



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

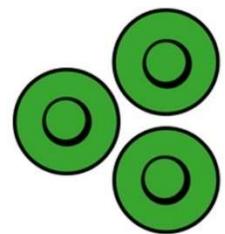
Abschlussbericht vom 13.12.2023

Demonstrationsanlage Druckluftkabel 145 kV

PAC145kV



Quelle: Hivoduct AG



Hivoduct

the better cable

Datum: 13.12.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung: keine

Subventionsempfänger/innen:

Hivoduct AG
Pfäffikerstrasse 28, CH-8310 Kemptthal
www.hivoduct.com

Autor/in:

Walter Holaus, Hivoduct AG, walter.holaus@hivoduct.com

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Roland Brüniger roland.brueniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer: SI/502385-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde die neu entwickelte «Druckluftkabel» Technologie für 145 kV, 2500 A in einem Pilotprojekt installiert und für 1 Jahr getestet.

Druckluftkabel sind eine neue Technologie für die verlustarme elektrische Energieübertragung welche Freileitungen und VPE Kabel ersetzen können. Sie bieten grössere Übertragungsleistungen, deutliche kleinere Übertragungsverluste, kleineren CO₂ Fussabdruck und ersetzen SF₆ gas und andere PFAS Isoliergase. Sie können unterirdisch und in bestehenden Tunnel installiert werden.

Dazu wurden die für die verschiedenen Tests nötigen Prüfpole entwickelt und Spezialkomponenten für die Testdurchführung gebaut. Für die Dauerversuche wurde eine typische 3ph Installation in einem Schutzrohr auf dem Gelände der SBB erstellt. Diese Pilotinstallation wurde in der neu eingerichteten Fabrik serienähe produziert, geliefert und installiert.

Die Ergebnisse des Projektes kurz zusammengefasst:

- Design, Produktion, Montage, Logistik, Transport, Vor-Ort Montage und Inbetriebnahme waren erfolgreich. Verbesserungen in allen Prozessschritten wurden eingeführt.
- Das neuartige Flanschdesign und das neue Rollensystem für kompakte Rohrmontage haben sich für Montage, Tests, Installation und Demontage gut bewährt.
- Vor-Ort Tests waren positiv und haben auch die Grenzen gezeigt. Die Erwärmungstests haben den wichtigsten Vorteil von Druckluftkabeln bestätigt: Geringere Verluste.
- Der Betrieb über 1 Jahr unter den verschiedensten Randbedingungen war erfolgreich und hat ausreichende Margen für Spannung, Strom, Druck und Temperatur bestätigt.
- Tests an neuen Produktversionen während des Projektes haben Verbesserungen im dielektrischen und mechanischen Design bestätigt und wurden ins Portfolio integriert.
- Weitere Investitionen in Werkzeuge und Betriebsmittel sind nötig für Volumenproduktion.

Parallel zur Testinstallation wurde das Design und die Messergebnisse in einer Reihe von wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht und an Expertentagungen präsentiert.

Das grosse Interesse mit Kundenanfragen und weiteren Pilotinstallationen haben gezeigt, dass der Markt diese Technologie benötigt. Druckluftkabel bieten eine neue Technologieoption für die Erneuerung und den Ausbau eines verlustärmeren elektrischen Energieübertragungsnetzes.

Zentrale Botschaften:

- Druckluftkabel bieten eine neue Technologieoption für die Energiestrategie 2050.
- Sie vereinfachen Genehmigungsverfahren für Freileitungen, verringern Übertragungsverluste, helfen Anwohnern und können mit bestehender Infrastruktur kombiniert werden.
- Druckluftkabel sind Schweizer Technologie mit Potential für globale Anwendung.



Summary

A newly developed «pressurized air cable» technology for 145 kV, 2500 A was produced for a pilot project, installed, and tested for 1-year in operation.

Pressurized air cables (=PAC) are a new technology for high-voltage electric energy transmission, which can replace overhead lines and traditional cables. They have strongly reduced losses and low carbon footprint, can be installed underground and in existing tunnels and replace SF6 gas and PFAS insulation gases.

During this project, several certification tests at the “FKH” test facility have been conducted. Specific test poles have been designed and produced for these tests. A typical 3ph installation in a protective tube was installed at the SBB premises for continuous operation tests. All products have been produced and assembled in the newly installed factory in a zero series setup.

The main project results so far:

- Design, production, assembly, logistics, transport, On-site assembly, and energization was successful.
- The new flange design as well as the roller system works for assembly, tests, installation into tubes and confined spaces and for disassembly.
- Additional Investments in tools and fixtures are required for volume production.
- The on-site tests were successful and showed the design limits. Heat-run tests confirmed the main advantage of pressurized air cables: Reduced losses.
- The 1-year operation was successful and confirmed good margins for voltage, current, pressure, and temperature.
- Tests on further optimized versions of the product showed improvements in electrical and mechanical design and were integrated into the product portfolio.
- Further investments in tools and production assets are required for volume production.

The design and test results were presented in several scientific papers and conferences. Significant interest in this technology by grid operators has confirmed that the market is ready for this technology. Pressurized air cables offer a new technology option for the expansion and renewing of a more efficient electric energy transmission system.

Take home messages:

- Pressurized air cables are available as a new technology to upgrade the high-voltage grid.
- They provide a viable alternative to simplify overhead line approval procedures, improve efficiency, upgrade neighborhoods and merge with existing linear infrastructure.
- Pressurized air cables are Swiss technology with the potential for global application.



Résumé

Dans le cadre de ce projet, la nouvelle technologie de "câble à air comprimé" pour 145 kV, 2500 A a été installée sous forme d'une installation pilote et testée pendant un an.

Les câbles à air comprimé sont une nouvelle technologie de transmission d'énergie électrique à faibles pertes qui peut remplacer les lignes aériennes et les câbles VPE. Ils offrent de plus grandes capacités de transmission, des pertes de transmission nettement plus faibles, une empreinte carbone réduite et remplacent le gaz SF₆ ou d'autres gaz isolants PFAS. Ils peuvent être installés sous terre et dans des tunnels existants.

Les pôles d'essai nécessaires pour les différents tests ont été développés et des composants spéciaux ont été construits pour la réalisation des tests. Pour les tests à longue durée, une installation typique de 3 phases placée dans un tube de protection a été réalisée sur un site des CFF. Cette installation pilote a été produite dans l'usine nouvellement aménagée, livrée et installée, comme pour une production en série.

Les résultats du projet en résumé :

- La conception, la production, l'assemblage, la logistique, le transport, le montage sur site et la mise en service ont été réussis. Toutes les étapes du processus ont subi des améliorations.
- Le nouveau design de la bride et le nouveau système de rouleaux pour le montage compact des tubes ont fait leurs preuves pour le montage, les tests, l'installation et le démontage.
- Les tests sur site ont été positifs et ont également montré les limites. Les tests d'échauffement ont confirmé le principal avantage des câbles à air comprimé : moins de pertes.
- L'exploitation pendant 1 an dans des conditions marginales très variées a été un succès et a confirmé des marges suffisantes pour la tension, le courant, la pression et la température.
- Des tests sur de nouvelles versions du produit pendant le projet ont confirmé des améliorations dans le design diélectrique et mécanique. Ces améliorations ont été intégrées dans le portefeuille.
- Des investissements supplémentaires dans l'outillage et les équipements sont nécessaires pour la production en volume.

Parallèlement à l'installation pilote, le design et les résultats de mesure ont été publiés dans une série d'articles scientifiques et présentés lors de conférences spécifiques.

Le grand intérêt suscité par les demandes de clients potentiels et le suivi dans le cadre d'autres installations pilotes ont montré que le marché est en demande de cette technologie. Les câbles à air comprimé offrent une nouvelle option technologique pour le renouvellement et l'extension d'un réseau de transport d'énergie électrique avec moindres pertes.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	4
Résumé.....	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	9
2 Anlagenbeschreibung	10
3 Vorgehen und Methode.....	12
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	14
4.1 Engineering: Prüfpole und Spezialkomponenten	14
4.1.1 Spezialkomponente: T-Verbindung	15
4.1.2 Spezialkomponente: 180° Umlenkung	16
4.1.3 Spezialkomponente: Isoliertes Gehäuse.....	16
4.1.4 Spezialkomponente: UHF TE Sensor	17
4.2 Engineering: Dreiphasige Installation mit Rohr und Schacht:	19
4.2.1 Spezialkomponenten: Rollensystem	20
4.2.2 Schacht und Montageschale	20
4.3 Produktion und Montage der Druckluftkabel	21
4.3.1 Spezialentwicklung: Rohrrheber	22
4.3.2 Spezialentwicklung: Ringöffner	23
4.3.3 Spezialentwicklung: Flanschzange	23
4.4 Routineprüfungen	24
4.5 Fertige Transporteinheiten gestapelt.....	25
4.6 AC Vorprüfung	27
4.7 Hochstromtests.....	29
4.7.1 Temperaturverlauf während der Erwärmungsprüfung	30
4.7.2 Widerstandsmessung vor/nach der Erwärmungsprüfung	31
4.7.3 Erwärmungsprüfung mit 2000 A	31
4.7.4 Widerstandsmessung bei 2000 A.....	32
4.7.5 Messung der Innenleitertemperaturen mit CelsiStrips	33
4.8 Hochspannungstests mit Wechselspannung	36
4.8.1 Resultate der AC Prüfungen mit 100 kV	37
4.8.2 Resultate der AC Prüfungen mit 123 kV	38



4.9	Blitzstossprüfungen	39
4.9.1	Resultate der Blitzstossprüfungen.....	40
4.10	Wechselspannungs- und Blitzstossprüfungen für 145 kV Nennspannung	43
4.11	Montage 3ph im Schutzrohr und Schacht	45
4.12	Einrollen in den Schacht mit Seilzug	47
4.13	Anschluss der Transformatoren + Monitoringsystem.....	48
4.14	Konformitätsbescheinigung Druckbehälter SVTI.....	50
5	On-site Tests während des Betriebs	51
5.1	Dauerbetrieb bis 2000 A. Temperatur- & Druckmonitoring.....	51
5.2	Einbau zusätzlicher Sensoren. Messung am Hotspot.....	53
5.3	Hochspannungstests mit reduziertem Druck & simuliertem Druckabfall	55
5.4	Durchschlagstest durch Druckablassen	56
5.4.1	Druckverlauf und Durchschlagszeitpunkt:	57
5.5	Flanschkorrosion im Freiluftbereich.....	59
6	Rückbau der Anlage.....	61
7	Wiederholung der Dielektriktests mit Designverbesserungen.....	62
8	Bewertung der Ergebnisse	64
8.1	Projektabchluss	64
9	Kommunikation und Information	66
10	Publikationen	67
10.1	Geplante weitere Veröffentlichungen	67
10.2	Politische Diskussionen zum Thema Druckluftkabel.....	67

Abkürzungsverzeichnis

PAC = Pressurized Air Cable (Deutsch: Druckluftkabel)

GIL = Gas Insulated Line



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Basierend auf vielen Jahren Entwicklungserfahrung zum Thema «Gasisolierte Schaltanlagen (GIS)» bei ABB und als Reaktion auf die Notwendigkeit zum Ersatz vom Treibhausgas SF6 hat Hivoduct eine neue Technologie für die elektrische Energieübertragung entwickelt: **Druckluftkabel**.

Dafür wurde das GIS Produktdesign basierend auf einem patentierten Flanschdesign von Grund auf neu entwickelt und mit flexiblen Komponenten und einem Rollensystem für einfachere Installation ergänzt.

In Zusammenarbeit mit Innosuisse, der Fachhochschule OST und lokalen Schweizer Lieferanten wurden Prototypen gebaut, getestet und verbessert und zwei Produkte serienreif gemacht: eines für die Mittelspannung (12 kV – 52 kV) und eines für Hochspannung (72 kV – 145 kV).

Diese Produkte wurden nach den geltenden Vorschriften (SVTI für Druckbehälter, IEC62271-204 für Gas-isolierte Leitungen) in unabhängigen Laboren typgeprüft. Deshalb sind diese Produkte nun bereit für Pilotanlagen und Betrieb im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz.

Parallel zur Entwicklung und den Test wurde der Kontakt zu Schweizer Netzbetreibern gesucht, um Projekte für Pilotinstallationen zu evaluieren. Dafür wurden sowohl ein Online-Konfigurator verwendet als auch detaillierte Angebote inklusive Anlagenengineering für Kabelverbindungen erstellt.

Die Rückmeldungen von Kunden sind jeweils sehr positiv bezüglich der technischen Daten, insbesondere bezüglich GWP, Energieeffizienz und der reduzierten Emissionen:

- Druckluftkabel verwenden **Luft** (GWP<1) statt **SF6** (GWP 23000) oder andere PFAS Isolergasmischungen (GWP ~400). Druckluft ist umweltfreundlich, einfach im Handling und muss nicht entsorgt werden.
- Die Energieverluste im Betrieb sind etwa die Hälfte von vergleichbaren Kupferkabeln oder etwa ein Fünftel einer Freileitung. Über die Betriebsdauer von > 40 Jahren reduzieren sich damit die Verluste um GWh/km was > 1 Mio CHF an Stromkosten- Einsparungen je km bedeutet.

Zusätzlich erlauben die reduzierten Magnetfeldemissionen, keine Koronageräusche, Verlegung in Rohren oder Microtunneln und der bessere Brandschutz einen wirtschaftlichen Einsatz bei sensiblen Umgebungsbedingungen. Das vereinfacht die Trasseefindung für Hochspannungsleitungen und ermöglicht damit einen einfacheren Ausbau des Übertragungsnetzes, welcher für die Energiestrategie nötig und vorgesehen ist.

Da Druckluftkabel sowohl Freileitungen (abschnittsweise) als auch Kupferkabel und SF6 GIS Ausleitungen im kompletten Leistungsbereich ersetzen können, ergibt sich für das Schweizer Energieübertragungsnetz ein enormes Energieeinsparungspotential durch den Einsatz von Druckluftkabeln.

1.2 Motivation des Projektes

Für alle Infrastrukturbetreiber ist die Verfügbarkeit der Betriebsmittel über die Betriebsdauer zentral. Deshalb sind **Referenzanlagen und Betriebserfahrung** nötig für einen Investitionsentscheid und Teil jeder Angebotsanalyse. Da Druckluftkabel als neue Technologie noch keine Betriebserfahrung vorweisen können, konnten bisher noch keine Anlagen installiert werden. Typprüfungen wurden zwar mit erhöhten Prüfwerten durchgeführt, können aber trotzdem keine reale Betriebserfahrung ersetzen.



Deshalb ist eine Pilot- und Demonstrationsanlage in einer realen Umgebung notwendig, um die Systemreife im Betrieb über längere Zeit zu bestätigen.

Hivoduct kann das Engineering für diese Demonstrationsanlage durchführen, diese in der Schweiz mit Schweizer Lieferanten produzieren und Vor-Ort installieren. Unsere Experten können die Dauerversuche im Testbetrieb begleiten und ein Monitoring für die wichtigsten Betriebsdaten installieren.

Für eine zusätzliche unabhängige Expertise wurde die Demonstrationsanlage zuerst in der FKH (Fachkommission für Hochspannungsfragen) Versuchsanstalt in Däniken aufgebaut und mit Typprüfwerten getestet. Dabei wurde ein Druckluftkabel für 145 kV, 2500 A, 1ph von etwa 100 m Länge auf Hochspannung, Hochstrom, Blitzstoss, Teilentladung und Dichtigkeit getestet, um die Konformität mit geltenden Normen und die Betriebstauglichkeit und die reduzierten Verluste zu bestätigen.

Anschliessend wurde die Anlage 3phasig für Dauerbetrieb aufgebaut und für etwa 1 Jahr mit Nennspannung und Dauerstrom betrieben. Dieser Aufbau wurde bei der SBB, einem Netzbetreiber für Mittel- und Hochspannungsnetze durchgeführt. Während dieser Zeit wurden Strom, Spannung, Temperatur, Dichtigkeit und Verluste gemessen und variiert und etwaige Vorkommnisse dokumentiert.

1.3 Projektziele

Die folgenden Ziele wurden für dieses Projekt definiert:

Ziel 1: Bestätigung Engineering

Kann das Engineering für diese neuartigen Produkte unter gegebenen Umgebungsbedingungen für die Testanlage und die Dauerbetriebsanlage normenkonform durchgeführt werden? Können die baulichen Vorgaben mit den Produktvorgaben in Übereinstimmung gebracht werden? Welche Spezialbauteile sind für diesen Aufbau nötig?

Ziel 2: Bestätigung Produktion und Produktionsmittel

Kann die Produktion für diese neuartigen Produkte Serie nahe durchgeführt werden? Sind die Herstellprozesse und Routineprüfungen erfolgreich? Hat die Fabrik die geeigneten Produktionsmittel und Mitarbeiter?

Ziel 2: Bestätigung Vor-Ort Installation inklusive Demontage

Kann die Anlage nach Kundenspezifikation und Engineering Vor-Ort installiert werden? Sind die geeigneten Betriebsmittel dafür vorhanden? Können die Vorgaben für die Montagezeiten eingehalten werden? Kann die Anlage nach der ersten Testphase demontiert und an einem neuen Ort wieder installiert werden? Werden die baulichen Vorgaben und Sicherheitsvorschriften eingehalten?

Ziel 3: Bestätigung Betriebstauglichkeit mit erhöhten Prüfwerten

Kann die Anlage unter erhöhter Betriebsspannung betrieben werden? Wie hoch ist der thermische Grenzstrom und nach welcher Zeit wird das Temperaturlimit erreicht? Bis zu welcher Spannung ist die Anlage Teilentladungsfrei? Sind die UHF TE Sensoren geeignet zur Lokalisierung von Störstellen? Bleibt die Anlage dicht und funktioniert das zugehörige Monitoringsystem?

Ziel 4: Bestätigung Dauerbetrieb

Funktioniert die Anlage im Dauerbetrieb? Wie hoch sind die Verluste? Wie wirken sich Umgebungseinflüsse (z.B. Aussentemperatur, Schnee, Tiere, ...) auf den Betrieb aus? Gibt es Gefahrenpotentiale für Anwohner, Betriebspersonal oder den Betreiber?

Ziel 5: Referenzanlage für Netzbetreiber

Wird diese Anlage als Referenzinstallation von Netzbetreibern akzeptiert? Können Netzbetreiber damit ihre Risikobewertung für neue Technologien durchführen? Können die verbesserten technischen



Daten im Vergleich zu Freileitungen und Kabeln von Kunden bestätigt werden? Werden Druckluftkabel basierend auf diesen Erfahrungen in realen Netzen installiert?

2 Anlagenbeschreibung

Im Rahmen dieses Projektes wurden Druckluftkabel für 145kV, 2500 A ausgelegt, produziert, transportiert, geprüft, installiert und in Betrieb genommen.

Die Druckluftkabel wurden nach Montage in der eigenen Fabrik zuerst zum Prüfgelände der FKH nach Däniken transportiert und dort getestet: Hochspannungstests, Blitzstossstest, Dauerstromtests und TE-Messung, siehe Bild vom Aufbau:



Anschliessend wurden die Prüfpole demontiert und auf dem SBB Gelände in Seebach zu einem 3ph Kabelabschnitt in ein PE Rohr verlegt. Damit wurde die Montage in einem PE Rohr mit dem neuartigen Rollensystem via Montageschacht getestet. Anschliessend wurden Hochspannungs- und Hochstromtransformatoren angeschlossen und die Anlage unter Druck gebracht, um den Dauerbetrieb zu starten.



Die Anlage war im Dauerbetrieb unter Hochstrom (Phase 1), Hochspannung (Phase 2) und Druck (Phase 3) von 09/2022 bis 09/2023. Temperatur und Druck wurden via Online-Monitoring überwacht.

Während dem Betrieb und vor dem Rückbau wurden verschiedene Betriebsfälle und Spezialfälle getestet.



3 Vorgehen und Methode

Das Projekt wurde in verschiedene Arbeitspakete aufgeteilt und als **Lieferprojekt einer Kundenanlage** abgewickelt. Die Projektschritte beinhalteten folgende Arbeitspakete:

Arbeitspaket 1: Engineering

In diesem Arbeitspaket wurden die Details für die Installation der Testpole (1ph) und im Dauerversuch (3p) festgelegt. Dazu wurden die Produktdetails mit den Anforderungen Vor-Ort und für die Tests in Übereinstimmung gebracht.

Einige Besonderheiten dieser Anlage:

- Der Hochspannungstransformator ist ein Umbauwandler. Das Layout muss dafür passen.
- Eine T-Verbindung für gleichzeitige Belastung mit Hochspannung und Dauerstrom ist nötig
- Isolation im Gehäuse an einer Stelle (Spezialanfertigung) ist nötig für die Einspeisung von Dauerstrom in den Innenleiter via dem Umbauwandler.
- Ein Schachtmodell für die Installation ist nötig
- Eine 180° Umlenkung war nötig für die Schleife für Hochstromtests
- UHF TE Sensoren wurden für den Einbau in die Winkelstücke optimiert
- Die PE-Aussenrohre werden AUF dem Boden verlegt (nicht vergraben, zur besseren Sichtbarkeit). Massnahmen zur Temperaturdehnung durch Sonneneinstrahlung sind nötig

Arbeitspaket 2: Seriennahe Produktion

Die Druckluftkabel wurden in einem Seriennahen Setup in der Fabrik produziert und montiert. Die wichtigsten Unterschiede zu vorhergehenden Pilotproduktionen sind:

- Grössere Mengen (Etwa 12t) an Einzelteilen & Komponenten -> Logistik, Transport, Handling
- Erweitertes Lieferantennetzwerk, um Serieproduktion zu testen
- Installation und Test von Arbeitsmitteln, Werkzeugen und Vorrichtungen
- Schulung von neuen Mitarbeitern
- Test der Routineprüf vorschriften und Geräte
- Test von Verpackung und Transport

Die Rohrbearbeitung wurde in der eigenen Werkstatt durchgeführt. Die Montage und Logistik in der neu installierten Fabrikhalle. Parallel dazu wurden auch die Büros neu installiert.

Arbeitspaket 3: Transport, Vor-Ort Installation, Demontage

Transport und Installation wurden durch das gewählte Setup mehrfach getestet:

- Transport von Fabrik zur Testinstallation und 1ph Aufbau im Versuchsgelände FKH
- Umbau der Prüfpole während der Tests und gelegentlich Austausch von fehlerhaften Teilen
- Abbau Testinstallation bei der FKH und Transport zum Dauerversuch Testgelände Seebach
- Aufbau Dauerversuch via Schacht mit Rohrverlegung und Rollensystem

Ein direktes Feedback zum Engineering erlaubt eventuelle Verbesserungen für zukünftige Anlagen schon im Engineering zu berücksichtigen.

Ein zentraler Punkt dieses Arbeitspaketes sind die nötigen Hilfsmittel, Maschinen und Vorrichtungen für die Vor-Ort Montage. Da eine solche bisher noch nicht durchgeführt wurde, sind hier Hürden und Iterationen zu erwarten. Die Sicherheitsvorschriften für die Arbeiten Vor-Ort sind zu berücksichtigen und Gefahrenpotentiale zu minimieren.



Arbeitspaket 4: Hochspannung, Hochstrom, Dichtigkeitstests

Dieses Arbeitspaket wird von Mitarbeitern der FKH mit Ihren Betriebsmitteln durchgeführt. Hivoduct begleitet die Tests mit einem Prüfingenieur. Wichtig sind Produktexpertise und Testexpertise für die Tests nach vorgegebenen Normen und Erfahrung aus der Prüfpraxis.

Insbesondere bei Fehlern oder ungewöhnlichen Vorkommnissen ist eine gemeinsame Beurteilung und Entscheidung über das weitere Vorgehen nötig. Die folgenden Tests sind geplant:

Teil 1: Test mit erhöhten Werten und unabhängige Prüfungen: Dauer: ~1 Monat

- Anschluss an das Prüfequipment: Incl. Hochstrom & Durchführung
- Dauerstrom- und Erwärmungsprüfungen 2-3 Zyklen
- Wechselspannungsprüfungen mit erhöhten Werten
- Teilentladungsmessungen während AC Prüfung: Konventionell und UHF
- Blitzstossprüfungen
- Dichtigkeitsmessungen während Versuchsdauer
- Demonstration: Demontage. Wiederverwendung für Teil 2

Prüfdurchführung: FKH zusammen mit Prüfingenieur von Hivoduct

Teil 2: Dauertests: Dauer: ~1 Jahr

- Aufbau nach Engineering-Vorgaben
- Anschluss an das Prüfequipment
- Wechselspannungs- Dauerprüfung mit Betriebsspannung
- Dauerstrom- und Erwärmungstests mit Monitoring
- Dichtigkeitsmessungen und Monitoring

Prüfdurchführung: Prüfingenieur von Hivoduct. Regelmässige Checks während des Dauerversuchs. Die Prüfresultate werden gesammelt und für den Abschlussbericht aufbereitet.

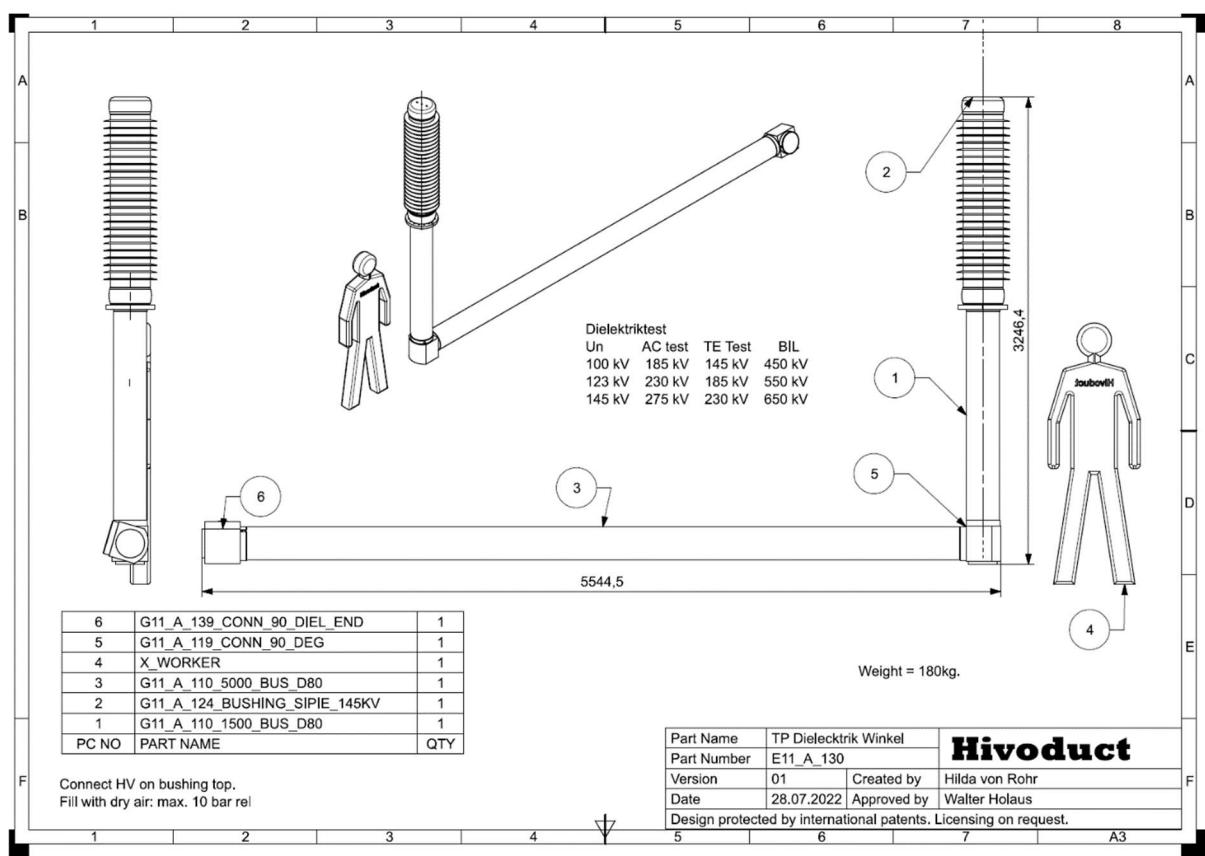


4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten wurden nach den im letzten Kapitel beschriebenen Arbeitspaketen durchgeführt. Hier eine Übersicht über die durchgeführten Arbeiten mit Bildern zur Veranschaulichung.

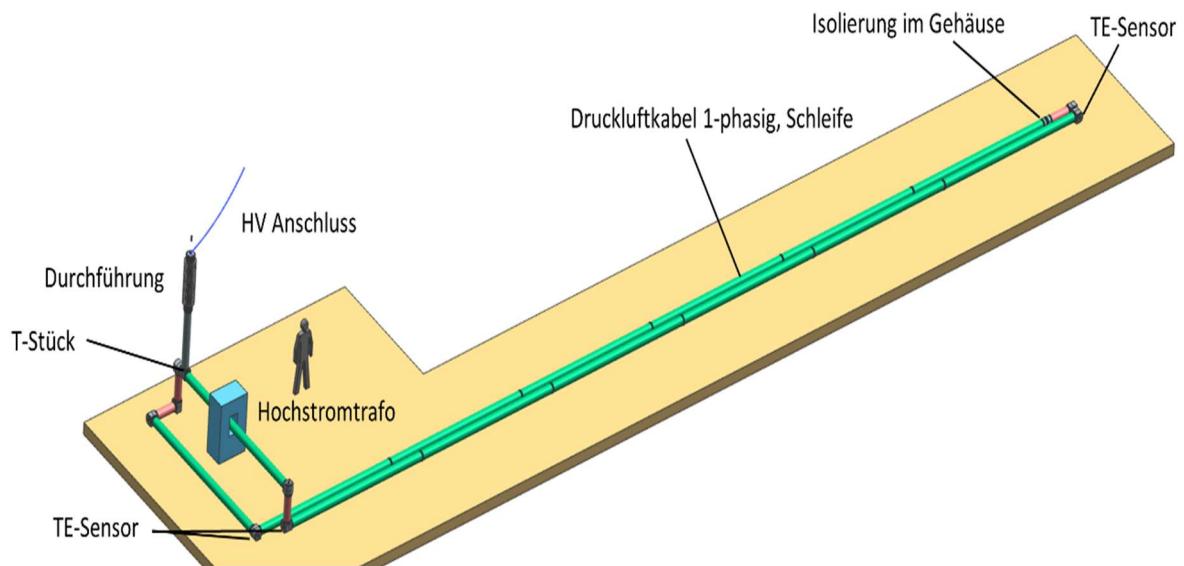
4.1 Engineering: Prüfpole und Spezialkomponenten

Das Engineering wurde mit dem 3D Designtool durchgeführt, um alle Details zu modellieren und die detaillierten Stücklisten für Einkauf und Produktion zu generieren. Ein Beispiel dazu zeigt die Zeichnung für den Prüfpol für die Dielektrikatests:



Für alle Prüfaufbauten wurden solche Zeichnungen für die Montage und die Materialbestellungen erstellt.

Der **Hochstrom-Prüfpol** ist besonders, da es sich um eine einphasige Schleife handelt, welche eine Isolierung im Gehäuse und exakte Längen zum Schliessen der Schleife benötigt. Zusätzlich ist eine 180° Umlenkung, eine Isolierung im Gehäuse und eine T-Verbindung nötig.



Alle Prüfpole konnten wie geplant produziert und installiert werden.

4.1.1 Spezialkomponente: T-Verbindung

Für den Anschluss der Hochspannung an die Stromschleife wurde eine T-Verbindung entwickelt. Das Bild zeigt die T-Verbindung vor dem Verbinden des Flansches der Durchführung. Man erkennt den Innenleiter mit dem Spacer und die Flanschverbindung mit Doppeldichtung.



Ein spezielles Gehäuse und Innenleiter sind für diese Komponente nötig.



4.1.2 Spezialkomponente: 180° Umlenkung

Für das Schliessen der Stromschleife wurde eine 180° Umlenkung entwickelt. Diese ist nur für den Hochstrom-Testaufbau nötig – für einen Betrieb gibt es typischerweise keine geschlossenen Schleifen.

Das Bild zeigt die Baugruppe zur 180 ° Umlenkung, welche aus 90° Gehäusen und speziellen Innenleitern erstellt wurde. Die Umlenkung ist auch mit einem Längskompensator kombiniert.

Verbaut wurde diese am hinteren Ende des Prüfpols. Zum Schliessen des letzten Flansches in der Schleife musste das letzte Rohr auf die exakte Länge produziert werden.



4.1.3 Spezialkomponente: Isoliertes Gehäuse

Um mit dem Umbauwandler Strom nur im Innenleiter der Stromschleife zu induzieren, wurde eine Gehäuse mit Isolierstelle entwickelt. Diese ist nur für den Hochstrom-Testaufbau nötig – für einen Betrieb sind die Gehäuse immer leitfähig.

Das isolierende Gehäuseteil wurde mit demselben Standard-Flanschdesign ausgeführt.

Da das Isoliermaterial nicht dieselbe mechanische Festigkeit wie die Alu-Gehäuse aufweist, wurden die Drucktests dafür mit reduzierten Werten von 20 bar durchgeführt. Das ist höher als die Routineprüfwerke aber kleiner als Berstwerte >32 bar für Typprüfungen. Da es sich um eine einmalige Anwendung mit max. 10 bar handelt, wurde dies als ausreichend erachtet. Das Gehäuse ist bis 20 bar nicht geborsten – der tatsächliche Berstwert liegt also höher und wurde nicht experimentell ermittelt.



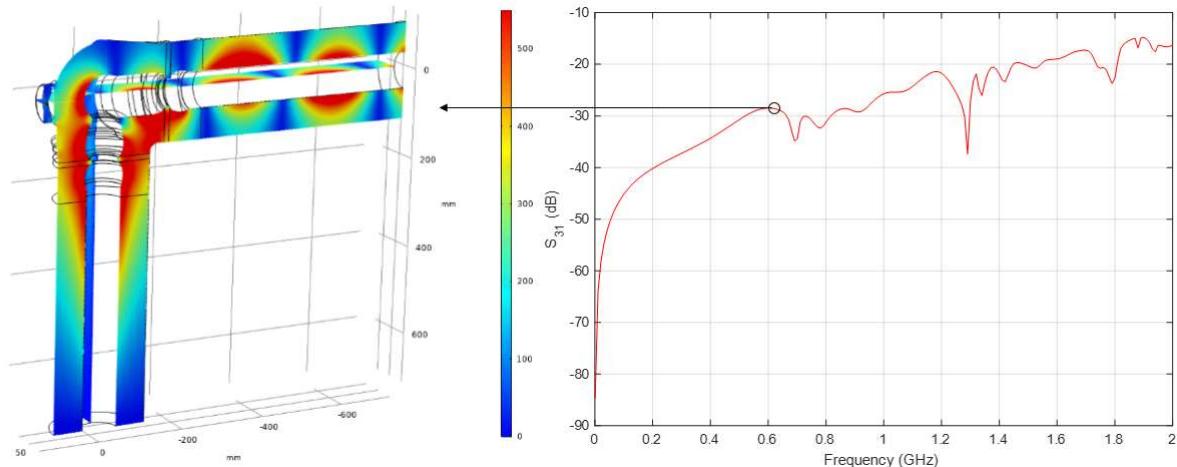
4.1.4 Spezialkomponente: UHF TE Sensor

Zum Einbau in die 90° Winkelstücke wurde ein UHF TE Sensor entwickelt. Dieser hat eine konkave Aluminiumscheibe als Sensor, welche isolierend im Gehäuse eingelassen ist. Das Isolierteil (schwarz) hat eine Doppeldichtung gegen aussen. Der isolierspalt ist wie im restlichen Gehäuse etwa 70 mm.



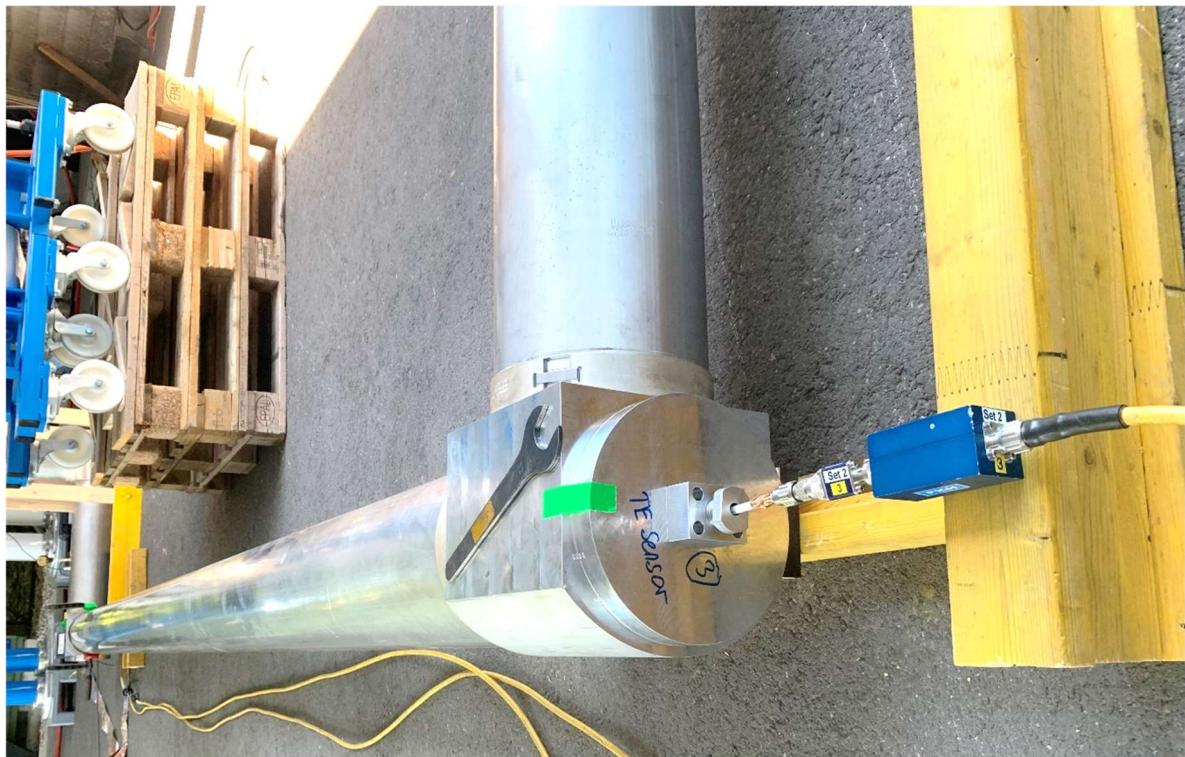
Das kapazitive Teilverhältnis zwischen Innenleiter und Gehäuse beträgt etwa **1:3840**. Das heisst, bei Nennspannung 145 kV = 85 kV Leiter-Erde ergeben sich am (offenen) TE Sensorausgang 22 V, wenn keine zusätzliche Kapazität durch die Zuleitung hinzugefügt wird.

Für diesen Sensor wurden auch Hochfrequenz-Simulationen von 0-2 GHz durchgeführt, um die Übertragungsfunktion zu bestimmen und die Geometry zu optimieren.



Die Simulation hat die Dimensionierung und eine ausreichende Signalübertragung in einem weiten Frequenzbereich bestätigt. Mit Anschluss an ein UHF TE Messsystem können damit TE Muster aufgezeichnet und analysiert werden.

Bei den UHF Messungen Vor-Ort hat sich leider gezeigt, dass die gewählte Steckverbindung zwischen TE-Sensor und Koax-Kabel nicht HF tauglich war. Die Verbindung selber hat Störungen produziert, welche den Störsignalen aus der Anlage überlagert waren und deshalb keine Aussagen möglich machte. Die Steckverbindung wurde für die nächste Version verbessert.



Das Bild zeigt den Anschluss des TE-Sensors an das Messsystem via Koax Kabel Vor-Ort.

Die Doppeldichtung des TE-Sensor ist für Überdruck innen konzipiert. Falls die Installation mit TE-Sensor auch mit Unterdruck (z.B. Evakuieren Vor-Ort zur Reduktion der Feuchtigkeit) betrieben werden soll, muss der Isolierteil des TE-Sensors auch auf der Aussenseite fixiert werden.

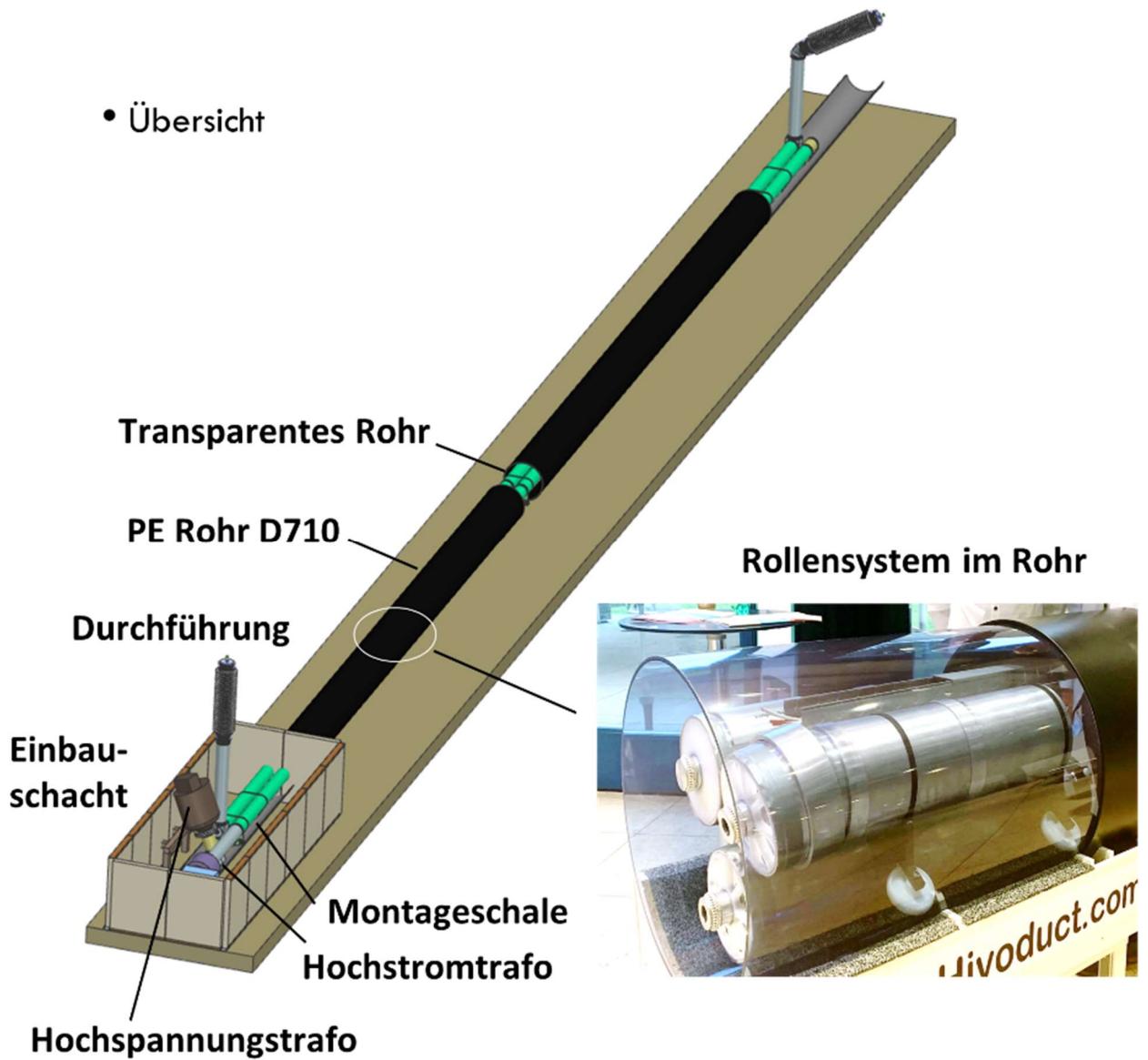
Es wurde auch eine Option zur axialen Verstellbarkeit der Sensorposition entwickelt. Diese konnte mechanisch getestet werden. Die Simulation hat bestätigt, dass sich die Dämpfung deutlich reduziert, wenn der Sensor näher am Innenleiter platziert wird. Spannungsfestigkeit für BIL ist bis – 6 mm gegeben. Die Empfindlichkeit konnte wegen der Kontaktierungsproblematik leider nicht mit dem UHF Testsystem getestet werden.



4.2 Engineering: Dreiphasige Installation mit Rohr und Schacht:

Die Montage im Dreieck in einem PE Rohr entspricht einer typischen Anwendung bei einer kompakten Graben-Verlegung im Untergrund.

Zur besseren Sichtbarkeit des verlegten Rohres wurde das PE Rohr tatsächlich aber nicht vergraben, sondern auf der Strasse verlegt. Das erlaubt eine gute Sichtbarkeit für Besuche während dem Betrieb. Der Schacht konnte in der Kranhalle des Betriebsgebäudes platziert werden. Die Schachtwände wurden nur so hoch gebaut, dass man die Einbauten darin einfach erkennen kann. Das Rollensystem wurde Vor-Ort montiert und getestet.

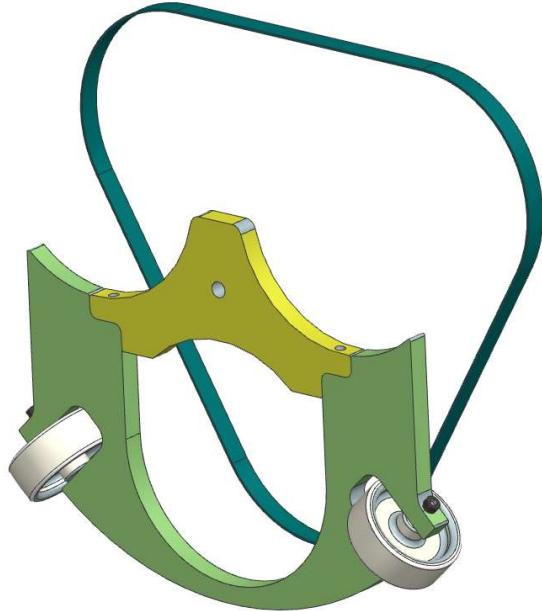


Der Prüfpol konnte wie geplant produziert und installiert werden.



4.2.1 Spezialkomponenten: Rollensystem

Das Rollensystem wurde auf das verwendete PE-Schutzrohr von DN=710 mm abgestimmt. Etwa alle 1.6 m wird ein Rollensystem verbaut, um das Gewicht der drei Phasen aufzunehmen und die Druckkraft pro Rolle zu limitieren. Ein Zugseil im Zentrum ermöglicht das Einrollen mit Seilwinde.



4.2.2 Schacht und Montageschale

Der Schacht mit 2.5m x 6 m wurde aus Metallplatten mit Isolierung und einer Höhe von 1.3 m aufgebaut, um Vor-Ort den Einbau von oben in die Montageschalte zu testen und trotzdem gute Sichtbarkeit auf das Equipment zu haben. Schacht und Schale wurden in der Fabrik zum Vortesten aufgebaut und für den Transport wieder demontiert.





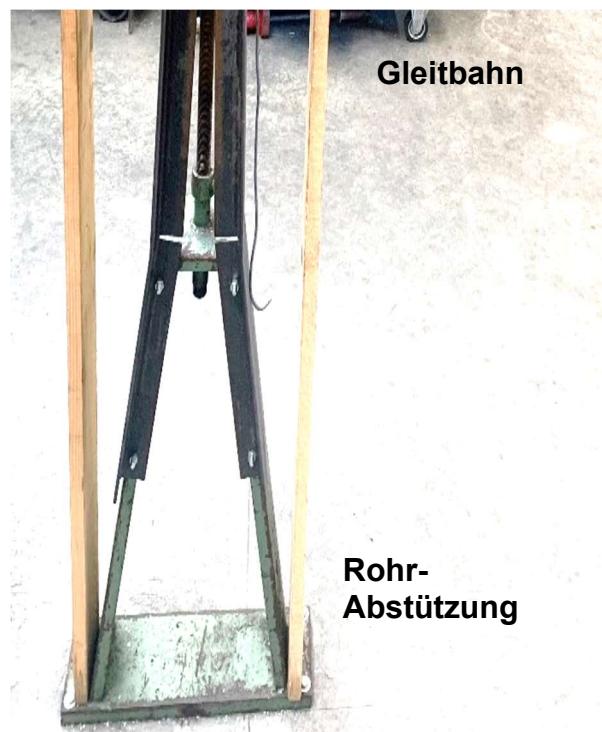
4.3 Produktion und Montage der Druckluftkabel

Die Rohre und die meisten Frästeile wurden in der eigenen Werkstatt gefräst. Ein Beispiel für die Rohrbearbeitung zeigt das Bild:



Für die Rohbearbeitung sind spezielle Aufspannvorrichtungen an der Fräsmaschine nötig.

Insbesondere für die langen Rohre wurde auch eine seitlich gleitende Abstützung für die Rohrenden gebaut. Die Abstützung dient auch als Endabschlag für die langen Rohre.





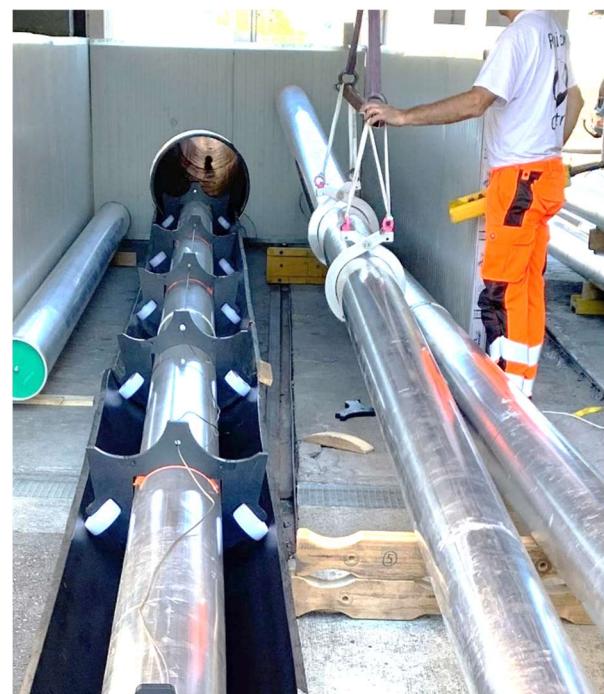
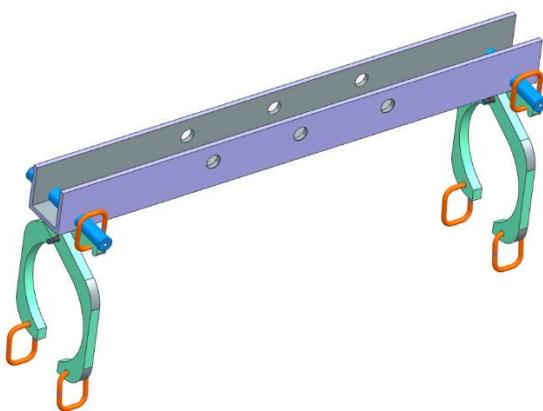
Die Abstützung ist auf die Höhe der Aufspannvorrichtung angestimmt und bietet auch einen Anschlag für die Standardlänge der Rohre. Während dem Fräsvorgang gleitet das Rohr auf der Gleitbahn horizontal hin und her.

Die Rohre mit den Innenleitern, Winkelstücke und Spezialkomponenten wurden in der Montagehalle montiert. Dazu wurde diese mit den nötigen Vorrichtungen und Werkzeugen eingerichtet, siehe Bild:



4.3.1 Spezialentwicklung: Rohrheber

Für das einfacheren Anheben der Rohre in der Produktion, Montage und Vor-Ort wurde ein spezielle Rohrheber-Zange entwickelt. Diese kann an den Kran gehängt und um das Rohr gelegt werden und schliesst sich durch das Gewicht des Rohres. Damit können einzelne Rohre in der Balance gehoben werden.





Die Ringe unten erlauben bis zu drei Rohre untereinander hängend zu heben.

Der Rohrheber hat sich bei der Montage gut bewährt, sollte aber noch ein wenig optimiert werden für einfacheres Handling.

4.3.2 Spezialentwicklung: Ringöffner

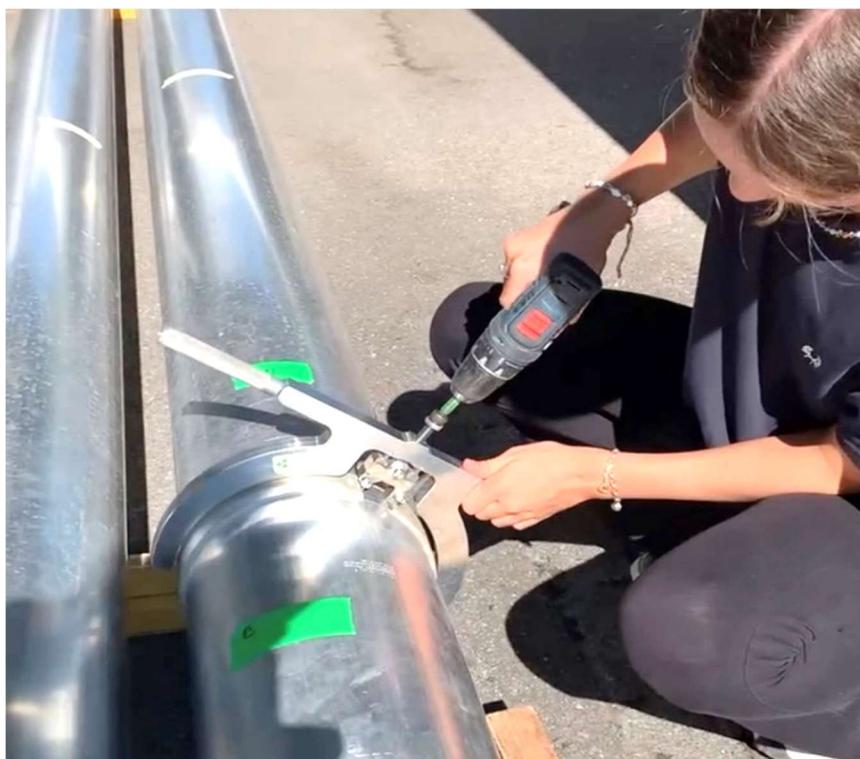
Das wichtigste Montagewerkzeug ist der Ringöffner. Damit können die Flanschringe geöffnet und geschlossen werden, ohne dass sie plastisch verformt werden.

Der Ringöffner wird mit einem Akku-Schrauber angetrieben. Ein Flanschring kann damit in wenigen Sekunden geöffnet und geschlossen werden.

Die Handgriffe beidseitig ermöglichen gute Ergonomie.

Eine Optimierung des Angriffswinkels der Krallen wird das Lösen von flach aufliegenden Flanschringen noch ein wenig beschleunigen.

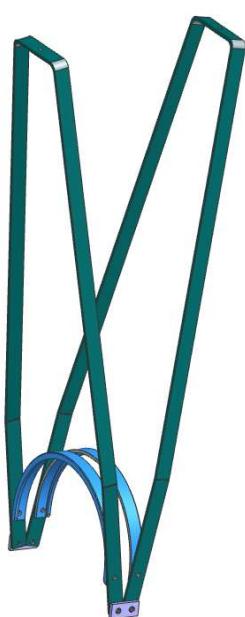
Für jeden Gehäusedurchmesser ist eine eigener Ringöffner notwendig.



4.3.3 Spezialentwicklung: Flanschzange

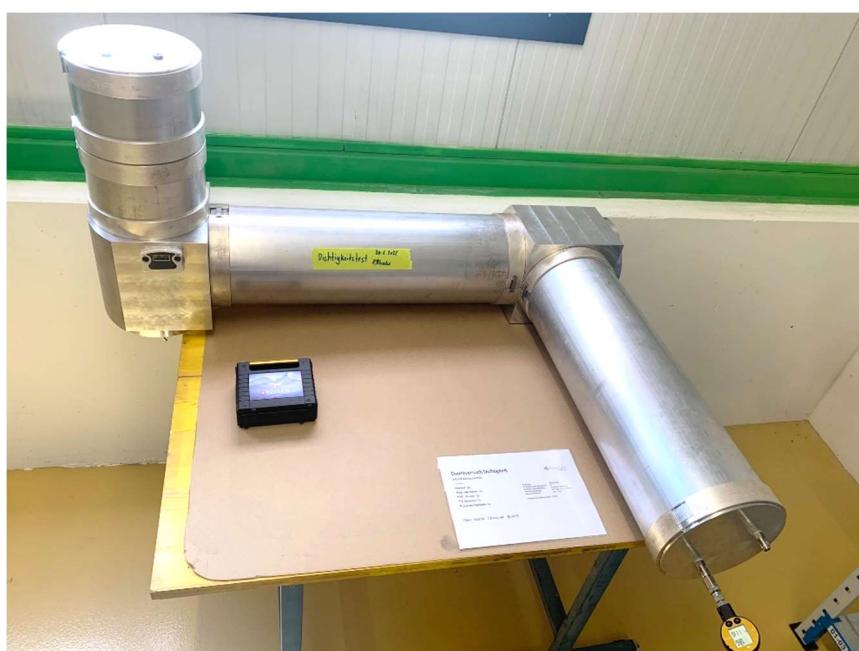
Die Flanschzange erlaubt das axiale Zusammen- und Auseinanderziehen der Rohre. Sie greift in die Rillen des Flanschringes ein und hat einen etwa 1:20 Hebelarm. Damit können die Rohre axial geöffnet und geschlossen werden. Beim Schliessen werden die O-Ringe gequetscht, weshalb die Hebelübersetzung nötig ist.

Die Zange hat sich gut bewährt - eine Optimierung für mehr Robustheit ist noch nötig.



4.4 Routineprüfungen

Während der Montage wurden eine Reihe von Routineprüfungen durchgeführt. Ein Beispiel hier zeigt einen Prüfpol zur Dichtigkeitsprüfung. Dafür wurden zwei Winkelstücke, kurze Rohre und das Isolierte Gehäuse mit Deckeln zu einem Prüfpol zusammengebaut und mit Druckluft gefüllt. Während 2 Wochen wurde die Dichtigkeit kontrolliert und bestätigt. Geringe Druckschwankungen aufgrund der Umgebungstemperatur werden für die Dichtigkeit mitberücksichtigt.





Für die Durchführung wurde eine neue Variante gewählt, welche eine neue Innenabschirmung und einen einteiligen Hochspannungsanschluss hat. Um die Berstfestigkeit zu bestätigen wurde diese Variante auch auf 50 bar mit Wasserdruck getestet.



Die Berstfestigkeit dieser Variante konnte damit bestätigt werden.

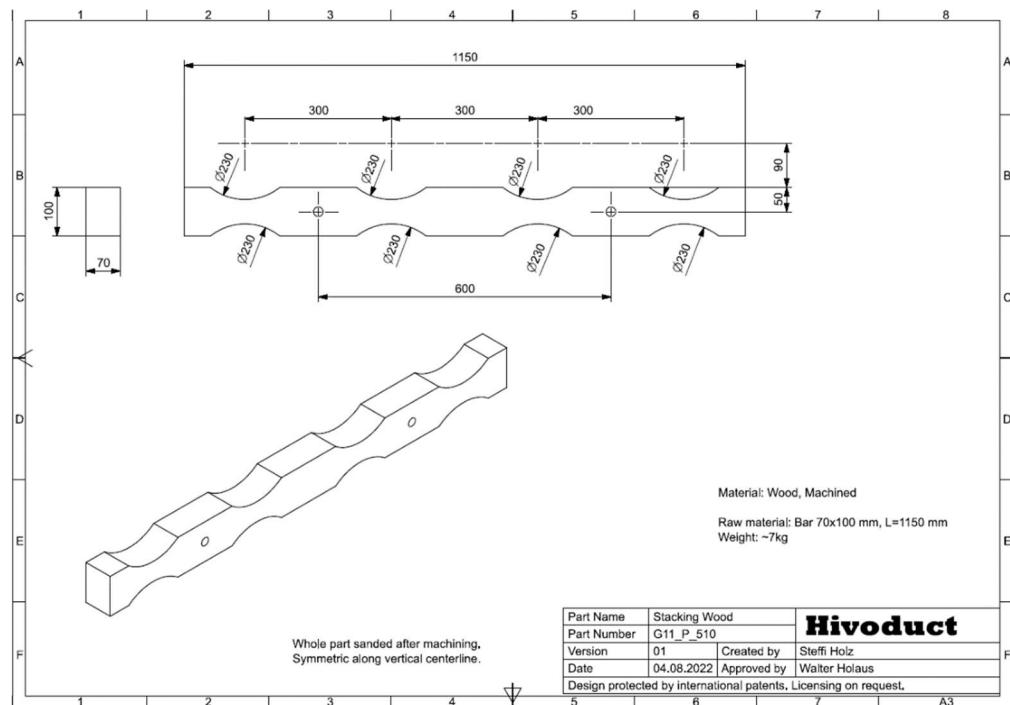
4.5 Fertige Transporteinheiten gestapelt

Für den Transport wurden Transportstapel mit gefrästen Holzklötzen gebildet. Damit lassen sich 16 Stk. je 5 m lange Rohre mit Anbauteilen transportieren.





Transportstapel in dieser Grösse und mit einem Gewicht von etwa 2.5 t lassen sich gut mit Gabelstapler (in der Montage) und Kran am LKW bewegen.



Der Transport wurde auf offenem LKW mit Transportschutzdeckeln durchgeführt.



Es zeigte sich, dass die Temperatur der Rohre während dem Transport durch Sonneneinstrahlung signifikant ansteigt. Da die Rohre durch die beiden Deckel dicht verschlossen sind, steigt damit der Innendruck. Das hat dazu geführt, dass die Deckel der obersten Rohre im Stapel herausgedrückt wurden. Sie wurden deshalb zusätzlich mit Klebband befestigt.



4.6 AC Vorprüfung

Vortests mit AC wurden mit einem kurzen Prüfpol im Prüflabor von Pfiffner durchgeführt, da wir in der Montage aktuell keine Möglichkeit für Hochspannungsprüfungen haben.

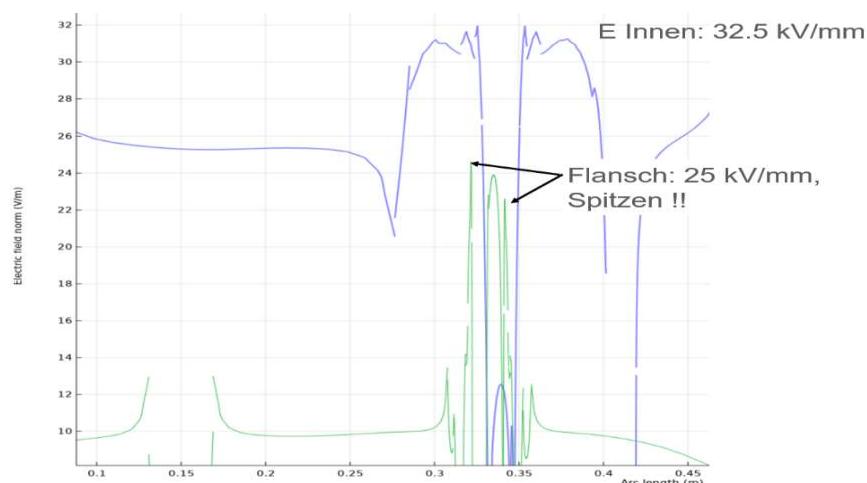


Vor der Prüfung wurden die Rohre für 1h in einem Trockenofen getrocknet.

Die AC Prüfung wurde TE-frei bis 230 kV, 1 min bestätigt, siehe Bild.

Bei Erhöhung der Prüfspannung gab es bei 250 kV einen wiederholten Überschlag. Der Überschlag konnte eindeutig im Übergangsradius vom horizontalen Spacer im Winkelstück lokalisiert werden.

Ein Vergleich mit der dielektrischen Rechnung zeigt, dass die Spitzen an diesem Radius zwar kleiner sind als die maximale Feldstärke an der Abschirmung. Es benötigt aber nur minimale Toleranzfehler oder Kanten am tangentialen Übergang, um die Spitzen deutlich höher werden zu lassen.





PFIFFNER			Teilentladungenmessung Formulare Nr: PA-804	
Prüfling / Test Object:	E11_A_130		Seite/Page:	1/1
Marke / Brand:	Hivoduct Druckluftkabel		von/of	
Typ/ Type:	G11 145kV			
Komm.-Nr./ Komm Nr.:	-			
Spannung Voltage [kV]	TE / PD level [pC]	Dauer / Time [s]	Bemerkung Remarks	
69	<1			
120	<1			
185	<1	60		
120	<1			
69	<1			
85	<1			
148	<1			
230	<1	60		
148	<1			
85	<1			
100	<1			
174	<1			
275		60	Überschlag bei 250kV. Wiederholung Überschlag bei 245 kV.	
174				
100				
Messmittel / Mesuring equipment			PMW Nr.	
HV Teiler / HV Divider			1013	
TE-Kalibrator / PD Calibrator			1055	
TE-Messgerät / PD measuring system			1224	
Bemerkung / Remarks				
Die Prüfung bis zu den Prüfpunkten der 123kV Spannungsreihe wurde bestanden. Die 145kV Spannungsreihe konnte nicht erfolgreich abgeschlossen werden.				
Datum: Date: 27. JULI 2022	Geprüft: Checked by: 	 PFIFFNER TEST LABORATORY CH - 5042 Hirschthal		
Pfiffner Messwandler AG, Hirschthal Vertreter: Pruefstelle Dokument Art: Formulare Formular Nr. / Verantwortlich / Ausgabe / Datum: PA-804_TE Messung.doc			Status: 2015-03-03 / Freigabe / SHC / Verantwortlich: 2015-03-03 / SHC Seite 1 von 1	

Obwohl damit nicht die volle Prüfspannung von 275 kV erreicht werden konnte, wurden die Hochspannungsversuche bei FKH wie geplant durchgeführt. Wie sich später zeigte, wurden dort dieselben Grenzwerte festgestellt. Die Schwachstelle war dieselbe.



4.7 Hochstromtests

Hochstromtests wurden bei FKH in einer etwa 67 m langen Schleife durchgeführt. In der langen Schleife war der mögliche Dauerstrom auf 2000 A limitiert (Limit vom Trafo). Deshalb wurde in einem zweiten Test die Länge auf 46 m reduziert. Damit waren 2500 A für 9h möglich.

Zum Vergleich der Widerstände vor und nach dem Test wurde der Schleifenwiderstand am Innenleiter vor dem Schliessen der Schleife gemessen.

Widerstandsmessung



Temperaturmessung am Innenleiter



Zur Temperaturmessung wurden 10 Temperatursensoren aussen am Gehäuse montiert. Zur Messung der Leitertemperatur wurden Messstreifen auf die Innenleiter geklebt. Damit wurde die Temperatur nahe beim Spacer und in der Mitte der langen Rohre gemessen. Die Streifen können erst nach dem Abbau abgelesen werden.

Das Bild zeigt den kompletten Aufbau mit Umbauwandler (blau) auf dem Palettenstapel.

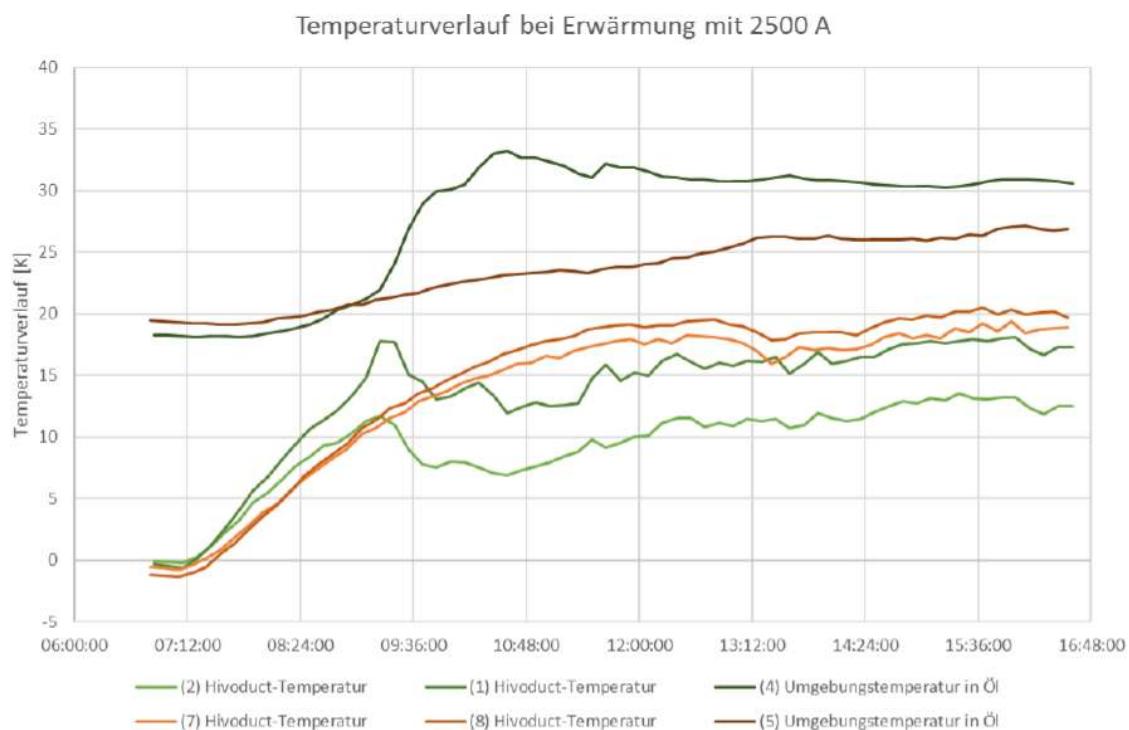


Hochstromtests

4.7.1 Temperaturverlauf während der Erwärmungsprüfung

Die Resultate wurden aus dem Prüfbericht von der FKH zu diesen Tests entnommen.

Die Grafik zeigt den Temperaturverlauf der Sensoren 1, 2, 4, 5, 7 und 8 während der Erwärmungsprüfung mit 2500 A über den Zeitraum von etwa 9h. Die Sensoren 1, 2 und 4 waren im äusseren Bereich, der stark besonnt wurde, was den schnelleren Temperaturanstieg im Vergleich zu den Sensoren 5, 7 und 8 erklärt, welche den ganzen Tag im Schatten waren.





Bei den Umgebungstemperaturen (Sensoren 4 und 5) handelt es sich um die gemessenen Werte. Bei den anderen vier Sensoren wurden die Temperaturunterschiede zur Umgebungstemperatur dargestellt.

Gemäss IEC 62271-204:2022 gibt es für die maximale Temperatur der Kapselung zwei verschiedene Kategorien:

- Freiluft-, Tunnel- und Schachtanlagen:
 - Maximale Gehäusetemperatur: 80 °C
 - Maximale Temperatur von berührbaren Teilen: 70 °C
- Direkte Erdverlegung:
 - Maximale Temperatur im Bereich von 50 – 60 °C

Alle obigen Vorgaben wurden bei dieser Erwärmungsprüfung erfüllt.

Am Ende der Erwärmungsprüfung betrug die Temperaturzunahme der Kapselung weniger als 1 K/h. Die Schwankungen sind auf verstärkte Kühlung durch sporadischen Wind zurückzuführen.

Die Temperaturen der Umgebungsluft in Luft gemessen ist stark beeinflusst von Wind und anderen äusseren Einflüssen, daher werden diese hier nicht berücksichtigt. Die Messtellen 9 – 12 sind in einem Bereich, der je nach Sonnenstand besonnt oder beschattet war, weshalb die an diesen Stellen beobachteten grossen Änderungen durch diesen Einfluss zustande kamen.

4.7.2 Widerstandsmessung vor/nach der Erwärmungsprüfung

Die Widerstände wurden vor und nach der Erwärmungsprüfung gemessen und im Anschluss verglichen. Gemäss dem Punkt 7.4.4.3 in der IEC-Norm 62271-1:2017 darf die Widerstandszunahme nicht mehr als 20 % betragen.

Messung vor der Erwärmungsprüfung:

- Temperatur: 29.1 °C Feuchtigkeit: 35.2 % Luftdruck: 972.0 mbar
- Widerstand: 50 A 0.741 mΩ 100 A 0.741 mΩ 200 A 0.741 mΩ

Messung nach der Erwärmungsprüfung:

- Temperatur: 27.6 °C Feuchtigkeit: 42.6 % Luftdruck: 972.1 mbar
- Widerstand: 50 A 0.752 mΩ 100 A 0.752 mΩ 200 A 0.752 mΩ
- Widerstandszunahme: 50 A 1.5% 100 A 1.5% 200 A 1.5%

Die Widerstandsänderung liegt damit im tolerierten Bereich.

4.7.3 Erwärmungsprüfung mit 2000 A

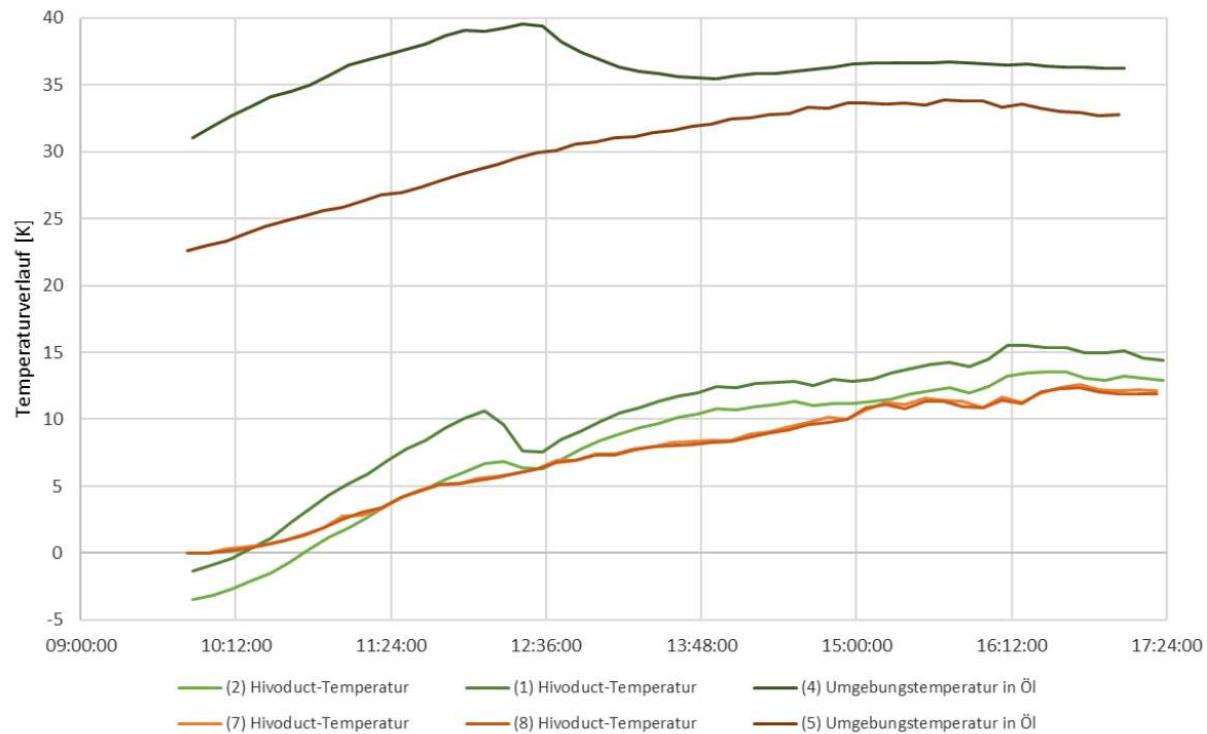
Die Erwärmungsprüfung mit 2000 A wurde derselbe Prüfaufbau mit einigen zusätzlichen geraden Rohren im Vergleich zur Variante für 2500 A durchgeführt.

Die Abbildung zeigt den Temperaturverlauf der Sensoren 1, 2, 4, 5, 7 und 8 während der Erwärmungsprüfung mit 2000 A. Die Sensoren 1, 2 und 4 waren im äusseren Bereich, der stark besonnt wurde, was den schnelleren Temperaturanstieg im Vergleich zu den Sensoren 5, 7 und 8 erklärt, welche den ganzen Tag im Schatten waren.

Bei den Umgebungstemperaturen (Sensoren 4 und 5) handelt es sich um die gemessenen Werte. Bei den anderen vier Sensoren wurden die Temperaturunterschiede zur Umgebungstemperatur dargestellt.



Temperaturverlauf bei Erwärmung mit 2000 A



Die Vorgaben aus der IEC-Norm 62271-204:2022 sind auch für diese Erwärmungsprüfung erfüllt. Am Ende der Erwärmungsprüfung betrug die Temperatur-zunahme weniger als 1 K/h. Die Schwankungen sind auf verstärkte Kühlung durch sporadischen Wind zurückzuführen.

Die Temperaturen der Umgebungsluft in Luft gemessen ist stark beeinflusst von Wind und anderen äusseren Einflüssen, daher werden diese hier nicht berücksichtigt. Die Messtellen 9 – 12 sind in einem Bereich, der je nach Sonnenstand besonnt oder beschattet war, weshalb die an diesen Stellen beobachteten grossen Änderungen durch diesen Einfluss zustande kamen.

4.7.4 Widerstandsmessung bei 2000 A

Messung vor der Erwärmungsprüfung:

- Temperatur: 28.7 °C Feuchtigkeit: 43.3 % Luftdruck: 973.3 mbar
- Widerstand: 50 A 1.060 mΩ 100 A 1.061 mΩ 200 A 1.061 mΩ

Messung nach der Erwärmungsprüfung:

- Temperatur: 29.1 °C Feuchtigkeit: 35.2 % Luftdruck: 972.0 mbar
- Widerstand: 50 A 1.044 mΩ 100 A 1.045 mΩ 200 A 1.045 mΩ
- Widerstandsabnahme: 50 A 1.5% 100 A 1.5% 200 A 1.5%

Die Widerstandsänderung liegt im tolerierten Bereich von weniger als 20 %.

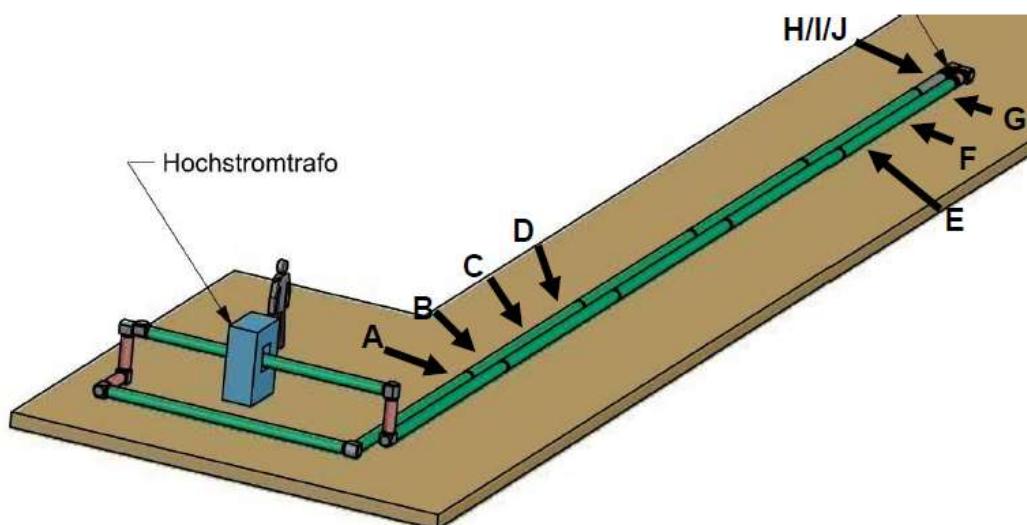


4.7.5 Messung der Innenleitertemperaturen mit CelsiStrips

Während den Erwärmungsprüfungen wurden neben den Temperatursensoren mehrere CelsiStrips an den Innenleiter und die Kapselung des Hivoduct-Prüfpols angebracht. Der Temperaturbereich dieser Streifen liegt zwischen 88 und 127 °C, wobei dieser in folgende Bereiche unterteilt ist:

- 88 – < 93 °C
- 93 – < 99 °C
- 99 – < 104 °C
- 104 – < 110 °C
- 110 – < 116 °C
- 116 – < 121 °C
- 121 – < 127 °C
- > 127 °C

Die nachstehende Abbildung zeigt die Positionen, an denen diese CelsiStrips angebracht wurden.



Positionen der CelsiStrips während den beiden Erwärmungsprüfungen

In der nachstehenden Tabelle sind die maximal registrierten Temperaturbereiche für alle Positionen aufgelistet.

Für den Innenleiter gibt die Tabelle 14 aus der IEC-Norm 62271-1:2017 an, dass die Temperaturzunahme bei einer solchen Erwärmungsprüfung unter 75 °C liegen soll und die maximal erreichte Temperatur kleiner als 115 °C bleiben soll.

Die Versuche ergaben, dass die maximale Temperatur im Bereich G möglicherweise und im Bereich J sicher über 115°C lagen und damit die IEC-Norm nicht erfüllen.

Da die CelsiStrips nach der Erwärmungsprüfung mit 2'500 A nicht ausgetauscht wurden, lässt sich nicht mit Sicherheit bestimmen, bei welcher Erwärmungsprüfung diese maximalen Temperaturen erreicht wurden. Aufgrund der allgemein höheren Temperaturen und Temperaturzunahmen bei der Erwärmung mit 2500 A kann allerdings angenommen werden, dass die Werte bei 2000 A tiefer lagen.



Es kann auch keine Aussage über die maximale Temperaturzunahme gemacht werden, da die Temperatur des Innenleiters zu Beginn der Versuche nicht gemessen wurde. Es kann lediglich angenommen werden, dass diese ungefähr der Umgebungstemperatur entsprach.

Nr.	Position am Rohr	Genauere Beschreibung	Registrierter Bereich der max. Temperatur
A	Ende des Rohres	Kapselung oben	Keiner
A	Ende des Rohres	Innenleiter oben	93 – < 99 °C
A	Ende des Rohres	Innenleiter unten	93 – < 99 °C
B	Anfang des Rohres	Innenleiter oben	93 – < 99 °C
B	Anfang des Rohres	Innenleiter unten	93 – < 99 °C
C	Mitte des Rohres	Innenleiter oben	88 – < 93 °C
C	Mitte des Rohres	Innenleiter unten	88 – < 93 °C
D	Ende des Rohres	Innenleiter oben	99 – < 104 °C
D	Ende des Rohres	Innenleiter unten	99 – < 104 °C
E	Anfang des Rohres	Innenleiter oben	99 – < 104 °C
E	Anfang des Rohres	Innenleiter unten	99 – < 104 °C
F	Mitte des Rohres	Innenleiter oben	93 – < 99 °C
F	Mitte des Rohres	Innenleiter unten	93 – < 99 °C
G	Ende des Rohres	Innenleiter oben	110 – < 116 °C
G	Ende des Rohres	Innenleiter unten	110 – < 116 °C
H	Anfang des Rohres	Innenleiter oben	104 – < 110 °C
H	Anfang des Rohres	Innenleiter unten	104 – < 110 °C
I	Mitte des Rohres	Innenleiter oben	104 – < 110 °C
I	Mitte des Rohres	Innenleiter unten	104 – < 110 °C
J	Ende des Rohres	Innenleiter oben	116 – < 121 °C
J	Ende des Rohres	Innenleiter unten	116 – < 121 °C

Der Bereich «G» mit den zu hohen Temperaturen am Innenleiter ist die 180° Umlenkung des Prüfpols, siehe dazu auch Kapitel 4.2.1.

Diese Umlenkung wurde nur für diesen speziellen Prüfaufbau als Schleife entwickelt und ist nicht Teil des Lieferprogramms für tatsächliche Kundeninstallation von Druckluftkabeln. Deshalb wurden bei dieser Umlenkung Kompromisse für den Leiterquerschnitt in Kauf genommen.



Der Kompromiss im Leiterquerschnitt hat dazu geführt, dass die Innenleitertemperaturen in diesem Bereich höher waren (116° - 121°C anstatt der erlaubten 115°C). Dieser Bereich war auch der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Das hat leider zu einem (knapp) nicht bestandenen Resultat geführt, zeigt aber, dass unser Leiterdesign sehr exakt zu den Anforderungen passt.



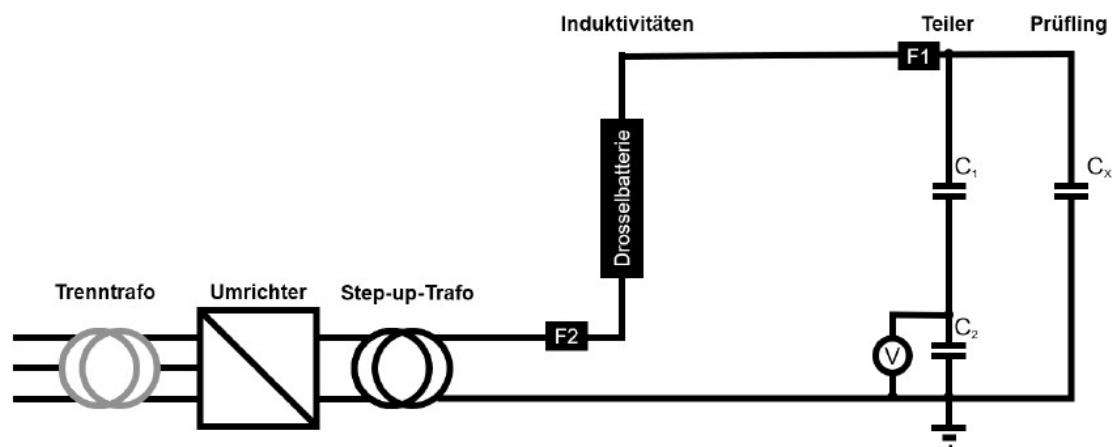
4.8 Hochspannungstests mit Wechselspannung

Hochspannungstests (AC, TE Messung, Blitzstoss) wurden am kleinen Prüfpol bei der FKH im Freien durchgeführt.



Die AC Prüfungen wurden mit einer mobilen Resonanzprüf-anlage durchgeführt, siehe Drosseln im Hintergrund.

Hier dazu das Schema des Hochspannungsprüfkreises:



Der Prüfaufbau umfasste die folgenden Komponenten (v.l.n.r.):

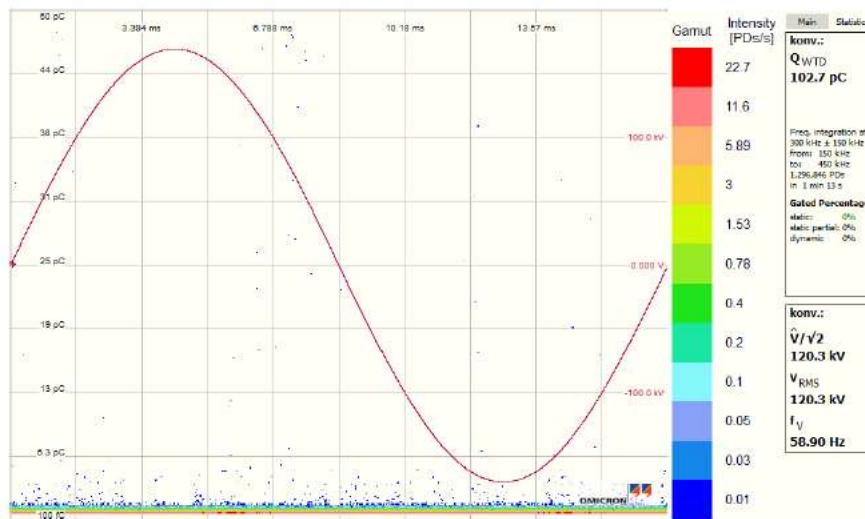
- Speisung über Trenntransformator (50 kVA)
- Frequenz-Umrichter (REFU 63)
- Step-Up-Transformator „Obelix“ mit Übersetzung 1:10
- Hochspannungs-Drosseln: $L_{total} = 162 \text{ H}$: 3 serie (LEinzel-Drossel = 50 H)



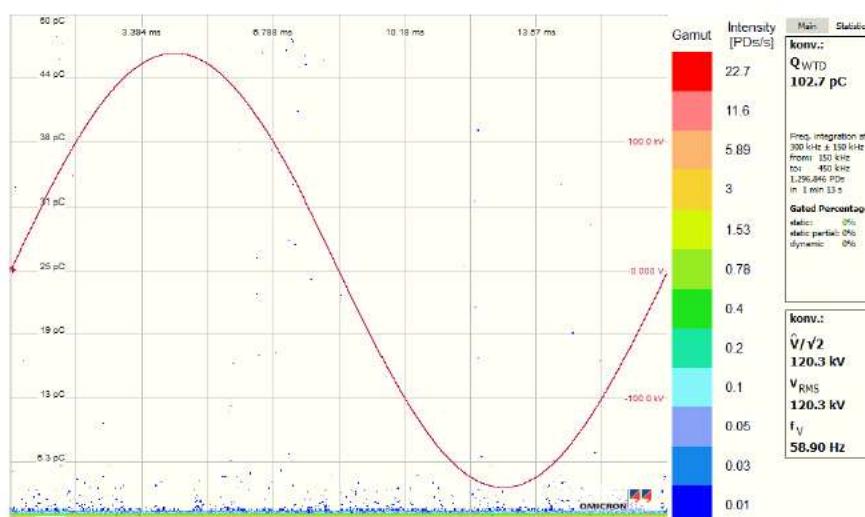
- Spannungsteiler mit C1: 1 nF, C2: 1'042 nF => ü (theoretisch): 1042 => ü (gemessen): 1033
- Last-Kondensatoren: Cx1: 42 nF
- Prüfling: CX2: 0.4 nF
- Frequenz des Prüfkreises: 58.8-58.9 Hz

4.8.1 Resultate der AC Prüfungen mit 100 kV

Die Teilentladungsmessungen bei 120 kV für die 100-kV-Spannungsebene vor der Blitzstossprüfung haben vor und nach der Stehwechselspannungsprüfung (185 kV / 1 min) keine spannungskorriierten TE ergeben. Die Teilentladungsmuster (Abbildungen 6 und 7) wurden während einer Minute aufgezeichnet:



Teilentladungsbild bei 120 kV (58.9 Hz, vor Stehwechselspannungsprüfung)



Teilentladungsbild bei 120 kV (58.9 Hz, nach Stehwechselspannungsprüfung)

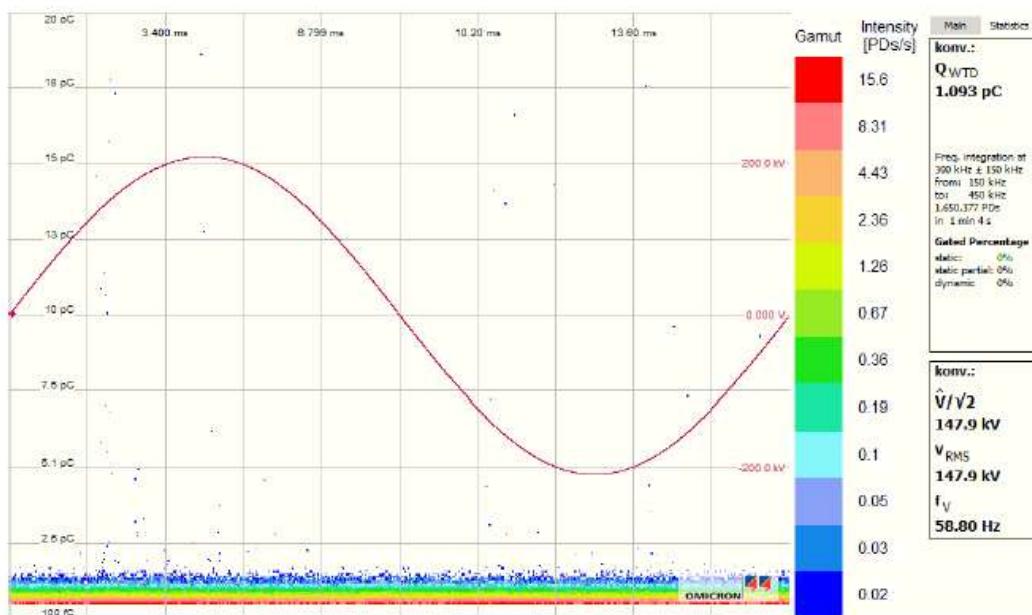


4.8.2 Resultate der AC Prüfungen mit 123 kV

Die Teilentladungsmessungen bei 148 kV für die 123-kV-Spannungsebene vor der Blitzstossprüfung haben vor und nach der Stehwechselspannungsprüfung (230 kV / 1 min) keine spannungskorrelierten TE ergeben. Die Teilentladungsmuster wurden während einer Minute aufgezeichnet:



Teilentladungsbild bei 148 kV (58.8 Hz, vor Stehwechselspannungsprüfung)



Teilentladungsbild bei 148 kV (58.8 Hz, nach Stehwechselspannungsprüfung)



4.9 Blitzstossprüfungen

Bei der Blitzstossprüfung wurde derselbe Hivoduct-Prüfpol wie für die Wechselspannungsprüfung geprüft. Die Blitzstossanlage ist im Vordergrund zu sehen.

Ein typischer Blitzstoss mit Wellenform 1.2 μ s / 50 μ s ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Sämtliche Stösse erfüllten die folgenden Toleranzen:

- Scheitelspannung $\pm 3\%$
- Anstiegszeit (Stirnzeit) $T_1 \pm 30\%$
- Rückenhalbwertszeit $T_2 \pm 20\%$.

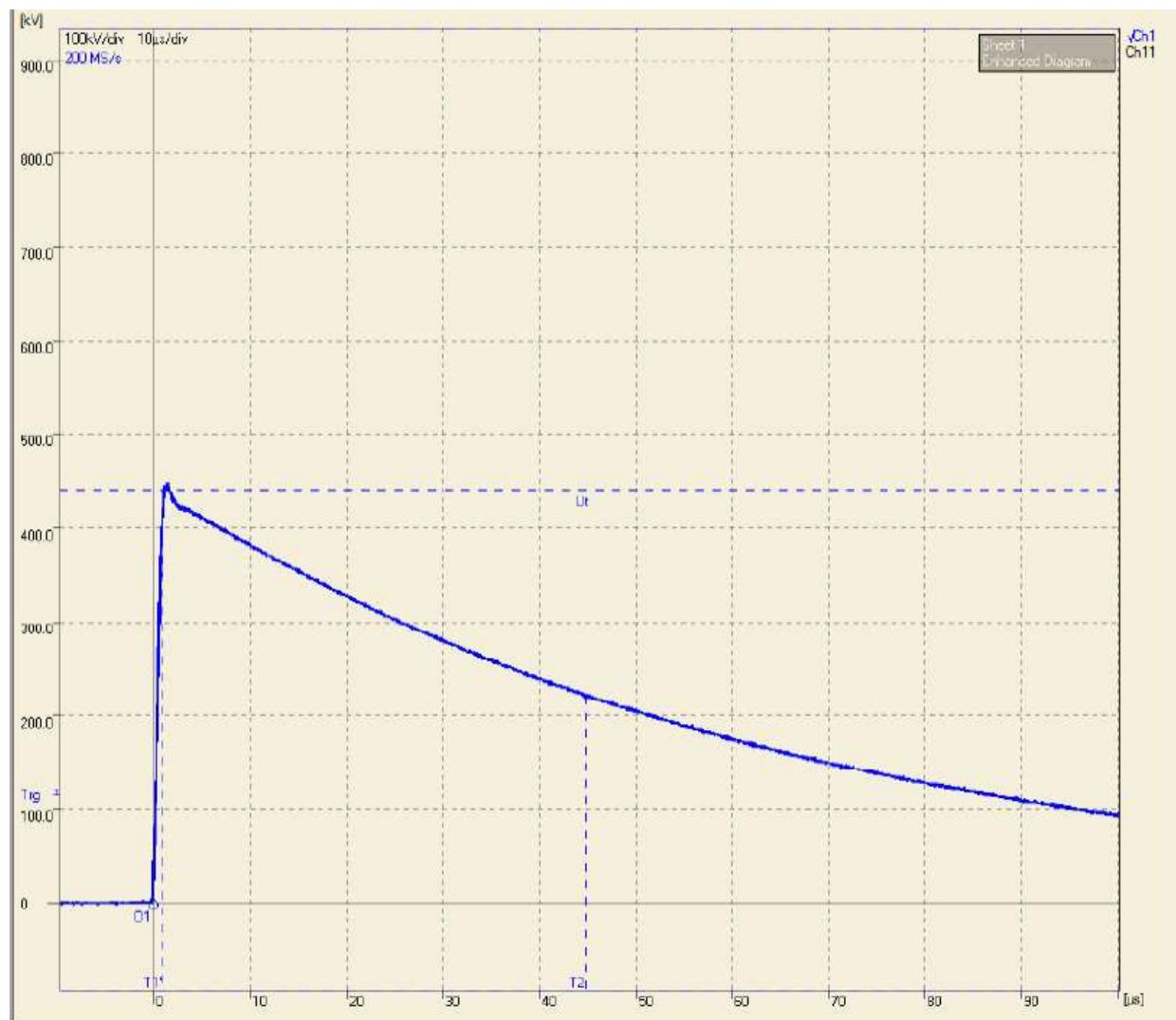


Bild eines positiven Blitzstosses für die 100-kV-Spannungsebene

Im Anschluss an die Vorprüfungen mit Wechselspannung wurden die Blitzstossprüfungen für die beiden Spannungsebenen 100 kV und 123 kV durchgeführt.



4.9.1 Resultate der Blitzstossprüfungen

Die durchgeföhrten Blitzstossversuche inklusive der Vorversuche (kursiv) für 100 kV Nennspannung sind in den nachstehenden Tabellen für die positive (Tabelle I) und die negative Polarität (Tabelle II) aufgelistet.

Tabelle I Positive Blitzstösse für die 100-kV-Spannungsebene inkl. Vorversuche

Nr.	Spannung [kV]	T1 [μ s]	T2 [μ s]	Polarität	bestanden
1	198.1	1.028	44.64	positiv	ja
2	259	1.03	44.85	positiv	ja
3	333.9	1.039	44.82	positiv	ja
4	408.4	1.041	44.96	positiv	ja
5	446.2	1.046	45.05	positiv	ja
6	447.1	1.047	45.01	positiv	ja
7	447.1	1.047	45.04	positiv	ja
8	447.1	1.046	45.01	positiv	ja
9	447.1	1.044	45.06	positiv	ja
10	448.1	1.04	44.98	positiv	ja
11	447.1	1.045	44.99	positiv	ja
12	447.1	1.046	45	positiv	ja
13	446.1	1.045	44.97	positiv	ja
14	446.1	1.045	45.09	positiv	ja
15	448.1	1.046	44.98	positiv	ja
16	448.1	1.046	45.02	positiv	ja
17	448.1	1.042	44.98	positiv	ja
18	448.1	1.043	45.06	positiv	ja
19	448.1	1.05	44.95	positiv	ja



Tabelle II Negative Blitzstöße für die 100-kV-Spannungsebene inkl. Vorversuche

Nr.	Spannung [kV]	T1 [μs]	T2 [μs]	Polarität	bestanden
20	-257.3	1.031	44.96	negativ	ja
21	-333.9	1.044	44.84	negativ	ja
22	-410.1	1.045	44.94	negativ	ja
23	-448	1.042	44.84	negativ	ja
24	-448	1.041	44.93	negativ	ja
25	-448	1.041	44.85	negativ	ja
26	-447.5	1.039	44.9	negativ	ja
27	-448	1.04	44.89	negativ	ja
28	-448	1.038	44.88	negativ	ja
29	-448.5	1.041	44.84	negativ	ja
30	-448	1.043	44.87	negativ	ja
31	-448.5	1.035	44.84	negativ	ja
32	-448.5	1.032	44.83	negativ	ja
33	-448	1.038	44.91	negativ	ja
34	-448	1.041	44.89	negativ	ja
35	-448	1.035	44.88	negativ	ja
36	-447.5	1.044	44.91	negativ	ja
37	-447.5	1.038	44.86	negativ	ja

Die 15 positiven und negativen Blitzstöße bei 450 kV wurden von dem Hivoduct-Prüfpol ohne Überschlag bestanden.



Die durchgeföhrten Blitzstossversuche inklusive der Vorversuche (kursiv) für 123 kV Nennspannung sind in den nachstehenden Tabellen für die positive (Tabelle I) und die negative Polarität (Tabelle II) aufgelistet.

Tabelle III Negative Blitzstösse für die 123-kV-Spannungsebene inkl. Vorversuche

Nr.	Spannung [kV]	T1 [μ s]	T2 [μ s]	Polarität	bestanden
1	-484.8	1.039	44.83	negativ	ja
2	-523.1	1.047	44.91	negativ	ja
3	-544.3	1.044	44.9	negativ	ja
4	-549.3	1.042	44.91	negativ	ja
5	-549.3	1.04	44.89	negativ	ja
6	-549.3	1.039	44.89	negativ	ja
7	-549.4	1.04	44.87	negativ	ja
8	-549.3	1.043	44.89	negativ	ja
9	-549.3	1.042	44.9	negativ	ja
10	-548.3	1.044	44.86	negativ	ja
11	-547.3	1.058	45.04	negativ	ja
12	-550.3	1.039	44.88	negativ	ja
13	-550.3	1.041	44.81	negativ	ja
14	-550.3	1.044	44.86	negativ	ja
15	-549.3	1.052	45.02	negativ	ja
16	-550.3	1.042	44.88	negativ	ja
17	-550.3	1.039	44.88	negativ	ja



Tabelle IV Positive Blitzstöße für die 123-kV-Spannungsebene inkl. Vorversuche

Nr.	Spannung [kV]	T1 [μ s]	T2 [μ s]	Polarität	bestanden
18	334.4	1.042	44.71	positiv	ja
19	485.3	1.044	44.92	positiv	ja
20	522.5	1.044	44.97	positiv	ja
21	549.6	1.044	45.08	positiv	ja
22	550.6	1.044	45.06	positiv	ja
23	549.6	1.046	45.08	positiv	ja
24	548.6	1.05	45.1	positiv	ja
25	549.6	1.046	45.04	positiv	ja
26	549.6	1.046	45.07	positiv	ja
27	548.6	1.038	45.05	positiv	ja
28	548.6	1.046	45.05	positiv	ja
29	549.6	1.046	45.02	positiv	ja
30	550.6	1.041	45.05	positiv	ja
31	550.6	1.046	45.07	positiv	ja
32	549.6	1.047	45.04	positiv	ja
33	549.6	1.045	45.01	positiv	ja
34	550.6	1.045	45	positiv	ja
35	550.6	1.047	45.11	positiv	ja

Die 15 positiven und negativen Blitzstöße bei 550 kV wurden vom dem Hivoduct-Prüfpol ohne Überschlag bestanden.

4.10 Wechselspannungs- und Blitzstossprüfungen für 145 kV Nennspannung

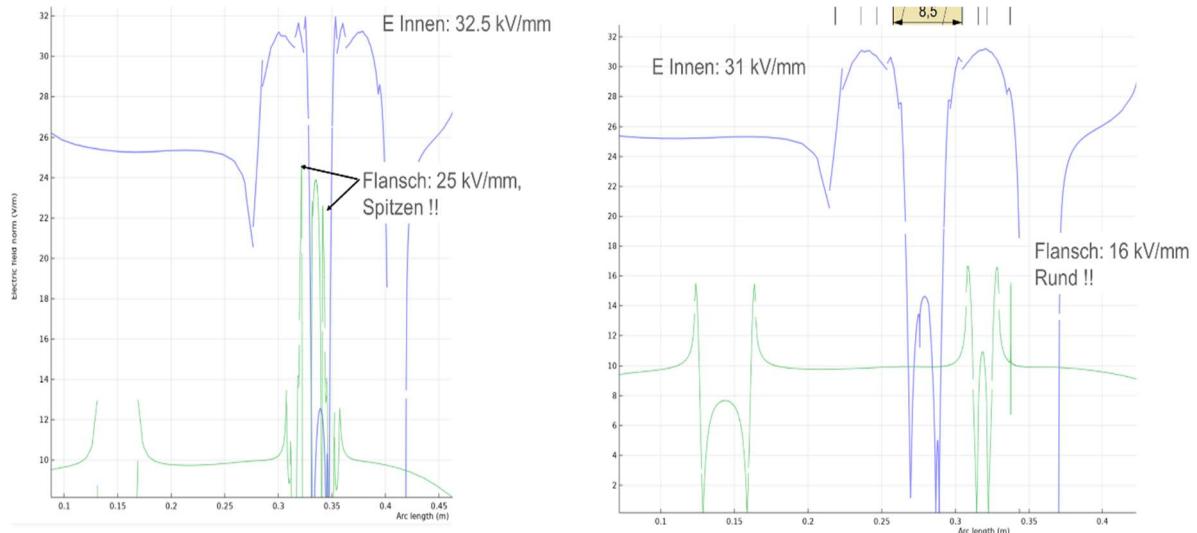
Bei der AC Vorprüfung (siehe Kap. 4.6) wurden bereits Überschläge bei 250 kV am Winkelstück des Prüfpols produziert. Damit hat sich gezeigt, dass die vollen Prüfwerte für die 145 kV Nennspannung auch bei der Vor-Ort Prüfung wahrscheinlich nicht erreicht werden.

Bei den Hochspannungstests Vor-Ort wurden diese Überschläge bei AC und Blitzstoss reproduziert. Die Überschläge traten reproduzierbar an derselben Stelle im Flansch des Winkelstückes auf. Diese Schwachstelle wurde mehrmals bei verschiedenen Tests gefunden.



Das Bild zeigt die Überschlagsspuren am horizontalen Spacer vom Winkelstück.

Das Flanschdesign wurde anschliessend analysiert und eine Flanschstudie zur Fehlersuche und Optimierung durchgeführt. ist für die nächste Produktion verbessert. Der Vergleich hier zeigt das Resultat zur geänderten Flanschgeometrie und den daraus folgenden Feldstärken am Innenleiter und am Gehäuse:





Es hat sich gezeigt, dass das neue Flanschdesign sowohl die maximalen Feldstärken leicht reduziert als auch die Toleranzen für die Produktion verbessert. Die Spitzen an den Radienübergängen sind jetzt flacher und kleine Ungenauigkeiten führen weniger rasch zu Feldüberhöhungen.

Das neue Flanschdesign wurde für alle Komponenten der Druckluftkabel als neuer Standard eingeführt.

Druckluftkabel sind immer einphasig gekapselt. Deshalb tritt während dem Betrieb nur die Leiter-Erde Spannung von $145 \text{ kV}/\sqrt{3} = 85 \text{ kV}$ im Kabel auf. Da die Überschläge bei den AC Prüfungen reproduzierbar erst bei **250 kV L-E** auftraten, und bei kleineren Werten auch keine Teilentladungen gemessen wurden, haben wir beschlossen die Kabel trotzdem für die Dauertests zu verwenden, auch wenn die 145 kV Prüfwerte nicht bestanden wurden.

Deshalb wurden nach dieser Testserie die Teile wieder abgebaut und für den Transport nach Oerlikon gestapelt, siehe Transportstapel nach Demontage.



4.11 Montage 3ph im Schutzrohr und Schacht

Für den dreiphasigen Aufbau im PE Schutzrohr wurden zuerst die Schutzrohre verlegt und mit dem transparenten Rohrstück verschraubt. Die Rohre waren beide nicht gerade, was die Ausrichtung und die Verschraubung mit dem transparenten Rohrstück erschwerte. Während des Tages werden die Rohre durch Sonneneinstrahlung etwa 65° heiß. Das Ende des PERohres dehnt sich dadurch um etwa 70 mm.



Zum Manövrieren wurden Palettmuli und Rollbretter verwendet.

Nach dem Ausrichten der Schutzrohre wurde der Schacht und die Montageschale im Gebäude aufgebaut.

Im Schacht wird zuerst die untere Phase mit dem Rollensystem und mit dem vorherigen Rohr verbunden. Dann wird das Zugseil durchgefädelt und die beiden anderen Phasen nacheinander aufgelegt und verbunden. Nach dem Festklemmen des Dreierpakets wird der montierte Kabelabschnitt um 5 m weiter in das Schutzrohr gezogen.



Montage untere Phase



Dreierpaket komplett im Schacht

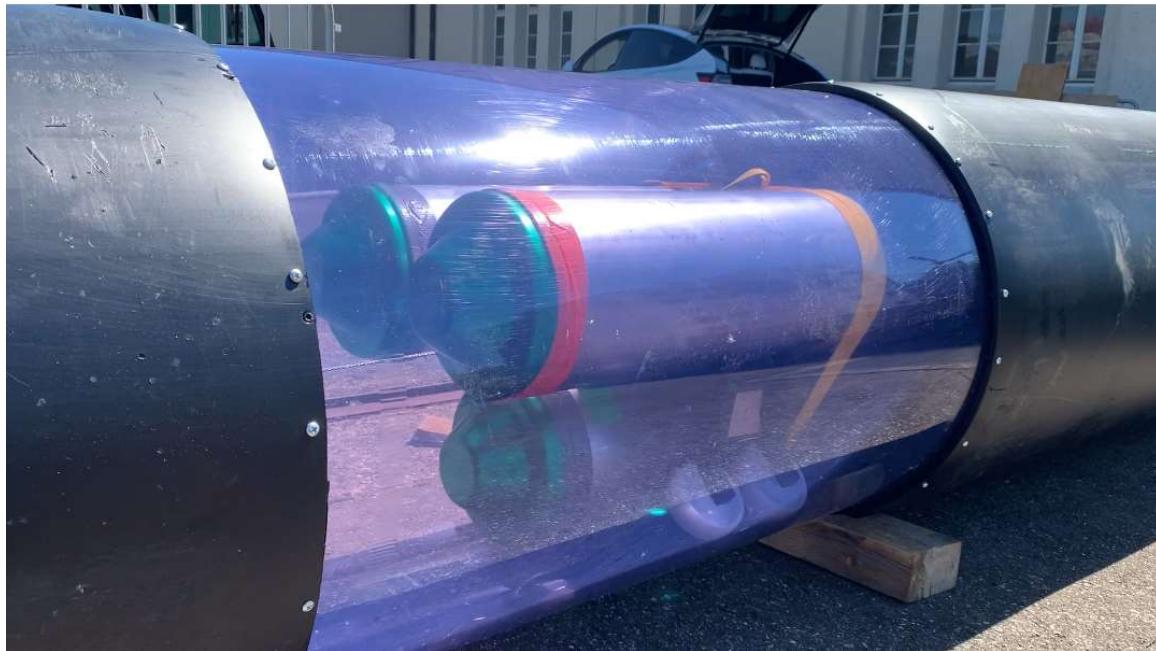


Das Rollensystem und der Seilzug zum Einziehen hat sich gut bewährt. Es benötigt etwa 20 min um jeweils 5 m 3ph Rohre zu verbinden und einzuziehen.

4.12 Einrollen in den Schacht mit Seilzug

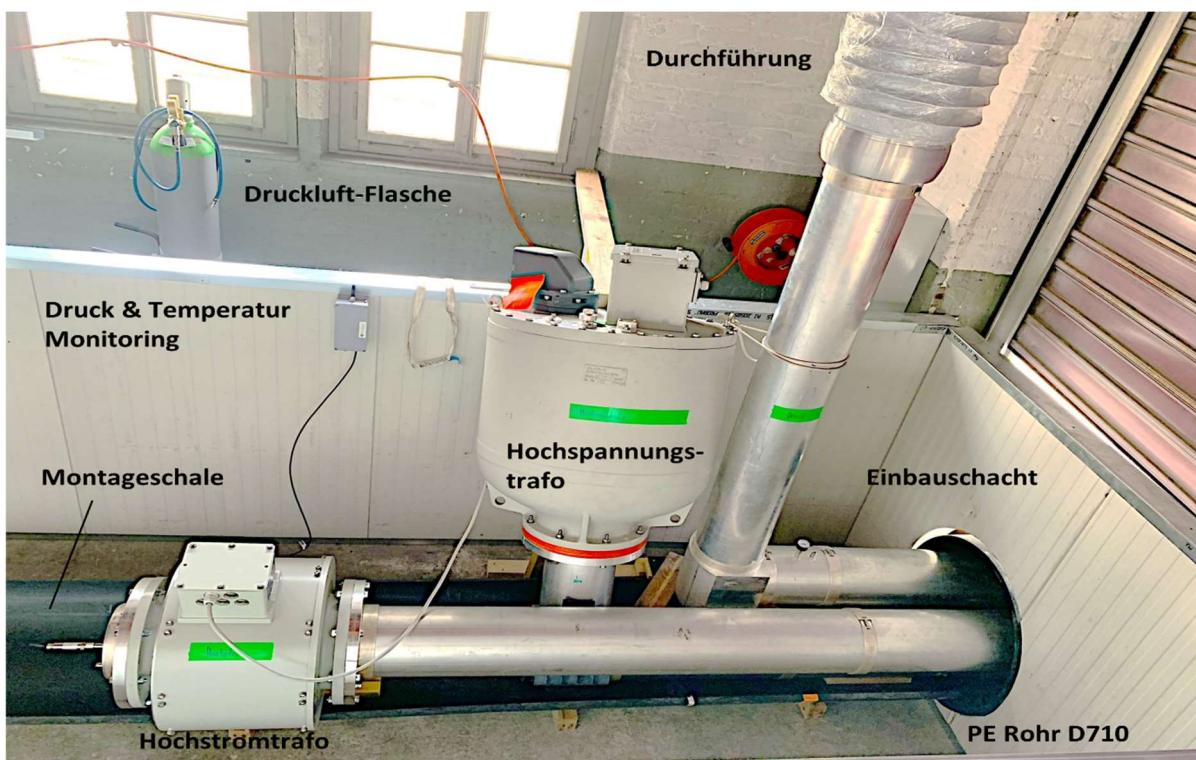
Die Druckluftkabel auf Ihren Rollen wurden mit einem Seilzug in das PE Rohr eingezogen. Durch das transparente Rohrstück kann man das Einrollen verfolgen. Man erkennt auch das gespannte Zugseil.

Das erste Rollenpaar wurde verdoppelt, da die Schutzrohre nicht gerade waren und deshalb mehr Gewicht auf den ersten Rollen liegt.

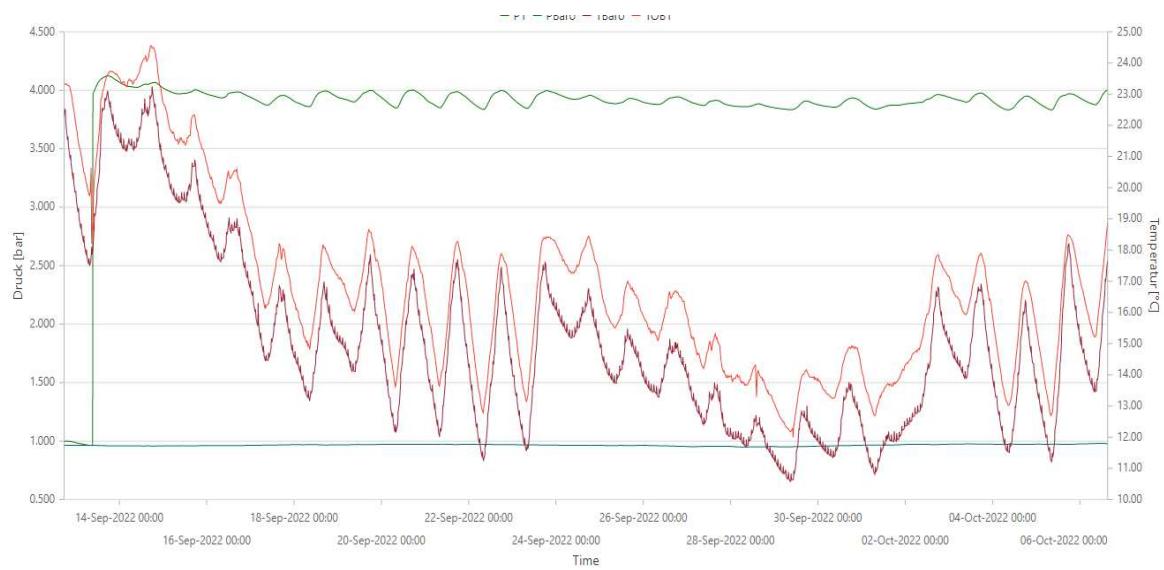


4.13 Anschluss der Transformatoren + Monitoringsystem

Im Schacht wurden dann für den Betrieb die Transformatoren installiert. Man erkennt auch das Druck- und Temperatur-Monitoringsystem mit 4G Antenne.



Die Daten zu Druck und Temperatur wurden 1 Mal pro Minute gemessen und 1 mal pro Stunde zur Cloud geschickt und dort gesammelt und angezeigt. Der Verlauf zeigt Druck (in grün) Gehäusetemperatur (hellrot) und Aussentemperatur (dunkelrot) über die Zeit nach dem ersten Füllen.



In den ersten Tagen nach der Installation wurde die Dichtigkeit bestätigt. Die 500 A Dauerstrom zum Start führten nur zu einer geringen Erhöhung der Kapselungstemperatur gegenüber der Umgebung.

Für die Druckmessung in den anderen zwei Phasen wurden später noch zusätzliche Sensoren installiert.

Nach der ersten längeren Testphase mit 2000 A wurde die Kapselung abgetastet, um den heissten Punkt zu finden. An dieser Stelle (Flanschbereich zwischen zwei langen Rohren) wurde anschliessend eine zusätzliche Temperaturmessung installiert.



4.14 Konformitätsbescheinigung Druckbehälter SVTI

Die Anlage und ihre Komponenten wurden vom SVTI nach der geltenden Vorschrift SVTI 704 bewertet und abgenommen. Die SVTI Anlagennummer ist 5525363.

Die Konformitätsbescheinigung wurde am 23.02.2023 ausgestellt.

KESSELINSPEKTORAT
INSPECTION DES CHAUDIÈRES
Richtistrasse 15, CH - 8304 Wallisellen, info.svti704@svti.ch



Konformitätsbescheinigung

Herstellung gemäss SVTI Vorschrift 704 Rev. 1.04

Das Kesselinspektorat des SVTI ist die behördlich akkreditierte Inspektionsstelle für die Beurteilung der Gesetzeskonformität und Sicherheit von druckführenden Geräten und Anlagen

Hiermit wird bestätigt, dass für die Komponenten Demoanlage 145kV

Name: **Testanlage**
SVTI No.: **5525363**

die Herstellung der Komponenten gemäss den Anforderungen der SVTI Vorschrift 704 für gasgefüllte elektrischen Geräte, Schaltanlagen und Übertragungsleitungen erfolgte. Die Anlage wurde hergestellt von:

Hivoduct AG
Pfäffikerstrasse 28
CH-8310 Kemptthal

- Die Enddokumentation entspricht den Anforderungen der SVTI Vorschrift 704.
- Die Komponenten gemäss E11_A_100_V01 bzw. Teileliste Druckbehälter G11 können als Baukastensystem für Demozwecke verwendet werden. (Ausgenommen sind die Teile, an denen Berst-Prüfungen erfolgten!).
- Periodische Inspektionen §24 sind gefordert, alle 10 Jahre im Beisein des SVTI-Experten.

Wallisellen, 23.02.2023

Inspector/Expert

SVTI
ASIT
KESSELINSPEKTORAT
Konstruktion
Richtistrasse 15
CH-8304 Wallisellen

Angela Klamt

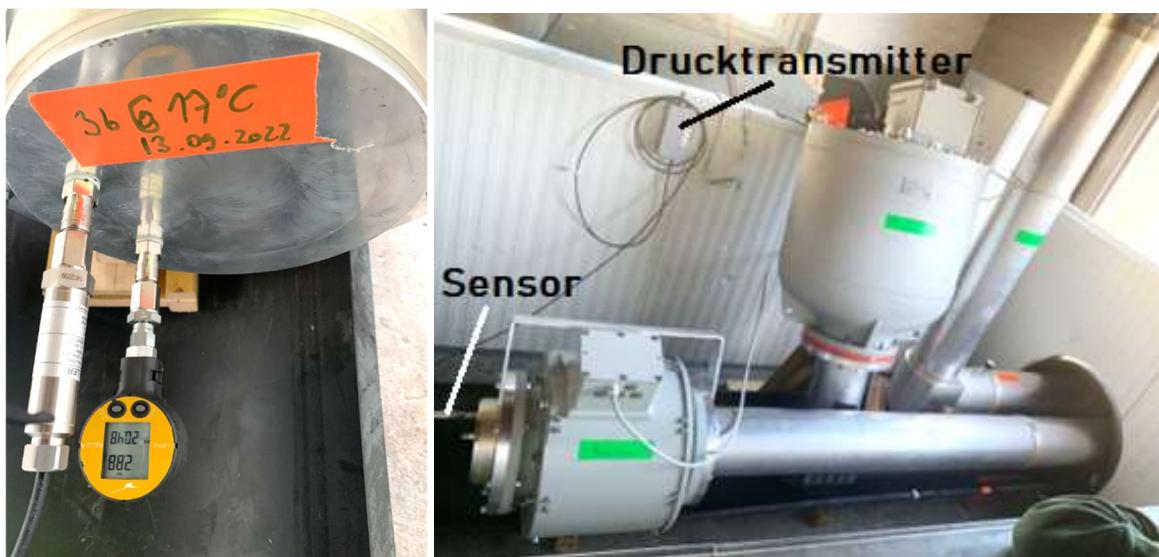


5 On-site Tests während des Betriebs

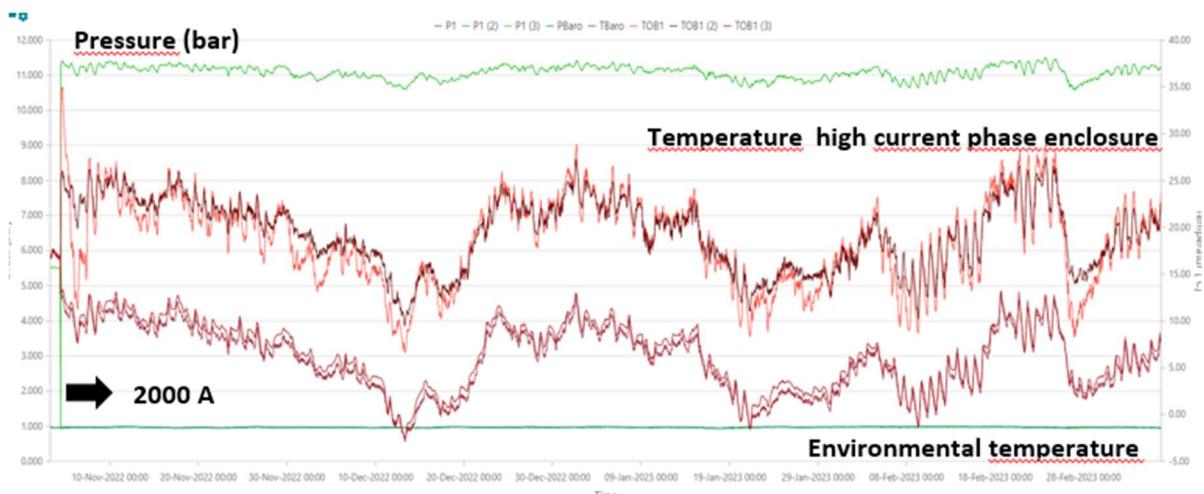
Der Aufbau der Anlage mit drei separaten Phasen, welche unabhängig mit Druck, Strom und Spannung beaufschlagt werden können, erlaubte verschiedene Tests Vor-Ort während dem Pilotbetrieb. Das Monitoringsystem erlaubt die kontinuierliche Messung von Druck und Temperatur. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Testreihen während des Betriebs ausgeführt.

5.1 Dauerbetrieb bis 2000 A. Temperatur- & Druckmonitoring.

Die Temperatur- und Druckmessung erfolgt am Druckfüllanschluss mit Piezoresistiven Drucktransmittern, Typ PAA-23SX der Firma Keller AG. Der Drucktransmitter misst auch die Umgebungstemperatur im Vergleich dazu. Die Daten werden 1 Mal je Minute gemessen und an die Cloud übertragen, womit eine lückenlose Überwachung der Anlage möglich ist.



Während der ersten Monate wurde der Strom in der Hochstromphase auf 2000 A eingestellt. Damit hat sich dieser Verlauf gezeigt: Daten von Nov 22 – März 23:



Man erkennt die täglichen Temperaturveränderungen Tag/Nacht und den Jahreszeitlichen Verlauf mit Tiefsttemperatur unter 0° C und Höchstwerte von etwa 15 °C.



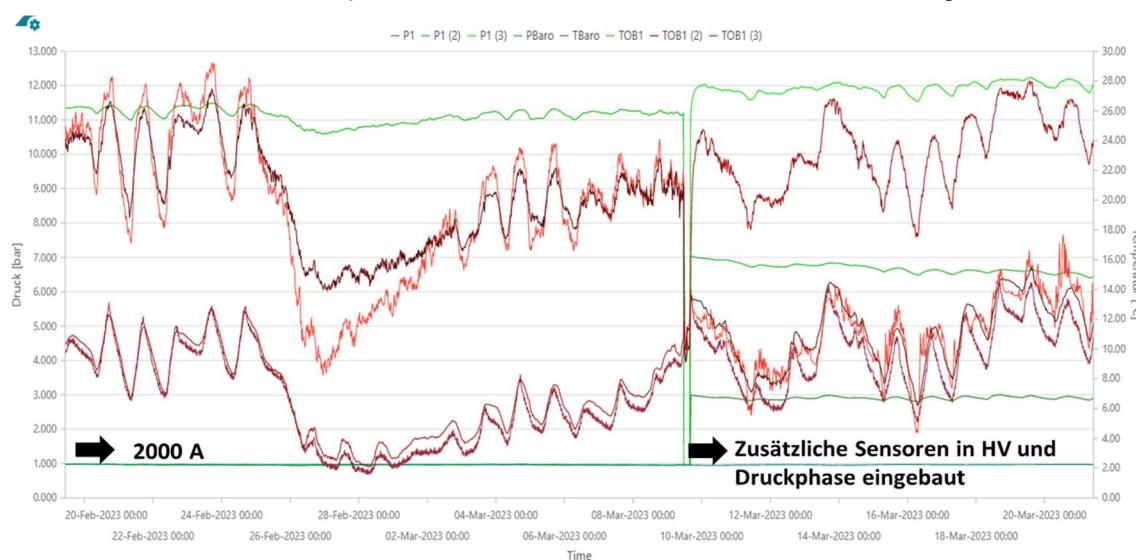
Die grüne Linie zeigt den Druck in der Hochstromphase. Fülldruck war 11 bar bei 15 °C. Wir haben für die Hochstromphase den maximalen Fülldruck gewählt, da dieser durch die Erwärmung noch weiter erhöht wird und damit einen worst-case test für die Druckbelastung der Gehäuse darstellt. Man erkennt die Schwankungen im Druck mit der Temperatur. Es ist keine Undichtigkeit erkennbar.

Am Morgen des kältesten Tages im Winter am 13.12.2023 war auf dem Schutzrohr der Anlage sogar der Schnee liegen geblieben. Die Verluste der Hochstromphase bei 2000 A waren offensichtlich nicht ausreichend, um Schneeeablagerungen auf dem Schutzrohr zu verhindern.



Im Temperaturverlauf sind deutliche Unterschiede zwischen sonnigen Tagen (große Tag/Nacht Unterschiede) und nebeligen Tagen (geringe Tag/Nacht Unterschiede) erkennbar.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu haben, wurden Anfang März 2023 zusätzliche Sensoren an den anderen Phasen eingebaut. Man erkennt im Diagramm jetzt zusätzliche grüne Linien für den Druck in der HV Phase und der Druckphase. Druck in der HV Phase wurde auf 7 bar eingestellt.

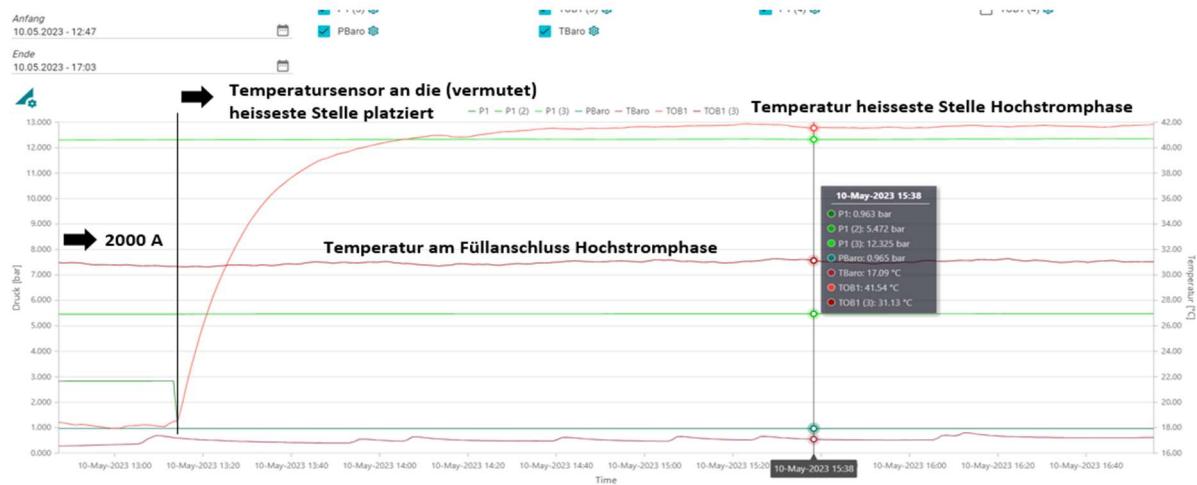




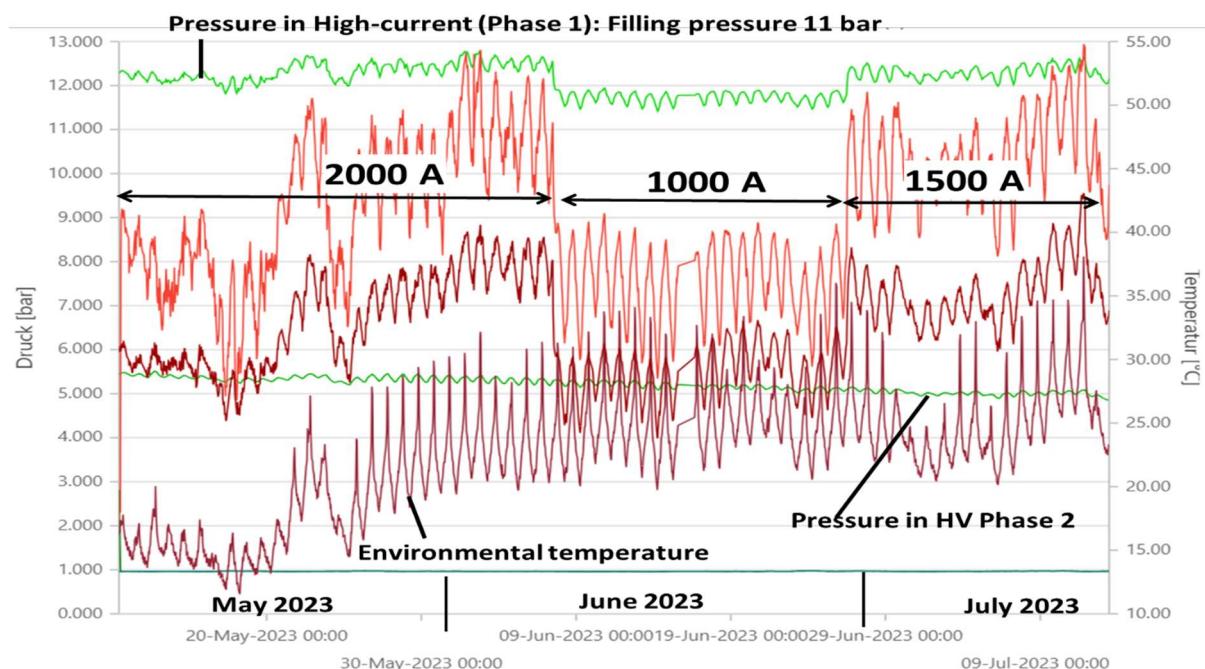
Der Temperaturunterschied zwischen Umgebungstemperatur (untere rote Linienschar) und Temperatur am Füllanschluss (obere rote Linie) blieb bei etwa 12 K.

5.2 Einbau zusätzlicher Sensoren. Messung am Hotspot

Da die gefühlte Temperatur an machen Stellen des Prüfpols höher war als am Füllanschluss, wurde Anfang Mai 23 ein Sensor umplatziert an die vermutet heisste Stelle beim ersten Flansch nach dem Stromwandler. Die Temperatur an dieser Stelle erreichte etwa 42 ° und war somit etwa 11 K höher als am Druckanschluss. Im weiteren Verlauf wurde die Temperatur immer an dieser Stelle gemessen.



In den folgenden heissen Monaten mit Umgebungstemperaturen bis 30°C wurden an der heisstenen Stelle Temperaturen bis 57 °C gemessen. Während der Hitzeperiode im Juni wurden deshalb Vergleichsmessungen mit 2000 A, 1000 A, und 1500 A für je 2 Wochen durchgeführt. Man erkennt beim Übergang von 2000 A auf 1000 A einen deutlichen Abfall der Temperatur am Hotspot um etwa 10 K. Der Druck reduziert sich auch um etwa 0.7 bar.





Die Temperatur am Hotspot ist trotz der hohen Umgebungstemperatur und 2000 A Dauerstrom deutlich unter der zulässigen Gehäusetemperatur von 65 °C.

Die Batteriekapazität des Datentrasmitters ist nach 1 Jahr Laufzeit mit Messintervall von 1 min und stündlicher Datenübertragung auf etwa 25 % abgesunken. Die Batterilaufzeit kann durch längere Messintervalle deutlich verlängert werden.

Hivoduct Intern - Pilot Seebach 3ph

Stations-ID	Cellular: +353529105248232	> Signalqualität	-51 dBm	> Letzte Daten
Letzte Übertragungszeit	04.09.2023, 13:37:27	> Batterie-Info	3.5V / ! 25%	> Ort
Nächste erwartete Übertragung	04.09.2023, 14:37:27	> Feuchtigkeit	52%	> Alarne
Messintervall ?	0d 0h 1m 0s			

Diese Langzeitversuche mit hohen Dauerströmen haben die folgenden Erkenntnisse gebracht:

- Das Monitoringsystem ist geeignet zur Druck- und Temperaturüberwachung im Betrieb.
- Für Normalbetrieb kann das Messintervall deutlich verlängert werden, um die Batterilaufzeit zu erhöhen.
- Ein eventueller Druckverlust ist trotz der täglichen Druckschwankungen durch Umgebungstemperatur (Tag/Nacht/Sonne) und Erwärmung durch Stromverluste eindeutig erkennbar.
- Änderungen im Betriebsstrom wirken sich mit einer Zeitkonstante von etwa 1 h direkt auf Innendruck und Gehäusetemperatur aus.
- Dauerströme von 2000 A sind dauerhaft und auch während Hitzeperioden im Freien in einem schwarzen Schutzrohr möglich.
- Die maximale Gehäusetemperatur bei 2000 A erreichte etwa 57 °C während der Hitzperiode im Juni 2023.
- Alle montierten Flansche der Druckluftkabel waren dicht. Undichtigkeiten waren immer an den Anschlussteilen lokalisierbar (siehe nächstes Kapitel).
- Der maximale Innendruck erreichte 12.5 bar bei 55 °C Gehäusetemperatur (Fülldruck 11 bar bei 17 °C) in guter Übereinstimmung mit der Theorie: $11 \text{ bar} * (273+55)/(273+17)=12.44 \text{ bar}$.

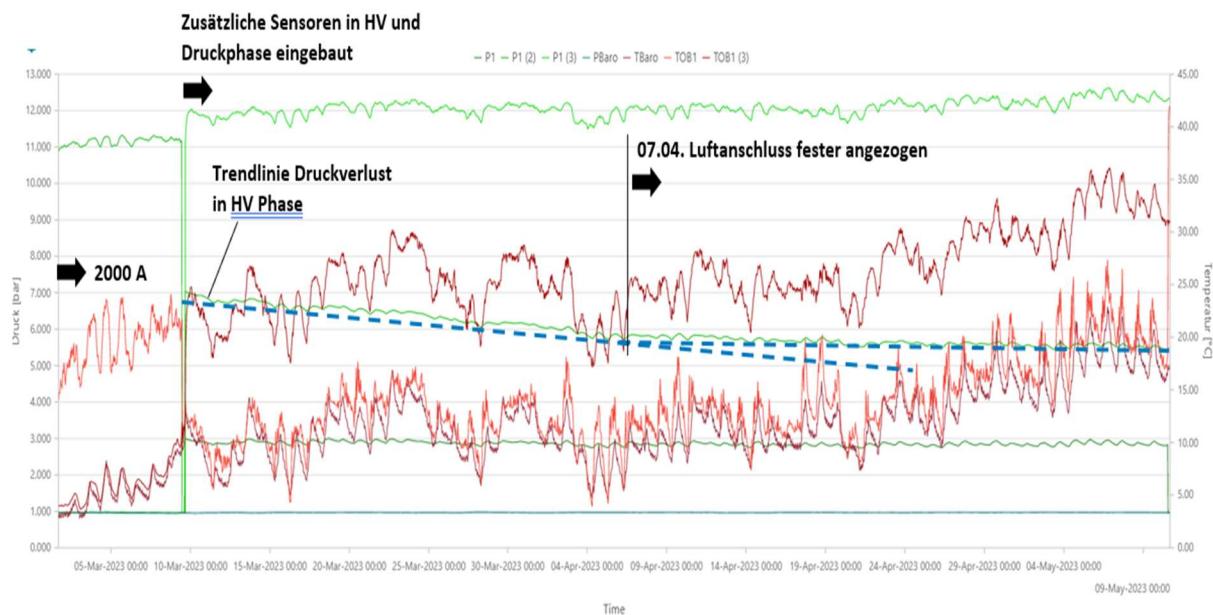


5.3 Hochspannungstests mit reduziertem Druck & simuliertem Druckabfall

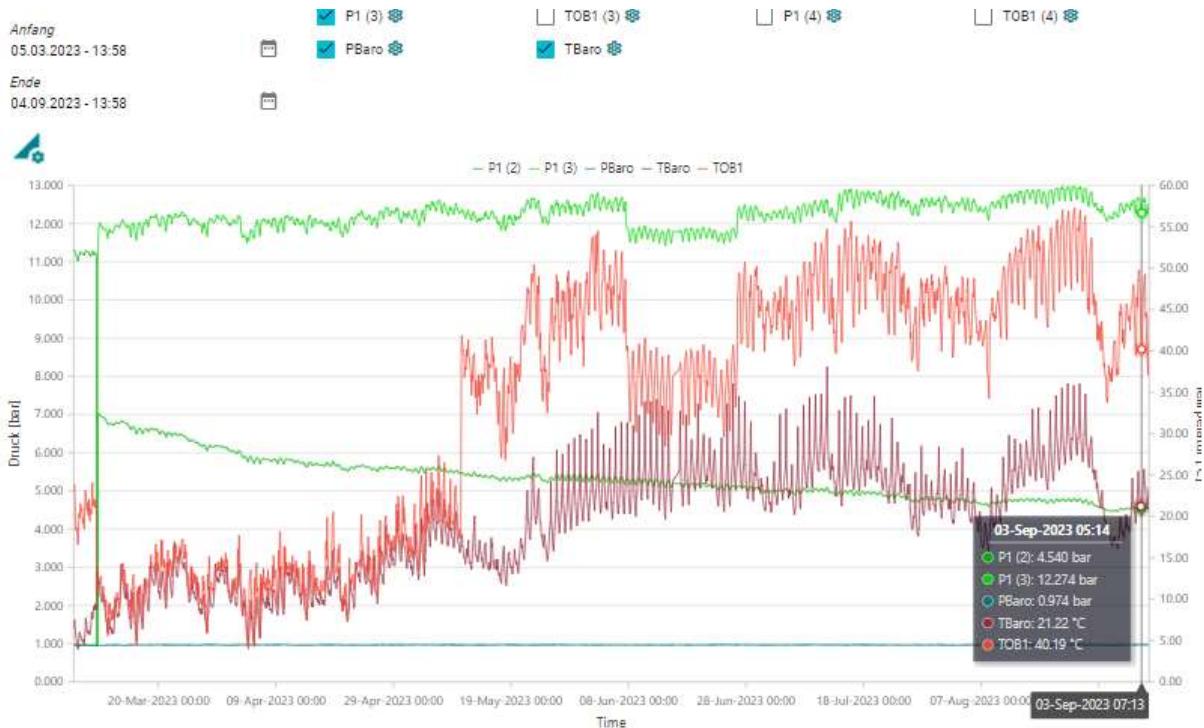
Die Hochspannungsphase wurde während dem Betrieb generell nur mit 7 bar befüllt, um die grosse Druckreserve im Betrieb mit Nennspannung $U_{L-E} = 145\text{kV}/\sqrt{3} = 84 \text{ kV}$ aufzuzeigen. Mit der bestandenen Steh-Wechselspannungsprüfung von $U_{L-E} = 230 \text{ kV}$ bei 10 bar besteht immer noch genügend Marge für den Dauerbetrieb bei 84 kV und 7 bar.

Nach dem Einbau des Drucksensors in der HV Phase wurde der Füllanschluss nicht vollständig angezogen, um eine Leckage zu simulieren. Diese Leckage war als schwaches Zischen hörbar nach dem Füllen. Diese Leckage hat zu einem Druckverlust von etwa 1 bar in einem Monat geführt, siehe strichlierte Trendlinie in der Grafik zur grünen Drucklinie in HV Phase.

Nach Abfall auf etwa 6 bar wurde der Anschluss etwas fester angezogen, um die Leckage zu reduzieren. Die Trendlinie zeigte damit einen geringeren Druckabfall von etwa 1 bar in 3 Monaten.

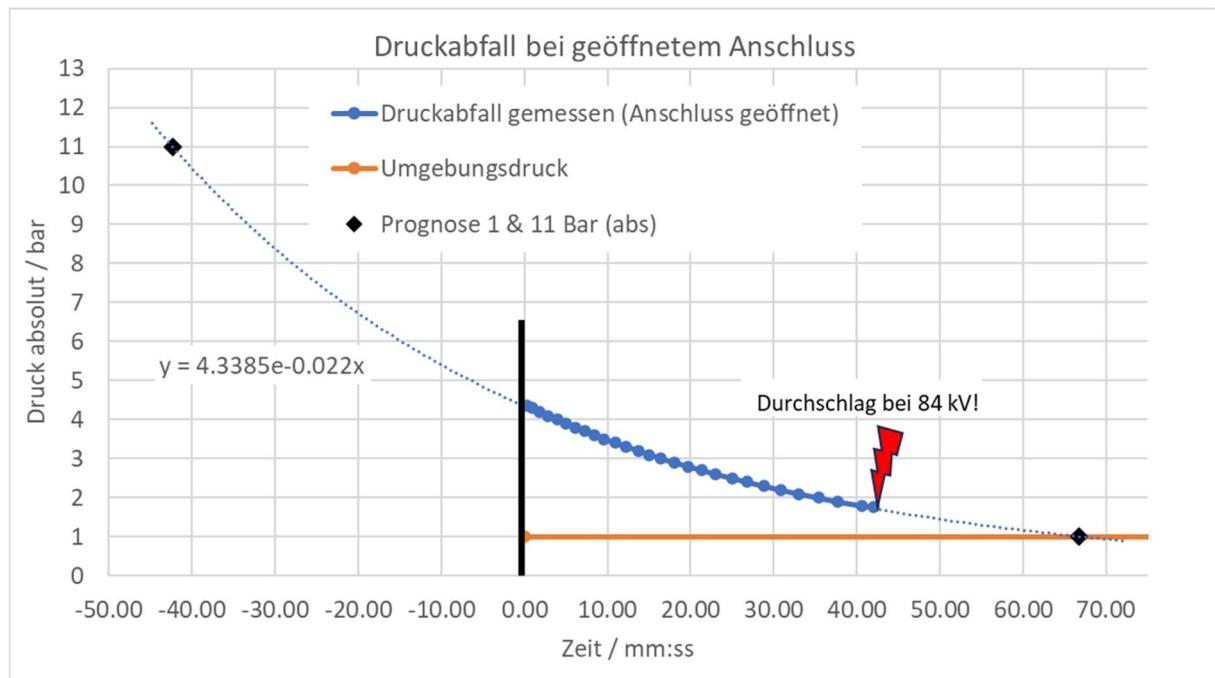


Von April bis Sept 23 führte diese künstliche Leckage zu einem weiteren Druckabfall auf ~4.5 bar bei durchgehend voller Spannung. Damit wurde bestätigt, dass die Anlage auch für längere Zeitabschnitte mit reduziertem Druck bei voller Spannungsbelastung betrieben werden kann.



5.4 Durchschlagstest durch Druckablassen

Da die Hochspannungsphase durch einen Prüftrafo gespeist wurde, war es möglich einen Überschlag in der Anlage zu produzieren. Dazu wurde als Abschluss test der Druckfüllanschluss geöffnet, so dass die Luft mit lautem Zischen entweichen konnte. Den gemessenen Druckverlauf (blaue Punkte) zeigt die folgende Abbildung inklusive einer Extrapolation zum Fülldruck und zum Umgebungsdruck:





5.4.1 Druckverlauf und Durchschlagszeitpunkt:

Die Versuchsparameter waren wie folgt:

- Konstant 84 kV während dem Druckablass ($U_{L-E} = 145\text{ kV}/\sqrt{3} = 84 \text{ kV}$).
- Druck zum Start so wie in den letzten Monaten bereits reduziert auf 4.5 bar, siehe Ende der Messreihe oben.
- Druck wurde während dem Ablassen mit dem Präzisionsmanometer gemessen und auf Video festgehalten



- Druckablass gestartet bei 4.5 bar (Zeitpunkt 0) durch Losdrehen der Festo Buchse
- Durchschlag bei 84 kV und 1.76 bar (Zeitpunkt 42 min)
- Durchschlag mit deutlich hörbarem «Ping». Dann wurde sofort abgeschaltet.
- Die Überschlagspur dazu in der Anlage haben wir nicht gefunden. Die geringe Leistung vom Hochspannungstrafo erzeugt nur minimale Überschlagsspuren, weshalb diese schwierig zu finden ist.
- Extrapolation der Ablasskurve bis zum vollen Druck zeigt, dass es bei so einer «Undichtigkeit» im Betrieb etwa 85 min bis zum Durchschlag dauern würde.

Dieser Versuch hat gezeigt, dass tatsächlich nur > 0.8 bar Überdruck zum Halten der Betriebsspannung nötig sind.

Auch bei einer sehr grossen «Undichtigkeit» dauert es noch > 1h bis zum Durchschlag.

Diese Langzeitversuche mit Leckage unter Hochspannung haben die folgenden Erkenntnisse gebracht:

- Das Monitoringsystem kann auch geringe Leckagen eindeutig und früh genug detektieren.
- Ein eventueller Druckverlust ist trotz der täglichen Druckschwankungen durch Umgebungstemperatur (Tag/Nacht/Sonne) und Erwärmung durch Stromverluste eindeutig.
- Durch die grossen Luftvolumina im Druckluftkabel ändert sich der Innendruck bei Leckagen nur sehr langsam.
- Grössere Leckagen produzieren ein hörbares Zischen.
- Nachfüllen von Druckluft via dem Füllanschluss ist im Betrieb unter Hochspannung möglich.
- Geringe Leckagen benötigen keine Sofortmassnahmen im Betrieb.
- Die Dichtungen der Anschlusssteile sind die kritischen Komponenten für die Dichtigkeit des Gesamtsystems. Dichtungen mit metallischem Stützring müssen verwendet werden.
- Betrieb bei Nennspannung ist trotz reduziertem Innendruck auf 4.5 – 7 bar über ein Jahr möglich.
- Bei einem Innendruck < 1.8 bar absolut führt die Betriebsspannung zu einem Überschlag.

Angeregt von diesen Dichtigkeitstests (und den im folgenden beschriebenen Korrosionstests) wurde in der Folge eine elastische Flanschabdeckung entwickelt, welche sich im Falle einer Undichtigkeit des Flansches wölbt und damit die Stelle der Undichtigkeit sichtbar macht.



5.5 Flanschkorrosion im Freiluftbereich

In der Anlage wurden versilberte und unversilberte Flanschringe verbaut, um den Unterschied im Korrosionsverhalten zu sehen. Im Innenbereich und innerhalb des Schutzrohres, wo keine direkte Exposition zu Wasser (Regen, Schnee) bestand, war keine Kontaktkorrosion bei der Demontage an den Flanschringen erkennbar. Insbesondere auch nicht bei versilberten Ringen im Innenbereich.

Im Aussenbereich zeigten die versilberten Ringe deutliche Flanschkorrosion an den Kontaktstellen zum Aluminiumgehäuse, siehe Bild. Die unversilberten Ringe (selbes Material wie die Gehäuse) zeigten keine Korrosion – auch nicht im Aussenbereich.





Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Design in zwei Punkten optimiert: Es werden keine Kontaktpaarungen Silber-Aluminium an von aussen zugänglichen Stellen mehr verbaut.

Ausserdem wurde eine elastische Schutzhülle als Regenschutz für die Flansche entwickelt, welche im Aussenbereich an jedem Flansch eingesetzt werden kann und zusätzlich als Dichtigkeits-Indikator für diesen Flansch funktioniert.



6 Rückbau der Anlage

Die Anlage wurde im 09/2023 nach 1 Jahr Betrieb wieder abgebaut. Der Rückbau verlief problemlos und konnte in 1 Tag mit 3 Personen erledigt werden.



Die verwendeten Komponenten können teilweise als Ausstellungstücke weiterverwendet werden.



7 Wiederholung der Dielektriktests mit Designverbesserungen

Wie im Kapitel 4.6 und 4.8 beschrieben, wurden bei den Dielektriktests (AC und BIL) für 145 kV nicht die vollen Prüfwerte von AC: 275 kV und BIL: 650 kV erreicht.

Neben den Designverbesserungen im Flanschbereich und den Abschirmungen wurden auch die Prozesse zur Montage- und Inbetriebnahme analysiert und verbessert. Gleichzeitig wurde bestätigt, dass die Gehäusedurchmesser nicht vergrössert werden müssen, sondern die aktuellen Dimensionen ausreichend für das Bestehen der Typprüfungen sind.

Um die Auswirkungen auf die Hochspannungstests zu messen, wurden AC und BIL Tests mit neuem Design und aktuellen Montageprozessen wiederholt. Das Bild zeigt einen der Prüfpole während der Montage im Hochspannungslabor.





Ergebnisse dieser Testserie im Vergleich mit früheren Messungen von 08/22:
AC Tests (je 1 min) mit Teilentladungsmessung:

Un	08/22	Wiederholung 10/23
100 kV	185 kV. < 1 pC, 10 bar	185 kV. < 1 pC, 10 bar
123 kV	230 kV, < 1 pC, 10 bar	230 kV, < 1 pC, 10 bar
145 kV	FO bei 250 kV, 10 bar	275 kV, < 3 pC, 10 bar
145 kV		275 kV, < 3 pC, 9 bar
145 kV		275 kV, < 3 pC, 8 bar

Bei dieser Wiederholung konnten die spezifizierte Prüfspannung von 275 kV sowohl bei Fülldruck 10 bar **als auch bei reduziertem Fülldruck von 9 bar und 8 bar für je 1 min** gehalten werden.

Auch die Blitzstossprüfung wurde in einem kleinen Prüfpol mit Durchführung, Geradem Rohr und Winkelstück wiederholt.



Un	08/22	Wiederholung 10/23
100 kV	450 kV. < 1 pC, 10 bar	nicht getestet
123 kV	550 kV, < 1 pC, 10 bar	nicht getestet
145 kV	FO bei 600 kV, 10 bar	+650 kV, 10 bar, 15 Impulse, kein Durchschlag.

Bei der Umpolung auf -650 kV gab es einen Überschlag, weshalb der Versuch abgebrochen werden musste. Generell sind für Gasdurchschläge die positiven Blitzstosswerte kritischer als die negativen. Deshalb wird als Ursache für den Überschlag nach dem Umpolen ein Polaritätseffekt vermutet. Eine Erklärung dafür steht noch aus und bedingt wahrscheinlich eine erneute Wiederholung.

Generell haben diese Tests bestätigt, dass die Design- und Prozessverbesserungen einen deutlichen Einfluss auf die Spannungsfestigkeit haben und sogar eine Reduktion des Nenn-Fülldrucks bei gleichem Gehäusedurchmesser möglich ist. Das Prüfprozedere für Polaritätswechsel bei BIL Tests muss optimiert werden.



8 Bewertung der Ergebnisse

Die gesammelten Ergebnisse des Projektes kurz zusammengefasst:

Druckluftkabel für 145 kV, 2500 A wurden produziert, installiert, erfolgreich betrieben und getestet und nach 1 Jahr demontiert.

- Produktion, Montage, Logistik, Transport, Vor-Ort Montage, Inbetriebnahme erfolgreich
- Rollensystem für kompakte Rohrmontage hat sich gut bewährt
- Aufwände höher als erwartet. Investitionen in Werkzeuge und Betriebsmittel waren nötig.
- Ergebnisse der Vor-Ort Tests sehr positiv und haben Grenzen gezeigt
- Hochstromtest 2500 A, 9h mit 21K Erwärmung zeigt den wichtigsten Vorteil von Druckluftkabeln: Kleine Verluste. Wenig Erwärmung.
- $U_n=100 \text{ kV}$, 123 kV : AC Prüfwerte bis 230 k und Blitzstossprüfung: $\pm 15 \text{ Imp. } 550 \text{ kV}$. OK.
- $U_n=145 \text{ kV}$: AC-TE Messung 275 kV OK nach Verbesserung. Marge im Druck: 2 bar.
- $U_n=145 \text{ kV}$: Blitzstossprüfung: $+15 \text{ Imp. } 650 \text{ kV}$. OK. Polaritätswechsel nicht ok.
- Dichtigkeit: Druckverlust < 1 % pro Jahr. Dichtigkeit mit Online-Druckmonitoring gut messbar.
- Mehrmonatiger Betrieb bei voller Spannung und reduziertem Druck (7-4.5 bar) ist möglich.
- Maximale Gehäusetemperatur bei 2000 A Dauerstrom während der Hitzeperiode war 57 °C.
- Der 1-jährige Testbetrieb war problemlos. Alle gewünschten Betriebszustände und Tests während dem Betrieb konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Die gewünschten Resultate aus diesem Projekt wurden damit allesamt erreicht.

8.1 Projektabschluss

Das Projekt wurde im November 2023 mit diesem Abschlussbericht erfolgreich abgeschlossen. Teile der Anlage werden als Ausstellungsstücke in der Fabrik weiterverwendet und können bei Bedarf besichtigt werden.

Die Ergebnisse dieses Projektes werden laufend mit Interessierten, Netzbetreiber und Kunden geteilt. Die Wissenschafts- und Expertengremien wurden mit einer Reihe von Veröffentlichungen mit dieser neuen Technologie vertraut gemacht. Auch die politische Diskussion zum Thema Freileitungsbau wurde damit angeregt.

Studien zu Kundenprojekten mit Druckluftkabeln wurden mittlerweile mit SBB, Swissgrid, Westnetz (DE), VOEST Alpine (AT), Sterlite (IN), RED Elettrica (ES), IWB (CH) gestartet. Kundenprojekte wurden bereits zu Westnetz (DE) und ETI Offshore (FR) geliefert.



W. Holaus, CEO Hivoduct:

«Ich bin sehr stolz, dass die Anlage problemlos und wie geplant während dieses Jahres funktioniert hat und wir alle geplanten Tests erfolgreich durchführen konnten. Wir hatten sehr viele Besucher Vor-Ort, was uns geholfen hat, diese neue Technologie einem weiten Expertenkreis bekannt zu machen.»





9 Kommunikation und Information

Während der Laufzeit der Pilotinstallation wurden regelmässig Besuche Vor-Ort mit verschiedenen Interessentengruppen durchgeführt: Experten, Netzbetreiber, Akademia, Engineeringbüros, Hersteller von Hochspannungsprodukten, Baufirmen, Politiker u.a.

Als Beispiel hier ein Foto vom Besuch der Doktoranden vom Hochspannungsinstitut der ETH Zürich.



Besuch: ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnik bei der Pilotanlage

Die Ergebnisse dieses Projektes werden weiterhin laufend mit Interessierten, Netzbetreibern und Experten geteilt, siehe dazu auch die Liste der Publikationen und Referate im nächsten Abschnitt.



10 Publikationen

Die folgenden wissenschaftlichen Publikationen wurden im Laufe des Projektes veröffentlicht:

- [1] Walter Holaus, "Innovation to reduce the environmental impact of HV transmission lines: High-efficiency pressurized air cable technology". IEEE Workshop 12/2021
- [2] Walter Holaus et. al. "Pressurized air insulated cables: A novel, compact GIL design for 12 kV-420 kV: Design, Simulation, and Test results". CIGRE 08/2022
- [3] Walter Holaus, "Test- und Betriebserfahrung mit einer 145-kV-Druckluftkabel-Pilotanlage. GIS Anwenderforum". Darmstadt 09/2022
- [4] Walter Holaus, "Pressurized Air Cables - a new technology for sustainable energy transmission 12 kV - 420 kV". VDE Berlin 11/2022
- [5] Walter Holaus, Damian Aegeuter, "Comparing temperature rise measurement and calculations for 24 kV, 3000 A pressurized air cables in various arrangements", Paper 235, Jicable Conference Lyon, 2023
- [6] Walter Holaus, Zeljko Tanasic, "Druckluftkabel zur Reduktion der Übertragungsverluste in Mittel- und Hochspannungsnetzen". OVE Zeitschrift e&i. Originalarbeit Ausgabe 09/2023.
- [7] Martina Stadelmann "Prüfungen an einphasigen Hivoduct-Prüfpolen unter realen Umgebungsbedingungen". FKH Jahresbericht 2022.
- [8] Walter Holaus, "Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145kV, 2000 A» FKH Fachtagung 2023
- [9] Walter Holaus, "Testing, installation, and operation experience with pressurized air cables for 36 kV, 3000 A and 145 kV, 2500 A" Matpost Lyon 2023
- [10] Walter Holaus, "Erfahrungsbericht Druckluftkabel Demonstrationsanlage» Electrosuisse Leitungsbautagung 2023
- [11] Walter Holaus, "Pressurized Air Cables - a new technology for sustainable high-power energy transmission 12 kV - 420 kV" Innovation in Energy, 2023, Slovenia
- [12] Michael Schüller, "Druckluftkabel der Zukunft" Electrosuisse Bulletin 12/2023
- [13] Benedikt Vogel, "Druckluft isoliert Erdkabel" BFE Publikationsdatenbank 12/2023

10.1 Geplante weitere Veröffentlichungen

- Caroline Schwald et.al. **LCA Druckluftkabel**: "Life cycle assessment for medium- und high voltage pressurized air cables for 40 years in operation", ETH Juniors (to be published)
- Eine Weiterentwicklung des Flanschdesigns wurde 2023 zum Patent angemeldet.

10.2 Politische Diskussionen zum Thema Druckluftkabel

Die Druckluftkabeltechnologie als Alternative für Hochspannungsfreileitungen wurde in einer Interpellation an den Bundesrat vorgeschlagen:

<https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaef?AffairId=20233942>

Swissgrid hat dafür ein Positionspapier erstellt:

<https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/about-us/newsroom/positions/230907-positionspapier-23-3942-ip-ettlin-de.pdf>

Kanton Obwalden: "Motion betreffend unterirdische Höchstspannungsleitungen anstelle von Freileitungen" <https://www.ow.ch/politbusiness/106042>