

Schraubenloses Flanschsystem von Hivoduct.

# Druckluftkabel der Zukunft

**Luftisolierte Hochspannungsleitungen** | Die viel diskutierte Versorgungssicherheit ist nicht nur von genügend Kraftwerkskapazität abhängig, wie es momentan in den Medien suggeriert wird. Gleich wichtig ist ein funktionierendes Stromnetz mit ausreichender Übertragungskapazität. Druckluftkabel können einen wertvollen Beitrag dazu leisten.

MICHAEL SCHUELLER, WALTER HOLAUS

**U**m eine grosse Menge an elektrischer Energie über längere Strecken zu transportieren, stehen grundsätzlich drei Hochspannungstechnologien zur Verfügung: Die bekannten Freileitungen und Kabel sowie die weniger bekannten gasisolierten Hochspannungsleitungen (GIL), die SF<sub>6</sub> oder Gasgemische mit SF<sub>6</sub> zur Isolierung verwenden. Dies sind ausgereifte Technologien, die schon lange eingesetzt werden und bei denen global umfangreiche Betriebserfahrungen vorliegen.

Diese Technologien unterscheiden sich stark bezüglich Transportkapazität, Überlastbarkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit.

Eine Freileitung ist bezüglich dieser drei Aspekte die bei Weitem beste Lösung. Sie kann viel Energie transportieren (etwa fünf- bis siebenmal mehr als Kabel), ihre Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallzeit sind gering. Je nach Wetterbedingungen kann sie für einige Zeit massiv überlastet werden, was bei Hochspannungskabeln überhaupt nicht möglich ist. Freileitungen haben geringere Übertragungsverluste als Kabel, aber deutlich grössere als GIL. Wenn man nur die Punkte Übertragungskapazität, Ausfallwahrscheinlichkeit/Ausfallzeit und Überlastbarkeit betrachtet, sind Freileitungen rein technisch die

bevorzugte Lösung – gesellschaftlich und politisch hingegen die unbeliebteste Option. Die Akzeptanz von unterirdischen Übertragungs-Korridoren wie Kabeln ist viel höher als bei Hochspannungsfreileitungen. Aber Kabelkorridore sind viel teurer im Bau, und wegen der vergleichsweise kleinen Übertragungskapazität der Kabel werden mehr parallele Systeme benötigt als bei Freileitungen.

Eine noch selten genutzte Alternative sind gasisolierte Leitungen. Sie haben eine hohe Transportkapazität, ähnlich einer Freileitung, die Verluste sind viel geringer und, was für die Gesellschaft am wichtigsten ist, gas-

isolierte Leitungen können unsichtbar unter der Erde verlegt werden. Von aussen sieht diese Technologie wie eine Pipeline aus, mit einem Aussengehäuse auf Erdpotenzial, das gefahrlos berührt werden kann. Im Inneren befindet sich ein zweites, von Isolatoren gehaltenes Rohr, das den Strom transportiert. Zwischen den beiden Rohren befindet sich unter hohem Druck stehendes Isoliergas, das es ermöglicht, diese Systeme so kompakt bauen zu können.

Die beiden Hauptgründe, die den Einsatz von GIL im grossen Stil bis jetzt verhindert haben, sind:

- **Mechanisch aufwendiger Aufbau:** Da eine traditionelle GIL einen Betriebsdruck von 5 bar SF<sub>6</sub> benötigt, ist das traditionelle Flanschdesign sehr aufwendig. Das macht einen Einsatz «im Dreck», wo Energieleitungen verlegt werden müssen, schwierig. Weil das System gasdicht sein muss, muss jeder Flansch mit jeder Dichtung staubfrei sein.

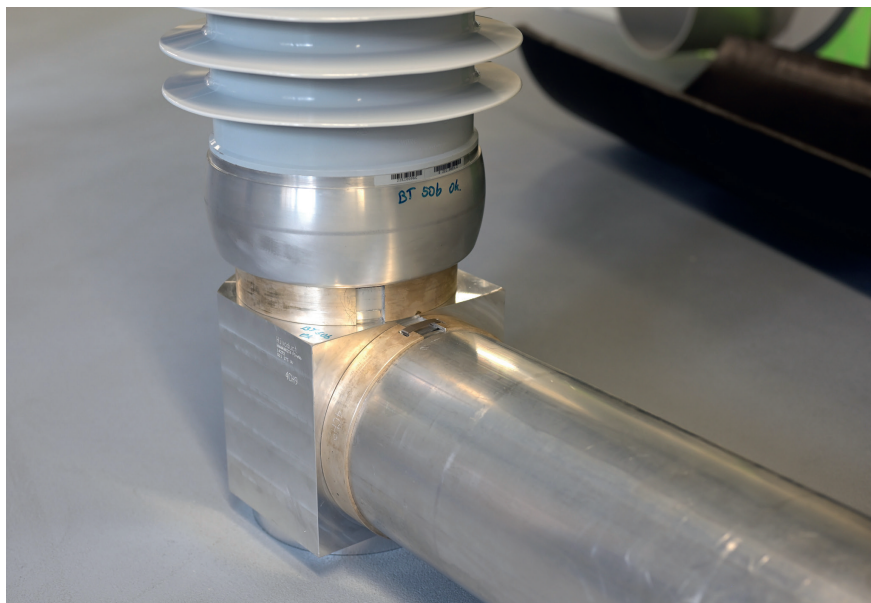
- **SF<sub>6</sub> als Isoliergas:** SF<sub>6</sub> ist ein 23 000-mal stärkeres Treibhausgas als CO<sub>2</sub>. Hunderte Kilometer mit SF<sub>6</sub> isolierter Leitungen zu verlegen, ist aus ökologischer Sicht nicht vertretbar, selbst bei kleinsten Leckraten. Daher wird die traditionelle GIL-Technologie mit SF<sub>6</sub>-Isolation nur an wenigen Orten weltweit eingesetzt, wo technisch eine andere Lösung nicht möglich wäre, beispielsweise am Flughafen Genf oder bei kurzen Ausleitungen an Umspannwerken.

Beide Aspekte werden in der neuen gasisolierten Leitung, die die Firma Hivoduct unter dem Namen Druckluftkabel in Zusammenarbeit mit der Gruppe für elektrische Energietechnik der Ostschweizer Fachhochschule entwickelt hat, elegant gelöst.

Die in diesem Artikel präsentierten Druckluftkabel könnten der Gamechanger in der Übertragungstechnik werden, da sie ohne SF<sub>6</sub> auskommen, dank ihres neuen Flanschsystems eine revolutionäre und günstige Verlegetechnik ermöglichen und viermal mehr Energie transportieren können als herkömmliche Hochspannungskabel.

### Mechanischer Aufbau

Das am 21. Juli 2020 patentierte schraubenlose Flansch-Design mit Doppelichtung löst alle mechanischen Nachteile der Technologie und kommt mit



**Bild 1** Da das System eine Verlegung mit Winkeln (Biegeradius 0) erlaubt, sind Installationen möglich, die mit Kabeln nicht realisiert werden können.

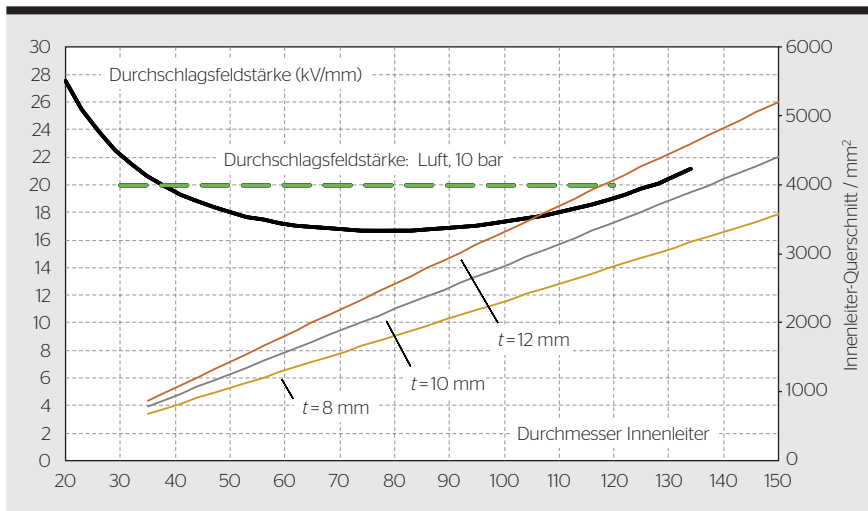


**Bild 2** Verlegung einer Anlage mit Rollensystem.

nur sechs Einzelteilen statt der rund 65 des traditionellen geschraubten Flanschdesigns aus. Das erleichtert die Installation im Feld erheblich. Zudem ermöglicht der schraubenlose Flansch viel höhere Betriebsdrücke im System als das traditionelle Flanschdesign.

Dank dem schraubenlosen Flansch hat das System insgesamt keinen grösseren Durchmesser als eine traditio-

nelle GIL am Flansch, obwohl für Druckluft grössere Isolationsabstände nötig sind. Dies ermöglicht im Gegensatz zu Kabeln eine kostengünstige Verlegung: Die Hivoduct-Druckluftkabel können beispielsweise auf einem Rollensystem (**Bild 2**) in vorher gebohrte Schächte, wie sie beispielsweise für Wasserleitungen Standard sind, geschoben werden.



**Bild 3** Einfluss des Innenleiter-Durchmessers auf die maximale Feldstärke bei Aussenleiter-Durchmesser von 212 mm und 650 kV.

Eigenschaft	Grund
Geringere Verluste	Grosse Leiterquerschnitte
Treibhausgaspotenzial = 0, ungiftig, keine Erstickungsgefahr	Druckluft als Isoliermedium
Kleinerer Platzbedarf	Neues Flanschdesign und Rollensystem
Keine Betonumhüllung nötig	Robuste Hülle und geringere Erwärmung
Beste Brandschutz	Unbrennbare, metallische Hülle
Geringere Blindleistung	Grösserer Isolierspalt, kleinere Dielektrizitätszahl und damit kleinere Kapazität pro m als Hochspannungskabel
Unauffällig, sicher, wartungsarm	Durch unterirdische Verlegung in Schutzrohr oder Mikrotunnel

**Tabelle 1** Technische Eigenschaften von Druckluftkabeln mit Begründung.

Anwendung	Vorteilhafte Eigenschaften in dieser Anwendung
<b>Ersatz von Freileitungen</b> (Abschnittsweise oder zwischen Schaltanlagen)	Leichtere Trassenfindung durch unterirdische Verlegung Keine Coronaentladungen, daher reduzierte Verluste und keine Coronageräusche Bessere Akzeptanz und Umgebungsaufwertung Geringere Wartung und Witterungseinflüsse
<b>Ersatz von Mittel- und Hochspannungskabeln</b>	Kleinere Verluste (Faktor 2 bis 3), kein Betonrohrblock nötig Tiefere Baukosten, dank Verlegetechnik mit Rollen Schmalere Trasse möglich, da mehr Übertragungskapazität pro System als Kabel Keine Muffen und keine Muffenschächte nötig Optimaler Brandschutz und Störlichtbogensicherheit Einfacherer Transport: Rohrabschnitte à 5 m
<b>Alternative zu SF<sub>6</sub> GIL, Sammelschienen und Ausleitungen</b>	Gleiche technische Parameter, aber ohne SF <sub>6</sub> , PFAS-Gase oder Gasmischungen. Daher umweltfreundlich und zukunftssicher
<b>Ersatz von (Hoch-)Stromschienen</b>	Keine Biegeradien, keine Muffen Hohe Stromtragfähigkeit und geringe Verluste Erdung inkludiert Optimaler Brandschutz und Störlichtbogenfestigkeit

**Tabelle 2** Anwendungen von Druckluftkabeln.

## Zukunftstaugliches Design

Ziel war es, ein umweltverträgliches, SF<sub>6</sub>-freies Produkt zu entwickeln. Die Vermeidung von SF<sub>6</sub> ist eine grosse Herausforderung in der Hochspannungsisolieretechnik, da SF<sub>6</sub> das beste bekannte Isolationsgas ist. Luft isoliert ungefähr dreimal schlechter als SF<sub>6</sub> und ist zusätzlich leider auch nicht so elektronegativer, wie es SF<sub>6</sub> wegen des Fluoranteils ist.

Gemäss dem Paschengesetz steigt die Isolationsfestigkeit von Gasen mit steigendem Druck. Das ist die Basis des elektrischen Designs der neuen Druckluftkabel von Hivoduct mit Luft als Isolationsmedium. Es werden rund 11 bar Luft statt 5 bar SF<sub>6</sub> verwendet. Dieser höhere Betriebsdruck ist dank des neuen Flansch-Designs möglich.

Druckluft ist ein bestens untersuchtes Isoliergas. Es hat eine druckabhän-

gige reale Durchschlagsfeldstärke, bei der der Luftdruck als ein Faktor mit Exponent 0,92 einfliesst. Der Druckexponent unter 1 berücksichtigt die Nichtlinearität, die mit zunehmendem Druck durch den wachsenden Einfluss von Oberflächenbeschaffenheiten der Elektroden entsteht. Dieser Effekt begrenzt die Anwendung von Druckluft als Isoliermedium in einem Bereich bis etwa 20 bar.

Die Feldstärke in einer coaxialen Rohranordnung ist am Innenleiter am höchsten und nimmt gegen aussen hin ab. Die maximale Feldstärke muss dabei bei der maximalen Spannungsbelastung während der Typprüfungen kleiner als die Durchschlagsfeldstärke der Druckluft sein. Daraus ergeben sich der nötige Isolierspalt und Aussenleiterdurchmesser.

Der Innenleiter-Durchmesser bestimmt die maximale Feldstärke und den verfügbaren Leiterquerschnitt. Er kann in einem weiten Bereich gewählt werden, um beide Parameter zu optimieren (**Bild 3**).

Bei einem Gehäuse-Aussendurchmesser von 212 mm und einer angelegten Spannung von 650 kV (entspricht der Blitzstoss-Prüfspannung bei Nennspannung 145 kV) variiert die maximale Feldstärke am Innenleiter je nach Innenleiter-Durchmesser von 17 bis 26 kV/mm. Die grüne Linie zeigt dazu die Durchschlagsfeldstärke von Luft bei 10 bar. Man erkennt ein Minimum bei rund 80 mm entsprechend einem Verhältnis von Aussen- zu Innendurchmesser von 2,71. Der Innenleiterquerschnitt, der entscheidend für die Stromtragfähigkeit des Druckluftkabels ist, steigt mit dem Durchmesser und der Wanddicke  $t$ . Optimale Wandstärken liegen zwischen 6 mm und 15 mm, wobei die untere Grenze durch ungenügende mechanische Stabilität des Innenleiters und die obere durch die Eindringtiefe der Wechselfelder in Aluminium bei 50 Hz gegeben ist.

Wie **Bild 3** zeigt, sind Leiterquerschnitte von über 2000 mm<sup>2</sup> daher design-inhärent für optimierte Druckluftkabel bei Hochspannungsanwendungen. Diese grossen Leiterquerschnitte sind die Basis für verlustarme Übertragungsleitungen.

Eine Übersicht über die technischen Eigenschaften von Druckluftkabeln mit dem Hivoduct-Basisdesign – ska-

lierbar von 24 kV bis 420 kV – zeigt **Tabelle 1**. In welchen Anwendungen diese technischen Eigenschaften vorteilhaft sind, wird in **Tabelle 2** erläutert.

### Installationsbeispiel

Eine dreiphasige Installation eines Druckluftkabels für 36 kV, 3 kA wurde als Ersatz für mehrere parallele Mittelspannungskabel in einem Kabelkanal aus Fertigbetonelementen (Innenmass: 550 x 400 mm) auf isolierenden Gleitfüssen ausgeführt. Spezielle Winkelelemente (**Bild 1**) ermöglichen dabei jeden Winkel ohne Biegeradius, in diesem Fall 90°. Das Füllen mit

Druckluft erfolgt via Druckluftflasche und Reduzierventil. Die Druckluftflasche kann auch zum Nachfüllen bei eventuellen Verlusten im Betrieb verwendet werden.

### Fazit

Druckluftkabel werden typgeprüft nach IEC 62271-204 für verschiedene Nennspannungen, Nennströme und Kurzschlussströme bis 50 kA und sind nun verfügbar für anspruchsvolle Anwendungen in der Mittel- und Hochspannung.

Druckluftkabel unterstützen den Umbau der elektrischen Netze hin zu einer modernen, effizienten, leistungs-

fähigen und nachhaltigen Energieübertragung. Im Netzausbau ermöglicht diese neue Technologie dank ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz neue Handlungsoptionen zur Netzverstärkung und zum Netzausbau.

#### Autoren

Prof. Dr. **Michael Schueller** ist seit 2020 Professor für Elektrische Energietechnik und Hochspannungstechnik an der OST.

→ OST, 8640 Rapperswil  
→ michael.schueller@ost.ch

Dr. **Walter Holaus** ist Gründer und CEO von Hivoduct.

→ Hivoduct AG, 8310 Kempthal  
→ walter.holaus@hivoduct.com

Die Entwicklung der Druckluftkabel von Hivoduct wurde finanziell von Innosuisse unterstützt.

## RÉSUMÉ

### Les câbles à air comprimé du futur

Lignes haute tension isolées à l'air

Il existe en principe trois technologies haute tension pour transporter une grande quantité d'énergie électrique sur de longues distances: les lignes aériennes et les câbles bien connus ainsi que les lignes haute tension à isolation gazeuse (LIG, ou GIL pour gasisolierte Leitungen), moins connues, qui utilisent du SF<sub>6</sub> ou des mélanges de gaz SF<sub>6</sub> pour l'isolation. Il s'agit là de technologies matures, utilisées depuis des décennies.

Si l'on ne considère que les points relatifs à la capacité de transport, à la probabilité ou au temps de défaillance ainsi qu'à la capacité de surcharge, les lignes aériennes constituent la meilleure solution d'un point de vue technique – et la moins populaire sur le plan social et politique. Les galeries de liaisons câblées souterraines sont en effet beaucoup mieux acceptées que les lignes aériennes à haute tension. Mais elles sont aussi beaucoup plus chères à construire et, en raison de la capacité de transport relativement faible des câbles, il faut davantage de systèmes parallèles que pour les lignes aériennes. Les lignes à isolation gazeuse constituent

une alternative encore rarement utilisée. Elles ont une capacité de transport élevée, similaire à celle d'une ligne aérienne, les pertes sont beaucoup plus faibles et elles peuvent être enterrées. De l'extérieur, cette technologie ressemble à un pipeline, avec une enveloppe extérieure au potentiel de la terre. À l'intérieur se trouve un deuxième tube, maintenu par des isolateurs, qui transporte le courant. Entre les deux tubes se trouve un gaz isolant sous haute pression, ce qui permet de construire ces systèmes de manière aussi compacte. Les lignes à air comprimé présentées dans cet article ne contiennent pas de SF<sub>6</sub>, permettent d'utiliser une technique de pose économique grâce à un nouveau système de brides et peuvent transporter quatre fois plus d'énergie que les câbles haute tension traditionnels. Elles sont soumises à des essais de type selon la norme CEI 62271-204 pour différentes tensions nominales, courants nominaux et courants de court-circuit jusqu'à 50 kA, et sont désormais disponibles pour des applications exigeantes dans les domaines de la moyenne et de la haute tension.

## Datendienstleistungen für Energieversorger



### Wir unterstützen EVU/VNB kompetent in den Bereichen:

- Mess- und Energiedatenmanagement (Strom, Gas, Wärme, Wasser)
- Metering und Zählerfernauslesung
- Visualisierung, Auswertung und Reporting und Portale
- Energieprognosen, Energieabrechnung von EVG / ZEV
- Datenschutz und Datensicherheit (ISO 27001 zertifiziert)
- Arbeitsunterstützung und Support

### Sysdex AG

Im Schörli 5  
CH-8600 Dübendorf

Tel. 044 537 83 10

www.sysdex.ch

NEUTRAL



SICHER



ZUVERLÄSSIG