



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

Jahresbericht

2022





*Bild Titelseite: Prüfung der Kabeleinführung
der Leitung Chamoson – Romanel zwischen dem
UW Bâtiaz und dem Portal Le Verney
Bild links: Prüfung des 110-kV-Verbindungskabels
«Kuppeltrafo 110/50 kV» im Unterwerk Horw*

Inhalt

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung	4	Zusammenarbeit mit Hochschulen /	
Struktur und Leitbild der FKH	6	Nachwuchsförderung	36
FKH-Vorstand	7	Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate,	
FKH-Geschäftsstelle	8	Publikationen	40
Dienstleistungen der FKH	9	Mitgliedschaft / Mitarbeit in Fachgremien und	
Auftragsarbeiten und statistische Übersicht	10	Kommissionen	41
Mitschwingender Einschaltstrom in Transformatoren		FKH-Mitglieder	43
und resultierende Überspannungen	12	Zufahrtspläne für die FKH-Standorte	46
Prüfungen an einphasigen Hivoduct-Prüfpolen unter			
realen Umgebungsbedingungen	14		
Überprüfung der Isolationsfestigkeit eines			
Blitzschutzkabels mit einer Stossspannungsprüfung			
nach IEC 62561-8	16		
Untersuchung der Erdfehler-Potenzialausbreitung			
über armierte Betonwinkel-Fertigelemente an			
Bahnsteigkanten	18		
Praktischer Einsatz von Kabelprüfadaptern für			
Hochspannungsprüfungen an GIS bis 245 kV	20		
Erwärmungsversuch an einem 150-kV-Dreileiter-Kabel			
in der Stadt Zürich	22		
Erdungskonzept für das Eidgenössische Schwing-			
und Äplerfest in Pratteln	24		
Kabelprüfungen	27		
Transformator-Diagnostik: Schadensbilder und			
dazugehörige Zersetzungsgas-Signaturen	29		
FKH-Labor für Isolierölanalysen	31		
Entwicklung der FKH-Gerätedatenbank zur Optimierung			
der Logistik von Vor-Ort-Prüfungen	32		
FKH-Fachtagung 2022 «Isolationskoordination»	34		

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung

Die Dienstleistungen der FKH in den drei Standbeinen Prüfungen, Öl-Analysen und Studien sind bei unseren Kunden weiterhin stark gefragt. Das Jahr 2022 war, gemessen am Umsatz, mit total 200 Aufträgen im Bereich Elektrotechnik sogar ein absolutes Spitzenjahr. Die FKH-Mitarbeiter haben grossen Einsatz gezeigt, um die vielen Projekte zur Zufriedenheit unserer Kunden auszuführen.

Relativ wenig beeinflusst von den politischen und wirtschaftlichen Turbulenzen, welche durch den Ukrainekrieg und die dadurch ausgelöste Energiekrise in Europa entstanden, konnte sich die FKH auf ihr Kerngeschäft fokussieren. Im Gegenteil, das plötzlich real erscheinende Risiko einer Strom- und Gas-Mangellage in Europa hat die Wichtigkeit zuverlässiger Energieübertragungssysteme zurück ins Bewusstsein der Bevölkerung gerückt und die Netzbetreiber veranlasst, kurzfristig wirksame und vom Bund koordinierte Vorsorgemassnahmen zur Bereitstellung zusätzlicher Einspeiseleistung und Erhöhung der Übertragungskapazität der Netze zu treffen. Einige dieser Bestrebungen hatten zusätzliche Prüfungen für die FKH zur Folge, da sie mit Anpassungen an Betriebsmitteln, an Unterwerken und Übertragungsleitungen einhergingen. Gleichzeitig war durch das Reduzieren der Massnahmen zur Pandemiebekämpfung, und aufgrund der wieder steigenden Energiepreise, eine gewisse Aufbruchstimmung bei den Energieunternehmen zu spüren, sodass ins Stocken geratene Ausbauvorhaben im Schweizer Energiesektor wieder Fahrt aufgenommen haben.

Das Jahr 2022 hatte für die FKH tragischerweise auch seine Schattenseiten. Ein schwerer Elektrounfall zu Jahresbeginn am Stausee Lac de Mauvoisin während einer Prüfung hat das ganze Team aufgerüttelt und uns in Sorge um die Mitarbeiter vor Ort bange Stunden verbringen lassen. Gross war die Erleichterung, als sich abzeichnete, dass voraussichtlich

keine bleibenden Schäden beim betroffenen Mitarbeiter zurückbleiben werden. Für den Vorstand, die Geschäftsleitung und die Mitarbeitenden ist klar, dass sich ein solcher Vorfall nicht wiederholen darf. Es wurde daher unter Beizug externer Experten für Arbeitssicherheit viel Energie in die Aufarbeitung des Unfalls gesteckt und eine anzustrebende ISO 45001-Zertifizierung neu in die Zielsetzung der FKH mit aufgenommen.

Erfreulich entwickelt sich das erweiterte Angebot für Studien zu transienten Vorgängen in den Netzen. Im Mai konnte die FKH einen zusätzlichen, erfahrenen Ingenieur einstellen, der das Team durch seine Aktivitäten im Bereich EMTP-Berechnungen sehr gut ergänzt. Zahlreiche Berechnungsstudien zu transienten Vorgängen im Netz wurden im Jahr 2022 angeboten und konnten erfolgreich abgewickelt werden. Es zeigen sich verstärkt Synergien zwischen dem Modellieren der Transienten am Computer und der Stärke der FKH, transiente Vorgänge vor Ort am betroffenen Netzknotenpunkt zu messen. Dies erlaubt die Vorhersagegenauigkeit der Aussagen weiter zu erhöhen und den quantitativen Effekt von vorgeschlagenen Massnahmen messtechnisch nachzuweisen.

Mit dem Entscheid zur Beschaffung eines modularen und mobilen Stossgenerators mit 1800 kV Ladespannung – dieser wird Mitte Jahr in Betrieb genommen – investiert die FKH weiter in ihre Prüfmöglichkeiten. Der neue Stossgenerator lässt sich relativ einfach transportieren und vor Ort aufbauen und ermöglicht integrale Prüfungen von fertig aufgebauten Hochspannungsanlagen vor Ort mittels Blitzstoss. Derartige Prüfungen können beispielsweise sinnvoll sein, wenn ein Netzbetreiber erstmalig einen neu entwickelten Typ Schaltanlage installieren will oder wenn er zur weiteren Absicherung nach Auffälligkeiten eines Betriebsmittels in

anderen Messungen, das Verhalten bei den real zu erwartenden transienten Spannungsformen überprüfen will. Der Stossgenerator wird aber auch zur Effizienzsteigerung von Prüfungen in Däniken beitragen und ersetzt dort die in die Jahre gekommene bestehende Stossanlage.

Durch den Einsatz des neu beschafften Zugfahrzeugs für den Erdungsmessanhänger und Neuerungen bei der Messgerätedatenbank, konnte die Logistik der Vor-Ort-Prüfungen weiter optimiert werden, was sich im 2022 bereits positiv auf die Prozesse ausgewirkt hat. Das Wachstum der FKH in den letzten Jahren und die Zunahme an Material, Mitarbeitenden und Anzahl an Aufträgen führt jedoch die 2010 gebaute Logistikhalle in Däniken allmählich an ihre Auslastungsgrenzen. Insbesondere besteht ein Zielkonflikt, wenn gleichzeitig Prüfungen in der Logistikhalle stattfinden und Material für Vor-Ort-Prüfungen gerüstet werden muss. Es wird daher im FKH-Vorstand laut darüber nachgedacht, die Logistikhalle durch einen angrenzenden Laboranbau zu erweitern.



Michael Walter und Christian Lindner in der Logistikhalle der FKH am Standort Däniken

Im ersten Jahr des neuen Geschäftsleiters der FKH blicken wir auf spannende und erfreuliche Gespräche mit FKH-Mitgliedern zurück. Bei Treffen vor Ort auf der Baustelle und beim Kunden, im Rahmen der Fachtagung Isolationskoordination und an den Powertagen, sowie bei diversen Fachveranstaltungen durften wir zahlreiche Mitarbeitende von FKH-Mitgliedern persönlich kennenlernen und mit ihnen über ihre Erwartungen an die FKH sprechen. Dieser direkte Austausch ist uns sehr wichtig und soll auch im neuen Jahr weiter gepflegt werden.



Foto: Catherine de Torquat

Christian Lindner
Christian Lindner
Präsident



Michael Walter
Dr. Michael Walter
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 Elektroenergietechnik aus. Durch aktive Kontakte zur ETH Zürich und ETH Lausanne sowie den Fachhochschulen, und durch die 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

Yves-André Bagnoud | Services Industriels Lausanne

Markus Burger | Electrosuisse

Anja Burkhard | Hitachi Energy Switzerland AG

Andri Casura | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Andreas Degen | Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Prof. Dr. Drazen Dujic | Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Prof. Dr. Christian Franck | Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Michael Junghans | Brugg Kabel AG

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

Daniel Riesen | BKW Energie AG

René Vollenwyder | Schweizerische Bundesbahnen AG

Dr. Michael Walter | FKH¹

Martin Weibel (bis 31. Dezember 2022) | Bouygues E&S EnerTrans AG

Kontrollstelle

Bruno Duebendorfer | Axpo Grid AG

Aaron Durrer (bis Oktober 2022) | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

¹ Mitglied mit beratender Stimme

FKH-Geschäftsstelle

Geschäftsleiter	Dr. Michael Walter , dipl. El.-Ing. ETH	walter@fkh.ch
Stv. Geschäftsleiter	Dr. Thomas Brügger , dipl. El.-Ing. ETH (bis 31. Januar 2023) Dr. Thomas Heizmann , dipl. El.-Ing. ETH	bruegger@fkh.ch heizmann@fkh.ch
Sekretariat	Saskia Muraro	muraro@fkh.ch
Mitarbeiter	Philippe Alff , MSc ETH ETIT Gunnar Andrae , M. Eng., Dipl. Ing. (FH), (ab 1. Mai 2022) Dr. Thomas Brügger , dipl. El.-Ing. ETH (bis 31. Januar 2023) Dr. Vahe Der Houhanessian , dipl. El.-Ing. ETH Pascal Fehlmann , El.-Ing. FH Tobias Felber , Netzelektriker Peter Frey , Chemielaborant Diego Friedli , MSc Eng. HES-SO Mario Gobeli , El.-Ing. FH Dr. Thomas Heizmann , dipl. El.-Ing. ETH Leiter Labor für Isolierölanalysen Dominic Kleger , B.Sc El.-Ing. FH Adamo Mele , Elektromechaniker Dr. Henrik Menne , dipl. El.-Ing. ETH (ab 1. Februar 2023) Simon Mutter , Energieelektroniker Dr. Stefan Neuhold , dipl. El.-Ing. ETH Franziska Schenker , Chemielaborantin Martina Müller , Msc ETH ETIT Markus von Arx , Elektromonteur Toni von Deschwanden , Elektromechaniker	alff@fkh.ch andrae@fkh.ch 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 menne@fkh.ch mutter@fkh.ch neuhold@fkh.ch schenker@fkh.ch mueller@fkh.ch vonarx@fkh.ch deschwanden@fkh.ch
Betriebsstätten	FKH-Hauptsitz Hagenholzstrasse 81, 8050 Zürich FKH-Versuchsstation Däniken Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen FKH-Labor für Isolierölanalysen Däniken Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen	Tel. 044 253 62 62 Tel. 062 288 77 95 Tel. 062 288 77 99
Kontakt für die Westschweiz	Pascal Fehlman Le Vernay 10 1483 Montet (Broye)	Tel. 026 665 07 20 Mobile 079 275 91 50 fehlmann@fkh.ch
Internet	www.fkh.ch	

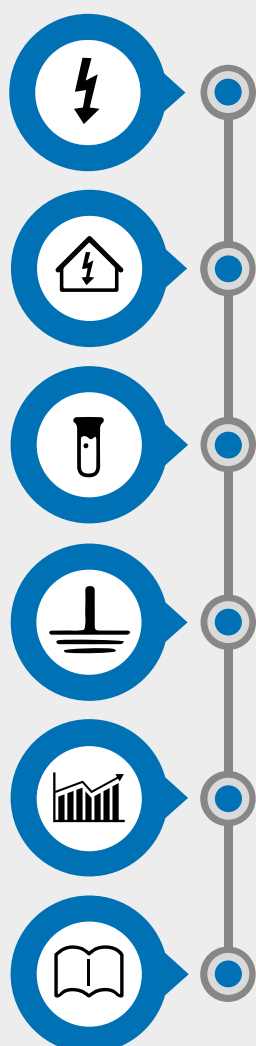
Dienstleistungen der FKH

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:



Prüfung von HS-Betriebsmitteln vor Ort

HS-Prüfungen an Apparaten und Betriebsmitteln mit Stoss- und Wechselspannung (Resonanzprüfungen), mit und ohne Diagnosemethoden.

- Transformatoren und andere Apparate
- GIS
- rotierende Maschinen
- Kabel

HS-Prüfungen im Kleinlabor

Hoch- und Mittelspannungskomponenten

Isolierölanalysen

Dielektrisch-chemische Analysen
Chromatographische und spektroskopische Analysen

- Zersetzungsgasanalysen
- Furananalysen
- FTIR-Spektralanalysen

Erdungs-, Umwelt- und Netzfragen

Erdungsmessungen/Berechnungen
EMF-/EMV-Messungen und Berechnungen
Schall- und Vibrationsmessungen
Netzqualitäts- und Netztransientenmessungen und Berechnungen

Engineering

Engineering, Beratung und Expertisen
Schadensanalysen
Blitzschutzfragen

Weiterbildung

Fachtagungen, Schulungen

Auftragsarbeiten und statistische Übersicht

Neben diversen Entwicklungsprojekten und der Behandlung aktueller Fragestellungen der FKH-Mitglieder wurden im Berichtsjahr 2022 insgesamt 200 (192) Elektrotechnische Auftragsarbeiten und 166 (173) Aufträge für Isolierölanalysen mit total 1818 (1981) Proben für FKH-Mitglieder und Dritte ausgeführt. Es wurde ein Umsatz gemäss Tabelle 1 bzw. Abbildung 1 erzielt. Vorjahreswerte sind in Klammern zum Vergleich angegeben.

Erlös aus Auftragsarbeiten für FKH-Mitglieder*	CHF	2'926'458	(2'592'288)
Erlös aus Auftragsarbeiten für Nichtmitglieder	CHF	1'924'374	(1'433'807)
Erlös aus Auftragsarbeiten	CHF	4'850'832	(4'026'095)
Nebenerlöse (inkl. Fachtagung)	CHF	55'913	(32'293)
Mitgliederbeiträge	CHF	312'000	(319'800)
Total gemäss FKH-Erfolgsrechnung 2022	CHF	5'218'745	(4'378'188)

Tabelle 1: Erlös aus Auftragsarbeiten (Vorjahr in Klammern)

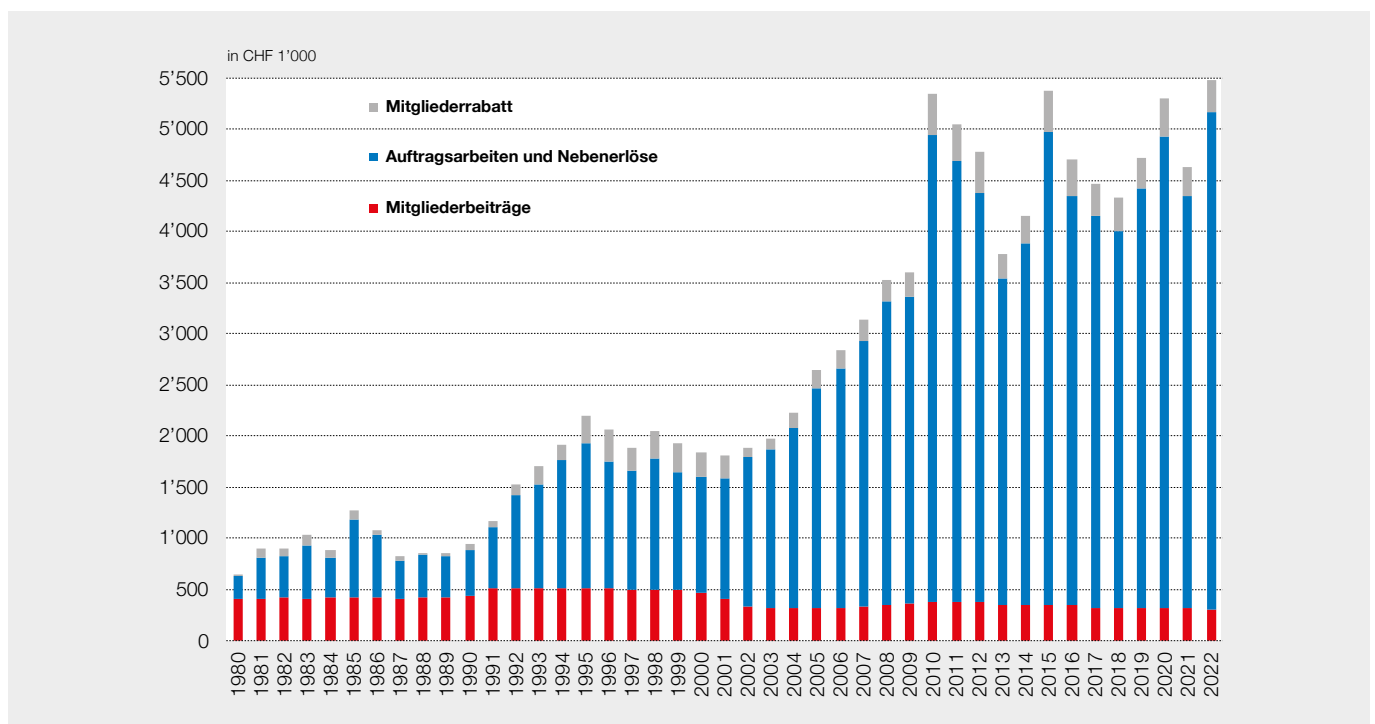


Abbildung 1: Erlös aus Auftragsarbeiten und Mitgliederbeiträgen im Zeitraum von 1980–2022

* Nettoerlös, 10% Mitgliederrabatt abgezogen

Die Auftragstätigkeit der FKH-Arbeitsgruppe für Mitglieder und Dritte im Berichtsjahr 2022 kann folgenden Gebieten zugeordnet werden (Tabelle 2 und Abbildung 2 prozentuale Verteilung bezogen auf den erzielten Nettoerlös):

Prüfung von Hochspannungskabelanlagen	34,7%	(33,7%)
Prüfung von Transformatoren	10,1%	(14,1%)
Prüfung von Hochspannungsapparaten und Generatoren	0,3%	(1,4%)
Prüfung von GIS und Schaltanlagen	23,6%	(15,0%)
Erdungsmessungen / Nachweis von Blitzschutzmassnahmen	4,4%	(6,6%)
Typenprüfungen / Spezialversuche	4,0%	(3,6%)
Umweltfragen / EMF / Korona / EMV / Transiente Vorgänge	1,0%	(0,7%)
Beratungs- und Betreuungsaufgaben	4,3%	(3,9%)
Isolierölanalysen	17,2%	(21,0%)
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0,5%	(0,0%)

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Auftragsarbeiten im Jahr 2022 nach Dienstleistungssparten aufgeschlüsselt (Vorjahr in Klammern)

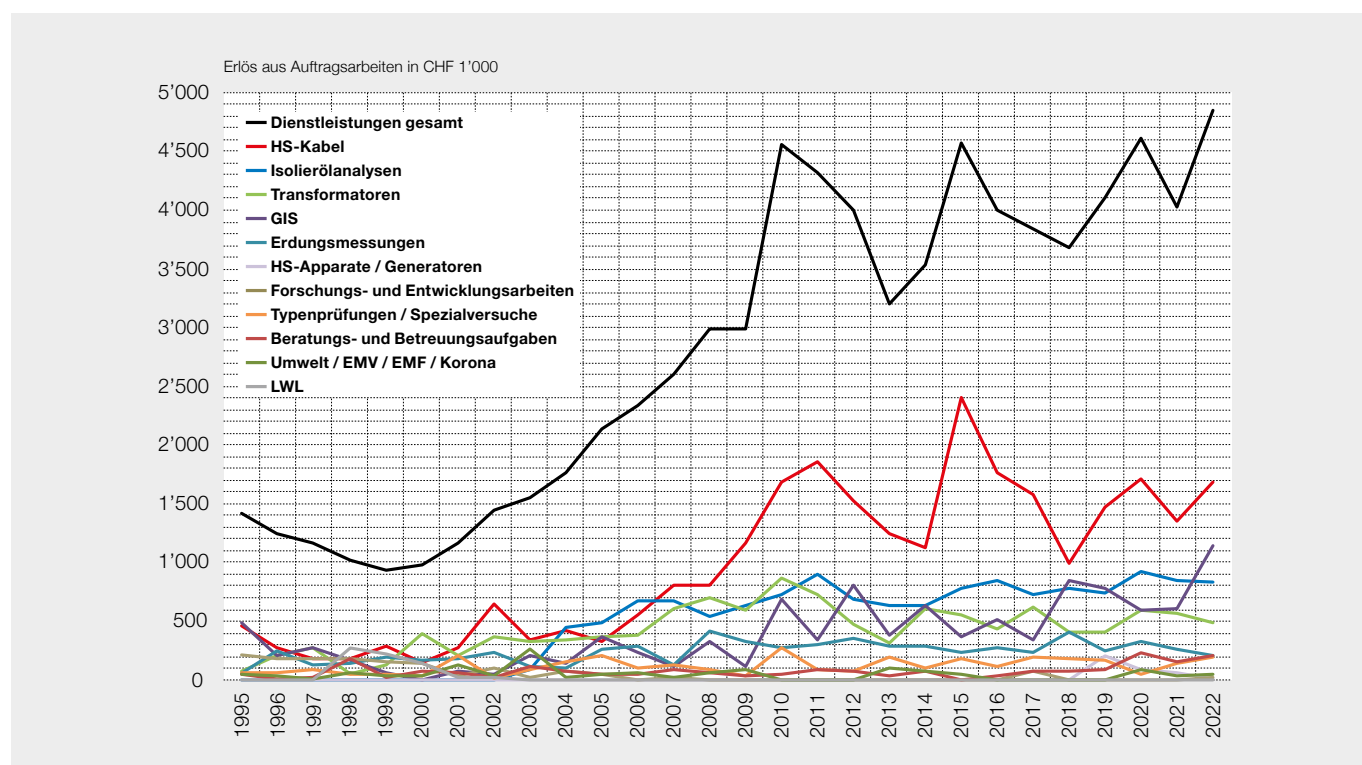


Abbildung 2: Entwicklung des Erlöses aus Auftragsarbeiten nach einzelnen Dienstleistungssparten (in CHF 1'000) über den Zeitraum von 1995–2022

Mitschwingender Einschaltstrom in Transformatoren und resultierende Überspannungen

Es ist allgemein bekannt, dass beim Einschalten von Transformatoren ein hoher Einschaltstrom auftreten kann. Wird ein Transformator eingeschaltet, wird jedoch nicht nur der Eisenkern des zugeschalteten Transformators, sondern auch jene von anderen Transformatoren, welche sich bereits in Betrieb befinden, gesättigt. Bei diesem Phänomen handelt es sich um die sogenannte sympathetische Wechselwirkung zwischen den Transformatoren, wobei der Magnetisierungsstrom, der dabei auftritt, als mitschwingender Einschaltstrom¹ bezeichnet wird.

Im Jahr 2020 wurden im Schweizer Übertragungsnetz aufgrund von Schalthandlungen an Maschinentransformatoren nahe eines Kraftwerks unzulässige temporäre Überspannungen detektiert, die zu Schädigungen an verschiedenen Betriebsmitteln führten. Aufgrund von Neubauprojekten, u.a. durch die Teilverkabelung in der Peripherie des Kraftwerkes, führte die FKH unter Berücksichtigung von Mess- und Systemdaten mit der Berechnungssoftware ATP/EMTP eine Fehleranalyse durch. Basierend auf der Fehleranalyse wurden Betriebsgrundsätze definiert, um derartige Ereignisse zukünftig zu vermeiden.

Hierzu wurden primär auftretende temporäre Überspannungen – aufgrund von mitschwingenden Einschaltströmen – beim Einschalten von parallellaufenden Transformatoren untersucht.

Zusätzlich sollte das Verhalten der neuen Netztopologie bei Lastabwurf und verschiedenen einphasigen und dreiphasigen Fehlerfällen bewertet werden. Zudem wurde der Einfluss des gesteuerten Schaltens (CS) von Leistungsschaltern (CB) auf die Einschalt-Überspannungen untersucht.

Beispielfall

Grundsätzlich können Überspannungen angeregt werden, wenn die Netzresonanzfrequenz in das dominante Oberwellenspektrum eines Einschaltstroms fällt. Je mehr Transformatoren sich vor dem Einschalten eines weiteren Leistungstransformators parallel an einer Sammelschiene im Leerlauf befinden, desto höher ist die maximal mögliche Überspannung aufgrund von mitschwingenden Einschaltströmen.

In einem der zu untersuchenden Fälle waren bereits drei Maschinentransformatoren eines Kraftwerks vor dem Zuschalten eines weiteren Transformators gleicher Bauart parallel im Leerlaufbetrieb mit dem Hochspannungsnetz verbunden. Die Kurzschlussinduktivität des angeschlossenen Netzes bildete hier in bestimmten Netzkonfigurationen mit der Kapazität von Freileitungen und Kabeln einen Schwingkreis, welcher durch die Oberwellenanteile eines Einschaltstromes angeregt werden konnte.

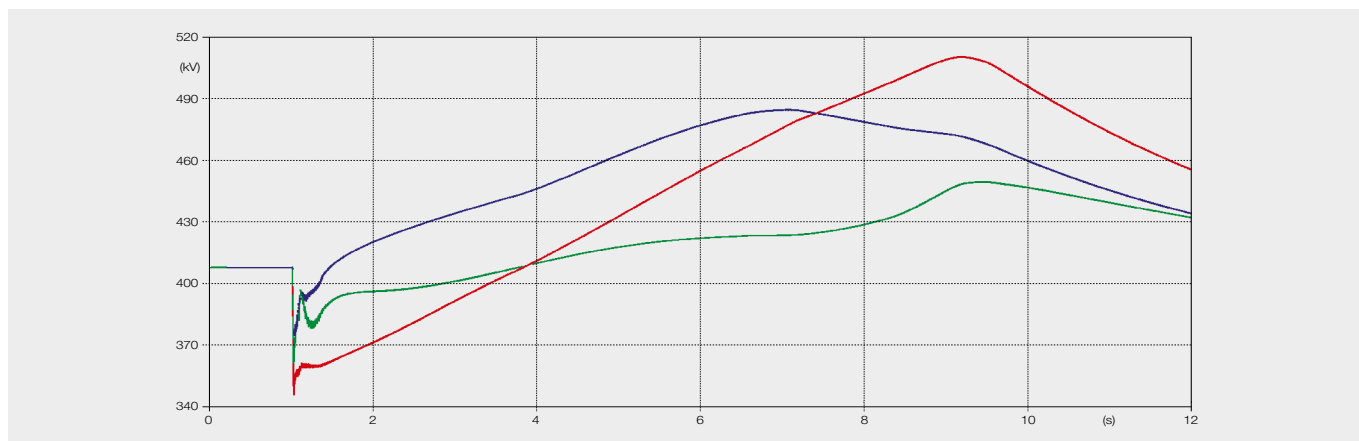


Abbildung 1: Ph-Ph-Spannungen auf der 420-kV-Sammelschiene des Kraftwerks; Spannung L1 in blau, L2 in rot, L3 in grün – mit einem in Betrieb befindlichen HS-Kabel zwischen Kraftwerk HS-Netz – ungünstigster Zuschaltmoment

¹ Mitschwingende Einschaltströme – engl. *Sympathetic Inrush Currents*

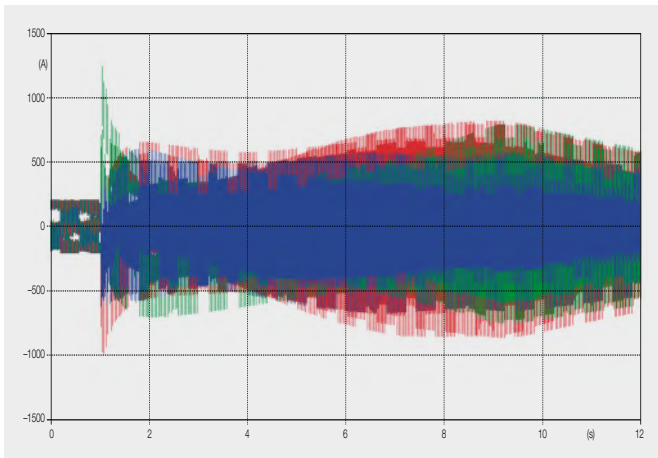


Abbildung 2: Darstellung des 3-phasigen Phasenstroms auf der HS-Seite des Maschinentransformators

Abbildung 3 zeigt die maximale RMS-Überspannung für Netzkurzschlussleistungen von 800 MVA bis 2000 MVA bei verschiedenen Einschaltzeitpunkten des HS-Leistungsschalters bezogen auf die anstehende Spannung – vom Spannungsscheitel (0 ms) bis Spannungsnulldurchgang (5 ms). Die Resonanzfrequenz des Netzes aus Kurzschlussimpedanz und Netzkapazität – dominiert durch die Kabelkapazität – kann bei 1370 MVA temporäre Überspannungen bis zu 540 kV RMS hervorrufen. Messungen bestätigen die Ergebnisse der dynamischen Simulation.

Eine deutliche Reduzierung der Überspannung kann durch gestaffeltes Zuschalten der drei Phasen erreicht werden, wobei eine Phase im Spannungsscheitel und die beiden anderen Phasen $\frac{1}{4}$ der Periode der Netzfrequenz später zugeschaltet werden.

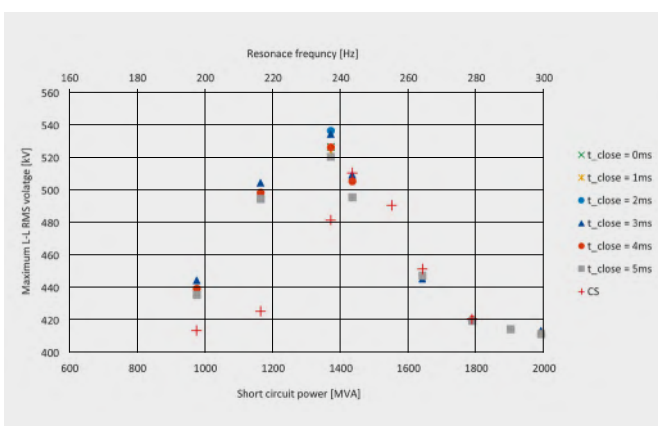


Abbildung 3: Darstellung der maximalen RMS-Spannung der drei Ph-Ph-Spannungen im Verhältnis zur Kurzschlussleistung bei einem angeschlossenen HS-Kabel – bei verschiedenen Einschaltzeitpunkten und bei gesteuertem Schalten (+)

Zusammenfassung

Überspannungen können immer dann angeregt werden, wenn die Netzresonanzfrequenz in das dominante Oberwellenspektrum des Einschaltstroms fällt. Je mehr Transformatoren vor dem Einschalten eines weiteren Leistungstransformators im Leerlauf parallel am gleichen Netzknoten am Netz sind, desto höher ist die maximal mögliche Überspannung aufgrund von mitschwingenden Einschaltströmen.

Es wurden die Einflussfaktoren des mitschwingenden Einschaltstroms, der Netzkurzschlussimpedanz, des Zuschaltwinkels, der Remanenz des zuschaltenden Transformators und der Netztopologie in den dynamischen Simulationen im Detail analysiert. Eine vermaschte Netztopologie ist zu bevorzugen, wenn Leistungstransformatoren mit zusätzlichen Transformatoren parallel im Leerlauf eingeschaltet werden. Lasten, insbesondere bei niedriger Kurzschlussleistung dämpfen die Überspannungseffekte. Gesteuertes Einschalten kann den Einschaltspitzenstrom und seine Gleichstromkomponente verringern, verhindert aber keine harmonischen Stromanteile im Einschaltstrom. Das synchron gesteuerte Einschalten aller drei Phasen hat nur geringen Einfluss auf die Amplitude der Überspannungen. Gestaffeltes gesteuertes Schalten hingegen erzielt eine klare Reduzierung der Überspannungen. Die Überwachung des Remanenz-Flusses beim Ausschalten des Transformators – öffnen des Leistungsschalters – kann die Wirkung der gesteuerten Einschaltung weiter optimieren. Der Remanenz-Fluss ist eine der Hauptursachen für mitschwingende Einschaltströme bzw. die resultierenden Überspannungen.



AUTOR

Gunnar Andrea

M. Eng., Dipl. Ing. (FH)
Projektingenieur

Prüfungen an einphasigen Hivoduct-Prüfpolen unter realen Umgebungsbedingungen

Das Schweizer Unternehmen «Hivoduct» hat Druckluftkabel für die Mittel- und Hochspannung entwickelt, welche auf dem Prinzip einer gasisolierten Leitung (GIL) basieren. Sie ermöglichen es, elektrische Energie verlustarm und umweltfreundlich übertragen zu können.

Druckluftkabel verwenden trockene Luft als Isoliergas in einer koaxialen Rohranordnung und haben ein neuartiges Flanschsystem, welches die Kosten reduziert und die Montage vor Ort vereinfacht.

Zwei repräsentative einphasige Druckluftkabel-Prüfpole mit einer Länge von bis zu 67 m wurden in der Versuchsstation der FKH in Niedergösgen durch Hivoduct aufgebaut – einer für dielektrische Tests, der andere für Erwärmungsversuche. Die Prüfpole beinhalten Rohre, Winklelemente und Durchführungen. Ziel der Versuche war es, bereits durchgeführte Prüfungen in grösserem Massstab im Freien unter realen Umgebungsbedingungen zu wiederholen. Neben den effektiven Prüfergebnissen lieferten die Versuche daher auch Erkenntnisse über Einflussfaktoren beim Zusammenbau im Feld und halfen der Firma Hivoduct den Montageprozess weiter zu optimieren.

Das geprüfte Design deckt die Spannungsebenen 100 kV und 123 kV in 50-Hz- und 60-Hz-Netzen ab. Eine AC-Prüfspannung von 23 kV mit ca. 60 Hz wurde angelegt, gefolgt von einer Teilentladungsmessung bei 148 kV. Dabei wurde die Hochspannung über die Durchführung in das Druckluftkabel eingespeist. Abbildung 1 zeigt den Aufbau für Resonanzprüfung mit dem Drosselturm, einem Koppelkondensator und zusätzlichen Lastkondensatoren, um die Frequenz der Resonanzquelle in den Bereich von 50 bis 60 Hz zu bringen. Für kleinere Nennspannungen wurde mit tieferem Nenndruck geprüft.

In Anschluss wurden Blitzstossprüfungen mit Spannungsscheitelwerten von bis zu 550 kV durchgeführt. Dazu wurde der mobile Blitzstossgenerator (siehe Abbildung 2) verwendet, der

eine maximale Summenladespannung von 800 kV besitzt. Nach den Blitzstossprüfungen wurden die Wechselspannungsprüfungen mit Teilentladungsmessung wiederholt, um nachzuweisen, dass der Prüfling auch nach Einwirken der Blitzstösse teilentladungsfrei war.



Abbildung 1: Hivoduct-Prüfpole und Wechselspannungs-Prüfaufbau



Abbildung 2: Hivoduct-Prüfpole und Blitzstoss-Prüfaufbau

Um die Stromtragfähigkeit zu bestätigen, wurde das Hivoduct einer Erwärmungsprüfung beim maximal zulässigen Strom von 2500 A unterzogen. Dazu wurde eine geschlossene Schleife aus Hivoduct-Elementen aufgebaut. Der Strom wurde mit Hilfe eines Heiztransformators (siehe Abbildung 3) in den Innenleiter induziert. Damit der Strom nur im Innenleiter fließt, wurde im Aussenleiter ein isolierendes Zwischenstück eingebaut.

Zur Temperaturüberwachung auf der Oberfläche der Kapselung während der Erwärmungsprüfung, wurden zwölf PT100 Temperatursensoren und drei Temperaturlogger verwendet. Da die Kapselung intakt bleiben musste, konnten keine Sensoren auf dem Innenleiter angebracht werden. Um trotzdem einen Anhaltspunkt über die maximale Temperatur auf dem Innenleiter zu erhalten, wurden Celsistrips (Temperatur-Registrier-Etiketten) mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ an kritischen Stellen an der Oberfläche des Innenleiters angebracht und im Anschluss an den Versuch ausgewertet. Die Herausforderung aus versuchstechnischer Sicht bestand darin, den Einfluss der sich über die Prüfdauer verändernden Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Sonneneinstrahlung und Wind auf die Versuchsergebnisse zu separieren.

Zusätzlich wurde der Widerstand vor und nach der Erwärmungsprüfung gemessen und verglichen, um zu zeigen, dass sich der Widerstand des Innenleiters, wie in IEC 62271-1:2017 gefordert, um nicht mehr als 20% veränderte.



Abbildung 3: Hivoduct-Prüfpol und Erwärmungsprüfungsaufbau

Die Prüfungen in der FKH-Versuchsstation in Niedergösgen lieferten wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von Druckluftkabeln und als Vorbereitung für Pilotprojekte. Zusätzlich ermöglichten sie der FKH bereits zu einem frühen Zeitpunkt Erfahrungen mit der innovativen Druckluftkabeltechnologie zu sammeln.

Diese Tests wurden vom Bundesamt für Energie unterstützt (SI/502385).



AUTOR

Martina Stadelmann

MSc ETH ETIT
Projektingenieurin

Überprüfung der Isolationsfestigkeit eines Blitzschutzkabels mit einer Stossspannungsprüfung nach IEC 62561-8

Die FKH wurde beauftragt, die Isolationsfestigkeit eines Blitzschutzkabels mit Halbleiterschirm mit einer Stossspannungsprüfung nach IEC 62561-8¹ zu überprüfen. Dabei wurden mehrere Kabelstücke vom gleichen Typ, aber mit verschiedenen Eigenschaften der halbleitenden Schicht, untersucht.

Die Versuchsanordnung wurde nach IEC 62561-8 in der FKH-Versuchsstation Däniken aufgebaut (siehe Abbildung 1 und 2). Hierbei wird der Prüfling in ein geerdetes Metallrohr eingeleitet und der halbleitende Schirm des Prüflings auf beiden Seiten des Rohrs geerdet. Die mit dem Prüfling zu verbindende Vergleichsanordnung, bestehend aus zwei im Kreuz angeordneten Stangen, welche eine Funkenstrecke bilden und die angelegte Stossspannung im Rücken abschneidet. Der Funkenstreckenabstand der Vergleichsanordnung «S_c» wurde gemäss den Angaben des Herstellers eingestellt.

Die Prüflinge wurden mit negativen, im Rücken abgeschnittenen Stossspannungen mit dem geforderten Scheitelwert beaufschlagt.

Bei allen Prüflingen wurden die Akzeptanzkriterien:

- Abschneidezeit: $1.0 \mu\text{s} < T_c < 1.4 \mu\text{s}$ und
- 3 Stossspannungen nur mit Überschlagen auf der Vergleichsanordnung ohne Durchschlag in der Kabelisolation eingehalten.

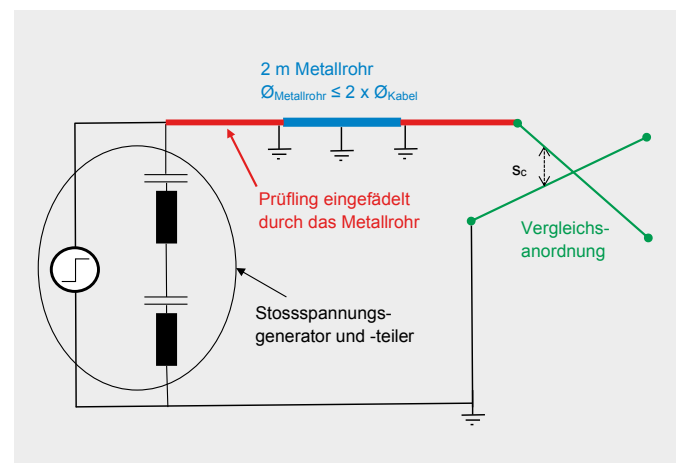


Abbildung 1: Versuchsanordnung nach IEC 62561-8



Abbildung 2: Versuchsanordnung aufgebaut in der FKH-Versuchsstation in Däniken, mobiler 800-kV-Stossgenerator im Hintergrund, im Vordergrund v.l.n.r.: Vergleichsanordnung, Metallrohr für die Einfädung des Prüflings, Stossteiler

¹ IEC TS 62561-8, Lightning protection systems components (LPSC) – Part 8: requirements for components for isolated LPS, Edition 1.0, 2018-01



Abbildung 3: links: Auswertung der Parameter der Stossspannung mit einem Auswertesystem, rechts: registrierte, im Rücken abgeschnittene Stossspannung

Stossprüfungen werden bei der FKH regelmässig angefragt. Bisher wurde jeweils der mobile 800-kV-Stossgenerator der FKH mit seinem kompakten und niederinduktiven Aufbau in der Versuchsstation Däniken und vor Ort eingesetzt. Der Stossgenerator ist allerdings in der Spannung und der maximalen Lastkapazität begrenzt. Die FKH wird in naher Zukunft in der Lage sein, mit einem neuen, mobilen Stossgenerator (modularer Aufbau bis 1800 kV), diese Art von Prüfungen für noch höhere Spannungspegel durchzuführen.



AUTOR

Mario Gobeli

Dipl. El.-Ing. FH
Projektingenieur



AUTOR

Vahe Der Houhanessian

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur

Untersuchung der Erdfehler-Potenzialausbreitung über armierte Betonwinkel-Fertigelemente an Bahnsteigkanten

Für den Bau von Bahnsteigkanten werden heute standardmässig Fertigwinklelemente aus Eisenbeton eingesetzt (Abbildung 1). Aufgrund der eingelegten Armierungsstäbe, und der relativ niedrigen elektrischen Widerstände von Betonteilen im feuchten Aussenbereich, besitzen solche Elemente eine gute Längsleitfähigkeit, die in Erdfehlerfällen zu Spannungsverschleppungen führen könnten. Das Szenario eines Fahrleitungsrisses mit einer Berührung der Bahnsteigkante durch den Fahrdrabt steht hier im Vordergrund. Nach EN 50122-1 dürfen gefährliche Potenzialverschleppungen über leitfähige Objekte parallel zum Gleis eine Distanz von 15 m nicht überschreiten. Die FKH hat im vergangenen Jahr im Auftrag eines europäischen Bahnunternehmens im Rahmen von Abklärungen zur Personensicherheit [1] messtechnisch untersucht, mit welchen Distanzen für eine Verschleppung personengefährlicher Potenziale über aneinandergereihte armierte Betonwinkel zu rechnen ist.



Abbildung 1: Einbau von Betonwinkel-Fertigelementen an einer Bahnsteigkante
(Foto mit freundlicher Genehmigung der WBI, AG, Schaffhausen, www.wbi.ch)

Die sich im Erdfehlerfall einstellende Potenzialverteilung ist durch die elektrischen Widerstände der Betonteile, die Übergangswiderstände zwischen den Betonteilen und jenen von

den Betonteilen gegen die Erdung bestimmt. Diese Widerstandswerte wurden bei Niederspannung und Hochspannung ausgemessen.

Bei den Hochspannungsversuchen mit Testspannungen bis 20 kV wurde festgestellt, dass bei aneinandergereihten Betonelementen erhebliche Ausgleichsströme fließen. Zumindest in den ersten Sekunden treten aber keine Durchschläge zwischen zwei benachbarten Betonelementen auf. Abbildung 2 zeigt den Versuchsaufbau für die Messung der Potenzialverteilung an vier aneinandergereihten Betonwinkeln auf Betonsockeln.

Es wurde festgestellt, dass die Widerstandswerte der Betonteile, und auch jene über den Fugen, nicht konstant sind. Sie nehmen in erheblichem Masse sowohl mit zunehmender Spannung wie auch mit zunehmender Temperatur des Betongefüges stark ab. Die Temperatur steigt bei Spannungen im kV-Bereich aufgrund der hohen elektrischen Leistung rasch an.

Die Erdfehlerströme, die bei Berührungen einer Betonfertigteil-kante mit einem elektrischen Leiter auf Fahrleitungspotenzial entstehen, liegen im ersten Moment im Bereich einiger 10 A. Diese steigen weiter an und führen zu einer schnell anwachsenden Verlustleistung bis in den Megawatt-Bereich. Bei den Labormessungen mussten die Versuche bei Erreichen einiger 100 kW jeweils abgebrochen werden, ohne dass ein vollständiger Lichtbogenentladung aufgetreten war. Es muss angenommen werden, dass der folgende weitere Leistungsanstieg ein rasches Schmelzen der Betonteile bewirkt. Bei den Versuchen wurden bereits Verglasungsspuren festgestellt. Die Folge sind verzweigte Lichtbogenentladungen in Fugen und Poren, welche vorwachsen, bis sie auf einen geerdeten Leiter treffen oder bis durch den Stromanstieg eine Überstromausschaltung ausgelöst wird.



Abbildung 2: Versuchsaufbau für die Messung der Potenzialverteilung auf 4 aneinandergereihten Fertigbeton-Winkeln

Aus den Ergebnissen konnte mit einem Kettenleiterwiderstandsmodell die Potenzialverteilung in Funktion der Distanz zu einem Erdberührungsfehler extrapoliert werden. (Abbildung 3).

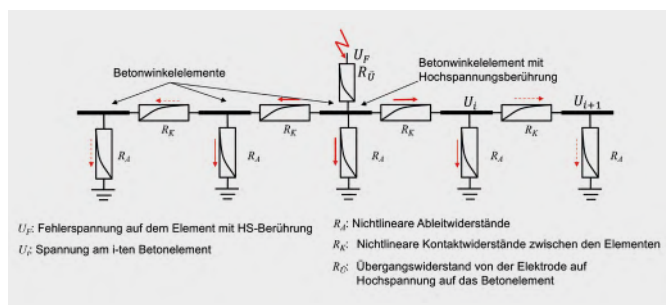


Abbildung 3: Ersatzschaltbild für die rechnerische Abschätzung des Potenzialverlaufs entlang einer Reihe von Bahnsteigkantenelementen

Aufgrund der Erkenntnisse aus Messung und Simulation kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Kontakt eines Leiters auf Fahrspannungspotenzial mit der Bahnsteigkante das Auftreten lebensgefährlicher Berührungsspannungen ausserhalb eines Radius von 15 m um die Fehlerstelle, zumindest in den ersten Sekunden nach dem Fehlerereignis, unwahrscheinlich ist. Angesichts des hochohmigen Übergangswiderstands vom Bahnsteigboden auf den Körper von Fahrgästen werden Berührungsspannungen an bahngeerdeten metallischen Objekten in 15 m Entfernung nicht als lebensgefährlich hoch angesehen.

Abbildung 4 zeigt hierzu eine Simulation mit dem Kettenleitermodell unter Verwendung der gemessenen Längs- und Querspannungen mit linearen Werten (bei kleinen Spannungen) und nichtlinear spannungsabhängigen Widerstandswerten.

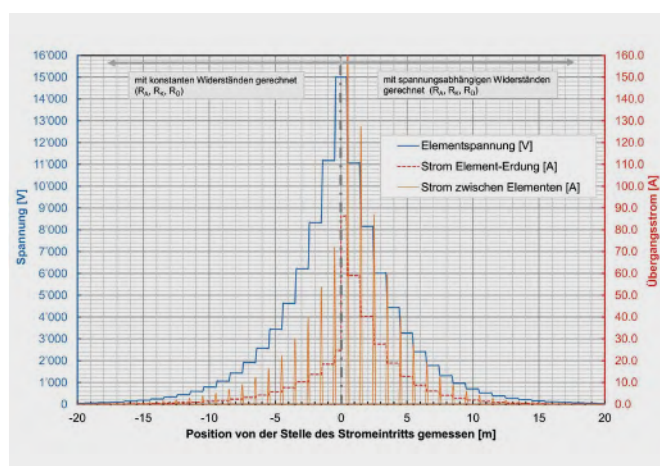


Abbildung 4: Berechnete Spannungsverteilung mit zwei Varianten eines Kettenleitermodells aufgrund der Widerstände an den Betonfertigelementen im ungünstigsten Fall. An der Position 0 befindet sich das Fertigwinkелеlement mit Hochspannungsberührung mit einer Spannung von 15 kV. Dargestellt ist das berechnete Potenzial und die Ströme an je 20 Elementen links und rechts davon. Auf der linken Seite wurde mit Widerständen bei kleinen Messspannungen simuliert, auf der rechten Seite mit spannungsabhängigen Widerständen, gemäss der gemessenen Charakteristik

- [1] Gerold Punz, Markus Fanta, «Untersuchungen zur Notwendigkeit von Erdungsmassnahmen bei Bahnsteigkanten», Elektrische Bahnen, eb Ausgabe 2–3 | 2023



AUTOR

Reinhold Bräunlich

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur

Praktischer Einsatz von Kabelprüfadaptern für Hochspannungsprüfungen an GIS bis 245 kV

Hochspannungsprüfungen an gasisolierten Schaltanlagen (GIS) vor Ort erfolgen typischerweise anlässlich von:

- Abnahmeprüfungen vor Inbetriebnahme (Erst-Anlage und Erweiterungen)
- Nachprüfungen nach geplanten Eingriffen in das Isolationssystem (z.B. nach Revision mit Öffnung von Gasräumen)
- Nachprüfungen nach Reparaturen (z.B. infolge von Havarien)

Das gasisierte Isolationssystem ist besonders empfindlich auf Partikel, welche während der Montage in der Fabrik und vor Ort in die Gasräume gelangen können. Partikel-Dimensionen im Millimeter-Bereich mit Gewichten im Milligramm-Bereich können bereits zu einer massiven Reduktion der Isolationsfestigkeit führen. Ein 2 mm langes Partikel auf einer Isolierstrecke kann z.B. die transiente Spannungsfestigkeit (Blitzstoss) um 50% reduzieren [1]. Bei entsprechender Belastung würde dies zum Durchschlag führen. Bei einer derart starken Reduktion der Spannungsfestigkeit reicht der Schutz durch Ableiter nicht mehr aus.

Zur Einspeisung der Hochspannung anlässlich einer Hochspannungsprüfung, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Diese unterscheiden sich z.B. durch die Notwendigkeit der Öffnung der GIS nach abgeschlossener und bestandener Hochspannungsprüfung.

HS-Einspeise-Möglichkeiten, welche ein *Öffnen der Gasräume* nach der Prüfung erfordern (hierbei wird entweder ein vorhandener Blinddeckel an der GIS entfernt oder eine GIS-Komponente, z.B. ein Ableiter oder Wandler) sind:

- Anbau eines GIS-Freiluft-Prüfadapters, typischerweise am letzten Gasraum einer Sammelschiene (je nach GIS-Typ in Kombination mit einem 3-Phasen-Umsteller)
- Anbau einer GIS-Freiluftdurchführung (mit Adapterstücken) an geeigneter Stelle in einem GIS-Feld
- Direkte Anflanschung eines gasisolierten, gekapselten Prüf-

transformators an die GIS (Einschränkung: Kurze Prüfzeiten / kleine Prüfabschnitte aufgrund schlechter Wärme-Abführung)

HS-Einspeise-Möglichkeiten über vorhandene Komponenten *ohne Öffnung der Gasräume* nach der Prüfung sind:

- Freiluft-Durchführungen von GIS-Abgängen (z.B. zu Freileitungen oder Transformatoren)
- Kabel-Abgänge (zumeist kurze), welche nach GIS-Prüfspezifikationen dimensioniert sind
- GIS-Spannungswandler, ausgelegt für erhöhte Leistung und rückwärts betrieben (nur für sehr kurze GIS-Strecken einsetzbar aufgrund schlechter Wärme-Abführung)
- Kabelprüfadapter eingesteckt in die Buchsen eines bestehenden Kabelfeldes via Kabelstecker

Verfahren, welche nach abgeschlossener und bestandener HS-Prüfung ohne nachträgliche Öffnung der GIS auskommen, haben einen klaren Vorteil. Die Gefahr des Eintrags von Partikeln besteht nicht und die Spannungsfestigkeit der Isolation kann für die Gesamtanlage nachgewiesen werden. Zudem muss das Prüf-equipment, bzw. der Prüfadapter, in diesem Fall nicht dasselbe Isoliermedium aufweisen wie die GIS. Dies bietet den Vorteil, dass mit demselben Einspeiseequipment Schaltanlagen, welche mit unterschiedlichen Isoliergasen betrieben werden, geprüft werden können.

Durch die zunehmende Verkabelung der unteren Spannungsebenen beschränkt sich die Einspeisung über Freiluft-Abgänge eher auf GIS der Höchstspannungsebenen 245 kV und 420 kV. Wobei auch diese immer häufiger mit Kabel-Abgängen ausgerüstet sind (insbesondere bei Kavernen-Anlagen).

Die Platzverhältnisse in Gebäuden sind zumeist knapp. Besonders, wenn durch GIS-Erweiterungen mögliche freie Flächen zur Aufstellung von Prüfanlagen nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Verwendung von Kabelprüfadaptern hat den grossen Vorteil,

dass die Platzierung des HS-Prüftestsets innerhalb der Kabel-länge optimiert werden kann bezüglich Schlagweiten und Sicherheits-Abständen zu anderen Einrichtungen. Sogar das Aufstellen der Prüfanlage in einem anderen Raum, in einem anderen Stockwerk oder ausserhalb des Gebäudes ist eine Option. Im Weiteren kann im Falle eines Befundes am eingespiesenen Kabelabgang zumeist einfach auf einen anderen Kabelabgang gewechselt und weitergeprüft werden.

Die Buchsen von nicht benutzten Kabelabgängen werden jeweils für die Prüfung mit druckfesten Deckeln versehen und mit Isoliergas gefüllt, bzw. mit spannungsfesten Blindstopfen verschlossen.

Nachfolgend einige Beispiele für den praktischen Einsatz von Kabelprüfadaptern vor Ort mit entsprechenden Prüfaufbauten:



Abbildung 1: Kabelprüfadapter für die Prüfung der 123-kV-GIS Horw (Rechts oben: Abschirmung der schwer zugänglichen Freiluft-Durchführungen in der Trafobox)



Abbildung 2: Kabelprüfadapter für die Prüfung der 245-kV-GIS Grimsel (sehr beschränkte Platzverhältnisse in der Kaverne)

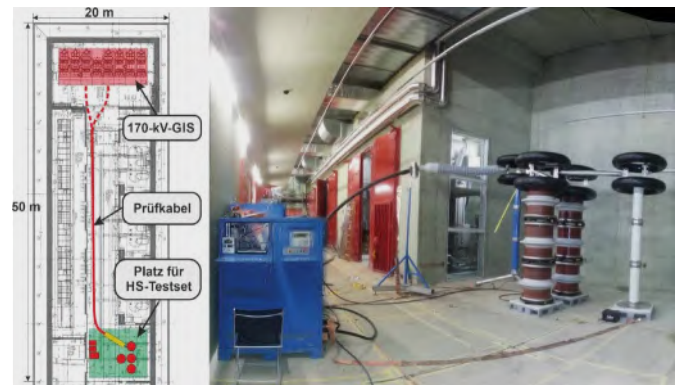


Abbildung 3: Kabelprüfadapter für die Prüfung der 170-kV-GIS Oerlikon (erste GIS mit Alternativ-Gas [2])



Abbildung 4: Kabelprüfadapter für die Prüfung der 145-kV-GIS Therwil (Einspeisung via Vorplatz durch vorhandene Kabelrohre via Kabelkeller auf die GIS; GIS mit synthetischer Luft als Isoliergas)

Die Anwendung von Kabel-Prüfadaptern hat in den letzten Jahren signifikant zugenommen und bewährt sich durch die flexiblen Prüfmöglichkeiten und den einfachen Einsatz.

- [1] Schurer R.; Der Einfluss von Störstellen auf Stützeroberflächen auf die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen in SF6-isolierten Anlagen; Dissertation; Uni Stuttgart; 1999
- [2] Müller P., Thelar D., Diggelmann T., Hengstler J., Hyrenbach M., Zache S., Mann M., Neuhold S.; Betriebserfahrung der ersten 170-kV- und 24-kV-GIS mit alternativem Isolationsmedium basierend auf Ketonen; Stuttgarter Hochspannungs-Symposium 2016



AUTOR

Stefan Neuhold

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur

Erwärmungsversuch an einem 150-kV-Dreileiter-Kabel in der Stadt Zürich

Anlass

Mit der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) wurde im Jahre 1999 ein Grenzwert für die magnetische Flussdichte von $100 \mu\text{T}$ für Orte in denen sich Personen aufhalten können. Zu diesen Orten zählen auch die Trottoirs und Strassen der Stadt Zürich, unter denen teilweise noch ältere Rohrsysteme mit drei DN-150-mm-Rohren im Abstand von 210 mm verlegt sind. Um die NISV trotz Ausbau des 150-kV-Netzes der ewz weiterhin einzuhalten, wurde ein verdrehtes Dreileiter-Kabel von Nexans verlegt, welches gerade noch in ein einzelnes DN-150-mm-Rohr passt. Da es Bedenken bezüglich der Kräfte durch die Ausdehnung bei maximaler thermischer Belastung gab, wurde im März und April 2022 ein Feldversuch durchgeführt.

Prüfquelle und Messtechnik

Der Versuch wurde an den installierten Teilstrecken vom Unterwerk (UW) Drahtzug bis zum Muffenschacht an der Seehofstrasse mit einer Länge von ca. 2000 m durchgeführt. Der Kabelkeller im UW Drahtzug bot ausreichend Platz, um die Prüfquelle und Messsysteme aufzubauen. Abbildung 1 zeigt den 3-phasigen Umrichter der FKH mit Steuerpult und den Anschluss auf die Kabel.



Abbildung 1: 3-phasige Einspeisung mit Umrichter auf die Kabel im UW Drahtzug

Abbildung 2 zeigt das Schema der Quelle mit Prüfling. Die Phasen wurden im Muffenschacht Seehofstrasse zusammengeschlossen und im UW Drahtzug über einen Trenntransformator gespeist. Der Umrichter wurde via Netzfilter an einen für die Dauer des Versuchs eigens zugewiesenen 22/0,4-kV-Transformator vom ewz angeschlossen. Der nachgelagerte Sinusfilter reduziert die hochfrequenten Störaussendungen und sorgt für eine sinusförmige Ausgangsspannung.

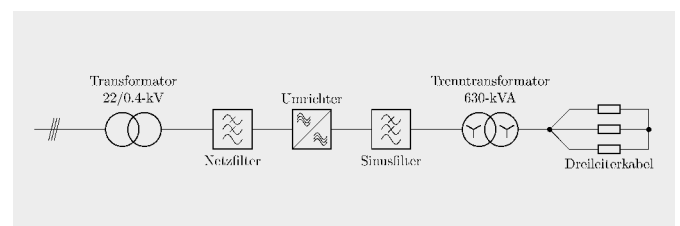


Abbildung 2: Schema der Prüfquelle

Im ersten Test traten versuchstechnische Herausforderungen auf: Der Sinusfilter wurde ohne Einsatz eines Trenntransformators direkt mit dem Dreileiterkabel verbunden. Dabei bildete die Kabelkapazität und die Induktivität des Sinusfilters einen Resonanzkreis. Dessen Resonanzfrequenz lag zu nahe an der Schaltfrequenz des Umrichters von 4 kHz, sodass das Risiko von unkontrollierbaren Schwingungen bestand. Dies konnte durch den Einsatz des zusätzlichen 630-kVA-Trenntransformators zwischen Sinusfilter und Dreileiterkabel behoben werden. Die Komponenten der Prüfquelle sind in Abbildung 3 zu sehen.

Die Versuchsanordnung erlaubte die Erzeugung eines 3-phasigen Stroms von 720 A bei 50 Hz zur thermischen Belastung des Kabels. Dazu musste eine verkettete Spannung von 300 V erzeugt werden. Die Scheinleistung betrug 370 kVA und es resultierte ein Wirkleistungsfaktor von 35%. Somit ergaben sich ohmsche Verluste von 130 kW über die Versuchsstrecke des 150-kV-Kabels. Die Strommessung erfolgte über Klappwandler im UW Drahtzug (Abbildung 4).

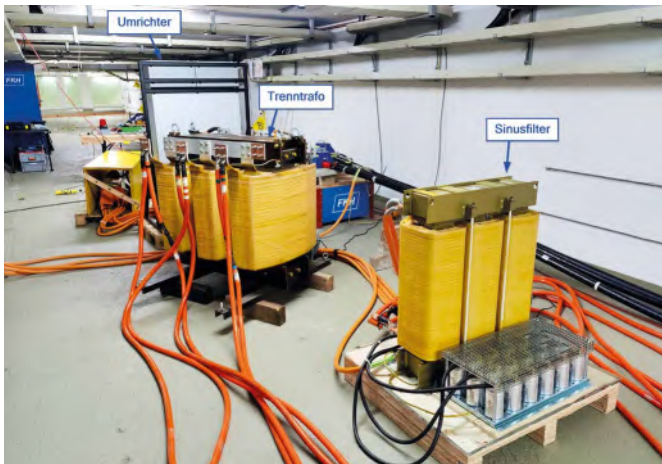


Abbildung 3: Komponenten der Prüfquelle



Abbildung 4: Stromwandler

Die Temperatur wurde mittels eines Lichtwellenleiters (LWL) im Zentrum des Dreileiterkabels gemessen und die «Ausdehnungskraft» mittels Sensoren in den Muffenschächten. Die zugehörige Messtechnik wurde durch weitere Dienstleister bereitgestellt.

Ergebnisse

Bei einem eingespeisten Strom von 720 A über eine Dauer von 80 Std. wurde eine Aussenmanteltemperatur von ca. 75°C gemessen. Gemäss Berechnungen erreicht die Leitertemperatur 10°C mehr als die gemessene Manteltemperatur aus Abbildung 5. Die Strom-Belastungsgrenze, bei der die Leitertemperatur von 90°C erreicht worden war, lag über den Erwartungen. Der Versuch ermöglichte es ewz zudem, den spezifischen

Bodenwärmewiderstand genauer zu bestimmen. Die gemessene Kraft, welche aufgrund der thermischen Ausdehnung resultierte, war rund zehnmal kleiner als der im Werk getestete Maximalwert von 1830 Dekanewton.

Mit dem Versuch konnte nachgewiesen werden, dass das 150-kV-Dreileiter-Kabel der maximalen thermischen Belastung unter realen Bedingungen standhält.

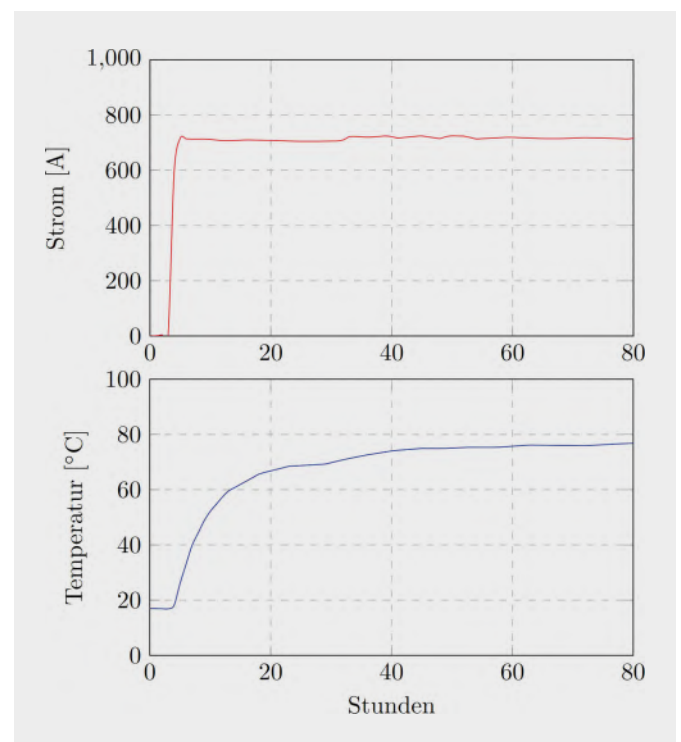


Abbildung 5: Eingespeister Strom und gemessene Temperatur am Aussenmantel (Zentrum des Dreileiterkabels)



AUTOR

Philippe Alff

MSc ETH ETIT

Projektingenieur

Erdungskonzept für das Eidgenössische Schwing- und Älplerfest in Pratteln

Das Eidgenössische Schwing- und Älplerfest (ESAF) 2022 fand in Pratteln in der Region Basel statt. Die FKH wurde beauftragt, eine Stellungnahme zum Erdungs- und Blitzschutzkonzept zu überprüfen und kurz vor der Eröffnung Erdungsmessungen durchzuführen, damit die Sicherheit der Menschen während des Anlasses gewährleistet werden konnte.

Das 700'000 m² grosse Festgelände liegt zwischen der Autobahnausfahrt Pratteln, der A22 und der Bahnlinie Basel – Liestal. Durch das Gelände führt die 220-kV-Freileitung München – Lachmatt und die 380-kV-Freileitung Asphard – Gösgen in unmittelbarer Nähe der Haupttribüne. Wegen der Näherung zur Bahnlinie und zur Hochspannungsfreileitung sind im Konzept neben den üblichen Erdungs- und Blitzschutzmassnahmen in temporären Freiluftfestanlagen insbesondere auch Massnahmen gegen eine mögliche Elektrisierung durch Fehlerereignisse im Betrieb der Bahnstromanlage und der Höchstspannungsfreileitung zu berücksichtigen.

Die Erdungsspannungen am Mast und die möglichen Berührungsspannungen im Festgelände in der Umgebung des Masts wurden theoretisch mit den zur Verfügung stehenden Werten abgeschätzt. Bis zu einer Distanz von ca. 95 m wurde

eine Überschreitung der zulässigen Berührungsspannung prognostiziert, wenn Metallteile berührt werden, die mit dem neutralen Potenzial, d.h. mit dem PEN-Leiter des Versorgungsnetzes in Berührung stehen.

Eine Reduktion der Berührungsspannung entsteht durch die lokale Erdung der Zelte mit Erdungsspiessen, die einen Gegen-Potenzialtrichter erzeugen. Das Beispiel in Abbildung 2 zeigt, dass im näheren Umfeld der Masten auch bei lokalen Erdungen unzulässige Berührungsspannungen entstehen können. Im Abstand von 25 m vom Mastzentrum und bei einem Ersatz-Erdungsdurchmesser von 1 m einer Erdung, die auch mit dem neutralen Potenzial in Verbindung steht, wird eine unbelastete Berührungsspannung von 1800 V prognostiziert.

Bei der Messung von Berührungsspannungen kann der Körperwiderstand einer Person von 1 k Ω berücksichtigt werden, was ebenfalls zu einer Reduktion der Berührungsspannung führt, diese Reduktion ist stark vom spezifischen Widerstand des Bodens, d.h. von der aktuellen Bodenfeuchtigkeit abhängig.



Abbildung 1: Lageplan mit den Hochspannungsleitungen und den beiden Masten in der Nähe des Festgeländes

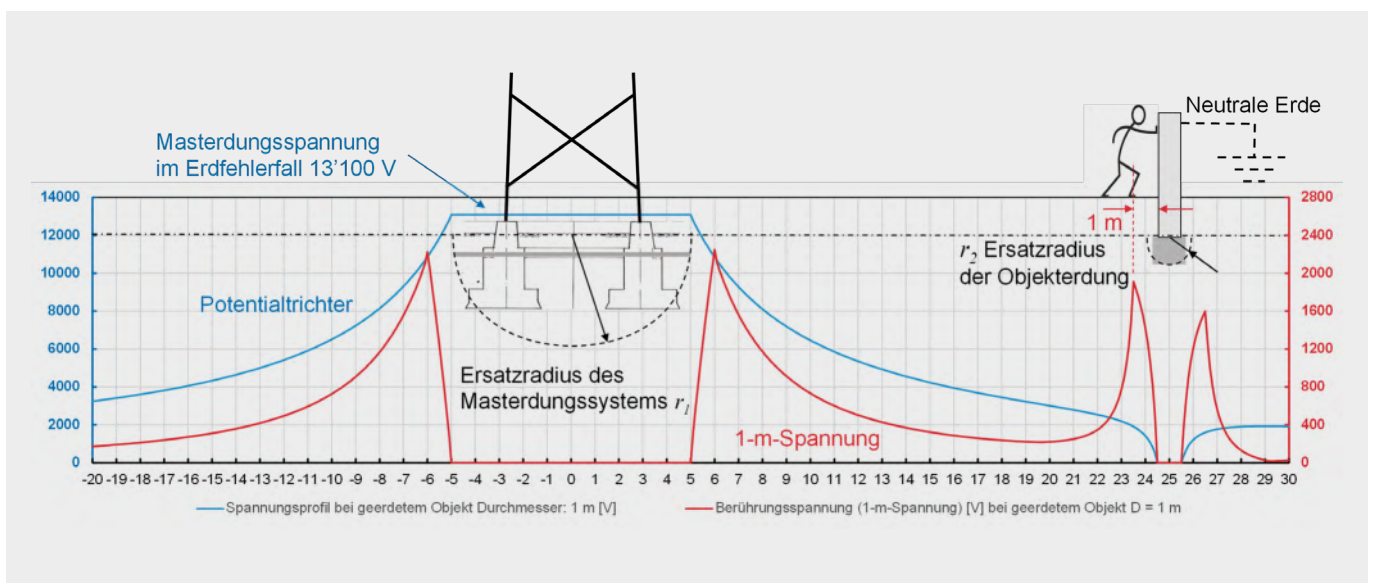


Abbildung 2: Beispielberechnung für einen Erdfehler an einem Mast mit einem Ersatzdurchmesser des Erdungssystems von $r_1 = 10$ m. Fehlerstrom von der Mast-Erdung auf den Erdboden: 2,04 kA, Spezifischer Erdbodenwiderstand: 200 Ω m. Auswirkung eines Objekts in einem Abstand von 25 m vom Mastzentrum, welches geerdet ist und neutrales Potenzial aufweist. Erdpotenzialverlauf (blaue Kurve, linke Vertikalachse) und Verlauf der Berührungsspannung (Spannung, die über 1 m Distanz abgegriffen wird) (rote Kurve, rechte Vertikalachse, 5-fach gedehnt)

Zur Beurteilung der Erdungsverhältnisse des Festgeländes des Eidgenössischen Schwing- und Äplerfests wurden kurz vor der Eröffnung im Areal und in deren Umgebung Erdungsmessungen durchgeführt. Die Erdungsimpedanz des Masts sowie Berührungs- und Differenz-Spannungen wurden gemessen. Mit diesen Messungen wurden die Berührungsspannungen im Bereich des Festgeländes für den Fall eines Erdschlusses an der 380-kV-Freileitung Gösigen – Asphard oder der 220-kV-Freileitung Münchwilen – Lachmatt (auf denselben Masten) auf Zulässigkeit überprüft.

Um die Berührungsspannungen messen zu können, wurde ein Strom in die Mastfüsse eingespeist. Das verwendete Gerät ist ein CPC100 der Firma Omicron, das einen Strom von 6 A bei einer Frequenz von 70 Hz lieferte, um nicht von der Netzfrequenz gestört zu werden. Die Berührungsspannung wurde dann mit einem FFT-Gerät zwischen den

Metallstrukturen und einem Erdspiess in einem Abstand von 1 m gemessen.

Um die gemessenen Werte hochzurechnen, wurde ein Faktor berechnet, der sich auf den tatsächlichen Erdkurzschlussstrom bezieht. Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Kontaktspannungen, bezogen auf einen Erdschlussstrom von 1 kA, die auf dem Festgelände gemessen wurden. Diese Messpunkte können mithilfe des Plans in Abbildung 5 lokalisiert werden.

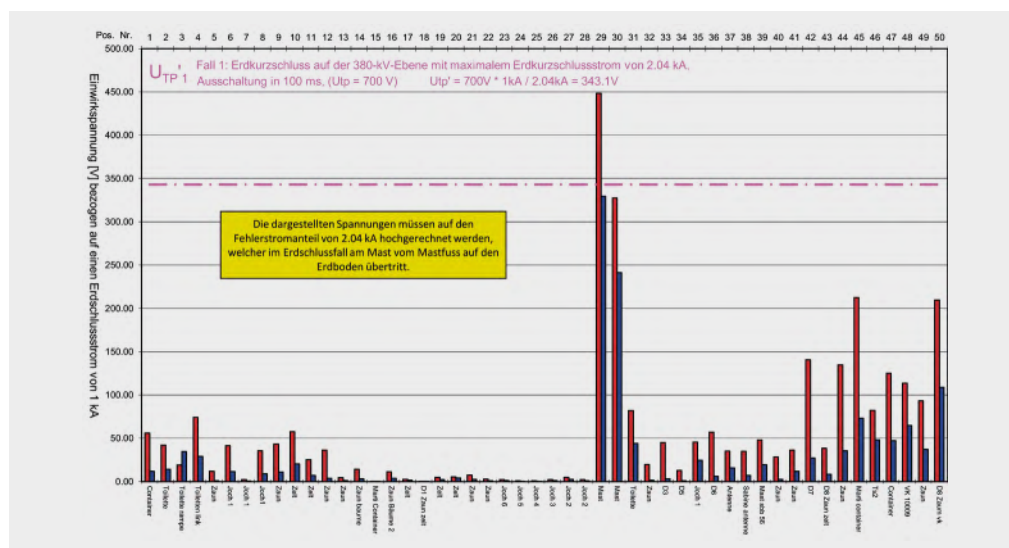


Abbildung 3: Berührungs- und Differenzspannungen bezogen auf 1 kA Erdkurzschlussstrom. In Rot sind die Spannungen mit 1 MΩ gemessen und in Blau mit 1 kΩ

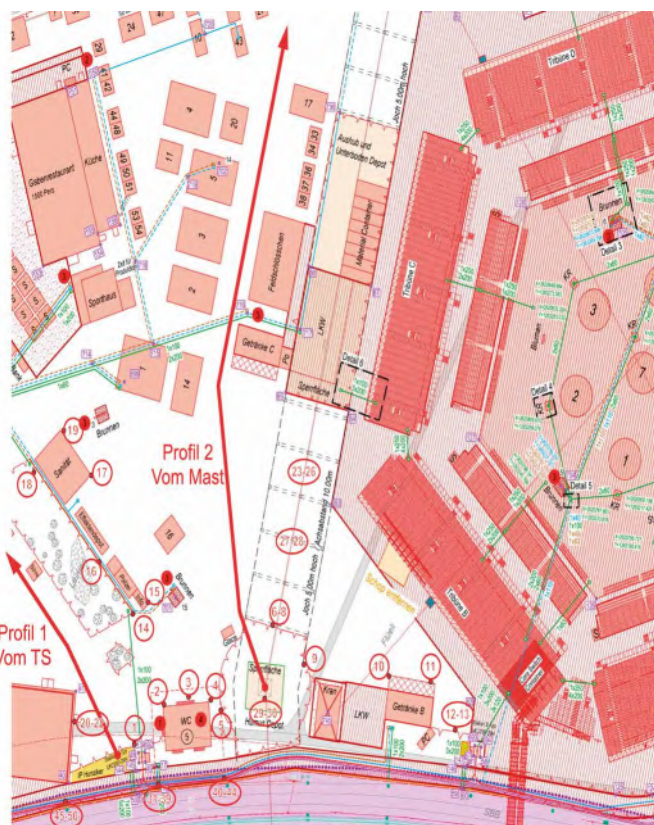


Abbildung 4: Situationsplan der verschiedenen Messpunkte mit den Profilen.

Keine der gemessenen Berührungsspannungen überschreitet die zulässigen Grenzwerte gemäss Anhang 4 der Starkstromverordnung im Falle eines Erdkurzschlusses am Mast. Die durchgeführten Erdungen der verschiedenen Metallstrukturen waren in Ordnung und es mussten keine Massnahmen ergriffen werden.

Für den Fall, dass ein Leiterseil bricht, wurde ein Joch gebaut, damit es zu einem Erdschluss und einer Ausschaltung kommt, bevor die Leitung auf den Boden fällt. Es musste eine Überprüfung des Widerstandes zwischen dem oberen Teil und der Erde durchgeführt werden. Die Werte lagen im Bereich von mΩ, sodass keine Massnahmen ergriffen werden mussten.

Es wurde auch eine Erdungsmessung von mobilen Kamera-Kranen in der Nähe der Hochspannungsleitungen durchgeführt. Dabei wurde ein zu hoher Erdungswiderstand festgestellt und der Wert durch Erdspeisse reduziert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die theoretischen Berechnungen für die Spannungserhöhung am Mast bei einem Erdschluss sowie die Berührungsspannungen mit einer zu grossen Unsicherheit behaftet sind, als dass man in Sachen Personensicherheit Entwarnung geben könnte. Erst durch Messungen vor Ort konnte gezeigt werden, dass die zulässigen Berührungsspannungen nicht überschritten werden und die Erdungswiderstände auf einem akzeptablen Niveau liegen.



AUTOR

Diego Friedli

MSc Eng. HES-SO

Projektingenieur

Kabelprüfungen

Zur Erhöhung der Versorgungssicherheit, und um Engpässe zu verhindern, sind bei Swissgrid schweizweit verschiedene Projekte in Realisierung.

Ein Meilenstein wurde im Jahr 2022 erreicht, indem das Kraftwerk Nant de Drance definitiv an das Höchstspannungsnetz angeschlossen wurde. Hierzu wurden u.a. zwei doppelsträngige 380-kV-Kabelsysteme zwischen dem Unterwerk La Bâtiâz und dem Portal Le Verney in einem unterirdischen Stollen verlegt. Am Portal Le Verney wurden die zwei Kabelleitungen mit den Freileitungen nach Romanel bzw. Chamoson verbunden.

Die FKH durfte hierzu mit einer Kabelprüfung vor Ort nach Fertigstellung der Montage ihren Beitrag leisten. Die 1,2 km lange Kabelstrecke wurde einer Spannungsprüfung mit 400 kV mit gleichzeitiger TE-Messung unterzogen.

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, lag eine der Herausforderungen in der teilentladungsfreien Einspeisung der Prüfspannung auf einer Höhe ab Boden von ca. 15 m. Die Verbindungen zwischen der Prüfanlage und dem Prüfling erfolgte mit bis zu 10 m langen Alu-Rohren mit 12 cm Durchmesser.

Eckdaten der Kabelsysteme

Kabel	1000 mm ² , Cu, 380 kV
Länge	1,2 km pro Kabel
Anzahl	Pro System, 3 Phasen à je 2 Kabel
Kapazität	ca. 190 nF pro Phase

Eckdaten der Prüfanlage

Induktivitäten	80 H pro Drossel
Induktivität total	89,4 H (3 x 3 Türme)
Prüffrequenz	27,5 Hz
Umgesetzte Leistung	10,76 MVA



Abbildung 1: Serienresonanzanlage für die Prüfung des Kabelsystems Romanel



Abbildung 2: Prüfanlage und Freiluft-Kabelendverschlüsse im Unterwerk Bickingen

Eckdaten der Kabelsysteme

Kabel	1600 mm ² , Cu, 380 kV
Länge	0,11 km
Anzahl	3 Phasen
Kapazität	ca. 19 nF pro Phase

Eckdaten der Prüfanlage

Induktivitäten	80 H pro Drossel
Induktivität total	170 H
Prüffrequenz	86,7 Hz
Umgesetzte Leistung	1,846 MVA

Mit dem Ziel der Stärkung der Versorgungssicherheit, bewilligte der Bundesrat die temporäre Erhöhung der Betriebsspannung (von 220 kV auf 380 kV) auf den Leitungen Bickigen – Chippis (Gemmileitung) und Bassecourt – Mühleberg. Dazu musste u.a. die Leitungseinführung im Unterwerk Bickingen angepasst werden. Es wurde eine provisorische 380-kV-Kabelverbindung zwischen dem Abspannportal der 220-kV-Freileitung und der 380-kV-Freiluftschaltanlage erstellt. Auch für dieses Projekt durfte die FKH mit der Kabelprüfung vor Ort mitwirken.

Die 380-kV-Verbindung setzte sich aus drei 110 m langen Einleiterkabeln zusammen, welche an beiden Enden mit Freiluft-Kabelendverschlüssen versehen sind. Mit einer Spannungsprüfung und gleichzeitiger Teilentladungsmessung wurde auch hier das Kabelsystem auf Montagefehler überprüft.

Auch wenn dieselben Prüfanforderungen wie im vorgängig präsentierten Projekt galten, waren in diesem Fall aufgrund der deutlich kleineren Last des Prüflings nur zwei Drosseln für den Prüfkreis notwendig.

Ein Vergleich der Abbildungen 1 und 2 zeigt, dass die seit Jahren eingesetzten modularen Serie-Resonanzanlagen für unterschiedliche Prüfsituationen mit optimaler Effizienz eingesetzt werden können.



AUTOR

Pascal Fehlmann

Dipl. El.-Ing. FH
Projektingenieur

Transformator-Diagnostik: Schadensbilder und dazugehörige Zersetzungsgas-Signaturen

Zersetzungsgasanalysen können wichtige Hinweise auf innere elektrische Fehler von Hochspannungstransformatoren geben. Zersetzungsgase entstehen durch chemische Reaktionen, vor allem von Öl und auch Zellulose. Deren Entstehung wird begünstigt durch erhöhte Temperaturen, wie sie bei Heissstellen oder Entladungsvorgängen auftreten. Die Zusammensetzung und Menge der Zersetzungsgase lassen daher Rückschlüsse auf die Fehlerursache zu. Sind die Gaskonzentrationen erhöht und bestätigen die gängigen Auswerteverfahren (z.B. nach IEC 60599 oder mit den Drei- oder Fünfecken von Michel Duval) den Verdacht auf einen Fehler, wird in der Folge versucht, mit elektrischen Messmethoden den Fehler zu bestätigen und bestenfalls zu lokalisieren. Zum Einsatz kommen vor allem Wicklungswiderstands- und Übersetzungsverhältnis-Messungen. Im Jahr 2022 kam dieser kombinierte Einsatz von Zersetzungsgasanalysen und elektrischen Methoden 2-mal bei der Analyse einer Heissstelle zur Anwendung.

Bei Maschinentransformatoren werden häufig Schalter für das spannungsfreie Umschalten des Übersetzungsverhältnisses eingesetzt. Werden solche Schalter während Jahren oder Jahrzehnten nicht bewegt, kann es an den Kontakten zur Ablagerung von Ölkohle und damit zu erhöhten Übergangswiderständen kommen.

Beim ersten Beispiel handelt es sich um einen Maschinentransformator (5,3 MVA, 11,5 / 3,5 kV, Jg. 2012) mit einem fünfstufigen Umsteller. Nach einem Buchholzalarm wurden Zersetzungsgasanalysen veranlasst. Tabelle 1 zeigt die gemessenen Gaskonzentrationen.

Parameter		Ref.-Wert FKH
Wasserstoff H ₂ [ppm]	470	< 100
Methan CH ₄ [ppm]	1100	< 40
Ethan C ₂ H ₆ [ppm]	520	< 30
Ethylen C ₂ H ₄ [ppm]	3400	< 100
Acetylen C ₂ H ₂ [ppm]	31	< 10

Tabelle 1: Zersetzungsgaskonzentrationen nach Buchholzalarm

Alle Gase zeigen erhöhte Konzentrationen, die höchste Konzentration erreicht Ethylen. Diese Gassignatur ist typisch für Heissstellen mit Temperaturen von über 700 °C.

Wicklungswiderstandsmessungen haben ergeben, dass der Widerstand auf der Betriebsstellung 3 deutlich über der Werksmessung liegt.

Stellung	Vor-Ort-Messung [mΩ]	Werks-Messung [mΩ]	Abweichung
1	107,8	106,27	+1,4%
2	102,8	101,37	+1,4%
3	105,9	98,39	+7,6%
4	95,85	94,60	+1,3%
5	92,44	91,47	+1,1%

Tabelle 2: Wicklungswiderstände

Es wurde entschieden, den Transformator zu öffnen. Abbildung 1 zeigt den Umstellerkontakt der Stellung 3.



Abbildung 1: Überhitzter Kontakt der Stellung 3



Abbildung 2: Verkohelter und intakter Kontakt

Da die erforderlichen Ersatzteile nicht kurzfristig geliefert werden konnten und der Umsteller eigentlich nicht benötigt wird, wurde entschieden, den Umsteller zu überbrücken und den Transformator fest auf Stellung 3 zu verschalten.

Aufgrund dieser Untersuchungen lag es nahe, auch den baugleichen Trafo einer zweiten Gruppe zu untersuchen. Tatsächlich zeigte dieser annähernd so hohe Gaskonzentrationen wie der erste Trafo. Dieser wurde in der Folge auch umgebaut.

Wenn die Kontakte nur leicht mit Ölkohle belegt sind, kann es unter Umständen gelingen, durch mehrfaches Durchschalten eine beginnende Heissstelle dauerhaft zu beseitigen. Im vorliegenden Fall wäre dies aber wahrscheinlich nicht gelungen, da die Kontakte schon zu tief erodiert waren. Um solche Ereignisse zu verhindern, wird empfohlen, Umsteller von Anfang an jährlich mehrfach durchzuschalten, um beginnende Ablagerungen zu entfernen.

Beim zweiten Fall handelt es sich um einen wesentlich grösseren Dreiwickler (160 MVA, 220 / 150 / 10 kV, Baujahr 2003), der sowohl als Netzkuppler als auch als Maschinentransformator dient. Bei einer Routinekontrolle wurden die in Tabelle 3 gezeigten Zersetzungsgaskonzentrationen festgestellt.

Parameter		Ref.-Wert FKH
Wasserstoff H ₂ [ppm]	710	< 100
Methan CH ₄ [ppm]	2200	< 40
Ethan C ₂ H ₆ [ppm]	1100	< 30
Ethylen C ₂ H ₄ [ppm]	4100	< 100
Acetylen C ₂ H ₂ [ppm]	19	< 10

Tabelle 3: Zersetzungsgaskonzentrationen bei Routine-Kontrolle

Auch hier ist das Leitgas Ethylen und auch diese Gas-Signatur ist typisch für Heissstellen mit Temperaturen von über 700°C.

Die Widerstandsmessung (Tabelle 4) zeigte eine starke Erhöhung gegenüber der Werksmessung.

Wicklung	Vor-Ort-Messung [mΩ]	Werks-Messung [mΩ]	Abweichung
3U – 3V	6.08	4.087	+48%
3V – 3W	7.46	4.077	+83%
3W – 3U	11.04	4.162	+165%

Tabelle 4: Wicklungswiderstände

Beim mehrfachen Betätigen des Umstellers verbesserten sich die gemessenen Widerstände nicht. Es wurde beschlossen, den Transformator wieder in Betrieb zu nehmen, allerdings ohne Last auf der betroffenen Tertiärwicklung. Leider erfolgte nach weniger als 24 h ein Buchholzalarm und der Transformator wurde ausser Betrieb genommen. Die Lehre daraus ist, dass es gefährlich sein kann, einen Umsteller, der fast 20 Jahre nicht bewegt wurde, zu betätigen.

Der Transformator wurde vor Ort entleert und durch Mannlöcher inspiziert. Abbildung 2 zeigt einen völlig verkohlten Kontakt.

In der Folge ist es gelungen, den Transformator vor Ort zu reparieren: Der Umsteller wurde ausgebaut und die Wicklungen direkt verschaltet.



AUTOR

Pascal Fehlmann

Dipl. El.-Ing. FH
Projektingenieur



AUTOR

Dr. Thomas Heizmann

Dr. sc. techn. ETH
Leiter Isolieröllabor

FKH-Labor für Isolierölanalysen

Analyseaufträge

Nach dem Rekordjahr 2020 ist der Umsatz im Jahr 2021 und auch im Jahr 2022 leicht zurückgegangen. Die Anzahl der verarbeiteten Proben lag dieses Jahr mit 1818 nur wenig hinter dem Jahr 2020 (1836) zurück. Erneut wurden aber weniger Zersetzungsgas- und Furan-Analysen durchgeführt. Die Ursache dafür ist unbekannt, es muss sich in den kommenden Jahren zeigen, ob es sich lediglich um eine zufällige Folge der Analysenzyklen (4 Jahre für Hochspannungstransformatoren bei den meisten Kunden) handelt, oder ob es andere Gründe gibt. Der Zugang an Proben von Mittelspannungstransformatoren, die zum ersten Mal erprobt wurden, hält weiter an, was hoffen lässt, dass das Probenvolumen durch regelmässige Wiederholung der Analysen weiter wachsen wird.

Notfalldienst

Im Jahr 2022 wurden vier Notfalleinsätze nach Buchholzalarmen durchgeführt. Nur beim ersten Fall über den im Abschnitt «Transformator-Diagnostik» berichtet wird, waren Zersetzungsgase nachweisbar. Bei den anderen Fällen handelte es sich um Störungen des Schutzes, oder der Betreiber wollte nach einem Kurzschluss im Netz Gewissheit haben, dass der Trafo dabei nicht beschädigt wurde.

Qualitätssicherung

Die im Jahr 2012 erworbene Akkreditierung gemäss ISO/IEC 17025 als «Prüfstelle für Isolieröl und Buchholz-Gas» durch die Schweizerische Akkreditierungsstelle SAS musste 2022 erneuert werden. Bei der vertieften Begutachtung des Fachexperten ist sein Augenmerk auf die Bestimmung des Passivatorgehalts gefallen. Diese Bestimmung wurde in den letzten 10 Jahren insgesamt nur 42-mal ausgeführt, zum Teil mit Lücken von mehreren Jahren. Es wurde entschieden, diese Analyse aus dem Geltungsbereich der Akkreditierung zu nehmen, da eine sehr aufwändige Validierung des Verfahrens nötig geworden wäre.

Die folgenden Verfahren sind weiterhin im Geltungsbereich der Akkreditierung:

- Dielektrisch-chemische Analysen
- Inhibitorgehaltsbestimmung
- Zersetzungsgasanalyse
- Furananalyse
- Bestimmung von potenziell korrosivem Schwefel
- Bestimmung der Oxidationsstabilität
- Probenahme von Isolieröl an Transformatoren und Wandlern
- Probenahme von Buchholzgas

Die Passivatorbestimmung wird aber weiterhin angeboten. Wie bis anhin stellen wir bei Bedarf für die fünf Furanderivate Kalibrationslösungen in vier Konzentrationen her, mit denen das HPLC-Analysegerät kalibriert wird.



AUTOR

Dr. Thomas Heizmann

Dr. sc. techn. ETH
Leiter Isolieröllabor

Entwicklung der FKH-Gerätedatenbank zur Optimierung der Logistik von Vor-Ort-Prüfungen

Im Jahr 2022 wurden bei der FKH im Bereich Elektrotechnik 200 Aufträge abgewickelt. Der überwiegende Teil davon sind Vor-Ort-Aufträge, welche den Hin- und Rücktransport von umfangreichem Mess- und Prüfmaterial mittels Lastwagen-transport erfordern. Auch wenn ein Prüfling nur für Minuten auf Spannung gelegt werden soll, erfordert dies aufwändige Prozesse im Hintergrund, welche häufig für den Kunden unsichtbar bleiben. Dies beinhaltet:

- 1) Definition der Prüfparameter anhand der Kenndaten des Prüflings, der Normen und FKH-Prüfempfehlungen und den Anforderungen der Kunden
- 2) Berechnung der Kreisparameter und der resultierenden Resonanzfrequenz und Entscheidung wie viele Drosseln parallel und oder in Reihe geschaltet werden müssen zur Erzeugung der gewünschten Spannungsform
- 3) Festlegung des Prüfzeitraums, Erstellen einer Materialliste der notwendigen Mess- und Prüfgeräte sowie Abklären der Verfügbarkeit von Material und Personal und Identifizierung von allfälligen Konflikten mit parallel ablaufenden Prüfungen
- 4) Rüsten, verladen und transportieren des Materials auf die Baustelle und Aufbau der Prüfkreise
- 5) Prüfung mit allfälliger anschliessender Fehlereingrenzung (Da der Zustand des Prüflings vorgängig unbekannt ist, besteht praktisch immer eine Unsicherheit in der zu erwartenden Prüfdauer.)
- 6) Rückbau, Rücktransport, Kontrolle des Materials auf allfällige Defekte mit anschliessender Einlagerung
- 7) Dokumentation der Prüfung mit Protokoll oder Prüfbericht

Es wird schnell ersichtlich: Die Logistik hierzu ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für das Funktionieren der FKH als Dienstleister.

Als Adamo Mele 1999 bei der FKH als Elektromechaniker eingestellt wurde, gehörte es zu seinen Aufgaben, die Messgeräte der FKH zu warten. Dies beinhaltete das Organisieren

der Kalibrierungen, kleine Reparaturen durchzuführen oder via Hersteller zu organisieren und nach den Versuchen die Messgeräte auf Vollständigkeit und Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Bei dazumal vier Ingenieuren und vier Mechanikern mit denen 60–70 Prüfungen pro Jahr bewältigt wurden, war es noch leicht, den Überblick zu behalten. Der Messgerätepark bestand aus einigen KOs, Drosseln, Trenntransformatoren, Step-Up-Transformatoren sowie Spezialgeräten. Häufig verwendeten Geräten wurden einprägsame Kosenamen wie Rote Zora, das Fass oder der Pershing verliehen, die einfacher zu memorieren waren, aber auch gleichzeitig Ausdruck davon war, welche Wichtigkeit das Prüfmaterial für die Mitarbeitenden der FKH hatte.

In den letzten zwei Jahrzehnten sind sowohl die Anzahl Mitarbeiter auf über 20 Personen, als auch die Menge an Prüf- und Messgeräten auf über 800 angewachsen. Die FKH hat sich von einer kleinen Truppe engagierter Prüfer zu einem breit aufgestellten Team entwickelt, in dem viele Spezialisten sich gegenseitig ergänzen und unterstützen. Erschwerend kommt hinzu, dass die FKH auf zwei Standorte aufgeteilt ist und, dass die meisten Mitarbeiter einen Grossteil ihrer Arbeitszeit nicht am Standort sind, sondern schweizweit Prüfungen durchführen.

Gleichwohl wie sich die FKH weiterentwickelt hatte, musste sich auch die Logistik in der FKH weiterentwickeln. Ziel war es, einerseits eine Datenbank aufzubauen, in welcher sowohl die Kenndaten der Messgeräte inklusive Manual abgelegt als auch die Einlastung der Messgeräte, deren Kalibrierung sowie deren Zustand und Wartung professionell überwacht werden können. In der Recherche wurden verschiedene fertig verfügbare Softwaretools eruiert, allerdings zugunsten einer Microsoft Access-Lösung verworfen. Hauptargument hierfür war, dass die FKH sehr viele Spezialbedürfnisse in die Software integrieren wollte und die Software mit der FKH und den steigenden Anforderungen mitwachsen musste.

FKH Geräte pflegen

Suchen nach: Geräte Nr. Für Suche in beliebigem Feld: CTRL-F

Gruppe: Kabel und Kabelgarnituren
Bezeichnung:
ML-Gruppe:
Einsatzgebiete:

Filtern nach: Reset Filter

Geräte Nr. 00623 **Gerät defekt** ☐ **Löschvermerk** ☐

Geräte Zubehör Nr. 00 **Hauptgerät**

Anzahl Geräte 1 **Stück**

Standort 2 Däniken **Lagerort** Halle

Länge [mm] 2'400 **Breite [mm]** 1'400
Höhe [mm] 2'250 **Gewicht [kg]** 960
Beschaffungsjahr 2019 **Versicherungswert** 34'500

Gruppe Ka **Kabel und Kabelgarnituren**

Gruppenbeschreibung Prüfadapter, Spezialkabel, Erdungssets, Messkabel ohne TE, Speisekabel und Adapter

Bezeichnung Prüfkabel 50m/240mm2 Connex Gr.6 / Conne
Hersteller Pfisterer
Typ Prüfkabel Connex Gr.6
Seriennummer
Eckdaten Umax: 235kV
Uprüf: 275kV
50m, 7,6nF 240/85mm2
Bemerkung Zubehör:
-Fernsteuerung/Fusspedal
-Reinigung/Fett
Gerätehistory

Zubehör (mit Doppelklick in Zubehör springen) **Neues Zubehör**

ZubehörNr	Bezeichnung	Lösch
00	Prüfkabel 50m/240mm2 Connex Gr.6 / Connex Gr.6	☐

Eingabe Ingenieur **Eingabe Materialwart**

Einsatzgebiete

ML-Gruppe 11 Prüfadapter

Einsatzgebiete

- ☐ 01 Nicht erfasst! /ALLE
- ☐ 02 div. Messgeräte /Brl
- ☐ 03 E/B – EMV /Brl
- ☐ 04 Erdungen /Fr
- ☒ 05 GIS /Ne
- ☐ 06 Isolierolentn. /Hz
- ☐ 07 Kabel /Fr
- ☒ 08 Kabel TE /Fr
- ☐ 09 Nicht el. Zub.Mat. /Go
- ☐ 10 Stossprüfungen /Bg
- ☐ 11 Trafo /Fe
- ☐ 12 Allg. HS-Prüfungen

Aktuelles Gerät drucken
Alle selektierte Geräte drucken
Gerät kopieren
Erfasste oder geänderte Geräte anzeigen Zeitraum (von-bis)
Geräte in Excel exportieren
Gerät an Zentrale übermitteln
Geräte importieren

Erstellt am 02.09.2021 13:05:20 **von** SMU
Geändert am 03.09.2021 13:24:40 **von** SMU

Abbildung 1: Maske zur Eingabe von Gerätedaten und Überwachung der Messgeräte-Zustand und Historie und der Möglichkeit Zertifikate, Software oder Vorschriften zum Gerät zu hinterlegen

Eine Hauptschwachstelle vor der Einführung der Datenbank war, dass Materiallisten individuell von den Ingenieuren erstellt wurden und Doppel-Einlastungskonflikte aufwändig von den fürs Rüsten verantwortlichen Mechanikern aufgelöst werden musste. Die Software in der heutigen Form erlaubt es, Prüfungen inklusive Prüfzeitraum zu definieren und der Prüfung Geräte zuzuordnen. Parallel dazu werden Kalibrierungen, Reparaturen und Wartung rückverfolgbar überwacht. Allfällige Doppel-Einlastungen werden direkt angezeigt. Nach deren Behebung wird automatisch eine nach Lagerort sortierte Materialliste mit Materialgewichten und Abschätzung der Lademeter erzeugt, nach der der Transport bestellt und das Material gerüstet werden kann. Bei Verschiebungen von Prüfungen oder ungeplanter Verlängerung von Prüfungen, kann direkt der Einfluss auf allfällige parallel stattfindende Prüfungen angezeigt und bei Bedarf umdisponiert werden. Ein wichtiges Bedürfnis der Ingenieure war eine Bibliothek von individuell gestaltbaren vordefinierten Materiallistenvorlagen für verschiedene Prüfungsarten. Dies reduziert den Arbeitsaufwand bei der Zusammenstellung des Materials deutlich, da auf bestehende Materiallisten zurückgegriffen werden kann.

Von der ersten Idee über verschiedene Zwischenschritte mit begrenzter Funktionalität bis zur heutigen Ausprägung der Datenbank sind nahezu 10 Jahre verstrichen. Das Weiterentwickeln der Datenbank, in Zusammenarbeit mit den externen Programmierern Heike Ganz, Andi Ganz und Ueli Peterhans, hat Adamo Mele über die Jahre hinweg vorangetrieben und gestaltet. Mit Freude ist zu erkennen, dass die Datenbank uns in der alltäglichen Arbeit unterstützt und geholfen hat, die Effizienz unserer Prozesse und die Rückverfolgbarkeit im Umgang mit dem Mess- und Prüfmaterail zu verbessern.



AUTOR

Adamo Mele

Elektromechaniker

FKH-Fachtagung 2022

«Isolationskoordination»

Die letztjährige FKH-Fachtagung zum Thema Isolationskoordination fand am 22. November 2022 auf dem FHNW Campus Brugg-Windisch statt. Sie wurde sehr kompetent durch Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen der TU Darmstadt geleitet.

Nach einer Einführung in die physikalischen Grundlagen, und die Normierung der Isolationskoordination, wurden die verschiedenen Betriebs- und Fehlerzustände diskutiert, welche zu Überspannungen führen können. Als Massnahme zur Reduktion der Überspannungen wurde der Einsatz und die Funktionsweise von Ableitern beleuchtet, und es wurde das Verhalten des Isolationsmaterials unter unterschiedlicher

Spannungsbelastung betrachtet. Die praktische Anwendung der Isolationskoordination wurde in Beiträgen mit den Schwerpunkten Schaltanlagen, Kabelstrecken und Transformatoren vertieft und mit je einem Beitrag zur EMTP-Netzmodellierung und zur Betriebsmittelauswahl aus der globalen Sichtweise von Übertragungsnetzbetreibern ergänzt.

Zahlreiche Fragen und Anmerkungen aus dem Publikum, sowie angeregte Diskussionen in den Pausen haben gezeigt, dass das Thema weiterhin sehr aktuell ist. Die Veranstaltung schloss mit einem informellen Zusammensein bei einem Apéro.

	Beitrag	Referent
08.30 – 09.00	Willkommenskaffee	
09.00 – 09.10	Begrüssung durch den Präsidenten der FKH	Christian Lindner, Axpo Grid AG
09.10 – 10.00	Einführung: Grundlagen der Isolationskoordination	Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, TU Darmstadt
10.00 – 10.25	Einfluss neuer Technologien/ Beanspruchungen auf die Normung in der Isolationskoordination	Prof. Dr. Ing. Uwe Schmidt, Hochschule Zittau/Görlitz
10.25 – 10.50	Ursache von Überspannungen im Betriebs- und Fehlerfall	Dr. sc. Michael Walter, FKH
10.50 – 11.25	Kaffeepause	
11.25 – 11.50	Wirkungsweise und Einsatz von Ableitern	Ektor Sotiropoulos, Hitachi Energy Switzerland AG
11.50 – 12.15	Festigkeit von Isolationen unter verschiedenen Spannungsformen	Dr. sc. Ulrich Straumann, Hitachi Energy Switzerland AG
12.50 – 12.40	Anforderungen an Schaltgeräte und Schalttransienten	Maxime Perret, GE Grid (Switzerland) GmbH
12.45 – 14.00	Mittagessen	
14.00 – 14.25	Isolationskoordination in der Praxis – Auswahl von Netzkomponenten	Jonas Baumann, Swissgrid AG
14.25 – 14.50	Technischer Hintergrund der FKH-Prüfempfehlungen für GIS-Anlagen	Dr. sc. techn. Stefan Neuhold, FKH

14.50 – 15.15	Überspannungsschutz im Zusammenhang mit Kabelstrecken für HVDC	Volker Vahrenholt, 50Hertz Transmission GmbH
15.15 – 15.45	Kaffeepause	
15.45 – 16.10	Messung und Modellierung von Überspannungen und Transienten an Transformatoren	Philippe Alff, FKH
16.10 – 16.35	Isolationskoordination bei Transformatoren	Hans-Peter Öttering, Siemens Energy AG
16.35 – 16.50	Schlussdiskussion	Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, TU Darmstadt
ab 16.50	Apéro	

Der Fachtagungsband kann auf der FKH-Internetseite unter «Fachtagungen» heruntergeladen werden.



Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung

Betreute Praktikumsarbeiten: Frequenzabhängigkeit von Ferroresonanzschwingungen, Messungen und Simulationen an einem 220-kV-Freiluftspannungswandler

Das Phänomen der Ferroresonanzschwingungen in Hochspannungsschaltanlagen mit induktiven Spannungswandlern wird seit vielen Jahrzehnten immer wieder praktisch und theoretisch untersucht. Nur wenige Publikationen zeigen einen direkten Vergleich zwischen Simulationen und Messungen.

Im Rahmen der Praktikumsarbeit eines Gaststudenten wurde ein theoretisches Modell für Ferroresonanzschwingungen in einem erweiterten Parameterfeld experimentell überprüft. In der Versuchsstation in Däniken wurde ein 220-kV-Freiluftwandler über einen Kondensator mit einem Hochspannungsprüftransformator gekoppelt. Der Hochspannungsprüftransformator, der die Spannungsanregung aus dem Hochspannungsnetz nachbildete, wurde mit einem Frequenzumrichter gespeist (Abbildungen 1 und 2).

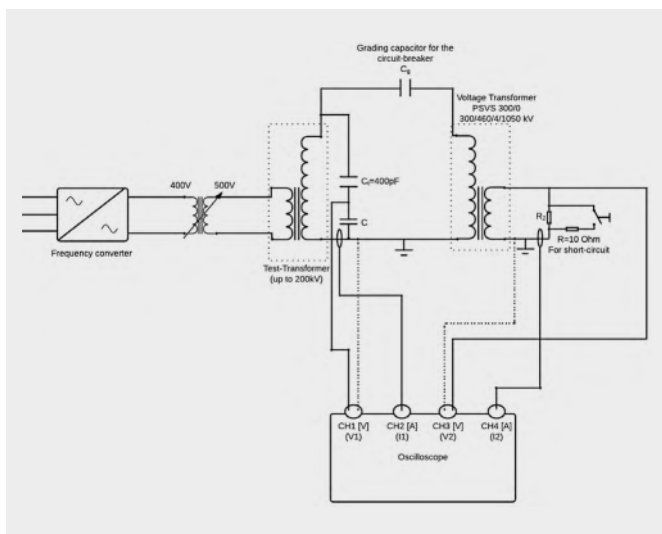


Abbildung 1: Schema der Versuchsanordnung für Messungen an einem Ferroresonanzversuchskreis

Die experimentelle Anordnung erlaubte es erstmals nicht nur die Schaltelemente und die anregende Spannung, sondern auch die anregende Frequenz zu variieren. Mit diesem Versuchsaufbau konnten alle beobachtbaren Phänomene der einphasigen Ferroresonanzschwingungen studiert werden: Es konnten Ferroresonanzschwingungen mit der Grundfrequenz, der dritten und fünften Subharmonischen, wie auch chaotische Schwingungen erzeugt werden.

Vergleiche des theoretischen Modells mit dem experimentellen Resonanzkreis waren auf diese Weise in einem breiten Parameterfeld möglich.



Abbildung 2: Versuchsanordnung für die Messungen am Ferroresonanzkreis

Die magnetische Charakteristik des Hochspannungswandlers wurde vorgängig mit dem Messwandlerprüfgerät Votano von Omicron ausgemessen und die Magnetisierungskennlinie für das theoretische Modell verwendet.

Mit dem relativ einfachem theoretischen Ferroresonanzmodell, bei welchem die Hystereseverluste nur durch einen Parallelwiderstand nachgebildet wurden, konnte das experimentell festgestellte Verhalten des Ferroresonanzkreises in den meis-

Wandlerübersetzung (Eigenversorgungswandler):	$(220'000\text{kV})/\sqrt{3}:400\text{V}/\sqrt{3}$
Frequenz der Spannungsquelle:	50 Hz
Spannungseffektivwert am Prüftransformator:	50 kV.
Koppelkapazität zwischen Spannungsquelle Spannungswandler:	500 pF
Dämpfungswiderstand an der Bürde:	470 Ω

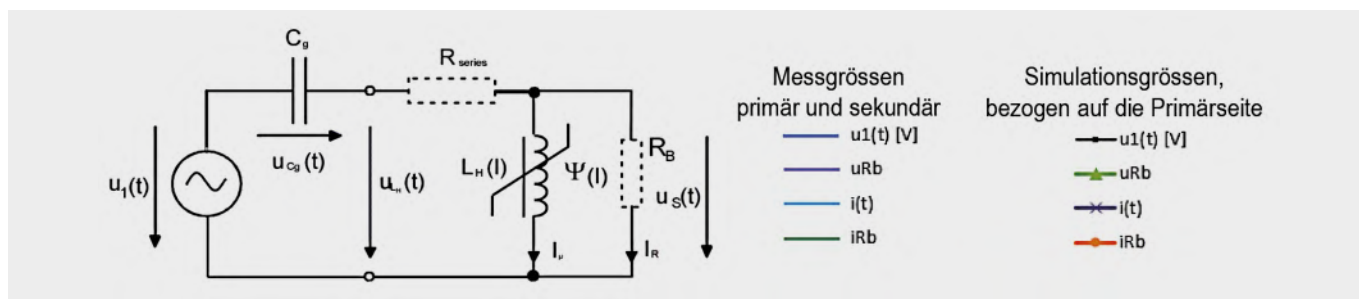


Abbildung 3: Definition der gemessenen und simulierten Spannungen und Ströme

ten Fällen korrekt wiedergegeben werden. Allerdings wurde auch die bekannte Feststellung gemacht, dass kleinste Parameteränderungen eine grosse Auswirkung auf die Schwingungsform haben können. Die gemessenen und berechneten Spannungs- und Strommesspunkte werden in Abbildung 3 definiert. Abbildung 4 zeigt eine oszillographierte Ferroresonanzschwingung mit der dritten Subharmonischen bei folgenden Versuchsparametern (siehe Tabelle oben).

Das zugehörige Simulationsergebnis zeigt Abbildung 5. Die Verläufe vor der Auslösung der Ferroresonanz unterscheiden sich beim Experiment und den Simulationen stark. Die Auslösung der Ferroresonanzschwingungen erfolgte im Experiment durch eine kurzzeitige Reduktion der Bürde (vgl. auch Abbildung 1), während in der Simulation ein Schalter über der Koppelkapazität geöffnet wurde.

Über die Arbeit wurde ein Praktikumsbericht verfasst, der den Interessenten zur Verfügung gestellt werden kann.

Kévin Declerck

IASTE-Praktikant aus Frankreich von der «IMT Nord-Europe, Dunkerque»

Praktikumsarbeit: «Theoretical model for single phase ferroresonance oscillations», 2022

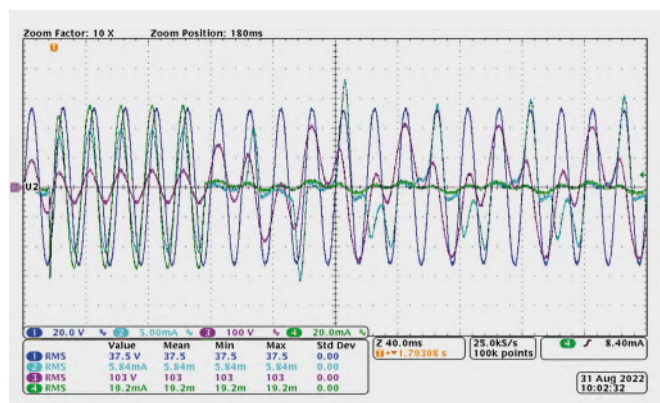


Abbildung 4: Messergebnis, (Definition der Messkanäle: Abbildung C)

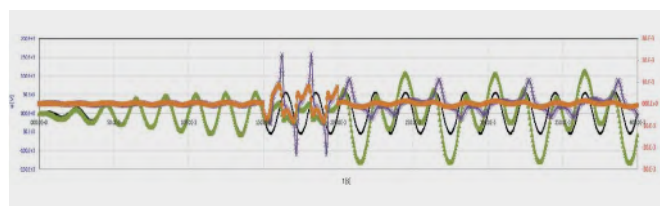


Abbildung 5: Simulationsergebnis, Ströme und Spannungen auf die Primärseite bezogen, (Definition der Simulationsgrößen: Abbildung 3)



AUTOR

Reinhold Bräunlich

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur





Spannungsprüfung mit TE-Messung an
16-kV-Massekabel-Endverschlüssen

Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen

Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate

Powertage 2022, 17.–19. Mai 2022, Zürich

Philippe Alff, Gunnar Andrae, Reinhold Bräunlich, Pascal Fehlmann, Diego Friedli, Thomas Heizmann, Dominic Kleger, Martina Müller, Stefan Neuhold, Michael Walter

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022, 21.–22. Juni 2022, Stuttgart

Thomas Brügger, Vortrag «Transienten und Oberwellenmessungen mit unkonventionellen Wandlern»

Pascal Fehlmann

Martina Müller

CIGRE Session Paris 2022, 28. August – 2. September 2022, Paris

Michael Walter, Tutorial: «Electric performance of new non-SF6 gases and gas mixtures for gas-insulated systems»

Thomas Brügger

Stefan Neuhold

FSM Science Brunch 34, «Thema: Können elektrische Felder von Hochspannungsleitungen wahrgenommen werden?», 21. September 2022, Zürich

Michael Walter

GIS Anwendungsforum Darmstadt, 27. September 2022, Darmstadt

Martina Müller

FKH-Fachtagung, Isolationskoordination 22. November 2022, Brugg-Windisch

Philippe Alff, «Messung und Modellierung von Überspannungen und Transienten an Transformatoren»

Michael Walter, Vortrag «Ursache von Überspannungen im Betriebs- und Fehlerfall»

Stefan Neuhold, Vortrag «Technischer Hintergrund der FKH-Prüfempfehlungen für GIS-Anlagen»

Gunnar Andrae, Reinhold Bräunlich, Pascal Fehlmann, Diego Friedli, Thomas Heizmann, Dominic Kleger, Martina Müller

Electrosuisse Fachtagung Leitungsbau 2022, 9. November 2022, Aarau

Michael Walter

Publikationen

Th. Brügger

Transienten und Oberwellenmessungen mit unkonventionellen Wandlern

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022, Stuttgart, 21.–22. Juni 2022

P. Fehlmann; Working Group JWG A2/D1.51

«Improvements to PD measurements for factory and site acceptance tests of power transformers», Cigré TB 861, Study Committee A2, D1

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)

Cigré

Firmenmitgliedschaft

VDE

Firmenmitgliedschaft

Die FKH ist bei folgenden nationalen und internationalen Fachgremien vertreten

Nationalkomitees:

CES electrosuisse TK 2: «Elektrische Maschinen»

Mitglied: Thomas Brügger

CES/SEV electrosuisse TK 10: «Flüssigkeiten für elektronische Anwendungen»

Mitglied: Thomas Heizmann (Vorsitzender)

CES electrosuisse TK 14: «Transformatoren»

Mitglied: Pascal Fehlmann

CES electrosuisse TK 17AC: «Hochspannungs-Schaltgeräte und Schaltanlagen»

Mitglieder: Martina Müller, Gunnar Andrae

CES electrosuisse TK 20: «Elektrische Kabel»

Mitglied: Dominic Kleger

CES electrosuisse TK 38: «Messwandler»

Mitglied: Martina Müller

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

Mitglieder: Michael Walter, Thomas Brügger

CES electrosuisse TK 99: «Isolationskoordination»

Mitglied: Michael Walter

CES electrosuisse TK Erdungen

Mitglied: Diego Friedli

Internationale IEC-Arbeitsgruppen:

IEC 62271-100 TC 17/SC 17A/MT 36: «High-voltage switchgear and controlgear – Alternating-current circuit-breakers»

Mitglied: Gunnar Andrae

IEC 62271-101 TC 17/SC 17A/MT 28: «High-voltage switchgear and controlgear – Synthetic testing»

Mitglied: Gunnar Andrae

IEC 62271-203 TC 17/SC 17C/MT 16: «High-voltage switchgear and controlgear – Gas-insulated switchgear»

Mitglied: Gunnar Andrae

IEC 60076-18 TC 14/MT 60076-18: Measurement of Frequency Response for Power Transformers

Mitglied: Pascal Fehlmann

Internationale CIGRE-Arbeitsgruppen:

CIGRE WG B1.68: «Condition evaluation and lifetime strategy of HV cable systems»

Mitglied: Diego Friedli

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

Mitglied: Stefan Neuhold

CIGRE WG D1.66: «Requirements of partial discharge monitoring systems for gas insulated systems»

Mitglied: Stefan Neuhold

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 Grid AG
5401 Baden

Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG
4658 Däniken

Axpo Power AG
5401 Baden

Kraftwerke Oberhasli AG
3862 Innertkirchen

Azienda Elettrica Ticinese
6501 Bellinzona

Primeo Netz AG
4142 Münchenstein

Aziende Industriali della città di Lugano SA
6901 Lugano

Sankt Galler Stadtwerke
9001 St. Gallen

BKW Energie AG
3013 Bern

SBB Energie
3052 Zollikofen

CKW AG
6002 Luzern

Service 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-Appenz. 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

Verzasca SA
6901 Lugano

ewl energie wasser luzern
6002 Luzern

Werke am Zürichsee AG
8700 Küsnacht

Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder

AFRY Schweiz AG

8048 Zürich

Nexans Suisse SA

2016 Cortaillod

Agea-Kull AG

4552 Derendingen

OMICRON electronics GmbH

A-6833 Klaus

Arnold AG, Hochspannungsleitungen

3072 Ostermundigen

Pfiffner Messwandler AG

5042 Hirschthal

Bouygues E&S EnerTrans AG

5013 Niedergösgen

Pfisterer Switzerland AG

6460 Altdorf

Brugg Kabel AG

5200 Brugg

Rauscher & Stöcklin

4450 Sissach

Condis SA

1728 Rossens

Retranol GmbH

8810 Horgen

Eidgenössisches Starkstrominspektorat

8320 Fehraltorf

SGB-SMIT Transformatoren Schweiz AG

5012 Schönenwerd

GE Grid (Switzerland) GmbH

5036 Oberentfelden

Siemens Energy AG

8047 Zürich

Haefely Test AG

4052 Basel

Studer Cables AG

4658 Däniken

Hitachi Energy Switzerland AG

8050 Zürich

Trafopower AG

5012 Schönenwerd

Megger Schweiz AG

5107 Schinznach Dorf

VAPEC AG

8304 Wallisellen

Mohaupt High Voltage GmbH

A-6142 Mieders

Korrespondierende Mitglieder

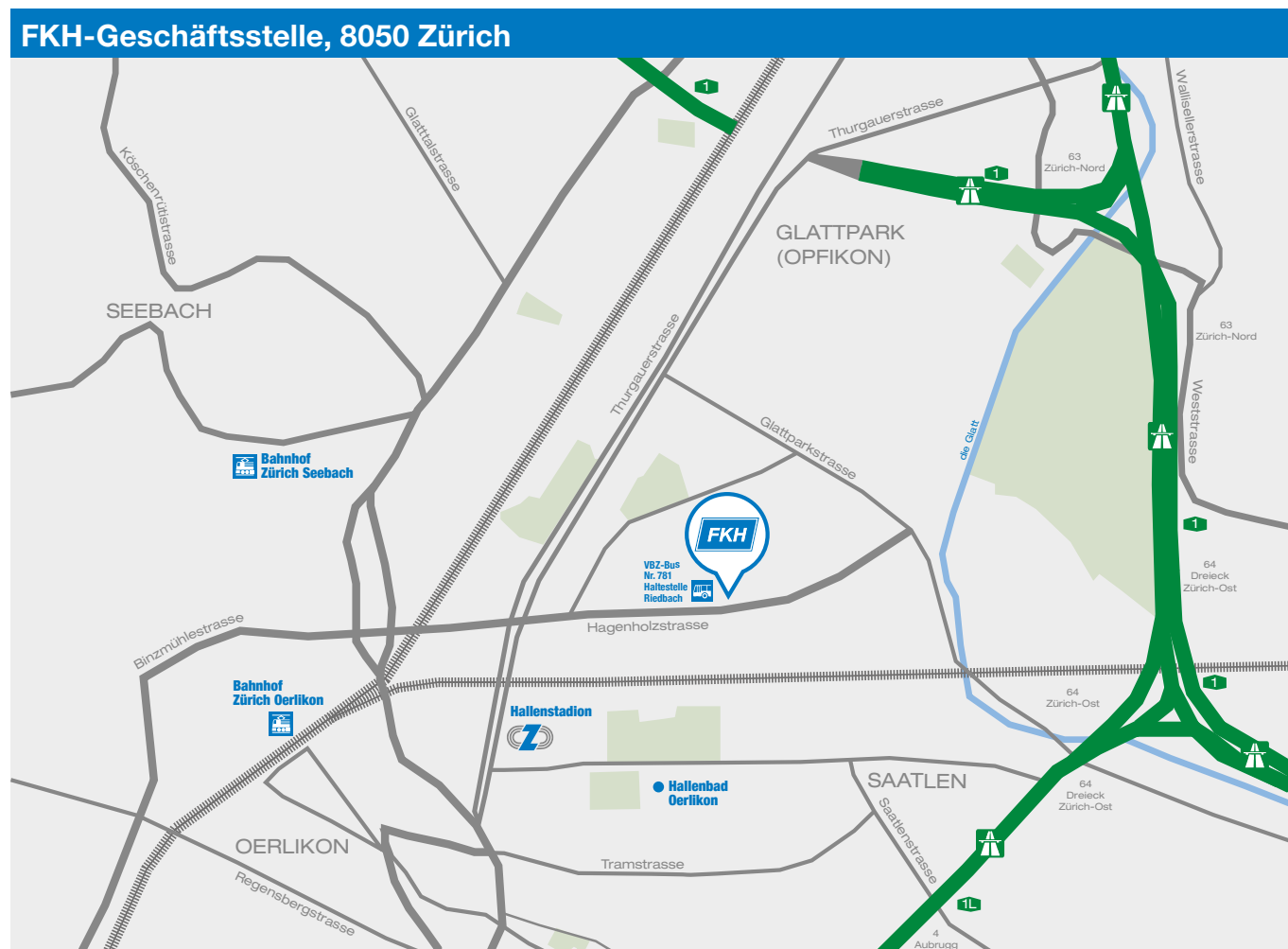
ABB Technikerschule Baden Elektrotechnik 5400 Baden	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH) FG Hochspannungstechnologie 8092 Zürich
Berner Fachhochschule 3400 Burgdorf	Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e.V. (FGH) D-68199 Mannheim
Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud 1400 Yverdon-les-Bains	HES-SO Valais/Wallis 1950 Sion
Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg 1705 Fribourg	Hochschule für Technik + Architektur Chur 7000 Chur
Swiss Federal Institute of Technology Power Electronics Laboratory (EPFL) 1015 Lausanne	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW 8401 Winterthur

Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit und danken für das Vertrauen.

Mitgliederbestand per 31. Dezember 2022

Verbände	2	(2)
Werksmitglieder	28	(27)
Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder	23	(23)
Korrespondierende Mitglieder	10	(10)
Total Mitglieder per 31. Dezember 2022 (Stand per 31. Dezember 2021 in Klammern)	63	(62)

Zufahrtspläne für die FKH-Standorte



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

FKH-Hauptsitz Tel. +41 44 253 62 62
Hagenholzstrasse 81 • CH-8050 Zürich

FKH-Isolieröllabor und -Versuchsstation, 5013 Niedergösgen



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

FKH-Isolieröllabor Tel. +41 62 288 77 99

FKH-Versuchsstation Tel. +41 62 288 77 95

Andresenschachen 10 • CH-5013 Niedergösgen

**FKH-Hauptsitz**

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

info@fkh.ch
www.fkh.ch

FKH-Isolieröllabor Däniken

Andresenschachen 10
CH-5013 Niedergösgen
Tel. +41 62 288 77 99

FKH-Versuchsstation Däniken

Andresenschachen 10
CH-5013 Niedergösgen
Tel. +41 62 288 77 95