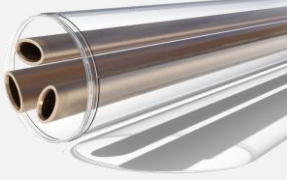


Technologievergleich: VPE-Kabel vs. Druckluftkabel

VPE-Kabel oder Druckluftkabel? Ein Vergleich von Systemeigenschaften und wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und technischer Kriterien¹. Alle Werte sind typische Werte von aktuellen Produkten oder Projekten und können im Einzelfall deutlich davon abweichen.

Vergleich: Systemeigenschaften

Thema	VPE-Kabel	Druckluftkabel
		
Verlegung	Unterirdisch: Beton-Rohrblock, begehbare Tunnel	Unterirdisch: Schutzrohr, Micro-tunnel, begehbare Tunnel
Platzbedarf	Trasse 145 kV: ≈ 2.0 m Trasse 245 kV ≈ 2.6 m Trasse 420 kV ≈ 3.5 m	Schutzrohr 110 kV: $\varnothing 0.7$ m Schutzrohr 245 kV: $\varnothing 1.0$ m Schutzrohr 420 kV: $\varnothing 1.2$ m
Bauten entlang der Leitung	Breiter Graben für Trasse. Muffenschächte alle ~ 1000 m	Schmalere Graben für Schutzrohr Montageschächte alle ~ 500 m
Leistungsverluste bei $I = 1000$ A (Skalieren mit I^2)	145 kV: ~ 50 kW/km 245 kV: ~ 45 kW/km 420 kV: ~ 30 kW/km	145 kV: ~ 46 kW/km 245 kV: ~ 25 kW/km 420 kV: ~ 19 kW/km
Übertragene Leistung (typische Werte)	145 kV: ~ 400 MW 245 kV: ~ 900 MW 420 kV: ~ 2300 MW	145 kV: ~ 800 MW 245 kV: ~ 1600 MW 420 kV: ~ 3600 MW
Grossflächiger Einsatz im Netz	Limitiert: Resonanzen, Blindleistungsbedarf	Kompletter Ersatz vom Freileitungsnetz möglich
Betriebserfahrung, Langzeiterfahrung	Sehr grosse Betriebserfahrung in allen Spannungsebenen	Neue Technologie. Betriebserfahrung mit GIL oder GIS
Fehlerortung	Impedanzmethode.	Integriert im Druckmonitoring: Lokalisierung des Gasraums.
Reparatur im Störfall	Aufwändige Reparatur (Muffen, Lieferzeiten Ersatzkabel)	Schnelle Reparatur. (Schraubenlose Flansche, Standardrohre)
Reparaturdauer im Störfall	Wochen bis Monate	Einige Tage
Parallele Systeme	Nötig für Redundanz und hohe Übertragungsleistungen	Optional für Redundanz und hohe Übertragungsleistung
Parallele Systeme	Nötig bei >2000 A	Nicht nötig bis 4000 A
Monitoring im Betrieb	Zusatzaufwand z. B. TE, DTS, Sheath	Integriertes Druckmonitoring für alle Betriebsparameter
Erdung	Cross-bonding mit SVL zur Verlustreduktion	Gehäuseerdung an jedem möglichen Erdungspunkt
Spannungserhöhung 245kV $\rightarrow$ 420kV	Oft nötig zur Verlustreduktion und Leistungserhöhung	Optional zur Verlustreduktion oder Leistungserhöhung

¹ Fokus auf Spannungsebenen ≥ 145 kV, obwohl DLK auch bei Mittelspannung eingesetzt werden.

Optionen für Ertüchtigung oder Netzausbau	Nur abschnittsweiser Ersatz von Freileitungen	Kontinuierlicher Neubau des kompletten Netzes möglich
Exposition (als kritischer Infrastruktur)	Im Rohrblock geschützt. Anschlüsse exponiert.	Im Microtunnel geschützt. Robuste metallische Hülle.

Vergleich: Wirtschaftlichkeit

Thema	VPE-Kabel	Druckluftkabel (DLK)
Investitionskosten: Kabel und Installation (Ohne PGV Kosten)	145 kV: ~1.2 MCHF/km 245 kV: ~2.7 MCHF/km 420 kV: ~5.0 MCHF/km	145 kV: ~1.5 MCHF/km ² 245 kV: ~2.9 MCHF/km ² 420 kV: ~4.3 MCHF/km ²
Kosten für Stromverluste im Betrieb über 40 Jahre bei durchschnittlich 1000 A	145 kV: ~2.1 MCHF/km 245 kV: ~1.6 MCHF/km 420 kV: ~1.0 MCHF/km	145 kV: ~1.0 MCHF/km 245 kV: ~0.6 MCHF/km 420 kV: ~0.4 MCHF/km
Kosten abhängig vom Nennstrom?	Starke Abhängigkeit: Grössere Ströme → höhere Kosten	Geringe Abhängigkeit: Basisdesign für alle Ströme
Maximale wirtschaftliche Leitungslänge	Begrenzt durch Blindleistung & Resonanzen	Keine Einschränkungen in modernen Netzen mit Speicher
Kosten für Blindleistungskompensation	Signifikant ab 20 km Länge	Keine bis 60 km Länge. Nötig ab 60 km Länge
Lieferzeit	Lieferzeit: >>Jahre.	Lieferzeit: ~Monate.
Kosten für Muffenschächte / Montageschächte	~ 20 kCHF/Schacht Höhere Kosten in Tunneln	~ 20 kCHF/Schacht Keine Muffenschächte in Tunnel
Betrieb & Instandhaltung	Geringer Wartungsaufwand. Zusatzaufwand für Monitoring	Geringer Wartungsaufwand. Integriertes Druckmonitoring
Installationsprozess	Erdarbeiten. Betonieren. Kabelzug. Setzen von Muffen.	Microtunnel bohren. Rohre im Schacht montieren. Einrollen.
Öffentliche Ausschreibungen	Standardisiert. Viele grosse Hersteller bieten mit.	Bisher keine produkt-spezifischen Ausschreibungen
Lebensdauer	~40 Jahre	> 40 Jahre (wie GIS)

Vergleich: Umwelt und Gesellschaft

Thema	VPE-Kabel	Druckluftkabel (DLK)
Genehmigungsprozess von Kabelprojekten	Aufwändig (Rohrblock), Projektspezifische Trassen	Schneller, Nutzung bestehender Trassen möglich
Gesellschaftliche Akzeptanz	Besser als Freileitung. Schlecht während Bauphase.	Noch keine Referenz. Besser wegen Emissionsfreiheit.
Äussere elektrische Felder	Keine: Leitfähige Abschirmung	Keine: metallisches Gehäuse
Äussere Magnetfelder bei I = 1000 A	<100 µT in >1 m Abstand <1 µT in >10 m Abstand	<100 µT in >0.3 m Abstand <1 µT in >3 m Abstand
Sicherheitsrisiken	Brand. Störlichtbogenfehler. Erdungsfehler.	Überdruck in ausgedehntem Druckbehälter < 10bar.

² Typische Werte für lange, hauptsächlich gerade Installationen.

Exposition für Vandalismus, Sabotage, Terrorismus	Leicht erhöht: Brandanschläge, mechanische Beschädigung	Minimal: Unterirdisch. Abgesperrt. Robuste Hülle.
Emissionen in die Umwelt	Magnetfeldemissionen. Abwärme. Beton im Rohrblock.	Minimale Emissionen.
Einfluss auf Nachbarschaft	Geringer Einfluss durch Feldemissionen.	Minimaler Einfluss.
Recycling Kabel am Lebensdauerende	Metalle: Rezyklierbar Isoliermaterialien: Sondermüll	~ 99 % Aluminium. Vollständig rezyklierbar.

Vergleich: Technische Parameter

Thema	VPE-Kabel	Druckluftkabel (DLK)
Aufbau und Herstellung	Komplexer Aufbau. Komplexer Extrusionsprozess & Muffen	Einfacher Aufbau. Einfache Montage (Fabrik & Vorort)
Isoliermedium	Vernetztes Polyethylen (VPE)	Druckluft (~10 bar, trocken)
Leitermaterial	Aluminium oder Kupfer	Aluminium
Feldbelastung am Innenleiter im Betrieb	10-18 kV/mm	2-4 kV/mm
Schirmung / Gehäuse	Dünnere, leitfähiger Schirm	Dickwandiges Aluminiumrohr
Brennbarkeit	Hülle & Isolierung: Kunststoff: Brennbar, Rauchentwicklung	Gehäuse & Leiter aus Metall: Nicht brennbar
Leiterquerschnitt	240 - 2500 mm ²	Mindestens 2200 mm ² Maximal: 5000 mm ²
AC-Widerstand bei Betriebstemperatur	145 kV: ~26 mΩ/km 245 kV: ~24 mΩ/km 420 kV: ~20 mΩ/km	145 kV: 12 mΩ/km 245 kV: 10 mΩ/km 420 kV: 8 mΩ/km
Kapazitätsbelag	145 kV: ~160 nF/km 245 kV: ~140 nF/km 420 kV: ~140 nF/km	145 kV: ~50 nF/km 245 kV: ~50 nF/km 420 kV: ~50 nF/km
Kapazitiver Ladestrom je km je Phase bei Nennspannung	145 kV: ~4.2 A/km 245 kV: ~6.2 A/km 420 kV: ~10.7 A/km	145 kV: ~1.30 A/km 245 kV: ~2.22 A/km 420 kV: ~3.81 A/km
Blindleistungsbedarf	145 kV: ~1.1 MVar/km 245 kV: ~2.64 MVar/km 420 kV: ~7.76 MVar/km	145 kV: ~0.33 MVar/km 245 kV: ~0.94 MVar/km 420 kV: ~2.80 MVar/km
Kompensationsbedarf	Erforderlich ab ~20 km	Erforderlich ab ~60 km
Biegeradius	Typisch: 20-30 * D _K . ~ 2-3 m Biegeradius	Kontinuierliche Biegung oder 90° Winkelstücke. R _B = 0 m
Störlichtbogenfestigkeit	Keine. Störlichtbogen führt zu Kabelbrand.	Ja. Lichtbogen bleibt intern. Druckaufbau < Berstwert..
Thermische Überlastbarkeit	Gering. Schlechte Wärmeleitung im VPE.	>1h bis 1.5*I _r . Gute Wärmeableitung via Alu-Gehäuse.
Inbetriebnahmeprüfung	Hohe Induktivität nötig für Resonanzprüfung ganzes Kabel	Prüfung von einzelnen Abschnitten, kleinere Kapazität.