

# DRUCKLUFT ISOLIERT ERDKABEL

Für die Übertragung grosser elektrischer Ströme werden bisher Freileitungen oder Kunststoff-isolierte Erdkabel eingesetzt. Eine neue Idee geht dahin, Erdkabel mit einer Hülle aus Gas zu isolieren statt mit Kunststoff. Derartige Gasisolierungen sind heute schon in Schaltanlagen des Hoch- und Mittelspannungsnetzes verbreitet. In einem BFE-unterstützten Demonstrationsprojekt wurde nun ein Druckluft-isoliertes Hochspannungskabel während eines Jahres unter realitätsnahen Bedingungen getestet. Dabei wurden Erfahrungen gesammelt für den künftigen Einsatz dieser neuartigen Erdkabel.



Teil der Demonstrationsanlage für Druckluftkabel bei der SBB-Schaltanlage in Zürich-Seebach: Rechts im Bild ist zu erkennen, dass in dem Schutzrohr drei Druckluftkabel untergebracht sind. Jedes davon ist eine Phase des dreiphasigen Hochspannungskabels. Auch an heissen Sommertagen und bei einem maximalen Strom von 2000 Ampère erhitzen sich die Druckluftkabel nicht auf mehr als 57 °C. Foto: Hivoduct

Das Schweizer Überlandnetz besteht zu grossen Teilen aus Freileitungen, die Strom bei einer hohen Spannung von 220 oder 380 kV transportieren. Diese Leitungen verlaufen hoch über dem Boden, in sicherem Abstand zu den Menschen. Wo Freileitungen nicht möglich oder unerwünscht sind, können Erdkabel verlegt werden. Diese werden in der Regel mit einer Kunststoffschicht aus VPE (vernetztem Polyethylen) isoliert. Als Alternative dazu werden seit einigen Jahren Erdkabel entwickelt, deren schützende Hülle nicht aus Kunststoff, sondern aus einem Gas besteht.

Gas wird bisher vor allem in Schaltanlagen als Isolator eingesetzt, es kann aber auch für die Isolierung von Leitungen genutzt werden. Dafür wird in der Regel Schwefelhexafluorid verwendet, geläufig unter der chemischen Summenformel SF<sub>6</sub>. Dieses Gas ist bei Raumtemperatur ungiftig und reaktionsträge, aber sehr klimaschädlich. Ein Kilogramm SF<sub>6</sub> verstärkt den Treibhaus-Effekt so stark wie 26'000 kg CO<sub>2</sub>. Vor diesem Hintergrund ist es wünschbar, SF<sub>6</sub> durch ein Gas zu ersetzen, das nicht als Treibhausgas wirkt.

### Praktiker gründet Start-up

Genau das ist das Ziel des Start-up Hivoduct (Kempthal/ZH). Mitgründer und CEO ist der österreichische Elektrotechnik-Ingenieur Walter Holaus, der an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich den Dokortitel erworben hat und über 15 Jahre in der Entwicklung Gas-isolierter Schaltanlagen bei Industrie- unternehmen tätig war. 2020 gründete er mit zwei Kollegen ein eigenes Unternehmen mit dem Ziel, mit Druckluft isolierte Erdkabel für die Stromübertragung zu entwickeln. Die Firma, die heute zehn Mitarbeitende zählt, hat unterdessen Kabel für Anwendungen bei Mittelspannung (12 bis 52 kV) und Hochspannung (72 bis 145 kV) zertifiziert.

## P+D-PROJEKTE DES BFE

Das im Haupttext vorgestellte Projekt wurde vom Pilot- und Demonstrationsprogramm des Bundesamts für Energie (BFE) unterstützt. Mit dem Programm fördert das BFE die Entwicklung und Erprobung von innovativen Technologien, Lösungen und Ansätzen, die einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz oder der Nutzung erneuerbarer Energien leisten. Gesuche um Finanzhilfe können jederzeit eingereicht werden.

➔ [www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration](http://www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration)



Vor dem Bau der Demonstrationsanlage in Zürich-Seebach waren die Druckluftkabel im Rahmen eines Innosuisse-Projekts und gemeinsam mit der Ostschweizer Fachhochschule auf einem Teststand der Fachkommission für Hochspannungsfragen (Versuchsanstalt Dänikon) getestet worden. Foto: Hivoduct

Ein Vorteil der Neuentwicklung: Wegen des grösseren Leiterquerschnitts sind die elektrischen Verluste bis zu zehn Mal tiefer als bei Freileitungen und zwei bis drei Mal geringer als bei Kunststoff-isolierten Erdkabeln. Mit den neuartigen Kabeln liessen sich erhebliche Mengen an Strom sparen; bislang gehen im Schweizer Übertragungsnetz nämlich bis zu zehn Prozent des Stroms auf dem Transportweg verloren. Druckluftkabel sind auch eine Alternative zu supraleitenden Erdkabeln, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, die sich bislang aber nicht durchgesetzt haben. «Um die Gas-isolierten Erdkabel auf den Markt bringen zu können, müssen wir deren Leistungsfähigkeit und Verlässlichkeit in einem praxisnahen Umfeld demonstrieren», sagt Walter Holaus. Diesem Zweck diene ein vom BFE mitfinanziertes Demonstrationsprojekt, das im Herbst 2023 abgeschlossen wurde.



Mittelspannungs-Druckluftkabel (36 kV) mit drei nebeneinander liegenden Phasen, verlegt in einem Kabelkanal. Foto: Hivoduct

### Demo-Anlage bei der SBB

Für das Projekt wurde bei der Schaltanlage der SBB in Zürich-Seebach ein 30 Meter langer Abschnitt einer Druckluftkabel-Leitung (für 2500 A Strom) aufgebaut. Die SBB stellte den Teststandort zur Verfügung, da sie gerade in städtischen Gebieten oft Erdkabel einsetzen muss. Vorteilhaft ist für die SBB auch, dass Druckluftkabel etwa drei bis fünf Mal weniger Blindleistungsbedarf haben, was einen breiteren Einsatz im Netz im Vergleich zu VPE-Kabeln ermöglicht. Für das Demonstrationsprojekt wurde eine Spannung von 145 kV gewählt – eine Hochspannung, die in Europa verbreitet ist und auch in den Netzen der Schweizer Verteilnetzbetreiber verwendet wird.

Der einjährige Pilotbetrieb ermöglichte den Test verschiedener Betriebsfälle – insbesondere Dichtigkeitstests, Hochspannungstests mit simuliertem Druckabfall, Dauertests mit hohen Strömen - und das alles während Hitzeperioden im Sommer und Kälte und Schneefall im Winter. Die getesteten Kabel verwenden Druckluft bis 10 bar. In den Bersttests mussten sie ihre Dichtigkeit bis zu Drücken von 50 bar un-



Im Sommer 2023 wurde das Flanschdesign der Druckluftkabel nochmals verbessert. Nun können die Druckluftrohre bei Bedarf flexibel und mit einem Winkel von bis zu 10 Grad verlegt werden.  
Foto: Hivoduct

## DRUCKLUFT ISOLIERT STROMLEITUNGEN

Wie bei einem herkömmlichen Stromkabel fließt der elektrische Strom beim Druckluftkabel durch einen metallischen Leiter (siehe Abbildung rechts: innerer grüner Ring). Dieser befindet sich in einem mit Druckluft gefüllten Gehäuserohr, das bei einer 145 kV-Leitung einen Durchmesser von gut 20 cm hat (Abbildung: äusserer grüner Ring). Das Gehäuserohr wirkt als Druckbehälter, als Erdleiter und zusätzlich als effektive Abschirmung für die elektromagnetischen Felder, so dass die Umgebungsbeeinträchtigung stark reduziert wird.

Druckluft wird verwendet, weil sie noch besser isoliert als Luft bei Normaldruck. Eine 10 cm starke Schicht aus Druckluft mit 10 bar isoliert ungefähr so gut wie ein Meter unkomprimierte Luft. Im Rahmen des BFE-Demonstrationsprojekts wurden auch Druckverluste simuliert: Bei einem Druckabfall kam es in einer 145 kV Leitung mit einem Strom von 2000 Ampère erst bei einem Druck von 1.8 bar zu einem Überschlag. Das zeigt, dass Druckluftkabel, deren Druck bei 10 bar liegt, eine grosse Reserve haben.

Innerhalb des Druckluftrohrs sorgen alle 5 Meter Scheiben aus nicht-leitendem Kunststoff dafür, dass der Leiter mittig im Rohr sitzt. Das Rohr ist geerdet, so dass eine Person, die es berühren würde, keinen Stromstoss befürchten müsste. Ein Druckluftkabel hat im Vergleich zu einem herkömmlichen erdverlegten Hochspannungskabel mit einem Isolator aus VPE (vernetztem Polyethylen) einen grösseren Durchmesser. Die Abbildung zeigt den Grössenvergleich zwischen einem 145 kV-Druckluftkabel (2500 A) auf der linken Seite und einem VPE-Kabel (1000 A) auf der rechten Seite.

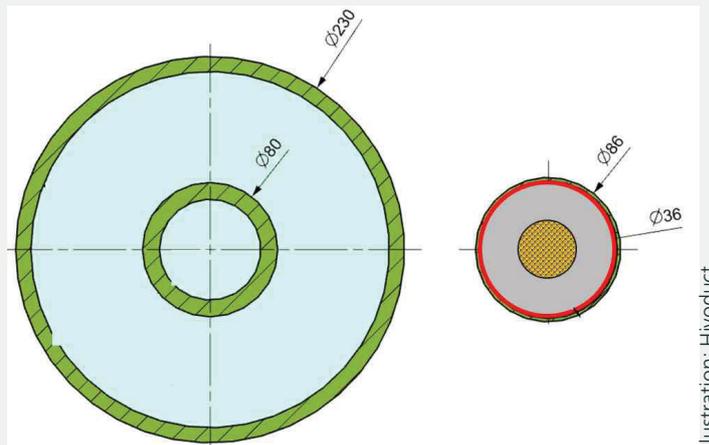
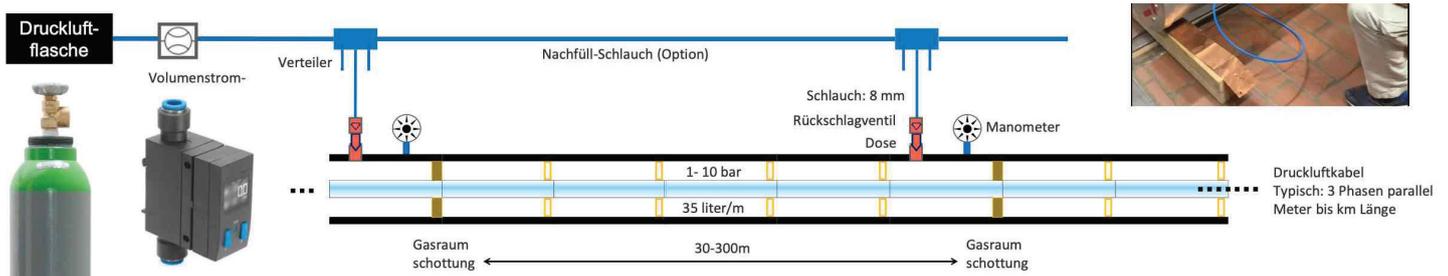


Illustration: Hivoduct



Druckluftkabel weisen gemäss Herstellerangaben über ihre 40-jährige Lebensdauer keine Druckverluste auf. Allerdings kommt es vor, dass die Druckluft nach Beschädigungen oder Revisionsarbeiten neu zugeführt werden muss. Zu diesem Zweck sind Druckluftleitungen mit einer Gasversorgung aus Druckluftflaschen ausgerüstet. Illustration: Hivoduct

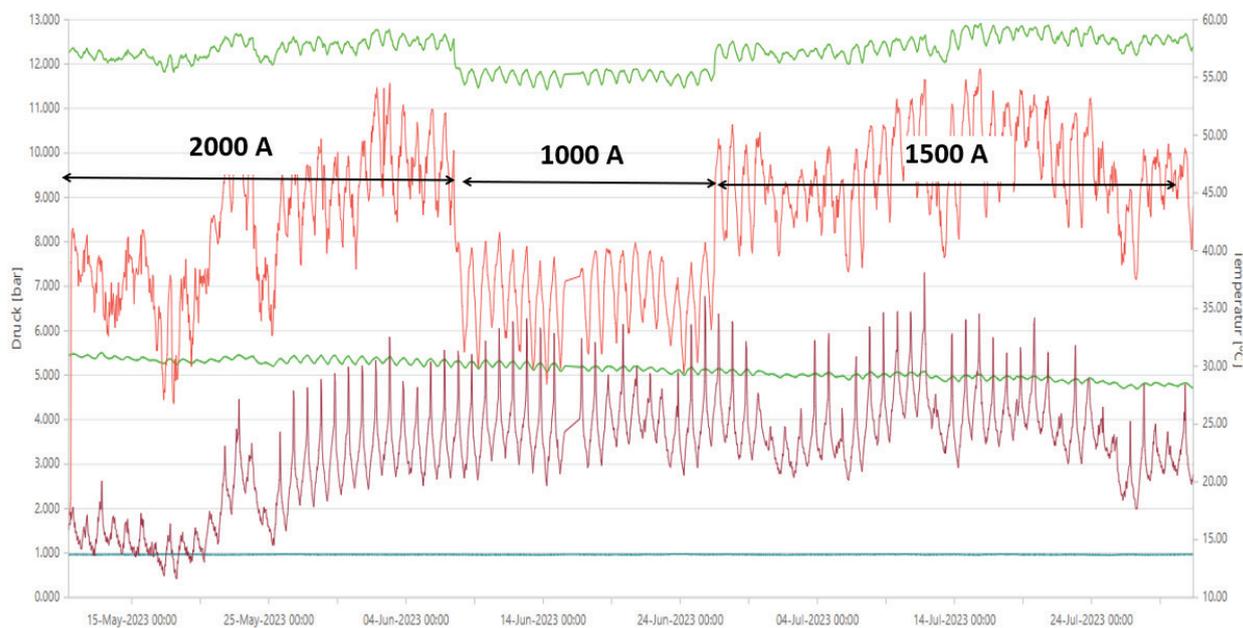
ter Beweis stellen. «Der Pilotbetrieb hat die Einsatztauglichkeit und die Robustheit der Druckluftkabel bestätigt», sagt Walter Holaus. «Es hat sich auch gezeigt, dass die laufende Überwachung mit Druck- und Temperatursensoren wertvolle Daten für den Betreiber liefert.»

### Konstruktive Verbesserungen

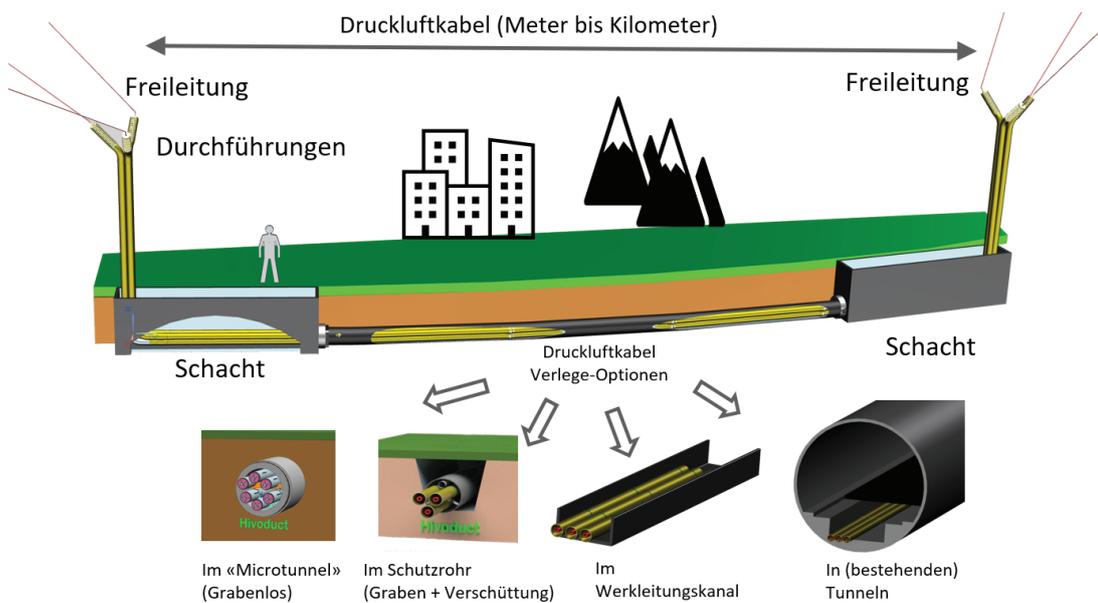
Der einjährige Betrieb hat bestätigt, dass in den Kabeln während zwölf Monaten keine Druckverluste auftreten. Die Entwickler gehen davon aus, dass die Dichtigkeit der Kabel über die gesamte Lebensdauer von 40 Jahren gewährleistet ist.

Dies verdankt sich unter anderem den neuartigen Flanschen, die die einzelnen, 5 m langen Druckluftrohre verbinden. Die Flansche bestehen aus einer eigens entwickelten und patentierten, formschlüssigen Ringverbindung und müssen nicht verschraubt werden.

Dank der Erfahrungen des Demonstrationsprojekts konnten die Druckluftrohre unterdessen weiter verbessert werden: So erwiesen sich Kontaktstellen zwischen versilberten Komponenten und Aluminiumteilen beim Einsatz unter freiem Himmel als korrosionsanfällig; sie werden nun mit einer Abde-



Das Druckluftkabel der Demonstrationslage wurde während des einjährigen Dauerbetriebs jeweils für mehrere Wochen testweise unterschiedlich hohen Dauerströmen ausgesetzt (2000 A, 1000 A, 1500 A). Die obere rote Kurve zeigt die Maximaltemperatur des Druckluftkabels (Gehäuserohr), die untere rote Kurve die Umgebungstemperatur. Trotz hoher Aussentemperaturen in dieser Jahreszeit stieg die Gehäusetemperatur des Druckluftkabels selbst bei 2000 A nie über 57 °C und blieb damit stets unter dem Grenzwert von 65 °C. Die obere grüne Kurve zeigt den Druckverlauf in der Hochstromphase, welche aufgrund des maximalen Fülldrucks und der Erwärmung durch den Dauerstrom Drücke bis 12.5 bar zeigte. Die untere grüne Kurve zeigt den schlimmsten Fall eines halbierten Druckes in der Hochspannungsphase, womit der Dauerbetrieb auch nach einer extremen Leckage bestätigt wurde. Grafik: Hivoduct



Schematisch Darstellung einer Hochspannungsleitung, die auf einem Abschnitt als Druckluft-Erdkabel geführt wird. Für die Kabelführung stehen vier unterschiedliche Designs zur Verfügung. Illustration: Hivoduct

ckung geschützt. Das Demonstrationsprojekt machte es dem Startup auch möglich, erstmals den vollständigen Produktions- und Installationsprozess durchzuspielen. Dabei konnten unter anderem die Werkzeuge optimiert werden, welche für das Zusammenfügen der einzelnen Rohre zu einer langen Druckluftkabel-Strecke benötigt werden.

### Schrittweise Zulassung

Hivoduct-Druckluftkabel bis 145 kV sind unterdessen zertifiziert und dürfen somit im Schweizer Stromnetz verbaut werden. Kabel für die beiden Höchstspannungen im Schweizer Übertragungsnetz (220 kV, 380 kV) könnten bald folgen, sind momentan aber noch nicht zugelassen. Bei der Kommerzialisierung der Druckluftkabel stehen für Hivoduct die Mittelspannung (12kV bis 52 kV) und untere Hochspannung (52 bis 145 kV) im Vordergrund: «Wir starten in diesem Spannungsbereich, weil diese Projekte zügig umgesetzt werden können», sagt Halaus. In Deutschland geht 2024 eine Pilotinstallation in einem städtischen Mittelspannungsnetz (36 kV) in Betrieb.

«Wir sehen das Einsatzgebiet für Druckluftkabel hauptsächlich da, wo Stromtrassen neu gebaut werden und wir Erdkabel benötigen, oder wo bestehende Freileitungen durch Erdkabel ersetzt werden müssen», sagt Halaus. Nach seiner Aussage liegen die Kosten für Druckluftkabel mit hohen Strömen über 1500 A bereits heute bei jenen von Kunststoff-isolierten Erdkabeln. Im Vergleich mit Freileitungen sind die Investitionskosten für Druckluftkabel 1.5 bis zehn Mal höher.

Hier müssten für einen fairen Kostenvergleich Übertragungsverluste und Wartung mit einbezogen werden, sagt Walter Halaus.

- Der **Schlussbericht** zum Projekt «Demonstrationsanlage Druckluftkabel 145 kV» ist abrufbar unter: [www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=50061](http://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=50061)
- **Auskünfte** zum Thema erteilt Roland Brüniger ([roland.brueeniger@brueniger.swiss](mailto:roland.brueeniger@brueniger.swiss)), externer Leiter BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Elektrizitätstechnologien finden Sie unter [www.bfe.admin.ch/ec-strom](http://www.bfe.admin.ch/ec-strom).