



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

Jahresbericht

2023





Bild Titelseite: Wechselspannungsprüfung mit TE-Messung an einer 275-kV-Kabelanlage im Kraftwerk Gabi im Simplon-Gebiet.

Bild links: Wechselspannungsprüfung mit TE-Messung an der 150-kV-Kabelanlage Frohalp – Katz mit Einspeisung über eine Indoor-AIS-Schaltanlage.

Inhalt

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung	4	Neubauprojekt Labor-Mehrzweckhalle Niedergösgen	40
Struktur und Leitbild der FKH	6	FKH-Fachtagung 2023 «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie»	44
FKH-Vorstand	7	Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung	46
FKH-Geschäftsstelle	8	Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen	47
Dienstleistungen der FKH	9	Mitgliedschaft/Mitarbeit in Fachgremien und Kommissionen	48
Auftragsarbeiten und statistische Übersicht	10	FKH-Mitglieder	50
Prüfung der ersten 145-kV-«Clean Air»-GIS der Schweiz	12	Zufahrtspläne für die FKH-Standorte	54
Teilentladungsmessungen an Transformatoren mit Connex-Buchsen	14		
Kabelprüfungen: gesammelte Erfahrung aus 38 Jahren	16		
Wegleitung für die Geräuschpegelberechnung von Freileitungskoronaentladungen zur Überprüfung der Einhaltung der Lärmschutzverordnung	18		
Kabelprüfung an einem 150-kV-City-Kabel	20		
Neue akustische Kamera	22		
Dimensionierung von RC-Snubber-Filtern zur Begrenzung von Schaltüberspannungen an Kompensationsdrosseln im Mittelspannungsnetz	24		
Probenahme von Isolierölen aus Transformatoren und Wandlern	28		
FKH-Labor für Isolierölanalysen	30		
Neuer FKH-1800-kV-Stossgenerator für Labor- und Vor-Ort-Einsätze	31		
Neu erlangte ISO-45001-Zertifizierung für Arbeits- und Gesundheitsschutz	34		
Koronaschallberechnung mit HVLBuzz	36		

Vorwort des Präsidenten und der Geschäftsleitung

In der Energiebranche ist nach Phasen von Covid und drohender Energieknappheit wieder eine Art Aufbruchstimmung zu beobachten. Es setzt sich langsam die Erkenntnis bei Netzbetreibern in ganz Europa durch, dass für die Energiewende – einhergehend mit der Elektrifizierung von Wärmeerzeugern und der Elektromobilität sowie der Integration erneuerbarer Energien, wie z.B. grosser alpiner Solarparks – massive Investitionen in Übertragungs- und Verteilnetze notwendig sein werden. Die gestiegenen Strompreise helfen, Rahmenbedingungen zu schaffen, dass diese Investitionen auch wirtschaftlich tragbar werden. Bremsend wirkt allerdings weiterhin der langwierige Bewilligungsprozess für Leitungsbauprojekte.

Diese Aufbruchstimmung wirkte sich im Jahr 2023 auch positiv auf die Dienstleistungen der FKH in den drei Standbeinen Prüfungen, Ölanalysen und Studien aus. Der Umsatz lag 2023 sogar noch leicht über dem bisherigen Spitzenjahr 2022. Dies zeigt, dass das Dienstleistungsangebot der FKH weiterhin gut auf die Bedürfnisse der FKH-Mitglieder ausgerichtet ist und dieses aktiv nachgefragt wird. Im Bereich Elektrotechnik wurden mit 211 Projekten überdurchschnittlich viele Aufträge bewältigt, aber auch das Öllabor hatte, gemessen an der Anzahl Analysen, ein Rekordjahr zu verzeichnen. Es ist vor allem dem Einsatz der FKH-Mitarbeitenden zu verdanken, dass diese grosse Anzahl an Projekten zur Zufriedenheit unserer Mitglieder bewältigt werden konnte.

Auch intern stand das Jahr 2023 für die FKH unter dem Motto «Investition in die Zukunft». Es konnten drei Mitarbeitende neu eingestellt werden. Dr. Henrik Menne ergänzt unser Ingenieursteam seit Februar. Mit Basil Peter durften wir im September einen zusätzlichen Mechaniker in unseren Reihen willkommen heissen. Der Elektroingenieur Ivan Barcan wurde als Ersatz von Pascal Fehlmann auf Mitte Januar 2024 eingestellt. Begleitend wurden intern Anpassungen vorgenommen, um die Strukturen an die über die letzten Jahre angewachsene Grösse anzupassen.

Eine grosse Investition in die Zukunft stellt der Neubau der Mehrzweckhalle am Standort Niedergösgen im Umfang von 1,6 Mio. CHF dar, über welchen noch im Detail in diesem Jahresbericht geschrieben wird. Die neue Mehrzweckhalle als direkter Anbau an die bestehende Logistikhalle wird die Prüfmöglichkeiten in Niedergösgen deutlich verbessern. Sie hilft, die angespannte Lagersituation in Niedergösgen zu entschärfen, und trägt dazu bei, dass die Rüstplätze für Vor-Ort-Prüfmateriale zukünftig nicht mehr temporär für Prüfungen belegt werden, sodass der Logistikfluss optimaler funktionieren kann.

Im Herbst 2023 erlangte die FKH neu die ISO-45001-Zertifizierung für Arbeits- und Gesundheitsschutz. Auf dem Weg zur Zertifizierung wurden – auch unter Beizug von externen Experten – die Aktivitäten der FKH aus dem Blickwinkel der Arbeitssicherheit beleuchtet und zahlreiche Einzelmassnahmen umgesetzt. Ein Schwerpunkt wurde insbesondere auf die Weiterbildung des Personals gelegt, zudem wurden für Niedergösgen ein grösserer Stapler und eine Hebebühne neu beschafft, um den Mitarbeitenden die optimalen Werkzeuge im Umgang mit Lasten und bei der Arbeit in der Höhe zur Verfügung zu stellen. Durch die intensive Beschäftigung mit dem Thema Arbeitssicherheit ist auch ein positiver Kulturwandel zu spüren, sodass vermehrt proaktiv im Vorfeld Arbeitssicherheitsfragen gemeinsam mit dem Kunden erörtert werden, bevor die FKH einen Auftrag übernimmt. Das Briefing vor Ort zusammen mit dem Kunden, in welchem gegenseitig über die Rollen der involvierten Personen während der Prüfung informiert wird und bei dem die formale Arbeitsfreigabe für die Prüfung erfolgt, hat sich unterdessen gut etabliert.

Der neu beschaffte modulare und mobile Stossgenerator wurde im Jahr 2023 geliefert und einer umfangreichen Abnahmeprüfung unterzogen. Es hat sich gezeigt, dass sich das Konzept mit modular in Kisten verpackten Einheiten bewährt. Die FKH ist somit bereit, in Niedergösgen und im Bedarfsfall auch vor Ort Stossprüfungen bis 1,8 MV anzubieten.

Indem die FKH für die CIGRE-Arbeitsgruppe D1.78 «Teilentladungsmessung in alternativen Isoliergasen» mit Michael Walter den Convenor stellt, bleibt die FKH auch international am Puls der Zeit im Bereich GIS, AIS und GIL und hat die Möglichkeit, die Zukunft der Prüfmethodik für Alternativgase aktiv mitzugestalten. Die Arbeitsgruppe plant, 2024 einen internationalen Round-Robin-Test durchzuführen, an dem sich auch die FKH mit Prüfungen beteiligen wird.

Auch im zweiten Jahr des neuen Geschäftsleiters der FKH blicken wir auf bereichernde Gespräche mit vielen FKH-Mitgliedern zurück. Im Rahmen der Fachtagung «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie», bei diversen Fachveranstaltungen, aber auch vor Ort auf der Baustelle konnten wir im direkten Austausch mit FKH-Mitgliedern auf ihre Bedürfnisse in Bezug auf die FKH eingehen. Dieser direkte Austausch mit ihnen ist für die FKH ein zentrales Anliegen und soll auch im neuen Jahr aktiv gepflegt werden.



A handwritten signature in black ink that reads 'Christian Lindner'.

Christian Lindner
Präsident



A handwritten signature in black ink that reads 'Michael Walter'.

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 Eigenent-

wicklung 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.

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 (ab 1.6.2023) | Pfiffner Messwandler AG

Markus Burger | Electrosuisse

Anja Burkhard | Hitachi Energy 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

Michael Junghans (bis 31.10.2023) | Brugg Kabel AG

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

Daniel Riesen | BKW Energie AG

René Vollenwyder | Schweizerische Bundesbahnen AG

Dr. Michael Walter | FKH ¹

Kontrollstelle

Bruno Duebendorfer | Axpo Grid AG

Ajdin Draganovic | Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

¹ Mitglied mit beratender Stimme

FKH-Geschäftsstelle

Geschäftsleiter	Dr. Michael Walter , Dr. sc. ETH	walter@fkh.ch
Stv. Geschäftsleiter	Dr. Thomas Heizmann , Dr. sc. techn. ETH	heizmann@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 (ab 15. Januar 2024) Dr. Reinhold Bräunlich , Dr. sc. techn. ETH, freier Mitarbeiter Dr. Thomas Brügger , Dr. sc. techn. ETH (bis 31. Januar 2023) Dr. Vahe Der Houhanessian , Dr. sc. techn. ETH Pascal Fehlmann , El.-Ing. FH (bis 31. Oktober 2023) Tobias Felber , Netzelektriker Peter Frey , Chemielaborant Diego Friedli , MSc Eng. HES-SO Mario Gobeli , El.-Ing. FH Dr. Thomas Heizmann , Dr. sc. techn. ETH Leiter Labor für Isolierölanalysen (bis 31. Mai 2024) Dominic Kleger , BSc El.-Ing. FH Adamo Mele , Elektromechaniker Dr. Henrik Menne , Dr. sc. ETH (ab 1. Februar 2023) Martina Müller , Msc ETH ETIT Simon Mutter , Energieelektroniker Dr. Stefan Neuhold , Dr. sc. techn. ETH Basil Peter , Polymechaniker (ab 11. September 2023) Franziska Schenker , Chemielaborantin Markus von Arx , Elektromonteur Toni von Deschwanden , Elektromechaniker	alff@fkh.ch andrae@fkh.ch barcan@fkh.ch braeunlich@fkh.ch bruegger@fkh.ch houhanessian@fkh.ch fehlmann@fkh.ch felber@fkh.ch frey@fkh.ch friedli@fkh.ch gobeli@fkh.ch heizmann@fkh.ch kleger@fkh.ch mele@fkh.ch menne@fkh.ch 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 Niedergösgen Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen	Tel. 062 288 77 95
	FKH-Labor für Isolierölanalysen Niedergösgen Andresenschachen 10, 5013 Niedergösgen	Tel. 062 288 77 99
Kontakt Westschweiz	Diego Friedli	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 grey line with six blue circular nodes. Each node contains an icon and is connected to a text box on the right. The icons are: a lightning bolt, a house with a lightning bolt, a test tube, a speech bubble, a bar chart, and an open book.

- Prüfung von HS-Betriebsmitteln vor Ort**
 HS-Prüfungen an Apparaten und Betriebsmitteln mit Stoss- und Wechselfeldspannung (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
 - Furananalysen
 - FTIR-Spektralanalysen
- Erdungs-, Umwelt- und Netzfragen**
 Erdungsmessungen/Berechnungen
 EMF-/EMV-Messungen und Berechnungen
 Schall- und Vibrationsmessungen
 Netzqualitäts- und Netztransientenmessungen und Berechnungen
- Engineering**
 Engineering, Beratung und Expertisen
 Schadensanalysen
 Blitzschutzfragen
- Weiterbildung**
 Fachtagungen, Schulungen

Auftragsarbeiten und statistische Übersicht

Neben diversen Entwicklungsprojekten und der Behandlung aktueller Fragestellungen der FKH-Mitglieder wurden im Berichtsjahr 2023 insgesamt 211 (200) elektrotechnische Auftragsarbeiten und 186 (166) Aufträge für Isolierölanalysen mit total 1833 (1818) 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	2'835'721	(2'926'458)
Erlös aus Auftragsarbeiten für Nichtmitglieder	CHF	2'008'125	(1'924'374)
Erlös aus Auftragsarbeiten	CHF	4'843'846	(4'850'832)
Nebenerlöse (inkl. Fachtagung)	CHF	72'075	(55'913)
Mitgliederbeiträge	CHF	322'400	(312'000)
Total gemäss FKH-Erfolgsrechnung 2023	CHF	5'238'321	(5'218'745)

Tabelle 1: Erlös aus Auftragsarbeiten (Vorjahr in Klammern)

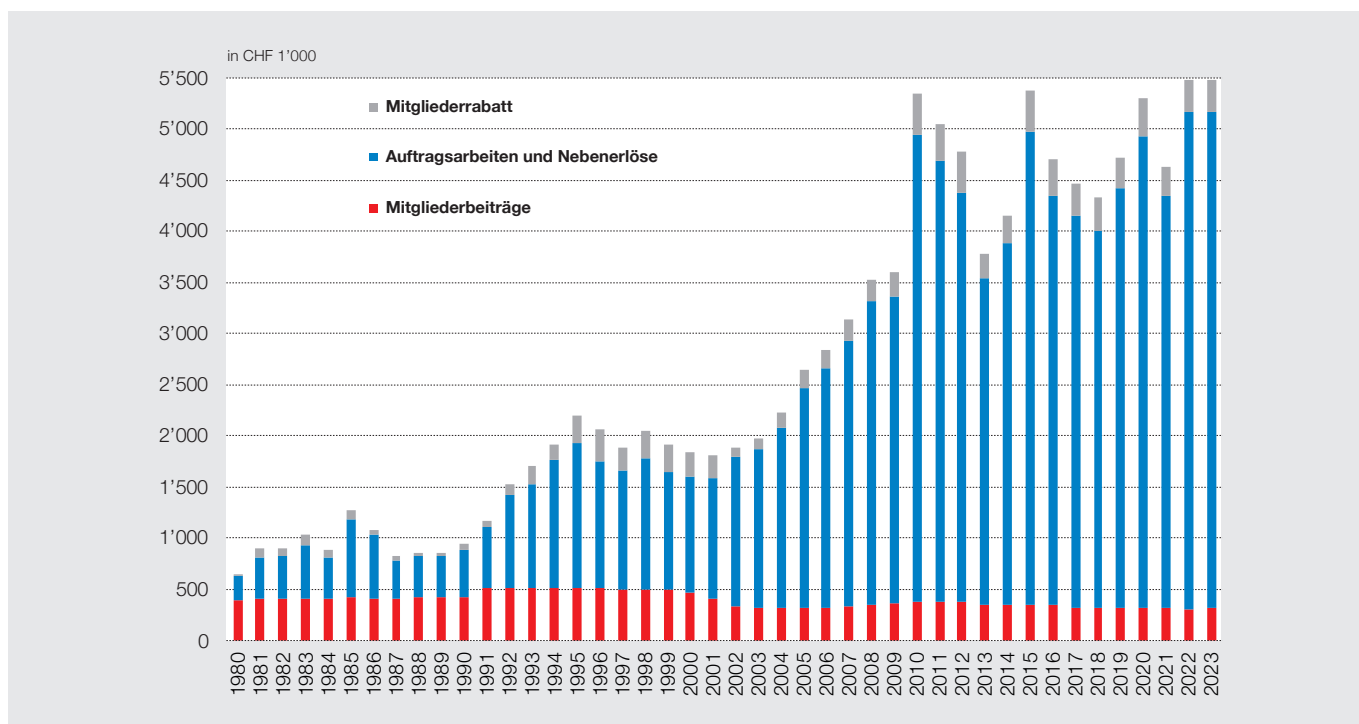


Abbildung 1: Erlös aus Auftragsarbeiten und Mitgliederbeiträgen im Zeitraum von 1980–2023

* Nettoerlös, 10% Mitgliederrabatt abgezogen

Die Auftragstätigkeit der FKH-Arbeitsgruppe für Mitglieder und Dritte im Berichtsjahr 2023 kann folgenden Gebieten zugeordnet werden (Tabelle 2 und Abbildung 2 prozentuale Verteilung bezogen auf den erzielten Nettoerlös nach Abzug der Mitgliederrabatte):

Prüfung von Hochspannungskabelanlagen	38,1%	(34,7%)
Prüfung von Transformatoren	11,9%	(10,1%)
Prüfung von Hochspannungsapparaten und Generatoren	1,1%	(0,3%)
Prüfung von GIS und Schaltanlagen	19,7%	(23,6%)
Erdungsmessungen / Nachweis von Blitzschutzmassnahmen	4,2%	(4,4%)
Typenprüfungen / Spezialversuche	3,1%	(4,0%)
Umweltfragen / EMF / Korona / EMV / Transiente Vorgänge	1,1%	(1,0%)
Beratungs- und Betreuungsaufgaben	2,2%	(4,3%)
Isolierölanalysen	18,2%	(17,2%)
Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	0,4%	(0,5%)

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Auftragsarbeiten im Jahr 2023, nach Dienstleistungssparten aufgeschlüsselt (Vorjahr in Klammern)

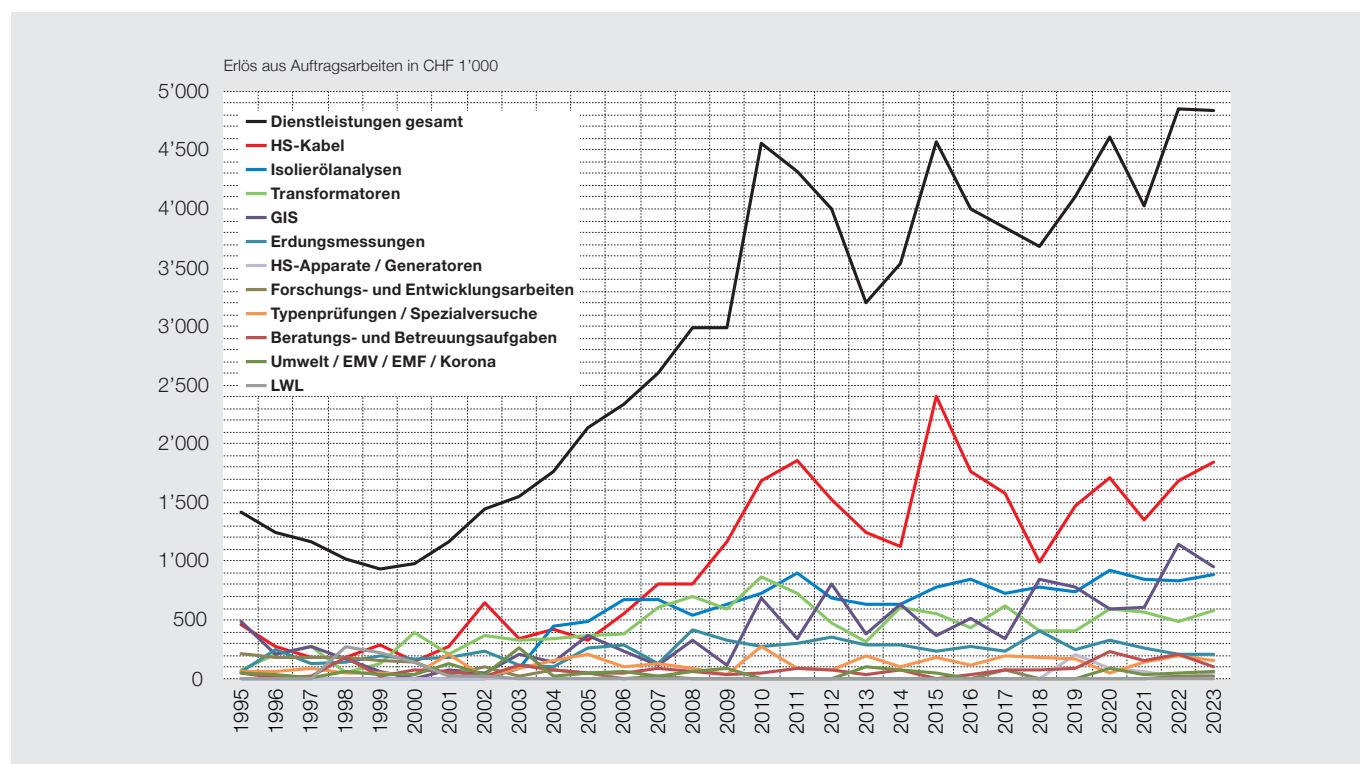


Abbildung 2: Entwicklung des Erlöses aus Auftragsarbeiten nach einzelnen Dienstleistungssparten (in CHF 1'000) über den Zeitraum von 1995–2023

Prüfung der ersten 145-kV-«Clean Air»-GIS der Schweiz

Die Primeo Energie AG hat sich dazu entschieden, im Jahr 2023 die ersten beiden mit «Clean Air» isolierten Schaltanlagen für die 145-kV-Ebene der Schweiz in Betrieb zu nehmen. Dieser Typ Schaltanlage verwendet synthetische Luft als Isoliermedium. Die Anlage bietet somit den Vorteil, dass das Isoliermedium ein globales Treibhauspotenzial (GWP) von kleiner eins hat.

Insbesondere bei solchen neuartigen Schaltanlagen ist eine Hochspannungsprüfung mit sensibler UHF-Teilentladungsmesstechnik nach der Montage vor Ort im Unterwerk sehr wichtig. Daher wurde die FKH beauftragt, diese beiden Schaltanlagen vor der Inbetriebnahme auf Teilentladungen zu prüfen.

In Abbildung 1 ist eine dieser beiden «Clean Air»-Schaltanlagen abgebildet. Diese Anlage ist auf allen fünf Feldern mit konventionellen induktiven Strom- und Spannungswandlern versehen und besitzt eine Einfachsammschiene mit doppelter Längstrennung. Die zweite Anlage besitzt anstelle von induktiven Wandlern LPITs (Low-Power Instrument Transformers; Kleinsignalwandler) sowohl zur Strom- als auch zur Spannungsmessung. Zusätzlich besitzt diese Anlage eine Doppelsammschiene mit zwei Längstrennungen. Sowohl die LPIT-Sensoren als auch die induktiven Wandler waren Teil der Hochspannungsprüfungen.



Abbildung 1: Gasisolierte Schaltanlage der 145-kV-Spannungsebene mit «Clean Air» als Isoliergas der Primeo Energie AG



Abbildung 2: Prüfanlage zur Prüfung der 145-kV-GIS

Prüfanforderungen

Für die Hochspannungsprüfung der «Clean Air»-Schaltanlagen wurden dieselben Prüfempfehlungen wie für die SF₆-Schaltanlagen herbeigezogen:

- Prüfspannung: 235 kV / 1 min (kein Überschlag)
- Teilentladungsmessung: 174 kV / 30 min
- Es dürfen keine phasenkorrelierten Teilentladungsaktivitäten detektiert werden. Das Teilentladungsmuster wird dazu jeweils über eine Dauer von einer Minute aufgezeichnet.

Prüfanlage

Die Schaltanlage wurde phasenweise über ein Prüfkabel unter Spannung gesetzt. Die anderen Phasen wurden jeweils geerdet. Die nicht verwendeten Kabelbuchsen wurden mit Schutzdeckeln versehen und mit Isoliergas gefüllt.

Aufgrund der engen Platzverhältnisse in den Unterwerken wurde in beiden Fällen entschieden, die Prüfanlage im Freien aufzustellen. Das Prüfkabel wurde dabei durch eine Kernbohrung von aussen in den Kabelkeller zu den Kabelendverschlüssen der GIS geführt.

Die Prüfanlage besteht aus einer Resonanzdrossel bzw. in diesem Fall aus einem Resonanzdrosselturm (zwei Drosseln in Serie), einem kapazitiven Spannungsteiler, einem Kondensator zur konventionellen Teilentladungsauskopplung, einem Adapter von Freiluft auf Kabel und dem bereits erwähnten Prüfkabel (in Abbildung 2 von links nach rechts). Die Hochspannung wird folglich mit einer Serie-Resonanzanlage generiert.

«Clean Air»

Bei den sogenannten «blue GIS» von Siemens Energy wird «Clean Air» als Isoliermedium verwendet. Dies ist ein fluorfreies Isoliergas. Es besteht zu 20% aus Sauerstoff und zu 80% aus Stickstoff. Diese Mischung wird oft auch als synthetische Luft bezeichnet. Der Leistungsschalter besitzt eine Vakuumschaltrohre, während die Trenner in einem mit reinem «Clean Air» gefüllten Gasraum liegen.

Aufgrund der schlechteren Isolierfähigkeiten der verwendeten Mischung wurden im Vergleich zu einer SF₆-Schaltanlage der gleichen Spannungsebene einerseits die Dimensionen grösser gewählt und andererseits auch höhere Gasdrücke in der Anlage verwendet. Es wurde ein Nenngasdruck von 7 bar rel. (bei 20°C) gewählt, wobei der Spannungswandler sogar mit 7,5 bar rel. betrieben wird.

UHF-Teilentladungsmessung

Die UHF-Teilentladungsmessung wurde nach demselben Vorgehen wie für SF₆-isolierte Schaltanlagen durchgeführt. Die Teilentladungssignale wurden in einem Frequenzbereich von 0,1–1,8 GHz aufgezeichnet und ausgewertet. Die Messempfindlichkeit von 5 pC der fest in der Schaltanlage verbauten UHF-Teilentladungssensoren wurde mittels Cigré-Sensitivity Check Step 2 untersucht und bestätigt.

Die beiden Anlagen konnten nach erfolgreich bestandenen Prüfungen dem Betreiber Primeo Energie AG übergeben werden.



AUTORIN

Martina Müller

MSc ETH ETIT

Projektingenieurin

Teilentladungsmessungen an Transformatoren mit Connex-Buchsen

Es zeigt sich, dass der Trend der berührungssicheren Anschlüsse immer mehr auch auf die Leistungstransformatoren übergreift. So konnte die FKH in diesem Jahr mehrere Trafos prüfen, die keine Öl-Freiluftdurchführungen mehr haben, sondern sowohl unter- als auch oberspannungsseitig mit Kabelsteckbuchsen (Connex-Buchsen) bestückt sind.

Unterspannungsseite

Transformatoren, die unterspannungsseitig mit Kabelsteckbuchsen versehen sind, sind schon länger keine Seltenheit mehr. Damit der Transformator bei der Hochspannungsprüfung trotzdem über die Unterspannungsseite unter Spannung gesetzt werden kann, besitzt die FKH jeweils vier Steckdurchführungen von Connex der Grössen 1, 2 und 3.

Die nachstehende Abbildung 1 zeigt den Aufbau für eine Einspeisung und Teilentladungsauskopplung im Fall von Connex-Buchsen Grösse 3. Die Teilentladungsauskopplung wird in diesem Fall mit parallelen Koppelkondensatoren und einem Stromwandler gemacht. Die Einspeisung wird mit einer Entstördrossel (blau) gefiltert.



Abbildung 1: Einspeisung über Steckdurchführungen Connex 3 auf der Unterspannungsseite des Transformators

Oberspannungsseite

Der Fall, dass die Oberspannungsseite mit berührungssicheren Anschlüssen versehen ist, ist in der Schweiz noch eher selten. Es wurden in diesem Jahr jedoch einige Transformatoren geprüft, bei denen auch die Oberspannungsseite mit Kabelsteckbuchsen bestückt waren.

In diesen Fällen konnten die Teilentladungen über die herausgeführten kapazitiven Abgriffe über einen Stromwandler ausgekoppelt werden (Hinweis: Diese Abgriffe müssen als Option bestellt werden und sind nicht Standard). Die Auskopplung der Teilentladungen ist in Abbildung 2 sichtbar, wobei der Anschluss des kapazitiven Abgriffes schwarz ist und der Stromwandler eine blaue Farbe besitzt.



Abbildung 2: Teilentladungsauskopplung über einen kapazitiven Abgriff einer Connex-Buchse

Für die Kalibration der Teilentladungsmessung ist es notwendig, dass die Wicklung und somit der Hochspannungsbereich der Buchse frei zugänglich sind. Die FKH hat für diesen Zweck Hilfsmittel entwickelt, damit eine gute Verbindung gewährleistet werden kann. Diese Hilfsmittel werden zusätzlich auch für weitere Messungen an Transformatoren verwendet (z.B. FRA, PDC,

Widerstand, Übersetzung). In Abbildung 3 wird die Kalibration der Teilentladungsmessung an einer Connex-Buchse gezeigt. Die Gewindestange weist einen guten elektrischen Kontakt zur Buchse auf.

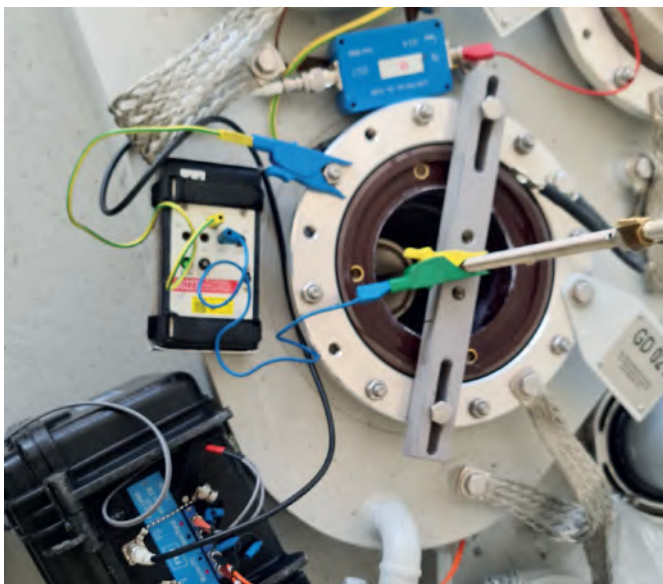


Abbildung 3: Kalibration der Teilentladungsmessung an einer Connex-Buchse

Für die Hochspannungsprüfung müssen die Oberspannungsanschlüsse mit spannungsfesten Blindstopfen versehen werden.

Sternpunkt

Für Teilentladungsmessungen werden herausgeführte Sternpunkte induktiv geerdet, das heisst, die Erdverbindung wird über eine Entstördrossel geführt. Dafür muss erneut die Wicklung bzw. der Hochspannungsbereich der Buchse frei zugänglich sein. Mit der induktiven Erdung wird eine höhere Empfindlichkeit der Teilentladungsauskopplung erreicht.

Da hier die Teilentladung nicht über den kapazitiven Abgriff ausgekoppelt wird, sondern direkt zwischen der Wicklung und der Gehäuseerdung, wird ein Kondensator dazwischen geschaltet, der die Durchführung simuliert.

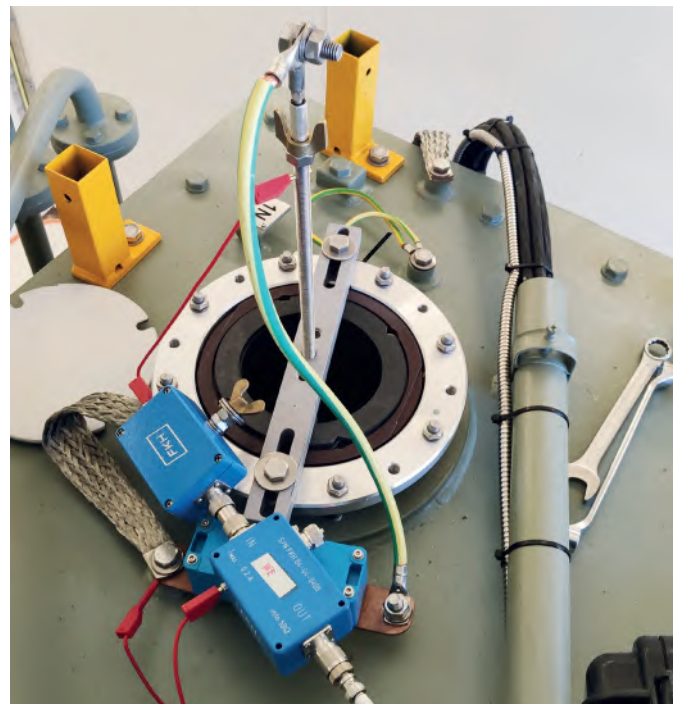


Abbildung 4: Teilentladungsauskopplung im Fall des Sternpunktes mit zusätzlicher Kopplungskapazität

Während der Hochspannungsprüfung wird im Fall des Sternpunktes kein Blindstopfen benötigt, da er für die Prüffrequenz niederohmig geerdet ist.

Mit diesen Vorgehensweisen und Hilfsmitteln konnten im Jahr 2023 diverse Transformatoren erfolgreich auf Teilentladungsfreiheit geprüft werden.



AUTORIN

Martina Müller

MSc ETH ETIT

Projektingeurin

Kabelprüfungen: gesammelte Erfahrung aus 38 Jahren

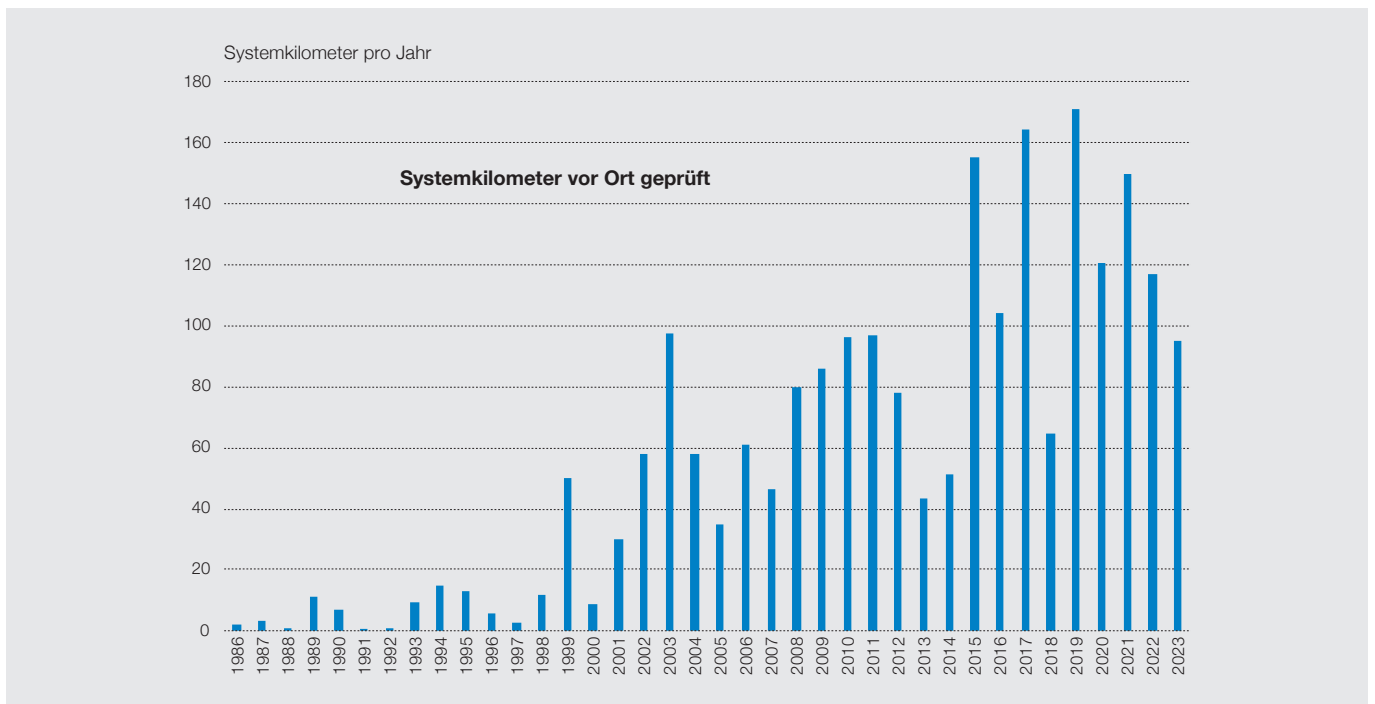


Abbildung 1: Gesamtlänge der pro Jahr geprüften Systeme

Durchgeführte Kabelprüfungen

Die FKH hat seit 1986 insgesamt 1430 Vor-Ort-Prüfkampagnen von Kabeln mit Nennspannungen von 10 bis 400 kV durchgeführt, dabei wurden 1734 Systeme mit einer Länge von 2199 Systemkilometern geprüft. Abbildung 1 zeigt die Gesamtlänge der pro Jahr geprüften Systeme.

Die für die Kabelprüfungen eingesetzten Serie-Resonanzanlagen wurden in den 1980er-Jahren von der ETH zusammen mit der FKH entwickelt und zunächst vor allem für die Prüfung von gasisolierten Schaltanlagen verwendet. Durch den Ausbau der modularen Anlagen konnte deren Leistung schrittweise erhöht werden, sodass sie auch für Kabelprüfungen eingesetzt werden konnten. Die ersten Aufträge kamen fast alle aus Deutschland. Erst ab Anfang der 1990er-Jahre konnten sich Kabelprüfungen auch in der Schweiz in einem grösseren Massstab durchsetzen.

Durchschlagsstatistik

Tabelle 1 zeigt die Durchschlagsstatistik der vor Ort geprüften Komponenten. Die Anzahl der Muffen ist geschätzt, da sie nicht vollständig erfasst wurden. Bei fehlender Angabe wurden 3 Muffen pro Systemkilometer angenommen (*). Der Durchschlagsort ist in 7 Fällen unbekannt (**).

Insgesamt haben also 3,9% der geprüften Kabelsysteme während der Prüfung einen Durchschlag erlitten. Die Ausfallraten der Endverschlüsse (0,39%) und der Muffen (0,45%) liegen nahe beieinander. Mit 0,23% beträgt die Ausfallrate der Kabel pro Systemkilometer nur etwa die Hälfte der Ausfallraten von Endverschlüssen und Muffen (pro Stück).

Im Ausland wurden in 81 Prüfungen 3,4% der Systemkilometer geprüft, dabei traten 10,3% der Durchschläge auf. Die Prüfungen in Deutschland machten 56% der Auslandsprüfungen

Geprüfte Komponenten			
Systeme (Stück)	Kabel (Systemkilometer)	Endverschlüsse (Stück)	Muffen (Stück)
1734	2199	9282	4464*
Anzahl Durchschläge			
68**	5	36	20
Durchschlagsraten			
3,9%	0,23%	0,39%	0,45%

Tabelle 1: Durchschlagsstatistik der geprüften Komponenten

und 1,8% der Systemkilometer aus. Die meisten Prüfungen in Deutschland wurden in den 1980er- und 1990er-Jahren durchgeführt. Alle Durchschläge im Ausland traten in Deutschland und im genannten Zeitraum auf.

Neben kunststoffisolierten Kabeln wurden auch Ölkabel (39,5 Systemkilometer) und gemischte Kabelstrecken (26,2 Systemkilometer) geprüft. Bei diesen Prüfungen traten keine Durchschläge auf.

Bei den Endverschlüssen und Muffen wird als Ausfallgrund in der Regel ein Montagefehler vermutet, was sich aber oft nicht vollständig beweisen lässt, weil nicht immer eindeutige Spuren vorhanden sind. Bei den fünf Ausfällen von Kabeln war in einem Fall eine Verletzung (wahrscheinlich während des Kabelzugs) und in einem anderen Fall ein Herstellungsproblem (Verunreinigung der Isolierung durch Partikel) die Ursache. Die drei weiteren Durchschlagsursachen sind unbekannt. Nach einem Durchschlag bei der Vor-Ort-Spannungsprüfung wird der Durchschlagsort gesucht und die betroffene Komponente ersetzt bzw. repariert. Nach der Reparatur findet in aller Regel eine Nachprüfung statt.

Bewertung

Die in der Schweiz seit den 1990er-Jahren ab der Spannungsebene 50 kV fast standardmässig durchgeführten Vor-Ort-Kabelprüfungen haben sich als wirksam erwiesen, Montagefehler beim Zubehör und in Einzelfällen auch Kabelschäden aufzudecken. Der Prüfpegel von 2,2 x Nennspannung (bis 150 kV) und die Prüfdauer von 15 Minuten sind geeignet, den überwiegenden Teil der Fehlerstellen während der Prüfung zum Durchschlag zu bringen, was durch die Tatsache untermauert wird, dass nur sehr wenige Durchschläge im Betrieb nach bestandener Vor-Ort-Prüfung bekannt sind. Eine noch höhere Sicherheit wird bei einer parallel zur Spannungsprüfung durchgeführten Teilentladungsmessung erreicht.



AUTOR

Dr. Thomas Heizmann

Dr. sc. techn. ETH
Leiter Isolieröllabor

Wegleitung für die Geräuschpegelberechnung von Freileitungskoronaentladungen zur Überprüfung der Einhaltung der Lärmschutzverordnung

Im vergangenen Jahr hat die FKH die Wegleitung der EMPA für die Berechnung von Koronaschallpegeln von Höchstspannungsfreileitungen aus dem Jahr 2009 aktualisiert [1] (letzte Ausgabe 2016 [2]). Die Wegleitung beschreibt standardisierte Berechnungsschritte für die theoretische Bestimmung des Jahresbeurteilungspegels für Koronageräusche von Freileitungen. Im Rahmen von Projekten für neue und modifizierte Höchstspannungsfreileitungen der Netzebene 1 (Betriebsspannung 220 kV und 380 kV, Abbildung 1) kann mithilfe der Wegleitung theoretisch überprüft werden, ob die Planungspegel nach der Lärmschutzverordnung eingehalten werden.

Die in der bisherigen Version verwendeten Beziehungen basierten auf einer von der EPRI¹ erarbeiteten Zusammenfassung mehrerer Untersuchungen, welche in einem Handbuch über Freileitungen publiziert worden waren [4]. Der EPRI-Formelsatz ist komplex und weist Fallunterscheidungen auf, welche beim Vergleich unterschiedlicher Leiterseilgeometrien zu Diskontinuitäten in den ermittelten Schallpegeln führen können. Mit dem EPRI-Datensatz kann die Koronaschallemission bei verschiedenen Regenintensitäten berechnet werden. Die Festlegung der Lärmphasen war nach der bisherigen Anleitung nicht geregelt.

Die aktualisierte Wegleitung zur Bestimmung des Jahresbeurteilungspegels basiert auf einem einfacheren Ansatz einer Forschungsgruppe der BPA² und beschränkt sich auf eine einzige Pegelberechnung bei einer mittleren Regenrate von 1 mm/h [4]. Es konnte gezeigt werden, dass diese Regenrate für die Schweiz als aussagekräftiger Mittelwert herangezogen werden kann. Dieser ergibt den korrekten Jahresbeurteilungspegel unter

Berücksichtigung von nur einer Lärmphase, wenn für die Regendauer (Dauer der Lärmphase) eine untere Grenze für die Regenrate von 0,2 mm/h festgelegt wird. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel der berechneten kumulativen Schallpegelhäufigkeit aus Niederschlagsdaten in Kloten, welche unter anderem für statistische Kontrollberechnungen zur Verifikation der vereinfachten Bestimmung des Jahresbeurteilungspegels herangezogen wurden. Durch die Reduktion auf nur eine Lärmphase vereinfacht sich die Auswertung der Niederschlagsdaten im Bereich des beurteilten Freileitungsabschnitts erheblich.

Die Berechnungsformulierung BPA-mod wurde mit allen verfügbaren Feldmessungen und den einschlägigen Literaturstellen abgestimmt. Detaillierte Begründungen für die notwendige Revision und für die Wahl der neuen Beziehungen werden in einem ausführlichen Bericht der FKH erläutert [3].

Die Berechnungswegleitung beschränkt sich auf die Ermittlung und Beurteilung von A-bewerteten Koronaschalldruckpegeln³. Der in gewissen Fällen als besonders störend wahrgenommene Reintongehalt im Koronalärm, vornehmlich bei einer Frequenz von 100 Hz, wird durch Pauschalzuschläge im Beurteilungspegel berücksichtigt.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass nicht alle Parameter, welche den Koronaschallpegel beeinflussen, messtechnisch und quantitativ befriedigend erfasst werden können. Eine statistische Streuung gemessener Koronaschallpegel ist unvermeidbar und erzeugt im Einzelfall eine Abweichung zum rechnerisch ermittelten Schalldruckpegel. Die für Prognosen verwendeten Beziehungen müssen sich daher auf eine möglichst breite Datenbasis

¹ Electric Power Research Institute, <https://www.epri.com>

² Bonneville Power Administration (BPA), Portland USA, <https://www.bpa.gov/>

³ Der Schalldruckpegel ist wie folgt definiert. L_p [dB] = $10 \cdot \log(\bar{p}^2 / (\bar{p}_0^2))$ [dB] = $20 \cdot \log(\bar{p} / \bar{p}_0)$ [dB]. Für die Frequenz 1000 Hz gilt $\bar{p}_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$. Die Bewertung des Schalldruckpegels wird nach der Kurve A gemäss DIN-Norm 45630 vorgenommen, welche dem subjektiven Lautstärkeempfinden des menschlichen Ohrs angepasst ist (Einheit dB[A]).



Abbildung 1: 380/220-kV-Freileitung mit 600-mm²-Zweierleiterbündeln, im Hintergrund Gebäude für die Überprüfung der Einhaltung der Lärmschutzverordnung

abstützen und im gesamten Bereich der Einflussparameter einen statistischen Mittelwert repräsentieren.

Variantevergleiche für die Auslegung von Freileitungen spielen für Umweltverträglichkeitsstudien eine zentrale Rolle. Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Beziehung war, dass die relativen Parameterabhängigkeiten den messtechnischen Beobachtungen entsprechen und in diesen Abhängigkeiten keine Diskontinuitäten auftreten.

Die Bestimmung des Jahresbeurteilungspegels nach der aktualisierten Wegleitung [1] wurde bereits im Computerprogramm HVLBuzz implementiert (vgl. hierzu Beitrag «Koronaschallberechnung mit HVLBuzz»).

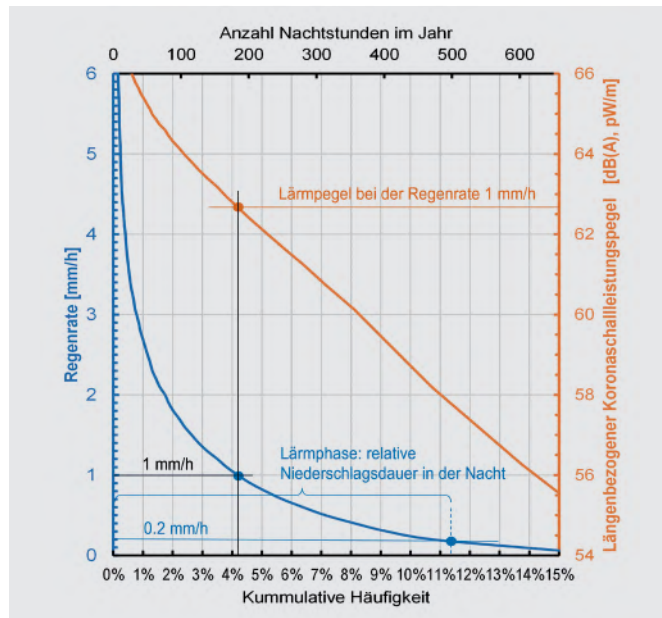


Abbildung 2: Auswertung einer Regenstatistik am Beispiel des Standorts Kloten über die Dauer vom 1.1.2000 bis 31.12.2009 und Lärmpegelberechnung für ein typisches Zweierleiterbündel einer 380-kV-Freileitung mit einem Leiterquerschnitt von 600 mm² bei einer Randfeldstärke von 16 kV/cm

Blaue Kurve: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsrate, Bestimmung der relativen Regendauer in der Nacht (Regenrate >0,2 mm/h)

Orangene Kurve: Zur Regenrate zugehöriger Lärmpegel, mit eingezeichnetem Pegel bei der Regenrate 1 mm/h (längenzugehöriger Koronaschalleistungspegel)

Referenzdokumente

- [1] FKH-Bericht: A23/170-1, «Wegleitung, Schallpegelberechnung und Beurteilung von Koronalärm von Hochspannungsfreileitungen», Februar 2024
- [2] EMPA-Bericht vom 30. Mai 2016, Aufarbeitung der CONOR-Forschungsergebnisse für den Vollzug – Update des Berichts: Empa-Nr. 452'574
- [3] FKH-Bericht: A23/170-2, «Wegleitung, Schallpegelberechnung und Beurteilung von Koronalärm von Hochspannungsfreileitungen, erläuternder Bericht», März 2024
- [4] R. Lings (Project Manager), EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and above, third edition, Electric Power Research Institute, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California, Ed. 3, Dec 2005



AUTOR

Reinhold Bräunlich

Dr. sc. techn. ETH

Projektingenieur

Kabelprüfung an einem 150-kV-City-Kabel

Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) hat zwischen dem UW Frohalp und dem UW Katz eine neue Kabelleitung gebaut. Es wurde ein sogenanntes City-Kabel über eine Strecke von ca. 4'910 m verlegt. In dem stark besiedelten städtischen Gebiet soll das magnetische Streufeld, zur Einhaltung der NISV (Verordnung über den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung), möglichst reduziert werden. Das von Nexans hergestellte Kabel, welches in ein Rohr eingezogen wurde, bestand deshalb aus drei verdrehten Einleiterkabeln. Auf der Kabelstrecke sind acht Crossbonding-Muffen eingebaut. Im UW Katz sind die Kabel mit einem Stecker Connex Gr. 6 in die GIS eingeführt. Auf der anderen Seite – im UW Frohalp – sind in der innen liegenden 150-kV-Freiluftschaltanlage Nexans-Freiluftendverschlüsse verbaut. Die Kabeldaten sind nachfolgend aufgelistet.

Eckdaten Kabel

Kabel XDFFCuCuTT-Y 3 x 1 x 500 mm² Cu, 150 kV
 Kabeldurchmesser: max. 131 mm
 Kabelgewicht: ca. 26,2 kg/m
 Kapazität: ca. 1185 nF/Phase

Trasseelänge 4'910 m

Querschnitt 3 x 1 x 500 mm² Kupfer

Garnituren 8 x 3 Crossbonding-Muffen
 1 x 3 Freiluftendverschlüsse im UW Frohalp
 1 x 3 Stecker Connex Gr. 6

Die Prüfanlage wurde im UW Frohalp aufgestellt. Es wurden sieben Resonanzdrosseln mit je 80 H parallel verschaltet, um eine Gesamtinduktivität von 11,4 H für den Prüfkreis bereitzustellen. Zusammen mit der Gesamtkapazität des Kabels von 1185 nF ergab dies eine Prüffrequenz von 43,2 Hz. Das Kabel wurde während 15 Minuten mit 2,2 U₀ getestet. Die Beurteilungskriterien waren kein Durchschlag während der gesamten Prüfdauer und keine phasenkorrelierten Teilentladungen bei

1,5 U₀. Während der Hochspannungsprüfung bei 190 kV (2,2 U₀) wurde an allen Garnituren (Freiluftendverschlüssen, Steckern und den acht Muffen) eine Teilentladungsmessung durchgeführt. Die Teilentladungen wurden mittels Hochfrequenzstromwandlern ausgekoppelt. Aufgrund der gegebenen Verhältnisse im UW Frohalp wurde die Prüfanlage im Gang zwischen den Feldern aufgebaut (siehe Abbildung 1). Die Endverschlüsse waren auf einer erhöhten Plattform aufgestellt. Die Verbindung zwischen Prüfanlage und dem zu prüfenden Kabel wurde mit einem Prüfkabel hergestellt. Diese Verbindung gewährleistet in den beengten Platzverhältnissen eine teilentladungsfreie Verbindung. Eine Freiluftverbindung wäre mit den gegebenen Abständen nicht teilentladungsfrei möglich gewesen. Das Prüfkabel selbst wurde einseitig mit einem Freiluftendverschluss konfektioniert. Auf der anderen Seite ist ein Stecker Connex Gr. 5S montiert. Diese Konfiguration erlaubt eine grosse Flexibilität, erfordert aber den Einsatz einer Prüfmuffe mit einer steckbaren Durchführung, um die Verbindung herzustellen (siehe Abbildung 2). Mit der so bereitgestellten Prüfanlage konnte die Prüfspannung schnell,



Abbildung 1: Prüfanlage mit Prüfkabel, geprüfte Kabel im Hintergrund oben

effizient und teilentladungsfrei für alle drei Phasen bereitgestellt werden. Eine solche Prüfung verdeutlicht die Vorteile des modularen Prüfanlagensystems der FKH. Die Prüfanlage kann an eine Vielzahl von Umgebungs- und Prüfbedingungen angepasst werden und ermöglicht eine zügige und flexible Durchführung von Hochspannungsprüfungen. Die drei Phasen haben die Prüfung bestanden.



Abbildung 2: Einspeisung mit Prüfmuffe und Durchführung (rot eingekreist)



AUTOR

Dominic Kleger

BSc El.-Ing. FH
Projekttingieur



AUTOR

Dr. Henrik Menne

Dr. sc. ETH
Projekttingieur

Neue akustische Kamera

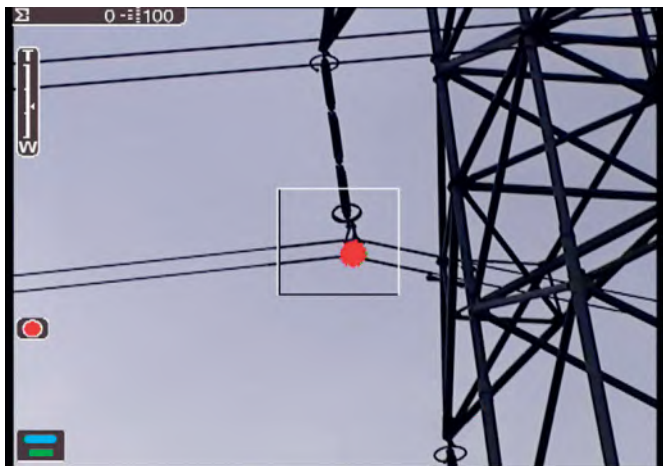


Abbildung 1: Entladungen an einer Seilklemme, Aufnahme mit UV-Kamera

Mit akustischen Detektoren können äussere Teilentladungen, zum Beispiel Koronaentladungen, lokalisiert werden. Seit 1986 wird bei der FKH eine «Corona Gun» eingesetzt. Dieser handgehaltene Ultraschalldetektor ähnelt einer Pistole mit aufgesetztem Parabolreflektor. Nachfolgende Generationen von «Corona Guns» sind auch heute noch im Einsatz und bieten unterschiedliche Reflektorgeometrien, um die Entladungen genauer lokalisieren zu können. Die Anwendung erfordert etwas Erfahrung, da die Schallwellen von den meisten Oberflächen reflektiert werden.

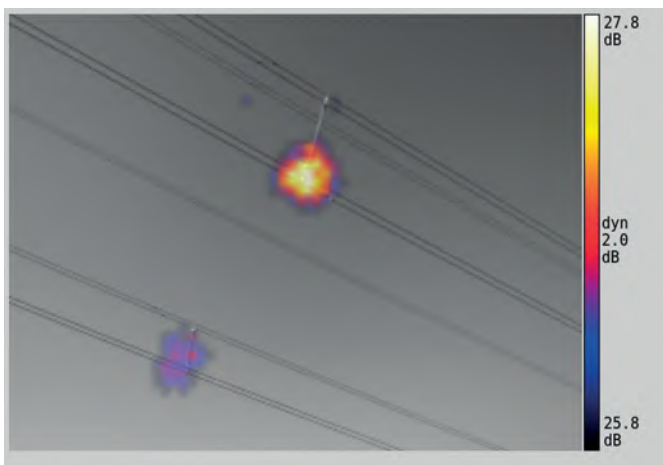


Abbildung 2: Koronaentladungen, Aufnahme mit akustischer Kamera

Seit ca. 10 Jahren hat die FKH eine Ultraviolett-Kamera im Einsatz. Diese für den Ausseneinsatz konzipierte UV-Kamera verwendet einen «Solar-Blind-Filter» und ist daher nicht über das gesamte UV-Spektrum empfindlich, sondern nur für Strahlung im Bereich 240–280 nm. Abbildung 1 zeigt eine Aufnahme der UV-Kamera: An der Seilklemme der 380-kV-Leitung konnten Entladungsaktivitäten festgestellt werden. Derartige Entladungen sind keine Besonderheit. Sie können an Rauigkeiten an Leiterseilen oder Armaturen auftreten. Ab einer bestimmten TE-Intensität etwa ab 5 Picocoulomb können sie mit der UV-Kamera auf 15 Meter Entfernung detektiert werden. Es ist aber nicht möglich, anhand der Aufnahmen direkt auf eine Entladungsamplitude zu schliessen.

In Abbildung 2 sind Entladungen an Klemmen von Phasenabstandshaltern zu sehen. Das Bild wurde mit einer neuen akustischen Kamera aufgenommen, die eine Matrix von Mikrofonen verwendet (Abbildung 4). Der Frequenzbereich reicht von 2 kHz bis 100 kHz und kann begrenzt werden, um zum Beispiel Hintergrundgeräusche herauszufiltern. Die Aufnahme und Ortung der Entladungen am Fuss der Durchführung in Abbildung 3 war damit auch bei lauten Hintergrundgeräuschen möglich. Im direkten Vergleich zur UV-Kamera ist die akustische Kamera

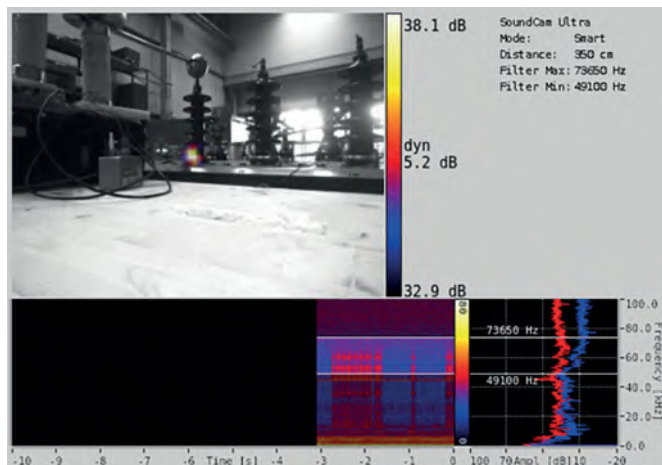


Abbildung 3: Entladungen an einer Durchführung, Aufnahme mit akustischer Kamera



Abbildung 4: Mikrofonmatrix an der akustischen Kamera

etwas weniger empfindlich und bietet keinen Zoom. Ausreichend starke Koronaentladungen werden von beiden Kameras detektiert. Die neue akustische Kamera bietet somit eine einfache Bedienung und erweitert die Möglichkeiten des Geräteparks der FKH zur Ortung von Teilentladungen.



AUTOR

Philippe Alff
MSc ETH ETIT
Projektingenieur

Dimensionierung von RC-Snubber-Filtern zur Begrenzung von Schaltüberspannungen an Kompensationsdrosseln im Mittelspannungsnetz

Einleitung

Die Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) wurde mit einer Studie beauftragt, die Wirkung von RC-Schutzfilter-Schaltungen zu untersuchen und diese zu dimensionieren, um neu in das 36-kV-Mittelspannungsnetz zu integrierende Blindleistungskompensationsdrosseln gegen Schaltüberspannungen zu schützen.

Beim Ausschalten von kleinen induktiven Strömen, wie z.B. an Kompensationsdrosseln, sind Leistungsschalter (LS) in der Lage, solche Ströme vor ihrem natürlichen Stromnulldurchgang zu unterbrechen. Durch diesen sogenannten Stromabriss (engl.: current-chopping) kommt es zu transienten Überspannungen (TRV), deren Scheitelwert von der Amplitude des abgerissenen Stromes sowie von der Charakteristik der Kompensationsdrossel abhängt. Die Frequenzen und die daraus resultierenden Spannungssteilheiten (du/dt) werden durch die Drosselinduktivität und die parasitäre Drosselkapazität bestimmt und liegen dabei im kHz-Bereich (vgl. Abbildung 2).

Solche Überspannungen können, in Abhängigkeit der Lichtbogenzeit zum Ausschaltzeitpunkt (Kontaktabstand der Lichtbogenkontakte des LS), zu Rückzündungen des Leistungsschalters bzw. zu virtuellem Stromabriss in den Nachbarphasen des erstlöschenden Pols führen. Derartige Rückzündungen haben sehr hochfrequente Überspannungen im MHz-Bereich zur Folge, welche die Drosselwicklungen sowie den Leistungsschalter dielektrisch stark beanspruchen und zu forcierter Alterung oder sogar zum Ausfall dieser Betriebsmittel führen können.

RC-Schutzfilter-Schaltungen können, neben anderen Massnahmen, Drosselwicklung und Leistungsschalter vor Schäden durch Isolationsfehler schützen und somit direkt und indirekt Kosten im Zusammenhang mit den Reparaturen und Ausfallzeiten von Anlagen reduzieren.

Vorgehensweise

Für die Auslegung bzw. elektrische Spezifikation der RC-Schutzfilter-Schaltungen wurde in dieser Studie in verschiedenen Schritten vorgegangen. Dabei wurden u.a. analytische Berechnungen sowie Berechnungen mithilfe der Simulations-Software EMTP¹ durchgeführt. Die folgenden Teilschritte wurden umgesetzt:

- Berechnung von transienten Wiederkehrspannungen an den Kompensationsdrosseln (3 Mvar, 5 Mvar) in Abhängigkeit variabler Streukapazitäten und variabler Abreissströme
- Berechnung möglicher Überspannungen beim Rückzünden des Leistungsschalters
- Abgleich der berechneten Überspannungen mit den geltenden Prüfwerten der internationalen Normung (IEC² 62271-110) für Leistungsschalter sowie mit Typen-Test-Daten
- Definition der zu tolerierenden TRV an Drossel und Leistungsschalter auf Grundlage der Testdaten und internationaler Standards, um Rückzündungen des Leistungsschalters zu minimieren
- Abgleich der definierten Werte mit den Ansprechpegeln der installierten Überspannungsableiter
- Parameterstudie zu Widerstand und Kapazität des RC-Schutzfilters in Abhängigkeit des Abreissstromes zur Bestimmung von Elementgrenzwerten zur Einhaltung der definierten Überspannungen
- Spezifikation der elektrischen Kenngrößen für Widerstand und Kapazität (Strom, Spannung, Leistung, Energieaufnahmevermögen, Spannungsfertigkeit)
- Kontaktaufnahme mit Herstellern der RC-Schutzfilter zur Rücksprache der Spezifikationen und zur Variantenausarbeitung
- Messungen von Überspannungen bei Inbetriebnahme (optional) zur Validierung der Berechnungen und Qualitätssicherung

¹ EMTP – Electromagnetic Transients Program

² IEC – International Electrotechnical Commission

Berechnungen

Für die Berechnung der zu erwartenden Überspannungen wurde die dreiphasige Situation der Kompensationsdrosseln im isolierten Netz modelliert (vgl. Abbildung 1). Auf die Modellierung im Programm EMTP soll an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen werden. Für den bei diesen Schalthandlungen untersuchten Frequenzbereich wurden keine Wellenwiderstands- und Laufzeitmodelle genutzt. Die Modellierung auf Basis konzentrierter Elemente ist an dieser Stelle ausreichend. Das Modell wurde anhand von analytischen Berechnungen und dem Schaltfall zugrunde liegenden IEC-Standard³ validiert.

Es wurde das Einschalt- sowie das Ausschaltverhalten untersucht. Bei den Ausschaltungen wurden die Überspannungen pro Phase bzw. zwischen den Phasen bei Variation der Filterelemente, des Abreissstromes und der Ableiter-Anschwelle ermittelt. Die Einschaltstrom-Scheitelwerte sowie transiente Einschaltüberspannungen wurden ermittelt und die Nennströme durch das Filter im stationären Betrieb bestimmt.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Strom-/Spannungsverlauf an einer der Kompensationsdrosseln bei Stromabriss des erstlöschenden Pols des Leistungsschalters.

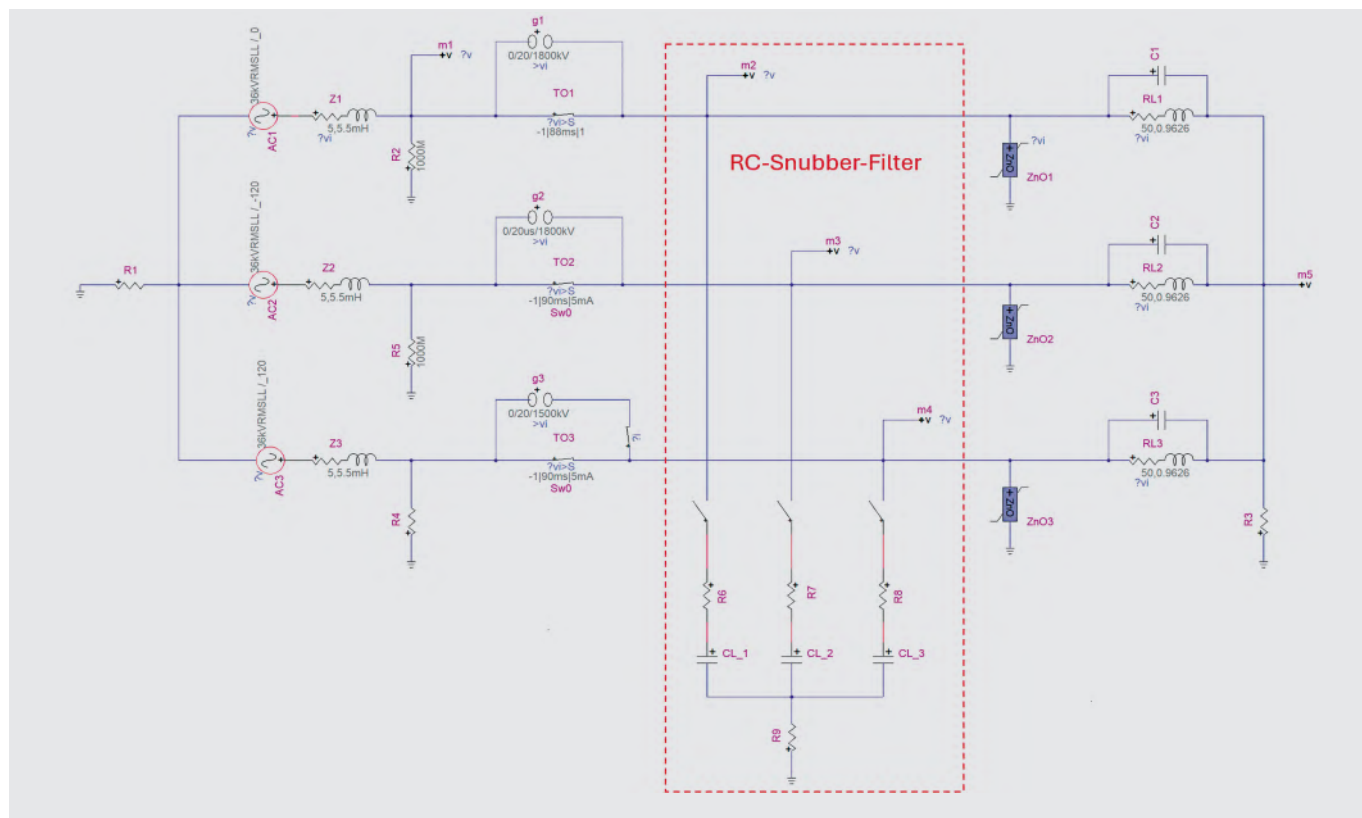


Abbildung 1: Dreiphasiges Modell unter Verwendung konzentrierter Elemente

³ IEC 62271-110:2023: Inductive load switching

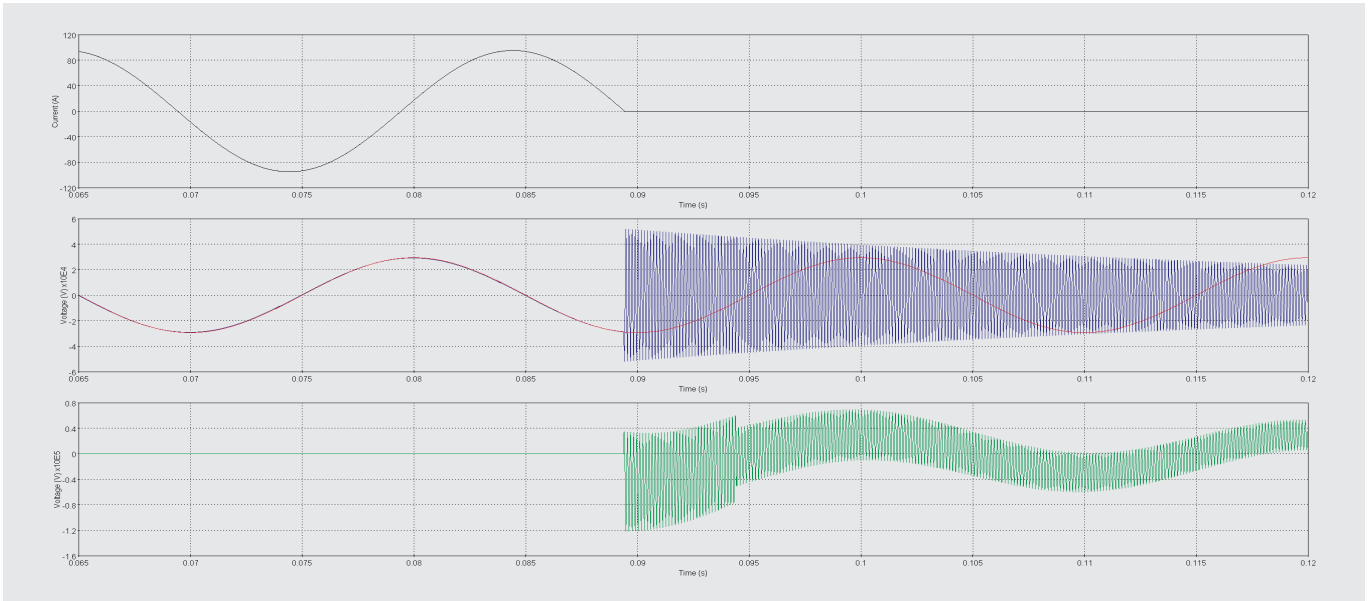


Abbildung 2: Strom-/Spannungsverlauf bei der Unterbrechung des Stroms durch eine Kompensationsdrossel. Strom (schwarz), Netzspannung (rot), Spannung an Drossel (blau), Spannung über den Schalterkontakten (grün)

Zur Spezifikation der elektrischen Kenngrößen von Widerstand und Kapazität des RC-Snubber-Filters müssen neben der Stromtragfähigkeit oder den Überspannungen auch die Leistung, das Energieaufnahmevermögen und die Spannungsfertigkeit (Isolationkoordination) berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden Parameterstudien durchgeführt, in welchen die

relevanten Parameter in definierten Grenzen simultan verändert wurden, um den Einfluss auf die relevanten Messgrößen zu ermitteln. Eine sinnvolle Definition der Parametergrenzen wurde auf Basis von Herstellerangaben (R, C), Typentestberichten (Abreissstrom) und IEC-Standards (parasitäre Drosselkapazität) bzw. durch Vorabrechnungen (Iterationen) vorgenommen. Abbildung 3

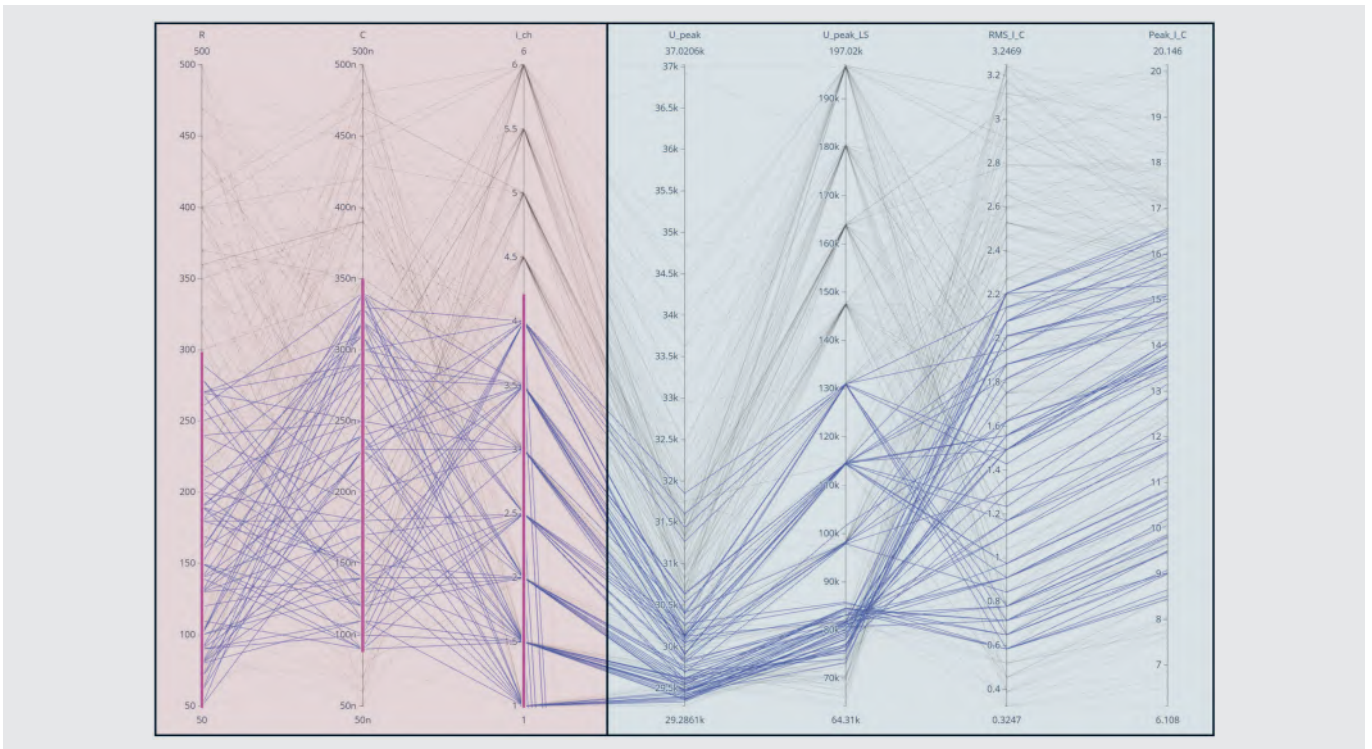


Abbildung 3: Spider-Diagramm zur Illustration der Abhängigkeiten von Strömen und Spannungen (rechts) an Drossel und Leistungsschalter bezüglich der Snubber-Elemente und des Abreissstroms (links)

zeigt beispielhaft die komplexen Abhängigkeiten zwischen den zu variierenden Parametern (Snubber-Elemente und Abreissstrom) und den resultierenden Strömen und Spannungen an Kompensationsdrossel und Leistungsschalter.

Ergebnisse

Durch den Einsatz eines RC-Snubber-Filters können Überspannungen aufgrund von Stromabriss in Amplitude und Frequenz markant reduziert werden. Dieser hilft somit, ein Rückzünden des Leistungsschalters zu minimieren bzw. vollständig zu vermeiden. Im Falle von Rückzündungen werden auch diese Überspannungen durch den Snubber-Filter effektiv begrenzt.

Wie in der aktuellen Studie vorliegend, kann es in der Mittelspannung zudem aufgrund der Kopplung (induktiv, kapazitiv) der drei Phasen des Leistungsschalters in einem Gehäuse zu virtuellen Stromabrissen (indizierten bzw. erzwungenen) in den Nachbarphasen des erstlöschenden Pols kommen. Dies hat hohe Überspannungen zur Folge, welche ebenfalls durch den Filter begrenzt (gedämpft) werden.

Im konkreten Fall wurde eine RC-Kombination ermittelt, welche es erlaubt, die zwei Kompensationsdrosseln von 3 Mvar bzw. 5 Mvar mit Snubber-Filtern gleicher Elementpaarung zu schützen. Dabei wurden die Überspannungen in Abhängigkeit der Grösse der Filterelemente und des Abreissstroms berechnet, um diese mit der zu tolerierenden Wiederkehrspannung zu vergleichen. Die ermittelten Spannungen überschreiten, im Gesamten, den Leistungsschalter charakterisierender Fenster von Abreissströmen, nicht die definierten Spannungsgrenzwerte.

Zudem wurden neben der Strom- und Spannungscharakteristik auch die Leistung, das Energieaufnahmevermögen und die Spannungsfertigkeit (Isolationkoordination) bei der Spezifikation der Elemente berücksichtigt.

Auf Basis der Spezifikation wurden mehrere Hersteller für RC-Snubber-Filter kontaktiert und verschiedene Varianten der Ausführung (z.B. gekapselt [berührungssicher], Freiluft, hängend) evaluiert. Auf Basis der Berechnungen und Begehungen vor Ort konnte in Abstimmung mit den Herstellern eine Optimierung der Angebote erzielt werden.

Es ist angedacht, je nach Projektverlauf, bei der Inbetriebnahme Messungen der Wiederkehrspannungen vorzunehmen, um die Berechnungen zu validieren.

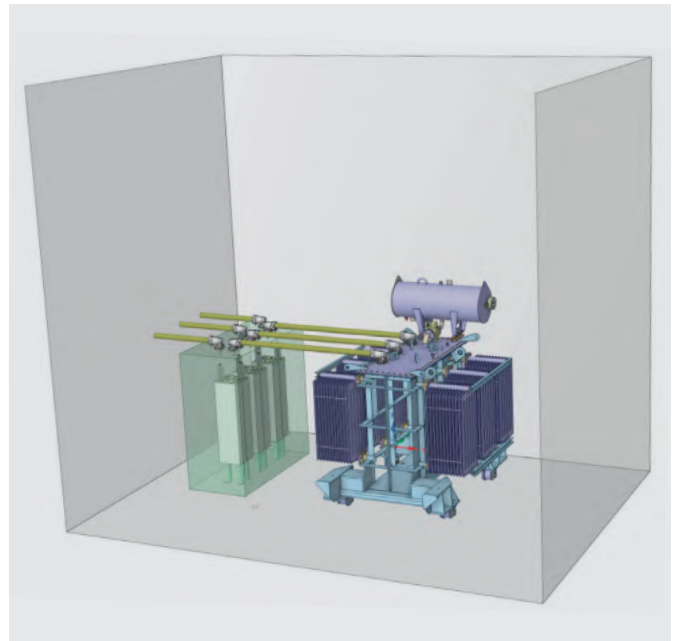


Abbildung 4: Beispiel eines möglichen Aufbaus eines berührungssicheren Filters an einer Kompensationsdrossel im Mittelspannungsbereich in Anordnung in einer Trafo-Box

Referenzdokumente

- [1] IEC 62271-100, «High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers», Edition 3.0 – 2021-07
- [2] IEC 62271-110, «High-voltage switchgear and controlgear – Part 110: Inductive load switching», Edition 5.0 – 2023-03
- [3] IEC 60071-1, «Insulation coordination – Part 1: Definitions, principles and rules», Edition 9.0 – 2019-08
- [4] The Experience Acquired Sizing Snubbers to Mitigate Switching Transients in Industrial Power Systems, Claudio S. Mardegan et al., IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 5, September/October 2016
- [5] IEEE C37.06-2000, «AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities», 2000



AUTOR

Gunnar Andrae

M. Eng. Dipl. Ing. (FH)

Projektingenieur

Probenahme von Isolierölen aus Transformatoren und Wandlern

Eine Probenahme von Isolierölen erfolgt in der Absicht, das entnommene Öl zu analysieren und aufgrund der erhaltenen Daten Rückschlüsse auf den Zustand eines ölisierten Betriebsmittels zu machen. Darum gilt: Erst eine korrekt durchgeführte Öl-Probenahme an einem Transformator, Wandler oder Kabelendverschluss ermöglicht repräsentative Analysresultate und somit eine korrekte Zustandsbeurteilung!

Im Folgenden soll auf wichtige Punkte eingegangen werden, die zum Ziel haben, eine repräsentative Probe aus einem Betriebsmittel zu entnehmen unter Vermeidung allfälliger Kontamination. Das detaillierte Vorgehen bei der Probenahme ist in unseren Arbeitsanweisungen festgehalten. Auf Wunsch stellen wir unseren Kunden eine Vorlage für ein Entnahmeprotokoll und Klebetiketten zur Beschriftung zur Verfügung.

Arbeitsplatz vorbereiten

Trockene, saugfähige Unterlage für Werkzeug, Flansch, Probenahme-schlauch und Thermometer



Beschriftung der Gebinde

Auf Vollständigkeit achten

Damit die nach Abschluss der Analyse gewonnenen Werte eindeutig dem beprobten Equipment zugeordnet werden können und bei späteren Analysen auf historische Daten zurückgegriffen werden kann, müssen mindestens folgende Informationen auf der Flasche notiert werden:

- **der Auftraggeber**
- **das Datum der Probenahme**
- **der Standort, die Fabrikationsnummer und die Spannungsebene des Betriebsmittels**
- Für die richtige Interpretation des Wassergehaltes braucht es zusätzlich eine Messung der Öltemperatur direkt nach Probenahme.

Wir empfehlen, zusätzlich folgende Informationen auf der Flasche zu notieren:

- **Bezeichnung des Equipments (Trafo 1, 2 usw.)**
- **Typ, Unterspannung, Leistung des Betriebsmittels**
- **Name des Probenehmers**
- **Witterungsbedingungen**

Da der Platz für Etiketten auf Spritzen beschränkt ist, empfehlen wir, ein Probeentnahmeprotokoll zu führen. Bei gleichzeitiger Befüllung einer Flasche und einer Spritze aus demselben Betriebsmittel reicht ein Etikett mit der Fabrikationsnummer des Betriebsmittels auf der Spritze aus.

Montage des passenden Flansches

Auf Sauberkeit achten, bevor der Adapter-Flansch montiert wird

Je nach Ausführung des Trafos gibt es verschiedene Entnahmestellen. Bei einem Hahn wird die Abschlusskappe entfernt, bei einem Schieber der Planflanschdeckel demontiert (Kessel für tropfen-des Öl bereitstellen).

Die darunterliegende Oberfläche muss mit einem Lappen von Partikeln und gealtertem Öl befreit werden. Danach den Adapter-Flansch und den Probenahmeschlauch montieren.

Spülen

Mit ausreichender Menge Öl spülen

Um eine repräsentative Probe zu erhalten, ist es sehr wichtig, gefangenes Öl, welches nicht in Zirkulation mit dem Trafoinhalt ist, auszuspülen: Je nach Dimensionierung der Entnahmestelle muss bei einem kleinen Hahn mit ca. 0,5 Liter und bei einem grossen Schieber mit 2 bis 3 Liter Öl gespült werden. Dieses Öl wird verworfen.

Zudem sollen der Flansch und der Probenahmeschlauch gespült werden.

Füllen einer Spritze

Luftfreie Probe

Die Probe soll möglichst luftfrei sein:

Hierzu die leere Spritze an den Probenahmeschlauch andocken und den Hahn (am Schlauch) langsam öffnen, sodass der Kolben langsam nach hinten gedrückt wird und das Öl möglichst ohne Luft in den Zylinder strömt. Es ist kaum zu vermeiden, dass eine Luftblase entsteht. Diese muss anschliessend bei senkrecht gehaltener Spritze herausgedrückt werden.

Füllen einer Flasche

Einbringen von Luftfeuchtigkeit vermeiden! Bei Regen darf kein einziger Tropfen in die Flasche gelangen!

Es besteht das Risiko, dass die Probe durch den Vorgang der Probeentnahme mit Wasser kontaminiert wird, entweder durch sich bildende Luftblasen oder durch direkt in die Flasche fallenden Regen: Idealerweise wird der Fluss des Öls mit dem Hahn am Schlauch etwas gedrosselt. Der Strahl soll der Innenwandung der Flasche entlangfliessen, um möglichst keine Luft in die Probe zu bringen. Ein zu starker Strahl würde zu unerwünschter Schaumbildung führen. Die Flasche soll so weit gefüllt werden, dass ca. 1 bis 2 cm Luftpolster bleiben. Dies dient als Expansionspuffer für Temperaturunterschiede zwischen dem Ort der Probenahme, dem Transport und dem Labor. Sofort nach der Probenahme soll die Temperatur des Öls gemessen, notiert und die Flasche dicht verschlossen werden.

Transport der Proben

Es ist darauf zu achten, dass die Proben möglichst wenig Temperaturschwankungen und, im Falle einer Glasflasche oder der Spritze, keinem Licht ausgesetzt werden. Die Probe soll möglichst rasch ins Labor gebracht werden.



Optimal entlüftete Spritze



Flasche mit optimalem Füllstand und angebrachtem Etikett



AUTOR

Peter Frey
Chemielaborant

FKH-Labor für Isolierölanalysen

Analyseaufträge

Nach der Gründung des Öllabors im Jahre 2003 dauerte es sechs Jahre, bis eine jährliche Anzahl von 500 Proben erreicht wurde. Bis 2020 stieg die Anzahl der analysierten Proben bis auf ca. 1800 an, seither bleibt sie etwa konstant. Mit 1833 analysierten Proben wurde die Anzahl vom Vorjahr wieder erreicht. Der Umsatz des Rekordjahres 2020 wurde noch leicht übertroffen, da vermehrt aufwendigere Zersetzungsgas- und Furananalysen angefragt wurden.

Notfalldienst

Im Jahr 2023 wurden fünf Notfalleinsätze nach Buchholzalarmen durchgeführt. Nur in einem Fall waren Zersetzungsgase nachweisbar. Bei den anderen Fällen handelte es sich um Störungen des Schutzes oder der Betreiber wollte nach einem Kurzschluss im Netz Gewissheit haben, dass der Trafo unbeschädigt ist.

Isolierölanalysen von Hochspannungskabelendverschlüssen

Die traditionellen (nicht steckbaren) Endverschlüsse von kunststoffisolierten Hochspannungskabeln enthalten eine Isolierflüssigkeit, welche bei höheren Spannungen oft eine Silikonflüssigkeit oder ein synthetischer Ester ist. Mit Ausnahme der Furananalyse können bei diesen Flüssigkeiten dieselben Bestimmungen wie bei Mineralölen durchgeführt werden. Seit 2013 wurden total über 200 Analysen von Flüssigkeiten aus Endverschlüssen durchgeführt. Dies geschieht in der Regel nicht routinemässig, sondern nach Störfällen oder bei vermuteten systematischen Problemen eines Endverschlusstyps. In einigen Fällen konnten zu hohe Wassergehalte festgestellt werden. Dies korrelierte jeweils mit einer zu tiefen Durchschlagsspannung der Proben. Bei den bis anhin analysierten Proben überstiegen die Zersetzungsgasgehalte die Referenzwerte nicht. Bei der Interpretation der Gaswerte muss berücksichtigt werden, dass hohe Methan- und manchmal auch Ethangehalte als Beiprodukte der Vernetzung der Poly-

ethylen-Kabelisolierung entstehen und in den Endverschluss diffundieren können. Hohe Methan- oder Ethangehalte allein ohne Auffälligkeiten bei anderen Parametern deuten somit noch nicht auf ein Problem hin.

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 2022 bei der FKH alle im «guten» bzw. «befriedigenden» Bereich.



AUTOR

Dr. Thomas Heizmann

Dr. sc. techn. ETH
Leiter Isolieröllabor

Neuer FKH-1800-kV-Stossgenerator für Labor- und Vor-Ort-Einsätze

Die FKH hat sich im Jahr 2022 für die Anschaffung eines neuen Stossgenerators entschieden.

Die Gründe für diese Entscheidung waren:

- Alterung der Komponenten des Eigenbau-Stossgenerators, der seit 1983 im Einsatz ist (siehe Abbildung 1)
- Erneuerung der zugehörigen veralteten Mess- und Auswertesysteme, im Einsatz seit 2012
- Erhöhung der Ladespannung von 800 kV auf 1'800 kV und der Ladeenergie pro Stufe von 4 kJ auf 10 kJ



Abbildung 1: Bisheriger FKH-800-kV-Stossgenerator im Einsatz in Niedergösgen

Die Hauptanforderungen an den neuen Stossgenerator waren Mobilität und Vor-Ort-Tauglichkeit. Nach einer intensiven Evaluationsphase entschied sich die FKH für den Kauf eines 18-stufigen Stossgenerators von Haefely: Delta-Typ, 1'800 kV, 180 kJ. Als Spannungsteiler wurde ein zweistufiger kapazitiv gedämpfter Teiler (1'600 kV, 525 pF) gewählt.



Abbildung 2: Werkabnahme des komplett aufgebauten 1'800-kV-Stossgenerators. Die Anlage wurde auf dem erweiterten Grundrahmen aufgebaut.

Die Besonderheiten des FKH-Stossgenerators gegenüber einem Standardprodukt waren:

- Der modulare Aufbau, welcher erlaubt, die Stufenanzahl von 6 bis 18 nach Bedarf in 3er-Schritten zu variieren
- Erweiterter Grundrahmen für Stossgenerator und Mess-teiler für mehr Stabilität im Feld und zur Beherrschung der Windlast (siehe Abbildung 2)
- Verwendung von Speziallack für GFK-Teile zur Erhöhung der Robustheit und Witterungsbeständigkeit der Isolier- und Tragstruktur



Abbildung 3: Speziell angefertigte Planen zur Abdeckung des Stossgenerators mit verschiedenen Stufenzahlen



Abbildung 4: Speziell angefertigte Transportkisten



Abbildung 5: Schulung des FKH-Personals durch Haefely zur Montage des Stossgenerators

- Speziell angefertigte Planen zur Abdeckung des Stossgenerators im Labor und im Feld (siehe Abbildung 3)
- Speziell angefertigte Transportkisten für den Transport und die Lagerung des Stossgenerators, des Spannungsteilers und der Messtechnik (siehe Abbildungen 4 und 6)
- Im Hinblick auf eine zukünftige Akkreditierung unserer Prüfungen in der neuen Prüfhalle in Niedergösgen und um die Rückführbarkeit der Messung sicherzustellen, wurde die Messkette bestehend aus Spannungsteiler, Messkabel und Auswertesysteme für Stoss- und Wechselspannung nach SCS kalibriert

Die Werksabnahmeprüfung wurde im Juni 2023 am komplett montierten Stossgenerator durchgeführt.

Anschliessend wurden die FKH-Techniker in die Montage und Demontage der Anlage eingewiesen (siehe Abbildung 5).

Nach Herstellung aller Transportkisten (siehe Abbildung 6) wurde im September 2023 die Abnahmeprüfung vor Ort in der Logistikhalle der Versuchsstation Niedergösgen durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Deckenhöhe der Halle wurde die Abnahmeprüfung an einer 9-stöckigen Anlage durchgeführt (siehe Abbildung 7).



Abbildung 6: Transport aller Kisten mit einem Sattelschlepper



Abbildung 7: Abnahmetest in der FKH-Versuchsstation mit verschiedenen Lastkondensatoren

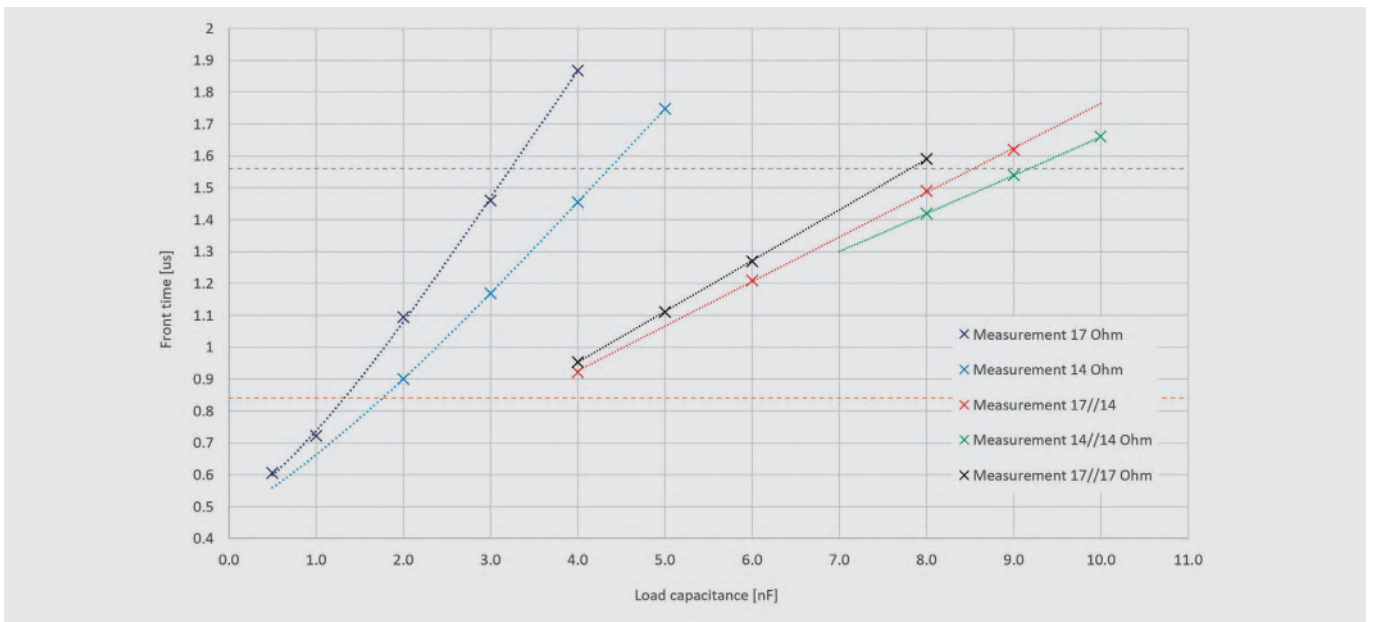


Abbildung 8: Verifikation der Anstiegszeit in Abhängigkeit des Lastkondensators für verschiedene Dämpfungswiderstände

Während der mehrtägigen Abnahmeprüfung in der FKH-Versuchsstation wurden insbesondere die gemessenen Frontanstiegszeiten in Abhängigkeit der Lastkapazität und des Dämpfungswiderstandes mit den Ergebnissen aus der Modell-Ersatzschaltung verglichen (siehe Abbildungen 8 und 9).

Die neu geplante Prüfhalle der FKH in Niedergösgen mit einer Deckenhöhe von 9 m und einem Hallenkran wird voraussichtlich im Juni 2024 fertiggestellt. Damit wird es möglich sein, den 12-stufigen Stossgenerator in der Prüfhalle aufzustellen und zu betreiben. Für Prüfungen vor Ort und im Freien kann der Stossgenerator mit bis zu 18 Stufen betrieben werden.

Die Abnahmeprüfungen und Montagetrainings haben gezeigt, dass der Stossgenerator einsatzbereit ist und ab sofort für Projekte in der Versuchsstation und vor Ort zur Verfügung steht.



Abbildung 9: Messkurven-Parametrisierung mit dem Auswertesystem

AUTOR

Vahe Der Houhanessian
 Dr. sc. techn. ETH
 Projektingenieur

AUTOR

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

Neu erlangte ISO-45001-Zertifizierung für Arbeits- und Gesundheitsschutz

Die FKH hat im Herbst 2023 erfolgreich die ISO-45001-Zertifizierung bestanden. Der Beitrag soll einen Überblick zum Weg hin zur Zertifizierung geben und Erkenntnisse beleuchten, welche die FKH auf diesem Weg gemacht hat.

Ausgangslage

Die Mitarbeitenden der FKH sind durch ihre Tätigkeit, den damit verbundenen hohen praktischen Anteil der Arbeit und die variierenden Arbeitsorte vor Ort generell erhöhten Risiken ausgesetzt. Dies beinhaltet unter anderem den Umgang mit hohen Spannungen und Strömen im Bereich Elektrotechnik, den Umgang mit schwebenden Lasten und das Arbeiten in der Höhe im Zusammenhang mit der Logistik und den Prüfaufbauten sowie den Umgang mit Gasen unter Druck sowie mit Öl und anderen Chemikalien im Rahmen des FKH-Isolieröllabors. Weiter betreibt die FKH eine Werkstatt für den Unterhalt und die Entwicklung ihres Prüfmaterials, in welcher Holz- und Metallbearbeitung sowie Schweiß- und Verdrahtungsarbeiten durchgeführt werden.

Um zu verstehen, weshalb Unfälle entstehen und wie diese systematisch verhindert werden können, werden in der Theorie häufig die Unfallpyramide (Abbildung 1) sowie das Schweizer-Käse-Modell (Abbildung 2) herangezogen. Es lassen sich daraus folgende Erkenntnisse ableiten:

- Unsichere Zustände und schwere oder sogar tödliche Unfälle stehen in einem Verhältnis zueinander. Soll die Wahrscheinlichkeit von Unfällen reduziert werden, muss man die Anzahl unsicherer Zustände minimieren.
- Technische und organisatorische Massnahmen, Kommunikation und Information, Qualifizierung und Wissen sowie die Einstellung und das Verhalten von Mitarbeitenden bilden je eine separate Schutzwirkung aus, welche Unfälle verhindern kann. Keine dieser Schichten ist aber perfekt dicht. Ein Unfall wird nur dann effektiv verhindert, wenn eine Lücke in der einen Schicht durch eine dahinterliegende

Schicht abgefangen wird. Je mehr Lücken pro Schicht existieren, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Summe aller Schichten nicht ausreicht, den Unfall zu verhindern. Je dichter die Schichten sind und je mehr Schichten existieren, desto wahrscheinlicher wird ein Unfall verhindert.

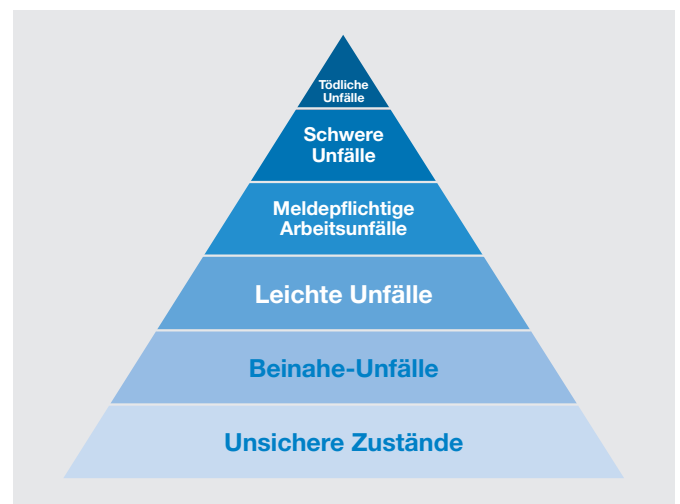


Abbildung 1: Unfallpyramide im Arbeitsschutz

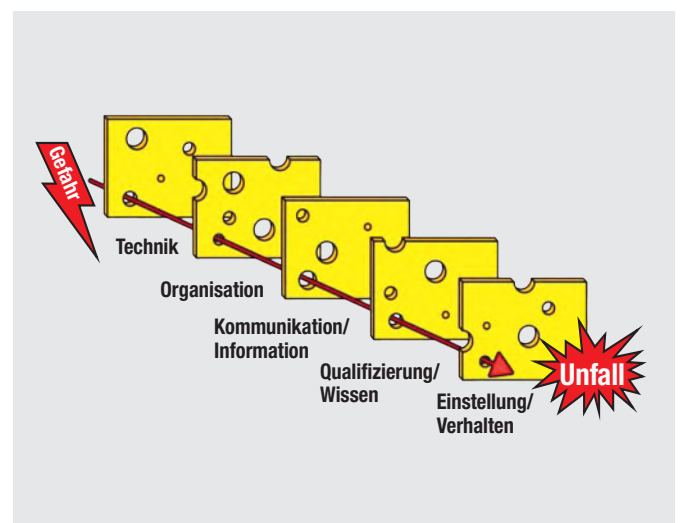


Abbildung 2: Schweizer-Käse-Modell zum Entstehen von Unfällen nach Reason (Quelle: <https://www.bauz.net/bauz-themen/bauz-sicherheit/unfaelle-besser-verstehen>)

Motivation und der Weg der FKH hin zur ISO-45001-Zertifizierung

Die zugrunde liegende Motivation, den Fokus auf die Arbeitssicherheit zu legen, fusst im Willen des Vorstands und der Geschäftsleitung, für die Mitarbeitenden der FKH ein sicheres Arbeitsumfeld zu gewährleisten, und im Willen der Mitarbeitenden, sicher von der Arbeit nach Hause zu kommen. Es ist aber branchenübergreifend zu beobachten, dass das Thema Arbeitssicherheit auch bei den Kunden der FKH immer stärker in den Fokus rückt. Auch der sich weiterentwickelnde Stand der Technik – abgebildet über verschärfte Regulierungen und die Verfügbarkeit von SUVA-Checklisten zu immer mehr Themen – zeigt, dass in der Gesellschaft das Thema Arbeitssicherheit über die letzten Jahre an Relevanz zugenommen hat. Mit ein Anstoss, zu untersuchen, wie dicht die verschiedenen «Schutzschichten» bei der FKH effektiv sind und bei welchen Arbeitshandlungen innerhalb der FKH allenfalls noch unsichere Zustände existieren, war ein schwerer Unfall im Jahr 2022, der aber glücklicherweise ohne Langzeitfolgen für die betroffene Person geblieben war.

Das richtige Werkzeug für die FKH zum Erreichen dieses Ziels der Risikominimierung war es, ein Managementsystem nach ISO 45001 neu aufzubauen. Die dahinterliegende Methodik ermöglicht eine ganzheitliche und systematische Herangehensweise, um einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu etablieren. Das Managementsystem an sich ist hierbei aber nur Mittel zum Zweck. Es hilft, dass Erkenntnisse festgehalten, Lücken geschlossen werden und sich mit der Zeit eine schriftlich festgehaltene «Best Practice» etabliert, welche zur Reduktion unsicherer Zustände beiträgt.

Sicheres Arbeiten ist eine Frage der Firmenkultur

Im Zentrum der Arbeitssicherheit stehen aber die Mitarbeiterin und der Mitarbeiter. Es wurden unter anderem folgende Themen intensiv im Team beleuchtet:

- **Die Fähigkeit, Risiken zu erkennen und richtig darauf zu reagieren** – einen wichtigen Beitrag hierzu leisten die interne und die externe Ausbildung der Mitarbeitenden und das Weitergeben von Erfahrungen.
- **Das Lernen aus Fehlern oder gefährlichen Situationen** – einen wichtigen Beitrag dazu leistet die Betriebskultur, in welcher sich Mitarbeitende auch trauen, über vorgefallene gefährliche Situationen oder gemachte Fehler zu sprechen, um anschliessend gemeinsam Massnahmen zu definieren, um die Wahrscheinlichkeit eines erneuten Auftretens zu minimieren.
- **Vier Augen sehen mehr als zwei** – ein wichtiger Beitrag dazu liegt in der bei der FKH bereits lange etablierten Arbeit im Zweierteam und der gegenseitigen Kontrolle von Ingenieur und Mechaniker.

- **Der Wille, sicher zu arbeiten, muss von innen kommen** – einen Beitrag dazu leistet das gemeinsame Erarbeiten von Vorgaben, um sicherzustellen, dass diese mit Augenmass ausgestaltet sind und die Art der Tätigkeiten und den Ausbildungsstand der Mitarbeitenden mitberücksichtigen.
- **Einstellung/Verhalten** – einen wichtigen Beitrag dazu leistet, dass der Mitarbeitende jederzeit das Recht hat, «Stopp» zu sagen, wenn eine gefährliche Situation vorliegt.

Erreichte Ziele

Neben dem Etablieren eines Managementsystems für ISO 45001 konnte eine positive Wirkung auf die Sicherheitskultur innerhalb der FKH erreicht werden, sodass das Bewusstsein gestärkt wurde, dass wir durch einen systematischen Umsatz die Arbeitssicherheit weiter verbessern können. Es werden hier exemplarisch einige umgesetzte Massnahmen aufgelistet:

- **Wissen:** Mithilfe eines externen Experten für Arbeitssicherheit wurden im Vorfeld der Zertifizierung eine Schulung der Mitarbeitenden und zwei Audits durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse flossen in die Dokumente mit ein.
- **Technische Massnahme:** Es wurden ein neuer Stapler und eine neue Hebebühne für den Standort Niedergösgen beschafft, um den Mitarbeitenden optimale Werkzeuge zum sicheren Arbeiten zur Verfügung zu stellen.
- **Technische Massnahme:** Im Öllabor wurde der Bedarf für eine zweite Absaughaube und ein Raum-Monitoringsystem für H₂ und CO ermittelt und ein entsprechendes System ausgelegt.
- **Massnahme zur Verbesserung der Information und Kommunikation:** Die Absprache zwischen FKH und Kunden bei Vor-Ort-Prüfungen wurde mithilfe eines formalen Übergabeprotokolls sowie prüfungsspezifischer Checklisten verbessert.

Weiteres Vorgehen

Über den etablierten kontinuierlichen Verbesserungsprozess bleibt das Thema Gesundheit und Sicherheit bei der Arbeit in der FKH im Fokus. Sämtliche umgesetzten Massnahmen bilden auch eine Basis im Hinblick auf eine potenzielle zukünftige SCL-Zertifizierung.



AUTOR

Dr. Michael Walter

Dr. sc. ETH
Geschäftsleiter

Koronaschallberechnung mit HVLBuzz

Leiteseile von Hochspannungsleitungen können hörbare Schallemissionen erzeugen, welche mit dem Ohr als Knistern wahrgenommen werden. Die Schallemissionen sind – unter anderem – abhängig von der elektrischen Oberflächenfeldstärke der Leiteseile. Die Lautstärke der Schallemissionen ist von der geometrischen Anordnung der Seile, von der Beschaffenheit der Leiteroberfläche, der Regenintensität, der Höhe über dem Meeresspiegel und weiteren Faktoren abhängig. So führt beispielsweise eine hohe Regenrate zu einer grösseren Lautstärke. Die FKH führt die Berechnung von Schallemissionen seit vielen Jahren durch und hat hierdurch eine grosse Expertise angesammelt. Es ist zu beobachten, dass das Thema der Schallemission von Freileitungen, auch Koronaschall genannt, in den letzten Jahren in der Schweiz, aber besonders auch im nahen Ausland stark an Relevanz gewonnen hat. Dies hat möglicherweise mit einer immer höheren Landnutzung oder aber auch mit einer generell verstärkten Sensibilität bezüglich Emissionen in der Bevölkerung zu tun.

Im Jahr 2017 wurde an der ETH Zürich im Fachgebiet des High Voltage Laboratory (HVL) eine Software entwickelt, welche eine einfache Berechnung der Schallemission erlaubt. Die Software heisst **HVLBuzz** und ist als Open-Source-Projekt frei verfügbar. Die Entwicklung wurde durch die studentische Arbeit von Aldo Tobler gestartet und in den folgenden Jahren durch wechselnde Doktorierende des High Voltage Laboratory betreut und weiterentwickelt. In dieser Zeit gab es auch erste Netzbetreiber, welche **HVLBuzz** genutzt haben. Über die Jahre vergrösserte sich der Wunsch der Nutzer, die Weiterentwicklung von **HVLBuzz** zu professionalisieren und eine feste Ansprechperson zu haben.

Im Austausch mit dem HVL hat die FKH ein Konzept erarbeitet, welches die langfristige fachliche Betreuung sicherstellt. Dieses sieht vor, dass die FKH die Betreuung des Projektes übernimmt. Sie agiert als Ansprechperson und Dienstleister für die Implementierung von neuen Funktionen. Gleichzeitig stellt

sie die Lauffähigkeit von **HVLBuzz** auf gängigen Betriebssystemen sicher. Inzwischen wird das Projekt vom Schweizer Übertragungsnetzbetreiber Swissgrid, vom Bundesamt für Umwelt, von drei deutschen Übertragungsnetzbetreibern (TenneT, Amprion, TransnetBW) und dem österreichischen Übertragungsnetzbetreiber (APG) aktiv unterstützt und genutzt. **HVLBuzz** steht weiterhin als Open-Source-Projekt zur Verfügung und kann kostenlos genutzt oder verändert werden. Bei Interesse kann die Software auch weiteren interessierten Netzbetreibern oder Ingenieurbüros vorgestellt werden.

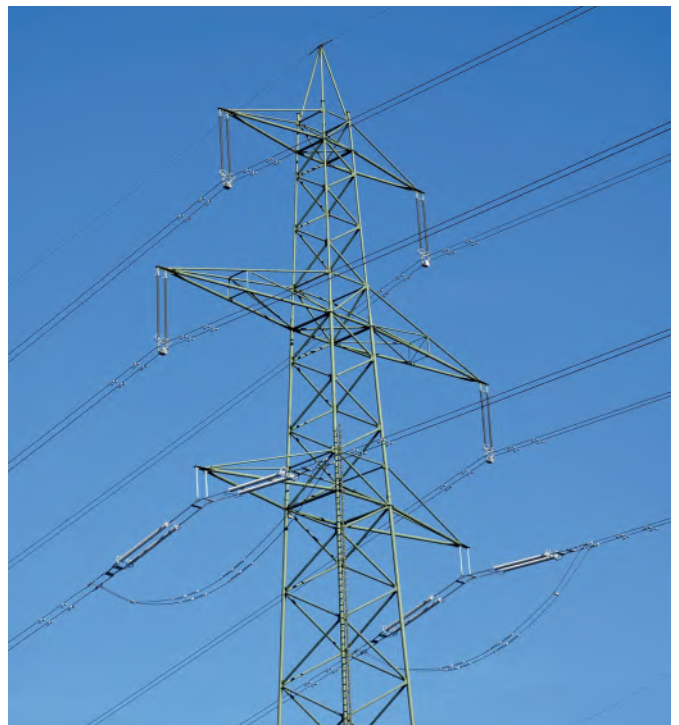


Abbildung 1: Typischer Mast in der Schweiz mit zwei 220-kV-Systemen

Mit **HVLBuzz** können neben den Schallemissionen auch das elektrische und das magnetische Feld in der Nähe von Freileitungen berechnet werden. Hierzu wird die Mastgeometrie in 2-D in **HVLBuzz** eingetragen. Ein Beispiel für einen typischen Mast mit zwei 220-kV-Systemen ist in der Abbildung 1 zu sehen. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 2 dar-

gestellt. Zur Berechnung der Schallemissionen werden verschiedene Ansätze verwendet, welche leicht unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die Unterschiede liegen darin begründet, dass die Formeln auf unterschiedlichen Messungen basieren, welche unter diversen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden. In der aktuellen Version von **HVLBuzz** sind zwei Formeln hinterlegt, die EPRI-Formel (dunkelblaue Linie) und die BPA-Formel (hellblaue Linie). Durch die parallele Berechnung mit unterschiedlichen Ansätzen können schnell die Unterschiede sichtbar gemacht werden. Es ist zukünftig geplant, die Formel der EDF und den neuen Berechnungsansatz der FKH (siehe Beitrag «Wegleitung für die Geräuschpegelberechnung von Freileitungskoronaentladungen zur Überprüfung der Einhaltung der Lärmschutzverordnung») zu implementieren.

Neben der zu erwartenden Lautstärke – senkrecht zum Verlauf der Freileitung – sind auf der Oberfläche von **HVLBuzz** die Positionen der Leiterseile als blaue Punkte angedeutet. Die hinterlegten Formeln erlauben eine Berechnung unter verschiedenen Bedingungen, welche der Nutzer definieren kann. So ist es beispielsweise möglich, die Aufstellhöhe des Mastes (oder die Regenrate) zu verändern. Auf der rechten Seite der Nutzeroberfläche kann die Geometrie eingestellt werden, diese wird durch die Position der Leiterseile, die Anzahl der Teilleiter, den Leiterseildurchmesser und den Bündeldurchmesser beschrieben. Des Weiteren werden die Spannung (Phase-Phase) und der Strom (pro Phase) für die Berechnung benötigt.

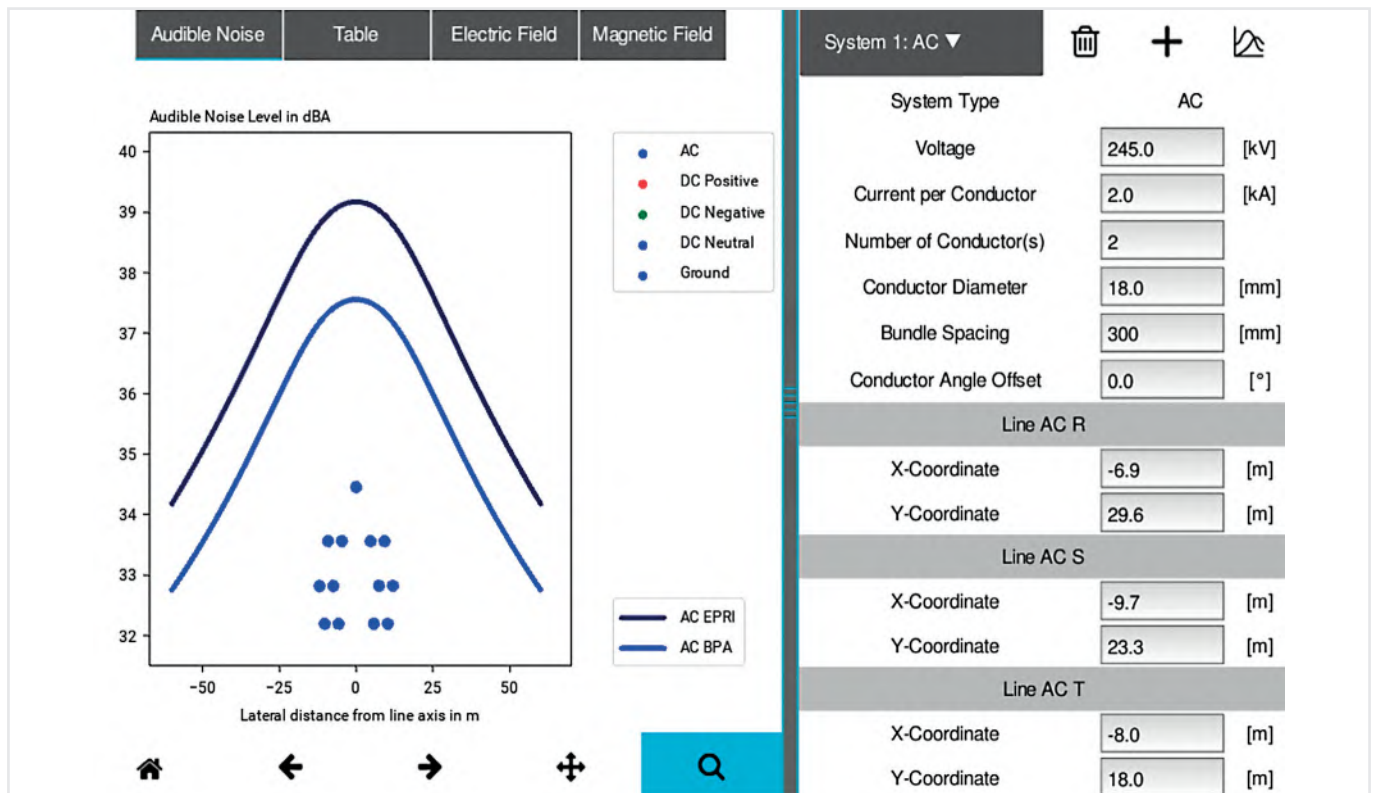


Abbildung 2: Mastbild mit zwei 220-kV-Systemen, auf der linken Seite ist die berechnete Lautstärke zu sehen und auf der rechten Seite ist die Geometrie des ersten Systems definiert

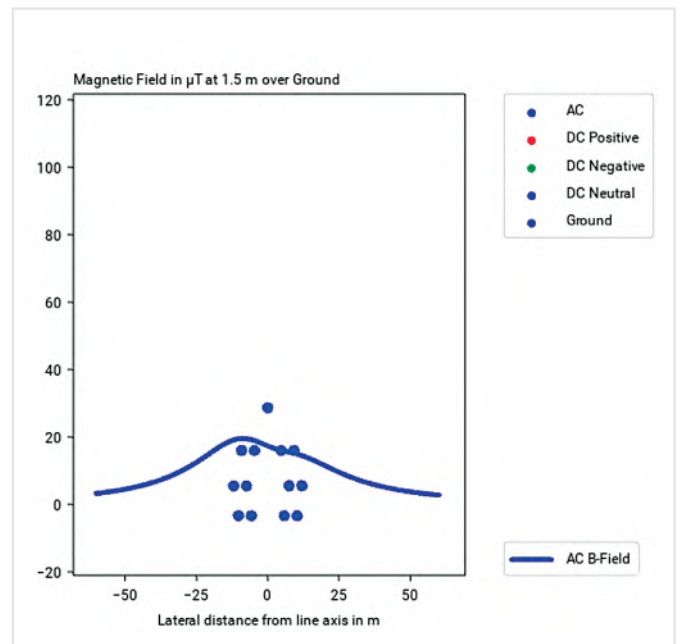
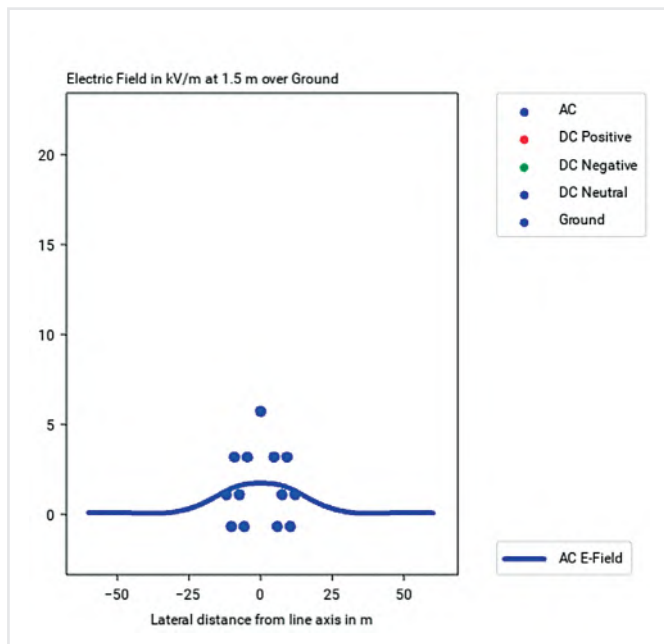


Abbildung 3: Elektrisches Feld (links) und magnetisches Feld (rechts)

Für die zuvor berechnete Mastgeometrie sind in der Abbildung 2 das elektrische und das magnetische Feld in 1,5 m Abstand zum Boden senkrecht zu den Leiterseilen berechnet worden. Der Abstand zum Boden, bei dem die elektrische oder magnetische Feldstärke ausgewertet werden soll, kann durch den Nutzer eingestellt werden. In der rechten Teilabbildung ist zu erkennen, dass das magnetische Feld unsymmetrisch ist. Die Asymmetrie kommt daher, dass das linke System mit 2000 A und das rechte System mit 1000 A betrieben wird.

sodass die einzelnen Teilleiter erkennbar sind. Eine Folge dieser Darstellung ist, dass Teilleiter von verschiedenen

Neben der Berechnung von Wechselspannungs-Freileitungen erlaubt **HVLBuzz** auch die Berechnung von Hybridleitungen. Dies sind Masten, auf denen sowohl Wechsel- als auch Gleichspannungssysteme installiert sind. Für diesen Fall sind die Ansätze von EPRI, BPA und CRIEPI hinterlegt. Ein Beispiel ist in der Abbildung 4 gezeigt. Bei diesem Beispiel besteht jede Phase sowohl des Wechselspannungs- als auch des Gleichspannungssystems aus drei Teilleitern. Die Mastgeometrie wird in **HVLBuzz** verzerrt dargestellt,

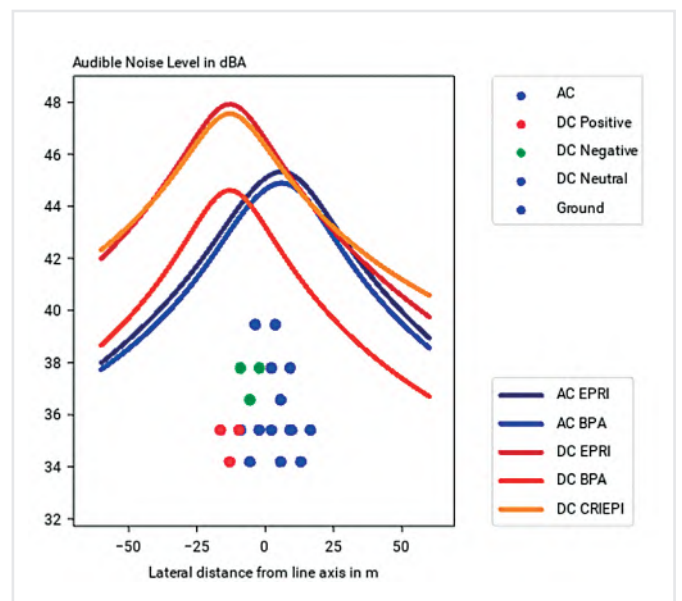


Abbildung 4: Lautstärke bei einem Hybridmast

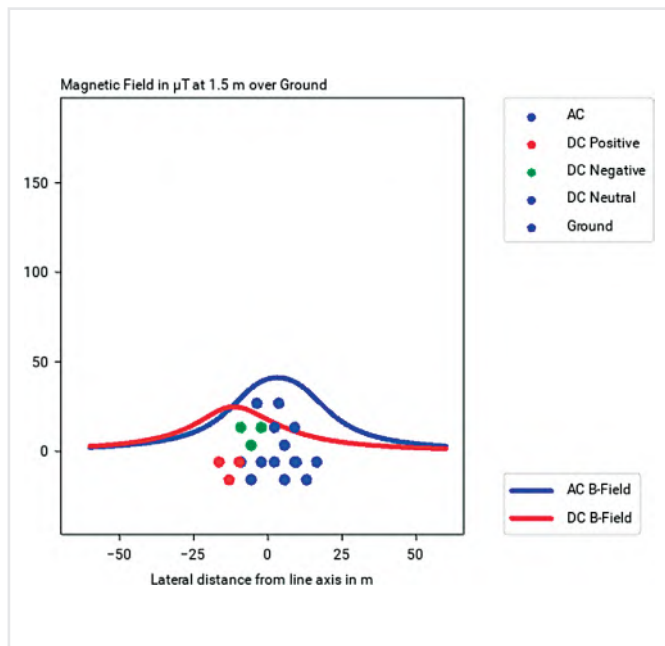
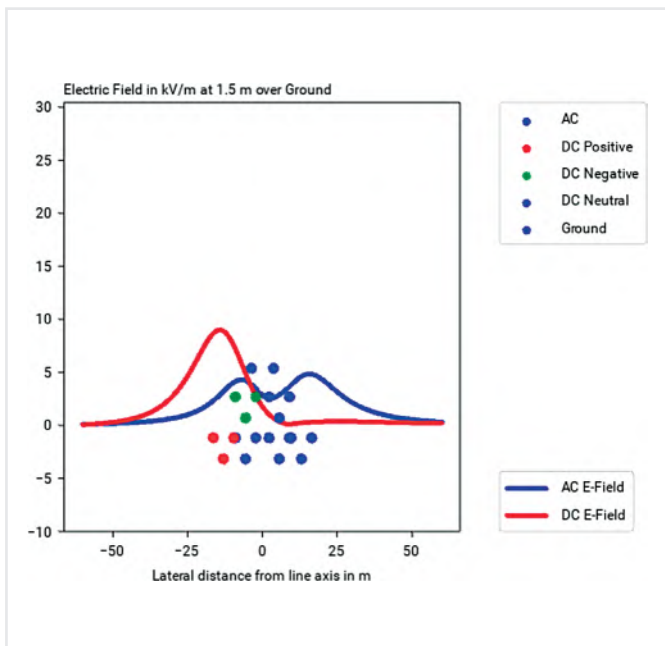


Abbildung 5: Elektrisches Feld (links) und magnetisches Feld (rechts)

Phasen sich überlappen können. Dies ist in Abbildung 3 geschehen.

Die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte werden getrennt nach Wechselspannungs- und Gleichspannungsanteil dargestellt (siehe Abbildung 5).

Da die Beeinflussung der Umwelt durch elektrische Betriebsmittel und insbesondere auch von Freileitungen in den letzten Jahren sehr an Relevanz gewonnen hat, ist es für eine Vielzahl von Nutzern von Interesse, ein Programm zu haben, welches mit der Eingabe von wenigen Parametern eine Aussage über die zu erwartende Lautstärke bei projektierten Leitungen trifft. Um den Nutzen für die (Schweizer) Anwender weiter zu erhöhen, wird in einem nächsten Schritt der Jahresbeurteilungspegel nach Vorgaben des Schweizer Bundesamtes für Umwelt eingebaut werden. Dieser Pegel ist relevant für die Planung von neuen und den Ersatz von alten Freileitungen. Die FKH ist überzeugt, mit der Wartung und Pflege der Koronaschall-

berechnungssoftware **HVLBuzz** einen Beitrag zu leisten, dass Nutzer eine einfache und komfortable Möglichkeit zur Berechnung der zu erwartenden Lautstärke haben.



AUTOR

Dr. Henrik Menne

Dr. sc. ETH

Projektingenieur

Neubauprojekt Labor-Mehrzweckhalle Niedergösgen



Abbildung 1: Bestehender, nicht mehr zeitgemässer Prüfplatz

Bisherige Situation am FKH-Standort Niedergösgen

Bei dem bestehenden Laborgebäude «Koronaschopf» am Standort Niedergösgen handelte es sich um einen alten Holzschopf mit baufälliger Bausubstanz, welcher als Prüfplatz umgenutzt wurde. Das Gebäude besass keinerlei elektromagnetische Abschirmung oder thermische Isolation und wies ein undichtes Dach auf. Deshalb entsprach das Gebäude nicht mehr den heutigen Bedürfnissen und dem Qualitätsanspruch der FKH. Hochwertiges Prüfequipment konnte nicht dauerhaft in der Halle verbleiben (übermässige Alterung). Dadurch entstand regelmässig Mehraufwand, da beim Einsatz sensibler Prüfquellen für jede Prüfung der gesamte Prüfkreis auf- und wieder abgebaut werden musste. Aus Platzgründen oder wenn Prüfungen stabile Umgebungstemperaturen erforderten, wurde häufig auf die Logistikhalle ausgewichen. Dies störte allerdings die Logistikabläufe für Vor-Ort-Aufträge erheblich und war bezüglich Sicherheit nicht optimal, da aufgrund der Doppelnutzung z.B. Sicherheitskreise nicht permanent installiert werden konnten.

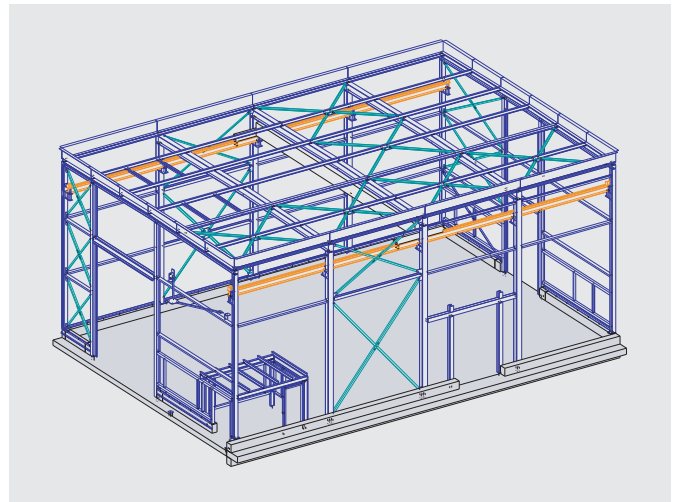


Abbildung 2: Bauvorhaben neue Prüfhalle/Mehrzweckhalle (Aufsicht)

Ziele, welche mit dem Neubau der Mehrzweckhalle erreicht werden sollen

Mit der neuen Mehrzweckhalle werden gleichzeitig verschiedene Ziele erreicht. Für Prüfungen am Standort Niedergösgen werden stabilere Prüfbedingungen und eine Effizienzsteigerung bei Stoss- und AC-Prüfungen erzielt, da Arbeitsabläufe für Auf- und Abbauarbeiten entfallen. Kontrollierbare Umgebungsbedingungen reduzieren die Messunsicherheit und verhindern eine übermässige Alterung von Prüfmitteln. Im Hinblick auf eine zukünftige Akkreditierung von Hochspannungsprüfungen ist dies ein wichtiger Schritt.

Für den Logistikfluss von Vor-Ort-Prüfung ergibt sich eine Erhöhung der Effizienz, da die Doppelnutzung des Rüstplatzes und die damit verbundenen bisherigen Störfaktoren wegfallen. Die Lagersituation der Logistikhalle mit aktuell zu wenig Bodenstellplätzen wird entschärft, denn im hinteren Bereich der Mehrzweckhalle können aufgebaute Prüfanlagen, Messleiter und Prüfkabel gelagert werden, sodass aktuell belegte Lagerplätze in der Logistikhalle wieder frei werden.

Durch die permanenten Prüfplätze in Niedergösgen und eine klare Trennung zwischen Prüf- und Lagerbereich können permanente Sicherheitskreise installiert werden. Prüfer können die Experimente zukünftig von einer fest installierten Prüfkabine aus steuern.

Da die neue Mehrzweckhalle direkt an die bestehende Logistikhalle angebaut wird und eine grössere Grundfläche als der Koronaschopf aufweist, steht insgesamt mehr Platz zur Verfügung. Dadurch entsteht die Möglichkeit, längere Prüfkampagnen als Dienstleistung für Mitglieder anzubieten oder zu Forschungszwecken bzw. im Rahmen von CIGRE-Arbeitsgruppen längere Experimentalaufbauten zu betreiben, ohne dass diese das Tagesgeschäft beeinträchtigen.

Der Neubau stellt für die FKH eine wichtige Investition in die Zukunft dar. Es wird ein ähnlich positiver Schub für die FKH erwartet, wie er durch den Bau der Logistikhalle erzielt wurde. Im Hinblick auf den vielfältigen Nutzen des Neubaus für die FKH hat der Vorstand in der Herbstsitzung 2023 den Baukredit von 1,6 Mio CHF bewilligt und der Geschäftsleitung den Auftrag erteilt, das Projekt umzusetzen. Der Neubau kann vollständig aus eigenen Mitteln finanziert werden, welche in den vergangenen Jahren als Rückstellung für diesen Zweck gebildet wurden.



Abbildung 3: Abbruch bestehendes Gebäude (Koronaschopf)

Nutzen für die Mitglieder der FKH

Die FKH bietet ihre Laborprüfungen als Ergänzung zu externen etablierten Laboren an.

Herstellerlabore sind häufig stark ausgelastet und auf standardisierte Prüfungen ausgerichtet. Hersteller haben neu die Möglichkeit, bei der FKH komplexe oder längere Prüfkampagnen durchzuführen. Auch kann die FKH kurzfristig einspringen, wenn intern keine Prüfslots vorhanden sind. Im Falle eines Befundes kann die FKH effizient bei der Problemlösung unterstützen. Je nach Entwicklungsstand des Betriebsmittels ist es somit möglich, sowohl Entwicklungsprüfungen als auch Typenprüfungen bei der FKH durchzuführen.

Netzbetreibern bietet die FKH eine neutrale und unabhängige Prüfmöglichkeit in der Schweiz. Weiter besteht die Möglichkeit, gealterte Betriebsmittel auf ihren Zustand zu untersuchen, bei systematischen Fehlern in der Ursachenermittlung zu unterstützen sowie nach Vorfällen eine unabhängige Schadensanalyse durchzuführen.

Universitäten und Forschungsinstituten bietet die FKH die Möglichkeit, im Rahmen von Studienarbeiten oder Forschungsk Kooperationen in Niedergösgen Experimentalaufbauten zu betreiben.

Planung und Stand der Umsetzung

Die FKH hat sich zum Ziel gesetzt, für den Bau der Labor-Mehrzweckhalle wo möglich lokale Firmen zu berücksichtigen und für die spezifischen Laboranforderungen ihre eigene Expertise einzubringen. Aufgrund der Messerfahrung in der bestehenden Logistikhalle konnte der zusätzliche Bedarf an elektromagnetischer Abschirmung gut quantifiziert werden. Dies ermöglichte der FKH, grösstenteils auf Standardbaumaterialien zu setzen und mit gezielten Massnahmen trotzdem optimale Erdung und eine gute elektromagnetische Abschirmwirkung im Sinne eines Faradaykäfigs zu erzielen.



Abbildung 4: Neubau Bodenplatte Mehrzweckhalle

Weiter wurde bei der Planung Wert darauf gelegt, dass die Möglichkeit einer Nachrüstung in der Schirmung – z.B. für den Fall, dass sich zukünftig einmal externe Einflussfaktoren verändern – im bestehenden Bau prinzipiell möglich bleibt. So ist die Hallenhülle selbst eine Standardindustriehalle mit

Sandwichpaneelen, während in Bereichen von Fenstern und Toren mit einem in den Boden eingearbeiteten Streckmetallnetz und optimierten Filtern an den Kabeleinführungen eine gezielte Dämpfung von Störungen angestrebt wird. Dies hat zwar die Komplexität in der Planungsphase erhöht, da die beteiligten Firmen grösstenteils nicht auf Laborbauten spezialisiert sind. Es hat aber den Vorteil, dass der Bau deutlich kostengünstiger realisiert werden kann als bei vergleichbaren Laborbauten.

Der Neubau wurde im Detail durch das Architekturbüro Mercatali basierend auf den Vorgaben der FKH geplant. Die Baubewilligung durch die Gemeinde Niedergösgen wurde im August 2023 erteilt. Es sind keinerlei Einsprachen gegen den Bau eingegangen. Ein herzlicher Dank geht an den kynologischen Verein und seine Präsidentin Frau Röthlisberger, die auf dem Nachbargrundstück eine Hundeschule betreiben. Die gute nachbarschaftliche Beziehung ermöglichte es, dass die FKH für die Zufahrt auf die Baustelle das Nachbargrundstück nutzen darf.

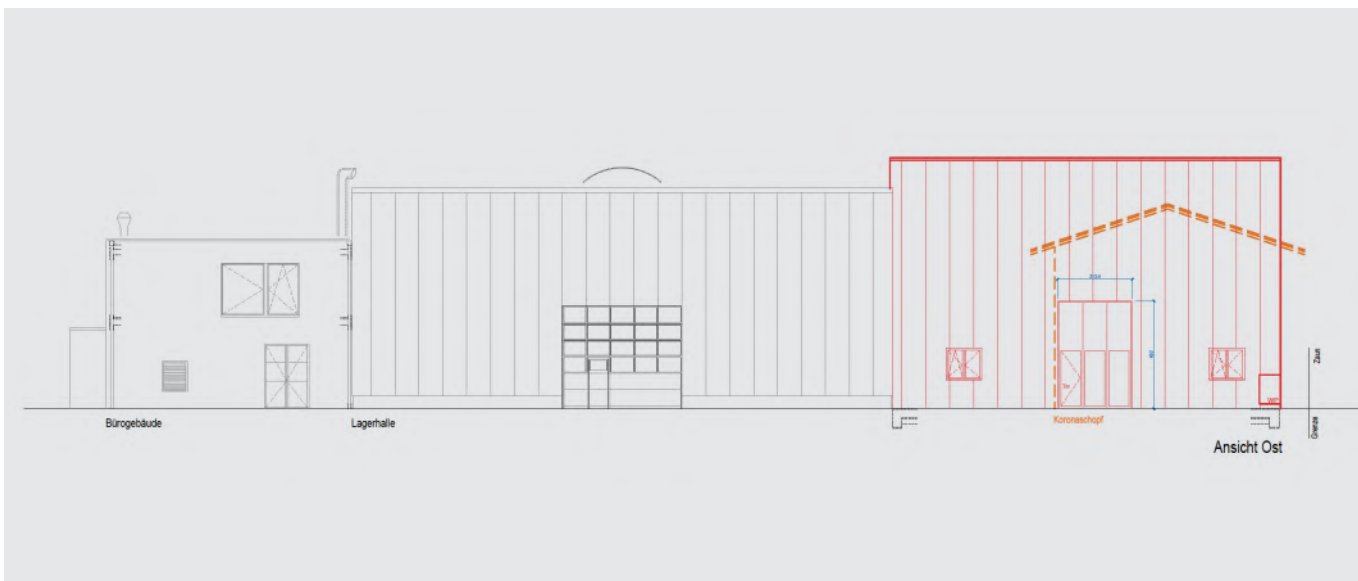


Abbildung 5: Bauvorhaben Ersatzbau Prüfhalle/Mehrzweckhalle (Ansicht Ost)

Bei der Umsetzung des Neubaus arbeitet die FKH mit den Firmen Huber (für den Rückbau), Merz (für die Erstellung der Bodenplatte), Equans (für die elektrischen Installationen), Senn (für den Hallenbau), Spengler Voney (für die Erdungen und Abschirmungen in der Bodenplatte) und Gersag (für die Kraninstallation) zusammen.

Das Projekt ist zum Zeitpunkt der Verfassung des Jahresberichts noch mitten in der Bauphase. Es wird erwartet, dass die neue Halle bis zum Zeitpunkt der Mitgliederversammlung im Mai nutzbar sein wird und eingeweiht werden kann.



Abbildung 6: Neubau Bodenplatte für überdachten Vorplatz



AUTOR

Dr. Michael Walter

Dr. sc. ETH
Geschäftsleiter

FKH-Fachtagung 2023

«Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie»

Die letztjährige FKH-Fachtagung zum Thema «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie» fand am 21. November 2023 im Trafo Baden statt. Sie wurde sehr fachkundig durch Prof. Dr.-Ing. Christian Franck, ETH Zürich, geleitet.

Hochspannungsbetriebsmittel bilden das Rückgrat unserer elektrifizierten Versorgungsinfrastruktur. Gleichzeitig stehen sie seit jeher in der Interaktion mit ihrer Umwelt. Negative Umweltaspekte betreffen den effektiven Landverbrauch der Produktionsanlagen, Verteilknoten und Trassen, die graue Energie der verbauten Komponenten, den Einsatz von Treibhausgasen und Öl als Isoliermedium sowie elektromagnetische Felder, Verlustabwärme- und Schallemissionen im direkten Umfeld.

Durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse in Bezug auf den Klimawandel ist das Bewusstsein der Bevölkerung und der Regulierungsbehörden für eine emissionsminimierende Kreislaufwirtschaft gestiegen und es werden sowohl Anreize als auch Vorschriften zur Förderung «grüner» Technologien geschaffen. Dies löst bei den Herstellern von Hochspannungsbetriebsmitteln einen Innovationsschub aus und konfrontiert die Netzbetreiber

und Produzenten elektrischer Energie mit neuen vielversprechenden Technologien. Der Aufbau von Betriebserfahrung bei den Netzbetreibern ist hierbei zentral. Durch die Umstellung des Technologiemix dürfen keine Konzessionen bei der gewohnt hohen Betriebssicherheit der Übertragungsnetze gemacht werden und die Selektion der alternativen Technologien muss auf Basis aller Umweltfaktoren getroffen werden, um ökologisch und wirtschaftlich die passendste Technologie für ein Projekt auszuwählen.

Die Beiträge zeigten auf, durch welche Mechanismen Emissionen von Betriebsmitteln entstehen und wie sie mittels Lebenszyklusanalyse relativ zueinander quantifiziert werden können. Weiter wurden innovative Konzepte zur Minimierung der Emissionen bei der Herstellung und dem Betrieb von Hochspannungsbetriebsmitteln vorgestellt und in den Kontext gesetzt.

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

	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. Christian Franck, ETH Zürich
09.10 – 09.35	Grüne Innovationstrends in gasförmiger, fester und flüssiger Isolation	Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich
09.35 – 10.00	Ökobilanzen zur Abschätzung des Umweltfussabdrucks von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes	Rolf Frischknecht, treeze Ltd
10.00 – 10.25	Regulatorisch motivierter Technologiewandel im Hoch- und Höchstspannungsnetz – Herausforderungen für Betreiber	Philipp Wenger, TransnetBW GmbH
10.25 – 11.00	Kaffeepause	
11.00 – 11.25	Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen und deren Prüfung	Dr. Michael Walter, FKH

11.25 – 11.50	Entscheidende Aspekte für den Einsatz von alternativen Gasen in GIS-Spannungswandlern	Dr. Mostafa Refaey, Pfiffner Ltd
11.50 – 12.15	Ansätze und Lösungen zum Gas-Lebenszyklus für Anlagen mit alternativen Isoliergasen	Martin Göppel, DILO GmbH
12.15 – 13.30	Mittagessen	
13.30 – 13.55	Berücksichtigung von Umweltaspekten beim Bau von Hochspannungsleitungen	Dr. Sandro Dinser, Dinser Expertise GmbH
13.55 – 14.20	Koronaschallemissionen von Freileitungen in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit	Hannah Kirchner, ETH Zürich
14.20 – 14.45	Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzvorgänge	Gunnar Andrae, FKH
14.45 – 15.15	Kaffeepause	
15.15 – 15.40	Gesteigerte Nachhaltigkeit durch innovative feststoffisolierte Transformatoren	Bogdan Cranganu-Cretu, Hitachi Energy AG
15.40 – 16.05	Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145 kV, 2000 A	Dr. Walter Holaus, Hivoduct AG
16.05 – 16.30	Ölisierte Transformatoren: Erkenntnisse und Innovationen im Bereich Isolierungen für eine verbesserte Lebenszyklusbilanz	Dr. Ghazi Kablouti, Hitachi Energy AG
16.30 – 16.40	Schlussdiskussion und Abschluss	Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich
ab 16.40	Apéro	

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



Zusammenarbeit mit Hochschulen / Nachwuchsförderung

Betreute Praktikumsarbeiten

Florian Vandenbroeke

IASTE-Praktikant aus Belgien von der Ghent University

Studiengang «Electrical and Electronics Engineering»

Praktikumsarbeit: Programmierung einer Datenbank, um anhand von grafischen Merkmalen Teilentladungsmuster bei Befunden in Betriebsmitteln einfacher anhand vergleichbarer Fehlermuster aus früheren Messkampagnen klassifizieren zu können.

Betreuer: Dr. Henrik Menne, Dr. Michael Walter

Teilnahme an Fachveranstaltungen, Referate, Publikationen

Publikationen

Stefan Neuhold, et al. als Mitglied von WG B3.50

Concepts for on-site HV testing of GIS after installation, extension, retrofit or repair
Cigré TB 920 (December 2023), Study Committee WG B3.50

Beiträge an Fachveranstaltungen

Michael Walter

Vortrag «Alternative Isoliergase in Schaltanlagen – was ist bei deren Prüfung zu beachten?»
DIL0-Anwenderkonferenz 2023, 25.04.2023, Babenhausen

Stefan Neuhold

Sessionsleitung Themenblock «Diagnose von Kabeln»
HIGHVOLT KOLLOQUIUM '23, 05.05.2023, Dresden

Reinhold Bräunlich

Vortrag «Betriebserfahrung EKW-Talleitung – Ursachenermittlung zur resonanten Sternpunktverschiebung im gelöschten Netz»
Apxo Forum Innovation Grid 2023, 13.06.2023, Baden

Michael Walter

Vortrag «Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen und deren Prüfung»
FKH-Fachtagung «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie» 21.11.2023, Trafo Baden

Gunnar Andrae

Vortrag «Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzvorgänge»
FKH-Fachtagung «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie» 21.11.2023, Trafo Baden

Teilnahme an Fachveranstaltungen

OMICRON-Diagnosewoche 2023, 20.–23.03.2023, Lindau am Bodensee

Dominic Kleger, Pascal Fehlmann

Apxo Forum Innovation Grid 2023, 13.06.2023, Baden

Reinhold Bräunlich, Michael Walter

Electrosuisse-Anlagetagung 2023, 21.09.2023, Aarau

Stefan Neuhold, Michael Walter

Swiss T&D Days 2023, 17./18.10.2023, Brugg-Windisch und Aarau

Stefan Neuhold, Michael Walter

Electrosuisse-Fachtagung Leitungsbau 2023, 8.11.2023, Aarau

Gunnar Andrae, Michael Walter

FKH-Fachtagung «Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie» 21.11.2023, Trafo Baden

Gunnar Andrae, Reinhold Bräunlich, Diego Friedli, Martina Müller, Stefan Neuhold, Michael Walter

Mitgliedschaft / Mitarbeit in Fachgremien und Kommissionen

Die FKH ist bei folgenden Institutionen als Mitglied eingetragen

Electrosuisse

Institutionelles Mitglied bei Electrosuisse

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

Mitglied im Förderkreis des ABB (Ausschuss Blitzschutz und Blitzforschung)

Cigré

Firmenmitgliedschaft

VDE

Firmenmitgliedschaft

Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM)

Firmenmitgliedschaft

Die FKH ist bei folgenden nationalen und internationalen Fachgremien vertreten

Nationalkomitees:

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

Mitglied: Thomas Heizmann (Vorsitzender)

CES electrosuisse TK 14: «Transformatoren»

Mitglied: Martina Müller

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

Mitglieder: Martina Müller, Gunnar Andrae

CES electrosuisse TK 20: «Elektrische Kabel»

Mitglied: Dominic Kleger

CES electrosuisse TK 38: «Messwandler»

Mitglied: Martina Müller

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

Mitglied: Michael Walter

CES electrosuisse TK 99: «Isolationskoordination»

Mitglied: Michael Walter

CES electrosuisse TK Erdungen

Mitglied: Diego Friedli

Internationale IEC-Arbeitsgruppen:**IEC 62271-100 TC 17/SC 17A/MT 36: «High-voltage switchgear and controlgear – Alternating-current circuit-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 60076-18 TC 14/MT 60076-18: «Measurement of Frequency Response for Power Transformers»

Mitglied: Pascal Fehlmann

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

Mitglied: Diego Friedli

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

Mitglied: Stefan Neuhold

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

Mitglied: Stefan Neuhold

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

Mitglied: Stefan Neuhold

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

Mitglied: Stefan Neuhold

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

Convenor: Michael Walter

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-Appenz. Kraftwerke AG

9001 St. Gallen

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich

8022 Zürich

Swissgrid AG

5001 Aarau

Energie-Service Biel/Bienne

2504 Biel

Stadtwerk Winterthur

8402 Winterthur

Energie Wasser Bern

3001 Bern

Verzasca SA

6901 Lugano

ewl energie wasser luzern

6002 Luzern

Werke am Zürichsee AG

8700 Küsnacht

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 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

Hochschule für Technik + Architektur Chur
7000 Chur

**Swiss Federal Institute of Technology Power
Electronics Laboratory (EPFL)**
1015 Lausanne

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

Neue Mitglieder

An der Mitgliederversammlung vom 1. Juni 2023 wurde dem Mitgliedschaftsantrag von folgendem Unternehmen zugestimmt:



Repower AG
Via da Clait 12
7742 Poschiavo

Siemens hat sich in Siemens Schweiz und Siemens Energy AG aufgespalten. Neu werden Siemens Schweiz AG und Siemens Energy AG separat als zwei unabhängige Mitglieder geführt.



Siemens Schweiz AG
Freilagerstrasse 40
8047 Zürich

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

Mitgliederbestand per 31. Dezember 2023

Verbände	2	(2)
Werkmitglieder	29	(28)
Industriemitglieder, Ingenieurbüros und weitere Mitglieder	24	(23)
Korrespondierende Mitglieder	10	(10)
Total Mitglieder per 31. Dezember 2023 (Stand per 31. Dezember 2022 in Klammern)	65	(63)

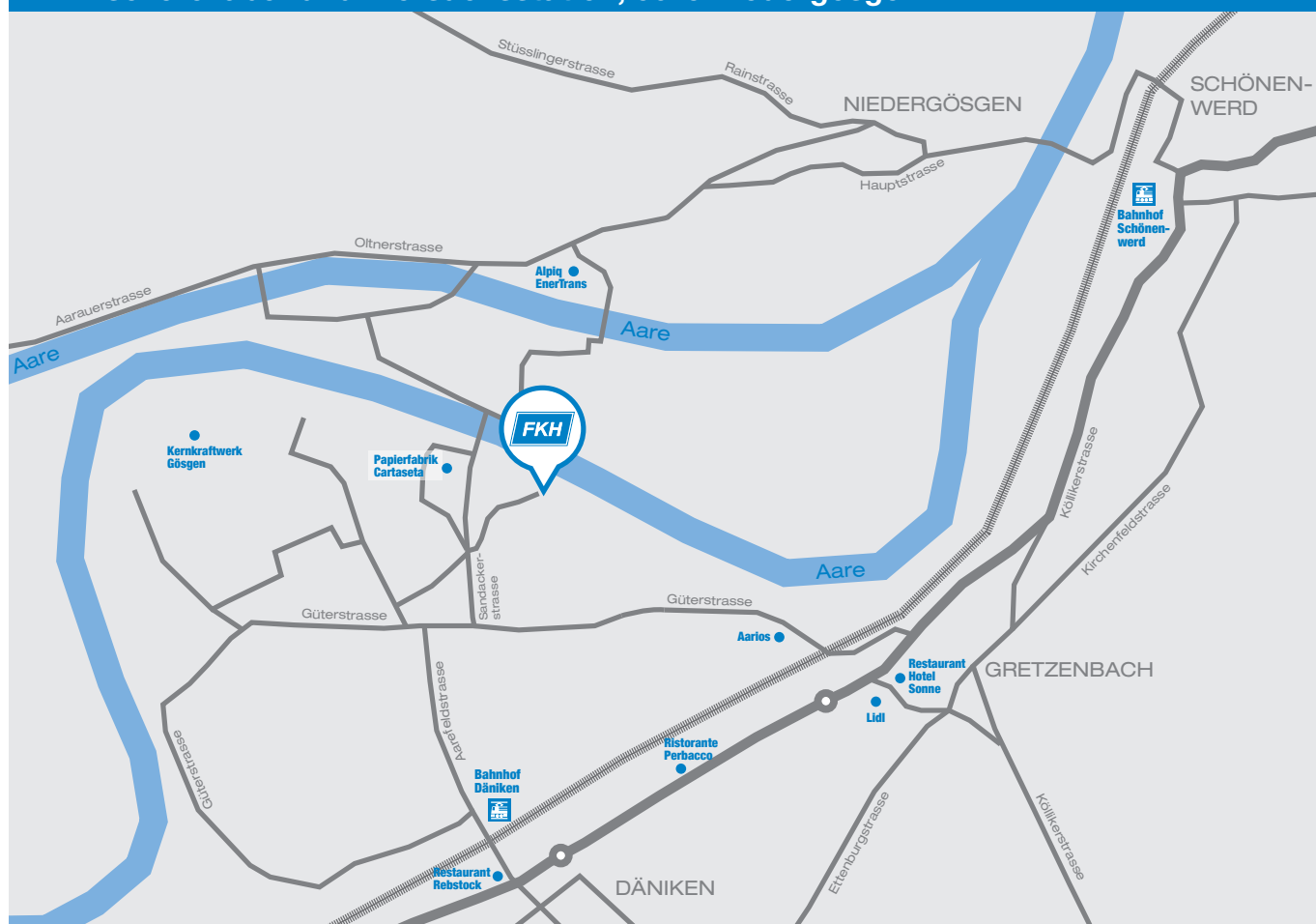
Zufahrtspläne für die FKH-Standorte



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

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

FKH-Isolieröllabor und -Versuchsstation, 5013 Niedergösgen



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

FKH-Isolieröllabor Tel. +41 62 288 77 99

FKH-Versuchsstation Tel. +41 62 288 77 95

Andresenschachen 10 • CH-5013 Niedergösgen



FKH-Hauptsitz

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

info@fkh.ch
www.fkh.ch

FKH-Isolieröllabor Däniken

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

FKH-Versuchsstation Däniken

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