



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

Jahresbericht

2024





*Bild Titelseite: Serie-Resonanzanlage für eine AC-Hochspannungsprüfung in der neuen FKH-Prüfhalle.
Bild links: FKH-Messanhänger mit Stromquelle bei einer Erdungsmessung im KW Göschenen.*

Inhalt

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung	4	Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung	50
Struktur und Leitbild der FKH	6	Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen	51
FKH-Vorstand	7	Mitgliedschaft / Mitarbeit in Fachgremien und Kommissionen	53
FKH-Geschäftsstelle	8	FKH-Mitglieder	55
Dienstleistungen der FKH	9	Zufahrtspläne für die FKH-Standorte	58
Auftragsarbeiten und statistische Übersicht	10		
Prüfung eines grossen Netztransformators	12		
Studien und Gutachten	16		
Berücksichtigung des Erdseileinflusses bei Berührungsspannungsmessungen in der Umgebung von Freileitungsmasten	20		
Ultraleichter Hochspannungsleiter für Vor-Ort- Prüfungen – eine neue Lösung	26		
Modulares Resonanzanlagenkonzept	29		
Neue Generation von Frequenzumrichtern bei der FKH	32		
220-kV-Kabelprüfung Leitung Birr	34		
FKH-Labor für Isolierölanalysen	36		
Forschung zum Teilentladungsverhalten von SF ₆ -freien Isoliergasen	37		
Möglichkeiten der Hochspannungsprüfung in der neuen FKH-Prüfhalle in Niedergösgen	40		
Inbetriebnahme eines Langzeitversuches auf dem Gelände in Niedergösgen	43		
Einweihungsfeier Prüfhalle Däniken – ein Blick hinter die Kulissen	44		
FKH-Fachtagung 2024 «Erzeugung und Messung hoher Spannungen und Ströme»	48		

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung

Trends in der Energiebranche: Die Energiebranche ist im Umbruch. Die Erkenntnis, dass die Energiewende nur durch einen massiven Ausbau der Verteil- und Übertragungsnetze erreichbar ist, führt bereits heute zu einem stetigen Anstieg der Ausbauprojekte bei den Netzbetreibern. Gleichzeitig ist Innovation bei den Herstellern, aufgrund der sich verändernden politischen Spielregeln zu Produkten hin, welche die Umwelt weniger belasten, gefordert. So wird beispielsweise die überarbeitete EU-F-Gas-Verordnung mittelfristig zu einem Verschwinden von SF₆ bei Neuanlagen führen und der Markt wird sich hin zu Produkten mit umweltfreundlichen Isoliergasen entwickeln. Ein weiterer Trend in der Branche ist die Zunahme der sensorbasierten Zustandsüberwachung von Betriebsmitteln, welcher in Kombination mit den rasant steigenden Fähigkeiten zur Auswertung grosser Datenmengen mittels KI auch im Energiemarkt neue Chancen eröffnet. Betriebsmittel sollen durch optimierte Zustandsüberwachung länger betrieben werden können oder Wartungsaktivitäten sollen durch datenbasiertes Predictive maintenance gezielter erfolgen. Diese Trends fallen in eine Zeit, in welcher der Fachkräftemangel weiter zunimmt und Expertenwissen gefragt ist.

Strategischer Fokus der FKH: Im Jahr 2024 hat die FKH eine umfangreiche Auslegeordnung im Rahmen einer Strategieüberprüfung durchgeführt, um zu verstehen, wie sich die Trends auf die Aktivitäten der FKH auswirken werden. Folgende Schwerpunktziele sind daraus hervorgegangen: 1. Durch die Aufrechterhaltung der Qualität und der technischen Expertise soll die FKH ihre Mitglieder weiterhin mit Expertenwissen unterstützen. 2. Die FKH soll sich hierbei am Bedarf des Schweizer Markts orientieren. 3. Die neu gebaute Prüfhalle in Niedergösgen soll sich für Spezialprüfungen positionieren und auch wieder vermehrt experimentelle Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Hochschulen ermöglichen. 4. Die FKH soll ihre Fähigkeiten zur Prüfung langer Kabelstrecken und zur gleichzeitigen Prüfung mehrerer Betriebsmittel an verschie-

denen Prüforten weiter ausbauen. 5. Die FKH soll sich gezielt mit den neuen digitalen Technologien auseinandersetzen, um mittels der Kombination von Daten und Expertise Erkenntnisse abzuleiten.

Wichtige Meilensteine 2024: Der Neubau der Prüfhalle in Niedergösgen, welche im Oktober eingeweiht werden konnte, stellt für die FKH einen grossen Schritt hin zu optimalen Prüfbedingungen dar. Unter stabilen Umgebungsbedingungen können Stossprüfungen bis 1.2 MV und AC-Prüfungen bis 540 kV mit Teilentladungsgrundstörpegeln < 1 pC zuverlässig durchgeführt werden. Höhere Spannungswerte können weiterhin im Freien geprüft werden. Die hohe Auslastung der Halle über die letzten Monate zeigt, dass die Prüfdienstleistungen in Niedergösgen von den FKH-Mitgliedern nachgefragt werden. Die indirekten positiven Effekte sind ein Platzgewinn in der Logistikhalle, das Freiwerden des Kleinlabors für Forschungsaktivitäten – es wurden im Jahr 2024 aufwendige Untersuchungen zum Teilentladungsverhalten in Alternativgasen im Rahmen der Arbeitsgruppe CIGRE D1.78 durchgeführt – und die Erhöhung der Sicherheit bei Prüfungen durch bessere Hebemittel und stationäre Prüfplätze.

Personelle Veränderungen: Durch den Entscheid, den langjährigen Mitarbeiter Peter Frey als neuen Leiter des Isolierlabors einzusetzen, hat die FKH auf Kontinuität gesetzt. Mit Christian Lawnik und Glenn Behrmann konnten zudem weitere Ingenieure dazugewonnen werden. Die Einführung neuer Mitarbeitender in die Vor-Ort-Prüfung erfolgt durch die Weitergabe von Wissen der erfahrenen Ingenieure und ist daher zeitaufwendig. Es ist aber eine lohnende Investition in die Zukunft, denn die interne Weiterbildung der Ingenieure in den verschiedenen Prüfmethode stellt mittelfristig sicher, dass die wachsende Zahl an Aufträgen bei gleichbleibend hoher Qualität und zur Zufriedenheit der Mitglieder durchgeführt werden kann.

Zusammenarbeit mit Mitgliedern: Die vielen Begegnungen während den Prüfungen, die Fachtagung, die Austauschforen «Erfahrungsaustausch GIS (EAG)», «IG-Trafo» und «IG-Generatoren» sowie die aktive Mitwirkung der FKH in CIGRE- und IEC-Arbeitsgruppen und bei Branchenevents werden aktiv für den stetigen Austausch mit Ihnen als FKH-Mitglieder genutzt. Es ist uns wichtig, uns Zeit für Ihre Fragen und den Austausch mit Ihnen zu nehmen, um unsere Aktivitäten auf Ihre Bedürfnisse abzustimmen und mit unserer Tätigkeit einen optimalen Nutzen für die Schweizer Energiebranche zu erzielen.



Christian Lindner
Präsident



Dr. Michael Walter
Geschäftsleiter

Struktur und Leitbild der FKH

Struktur der FKH



Abbildung 1: Struktur der FKH

FKH-Leitbild

Die **neutrale und unabhängige** Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) verfolgt gemeinnützige Zwecke durch die Bereitstellung von Prüf- und Diagnosedienstleistungen sowie Expertisen auf dem Gebiet der **elektrischen Energieversorgung und der Hochspannungstechnologie**. Durch die Vereinstätigkeit sollen die permanente Verfügbarkeit und die langfristige Leistungsfähigkeit und Sicherheit der Versorgung mit elektrischer Energie in der Schweiz gefördert werden.

Die **Ziele** der FKH sind seit der Gründung 1937 **ausschliesslich technischer Natur**. Die FKH verfolgt keine eigenwirtschaftlichen Ziele. Die finanziellen Mittel des Vereins dürfen nur für statutenkonforme Zwecke verwendet werden. Durch Eigenentwicklung auf dem Gebiet der Prüf- und Messtechnik, wissenschaftliche Publikationen und aktive Mitarbeit in internationalen **Normen- und**

Fachgremien trägt die FKH global zur **Weiterentwicklung der Prüfmethodik** bei. Durch die Organisation von Fachtagungen und **Erfahrungsaustauschplattformen** fördert die FKH den Wissenstransfer über neue wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen in der Schweiz. Durch aktive Kontakte zur ETH Zürich, zur ETH Lausanne sowie zu den Fachhochschulen und durch die Beteiligung an der Forschung leistet sie einen Beitrag zur Förderung der Attraktivität der energietechnischen Disziplinen und übt eine **Brückenfunktion zwischen** den **schweizerischen Hochschulen** und den **Unternehmungen der Elektroenergie-technik** aus.

Die Mitarbeitenden der FKH unterstützen Sie als Kunden bei der Inbetriebnahme und Diagnose von hochspannungstechnischen Betriebsmitteln mit **Prüfdienstleistungen vor Ort** und in der FKH-Versuchsstation. Falls angezeigt, helfen sie, effizient Probleme zu identifizieren, zu lokalisieren und zu beheben. Auf Anfrage unterstützen wir Sie auch mit Prüfdienstleistungen im Ausland. Bei der Beantwortung auftretender Fragestellungen wird auf **wissenschaftliche Methodik** und **spezialisierte, sensitive Prüftechnik** gesetzt.

Die FKH setzt sich aus einem erfahrenen, eingespielten **Team von Prüf- und Messexperten** zusammen, welches bei Bedarf **kurze Reaktionszeiten** ermöglicht und auch **komplexe Prüfkampagnen** realisieren kann. Die FKH ist in der Lage, das Gesamtpaket von Beratung zu Prüfkriterien, Planung bis zur Durchführung der Prüfung mit **eigenen Prüf- und Messmitteln** anzubieten.

Als Beratungsdienstleistung bietet Ihnen die FKH **theoretische und experimentelle Studien**, Untersuchungen und Prüfungen zur Klärung aller Fragen und Erscheinungen an, die bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von Energieversorgungsanlagen, insbesondere auf den Gebieten der Hochspannungs- und Hochstromtechnik, auftreten. Des Weiteren werden auch **eigenständige praxisorientierte Forschungsaktivitäten** in Zusammenarbeit mit Hochschulen, Herstellern und Netzbetreibern angeboten.

FKH-Vorstand

Präsident

Christian Lindner | Axpo Grid AG

Vizepräsident

Adrian Häsler | Swissgrid AG

Mitglieder

Yves-André Bagnoud | Service Industriels Lausanne

Jürgen Bernauer | Pfiffner Group

Frank Brodbeck (ab 24. Mai 2024) | Brugg Kabel AG

Markus Burger | Electrosuisse

Anja Burkhard | Hitachi Energy Switzerland AG

Andri Casura | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Andreas Degen | Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

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

Prof. Dr. Christian Franck | Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

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

Daniel Riesen | BKW Energie AG

René Vollenwyder | Schweizerische Bundesbahnen AG

Dr. Michael Walter | FKH¹

Kontrollstelle

Bruno Dübendorfer | Elektrizitätswerk des Kantons Zürich

Ajdin Draganovic | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

¹ Mitglied mit beratender Stimme

FKH-Geschäftsstelle

Geschäftsleiter	Dr. Michael Walter , Dr. sc. ETH	walter@fkh.ch
Stellvertreter	Dr. Vahe Der Houhanessian , Dr. sc. techn. ETH Martina Müller , MSc ETH ETIT	houhanessian@fkh.ch mueller@fkh.ch
Sekretariat	Saskia Muraro	muraro@fkh.ch
Mitarbeiter	Philippe Alff , MSc ETH ETIT Gunnar Andrae , M. Eng. Dipl. Ing. (FH) Ivan Barcan , MSc TUM ETIT (bis 31. März 2025) Glenn Behrmann , B.S.E.E. Union College Dr. Reinhold Bräunlich , Dr. sc. techn. ETH Dr. Thomas Heizmann , Dr. sc. techn. ETH Dr. Vahe Der Houhanessian , Dr. sc. techn. ETH Tobias Felber , Netzelektriker Peter Frey , Leiter Isolieröllabor Diego Friedli , MSc Eng. HES-SO Mario Gobeli , El.-Ing. FH Dominic Kleger , BSc El.-Ing. FH Christian Lawnik , M. Eng. HTW Berlin (ab 19. August 2024) Adamo Mele , Elektromechaniker Dr. Henrik Menne , Dr. sc. ETH Martina Müller , MSc ETH ETIT Simon Mutter , Energieelektroniker Dr. Stefan Neuhold , Dr. sc. techn. ETH Basil Peter , Polymechaniker Franziska Schenker , Chemielaborantin Markus von Arx , Elektromonteur Toni von Deschwanden , Elektromechaniker	alff@fkh.ch andrae@fkh.ch barcan@fkh.ch behrmann@fkh.ch braeunlich@fkh.ch heizmann@fkh.ch houhanessian@fkh.ch felber@fkh.ch frey@fkh.ch friedli@fkh.ch gobeli@fkh.ch kleger@fkh.ch lawnik@fkh.ch mele@fkh.ch menne@fkh.ch mueller@fkh.ch mutter@fkh.ch neuhold@fkh.ch peter@fkh.ch schenker@fkh.ch vonarx@fkh.ch deschwanden@fkh.ch
Betriebsstätten	FKH-Hauptsitz Hagenholzstrasse 81, 8050 Zürich	Tel. 044 253 62 62
	FKH-Versuchsstation Däniken Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen	Tel. 062 288 77 95
	FKH-Labor für Isolierölanalysen Däniken Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen	Tel. 062 288 77 99
Kontakt Westschweiz	Diego Friedli	M 079 275 91 50 friedli@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 Niedergösgen ausgeführt werden.

Die wichtigsten Dienstleistungen der FKH sind in den Informationsbroschüren beschrieben, die auf der Website 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:

The infographic consists of a vertical line with six circular icons on the left, each pointing to a text box on the right. The icons represent: 1. A lightning bolt (high voltage), 2. A house with a lightning bolt (small lab), 3. A test tube (oil analysis), 4. A ground symbol (grounding), 5. A bar chart (engineering), and 6. An open book (education).

- 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
 - rotierende Maschinen
 - GIS
 - Kabel
- HS-Prüfungen im Kleinlabor**
 Hoch- und Mittelspannungskomponenten
- Isolierölanalysen**
 Dielektrisch-chemische Analysen
 Chromatografische und spektroskopische Analysen
 - Zersetzungsgasanalysen
 - Furanalysen
 - 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 2024 insgesamt 217 (211) elektrotechnische Auftragsarbeiten und 157 (186) Aufträge für Isolierölanalysen mit total 1806 (1833) 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	2'833'039	(2'835'721)
Erlös aus Auftragsarbeiten für Nichtmitglieder	CHF	2'129'373	(2'008'125)
Erlös aus Auftragsarbeiten	CHF	4'962'412	(4'843'846)
Nebenerlöse (inkl. Fachtagung)	CHF	65'337	(72'075)
Mitgliederbeiträge	CHF	317'200	(322'400)
Total gemäss FKH-Erfolgsrechnung 2024	CHF	5'344'950	(5'238'321)

Tabelle 1: Erlös aus Auftragsarbeiten (Vorjahr in Klammern)

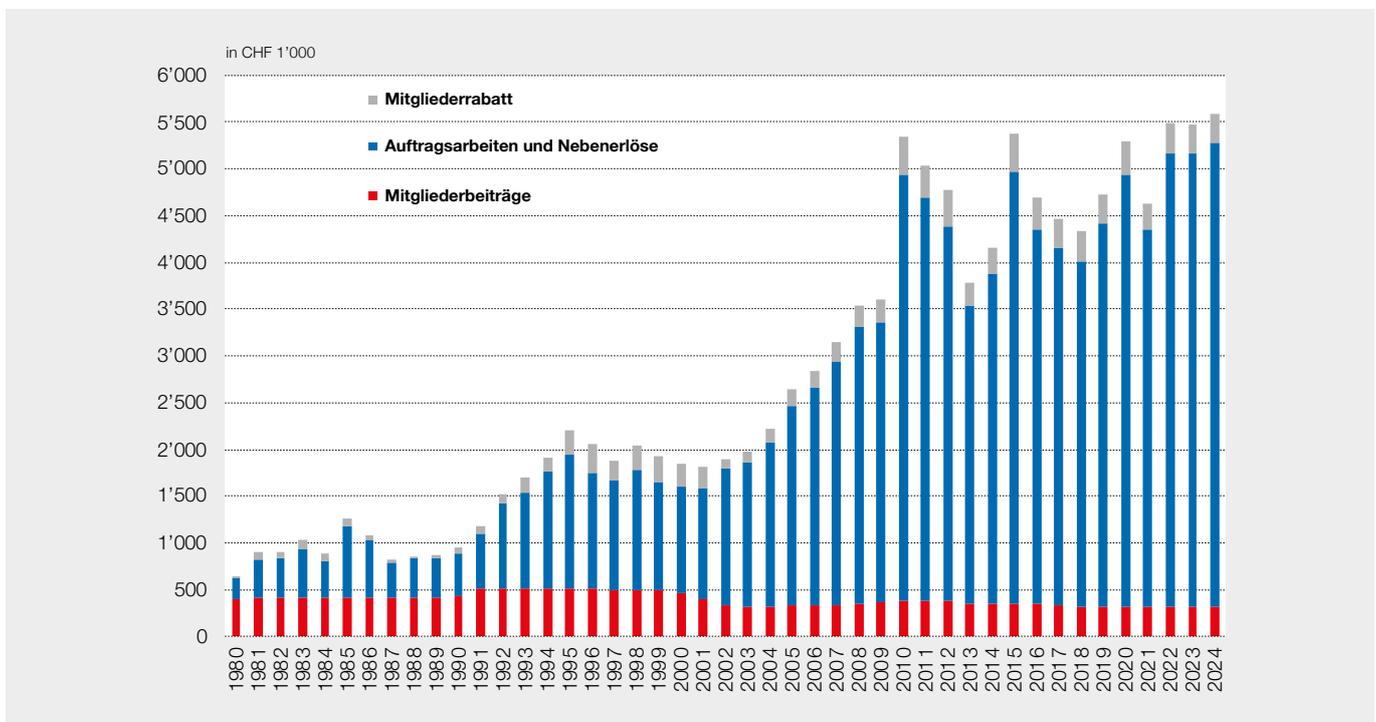


Abbildung 1: Erlös aus Auftragsarbeiten und Mitgliederbeiträgen im Zeitraum von 1980–2024

* Nettoerlös, 10% Mitgliederrabatt abgezogen

Die Auftragstätigkeit der FKH-Arbeitsgruppe für Mitglieder und Dritte im Berichtsjahr 2024 kann folgenden Gebieten zugeordnet werden (Tabelle 2 und Abbildung 2 prozentuale Verteilung bezogen auf den erzielten Nettoerlös nach Abzug der Mitgliederrabatte):

Prüfung von Hochspannungskabelanlagen	33,5%	(38,1%)
Prüfung von Transformatoren	15,3%	(11,9%)
Prüfung von Hochspannungsapparaten und Generatoren	0,7%	(1,1%)
Prüfung von GIS und Schaltanlagen	16,6%	(19,7%)
Erdungsmessungen / Nachweis von Blitzschutzmassnahmen	6,0%	(4,2%)
Spezialversuche	3,0%	(3,1%)
Umweltfragen / EMF / Korona / EMV / Transiente Vorgänge	0,4%	(1,1%)
Beratungs- und Betreuungsaufgaben	6,0%	(2,2%)
Isolierölanalysen	18,1%	(18,2%)
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0,4%	(0,4%)

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Auftragsarbeiten im Jahr 2024, nach Dienstleistungssparten aufgeschlüsselt (Vorjahr in Klammern)

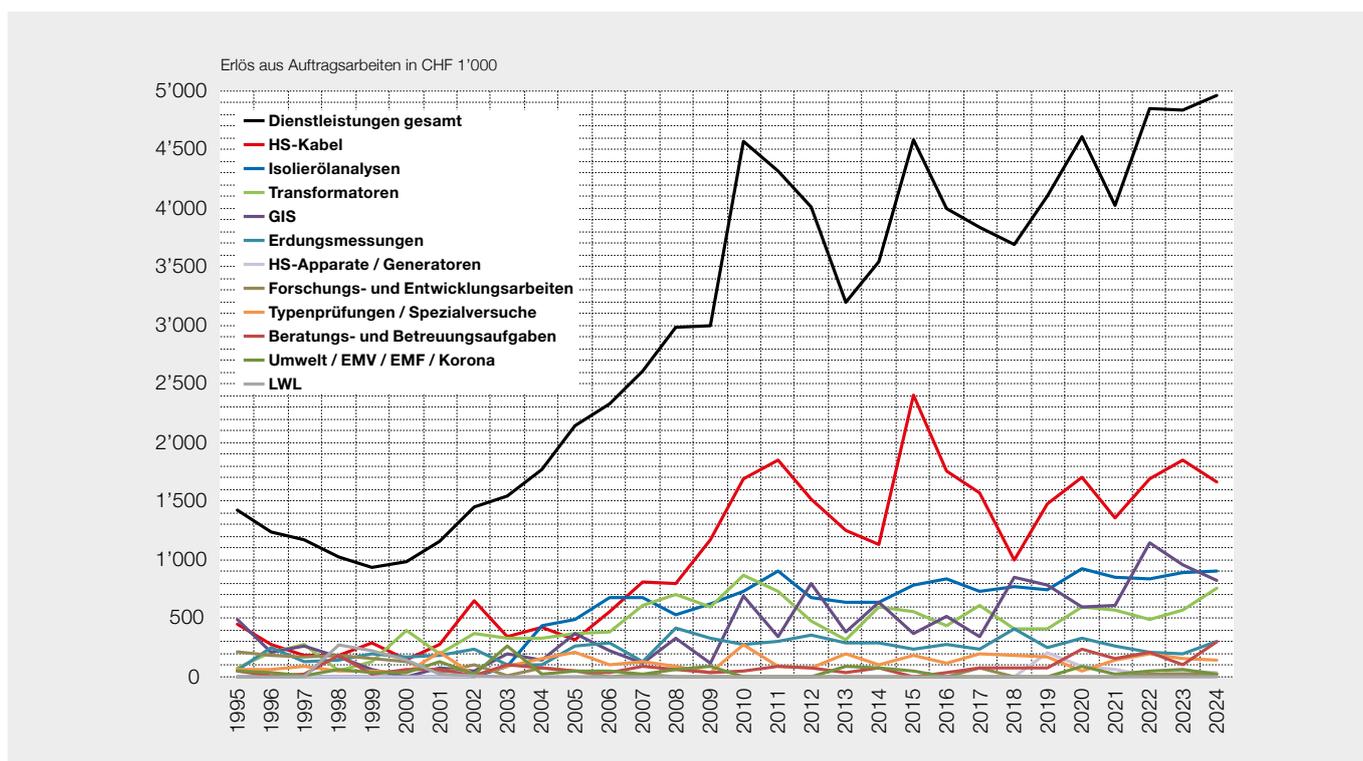


Abbildung 2: Entwicklung des Erlöses aus Auftragsarbeiten nach einzelnen Dienstleistungssparten (in CHF 1'000) über den Zeitraum von 1995–2024

Prüfung eines grossen Netztransformators

Die induzierte Spannungsprüfung mit Teilentladungsmessung vor der Inbetriebnahme eines Transformators ist ein wichtiger Schritt der Qualitätssicherung. Diese Prüfung liefert ein umfassendes Bild über den Zustand der Isolation und kann isolationszerstörende Teilentladungsquellen aufspüren, bevor ein Schaden entsteht.

Der Aufwand und der Umfang dieser Prüfung variieren in Abhängigkeit des zu prüfenden Transformators. Wesentliche Faktoren sind die Nennleistung (insbesondere die Leerlaufleistung und der Leerlaufstrom) des zu prüfenden Transformators, die Spannungsebenen und die Anzahl der Durchführungen.

Die grössten Netzkuppeltransformatoren in der Schweiz haben eine Nennleistung von bis zu 1000 MVA und verbinden die 380-kV-Netzebene mit der 220-kV-Netzebene. Dies stellt besondere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der verwendeten Prüfquelle. Die mobile Prüfquelle der FKH muss bei einer solchen Prüfung durch eine modulare Blindleistungskompensation erweitert werden. Der Prüfaufbau zur Zustandsermittlung eines grossen Netzkuppeltransformators wird in Abbildung 1 gezeigt. Es wurden pro Phase vier 50-H-Drosseln parallel verschaltet. Somit ergab sich eine Induktivität von 12.5 H pro Phase, welche für die Prüfung im Stern verschaltet wurden.



Abbildung 1: mobile Transformatorprüfanlage inkl. Kompensationsdrosseln (4x 50-H-Drossel parallel pro Phase in Sternschaltung)

Die Prüfleistung wurde mit einem Frequenzumrichter bereitgestellt, welcher durch einen Dieselgenerator gespeist wurde.

Die Leistungsaufnahme und -abgabe der Prüfanlage wurde mit Leistungsmessgeräten überwacht. Verschiedene Temperaturüberwachungen waren im Einsatz, um kritische Punkte der Prüfanlage zu überwachen.

Wird ein solcher Transformator nicht nur mit Längsregelung (Einstellung des Übersetzungsverhältnisses), sondern auch mit Querregelung (Einstellung des Phasenwinkels und damit des Lastflusses) ausgestattet, erhöht sich die Komplexität des Transformators deutlich. Je nach Bauform des Transformators resultiert hieraus eine grosse Anzahl von Durchführungen, über deren kapazitive Abgriffe die Teilentladungen der einzelnen Kessel ausgekoppelt werden.



Abbildung 2: Beispiel für die Teilentladungsaukopplung mithilfe von Adaptern an den verbauten Durchführungen

Bei grossen Netztransformatoren (mit einem oder zwei Kesseln pro Phase) können so inkl. des Sternpunktbildners bis zu 31 Teilentladungsmessstellen zusammenkommen. Zum Vergleich: Kleinere Transformatoren haben oft nur sieben bis acht Messstellen. Jede Messstelle wurde mit einem Adapter versehen, sodass ein Teilentladungsmesssystem angeschlossen werden konnte (siehe Abbildung 2). In diesem Fall wurde auf einen externen Ankoppel-

vierpol verzichtet und der interne Ankoppelvierpol des Messsystems verwendet. Es kam das MPD800-System der Firma Omicron zum Einsatz. Jede Messstelle konnte mit einem eigenen Kanal ausgestattet werden, sodass während der Prüfung alle Durchführungen gleichzeitig überwacht werden konnten.

Bei früheren Messungen dieser Art hat die FKH noch einen Multiplexer eingesetzt. Dies reduziert die Anzahl der benötigten Kanäle, jedoch können bei dieser Variante nicht alle Kanäle gleichzeitig überwacht werden, sodass sporadische Teilentladungsquellen übersehen werden können.



Abbildung 3: Teilentladungsauskopplung an Durchführungen der Unterspannung über ein zweikanaliges MPD800-System (im Hintergrund: Überspannungsableiter, die mitgeprüft wurden)

Durchführungen mit kapazitivem Messanschluss sind in der Schweiz mittlerweile (fast) Standard. Die Möglichkeit zur UHF-Teilentladungsmessung haben jedoch nur wenige Transformatoren. Einerseits gibt es Varianten mit fix verbauten Sensoren, andererseits auch die Möglichkeit, die Sensoren von aussen nach Bedarf zu montieren (ohne Ölkontakt).

Bei Transformatoren ist die Empfehlung der CIGRE-«Technical Brochure 861», die UHF-Messung zwischen 300 MHz und 750 MHz durchzuführen. Die TE-Auskopplung einer solchen Messung ist in der folgenden Abbildung 4 zu sehen.

Diese Messmethode ist kein Teil der Abnahmebedingungen eines Transformators. Sie kann aber als Fingerprint für spätere Online-Teilentladungsmessungen verwendet werden.



Abbildung 4: externer UHF-Sensor inkl. Verstärker und UHF-Kabel zur Teilentladungsmessung

Sollten bei einem Transformator später im Betrieb zum Beispiel erhöhte Gaswerte im Öl nachgewiesen werden können, so kann dies ein Hinweis auf eine Teilentladungsquelle sein. Mithilfe einer Online-Teilentladungsmessung an den UHF-Sensoren kann ein solcher Verdacht näher untersucht werden. Eine durchgeführte Messung im Neuzustand kann dann eine wichtige Referenz sein. Durch einen Vergleich mit den Referenzmessungen kann nachgewiesen werden, ob beobachtbare Teilentladungsmuster durch ein Ereignis im Betrieb neu entstanden sind oder ob sie bereits im Neuzustand vorhanden waren.

Dank des Equipments und der technischen Ausstattung der FKH ist es möglich, auch bei den grössten Transformatoren der Schweiz eine umfassende und zeitgemässe Diagnostik durchzuführen.



AUTORIN

Martina Müller

MSc ETH ETIT
Projektingeurin



AUTOR

Dr. Henrik Menne

Dr. sc. ETH
Projektingeur





Vorbereiteter Prüfling aus der Vogelperspektive

Studien und Gutachten

Die FKH führt pro Jahr zwischen 20 und 40 Studien und Expertisen im Auftrag ihrer Mitglieder durch, die sich mit verschiedenen Fragestellungen von Netzbetreibern und der Elektroindustrie befassen.

Eine Grosszahl der Problemstellungen lassen sich durch Kenntnisse aus der Fachliteratur und durch Berechnungen bearbeiten. In einigen Studien werden jedoch auch Messungen durchgeführt, beispielsweise zur Überprüfung von Hypothesen, die aus theoretischen Überlegungen hervorgehen.

Für den vorliegenden Rückblick wurden die FKH-Studien der letzten 30 Jahre statistisch ausgewertet. Generell ist ein kontinuierlicher Anstieg der Auftragsstudien bei der FKH in den vergangenen Jahrzehnten zu verzeichnen. Allerdings verläuft die Entwicklung in den einzelnen Fachgebieten unterschiedlich. Die Zusammenhänge mit bekannten Trends in der Elektrizitätsversorgungsbranche werden im Folgenden diskutiert (Abbildung 1).

Die Bereiche Umwelt und Risiken sind stark vom gesellschaftlichen Wandel beeinflusst (**Diagramm: Umweltfragen**). Dies ist besonders an der in den 1990er-Jahren aufgekommenen Medienpräsenz beim Thema der biologischen Wirkung elektromagnetischer Felder zu erkennen, die zu einer Verunsicherung der Gesellschaft führte (Schlagwort: «Elektrosmog»). Da in den 1990er-Jahren kommerzielle Software für die Berechnung elektrischer und magnetischer Felder von Freileitungen noch nicht verfügbar war, wurde die FKH mit entsprechenden Berechnungen beauftragt. Mit einiger Verzögerung gerieten auch Koronaschallemissionen sowie Fragen zu Streuströmen in landwirtschaftlichen Betrieben in den Fokus der Medien (Schlagwort: «Kriechströme»).

Die zunehmende Zahl an Risikostudien der letzten Jahrzehnte steht im Zusammenhang mit der Etablierung der Anforderungen für das Qualitäts- und Risikomanagement der Unterneh-

men nach ISO 9000 (**Diagramm: Risiko/Schäden**).

Ein wachsender Bedarf an Studienaufträgen im Bereich Netzplanung (**Diagramm Starkstromanlagen/Erdung**) ist unter anderem auf den zunehmenden Preiswettbewerb im Elektrizitätsmarkt zurückzuführen. Aus Kostengründen wurden vermehrt spezialisierte technische Fragestellungen der Netzbetreiber an externe Dienstleister vergeben.

Die Trends technischer Fragen von Kunden stehen zu einem wesentlichen Teil im Zusammenhang mit dem Energiewandel, der sich auf die Netzbeanspruchungen sowie die Netzqualität auswirkt.

Im Jahr 2021 erweiterte die FKH ihr Team mit einem Fachspezialisten für die Berechnungen von Netzvorgängen mittels des Electromagnetic Transients Program (EMTP) (**Diagramm: Untersuchung Netzvorgänge**). Der FKH-Vorstand entschied damals, die Projektberichte und die ATP-Modelle (Alternative Transients Program) von Koepl Power Experts (KPE) zu erwerben und die Dienstleistungen der seit 2022 nicht mehr aktiven Firma weiterzuführen (vgl. Jahresbericht 2021, S. 34). Dies erklärt den Anstieg der Studienzahl in den letzten fünf Jahren. In den Jahrzehnten zuvor lag der Schwerpunkt der Studien zu Netzvorgängen in den Bereichen elektromagnetische Verträglichkeit, Starkstrombeeinflussung und Blitzschutz.

Bei den Aufträgen im Bereich F&E in der Industrie (**Diagramm F&E, Industrie**) ist ein Aktivitätsmaximum in den ersten zehn Jahren nach der Jahrtausendwende zu verzeichnen. Die Nachfrage ist aber bis heute in spezialisierten Bereichen konstant. Der leichte Rückgang der Studienanzahl in den letzten zehn Jahren lässt sich einerseits in der Formierung spezialisierter Unternehmen für technische Innovationen erklären, andererseits aber auch durch die hohe Auslastung der FKH im Bereich Prüfungen und bei Fragestellungen in Zusammenhang mit Netzprojekten.

Die Entwicklung der Nachfrage für Studien und Expertisen aus dem Kreis der FKH-Mitglieder stellt eine wichtige Informationsquelle für die Abschätzung der zukünftigen Bedürfnisse

der Mitglieder dar und ist deshalb eine Grundlage für das Wissensmanagement der FKH.

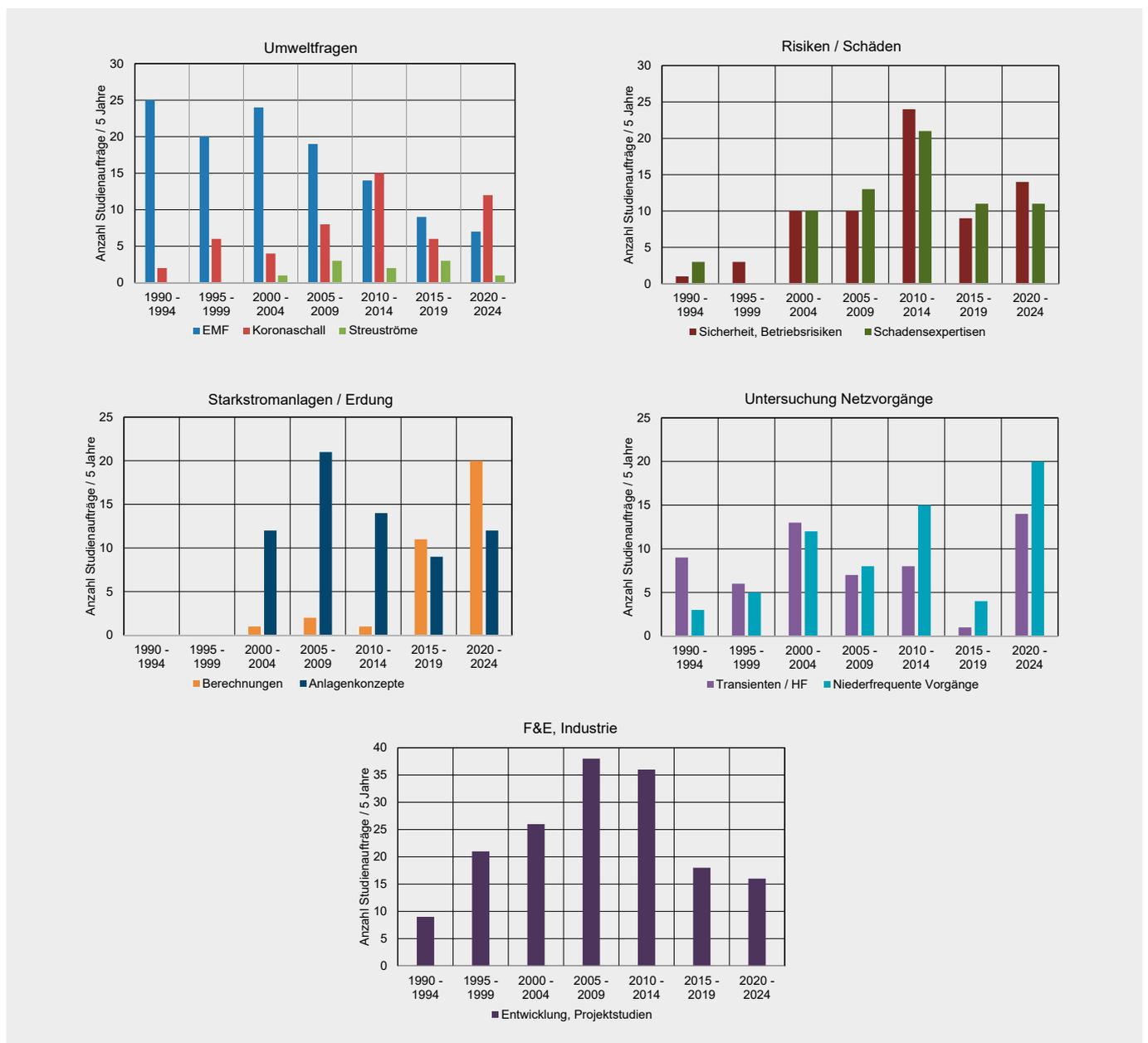


Abbildung 1: Säulendiagramme zur Entwicklung der Auftragszahlen für Studien und Expertisen für verschiedene Themenkreise in den vergangenen 30 Jahren



Abbildung 2: Beispiel eines Schadens an Mittelspannungs-Spannungswandlern, für welchen die Ursache zu analysieren war

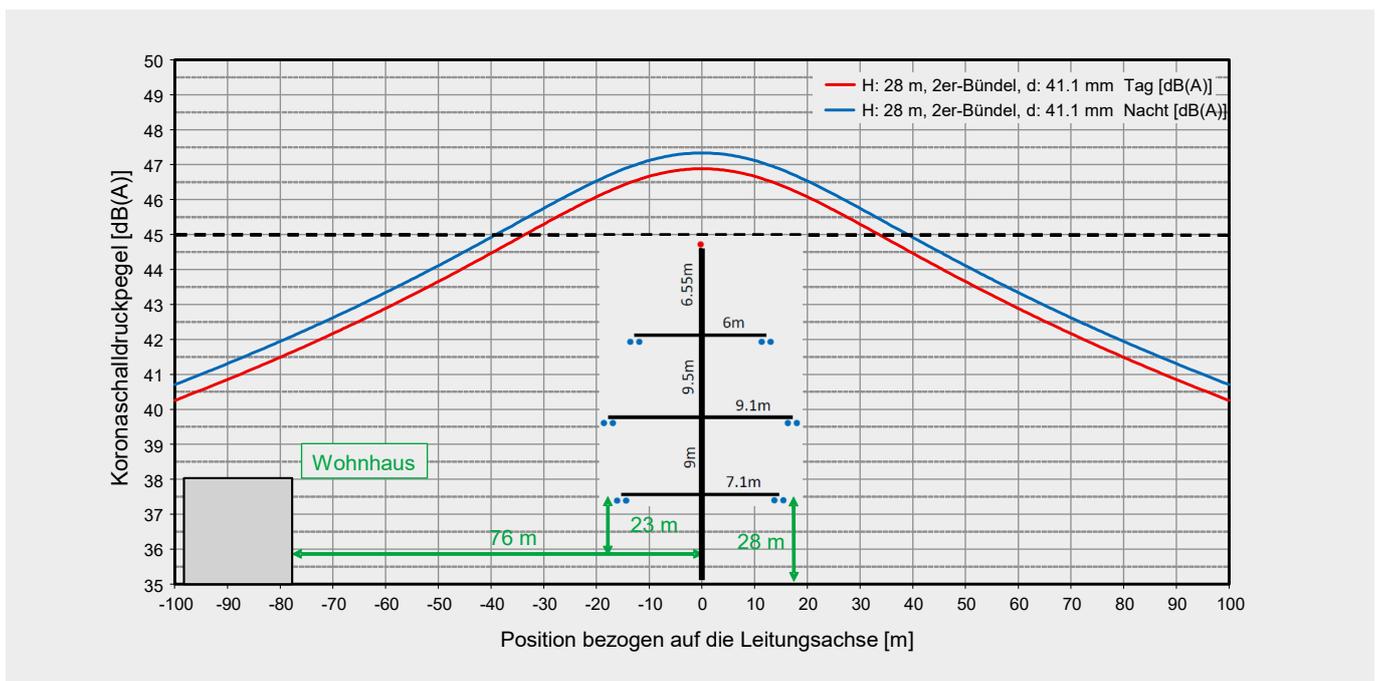


Abbildung 3: Beispiel für die Darstellung eines berechneten Querprofils des Jahresbeurteilungspegels für die Koronaschallemissionen bei einem Erneuerungsprojekt für eine Hochspannungsfreileitung

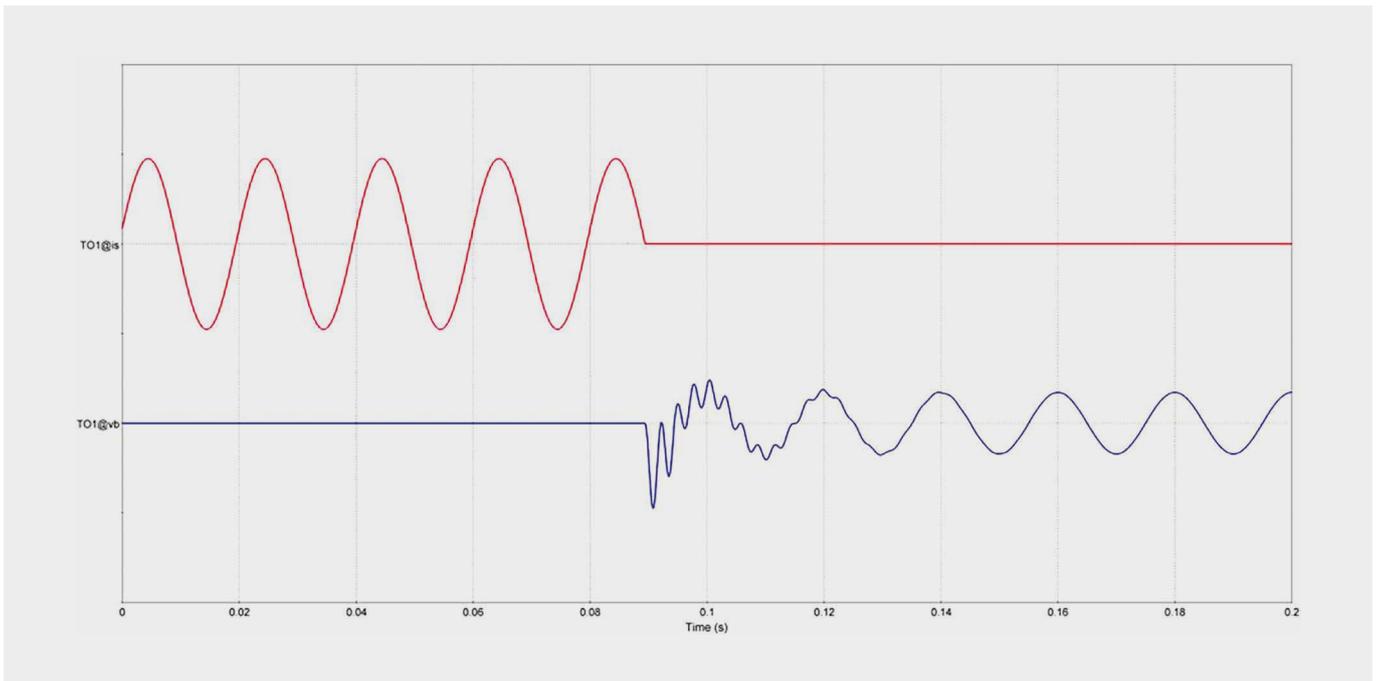


Abbildung 4: Beispiel der Berechnung transientser Wiederkehrspannungen nach Stromunterbrechung zur Untersuchung möglicher Schutzmassnahmen gegen Überspannungen



Abbildung 5: Überprüfung von berechneten Radiostörspannungen durch Freileitungskorona mit einem Störspannungs-Messempfänger

AUTOR

Reinhold Bräunlich
 Dr. sc. techn. ETH
 Projektingenieur

AUTOR

Gunnar Andrae
 M. Eng. Dipl. Ing. (FH)
 Projektingenieur

Berücksichtigung des Erdseileinflusses bei Berührungsspannungsmessungen in der Umgebung von Freileitungsmasten

Am Beispiel eines Freileitungsmastes mit Mobilfunkstation wird das praktische Vorgehen bei der Berücksichtigung des Erdseileinflusses für die Überprüfung der Berührungsspannung beschrieben.

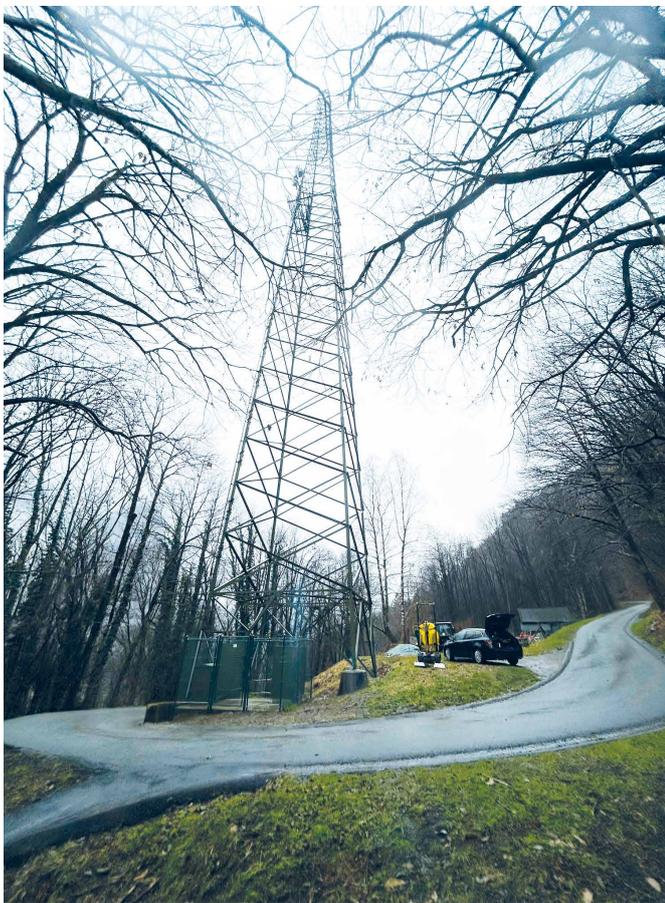


Abbildung 1: Hochspannungsmast mit Mobilfunkanlage und Sendeanlage am Boden

Gemäss der Eidgenössischen «Verordnung über elektrische Starkstromanlagen» (StV) vom 30. März 1994 (Stand am 1. Juli 2012) Art. 54, müssen bei Tragwerken von Hochspannungsfreileitungen aus leitenden Materialien bei Erdschlüssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- In Gebieten, in denen grössere Menschenansammlungen zu erwarten sind oder in denen sich Personen periodisch für längere Zeit aufhalten, sind für die Berührungsspannungen die Werte nach StV, Anhang 4, einzuhalten.
- In besiedelten Gebieten, in der näheren Umgebung von Einzelbauten und an Verkehrswegen, wo sich Personen regelmässig für kurze Zeit aufhalten, dürfen die Werte für Berührungsspannungen während höchstens zwei Sekunden überschritten werden.
- In den übrigen Gebieten dürfen die Berührungsspannungen die Werte nach Absatz 1 überschreiten. Werte über 50 V Wechselfspannung bzw. 120 V Gleichspannung sollen jedoch nicht länger als wenige Stunden bestehen bleiben.

Was die Zäune in der Umgebung von Hochspannungsmasten betrifft, so gibt es keine Unterscheidung von verschiedenen Gebieten: Die zulässigen Berührungsspannungen nach StV, Anhang 4, müssen eingehalten werden.

Messung des Erdungswiderstands von Masten

Um zu bestätigen, dass die Berührungsspannungen im zulässigen Bereich liegen, muss eine Vor-Ort-Messung durchgeführt werden, um den Erdungswiderstand des Mastes mit und ohne Messung des Mastfussstroms zu bestimmen. Das Messgerät Chauvin Arnoux C.A.6472 und das Zubehör für Masten C.A.6474 werden für diese Messungen verwendet.

Zur Messung bei Gittermasten werden vier flexible Stromsonden parallel an den vier Mastfüssen eingesetzt und die Ströme addiert. Das verwendete Gerät berücksichtigt die Phasenwinkel der gemessenen Ströme bei deren Summierung zum gesamten Mastfussstrom. Zur Messung von Betonfussmasten reicht eine einzelne Stromsonde aus. Das Messsystem wird mit Batterien betrieben und ist gut transportierbar.

Es genügt, die Hilfserde 100 m und die Sonde 50 m vom Mast entfernt einzustecken. Optimalerweise werden die beiden Litzen nicht parallel zueinander, sondern in einem Winkel verlegt.

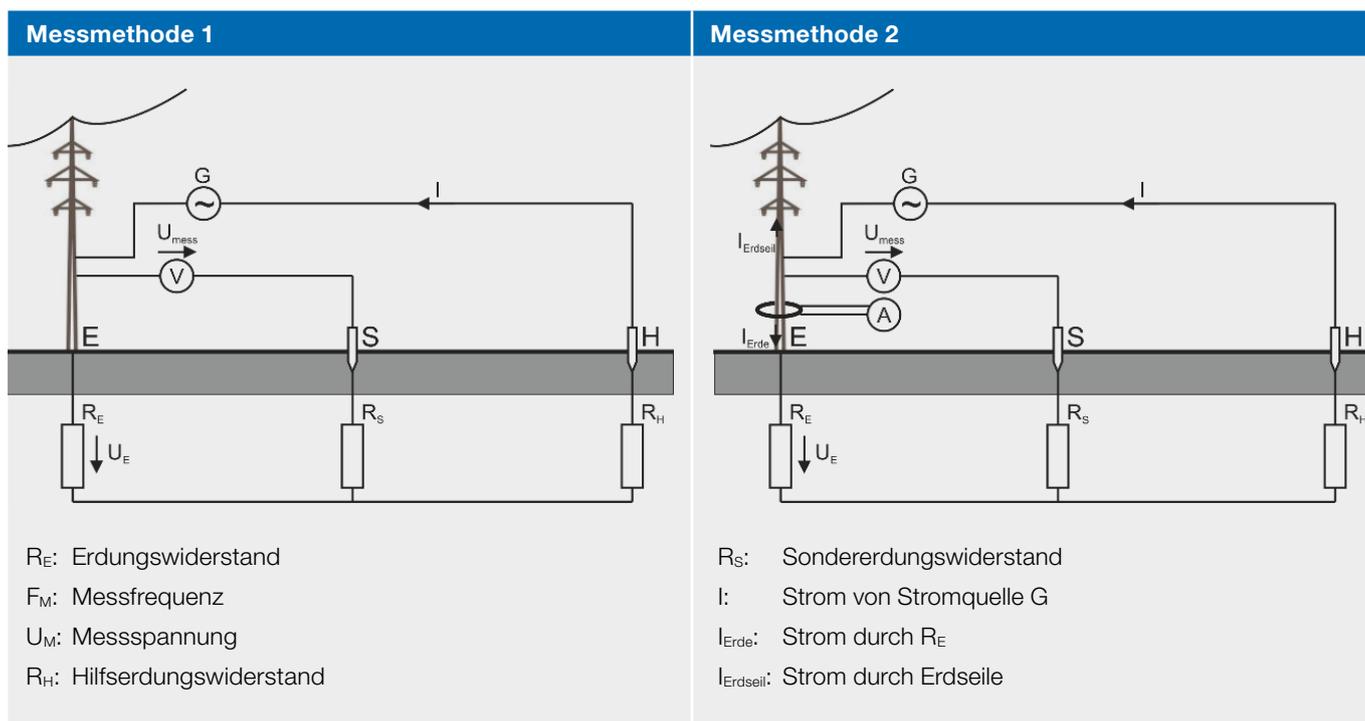


Tabelle 1: Methode zur Messung von Masten mit und ohne Berücksichtigung des Erdseils

Mit dem eingesetzten Gerät können die Erdungswiderstandsmessungen sowohl ohne separate Messung des Mastfußstroms (Methode 1) als auch mit Mastfußstrommessung (Methode 2) durchgeführt werden. Es ist zusätzlich notwendig, eine Erdwiderstandsmessung 1 m vom Mastfuß entfernt, ohne und mit einem parallelen Widerstand von 1 kΩ durchzuführen, der den menschlichen Körper simuliert. Ein Beispiel für eine Messung ist in Tabelle 2 dargestellt.

Wenn ein metallisch leitfähiger Zaun vorhanden ist, müssen zudem an diesem Zaun in 1 m Abstand (mit und ohne Körperwiderstand) Messungen durchgeführt werden, um die Berührungsspannungen an diesen Stellen berechnen zu können. Abbildung 2 zeigt die Position der Messpunkte um den Zaun herum.

R_E mit Erdseileinfluss (Messmethode 1)	R_E ohne Erdseileinfluss (Messmethode 2)	R_{E-1m} mit Erdseileinfluss (Messmethode 1)	$R_{E-1m\ 1\ k\Omega}$ mit Erdseileinfluss (Messmethode 1)
[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
9.39	23.42	0.689	0.171

Tabelle 2: Zusammenfassung der Messresultate am Mast (Messfrequenz 128 Hz). Die Messmethoden 1 und 2 sind in der Tabelle 1 beschrieben



Abbildung 2: Standort der Messpunkte rund um den Zaun

Mit diesen Messungen sowie dem Erdschlussstrom am Mast und den Abschaltzeiten können die theoretischen Berührungsspannungen um den Zaun herum berechnet und beurteilt werden.

Hierzu existiert eine vereinfachte Methode, welche eine Worst Case-Abschätzung darstellt, aber mit der Vernachlässigung, dass in der Realität nicht der gesamte Strom durch den Mast abfließt. Für diese vereinfachten Berechnungen wird der Widerstand ohne Trennung des Erdseilstroms vom Erdungsstrom verwendet. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der vereinfachten Methode.

Die Grenzwerte zur Beurteilung der Berührungsspannungen sind abhängig vom maximal möglichen Kurzschlussstrom und von der Abschaltzeit im Fehlerfall. Für die zulässigen Berührungsspannungen müssen die Werte nach StV, Anhang 4, berücksichtigt werden. Bei einer Abschaltzeit von 100 ms sind zum Beispiel 700 V erlaubt. In der Regel liegt bei einem Erdschlussstrom von 18.2 kA die Berührungsspannung über der maximal zulässigen Spannung von 700 V.

Die einfachere und ungenauere Methode beinhaltet eine erhebliche Reserve. Wenn mit ihr die Einhaltung der Grenzwerte nicht nachgewiesen werden kann, kommt die detailliertere Methode 2 zum Einsatz.

Messposition	R_{E-1m} mit Erdseileinfluss (Messmethode 1)	$R_{E-1m \ 1 \ k\Omega}$ mit Erdseileinfluss (Messmethode 1)	Berührungsspannung am Zaun $R_{E-1m \ 1 \ k\Omega} \times 18.2 \ kA$
	[Ω]	[Ω]	[Ω]
1	0.507	0.237	4.31
2	0.369	0.157	2.86
3	0.952	0.291	5.30
4	0.161	0.069	1.26

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messresultate am Zaun

Grundlagen zum Einfluss des Erdseils auf die wirksame Masterdungsimpedanz

Erdseilreduktionsfaktor

Aufgrund der magnetischen Kopplung zwischen Leiterseilen und Erdseil fliesst ein Teil des Fehlerstroms beidseitig durch das Erdseil ab, und zwar selbst dann, wenn die Erdungsimpedanzen der Masten 0Ω betragen würden.

Der Erdseilreduktionsfaktor ζ_E gibt bei solch idealen Masterdungen (0Ω) an, um welchen Faktor der Fehlerstrom durch den Erdseilstromanteil reduziert wird. Der verbleibende Fehlerstrom fliesst am Fehlermast und an den Nachbarmasten in den Erdboden.

Kettenleiterimpedanz

Entsprechend dem Erdseilreduktionsfaktor ζ_E fliesst gemäss den Ausführungen im vorangehenden Abschnitt ein magnetisch induzierter Erdfehlerrückstrom im Erdseil der Leitung bis zum speisenden Unterwerk zurück. Dieser Strom bleibt ab einer gewissen Distanz vom fehlerbetreffenen Mast und vom Unterwerk ortsunabhängig konstant. Man nennt diesen Strom deshalb auch den «ausgeglichenen» Erdseilstrom. Nebst diesem ausgeglichenen Erdseilstrom fliesst in der Umgebung des fehlerbetreffenen Masts ein zusätzlicher Erdseilstrom, der

mit zunehmender Distanz abklingt. Dieser örtlich begrenzte zusätzliche Erdseilstromanteil wird durch die Ströme hervorgerufen, die durch den vom Erdfehler betroffenen Mast und auch durch die Nachbarmasten in den Erdboden fliessen. Infolge des Erdungswiderstands des fehlerbetreffenen Masts R_E und jenem der Nachbarmasten erzeugen diese Erdübergangsströme je einen Spannungstrichter um die Masten und damit Potenzialanhebungen, die ebenfalls mit zunehmendem Abstand abklingen. Die über das Erdseil parallel geschalteten Masten bilden die sogenannte Kettenleiterimpedanz. In einigen Spannweiten vom Fehlermast entfernt liegt keine Potenzialanhebung mehr vor. Auch das Erdseil weist dort dasselbe Potenzial auf wie der Erdboden. In grösserer Entfernung ist deshalb nur noch der magnetisch eingekoppelte ausgeglichene Fehlerstromanteil im Erdseil feststellbar.

Tabelle 4 zeigt die verschiedenen Parameter, die zur Berechnung der resultierenden Masterdungsimpedanz unter Berücksichtigung des Erdseilreduktionsfaktors und der Kettenleiterimpedanz benötigt werden. Die Geometrie des Mastes, die Daten des Erdseils und der durchschnittliche Abstand zwischen den Masten sind erforderlich.

1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	17	18	19	21	23	24	26
Nr. Mast / Berechnungsfall	Frequenz	Mittlerer spezifischer Bodenwiderstand entlang der Leitung	Realteil des Erdseilwiderstands pro Weglänge	Radius des Erdseils	Relative magnetische Permeabilität des Erdseils	Mittlere Distanz zwischen Leiterseilen und Erdseil	Mittlere Leiterseilhöhe über Boden (hMast - 0.7 x Durchhang)	Mittlere Erdseilhöhe über Boden (hMast - 0.7 x Durchhang)	Mittlere Spannweite	Ersatzdurchmesser der Masterdungen	Virtuelle Erdstromeindringtiefe	Mittlere Masterdungsimpedanzen ohne Erdseilwirkung gerechnet	Mittlere Masterdungsimpedanzen ohne Erdseilwirkung gemessen	Erdseilreduktionsfaktor (Betrag)	Kettenleiterimpedanz (einseitig)	Gemessener Masterdungs-widerstand am Fehlermast ohne Erdseilwirkung	Resultierende Masterdungsimpedanz
	f	ρ_E	R'_2	r_2	μ_r	d_{12}	h_1	h_2	l_s	D_T	δ	R_{EM}	R_{EM}	r_E	Z_1	R_E	R_{res}
	Hz	$[\Omega m]$	$[\Omega/km]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[m]$	$[km]$	$[m]$	$[m]$	$[\Omega]$	$[\Omega]$		$[\Omega]$	$[\Omega]$	$[\Omega]$
0	50	800	0.118	0.0112	1.0	15.6	44.3	58.7	0.390	9.90	2634	25.72	23.40	0.597	2.846	23.40	0.81

Tabelle 4: Auswertung von Mastimpedanzen unter Berücksichtigung des Erdseileinflusses

Resultierende Erdungsimpedanz am Mast: R_{res}	0.81 Ω
Maximaler Erdfehlerstrom am Mast: I_F	18.2 kA
Maximale Erdungsspannung im Erdfehlerfall am Mast: $U_E = R_{res} \times I_F$	14.7 kV
Fehlerstromanteil durch die Masterdung: $I_{F-REM} = U_E / R_{E(ohne\ Erdseileinfluss)}$	0.63 kA

Tabelle 5: Berechnung des Fehlerstromanteils durch die Masterdung

Fehlerstrom am Mastfuss und Berührungsspannungen

Mit der resultierenden Masterdungsimpedanz ist es jetzt möglich, den Strom zu berechnen, der effektiv durch den Mastfuss fließt. Die Berechnung des Fehlerstromanteils durch die Masterdung ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

Mit dieser detaillierten Berechnungsmethode unter Berücksichtigung der Kettenleiterimpedanz und des Reduktionsfaktors sind die Berührungsspannungen an allen vier Messpositionen kleiner als der maximale zulässige Wert von 700 V mit einer Abschaltzeit von 100 ms.

Mit der Berechnungsmethode 2 kann festgestellt werden, dass bei einem Erdschluss von 18.2 kA am Mast ein Stromanteil von 628 A durch die Mastfüsse fließt. Der Rest fließt beidseitig ins Erdseil.

Wenn wir diesen Strom berücksichtigen, um die Berührungsspannungen in einem Meter Abstand von der Mastkonstruktion zu bestimmen, erhalten wir die Ergebnisse in Tabelle 6. Voraussetzung dafür ist allein die Kenntnis des Stroms durch die Mastfüsse.

Messposition	R_{E-1m} ohne Erdseileinfluss (Messmethode 2)	$R_{E-1m\ 1\ k\Omega}$ ohne Erdseileinfluss (Messmethode 2)	1-m-Berührungsspannung Spannung am Zaun $R_{E-1m\ 1\ k\Omega} \times 628\ A$
	[Ω]	[Ω]	[V]
1	1.272	0.590	371.4
2	0.915	0.384	241.7
3	2.372	0.727	457.6
4	0.403	0.169	106.4

Tabelle 6: Zusammenfassung der Messresultate am Zaun unter Berücksichtigung des Erdseileinflusses

Schlussfolgerungen

Die vereinfachte Methode der Bestimmung der Berührungsspannungen am Zaun der Mobilfunkanlage bei einem Erdschluss (Methode 1) führt zu einer Überschreitung der zulässigen Spannung von 700 V. Unter Berücksichtigung der Erdseildaten, des Reduktionsfaktors und der Kettenleiterimpedanz (Methode 2) liegen die wirklichen Berührungsspannungen in der Umgebung des Zauns unter dem maximal zulässigen Wert von 700 V.

In einigen Fällen ist es daher notwendig, diese zusätzlichen Berechnungen durchzuführen, wenn die vereinfachte Methode nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt. Die detaillierte Methode erlaubt eine realistischere Einschätzung der Sicherheitslage und trägt dazu bei, unnötige Schutzmassnahmen zu vermeiden oder falls nötig gezielt einzusetzen.

Es wird empfohlen, die detaillierte Methode anzuwenden, wenn eine erste Abschätzung mit der vereinfachten Methode auf kritische Werte hinweist. Insbesondere in Bereichen mit häufigem Personenaufenthalt kann die genauere Berechnung einen entscheidenden Beitrag zur sicheren Auslegung der Anlage leisten.

Wenn die Berührungsspannungen in der Nähe von elektrischen Masten oder benachbarten Zäunen nach Methode 2 unter Berücksichtigung der Erdseilreduktionsfaktoren und der Kettenleiterimpedanz immer noch zu hoch sind, kann ein Teerbelag oder ein 30 cm tiefes Schotterbett (mindestens bis zu einem Meter Abstand von der Berührungsstelle) aufgebracht werden, um unzulässige Berührungsspannungen zu vermeiden.



AUTOR

Diego Friedli

MSc Eng. HES-SO

Projektingenieur

Ultraleichter Hochspannungsleiter für Vor-Ort-Prüfungen – eine neue Lösung

Die teilentladungsfreie Einspeisung bei Prüfungen mit Teilentladungs (TE)-Messungen an Höchstspannungsbetriebsmitteln stellt eine Herausforderung dar. Insbesondere bei Vor-Ort-Prüfungen befinden sich die Freiluftdurchführungen oft in Höhen von über 10 Metern (z.B. bei Ausleitungen von gasisolierten Schaltanlagen [GIS]). Dies erfordert für die Einspeisung der Prüfspannung entsprechende Zuleitungslängen im Bereich von über 15 m bei einem Leiterdurchmesser von über 100 mm.

Unten stehend ein Beispiel zur Hochspannungseinspeisung mit starren Aluminiumrohren mit Aussendurchmesser 120 mm an einer 420-kV-GIS-Durchführung (schematische Darstellung eines realen HS-Prüfaufbaus).

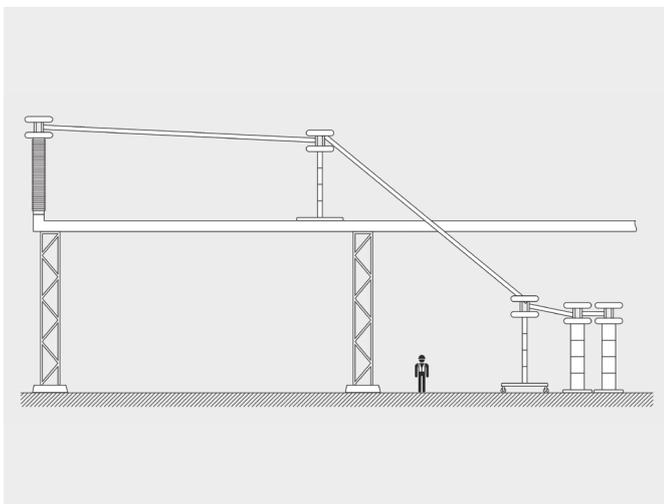


Abbildung 1: TE-freier Prüfaufbau für die Hochspannungseinspeisung vor Ort an einer 420-kV-GIS-Durchführung

Die Installation der Rohrleiter in Abbildung 1 mit Rohrlängen von bis zu 16 m und einem Gewicht von bis zu 60 kg erforderte drei Personen, einen Pneukran und zwei Hubarbeitsbühnen. Wird eine TE-Messung bei der durch die CIGRE [1] empfohlenen TE-Messspannung von 416 kV durchgeführt, sind Leiterdurchmesser von 120 mm im praktischen Einsatz am Limit. Es wäre angebracht, noch grössere Leiterdurch-

messer zur Sicherstellung der Teilentladungsfreiheit der Einspeisung zu verwenden.

Alternative Lösungen wie z.B. flexible Aluminiumschläuche (verwendet in Lüftungsanlagen) reißen leicht ein und müssen abgespannt werden, da sie nicht formstabil sind.

Wunschziele für eine neue Lösung

Um die Prüfmöglichkeiten zu erweitern sowie die Montage der HS-Einspeisung vor Ort zu erleichtern und sicherer zu machen, wurden folgende Wunschziele für einen neuen HS-Leiter formuliert:

Montage	1 Person	(mit Hubarbeitsbühne)
Gewicht	10 ... 15 kg	(für 1 Person in Hubarbeitsbühne)
Durchmesser	mind. 20 cm	(TE-frei bis > 420 kV im praktischen Einsatz)
Länge (vor Einsatz) (im Einsatz)	minimal maximal	(1–2 m) (15–50 m)
Stromverlust	minimal	(< 1 kW OK für Standard-HS-Prüfsets)
Spannungsabfall	< 100 Volt	(Einfluss auf Spannungsmessung vernachlässigbar)

Die neue Lösung: ein aufblasbarer Hochspannungsleiter

Der neue Hochspannungsleiter besteht im einsatzfähigen Zustand aus einem langen, zylinderförmigen Druckkörper – ähnlich einem langen Ballon – mit einer elektrisch leitfähigen Aussenhülle. Die Formstabilität wird durch den Innendruck erreicht.

Vor der Montage kann der Leiter im flachen, eingerollten Zustand transportiert werden und ist entsprechend kompakt. Zur Montage wird er ausgerollt und abschliessend durch Aufblasen in eine stabile Form gebracht.



Abbildung 2: Lösungsprinzipien des aufblasbaren Hochspannungsleiters

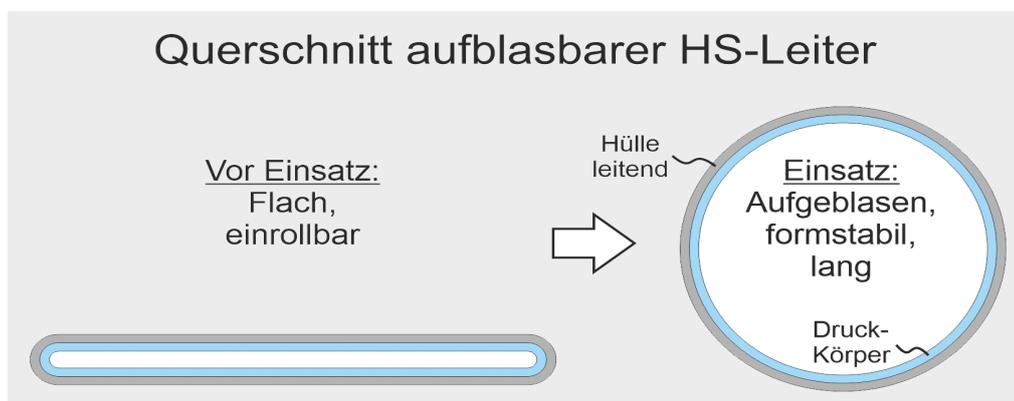


Abbildung 3: Querschnitt des aufblasbaren HS-Leiters vor dem Einsatz und im Einsatz

Versuchsmuster und erste Tests

Es wurden erste Versuchsmuster angefertigt und getestet.



Abbildung 4: Versuchsmuster des aufblasbaren Hochspannungsleiters mit 7 m Länge, 20 cm Durchmesser und 1.5 kg Gewicht (getragen durch Simon Mutter; Mitentwickler)

Gewicht	1.5 kg
Durchmesser	20 cm
Länge	7 m
Widerstand	< 0.1 Ohm (Verlust bei 10 Ampere: < 10 W; Spannungsabfall < 1 V)

Die Wunschziele wurden übertroffen.

Das Versuchsmuster in Abbildung 4 wurde einer Teilentladungsmessung unterzogen. Bei 460 kV zeigte sich der neue HS-Leiter praktisch TE-frei (2 pC).

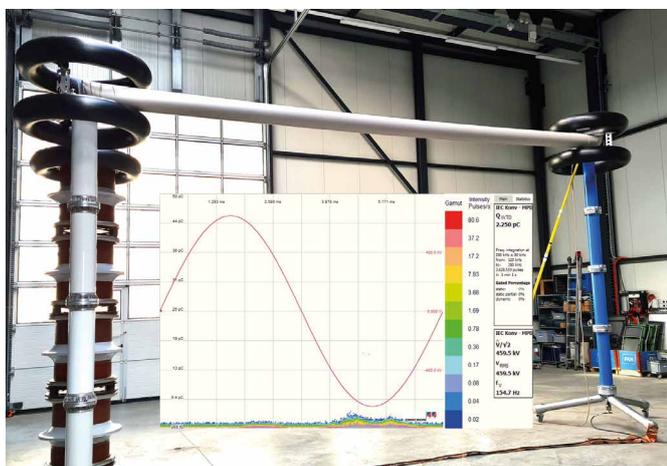


Abbildung 5: Überprüfung des Teilentladungsverhaltens eines Versuchsmusters des neuen HS-Leiters

Stand und Ausblick

Das Versuchsmuster übertraf die gesetzten Ziele. Insbesondere zeigte sich bereits bei der Verwendung eines einfachen Plastik-Folienschlauches als Druckkörper (bei niedrigem Innendruck) eine hohe Formstabilität. Beim Einsatz von entsprechend optimierten Lösungen ist zu erwarten, dass sowohl grosse Längen als auch grosse Durchmesser gut realisierbar sind.

Es wurden Evaluationen zur Material- und Konstruktionsoptimierung für den praktischen Einsatz durchgeführt.

Der nächste Schritt ist der Prototypenbau für den praktischen Einsatz mit anschliessenden Labor- und Feldtests.

[1] CIGRE Joint Working Group 33/23.12; Insulation coordination of GIS; return of experience on site and diagnostic techniques; Electra No 176; February 1998



AUTOR

Stefan Neuhold
Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur



AUTOR

Simon Mutter
Energieelektroniker

Modulares Resonanzanlagenkonzept

Auf dem Markt gibt es Serieresonanzprüfanlagen für verschiedene Anwendungen und vor allem für einen grossen Bereich Prüflingskapazitäten und Prüfspannungen. Die FKH setzt auf modulare Anlagen, bei denen je nach Prüfling mehr oder weniger Drosseln eingesetzt werden. Die FKH verfügt über drei verschiedene Resonanzdrosseltypen (siehe Tabelle unten).

Mit diesen verschiedenen Drosseln kann für jeden Anwendungsfall eine optimal auf den Prüfling abgestimmte Resonanzanlage zusammengestellt werden. Die folgenden Beispiele zeigen, dass dieselben Drosseln für die unterschiedlichsten Anwendungen kombiniert werden können. Durch Parallelschaltung einzelner Induktivitäten kann eine grössere Kapazität geprüft werden. Setzt man Drosseln in Serie aufeinander, lassen sich höhere Spannungen erreichen.

Es können bis zu drei 80-H-Drosseln aufeinandergestellt werden. Damit wäre eine Spannung bis 780 kV möglich, zumindest in der Theorie. Bis jetzt hat die FKH mit einer Serieresonanzanlage max. 560 kV erzeugt.

Ein grosser Vorteil der modularen Anlagen liegt auch beim Transport über enge Feldwege oder über Strassen mit Gewichtsbeschränkung. Unsere Drosseln können auf mehrere kleine Lkw aufgeteilt werden und müssen nicht mit dem grossen Sattelschlepper angeliefert werden.

Für Vor-Ort-Prüfungen sind Frequenzen von 20 bis 300 Hz vorgesehen, sofern die Komponenten im Prüfkreis für z.B. so

tiefe Frequenzen dimensioniert sind. Wenn induktive Spannungswandler im Prüfkreis sind, muss die Prüffrequenz entsprechend hoch sein, damit diese nicht sättigen. Die Resonanzfrequenz eines LC-Schwingkreises folgt der Gleichung:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{oder} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

So werden Schaltanlagen oder kurze Kabelstrecken mit wenigen Drosseln und eher hohen Frequenzen geprüft. Bei grösseren Kapazitäten, wie zum Beispiel bei langen Kabelstrecken, werden mehr Drosseln benötigt und die Frequenzen sind tiefer.

Folgende Beispiele von Prüfungen zeigen die Skalierbarkeit der Resonanzanlage für verschiedene Anwendungsfälle:

Beispiel 1: 380-kV-Kabelstrecke mit 220 m Länge

Ein Highlight des Jahres 2024 war für drei unserer Mitarbeiter eine Reise in den Norden Deutschlands, um ein rund 220 m kurzes 380-kV-Kabel zu prüfen. Dank der Modularität unserer Anlagen konnten wir auf einem Lkw mit Anhänger die gesamte Prüfanlage inkl. der TE-Messtechnik ins Unterwerk fahren. Für diese Prüfung wurden zwei Türme mit je drei 80-H-Drosseln in Serie aufgebaut (Abbildung 1). Das Kabel wurde für den Kunden nach IEC mit 374 kV (1.7 U₀) während 60 min geprüft. Die Teilentladungsbewertungsspannung lag bei 330 kV (1.5 U₀).

Induktivität L	Anzahl	Max. Spannung U _{max}	Max. Strom I _{max}	Prüfzeit bei I _{max} t	Gewicht m
80 H	19 Stk.	260 kV	10 A	15 min	2100 kg
50 H	14 Stk.	230 kV	6 A	10 min	500 kg
40 H	2 Stk.	60 kV	3.1 A	15 min	130 kg

Im Vergleich zur FKH setzen andere Prüfinstitute auf Resonanzanlagen mit wenigen und dafür deutlich grösseren (Tank-) Drosseln, welche fix auf einem 40-t-Sattelschlepper verbaut sind. Die übliche Betriebsspannung solcher Drosseln liegt bei 260 kV. Für die Prüfung sehr langer Kabel mit entsprechend grosser Kapazität kann dies Vorteile bieten, die Prüfquelle kann aber weniger gut auf unterschiedliche Kabellängen angepasst werden. Sollen damit kleinere Kabelstrecken geprüft werden, ist das Transportvolumen im Vergleich zur FKH-Quelle deutlich höher und das Unterwerk muss zwingend eine Zugänglichkeit für grosse Sattelschlepper aufweisen. Im oben genannten Beispiel hätte man zwei solche Drosseln in Serie schalten müssen, um die Prüfspannung zu erreichen. Diese Anlage hätte auf zwei 40-t-Sattelschlepper angeliefert werden müssen.



Abbildung 1: Prüfanlage für eine 220 m lange 380-kV-Leitung

Beispiel 2: 132-kV-Kabel mit 8.6 km Länge

Auf der anderen Seite gibt es auch Kabelsysteme mit einer Länge, bei welcher nahezu alle Drosseln einer Baureihe der FKH benötigt werden (siehe Abbildung 2). Im letzten Jahr wurde z.B. ein ca. 8.6 km langes 132-kV-Kabel geprüft. Das Kabel mit einer Kapazität von ca. 1934 nF verlangte eine entsprechend grosse Drosselbatterie mit 17 parallel geschalteten Drosseln. Mit einer Gesamtinduktivität von 4.7 H stellte sich eine Frequenz von 52.6 Hz ein. Die Frequenz und die Prüfspan-

nung von lediglich 100 kV wurden entsprechend der Anlagenkonfiguration gewählt. Auf einer Kabelseite befand sich eine gasisolierte Schaltanlage mit einem Spannungswandler, der nicht getrennt werden konnte. Auf Wunsch des Kunden und nach einer vorangegangenen Prüfung wurde die Prüffrequenz über die Betriebsfrequenz erhöht und die Prüfspannung reduziert. So konnte die Spannungsprüfung inklusive der Teilentladungsmessung für 15 min durchgeführt werden. Da diese 17 Drosseln einiges an Platz benötigten, der innerhalb des Gebäudes nicht vorhanden war, waren zwei Adapterkabel à 50 m notwendig, um die Strecke zwischen dem Kabelendverschluss im Kabelkeller bis zur Prüfanlage zu überbrücken.



Abbildung 2: Drosselbatterie mit 17 Stück 80-H-Drosseln für ein 132-kV-Kabel

Beispiel 3: 60-kV-Kabel mit 600 m Länge

Je nach Gegebenheiten werden auch kleinere 50-H-Drosseln für verschiedene Kabelprüfungen zusammengestellt. An einem ca. 600 m langen 60-kV-Kabel musste nach einer Anpassung eine Hochspannungsprüfung durchgeführt werden. Mit sechs Drosseln parallel stellte sich die Frequenz von 49.4 Hz ein. Dabei wurden alle drei Kabel (Phasen) miteinander geprüft. Bei den kleinen Drosseln sind der Prüfstrom und die Prüfzeit zu beachten, da die Drosseln nur für 6 A während 10 min ausgelegt sind. Der Vorteil der 50-H-Drosseln liegt in ihrem tiefen

Gewicht von rund 500 kg, was einem Viertel des Gewichtes einer 80-H-Drossel entspricht. Sie sind daher handlicher und lassen sich vor Ort einfacher platzieren. So ist zum Beispiel je nach Bodenbeschaffenheit ein normaler Handhubwagen ausreichend, wohingegen für die 80-H-Drossel ein elektrischer Hubwagen notwendig wird.



Abbildung 3: sechs 50-H-Drosseln parallel für eine 60-kV-Kabelprüfung

Beispiel 4: MS-Schaltanlagen

Mit der kleinen 40-H-Drossel können MS-Schaltanlagen oder kurze MS-Kabel geprüft werden.

Abbildung 4 zeigt eine Prüfung einer 20-kV-Schaltanlage. Eine solch kompakte und leichte Anlage (inkl. TE-Messmaterial) kann bereits mit einem 3.5-t-Transporter an den Bestimmungsort gebracht werden.



Abbildung 4: Prüfung einer 20-kV-Schaltanlage mit der kleinen 40-H-Drossel



AUTOR

Dominic Kleger

BSc El.-Ing. FH
Projekt Ingenieur

Neue Generation von Frequenzumrichtern bei der FKH

Wer sich noch an den Artikel «Frequenzvariable Speisequelle für Hochspannungsprüfungen und Erdungsmessungen» aus dem Jahresbericht 1996 erinnert, wird den Inhalt des folgenden Beitrages wahrscheinlich schon erahnen. Damals wurden Frequenzumrichter des Herstellers REFU als Basis für eine stabile Stromquelle für Erdungsmessungen und als teilentladungsfreie Spannungsquelle für Hochspannungsprüfungen eingesetzt. Da diese Komponenten langsam das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, wird bei der FKH seit 2019 am Austausch und an der Erweiterung der Quellen gearbeitet.

Als neue Basis dienen Umrichter von Toshiba mit 50, 150 und 950 A Nennstrom. Da die ursprüngliche Steuerung der Frequenzumrichter nicht für Prüfungen vor Ort ausgelegt war, wurde von Alff Engineering eine neue Steuerung entwickelt. Diese Steuerung arbeitet mit einer Pulsweitenmodulation von 8 kHz und existiert in einer zweiphasigen Variante (siehe Abbildung 1) für den Einsatz bei Serieresonanzprüfungen (siehe Beitrag «Möglichkeiten der Hochspannungsprüfung in der neuen FKH-Prüfhalle in Niedergösgen») mit automatischer Suche der Resonanzfrequenz. Diese zweiphasige Variante wird auch für Erdungsmessungen oder als Strom- oder Spannungsquelle für Langzeitversuche eingesetzt (siehe Beitrag «Möglichkeiten der Hochspannungsprüfung in der neuen FKH-Prüfhalle in Niedergösgen»). Bei Serieresonanzprüfungen setzt die FKH auch Umrichter der Firma Highvolt mit Grundfrequenzmodulation ein. Die Leistungsdichte ist im Vergleich höher, bei Teilentladungsmessungen treten durch die Modulation aber Artefakte auf.

Abbildung 1 zeigt die Leiterplatte der zweiphasigen Steuerung. Die insgesamt vier IGBT der beiden verwendeten Halbbrücken des Toshiba-Umrichters werden von den Gate-Treibern in der rechten unteren Ecke angesteuert.

Zur Abschirmung elektromagnetischer Störungen wurde der 150-A-Umrichter in einem robusten Gehäuse aus magnetischem



Abbildung 1: Leiterplatte der zweiphasigen Steuerung von Alff Engineering, rechts unten sind die vier Gate-Treiber zu sehen

Blech untergebracht und mit wirksamen Filtern auf der Eingangs- und Ausgangsseite versehen, siehe Abbildung 2. Mit diesem Abschirmkonzept zeigen die Teilentladungsmessungen im Labor keine Erhöhung des TE-Grundstörspegels (ca. 1 pC) beim Einschalten des Umrichters.



Abbildung 2: offener Umrichterschrank, in der Mitte oben: Frequenzumrichter, unten: Trenntrafo, links: Eingangsfilter, rechts: Ausgangsfilter

Ein weiterer geschirmter Schrank mit einem 50-A-Umrichter befindet sich derzeit in der Erprobungsphase.

Für die Messung von Transformatoren wird aktuell eine dreiphasige Variante der Steuerung auf einem 950-A-Umrichter eingesetzt, siehe Abbildung 3. Die gesamte Prüfquelle für



Abbildung 3: 950-A-Umrichter mit Steuerung von Alff Engineering (grüne Leiterplatte) in der Prüfquelle für Transformatoren

Transformatoren, inklusive Step-up-Transformator, ist in einem ca. 8 Meter langen Lkw-Koffer installiert. Für die Prüfung von kleinen Transformatoren in Gebäuden ist daher ein weiterer Umrichterschrank in Arbeit, siehe Abbildung 4. Dieser basiert auf einem 150-A-Umrichter in Kombination mit einem separaten Step-up-Transformator.

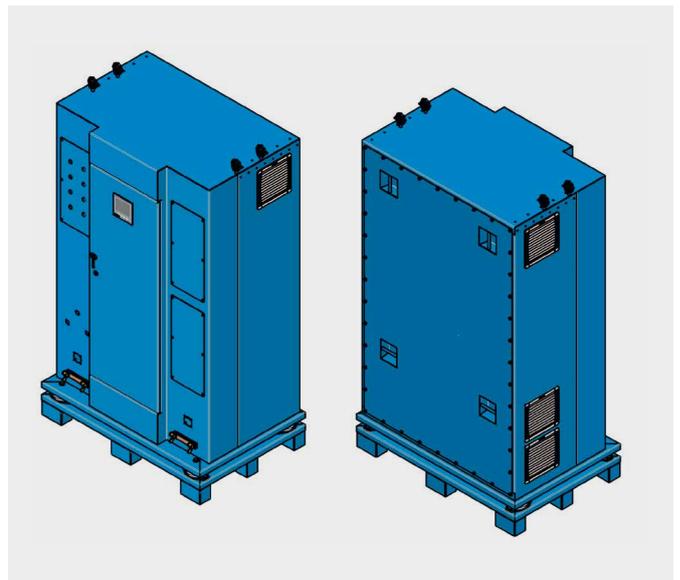


Abbildung 4: geplanter Umrichterschrank für Messungen an Transformatoren mit einem Umrichter der 150-A-Klasse



AUTOR

Philippe Alff
MSc ETH ETIT
Projektingenieur

220-kV-Kabelprüfung Leitung Birr

Nach einem Ausfall Anfang 2024 musste die bestehende Leitung zwischen dem UW Birr und dem Netzanschluss Ansaldo erneuert werden. Die Leitung, welche das Notkraftwerk Birr mit dem Netz von Swissgrid verbindet, wurde in kürzester Zeit neu montiert und wieder in Betrieb genommen. Das Kabel wurde in Birr im bestehenden Feld angeschlossen (Abbildung 1) und auf dem Werksgelände der GE in Birr beim Anschluss Ansaldo mit der provisorischen Einspeisung des UW Lupfig mit dem Notkraftwerk verbunden. Die Leitung hat folgende Kenn-/Nennndaten:

Eckdaten Kabel

Kabel	XDRUCU-ALT 1x 800 mm ² , 127/220 (245) kV
Kapazität	ca. 184.5 nF/Phase
Trasseelänge	1140 m
Garnituren	Freiluftendverschlüsse FR 1.245-11 auf beiden Seiten

Die Prüfanlage wurde beim Netzanschluss Ansaldo aufgestellt (Abbildung 2). Es wurden zwei Drosseltürme mit zwei 80-H-Drosseln mit einer Gesamtinduktivität von 84.8 H aufgestellt. Mit der Kapazität des Kabels ergab das eine Prüffrequenz von 40.2 Hz. Die Kabel wurden mit $2.0 U_0$ (254 kV) während 15 min geprüft. Zusätzlich wurde an den Endverschlüssen auf beiden Seiten eine Teilentladungsmessung durchgeführt. Als Akzeptanzkriterium für die TE-Messung galt, wenn bei $1.5 U_0$ (190 kV) keine phasenkorrelierten Teilentladungen nachgewiesen werden konnten. Die Teilentladungen wurden bei den Kabelschirmen mithilfe von 16-A-Vierpolen der FKH ausgekoppelt. Da eine LWL-Verbindung zwischen den beiden Endverschlüssen fehlte, wurden die Teilentladungsmessungen auf beiden Seiten durch jeweils einen Prüffingenieur durchgeführt.

Während den Messungen wurden bei der Prüfspannung Teilentladungen im UW Birr nachgewiesen (Abbildung 3). Anhand der Muster konnte auf Koronaentladungen geschlossen

werden. Es ist zu beachten, dass die Synchronisation der Teilentladungsmuster im UW Birr mithilfe des Schirmstromes gemacht wurde. Daher gibt es eine Phasenverschiebung des typischen Musters um rund 90°. Mithilfe einer Akustikkamera konnte die Ursache schnell ermittelt werden (Abbildung 4). Die bereits montierten Erdungsbügel an den Endverschlüssen waren nicht vollständig im Feldschatten der Abschirmungselektroden. Bei der Teilentladungsbewertungsspannung ($1.5 U_0$) waren diese Entladungen nicht mehr messbar.

Beim Netzanschluss Ansaldo hat man die Prüfspannung mit einem Rohr über die Umzäunung geführt. Ein Teil des Zauns war lackiert und hatte eine Isolationsschicht zwischen den einzelnen Maschen. In der Folge traten schon bei kleinen Spannungen Teilentladungssignale auf, welche auf externe



Abbildung 1: Endverschlüsse im UW Birr

Kontaktprobleme schliessen liessen (Abbildung 5). Mithilfe eines leitfähigen Tuches konnte der Zaun abgeschirmt werden (Tuch im Hintergrund in Abbildung 2). Dadurch konnte sich der Zaun nicht mehr aufladen und die Teilentladungen verschwanden.

Die Spannungsprüfung wurde ohne Durch- oder Überschlag bestanden. Die Anlage war bei 190 kV frei von Teilentladungen und konnte in Betrieb gehen.



Abbildung 2: Prüfanlage mit Teiler und Drosseln (von links nach rechts) mit abgeschirmtem Zaun im Hintergrund

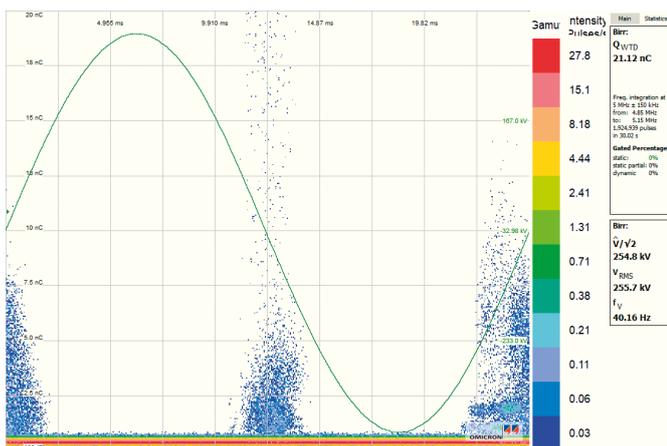


Abbildung 3: Koronaentladungen am Endverschluss bei Prüfspannung mit dem Teilentladungsmesssystem gemessen (das Teilentladungsmuster ist 90° phasenverschoben, da der Schirmstrom für die Teilentladungssynchronisation benutzt wurde)

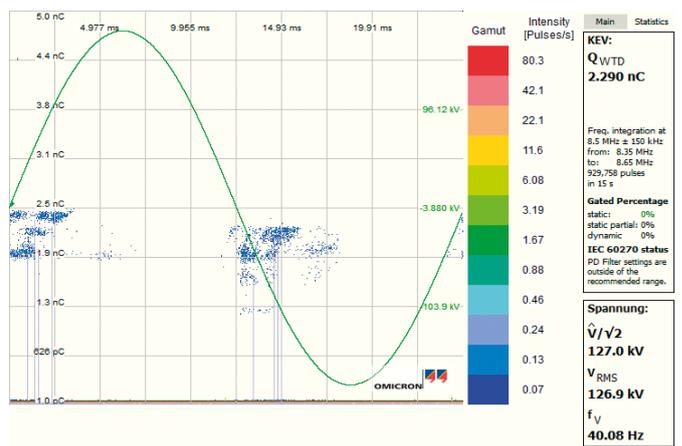


Abbildung 5: Teilentladungen, welche auf Kontaktprobleme schliessen lassen

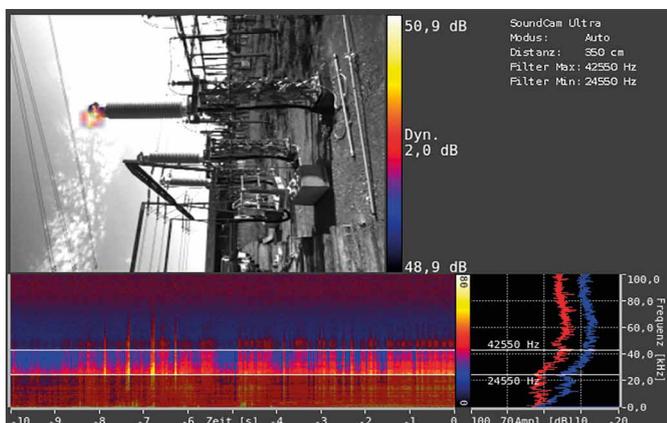


Abbildung 4: Koronaentladungen am Endverschluss bei Prüfspannung mit Akustik-kamera nachgewiesen

AUTORIN

Martina Müller
MSc ETH ETIT
Projektingeurin

AUTOR

Dominic Kleger
BSc El.-Ing. FH
Projektingeur

FKH-Labor für Isolierölanalysen

Personelles

Als Nachfolger von Thomas Heizmann hat sein bisheriger Stellvertreter, Peter Frey, die Leitung des Isolieröllabors übernommen. Seine Stellvertreterin wird Martina Müller sein. Die Probenahmen, die bisher fast ausschliesslich Peter Frey durchgeführt hatte, übernimmt seither hauptsächlich Adamo Mele. Auch andere Mitarbeiter der FKH sollen in die Probenahmetechnik eingeführt werden, um notfalls einspringen zu können.

Analyseaufträge

Seit dem Jahr 2020 ist die jährliche Anzahl Proben relativ konstant bei 1800 geblieben und lag 2024 bei 1806 Proben. Die im Jahr 2023 festgestellte Zunahme von Zersetzungsgas- und Furananalysen konnte 2024 bestätigt werden. Auffallend ist die markant angestiegene Anzahl Probenahmen, welche durch FKH-Mitarbeiter durchgeführt wurden. Der Umsatz konnte noch leicht gesteigert werden und liegt damit an der Spitze der bisher erreichten Umsätze.

Notfalldienst

Im Jahr 2024 wurden keine Notfalleinsätze nach Buchholzalarmen durchgeführt. Die drei Proben, die uns von Betreibern nach Buchholzauslösungen ins Labor gebracht wurden, konnten im normalen Laborbetrieb analysiert werden. In einem Fall konnten anhand der Gassignatur stromstarke Entladungen als Ursache ermittelt werden. Dieser Trafo musste repariert werden. In den anderen Fällen konnten keine auffälligen Gaskonzentrationen gefunden werden.

Probenahmen an Ölkabeln

Das Öllabor der FKH hat schon seit den Anfängen im Jahr 2003 immer wieder auch Ölproben aus Ölkabeln analysiert. Die Problematik der Aussagekraft einer Ölprobe bei Ölkabeln liegt in der sehr geringen Zirkulation des Öls im Kabel und in den Endverschlüssen zum Expansionsgefäss und zurück. Somit kann nicht automatisch angenommen werden, dass

die entnommene Probe repräsentativ für das Öl im Kopf des Endverschlusses oder für das Öl im Kabel in einer gewissen Entfernung vom Entnahmeort ist. Sollte sich die Ölqualität oder die Zusammensetzung der Zersetzungsgase aufgrund eines Ereignisses stark verändert haben, wird dies vorerst ein sehr lokaler Effekt sein. Erst nach trägen Transport- und Diffusionsvorgängen wird das veränderte Öl in der Ölprobe feststellbar sein.



Abbildung 1: Probenahme an einem Ölkabel in einem Unterwerk

Qualitätssicherung

Zur Erhaltung der 2012 erworbenen Akkreditierung gemäss ISO/IEC 17025 als «Prüfstelle für Isolieröl und Buchholz-Gas» durch die Schweizerische Akkreditierungsstelle (SAS) wird jedes Jahr an einem internationalen Ringversuch teilgenommen. Von den 20 geprüften Parametern lagen im Jahr 2024 bei der FKH alle im «guten» bzw. «befriedigenden» Bereich.



AUTOR

Peter Frey

Leiter Isolieröllabor

Forschung zum Teilentladungsverhalten von SF₆-freien Isoliergasen



Abbildung 1: Experten der internationalen Arbeitsgruppe CIGRE D1.78 führen während ihrem Treffen in Niedergösgen gemeinsam Messungen durch und diskutieren die Resultate.

Einführung

Die Verwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) unter hohem Druck hat es ermöglicht, Hochspannungsschaltanlagen sehr kompakt zu bauen, denn SF₆ ist ein ausgezeichnetes Isolier- und Löschmedium für den Lichtbogen. Als Konsequenz des hohen GWP von SF₆ von 25'200 ist dessen Verwendung international stark reguliert, und spätestens nach dem Inkrafttreten der EU-F-Gas-Verordnung ist klar, dass Neuanlagen in Zukunft ohne SF₆ auskommen müssen. Alternativen existieren: Hersteller bieten ein wachsendes Portfolio an GIS-, AIS- und GIL-Anlagen an, welche ohne SF₆ auskommen und auf alternative Isoliergase setzen – darunter einerseits Luftmischungen in Kombination mit einem Vakuumschalter und andererseits Mischungen bestehend aus einem geringen Anteil Fluornitril (C₄-FN) und einem Hintergrundgas aus CO₂, O₂ in Kombination mit einem Gasschalter. Anlagen mit einer C₄-FN/CO₂/O₂-Mischung unterscheiden sich in Bauform, Grösse und Funktionsprinzip nicht wesentlich von den heutigen SF₆-Anlagen und erreichen ein GWP <1000. Anlagen mit Luftmischungen und Vakuumschalter werden aufgrund der schlechteren Isolationsfestigkeit von Luft typischerweise mindestens eine Nennspannungsreihengrösse grösser, dafür erreichen sie ein GWP <1. Beide Technologien sowie weitere Mischungen sind heute auf dem Markt erhältlich und erprobt.

Defekte wie Spitzen, Partikel oder Lunker in Isolationsstoffen können, wenn sie nach Inbetriebnahme in der Schaltanlage verbleiben, die Spannungsfestigkeit um bis zu 50% reduzieren. Ein zuverlässiges Detektieren solcher Defekte mittels Teilentladungsmessung trägt somit wesentlich zur Betriebssicherheit der Anlagen bei.

Die FKH konnte bereits für beide dominierenden Alternativgas-GIS-Technologien Abnahmeprüfungen an Anlagen von Schweizer Netzbetreibern vor deren Inbetriebnahme durchführen. Das Messen von Teilentladungsaktivitäten ist sowohl in SF₆ als auch bei alternativen Isoliergasen technisch anspruchsvoll, da ein sehr kleines Entladungssignal in einem stark störungsbehafteten Umfeld zuverlässig detektiert werden muss. Bei Routineprüfungen im Werk kommt hierzu die konventionelle Teilentladungsmessung zum Einsatz. Vor Ort hat sich die UHF-Teilentladungsmessung aufgrund ihrer höheren Messempfindlichkeit und Störungsresilienz durchgesetzt.

Forschungsaktivitäten der FKH im Rahmen der CIGRE D1.78

Im Rahmen der Arbeitsgruppe CIGRE D1.78 untersucht eine Gruppe von ca. 25 internationalen Experten auf dem Gebiet der Teilentladung typische Fehlerbilder mit Teilentladungsaktivität, welche von Fehlstellen in alternativen Isoliergasmischungen erzeugt werden. Die Gruppe plant, umfangreiche Round-Robin-Tests in bis zu zehn Laboren weltweit durchzuführen und die Resultate sowie den aktuellen Stand des Wissens in einer Broschüre zusammenzutragen. Die FKH ist an der Gruppe stark beteiligt. Michael Walter leitet die Arbeitsgruppe in seiner Funktion als Convenor, Glenn Behrmann agiert zusammen mit Karsten Juhre (Siemens Energy) als Secretary. Stefan Neuhold ist als Technical Expert Mitglied und hat das Grundkonzept des Versuchsaufbaus entworfen.

Für erste Vorversuche hat die FKH eine IAESTE-Praktikumsarbeit von sechs Monaten ausgeschrieben, besetzt und dimensioniert.

Paul Demel, ein Student der Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt, hat den Versuchsaufbau im Rahmen seines Praktikums und seiner anschließenden Bachelorarbeit im Kleinlabor in Niedergösgen gebaut und erste Messreihen mit alternativen Isoliergasen durchgeführt.

Versuchsaufbau im Kleinlabor am Standort Niedergösgen

Der Versuchsaufbau besteht aus einer AC-Quelle, welche über einen strombegrenzenden Widerstand einen Prüfling speist. Der Prüfling in Abbildung 2 erlaubt es, verschiedene Defekte wie Spitze-Platte, ein frei bewegliches Partikel und ein auf einem Isolator haftendes Partikel reproduzierbar einzubauen. Der Prüfling kann mit verschiedenen Gasen bis zu einem Druck von 15 bar relativ gefüllt werden.

Das Teilentladungssignal kann gleichzeitig auf drei verschiedene Arten ausgekoppelt werden:

- Zwei peripher angeordnete UHF-Sensoren mit Signalverstärker, Spektrumanalyser und TE-Anzeigesystem empfangen die elektromagnetische Welle, welche von der Entladung ausgesandt wird.
- Ein Koppelkondensator in Kombination mit einem konventionellen Teilentladungsmesssystem misst die scheinbare Ladung, welche im Kreis, bestehend aus Prüfling und Koppelkondensator, umgesetzt wird.
- Die Spitze auf Erdpotenzial ist isoliert herausgeführt und erlaubt eine direkte hochfrequente Messung des Entladungsstroms.
- Zusätzliche optische oder akustische Auswertesysteme können nachgerüstet werden und auch ein direktes Beobachten der Bewegung des Partikels mittels Videoaufnahme ist möglich.

Der grosse Vorteil des Versuchsaufbaus besteht in der gleichzeitigen Messung desselben Defekts mit verschiedenen Messmethoden unter reproduzierbaren Bedingungen in verschiedenen Gasen bei unterschiedlichen Drücken. Dies erlaubt nicht nur einen direkten Vergleich der Isoliergase relativ zu SF₆, sondern es erlaubt auch einen direkten Vergleich der Messmethoden. Zusätzlich ermöglicht der Versuchsaufbau das Bestimmen der Durchschlagsspannung in derselben Referenzanordnung. Indem mehrere Gruppen mit vergleichbaren Versuchsaufbauten in verschiedenen Laboren prüfen, kann eine grössere Zahl an Gasen und Anordnungen unter-



Abbildung 2: Versuchsaufbau zur systematischen Untersuchung des Teilentladungsverhaltens verschiedener Fehlstellen

sucht werden und die Resultate können gegenseitig validiert und verglichen werden.

Ziel der Forschungsaktivitäten

Ziel der Forschungsarbeit ist das Beantworten folgender Fragestellungen:

- Ist das physikalische Verhalten der Teilentladungspulse bei den entsprechenden Drücken und Fehleranordnungen – insbesondere die Amplitude und die Pulssteilheit, die umgesetzte Ladung, die statistische Häufigkeit der Pulse – vergleichbar mit dem Verhalten in SF₆?
- Erzeugen die Fehler wie in SF₆ bei ausreichend tiefer Spannung bereits ein zuverlässig detektierbares Teilentladungssignal, sodass eine Teilentladungsmessung bei der durch die Norm vorgeschriebenen Spannungsamplitude sicherstellt, dass ein Betriebsmittel auch bei betriebsbedingten AC-Überspannungen oder bei transienten Vorgängen und Blitzüberspannungen nicht durchschlägt?



Abbildung 3: Versuchsaufbau Spitze-Platte-Anordnung mit isoliert herausgeführter Spitze auf Erdpotenzial



Abbildung 4: Versuchsaufbau frei bewegliches hüpfendes Partikel

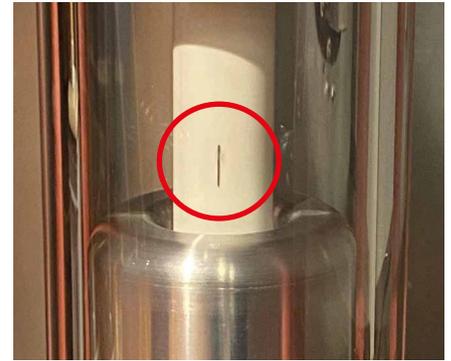


Abbildung 5: Versuchsaufbau haftendes Partikel auf Isolator

- Ist das Frequenzspektrum der durch die Teilentladungsaktivität ausgesandten elektromagnetischen Welle vergleichbar zu SF₆ oder muss der Frequenzbereich der UHF-Messung und allenfalls auch das Design der UHF-Sensoren angepasst werden, um auch bei alternativen Isoliergasen einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand sicherzustellen?

Allgemein ausgedrückt möchten wir mit der Forschungsarbeit verstehen, ob Fehler in Alternativgasen gleich kritisch und gleich gut detektierbar sind wie in SF₆.

Aktueller Stand und erste Erkenntnisse

Erste Durchschlagsexperimente und Teilentladungsmessungen in Luft wurden mit konventioneller TE-Messung, mit UHF-TE-Messung und mittels direkter Entladungsstrommessung an der Spitze erfolgreich durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass der Versuchsaufbau ein reproduzierbares Fehlverhalten bei verschiedenen Defekten und Gasen mit Drücken bis 11 bar abs. erzeugen kann und dass sich der Versuchsaufbau somit für einen Round-Robin-Test eignet.

Die ersten Messreihen wurden im Rahmen der Praktikumsarbeit aufgenommen. Die Resultate werden innerhalb der Arbeitsgruppe D1.78 geteilt und diskutiert.



AUTOR

Dr. Michael Walter

Dr. sc. ETH
Geschäftsleiter



AUTOR

Ivan Barcan

MSc TUM ETIT
Projektingenieur



AUTOR

Stefan Neuhold

Dr. sc. techn. ETH
Projektingenieur



AUTOR

Glenn Behrmann

B.S.E.E. Union College
Fachingenieur

Möglichkeiten der Hochspannungsprüfung in der neuen FKH-Prüfhalle in Niedergösgen

Die Dimensionen der neuen Prüfhalle der FKH in Niedergösgen ermöglichen die Prüfung mit der Bemessungs-Stehblitzstossspannung von 1050 kV Scheitelwert und der Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung von 460 kVeff / 1 min von Komponenten der 245-kV-Baureihe (IEC 60071-1).

Unser modular aufgebauter und vor Ort einsetzbarer 1.8-MV-Haefely-Stossgenerator (mit 180 kJ) kann mit dem Hallenkran mit bis zu 12 Stufen aufgebaut und für Bemessungs-Stehblitzstossspannungen bis 1050 kV eingesetzt werden (siehe Abbildung 1).

In Anlehnung an unsere Vor-Ort-Praxis wird in unserer Prüfhalle Wechselspannung hauptsächlich mit Serieresonanzanlagen erzeugt (siehe Prinzipschema in der Abbildung 2).

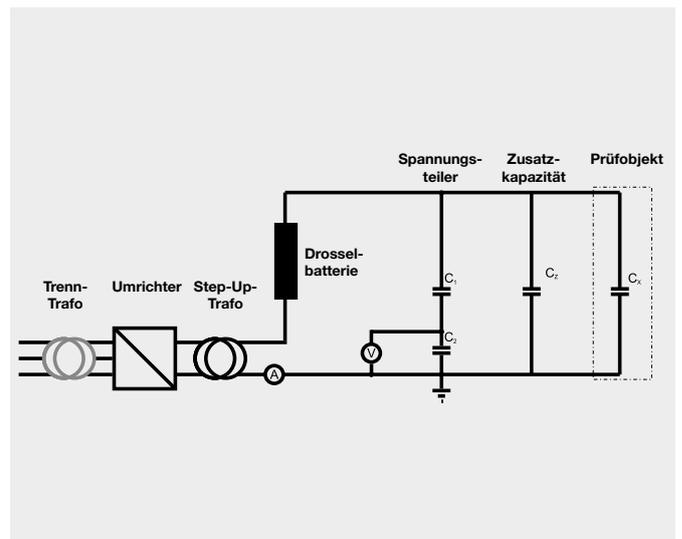


Abbildung 1: das Prinzipschema der Serieresonanzanlage



Abbildung 2: 12-stufig aufgebauter Stossgenerator mit Ladeeinheit und zwei Spannungsteilern

Die Resonanzfrequenz ist definiert nach der Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{tot} \cdot C_{tot}}}$$

f_0 : Resonanzfrequenz

L_{tot} : gesamte Kreisinduktivität

C_{tot} : gesamte Kreiskapazität

Die Prüfanlage wird nach der Amplitude der Prüfspannung und der Kapazitätsgrösse des Prüflings individuell mit dem Hallenkran zusammengesetzt (siehe Beispiele der Prüfanordnungen in der Abbildung 3).

Die Prüfspannung ist aufgrund des Funktionsprinzips der Resonanzanlage oberwellenfrei.

Die Prüffrequenz (Resonanzfrequenz) wird durch den Einsatz einer ausreichenden Anzahl von Zusatzkondensatoren im Frequenzbereich zwischen 45 Hz und 65 Hz gemäss IEC 60060-1 eingestellt.

Die Erregung des Resonanzkreises wird mit einem von der FKH entwickelten Frequenzumrichter durchgeführt. Die Suche der Resonanzfrequenz, der Anstieg, die Regelung und der Abstieg der Prüfspannung werden automatisch durchgeführt (siehe Abbildungen 2 und 4).

Alle Komponenten der Seriersonanzanlage sind HF-störungs-frei. In unserer komplett abgeschirmten Prüfhalle kann somit ein Grundstörpegel von < 1 pC bei Prüfspannung erreicht werden.



Abbildung 3: verschiedene Prüfanordnungen, bestehend aus 1 bis 3 HS-Drosseln in Serie, Spannungsteiler angepasst an Prüfspannung (blauer Turm) und Zusatzkondensatoren (weisse Türme), um die Resonanzfrequenz zu senken



Abbildung 4: von links: Step-Up-Transformator, Trenntransformator und Frequenzrichter (links). Automatische Einstellung der Prüfspannung mit einem Rechner (rechts)

Die FKH besitzt auch klassische Prüftransformatoren (siehe Abbildung 5). Der 1-MV-Prüftransformator der Firma Moser-Glaser AG wird neben Stehwechselfspannungsprüfungen (trocken und nass) an Freiluftkomponenten, hauptsächlich für Step-Tests an Mittelspannungskabeln auf dem Vorplatz der

Prüfhalle oder auch in der Prüfhalle, durch Einführung der Spannung durch das Haupttor, eingesetzt. Der gasisolierte 400-kV-Prüftransformator der Firma Trench GmbH ist auf einem Anhänger installiert und kann nach Bedarf auch in der Prüfhalle eingesetzt werden.



Abbildung 5: 1-MV-Moser-Glaser-Prüftransformator mit Spannungsteiler (links). Gasisolierter 400-kV-Trench-Prüftransformator (rechts)



AUTOR

Vahe Der Houhnessian

Dr. sc. techn. ETH

Projektingenieur

Inbetriebnahme eines Langzeitversuches auf dem Gelände in Niedergösgen

Im Juli 2024 war es so weit: Die Vorbereitungen für einen Langzeitversuch auf dem Gelände der FKH in Niedergösgen waren abgeschlossen. Der Prüfling, eine 145-kV-Schaltanlage von Hitachi, war auf dem zuvor verfestigten Untergrund fertig aufgebaut worden und der Container mit Messgeräten und elektronischen Quellen fertig eingerichtet. Vor der Inbetriebnahme wurde die Anlage einer Teilentladungsmessung und Stossprüfung unterzogen, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Prüfling (hinten links), Teiler (vorne links), Stossgenerator (Mitte), Ladeeinheit (vorne rechts), Container (hinten rechts)

Für den einjährigen Langzeitversuch werden eine Spannung von grösser 100 kV und ein Strom von einigen Kiloampere benötigt. Je ein Strom- und Spannungswandler mit erhöhter Leistung wurde dazu in der gasisolierten Schaltanlage verbaut und unterspannungsseitig gespeist. Als Herzstück der Quellen konnten die gleichen 150-A-Umrichter verwendet werden, die bereits in den mobilen Prüfquellen der FKH zum Einsatz kommen (siehe Beitrag «Neue Generation von Frequenzumrichtern bei der FKH»).

Um die Auswirkungen auf den Laborbetrieb in Niedergösgen möglichst gering zu halten, wurde zusätzlich zu den Filtern vor den Umrichtern ein netzseitiger Trenntransformator eingesetzt, siehe Abbildung 2. Die Stromquelle wird nur während der Nacht betrieben, dies, um einen Lastzyklus zu simulieren und die feldgebundenen Störungen tagsüber weiter zu reduzieren.

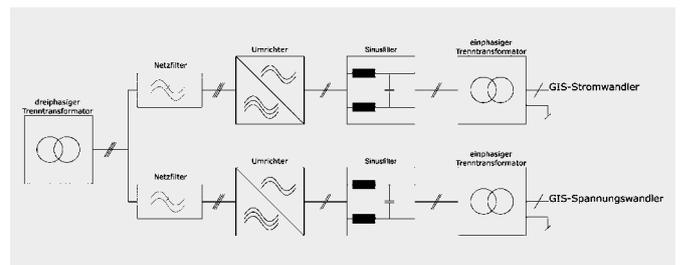


Abbildung 2: Blockschaltbild der Quellen zur Speisung von Strom- und Spannungswandlern

Im Betrieb benötigt die Anlage mehr als 10 kW Wirkleistung. Der Oberschwingungsanteil auf der Hochspannungsseite ($\text{THDi} < 0.4\%$) wird durch den Einsatz eines geeigneten Sinusfilters und Trenntransformators gering gehalten. GIS-Strom- und -Spannungswandler selbst tragen ebenfalls zur Reduktion der Oberschwingungen bei.



Abbildung 3: Umrichterschränke mit Steuerung



AUTOR

Philippe Alff
MSc ETH ETIT
Projektingenieur

Einweihungsfeier Prüfhalle Däniken – ein Blick hinter die Kulissen

... und alles stand in den Sternen, als das Kupfer für die Erdung von der Baustelle gestohlen wurde. Aber es gab ein Happy End!

Im Zuge der 234. FKH-Vorstandssitzung wurde entschieden, den alten Coronaschopf durch den vorgeschlagenen Neubau zu ersetzen. Das Eingabeprojekt wurde daraufhin ausgearbeitet und zeitnah für eine Baubewilligung eingereicht. Im Herbst 2023 wurde der Altbau abgerissen und im Frühjahr 2024 der Spatenstich für den Neubau gesetzt.

Mit dem Spatenstich lief der Countdown für die Planung einer Einweihungsfeier, denn dass es eine geben würde, war selbstverständlich. Es sollte ein Event werden, das der neuen Halle würdig ist.

Aber was genau versteht man unter einem Event? Im Duden wird der Begriff mit einem «besonderen» Ereignis erklärt. Wie «besonders» definiert ist, bleibt allerdings offen. Unter den Synonymen sind u.a. Anlass, Ereignis, Erlebnis, Fest, Geselligkeit aufgeführt. Somit ist ein Event also etwas Aussergewöhnliches, etwas, das nicht zum Alltäglichen gehört und dadurch zu einem besonderen Ereignis wird. Also genau das, was wir uns für unser Einweihungsfest wünschten.

Um ein solches Event zu planen, muss man sich über die Intention eines Events klar sein und dementsprechend die Planung ausrichten. In der Theorie werden Events planmässig und zielorientiert durchgeführt, um den Teilnehmenden ein einzigartiges Erlebnis zu bieten, das alle Sinne eines Besuchers anspricht und auch so wahrgenommen wird. Es soll an dem Event ein Gefühl einer exklusiven Gemeinschaft und Zusammengehörigkeit vermittelt werden, sodass sich jeder als Teil einer grossen Einheit empfindet. Wichtig ist zudem, dass bei den Teilnehmenden eine hohe thematische Identität erzeugt wird, das Event also monothematisch aufgebaut wird. So viel zur Theorie, die wir in die Praxis umsetzen wollten. Ganz zu Beginn musste der Termin für die Einweihung festgelegt wer-

den. Der Bau hatte noch nicht einmal recht angefangen und ob das Zeitmanagement des Baus eingehalten werden konnte, wusste man nicht. Das Bauende war auf Ende August 2024 datiert, mit ein wenig Karenzzeit haben wir uns dann auf den 4. Oktober 2024 als Tag für die Einweihung festgelegt. Nun musste aber noch die Gästeliste definiert werden. Fragen wie «Wie gross soll die Veranstaltung werden?», «Wer soll eingeladen werden?» und «Wie kann man kontrollieren, dass die Veranstaltung nicht überrannt wird und wir nachher mehr Gäste haben als geplant?», mussten geklärt werden. Um sicherzustellen, dass das Datum des Anlasses frühzeitig bekannt ist und interessierte Gäste sich das Datum vormerken, wurde ein «Save the date» versandt.

Während der Bau voranschritt, wurde im Hintergrund ein Grundkonzept erstellt, das alle Einzelheiten, wie z.B. den Zeitraum des Festes, das Rahmenprogramm, die Aufgabenverteilung intern und extern, das Verpflegungskonzept, das Müll-, Toiletten- und Parkplatzkonzept, beinhaltete und dementsprechend organisiert wurde.

Dann kam der Morgen, an dem wir entdeckt hatten, dass uns das Kupfer für die Erdung der Hochspannungshalle von der Baustelle gestohlen worden war, und das Zittern begann. Die Lieferfrist des neuen Kupfers war auf sechs Wochen angesetzt. Da es mit dem Bau vor der Verlegung der Erdung nicht gross weitergehen konnte, verzögerte sich also der ganze Bau um mindestens genau diese Zeit und das Datum unseres Einweihungsfestes wurde infrage gestellt. Wir entschieden uns für das Risiko und hielten an dem Termin fest. Die Einladungen wurden im August konzipiert und verschickt.

Natürlich wollte die FKH sich an dem Tag insgesamt präsentieren und allen Gästen unsere Dienstleistungen und Prüfmöglichkeiten näherbringen. Dazu eignet sich am besten eine Aarealführung. Gesagt, getan. Auch hierzu wurde ein detailliertes Konzept entworfen und umgesetzt.

Einsatzplan für das Einweihungsfest der neuen Prüfhalle, 04.10.2024

Eckdaten:

Festzeit: 15.00 - 20.00 Uhr
Arealführungen 15.00 - 17.00 Uhr
Networking, Essen und Musik 17.00 - 20.00 Uhr
Rede: 17.00 Uhr
Musikdarbietung: 17.30 - 18.15 und 19.15 - 20.00

Teilnehmerzahl: 119 Personen

FKH: 20 Personen
 TK42: 11 Personen
 Mangold: 5 Personen
 6 Personen ohne Führung
 82 Personen mit Führung

Ablauf der Arealführungen:

Alle Besucher haben sich vorgängig für die Arealführung angemeldet und wissen, dass diese zwischen 15.00 - 17.00 Uhr stattfindet. Jeweils 15 Teilnehmer werden eine Gruppe bilden. Es gibt einen Registrierungsdesks an jeder Teilnehmer eine Nummer zugewiesen bekommen, die die Gruppe zuweist. Die Länge und die Anzahl Führungen müssen je nach Anmeldungen geplant werden. Hier eine Grobplanung, die bei Bedarf modifiziert werden muss:

Posten	Zeit in min	Zeit2 in min	Mitarbeiter auf dem Posten
1. Öllabor	10	8	Fy
2. Erdung	10	8	Fr oder Al
3. Trafo	10	8	Mn
4. Werkstatt und Logistikhalle	10	8	Go und Mu
5. HS-Labor	20	16	DH und MI
Total	60	50	

Mitarbeiter, die die Gruppen von Posten zu Posten führen: Wa, Kl, Al, An, La, Ne, De, Me

Zeitablauf für 60 min-Führung:	Gruppennummer	Ende Führung	Personenanzahl
14.30 Uhr	TK	15.30 Uhr	11, Postenbegleiter Wa
15.00 Uhr	1	16.00 Uhr	15, Postenbegleiter An
15.10 Uhr	2	16.10 Uhr	15, Postenbegleiter Al (wenn Posten : Me)
15.20 Uhr	3	16.20 Uhr	15, Postenbegleiter Kl
15.30 Uhr	4	16.30 Uhr	15, Postenbegleiter La
15.40 Uhr	5	16.40 Uhr	15, Postenbegleiter Ne
15.50 Uhr (Reservetour)	6	16.50 Uhr	15, Postenbegleiter De
Total Pax 101			

Am Tag des Festes

Aufgabe	Mitarbeiter	Zeitfenster	Bemerkung
Anweisung Putzkraft	Mr	14.30 Uhr	Einsatzzeit: 14.30 - 21.00 Uhr
Anreise Foodtrucks	Mr	14.00 Uhr	
Aufbau Band	Fy	bis 14.00 Uhr	Mikro & co auch für Rede aufbauen
Aufstellung Erdungsmessanhänger falls verfügbar	Fr	bis 13.00 Uhr	
Einrichtung Erdungsposten, falls Anhänger nicht da	Al	bis 13.00 Uhr	
Aufstellung Trafo-Koffer	Mn	bis 13.00 Uhr	
Probendurchlauf Arealführung	alle	13.00 Uhr	
Parkplatzanweiser	Ax, Fb, Pe alle verfügbaren Personen, die nicht gerade mit der Führung zu tun haben	14.15 - 16.00 Uhr	Vorher das Areal anschauen, wie man die Autos am Besten platzieren möchte. Bitte ein Mitarbeiter vome bei unseren "normalen" Parkplätzen postieren, dass die, die dort parken wollen, zum Parkplatzareal geleitet werden.
Networking		15.00 - 20.00 Uhr	Bitte alle die ganze Zeit die Augen offen haben und offensichtliches Müll wegräumen, wenn man nicht gerade im Gespräch und auf dem Weg ist. Die Mitarbeiterin von Honegger wird für die Toiletten und den Müll eingesetzt aber alle sind angehalten, mit zu schauen. Mr, De und Mu sind mit der Aufgabe betraut, zu kontrollieren und zu unterstützen.
Müllhandlung	Mr, De, Mu, Putzkraft, alle Mitarbeiter	15.00 - 20.00 Uhr	
Allgemeine schnelle Aufräumarbeiten	alle	20.00 - 21.00 Uhr	Müll einsammeln, Tische und Bänke zusammenklappen, Musikbandabbau, Schilder einsammeln etc.
Abreise Foodtruck		bis 21.00 Uhr	

Vorbereitung

Aufgabe	Mitarbeiter	Zeitfenster	Bemerkung
Beschliden erstellen, laminieren	Mr	Anfang September	
Schilder mit Eleafantfüssen versehen, fertigstellen	Mu	bis 03.10.	
Nummernkarten für Registrierung Arealführung erstellen	Mr	15.9. - 03.10.	
Bilder, Plakate für die Ausstellung (Bauschritte) erstellen	Mr, DH	bis 03.10.	
Vorbereitung Posten 1, Öl: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	Fy	bis 03.10.	
Vorbereitung Posten 2 Erdung: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	Fr	bis 03.10.	evtl. nicht möglich anzureisen, in dem Fall wird der Posten mit Plan B von Al ersetzt.
Vorbereitung Posten 2 Erdung: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	Al	bis 03.10.	Plan B, sollte der Messwagen nicht nach Ds kommen können.
Vorbereitung Posten 3 Trafo: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	Mn	bis 03.10.	evtl. nicht möglich anzureisen, in dem Fall fällt der Posten aus
Vorbereitung Posten 4 Werkstatt und Logistikhalle: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	Go, Mu	bis 03.10.	hier interessantes Messeequipment zeigen, evtl. die selbstgemachten Kabelrollen
Vorbereitung Posten 5 Neue Prüfhalle: Was wird wie gezeigt, Vortrag erarbeiten	DH, MI	bis 03.10.	Dieser Posten soll 4 Unterposten haben: Aufbau Resonanzanlage mit TAU und 2-3-er Drosseltrum, Stossgenerator mit Teller, Ausstellung Bilder der Bauabschnitte und Regenanlage und PIZ. Zwei Mitarbeiter nehmen hier die Gruppen in Empfang und machen einen Tourmus (gesaffelt) durch die Unterposten
Areal aufräumen und Mähen	Mu, Fb, Go, Dm	1.-3.10.	
Resonanzanlage mit 3er Drosseltrum aufbauen	Mu, Fb, Go, Dm	1.-2.10.	
Stossgenerator aufbauen	Mu, Fb, Go, Dm	1.-2.10.	
Werkstatt und Logistikhalle aufräumen, Isolierlabor aufräumen	Mu, Fb, Go, Dm	1.-3.10.	In der Logistikhalle evtl. eine Ecke mit historischen Geräten einrichten, u.a. mit dem alten Stossgenerator
Bilder, Plakate für die Ausstellung (Bauschritte) aufhängen	Mr, DH	3.10.	
Schilder auf dem Areal verteilen	Mu, Fb, Go, Dm, Wa, Mr, DH	3.10.	
Müllimer aufstellen	Mu, Fb, Go, Dm, Wa, Mr, DH	3.10.	
Parkplatz anschauen, damit der Einsatz für den Tag klar ist	Go, Fb	bis 3.10.	
Tische und Bänke abholen	Go	bis 3.10.	vor Abholung Herrn Meier anrufen!
Lieferung Toilettenwagen	Mu, Fb, Go, Dm	3.10.	
Kontrollgang	Wa, DH, Mr	3.10., abends	

Aufräumarbeiten

Aufgabe	Mitarbeiter	Zeitfenster	Bemerkung
Bänke und Tische zum Versand vorbereiten, zurückbringen	De, Dm	Vormittag	
Abholung Toilettenhäuschen	De, Dm	tba	
Müllimer zum Versand vorbereiten	De, Dm	Vormittag	
Abholung Müllimer	De, Dm	tagsüber	
Rückbau des Versuchsaufbaus	tba	wenn Zeit ist	
Erstellung und Versand einer Broschüre über die Prüfmöglichkeiten in der neuen HS-Halle	Mr, DH	November	

Abbildung 1: Auszug aus dem Einsatzplan

An alle Mitarbeitenden erging die Weisung, dass an dem Tag möglichst keine Vor-Ort-Prüfungen stattfinden und alle verfügbaren Mitarbeitenden am Tag der Einweihung eine Rolle zugeordnet bekommen. Es wurde ein ausführlicher Einsatz- und Arbeitsplan erstellt und verteilt. Auch hier gab es die Unsicherheit, ob wirklich alle Mitarbeitenden rechtzeitig von ihren Vor-Ort-Einsätzen zurückkommen und ihre Posten bei der Arealführung beziehen konnten. Wir mussten also einen Plan B in petto haben.

Dann rückte unser Einweihungsfest näher, der Fortschritt der Baustelle ging voran und es sah aus, als würden wir so gerade eben mit dem Bau zum Fest fertig werden. Am Tag vor dem Event hiess es putzen, denn die Versuchsstation sollte strahlen, und aufbauen, allerdings musste z.B. noch ein Grossteil des Aufbaus in der Hochspannungsprüfhalle auf den Tag des Events verschoben werden, da gleichzeitig noch diverse Vor-Ort-Prüfungen für die darauffolgende Woche gerüstet werden mussten und schlicht keine Zeit und keine Ressourcen für den Aufbau verfügbar waren. Auch die Beschilderung des Parkplat-

zes, den wir organisiert hatten, musste am Tag des Events noch umgesetzt werden, da die Schilder ja auf öffentlichem Grund aufgestellt wurden.

Rückblickend war es eine intensive Vorbereitungszeit, aber es hat sich gelohnt: Wir konnten über 100 Gäste willkommen heissen und erhielten viele sehr positive Rückmeldungen. Wir freuen uns, dass es uns gelungen ist, die Theorie in die Praxis umzusetzen und allen Gästen einen kurzweiligen, interessanten und unterhaltsamen Aufenthalt in unserer FKH-Versuchsstation zu bieten.



Impressionen der Einweihungsfeier





FKH-Fachtagung 2024

«Erzeugung und Messung hoher Spannungen und Ströme»

Bildet ein gemessenes Hochspannungssignal einen real auftretenden Vorgang mit der richtigen Amplitude ab oder wurde das Signal durch die Umwandlung bzw. durch externe Störungen in seiner Form verfälscht? Vor welche prüftechnischen Herausforderungen stellen uns die zukünftigen Entwicklungen in Hochspannungsnetzen, mit immer länger werdenden Kabeln, hochfrequenten Einspeisequellen, höheren und dynamischeren Belastungen und dem Aufbau von HVDC-Netzen?

Durch Messungen und Prüfungen ist man in der Lage, die Betriebssicherheit von Hochspannungsbetriebsmitteln nachzuweisen und das theoretische Verständnis der Vorgänge im Gesamtnetz sowie an den einzelnen Betriebsmitteln mit der Praxis abzugleichen.

Die Herausforderung in der Hochspannungsmesstechnik liegt darin, dass Ströme und Spannungen nicht direkt gemessen werden können. Man bedient sich stattdessen verschiedener Wandler und Teiler, um ein proportional herunterskaliertes und dadurch messbares Signal zu erzeugen.

Die Herausforderung in der Hochspannungsprüftechnik liegt in der Erzeugung ausreichend hoher Prüfspannungen und -ströme

sowie in der limitiert zur Verfügung stehenden Einspeiseleistung. Dabei ist das zu prüfende Hochspannungsbetriebsmittel selbst in der Lage, Leistungen im Giga- bis Terrawattbereich zu tragen. In der Praxis werden die realen Belastungen deshalb durch eine Summe repräsentativer Teilprüfungen mit deutlich geringeren Einspeiseleistungen angenähert und trotzdem müssen dabei die ausreichenden Reserven für den Betrieb zuverlässig aufgezeigt werden.

Die Tagung richtete sich an Personen aus der Energiebranche, die ihr Wissen über Prüf- und Messtechnik auffrischen und sich über messtechnische Herausforderungen in der Praxis austauschen wollten.

Der Tag startete mit einer Einführung in die Grundlagen der Hochspannungsprüf- und Messtechnik. Es wurden verschiedene Wandler- und Teilerprinzipien unter der Berücksichtigung von Messunsicherheiten sowie Frequenzspektren diskutiert. Des Weiteren gab es einen Überblick über die aktuellen und zukünftigen Konzepte der Hochspannungsprüfquellen. In einem zweiten Teil widmete man sich konkreten mess- und prüftechnischen Herausforderungen und es wurde aufgezeigt, wie diese in der Praxis bewältigt werden können.

	Beitrag	Referent
08.30 – 09.00	Willkommenskaffee	
09.00 – 09.05	Begrüssung durch den Präsidenten der FKH	Christian Lindner, Axpo Grid AG
09.05 – 09.10	Informationen zum Fachtagungsablauf	Prof. Dr. Andreas Küchler, THWS
09.10 – 09.35	Prinzipien zur Messung von hohen Spannungen und Strömen bei AC, DC und transienten Vorgängen	Prof. Dr. Andreas Küchler, THWS
09.40 – 10.05	Einführung in die Ermittlung der Messunsicherheit bei Prüf- und Kalibrierarbeiten	Hansjürg Weber, SAS, ehemals ETH
10.10 – 10.35	Prinzipien zur Erzeugung hoher Spannungen und Ströme	Michael Gamlin, Haefely AG
	Kaffeepause	

11.10 – 11.35	Beispiele zur Realisierung von Typ-, Werksprüfungen und Vor-Ort-Prüfungen von DC-Kabeln bis 540 kV auf Basis der CIGRE-Broschüre 852	Dr. Ralf Pietsch, Highvolt Prüftechnik Dresden GmbH
11.40 – 12.05	Diagnosemessungen und Prüfungen an Transformatoren	Dr. Henrik Menne, FKH
12.10 – 12.35	Herausforderungen und Erfahrungen mit Kleinsignalmesswandlern (LPIT) in Hochspannungs-GIS	Simon Averkamp, Frank Feinkohl, Siemens Energy GmbH & Co. KG
	Mittagessen	
14.20 – 14.45	Neue Anforderungen an die Messwandler aus Sicht der Normenfamilie IEC 61869 und die daraus resultierenden Prüftechnikansätze	Dr. Erik Sperling, Omicron electronics GmbH
14.50 – 15.15	Skalierbarkeit von Resonanzprüfungen zur Prüfung immer länger werdender Kabelstrecken	Dr. Michael Walter, FKH
15.20 – 15.45	HVDC-Strommessung mit einem Nullflusswandler basierend auf dem Fluxgate-Prinzip	Dr. Manfred Winkelkemper, Piffner Messwandler AG
	Kaffeepause	
16.10 – 16.35	Messung und Diagnostik für eine Höherauslastung des Netzes – Ergebnisse der VDE Task Force	Prof. Dr. Maik Koch, Hochschule Magdeburg-Stendal
16.40 – 17.05	Schlussdiskussion	Prof. Dr. Andreas Küchler, THWS
ab 17.10	Apéro	

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



Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung

Betreute Praktikumsarbeiten

Paul Demel

IASTE-Praktikant aus Deutschland von der Hochschule

Magdeburg-Stendal

Studiengang Elektrotechnik

Inhalt des Praktikums siehe Beitrag «Forschung zum

Teilentladungsverhalten von SF₆-freien Isoliergasen»

Betreuer: Dr. Michael Walter, Ivan Barcan, Glenn Behrmann

Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen

Publikationen

Dominic Kleger, Mario Gobeli, Thomas Heizmann, Michael Walter

Prüfempfehlung für Kabelstrecken – Ergebnis von 38 Jahren Vor-Ort-Prüferfahrung
Bulletin SEV/VSE 2024 Nr. 6, S. 50 ff.

Michael Walter et al. als Mitglied von CIGRE WG D1.67

Electric Performance of New Non-SF₆ Gases and Gas Mixtures for Gas-Insulated Systems
IEEE Xplore, März/April 2024 – Vol. 40, Nr. 2 S. 5 ff.

M. Walter

Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen
Bulletin SEV/VSE 2024 Nr. 1, S. 40 ff.

Glenn Behrmann, Detlev Gross, Michael Muhr

Guide to Changes Made in Edition 4 of IEC 60270, Charge-Based Partial Discharge Measurements, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 40, No. 4, July/Aug 2024, S. 27–39

Wojciech Koltunowicz, Glenn Behrmann, Stefan Neuhold et al.

Requirements and application of UHF PD monitoring systems for gas-insulated systems, CIGRE TB933, Mai 2024

Beiträge an Fachveranstaltungen

Michael Walter

SF₆ gas replacement in HV and MV substation and equipment, CIGRE XI Workspot, Rio de Janeiro, Brasilien, 25.–27.11.2024

Dominic Kleger

Vortrag «Ersatz von ölisolierten Kabelsystemen – Erfahrungen aus der Praxis»
Electrosuisse Fachtagung Leitungsbau 2023, 13.11.2024, Aarau

Michael Walter

Vortrag «Skalierbarkeit von Resonanzprüfungen zur Prüfung immer länger werdender Kabelstrecken»
FKH-Fachtagung «Erzeugung und Messung hoher Spannungen und Ströme», 5.12.2024, Hotel Arte, Olten

Henrik Menne

Vortrag «Diagnosemessungen und Prüfungen an Transformatoren»
FKH-Fachtagung «Erzeugung und Messung hoher Spannungen und Ströme», 5.12.2024, Hotel Arte, Olten

Teilnahme an Fachveranstaltungen

Powertage 2024, 4. – 6.6.2024, Zürich

Gunnar Andrae, Reinhold Bräunlich, Ivan Barcan, Diego Friedli, Dominic Kleger, Martina Müller, Michael Walter

CIGRE Paris Session 2024, 25.–30.8.2024, Paris

Michael Walter

CIGRE Schweiz – Power Electronics and Paris Session, 13.12.2024, Lenzburg

Michael Walter

Stuttgarter Hochspannungssymposium 2024, 11.–12.06.2024, Stuttgart

Gunnar Andrae

Electrosuisse Anlagetagung 2024, 19.9.2024, Aarau

Gunnar Andrae, Ivan Barcan, Michael Walter

Electrosuisse Fachtagung Leitungsbau 2024, 13.11.2024, Aarau

Dominic Kleger, Michael Walter

FKH-Fachtagung «Erzeugung und Messung hoher Spannungen und Ströme», 5.12.2024, Hotel Arte, Olten

Gunnar Andrae, Reinhold Bräunlich, Diego Friedli, Martina Müller, Stefan Neuhold, Michael Walter, Vahe Der Houhanessian, Peter Frey, Philippe Alff, Mario Gobeli, Christian Lawnik, Ivan Barcan, Glenn Behrmann, Dominic Kleger

Forum Romand de l'Énergie, 27.11.2024, Beaulieu Lausanne

Diego Friedli

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)

CIGRE

Firmenmitgliedschaft

VDE

Firmenmitgliedschaft

Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM)

Firmenmitgliedschaft

Die FKH ist bei folgenden nationalen und internationalen Fachgremien vertreten

Nationalkomitees:

CES electrosuisse TK 10: «Flüssigkeiten für elektrische Anwendungen»

Mitglied: Peter Frey

CES electrosuisse TK 14: «Transformatoren»

Mitglied: Martina Müller

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

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»

Mitglied: Michael Walter

Mitglied: Glenn Behrmann

CES electrosuisse TK 99: «Isolationskoordination»

Mitglied: Michael Walter

CES electrosuisse TK Erdungen

Mitglied: Diego Friedli

Mitarbeit ESTI-Weisung 250:

«Abstände bei Annäherungen und Kreuzungen von elektrischen Leitungen mit Rohrleitungen»

Mitglied: Reinhold Bräunlich

Internationale IEC-Arbeitsgruppen:

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

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 62271-2 TC 99/MT 9: «Insulation co-ordination – Part 2: Application guidelines»

Mitglied: Gunnar Andrae

IEC 62478 MT 14: High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods

Mitglied: Glenn Behrmann (Sekretär, Schweizer Referent)

IEC 60270 MT 23: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements

Mitglied: Glenn Behrmann (Sekretär, Schweizer Referent)

DKE/AK 124.0.5: Teilentladungsmesstechnik – Revision IEC 60270

Mitglied: Glenn Behrmann (CH-Delegat)

DKE/AK 124.0.7: Teilentladungsmesstechnik (nicht konventionell) – IEC 62478

Mitglied: Glenn Behrmann (CH-Delegat)

Internationale CIGRE-Arbeitsgruppen:

CIGRE D1 «Materials and emerging test techniques»

Nationalvertreter Schweiz: Michael Walter

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

Mitglied: Diego Friedli

CIGRE AG D1.04: «Advisory group insulating gases»

Mitglieder: Stefan Neuhold, Michael Walter

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

Mitglieder: Stefan Neuhold, Glenn Behrmann

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

Mitglieder: Stefan Neuhold, Glenn Behrmann (Sekretär)

CIGRE WG D1.78: «Partial discharge properties of non-SF₆ insulating gases and gas mixtures»

Convenor: Michael Walter

Sekretär: Glenn Behrmann

Mitglied: Stefan Neuhold

FKH-Mitglieder

Verbände

Electrosuisse

8320 Fehraltorf

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE)

5001 Aarau

Werksmitglieder

AEW Energie AG

5001 Aarau

Industrielle Werke Basel

4053 Basel

AG Kraftwerk Wägital

8854 Siebnen

Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

4658 Däniken

Axpo Grid AG

5401 Baden

Kraftwerke Oberhasli AG

3862 Innertkirchen

Axpo Power AG

5401 Baden

Primeo Netz AG

4142 Münchenstein

Azienda Elettrica Ticinese

6501 Bellinzona

Repower AG

7742 Poschiavo

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-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

Verzasca SA

6901 Lugano

ewl energie wasser luzern

6002 Luzern

Werke am Zürichsee AG

8700 Küsnacht

GRUPE E SA

1701 Fribourg

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

Siemens Schweiz AG

8047 Zürich

Hitachi Energy Switzerland AG

8050 Zürich

Studer Cables AG

4658 Däniken

Megger Schweiz AG

5107 Schinznach Dorf

Trafopower AG

5012 Schönenwerd

Mohaupt High Voltage GmbH

A-6142 Mieders

VAPEC AG

8304 Wallisellen

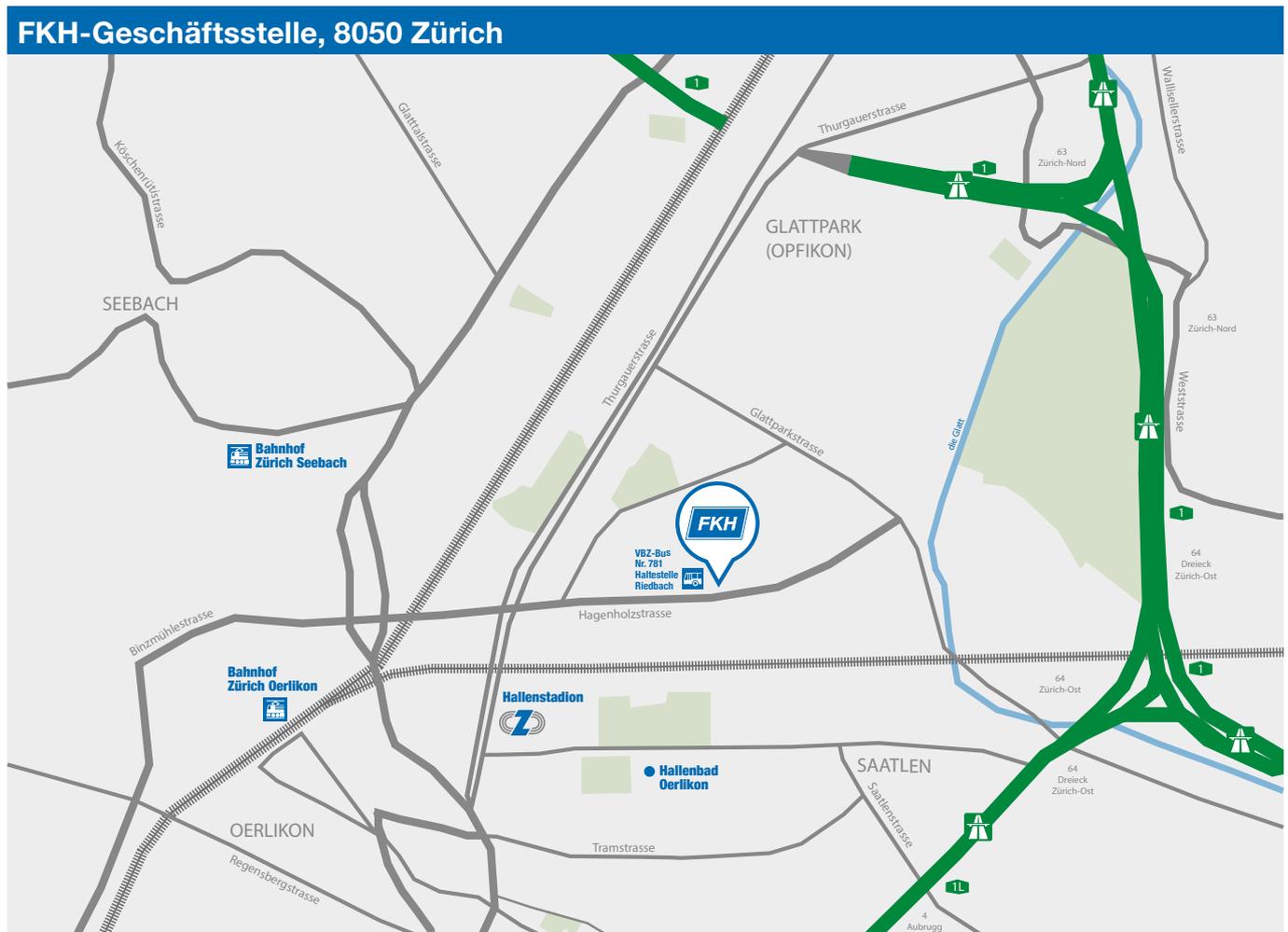
Korrespondierende Mitglieder

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 École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud 1400 Yverdon-les-Bains	HES-SO Valais/Wallis 1950 Sion
École d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg 1705 Fribourg	FH Graubünden 7004 Chur
Swiss Federal Institute of Technology Power Electronics Laboratory (EPFL) 1015 Lausanne	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) 8401 Winterthur

Mitgliederbestand per 31. Dezember 2024

Verbände	2	(2)
Werksmitglieder	29	(29)
Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder	24	(24)
Korrespondierende Mitglieder	10	(10)
Total Mitglieder per 31. Dezember 2024 (Stand per 31. Dezember 2023 in Klammern)	65	(65)

Zufahrtspläne für die FKH-Standorte



FKH 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