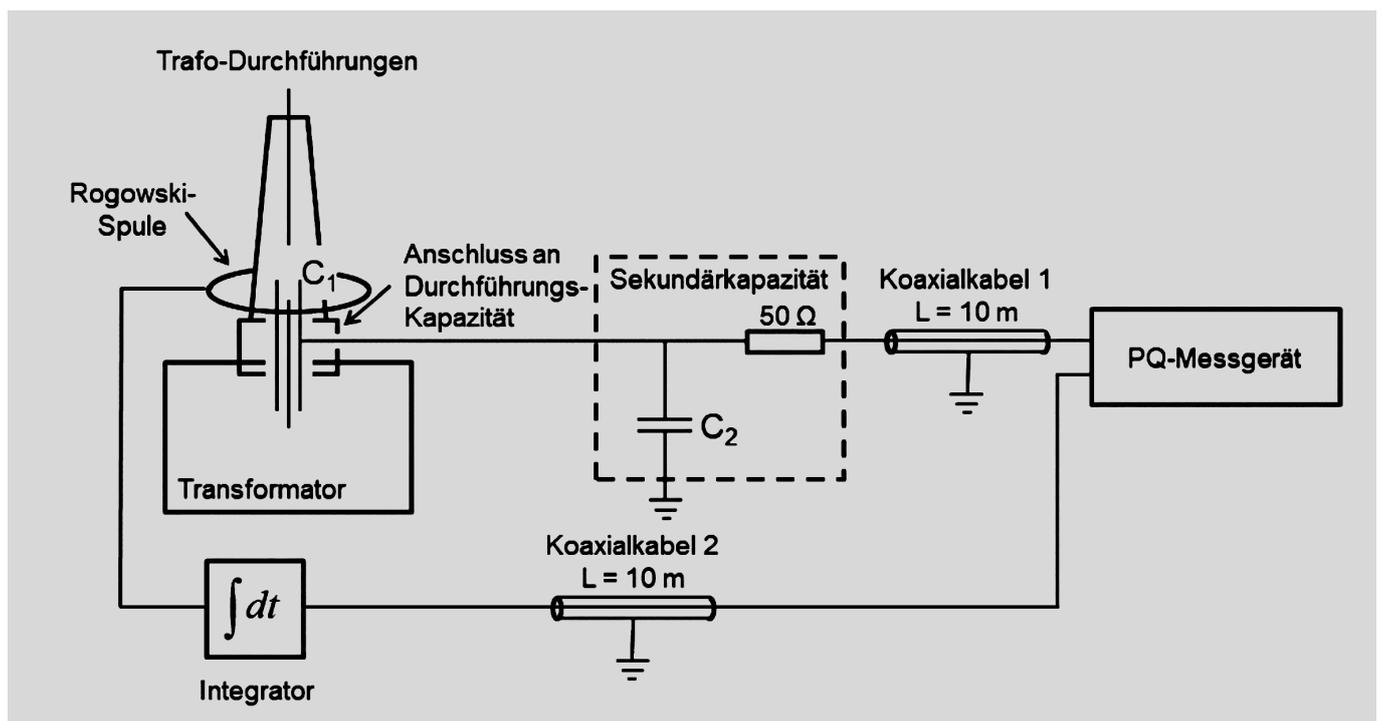
um den Flansch der Durchführung gelegt, womit auch die fließenden Ströme mit hoher Bandbreite (ca. 20 kHz) erfasst wurden. Die Installation, bzw. der Rückbau, bedingte dabei jeweils eine Ausschaltung für ca. eine Stunde.



Abbildung 2:
Oben links: 380/150 kV-Transformator mit 380 kV-Durchführungen (der rote Kreis markiert die Position der Messanschlüsse)

Oben rechts: Messanschluss mit angeschlossener Sekundärkapazität und Rogowski-Spule

Unten: Schematischer Messaufbau



Die aufgezeichneten Daten werden nach der Messung analysiert und dargestellt. In Abbildung 3 ist beispielsweise das harmonische Spektrum einer einwöchigen Messperiode dargestellt. Weitere Auswertungen können den Zeitverlauf der Harmonischen und damit die Abhängigkeit von ausgewählten Netzzuständen umfassen.

Falls in einem Unterwerk keine Trafodurchführungen für eine kapazitive Spannungsmessung zur Verfügung stehen, gibt es weitere Möglichkeiten einer breitbandigen Spannungsmessung. 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 4).

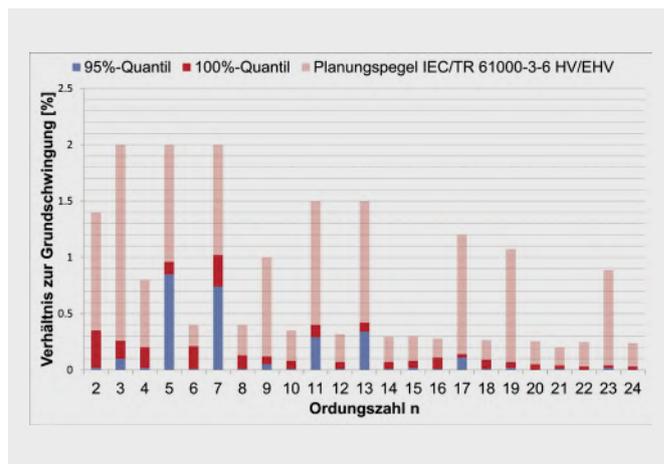


Abbildung 3: Spektrum der harmonischen Spannungen aus einer Netzqualitätsmessung der FKH im Hochspannungsnetz

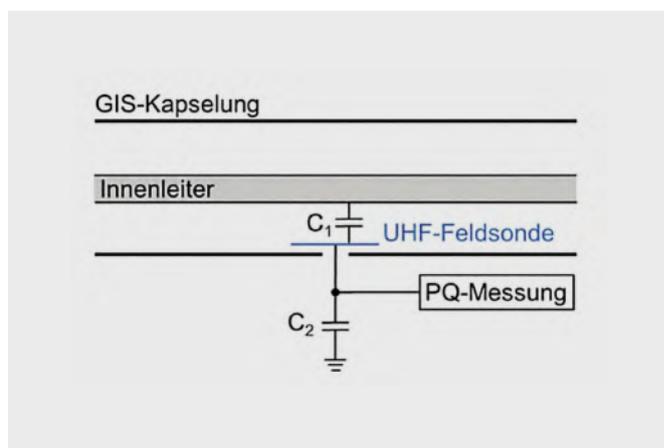


Abbildung 4: Kapazitive Spannungsmessung an einer GIS-UHF-Feldsonde

Eine weitere Möglichkeit zur Spannungsmessung sind Feldplatten, d.h. grössere metallische Platten, die in der Nähe von geeigneten spannungsführenden Teilen, z.B. luftisolierten Sammelschienen, aufgestellt werden und so dem elektrischen Feld ausgesetzt sind (Abbildung 5).

Durch Beschaltung der isoliert aufgestellten Feldplatten mit Sekundärkapazitäten kann auch so ein breitbandiges Spannungssignal gewonnen werden, welches für eine Netzqualitätsmessung verwendet werden kann. Zu beachten ist hier natürlich der Einfluss der Nachbarphasen.

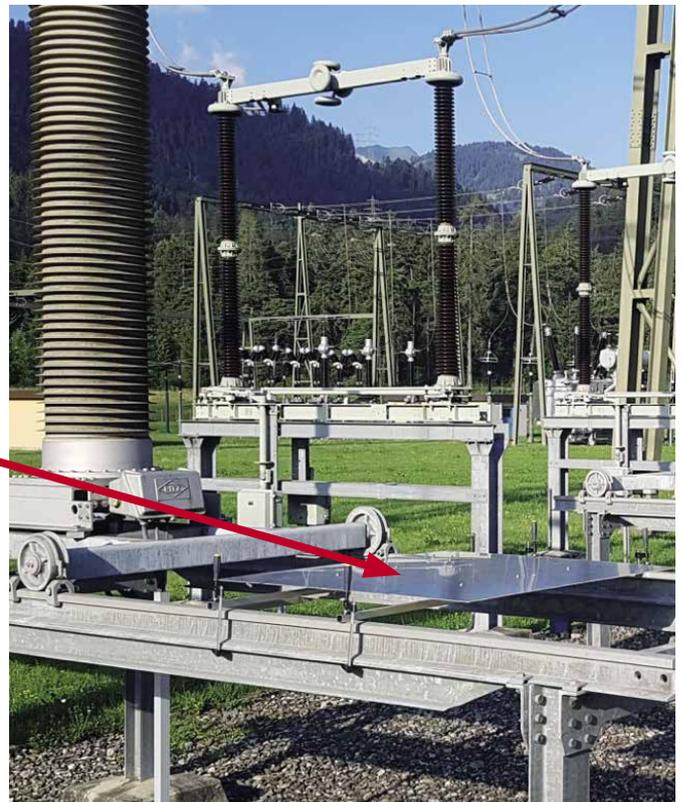
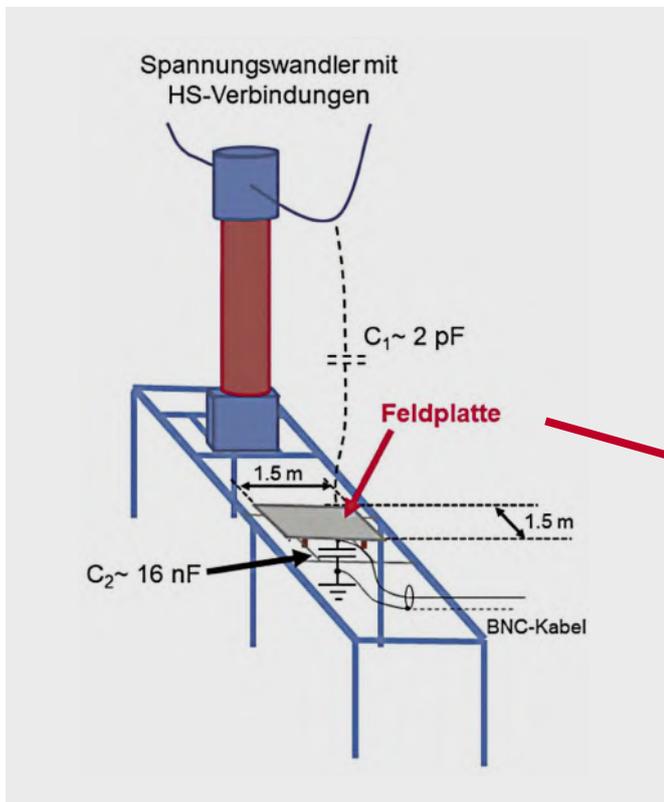


Abbildung 5: Aufstellung der Feldplatte schematisch (links) und bei einer Messung der FKH (rechts)



AUTOR

Thomas Brügger

Dr. sc. ETH
Projektingenieur

Hochstromprüfung additiv gefertigter Anschlussklemmen

Aufgrund langer Lieferzeiten von Ersatzmaterial bei einem Klemmenausfall im Betrieb, zieht die Axpo Grid AG den Ersatz durch additiv gefertigte Klemmen in Betracht. Vor einem ersten Einsatz ist es wichtig, die Eigenschaften der Klemmen aus dem 3D-Drucker mit denjenigen einer konventionellen Klemme zu vergleichen. [1]

In der Versuchsstation der FKH in Däniken wurden zu diesem Zweck Hochstromversuche mit Temperaturoaufzeichnung durchgeführt, bei der das Temperaturverhalten einer konventionellen mit demjenigen einer gedruckten Klemme der gleichen Art verglichen wurde.

Bei den drei Erwärmungsprüfungen wurden die Klemmen mit einem Strom von bis zu 3000 A belastet (siehe Abbildung 1). Die Temperaturen an verschiedenen Stellen bei den Klemmen wurden mithilfe dreier Sonden (siehe Abbildung 2) bestimmt, sowie der Spannungsabfall über der Klemme abgegriffen. Zusätzlich konnten mithilfe einer Wärmebildkamera qualitativ die Temperaturen der beiden Klemmen verglichen werden (siehe Abbildung 3). Es wurde auf eine Kalibration der Kamera verzichtet.

Die drei Wärmeläufe des Hochstromversuchs mit Temperaturüberwachung mit einer konventionellen und einer additiv gefertigten Klemme im selben Stromkreis haben gezeigt, dass sich die konventionelle Klemme schneller erhitze als die gedruckte. In allen drei Fällen waren die Temperaturzunahmen und auch die Widerstandszunahme (über Spannungsmessung) für die konventionelle Klemme grösser ausgefallen.

Obwohl die Prüfungen weder eine Aussage über allfällige Exemplarstreuung noch über das Langzeitverhalten zulassen, haben sie gezeigt, dass mit additiver Fertigungstechnik Klemmen herstellbar sind, die bezüglich elektrischen und thermischen Eigenschaften den konventionellen Klemmen mindestens ebenbürtig sind.

Referenzen

- [1] G. Santner, «Ersatzklemme aus dem 3D-Drucker», Bulletin.ch, Ausgabe 9/2020



Abbildung 1: Aufbau für Erwärmungsprüfung

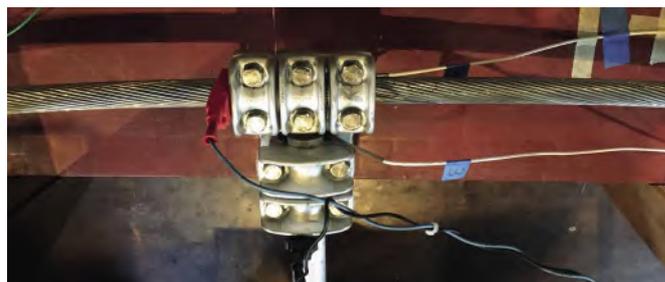


Abbildung 2: Klemme mit drei Temperatursensoren und Spannungsabgriffen



Abbildung 3: Qualitative Wärmebildkameraaufnahme des Prüfaufbaus



AUTOR

Martina Stadelmann

Msc ETH ETIT
Projektingenieurin

Limiten der Quantifizierung von Teilentladungen

Die Teilentladungsmessung ist zum Standard für nicht zerstörende Prüfungen von Hochspannungs-Betriebsmitteln geworden und ermöglicht Defekte in der Isolation zu erkennen und zu entfernen, bevor sie zu einem Durchschlag im Betrieb führen.

Die konventionelle TE-Messung, bei welcher eine kleine Ladungsmenge (pC) erfasst wird, wurde für die Anwendung im Labor und für die Qualitätssicherung in der Fabrik entwickelt und unter anderem in der IEC 60270 standardisiert [1]. Die Messempfindlichkeit einer TE-Messung, und damit ihre Aussagekraft, hängt im Wesentlichen von der lokal vorherrschenden Störsignalsituation und dem verwendeten TE-Messkreis ab. Damit auch für den Betrieb kritische Defekte mit kleinem TE-Pegel klar detektiert werden können, muss ein möglichst tiefer Grundstörpegel für die Messung erreicht werden.

Um den TE-Grundstörpegel für Labore oder Endprüfungen von Hochspannungs-Betriebsmitteln auf ein akzeptables Mass zu senken, sind aufgrund der Vielzahl von elektrischen Einrichtungen in den Fabriken zumeist aufwendige Massnahmen wie elektrische Abschirmung, Netzfilterung und zusätzliche Erdung notwendig.

Grundstörpegel deutlich unter 1 pC bei der Fabrikprüfung sind zum Beispiel für gasisolierte Schaltanlagen die Regel. Bei der Vor-Ort Prüfung von GIS sind zum einen die Möglichkeiten der Grundstörpegel-Reduzierung sehr eingeschränkt, zum anderen steigt der Einfluss von Störungen aufgrund des viel grösseren Prüfobjektes, verglichen mit den Montageeinheiten in der Fabrik.

Deshalb wurde in den Achtzigerjahren damit begonnen Hochfrequenz-Messmethoden für die TE-Messung von GIS vor Ort anzuwenden, um eine aufwendige Blitzstossprüfung zu ersetzen [2]. Dabei wurden mithilfe von eingebauten Feldsonden die

elektromagnetischen Wellen von Teilentladungen aufgefangen und ausgewertet – ähnlich zu einem Radioempfänger. Dieses als UHF-TE-Messung bekannte Verfahren ist mittlerweile zum Standard bei Vor-Ort-Prüfungen geworden.

Eine sorgfältige Bewertung von Teilentladungsergebnissen erfordert sehr viel Erfahrung und eine gute Datenbasis, da aufgrund der stochastischen Natur der Signale sehr unterschiedliche Signalmuster auftreten können – selbst innerhalb eines Fehlertyps. Für die Fabrikprüfung wurde dies durch das Festlegen eines Akzeptanzwertes, wie z.B. ≤ 5 pC, stark vereinfacht [1].

Die korrekte Quantifizierung der TE gemäss IEC, unabhängig vom Ort innerhalb eines Prüflings ist abhängig vom Aufbau des Prüflings, des TE-Messkreises und der verwendeten TE-Messbandbreite.

In Abbildung 1 sind schematisch die Frequenzspektren von TE-Pulsen bei einer Messung nach IEC (< 1 MHz) dargestellt (blaue Flächen S1, S2). Über diese Frequenzspektren wird nun die Messbandbreite des TE-Messgerätes gelegt (grüne, rote Flächen).

Zur korrekten Quantifizierung muss die TE-Messbandbreite im konstanten Teil des Spektrums liegen, in dem die Amplitude A unabhängig von der Frequenz f ist.

Auf der Darstellung links ist dies der Fall. Die Situation wird für einfach aufgebaute Prüflinge wie z.B. GIS-Montageeinheiten für die zulässigen Messbandbreiten unterhalb von 1 MHz gemäss IEC gut erreicht.

Wird dieselbe TE-Messbandbreite für das TE-Signal S2 in der Mitte angewendet (mit einer tieferen Grenzfrequenz f_{g2} als Signal S1) ist dies nicht mehr der Fall – die Teilentladung würde also zu tief bewertet aufgrund der gedämpften Amplituden der höheren Frequenzen.

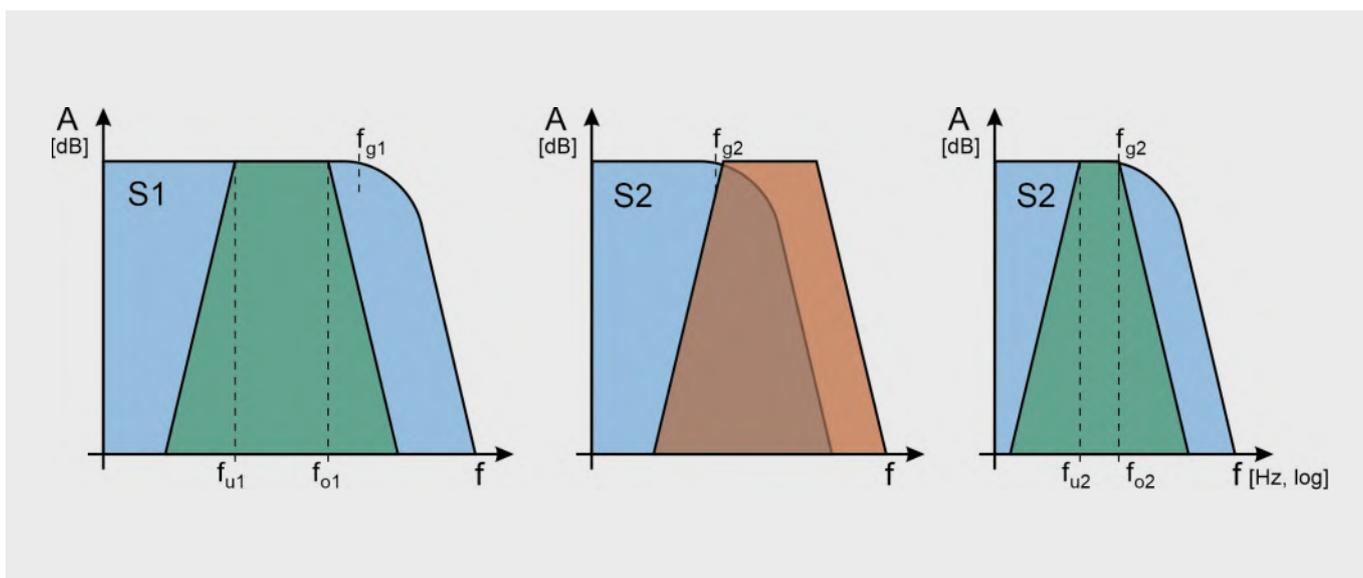


Abbildung 1: Korrekte Quantifizierung von TE: Anpassung der Messbandbreite an die Signalbandbreite notwendig

Diese Problematik stellt sich z.B. bei Teilentladungen in Transformatorwicklungen und erfordert nach Möglichkeit eine entsprechende Anpassung der Messbandbreite hin zu tieferen Frequenzen (Darstellung oben).

Der Versuch der Vereinfachung der TE-Bewertung bei Vor-Ort-Prüfungen durch eine Quantifizierung der UHF-TE-Signale, scheitert an der Physik der Signalausbreitung bei diesen Frequenzen.

Die sehr kurzen Anstiegszeiten von Teilentladungen in GIS im Bereich von 25 psec, ergeben Grenzfrequenzen von ca. 15 GHz, sehr lokal bei der TE-Quelle. Aus praktischen Gründen wird bei der UHF-TE-Messung der Frequenzbereich von ca. 100 MHz bis 2 GHz ausgewertet. Damit wäre zwar die Bedingung gemäss der Figur links in Abbildung 1 bestens erfüllt. Aber da die Wellenlängen dieser Frequenzen im Bereich der GIS-Dimensionen liegen, führt dies zu starken Resonanzen und Auslöschungen von TE-Signal-Anteilen je nach der inneren

GIS-Geometrie, entlang des Signalpfades zum UHF-TE-Sensor. Das Resultat ist ein alles andere als ein konstanter Frequenzgang zwischen der TE-Quelle und dem TE-Sensor.

In der Figur 2 ist z.B. die Signalübertragung zwischen Punkt B und C2 in einer GIS dargestellt (grüne Fläche, rechts), welche je nach Messfrequenz stark unterschiedlich ist [3]. Der Ort der TE-Quelle innerhalb der GIS hat einen sehr grossen Einfluss auf das an einem bestimmten UHF-TE-Sensor messbare Signal. Dies ist ebenfalls in Figur 2 in einem Beispiel dargestellt.

Der Signalpfad zwischen den Positionen A und C1 ist praktisch identisch zum Signalpfad zwischen B und C2 (Messung von der Sammelschiene zum Abgang). Sogar in Fällen, wo der Unterschied der Signalpfadlänge weniger als 5% beträgt, kann aufgrund der leicht verschobenen Position der Signalquelle eine Abnahme der Signalstärke von ca. 17 dB (50:1) festgestellt werden!

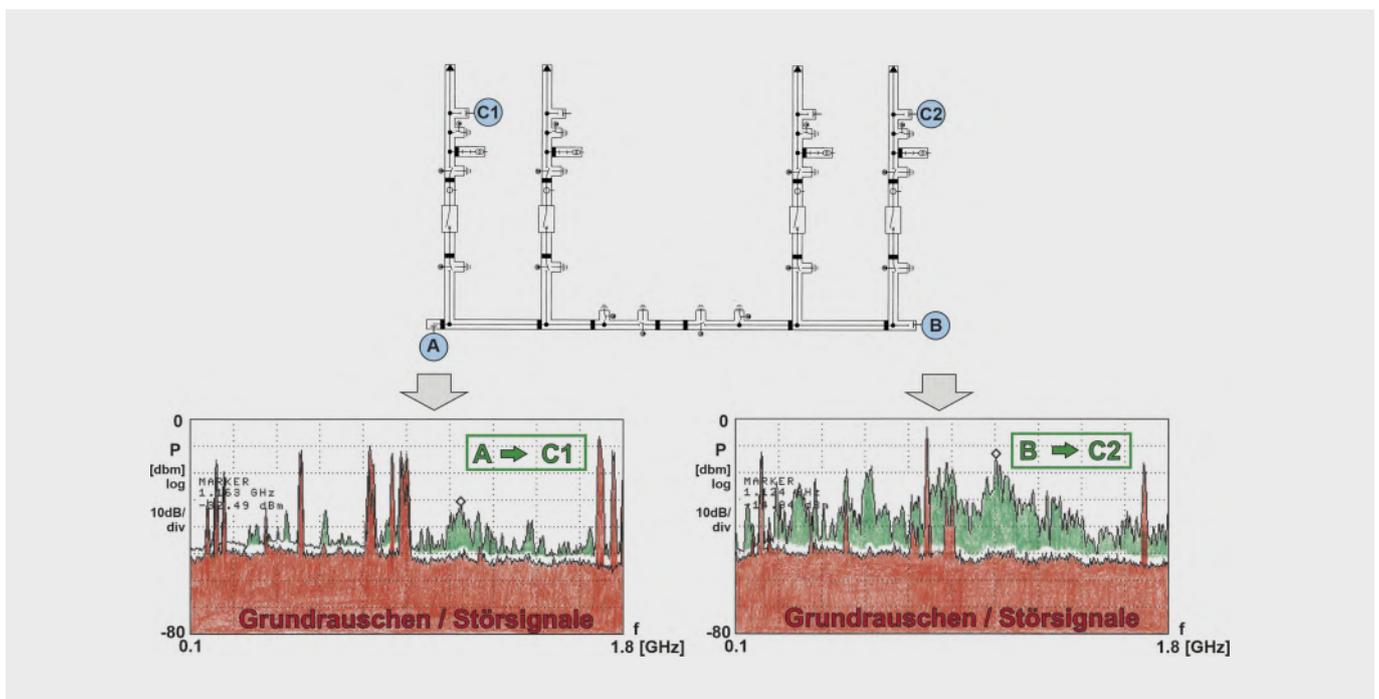


Abbildung 2: Beispiel für den Einfluss einer geringfügigen Verschiebung der TE-Signalquelle auf die gemessenen Signalstärken in GIS [3]

Es ist noch anzufügen, dass unterschiedliche Defekt-Typen mit gleichem TE-Pegel in pC bei einer IEC-Messung sehr unterschiedliche Signalstärken im UHF-Bereich aufweisen können [3].

Das Thema der Quantifizierung von Teilentladung relativiert sich, wenn die Betriebsgefährdung durch Defekte betrachtet wird. So können auch Defekte mit deutlich geringerem TE-Pegel als 5 pC, klassisch gemessen, eine kritische Schwächung der Isolationsfestigkeit und damit eine Betriebsgefährdung darstellen. Beispiele sind Spitzen an Hochspannung mit Längen im Bereich von 1 mm und TE-Pegel von 1–2 pC oder Partikel auf Isolatoren mit Längen im Bereich von 2 mm und TE-Pegel von ca. 0,5 pC, welche die Blitzstossfestigkeit um 50% reduzieren können. Dies, ohne bei einer 100%-Wechselspannungsprüfung zum Durchschlag zu führen.

Die UHF-TE-Messung kann zwar nicht kalibriert werden, dafür ist sie oft empfindlicher als die klassische TE-Messung und ermöglicht z.B. die oben erwähnten kritischen Defekte selbst unter den schwierigen Störsignalbedingungen vor Ort detektieren zu können. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Lokalisierung der TE-Quelle mittels Laufzeitmessung. Da die Reichweite der UHF-TE-Sensoren beschränkt und sehr vom GIS-Aufbau abhängig ist, wird vor einer Vor-Ort-Prüfung die erforderliche Sensorabdeckung der gesamten GIS-Anlage mit dem CIGRE-Empfindlichkeits-Check überprüft [4].

Abbildung 3 zeigt die UHF-TE-Messeinrichtung der FKH (klassische Schmalband-UHF-Methode mit visueller Auswahl der Messfrequenz) inklusive der Laufzeitmessung für Signalbandbreiten bis 2 GHz zur genauen Ortung von Teilentladungen. Es lohnt sich also, eine sehr empfindliche TE-Messung durchzuführen (insbesondere bei der Abnahmeprüfung vor Ort), um TE-Quellen unabhängig von ihrer Signalamplitude klar zu erkennen, zu lokalisieren und nach Möglichkeit beheben zu können.

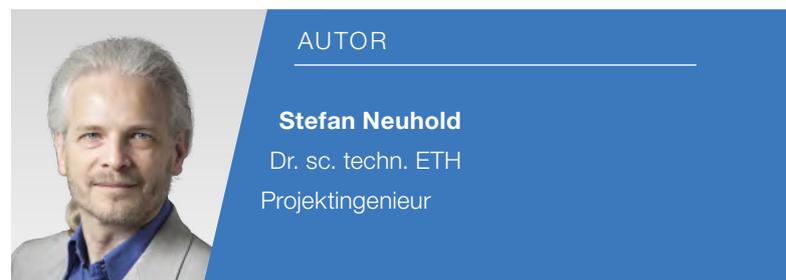
Detailliertere Informationen zum behandelten Thema sind in der Publikation «Limitations of Attempting Calibration of Partial Discharge Measurements in VHF und UHF Ranges» enthalten [3].



Abbildung 3: UHF-TE-Messsystem der FKH inklusive Laufzeitmessung zur Ortung von TE

Referenzen

- [1] Internationale Norm IEC 60270, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, IEC, Geneva, November 2015
- [2] Hampton B.F., Meats R.J.; Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations (IEE Proceedings C – Generation, Transmission and Distribution, Year 1988, Volume 135, Issue: 2, pages 137–145)
- [3] Behrmann G.J., Gross D., Neuhold S.; Limitations of Attempting Calibration of Partial Discharge Measurements in VHF and UHF Ranges; IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP; East Rutherford, USA, 2020
- [4] CIGRE Brochure 654; Working Group D1.25; Schichler U., Koltunowicz W., Gautschi D., Girodet A., Hama H., Lopez-Roldan J., Neuhold S., Neumann C., Okabe S., Pearson J., Pietsch R., Riechert U., Tenbohlen S.; UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification, April 2016



AUTOR

Stefan Neuhold

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur

Erneuerung der 150 kV-GIS-Katz von ewz – Abnahmeprüfung vor Ort

Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ewz hat im Berichtsjahr die 150 kV-GIS in der Unterstation Katz aus dem Jahr 1977 durch eine neue Anlage ersetzt. Die FKH war beauftragt die Hochspannungs-Abnahmeprüfung vor Ort durchzuführen.

Der Ersatz einer gasisolierten Schaltanlage bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Betriebes erfordert ein etapiertes Vorgehen bei Inbetriebnahme und Prüfungen. Abbildung 1 zeigt die ersetzte Anlage, bei welcher bei einer Erweiterung im vordersten Feld (hinter den Reservepolen) bereits Leistungsschalter einer nachfolgenden Generation eingesetzt wurden.



Abbildung 1: Unterwerk Katz, 150 kV-GIS von BBC, Typ ELK BC aus dem Jahr 1977

Bei der Prüfung der neuen GIS-Anlage wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Die GIS muss die Spannungsprüfung mit 325 kV 1 Minute bestehen.
- Bei der Teilentladungsmessung bei 204 kV (nach der Spannungsprüfung) dürfen keine phasenkorrelierten TE-Aktivitäten messbar sein. Für die Beurteilung massgebend ist ein phasenkorreliertes TE-Muster (Integrationszeit 1 Minute), aufgezeichnet während der Messzeit von mindestens 30 Minuten bei einem Spannungspegel von 204 kV.

Aufgrund der strategischen Wichtigkeit dieses Netzknotens im Zentrum von Zürich, wurde die Wechsellspannungsprüfung mit 100% des Fabrikprüfwertes durchgeführt.

Die Teilentladungsmessung wurde mit der klassischen Schmalband-UHF-Methode mit visueller Auswahl der Messfrequenz durchgeführt, welche als empfindlichste UHF-Methode mit der höchsten Störsicherheit gilt [1].

Wird zur Einspeisung der Prüfspannung ein Prüfadapter oder eine gasisolierte Prüfquelle an die GIS angeflanscht, besteht das Risiko, dass nach der Hochspannungsprüfung betriebsgefährdete Partikel in die GIS gelangen können.

Dieses Risiko wurde durch die Verwendung eines Prüfkabels eliminiert.

Der Ersatz der GIS-Anlage erfolgte in 2 Etappen. In der unterirdischen GIS-Halle stand Platz zur Verfügung, um 3 neue Felder und eine Sammelschienen-Längstrennung für den provisorischen Betrieb mit einem Speise- und Trafofeld zu installieren. Abbildung 2 zeigt die Installation der ersten Etappe.

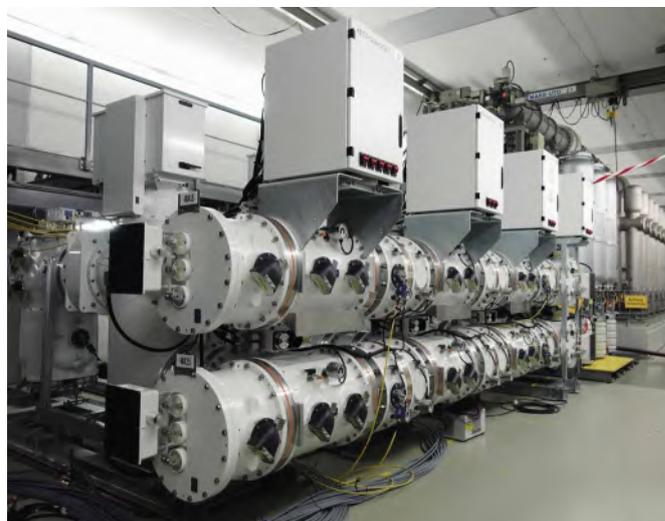


Abbildung 2: Neue 150 kV-GIS von GE, Typ F35-170 kV, 1. Realisierungsetappe

Die Verwendung eines Prüfkabels ermöglicht grosse Flexibilität bei der Aufstellung des Hochspannungsprüfsets. Dieser Vorteil kam besonders bei den sehr eingeschränkten Platzverhältnissen in der ersten Etappe zum Tragen. Das Prüfkabel kann an einem Feld mit Kabelabgang angeschlossen werden (geeignetes Feld frei wählbar).

Unten stehend die Aufstellung des Hochspannungsprüfsets im Gang vor den Trafo-Boxen.



Abbildung 3: Resonanzprüfanlage mit Prüfkabeladapter

Die erste Hochspannungsprüfung umfasste die GIS-Felder der Etappe 1 inklusive der Sammelschienen-Längstrenner mit angrenzendem Gasraum rechts (siehe Abbildung 4, Phase A).

Referenzen

[1] Neuhold S., Brügger T., Bränlich R., Behrmann G., Schlemper H.D., Riechert U., Müller P., Lehner, M., Schneiter E., Sigrist P., Return of experience: The CIGRE UHF PD sensitivity verification and onsite detection of critical defects; CIGRE Paris, 2018

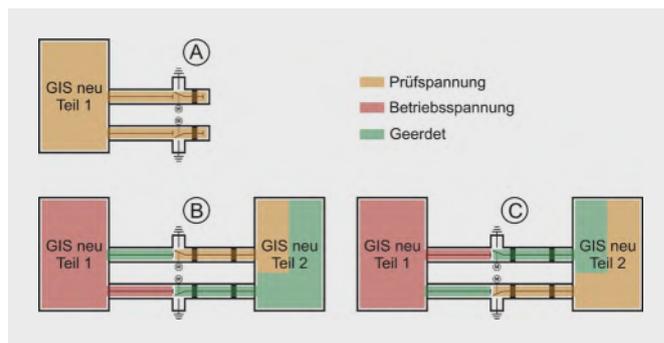


Abbildung 4: Phase der Realisierung, Inbetriebnahme und Prüfung

Nach Prüfung der Phase A wurden die Leitungen für den Minimalbetrieb auf die neuen 3 Felder umgelegt und die alte GIS abgebrochen. In einer zweiten Etappe wurde am Platz der alten GIS die neue aufgestellt und an den Teil der ersten Etappe angeschlossen.

Aufgrund des Betriebs im ersten Teil der GIS wurde die Prüfung des zweiten Teils in zwei Prüfabschnitte unterteilt (Phase B und C in Abbildung 4), da garantiert sein muss, dass sich immer ein geerdeter GIS-Abschnitt zwischen Betriebs- und Prüfspannung befindet.

Der Gasraum des in der Phase A bereits geprüften Sammelschienen-Längstrenners musste für den Anschluss der neuen GIS nicht mehr geöffnet werden. Somit haben schlussendlich alle Gasräume der GIS (inklusive Spannungswandler) die Vor-Ort-Prüfung bestanden und wurden nach der abschliessenden Hochspannungsprüfung nicht mehr geöffnet.



AUTOR

Stefan Neuhold

Dr. sc. techn. ETH

Projektingenieur

MS-Prüfungen: Gegenüberstellung Resonanzanlage / Prüftransformator

Der weitaus grösste Anteil der Prüfungen und Diagnosemessungen der FKH wird mit Wechselspannung durchgeführt. Die Prüffrequenz soll im Sinne bestmöglicher Aussagekraft in der Nähe der Netzfrequenz liegen. Für die Hochspannungsprüfung von Kabelstrecken und Hochspannungsbetriebsmitteln, bietet die FKH deshalb nur Prüfungen im Bereich zwischen 10 Hz und 500 Hz (IEC 60060-3) an, aber keine VLF-Prüfungen (z.B. 0,1-Hz-Prüfungen). Gleichspannungsprüfungen werden heute nur bei Kabelmantelprüfungen eingesetzt.

Die für Wechselspannungsprüfungen eingesetzten Hochspannungsquellen sind unterschiedlich und werden jeweils den Prüfaufgaben angepasst.

Bei den meisten Wechselspannungsprüfungen setzt die FKH modulare Serie-Resonanzanlagen ein. Sie bestehen aus einem Schwingkreis, der durch Anschluss von Hochspannungsdrosseln, meist im Bereich einiger 10 Henry, an den kapazitiven Prüfling realisiert wird. Eine Spannungsquelle, bestehend aus Frequenzumrichter und Anpasstransformator, speist in diesen Kreis ein. Der Umrichter wird auf die Kreisresonanzfrequenz abgestimmt (Abbildung 1). Die Resonanzüberhöhung von einem Faktor zwischen 50 und 250 erzeugt dabei die Prüfspannung. Serie-Resonanzanlagen können im gesamten Hochspannungsbereich eingesetzt werden und erzeugen Prüfscheinleistungen bis in den hohen MVA-Bereich.

Bei kleineren Prüflingen kann auch mit einem Prüftransformator gearbeitet werden, wobei die Prüfspannung meist mit einem primärseitigen Regeltransformator eingestellt wird (Abbildung 2). Prüftransformatoren haben begrenzte Lastkapazitäten. Die Prüfanlage in Abbildung 6 hat einen maximalen Strom von 100 mA. Bei dieser Anlage können Prüflinge bis ca. 10 nF geprüft werden. Bei steigenden Prüfscheinleistungen erreichen Prüftransformatoren rasch Ausmasse, die einen Transport vor Ort impraktikabel machen. Bei Bedarf können auch Prüftransformatoren über einen Umrichter bei Frequenzen betrieben werden, die von der Netzfrequenz abweichen.

Eine Verschiebung der Frequenz hat beispielsweise bei Teilladungsmessungen entscheidende Vorteile bei der Unterdrückung von Störimpulsen.

Mit einer Serie-Resonanzprüfanlage können mit einem festgelegten Transportvolumen und Transportgewicht um Faktoren grössere kapazitive Lasten geprüft werden (z.B. lange Kabelstrecken). Der Grund liegt in der Energie des elektrisch aufgeladenen Prüflings, die in den Resonanzdrosseln zwischengespeichert werden kann und im Resonanzbetrieb zwischen der Induktivität und der Prüflingskapazität pendelt. Die Speisequelle muss demnach nur noch die Wirkverluste des Schwingkreises decken. Transformatoren können hingegen die im Prüfling gespeicherte kapazitive Energie nicht zwischenspeichern und müssen die gesamte kapazitive Blindleistung des Prüflings übertragen.

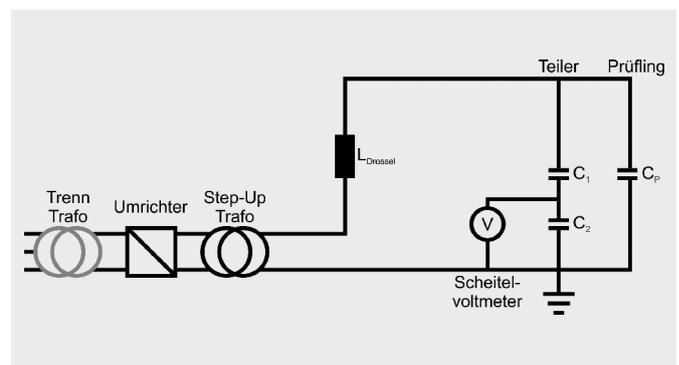


Abbildung 1: Ersatzschaltbild eines Serie-Resonanzprüfkreises mit einer Drossel

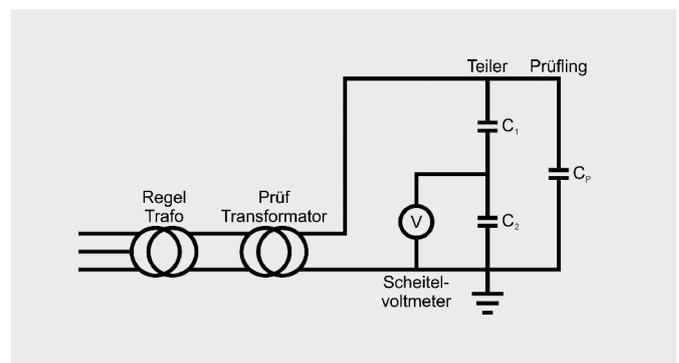


Abbildung 2: Ersatzschaltbild mit Prüf- und Regeltransformator

Wichtigstes Kriterium für die Wahl der Spannungserzeugung ist demnach die Prüflingskapazität. Ein zweites Kriterium ist die Frage, ob die geprüften Anlagenteile induktive Betriebsmittel wie Wandler enthalten. Bei den Prüfspannungen, welche das 1,8- bis 3-fache der Betriebsspannung betragen, muss eine Sättigung des Eisenkerns verhindert werden, weshalb bei induktiven Apparaten eine entsprechend höhere Prüffrequenz angewendet werden muss. Prüffrequenzen von 100 Hz und mehr sind bei Schaltanlagen mit Spannungswandlern zwingend. In diesen Fällen kommen Frequenzumrichter meist in Kombination mit Serie-Resonanzanlagen zum Einsatz. Diese Anlagen haben einen Frequenzbereich von 20–300 Hz. Mit der Wahl der Drossel, allenfalls mit Lastkondensatoren, wird die Frequenz in den gewünschten Bereich gebracht.

Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen die Resonanzanlagen mit verschieden grossen Drosseln, welche die FKH im Mittelspannungsbereich einsetzt. Abbildung 6 zeigt eine Prüfung einer kleinen Mittelspannungsanlage mit einem Prüftransformator. Spannungstests an grösseren Anlagen können in besonderen Fällen auch mit Prüftransformatoren durchgeführt werden, wenn die kapazitive Last auf der Hochspannungsseite kompensiert wird. Dies kann mit den Resonanzdrosseln der FKH bewerkstelligt werden (Abbildung 7). Diese Prüfvariante wird selten verwendet, beispielsweise dann, wenn die Prüfung zwingend bei Netzfrequenz erfolgen muss.



Abbildung 5: Serie-Resonanzquelle mit 40–60 Hz für kleinere Prüfungen auf Anhänger



Abbildung 6: Prüfung mit Prüftransformator bis 50 kV



Abbildung 3: Resonanzkreis mit 40-H-Drossel bis 60 kV



Abbildung 7: Generatorprüfung mit Prüftransformator und Kompensationsdrossel



Abbildung 4: Resonanzkreis mit 50-H-Drossel bis 150 kV



AUTOR

Dominic Kleger

Bsc. El.-Ing. FH
Projektingenieur

FKH-Labor für Isolierölanalysen

Analyseaufträge

Das Öllabor konnte im Berichtsjahr die Zahl der analysierten Proben und auch den Umsatz um ca. 10% steigern. Wie bei der ganzen FKH ergaben sich durch die Pandemie auch für das Öllabor keine wesentlichen wirtschaftlichen Beeinträchtigungen. Eine einzige Einschränkung trat im Frühling auf, als Isopropanol, das als Lösungsmittel für die Bestimmung der Neutralisationszahl verwendet wird, wegen der grossen Nachfrage nach Desinfektionsmitteln nur noch in kleinen Mengen und mit grossen Lieferzeiten beschafft werden konnte.

Notfalldienst

Im Jahr 2020 wurden acht Notfalleinsätze nach Buchholzalarmen durchgeführt. In drei Fällen waren im Buchholzrelais brennbare Gase enthalten. Die Ursachen waren ein Windungschluss, ein fehlerhafter Schaltvorgang des Stufenschalters und ein erhöhter Kontaktwiderstand bei einem Umsteller.

Buchholzalarme durch Umsteller bei Maschinentransformatoren

Die bei Maschinentransformatoren häufig anzutreffenden Schalter, für das spannungsfreie Umschalten des Übersetzungsverhältnisses, sind gehäuft für Buchholzalarme verantwortlich. Werden solche Schalter während Jahren oder Jahrzehnten nicht bewegt, kann es an den Kontakten zur Ablagerung von Ölkohle und damit zu erhöhten Übergangswiderständen kommen. Bei periodischen Zersetzungsgasanalysen können solche Fehler oft frühzeitig über die Gas-signatur «Heissstelle mit Temperaturen von 300 bis 700°C» identifiziert werden. Geschieht dies nicht, ist das Ergebnis oft ein Buchholzalarm, der ernst genommen werden sollte. Grössere Folgeschäden sind zum Glück selten und der Fehler kann oft mit vertretbarem Aufwand repariert werden. Um solche Ereignisse zu verhindern, wird empfohlen, Umsteller von Anfang an jährlich mehrfach durchzuschalten um beginnende Ablagerungen zu entfernen.

Qualitätssicherung

Die 2012 erworbene Akkreditierung, gemäss ISO/IEC 17025 als «Prüfstelle für Isolieröl und Buchholzgas» durch die Schweizerische Akkreditierungsstelle SAS, konnte durch erfolgreiche Audits verlängert werden.



AUTOR

Dr. Thomas Heizmann

Dr. sc. techn. ETH
Leiter Isolieröllabor

Neue Prüfadapter

In den letzten Jahren hat sich der Einsatz von Hochspannungsteckverbindungen im Anlagenbau weitgehend durchgesetzt, sodass auch bei Inbetriebsetzungsprüfungen der Einsatz von Steckverbindungen unabdingbar geworden ist.

Im Jahr 2020 wurde das Prüfadapterkabel Freiluft – Connex Gr. 5 in der 145 kV-Ebene vermehrt eingesetzt. Damit auch die 170 kV- und 245 kV-Spannungsebenen mit Prüfadapterkabel eingespeist werden können, wurden folgende Neuentwicklungen realisiert:

- Prüfadapterkabel Connex Gr. 6 – Connex Gr. 6 mit Kabelbobine
- Prüfadapter 170 kV von Freiluftdurchführung auf Connex Gr. 6
- Prüfadapter 245 kV von Freiluftdurchführung auf Connex Gr. 6

Damit sind steckbare Adapter bis zu Prüfungen auf der 220 kV-Netzebene verfügbar.



Abbildung 3: Prüfadapterkabel Freiluftdurchführung – Connex Gr. 6, 170 kV



Abbildung 1: Prüfadapterkabel Freiluftendverschluss – Connex Gr. 5, 145 kV



Abbildung 4: Prüfadapterkabel Freiluftdurchführung – Connex Gr. 6, 245 kV



Abbildung 2: Prüfadapterkabel Connex Gr. 6 – Connex Gr. 6, 245 kV



AUTOR

Mario Gobeli

Dipl. El.-Ing. FH

Projektingenieur

Zusammenarbeit mit Hochschulen/ Nachwuchsförderung

Betreute Praktikumsarbeiten

Katarzyna Sawczuk

IASTE-Praktikantin aus Dänemark von der «Technical University of Denmark», Studiengang «Electrical and Electronics Engineering».

Praktikumsarbeit: «Electrical field calculation on high voltage toroidal electrodes for resonance reactors» und «Investigation of hidden correlations in data from insulating oil analyses by using machine learning algorithms».

Frau Sawczuk musste uns aufgrund der Coronapandemie frühzeitig verlassen und konnte ihre Arbeit nicht zu Ende führen.

Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen

Teilnahme an Fachtagungen, Referate

Reinhold Bräunlich

Poster-Vorstellung: «Safety clearance between high voltage test systems and parts of air-insulated substations in operation»
VDE Hochspannungstechnik, 9. – 11. November 2020, online (vgl. Publikation)

Thomas Brügger

Vortrag: «Potential of VLF PD measurements for diagnosis of stator insulation of large hydro generators»
Cigré Session 48, 24. August – 4. September 2020, Onlinekonferenz

Stefan Neuhold

2020 IEEE conference on electrical insulation and dielectric phenomena CEIDP
Virtual Conference, 18. – 30. Oktober 2020

Martina Stadelmann

Leitungsbautagung 2020, 11. November 2020, online

Publikationen

M. Duval, Th. Heizmann

«Identification of Stray Gassing of Inhibited and Uninhibited Mineral Oils in Transformers»
Energies 2020, Volume 13, Issue 15, 3886, 30. Juli 2020

Th. Brügger, U. Ranninger, F. Öttl, M. Krüger

«Potential of VLF PD measurements for diagnosis of stator insulation of large hydro generators»
Cigré Session 48, 24. August – 4. September 2020, online

G. J. Behrmann, D. Gross, St. Neuhold

«Limitations of Attempting Calibration of Partial Discharge Measurements in VHF and UHF Ranges»
IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 18. – 30. Oktober 2020, East Rutherford, USA

R. Bräunlich, Th. Brügger, G. Storf, U. Straumann, H. Kötz

«Safety clearance between high voltage test systems and parts of air-insulated substations in operation»
VDE Hochspannungstechnik, 9. – 11. November 2020, online

Mitgliedschaft / Mitarbeit in Fachgremien und Kommissionen

Die FKH ist bei folgenden Institutionen als Mitglied eingetragen

Electrosuisse

Institutionelles Mitglied bei Electrosuisse

Förderkreis «Blitzschutz und Blitzforschung» des VDE, Frankfurt am Main

Mitglied im Förderkreis des ABB (Ausschuss Blitzschutz und Blitzforschung)

Die FKH ist bei folgenden nationalen und internationalen Fachgremien vertreten

CES electrosuisse TK: «Erdungen»

Mitglied: Günther Storf (Vorsitzender)

CES electrosuisse TK 2: «Elektrische Maschinen»

Mitglied: Thomas Brügger

CES electrosuisse TK 10: «Flüssigkeiten für elektronische Anwendungen»

Mitglied: Thomas Heizmann (Vorsitzender)

CES electrosuisse TK 14: «Transformatoren»

Mitglied: Pascal Fehlmann

CES electrosuisse TK 17: «AC Hochspannungsschaltgeräte und Schaltanlagen»

Mitglied: Martina Stadelmann

CES electrosuisse TK 20: «Elektrische Kabel»

Mitglied: Dominic Kleger

CES electrosuisse TK 42: «Hochspannungs- und Hochstrom-Prüftechnik»

Mitglied: Thomas Brügger

CIGRE JWG A2/D1.51: «Improvements to partial discharge measurements for factory and site acceptance tests of power transformers»

Mitglied: Pascal Fehlmann

CIGRE WG B1.68: «Condition evaluation and lifetime strategy»

Mitglied: Diego Friedli

CIGRE WG D1.63: «Partial discharge detection under DC Voltage Stress»

Mitglied: Stefan Neuhold

CIGRE WG B3.50: «Concepts for on-site HV testing of GIS after installation, extension, retrofit or repair»

Mitglied: Stefan Neuhold

CIGRE JWG D1/B3.57: «Dielectric Testing of Gas-Insulated HVDC Systems»

Mitglied: Stefan Neuhold

CIGRE WG D1.66: «Requirements of partial discharge monitoring systems for Gas-Insulated systems»

Mitglied: Stefan Neuhold

Cired WG 2017-1: «Test recommendations for ground screen power cable connections»

Mitglied: Dominic Kleger

FKH-Mitglieder

Verbände

Electrosuisse
8320 Fehraltorf

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE)
5001 Aarau

Werksmitglieder

AEW Energie AG
5001 Aarau

Groupe E SA
1701 Fribourg

AG Kraftwerk Wägital
8854 Siebnen

Industrielle Werke Basel
4053 Basel

Axpo Power AG
5401 Baden

Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG
4658 Däniken

Azienda Elettrica Ticinese
6501 Bellinzona

Kraftwerke Oberhasli AG
3862 Innertkirchen

Aziende Industriali della città di Lugano SA
6901 Lugano

Primeo Netz AG
4142 Münchenstein

BKW Energie AG
3013 Bern

Sankt Galler Stadtwerke
9001 St. Gallen

Bouygues E&S EnerTrans AG
5013 Niedergösgen

SBB Energie
3052 Zollikofen

CKW AG
6002 Luzern

Services Industriels Lausanne (SIL)
1000 Lausanne 9

EKT AG
9320 Arbon

Services Industriels de Genève (SIG)
1211 Genève 2

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich
8050 Zürich

St. Gallisch-Appenzellische Kraftwerke AG
9001 St. Gallen

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich
8022 Zürich

Swissgrid AG
5001 Aarau

Energie-Service Biel/Bienne
2504 Biel

Stadtwerk Winterthur
8402 Winterthur

Energie Wasser Bern
3001 Bern

Werke am Zürichsee AG
8700 Küsnacht

ewl energie wasser luzern
6002 Luzern

Verzasca SA
6901 Lugano

Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder

ABB Power Grids Switzerland AG
8050 Zürich

Mohaupt High Voltage GmbH
A-6142 Mieders

Agea-Kull AG
4552 Derendingen

Nexans Suisse SA
2016 Cortaillod

Arnold AG, Energie & Telecom
3072 Ostermundigen

OMICRON electronics GmbH
A-6833 Klaus

BCP Busarello + Cott + Partner AG
8703 Erlenbach

Pfiffner Messwandler AG
5042 Hirschthal

Brugg Kabel AG
5200 Brugg

Pfisterer Switzerland AG
6460 Altdorf

Condis SA
1728 Rossens

Pöyry Schweiz AG
8048 Zürich

Eidgenössisches Starkstrominspektorat
8320 Fehraltorf

Retranol GmbH
8810 Horgen

GE Grid (Switzerland) GmbH
5036 Oberentfelden

SGB-SMIT Transformatoren Schweiz AG
5012 Schönenwerd

Haefely Test AG
4052 Basel

Siemens Schweiz AG
8047 Zürich

LEONI Studer AG
4658 Däniken

VAPEC AG
8304 Wallisellen

Megger Schweiz AG
5107 Schinznach-Dorf

Trafopower AG
5012 Schönenwerd

Korrespondierende Mitglieder

Berner Fachhochschule
3400 Burgdorf

**Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs-
und Hochstromtechnik e.V.**
D-68201 Mannheim

Ecole d'Ingénieurs de l'Etat de Vaud
1400 Yverdon-les-Bains

Haute Ecole Valaisanne
1950 Sion

Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg
1705 Fribourg

Hochschule für Technik und Architektur Chur
7000 Chur

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
1015 Lausanne

**Zürcher Hochschule für Angewandte
Wissenschaften ZHAW**
8401 Winterthur

**Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FG Hochspannungstechnologie**
8092 Zürich

Mitgliederbestand per 31. Dezember 2020

Verbände	2	(2)
-----------------	---	-----

Werksmitglieder	28	(28)
------------------------	----	------

Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder	21	(22)
---	----	------

Korrespondierende Mitglieder	9	(9)
-------------------------------------	---	-----

Total Mitglieder per 31. Dezember 2020 (Stand per 31. Dezember 2019 in Klammern)	60	(61)
--	-----------	-------------

Zufahrtspläne für die FKH-Standorte

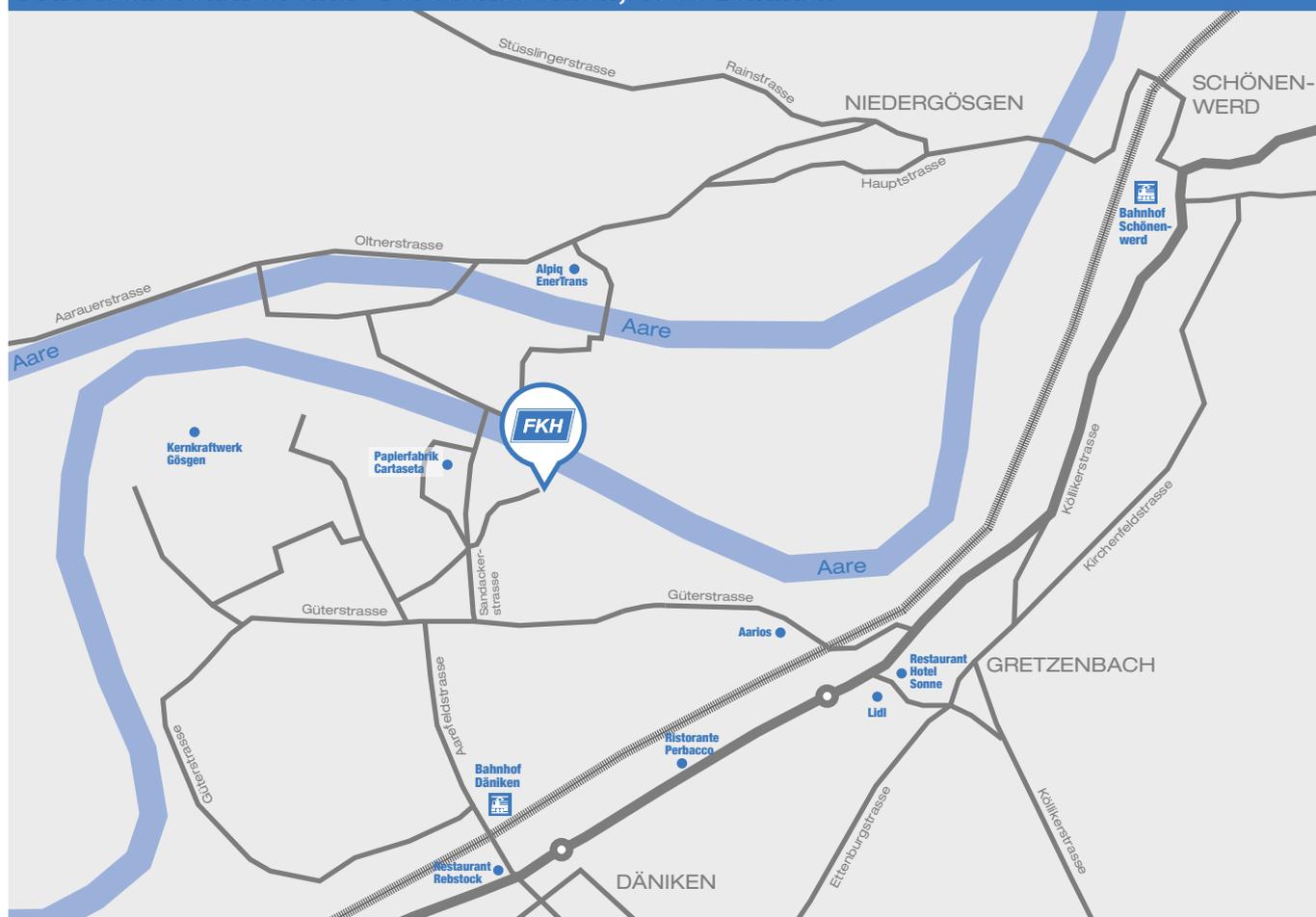


*Fachkommission für Hochspannungsfragen
Commission d'étude des questions relatives à la haute tension*

Hagenholzstrasse 81 • CH-8050 Zürich

Tel. +41 44 253 62 62 • Fax +41 44 253 62 60

FKH-Isolieröllabor und -Versuchsstation, 4658 Däniken



*Fachkommission für Hochspannungsfragen
Commission d'étude des questions relatives à la haute tension*

FKH-Isolieröllabor Tel. +41 62 288 77 99 • Fax +41 62 288 77 90

FKH-Versuchsstation Tel. +41 62 288 77 95 • Fax +41 62 288 77 94

CH-4658 Däniken

**FKH-Hauptsitz**

Hagenholzstrasse 81
CH-8050 Zürich
Tel. +41 44 253 62 62
Fax +41 44 253 62 60

info@fkh.ch
www.fkh.ch

FKH-Isolieröllabor

CH-4658 Däniken
Tel. +41 62 288 77 99
Fax +41 62 288 77 90

FKH-Versuchsstation

CH-4658 Däniken
Tel. +41 62 288 77 95
Fax +41 62 288 77 94