

Technologievergleich: Freileitungen vs. Druckluftkabel

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

Vergleich: Systemeigenschaften

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
Verlegung	Oberirdisch entlang unbebauter Trassen.	Unterirdisch: Schutzrohr, Micro-tunnel, begehbare Tunnel
Platzbedarf	Trasse 145 kV: 45-55 m Trasse 220 kV: 55-65 m Trasse 380 kV: 65-75 m	Schutzrohr 110 kV: 0.7 m Schutzrohr 220 kV: 1.0 m Schutzrohr 380 kV: 1.2 m
Bauten entlang der Leitung	Masten mit Fundament alle ~300 m.	Schutzrohr. Installationsschacht alle ~300-500 m.
Leitungsverluste bei I = 1000 A (Skalieren mit I²)	145 kV: ~400 kW/km 245 kV: ~200 kW/km 420 kV: ~100 kW/km	145 kV: ~46 kW/km 245 kV: ~25 kW/km 420 kV: ~19 kW/km
Übertragbare Leistung (typische Werte)	145 kV: ~500 MW 245 kV: ~1000 MW 420 kV: ~2000 MW	145 kV: ~800 MW 245 kV: ~1600 MW 420 kV: ~3600 MW
Grossflächiger Einsatz im Netz	Ja. Aktueller Standard. Neubauten sehr schwierig.	Kompletter Ersatz vom Freileitungsnetz möglich
Betriebserfahrung, Langzeiterfahrung	Sehr grosse Betriebserfahrung in allen Spannungsebenen	Neue Technologie. Betriebserfahrung mit GIL oder GIS
Fehlerortung	Distanzschutz oder Impedanzmethode. Optische Kontrolle.	Integriert im Druckmonitoring: Lokalisierung des Gasraums.
Reparatur im Störfall	Einfache Reparatur: Sichtbare Fehler. Standard Ersatzteile.	Reparatur fehlerhafter Rohre. Ersatz mit Standard-Ersatzteile.
Reparaturdauer im Störfall	Einige Tage	Einige Tage
Parallele Systeme	Nötig für Redundanz und hohe Übertragungsleistungen	Optional für Redundanz
Parallele Systeme	Nötig bei >1500 A	Nicht nötig bis 4000 A
Monitoring im Betrieb	Zusatzaufwand z. B. optische Überwachung	Integriertes Druckmonitoring für alle Betriebsparameter
Erdung	Erdungsseil entlang Leitung. Geerdet an jedem Mast	Gehäuseerdung an jedem möglichen Erdungspunkt
Spannungserhöhung 245kV → 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	Bessere oder mehr Seile. Neubau dauert ~ 20 Jahre.	Kontinuierlicher Neubau des kompletten Netzes möglich
Exposition (als kritische Infrastruktur)	Exponiert gegen Wetter, Naturereignisse, Sabotage	Unterirdisch. Zugang geschützt. Robuste metallische Hülle.

Vergleich: Wirtschaftlichkeit

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
Investitionskosten Bau: Leitung und Installation (ohne PGV Kosten)	145 kV: ~ 0.9 MCHF/km 245 kV: ~ 1.8 MCHF/km 420 kV: ~ 2.8 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: ~ 8.5 MCHF/km 245 kV: ~ 4.5 MCHF/km 420 kV: ~ 2.0 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 Ferranti-Effekt auf etwa 1000 km	Keine Einschränkungen in modernen Netzen mit Speicher
Kosten für Blindleistungskompensation	Nur in Ausnahmefällen.	Keine bis 60 km Länge. Nötig ab 60 km Länge
Lieferzeit Seile, Masten, Rohre	Lieferzeit: ~Monate.	Lieferzeit: ~Monate.
Kosten für Mastfundamente / Montageschächte	~ 80 kCHF/Mastfundament	~ 20 kCHF/Schacht
Betrieb & Instandhaltung	Aufwand für Inspektion, Warnkugeln, Bewuchs, Wetter, Tiere	Geringer Wartungsaufwand. Integriertes Druckmonitoring
Installationsprozess	Bau von Fundamenten & Masten. Seilzug.	Schutzrohr verlegen. Rohre im Schacht montieren. Einrollen.
Öffentliche Ausschreibungen	Standardisiert. Viele grosse Hersteller bieten mit.	Bisher keine produktspezifischen Ausschreibungen
Lebensdauer	40 – 80 Jahre	> 40 Jahre (wie GIS)

Vergleich: Umwelt und Gesellschaft

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
Genehmigungsprozess von Leitungsprojekten	Aufwändig, Lange (15-20J) Stark projektabhängig	Schneller: Nutzung bestehender Trassen möglich
Gesellschaftliche Akzeptanz	Schlechte Akzeptanz für Bestand. Keine für Neubau.	Noch keine Referenz. Besser wegen Emissionsfreiheit.
Äussere elektrische Felder	Ausgedehnte elektrische Felder	Keine: metallisches Gehäuse
Äussere Magnetfelder bei I = 1000 A	< 100 µT in >2 m Abstand < 1 µT in > 200 m Abstand	< 100 µT in >0.3 m Abstand < 1 µT in >3 m Abstand
Sicherheitsrisiken	Exponierte Hochspannungsleiter.	Überdruck in ausgedehntem Druckbehälter < 10 bar.

² Typische Werte für lange, hauptsächlich gerade Installation.

Exposition für Vandalismus, Sabotage, Terrorismus	Landesweite Exposition. Schutz unmöglich.	Minimal: Unterirdisch. Zugang abgesperrt. Robuste Hülle.
Emissionen in die Umwelt	Felder, Geräusche, Optik, Abwärme	Minimale Emissionen.
Einfluss auf Nachbarschaft	Hoch. Abwertung von nahen Immobilien und Landschaft.	Minimaler Einfluss. Wenige sichtbare Eingänge.
Gefahr für die Umwelt	Vögel, Gleitschirme, Luftfahrzeuge, Waldbrand	Keine
Recycling Leitung am Lebensdauerende	Metalle (Leiter, Masten) rezyklierbar.	~ 99 % Aluminium. Vollständig rezyklierbar.

Vergleich: Technische Parameter

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
Aufbau und Herstellung	Einfacher Aufbau und Herstellung. Montage in Höhe.	Einfacher Aufbau. Einfache Montage im Schacht.
Isoliermedium	Umgebungsluft (~1bar)	Druckluft (~10 bar, trocken)
Leitermaterial	Aluminium mit Stahlkern	Aluminium
Feldbelastung am Draht/Leiter im Betrieb	~1.5 - 2.0 kV/mm	2-4 kV/mm
Schirmung / Gehäuse	Keine	Dickwandiges Aluminiumrohr
Brennbarkeit	Leiterseile und Masten metallisch: Nicht brennbar	Gehäuse & Leiter aus Metall: Nicht brennbar
Leiterquerschnitt (Einzeln oder als Bündel)	240 - 1600 mm ²	Mindestens 2200 mm ² Maximal: 5000 mm ²
AC-Widerstand bei Betriebstemperatur	145 kV: ~100 mΩ/km 245 kV: ~50 mΩ/km 420 kV: ~25 mΩ/km	145 kV: 12 mΩ/km 245 kV: 10 mΩ/km 420 kV: 8 mΩ/km
Kapazitätsbelag	145 kV: ~11 nF/km 245 kV: ~10 nF/km 420 kV: ~14 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: ~0.28 A/km 245 kV: ~0.44 A/km 420 kV: ~1.07 A/km	145 kV: ~1.30 A/km 245 kV: ~2.22 A/km 420 kV: ~3.81 A/km
Blindleistungsbedarf 3-phasig	145 kV: ~0.07 MVar/km 245 kV: ~0.19 MVar/km 420 kV: ~0.78 MVar/km	145 kV: ~0.33 MVar/km 245 kV: ~0.94 MVar/km 420 kV: ~2.80 MVar/km
Kompensationsbedarf	Nur in Spezialfällen nötig.	Erforderlich ab ~60 km
Richtungsänderungen (seitlich, vertikal)	Gerade Seile zwischen Masten. Winkel je Abspannmast: ≤ 60°	Kontinuierliche Biegung oder 90° Winkelstücke bei Bedarf
Störlichtbogenfestigkeit	Ja. Aber Lichtbogen, Knall und Wärmeemission	Ja. Lichtbogen bleibt intern. Druckaufbau < Berstwert.
Thermische Überlastbarkeit	Sehr gut. Hochtemperaturseile bis 350 °C bei hohen Verlusten.	>1h bis 1.5* I _r . Gute Wärmeableitung via Alu-Gehäuse.