

## Technologievergleich: Freileitungen vs. Druckluftkabel

Freileitungen oder Druckluftkabel? Ein Vergleich von Systemeigenschaften, wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und technischer Kriterien<sup>1</sup>. Alle Werte sind typische Werte von aktuellen Produkten oder Projekten und können im Einzelfall davon abweichen.

### Vergleich: Systemeigenschaften

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
<b>Verlegung</b>	Oberirdisch entlang unbebauter Trassen.	Unterirdisch: Schutzrohr, Micro-tunnel, begehbare Tunnel
<b>Platzbedarf</b>	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
<b>Bauten entlang der Leitung</b>	Masten mit Fundament alle ~300 m.	Schutzrohr. Installationsschacht alle ~300-500 m.
<b>Leitungsverluste bei I = 1000 A (Skalieren mit I<sup>2</sup>)</b>	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
<b>Übertragbare Leistung (typische Werte)</b>	145 kV: ~500 MW 245 kV: ~1000 MW 420 kV: ~2000 MW	145 kV: ~800 MW 245 kV: ~1600 MW 420 kV: ~3600 MW
<b>Grossflächiger Einsatz im Netz</b>	Ja. Aktueller Standard. Neubauten sehr schwierig.	Kompletter Ersatz vom Freileitungsnetz möglich
<b>Betriebserfahrung, Langzeiterfahrung</b>	Sehr grosse Betriebserfahrung in allen Spannungsebenen	Neue Technologie. Betriebserfahrung mit GIL oder GIS
<b>Fehlerortung</b>	Distanzschutz oder Impedanzmethode. Optische Kontrolle.	Integriert im Druckmonitoring: Lokalisierung des Gasraums.
<b>Reparatur im Störfall</b>	Einfache Reparatur: Sichtbare Fehler. Standard Ersatzteile.	Reparatur fehlerhafter Rohre. Ersatz mit Standard-Ersatzteile.
<b>Reparaturdauer im Störfall</b>	Einige Tage	Einige Tage
<b>Parallele Systeme</b>	Nötig für Redundanz und hohe Übertragungsleistungen	Optional für Redundanz
<b>Parallele Systeme</b>	Nötig bei >1500 A	Nicht nötig bis 4000 A
<b>Monitoring im Betrieb</b>	Zusatzaufwand z. B. optische Überwachung	Integriertes Druckmonitoring für alle Betriebsparameter
<b>Erdung</b>	Erdungsseil entlang Leitung. Geerdet an jedem Mast	Gehäuseerdung an jedem möglichen Erdungspunkt
<b>Spannungserhöhung 245kV → 420kV</b>	Oft nötig zur Verlustreduktion und Leistungserhöhung	Optional zur Verlustreduktion oder Leistungserhöhung

<sup>1</sup> Fokus auf Spannungsebenen >= 145 kV, obwohl DLK auch bei Mittelspannung eingesetzt werden.

<b>Optionen für Ertüchtigung oder Netzausbau</b>	Bessere oder mehr Seile. Neubau dauert ~ 20 Jahre.	Kontinuierlicher Neubau des kompletten Netzes möglich
<b>Exposition (als kritische Infrastruktur)</b>	Exponiert gegen Wetter, Naturereignisse, Sabotage	Unterirdisch. Zugang geschützt. Robuste metallische Hülle.

## Vergleich: Wirtschaftlichkeit

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
<b>Investitionskosten Bau: Leitung und Installation (ohne PGV Kosten)</b>	145 kV: ~ 0.9 MCHF/km 245 kV: ~ 1.8 MCHF/km 420 kV: ~ 2.8 MCHF/km	145 kV: ~ 1.5 MCHF/km 245 kV: ~ 2.9 MCHF/km 420 kV: ~ 4.3 MCHF/km
<b>Kosten für Stromverluste im Betrieb über 40 Jahre bei durchschnittlich 1000 A</b>	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
<b>Kosten abhängig vom Nennstrom?</b>	Starke Abhängigkeit: Grössere Ströme → höhere Kosten	Geringe Abhängigkeit: Basisdesign für alle Ströme
<b>Maximale wirtschaftliche Leitungslänge</b>	Begrenzt durch Ferranti-Effekt auf etwa 1000 km	Keine Einschränkungen in modernen Netzen mit Speicher
<b>Kosten für Blindleistungskompensation</b>	Nur in Ausnahmefällen.	Keine bis 60 km Länge. Nötig ab 60 km Länge
<b>Lieferzeit Seile, Masten, Rohre</b>	Lieferzeit: ~Monate.	Lieferzeit: ~Monate.
<b>Kosten für Mastfundamente / Montageschächte</b>	~ 80 kCHF/Mastfundament	~ 20 kCHF/Schacht
<b>Betrieb &amp; Instandhaltung</b>	Aufwand für Inspektion, Warnkugeln, Bewuchs, Wetter, Tiere	Geringer Wartungsaufwand. Integriertes Druckmonitoring
<b>Installationsprozess</b>	Bau von Fundamenten & Masten. Seilzug.	Schutzrohr verlegen. Rohre im Schacht montieren. Einrollen.
<b>Öffentliche Ausschreibungen</b>	Standardisiert. Viele grosse Hersteller bieten mit.	Bisher keine produktspezifischen Ausschreibungen
<b>Lebensdauer</b>	40 - 80 Jahre	> 40 Jahre (wie GIS)

## Vergleich: Umwelt und Gesellschaft

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
<b>Genehmigungsprozess von Leitungsprojekten</b>	Aufwändig, Lange (15-20J) Stark projektabhängig	Schneller: Nutzung bestehender Trassen möglich
<b>Gesellschaftliche Akzeptanz</b>	Schlechte Akzeptanz für Bestand. Keine für Neubau.	Noch keine Referenz. Besser wegen Emissionsfreiheit.
<b>Äussere elektrische Felder</b>	Ausgedehnte elektrische Felder	Keine: metallisches Gehäuse
<b>Äussere Magnetfelder bei I = 1000 A</b>	< 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
<b>Sicherheitsrisiken</b>	Exponierte Hochspannungsleiter.	Überdruck in ausgedehntem Druckbehälter < 10 bar.
<b>Exposition für Vandalismus, Sabotage, Terrorismus</b>	Landesweite Exposition. Schutz unmöglich.	Minimal: Unterirdisch. Zugang abgesperrt. Robuste Hülle.

<b>Emissionen in die Umwelt</b>	Felder, Geräusche, Optik, Abwärme	Minimale Emissionen.
<b>Einfluss auf Nachbarschaft</b>	Hoch. Abwertung von nahen Immobilien und Landschaft.	Minimaler Einfluss. Wenige sichtbare Eingänge.
<b>Gefahr für die Umwelt</b>	Vögel, Gleitschirme, Luftfahrzeuge, Waldbrand	Keine
<b>Recycling Leitung am Lebensdauerende</b>	Metalle (Leiter, Masten) rezyklierbar.	~ 99 % Aluminium. Vollständig rezyklierbar.

## Vergleich: Technische Parameter

Thema	Freileitungen	Druckluftkabel
<b>Aufbau und Herstellung</b>	Einfacher Aufbau und Herstellung. Montage in Höhe.	Einfacher Aufbau. Einfache Montage im Schacht.
<b>Isoliermedium</b>	Umgebungsluft (~1bar)	Druckluft (~10 bar, trocken)
<b>Leitermaterial</b>	Aluminium mit Stahlkern	Aluminium
<b>Feldbelastung am Draht/Leiter im Betrieb</b>	~1.5 - 2.0 kV/mm	2-4 kV/mm
<b>Schirmung / Gehäuse</b>	Keine	Dickwandiges Aluminiumrohr
<b>Brennbarkeit</b>	Leiterseile und Masten metallisch: Nicht brennbar	Gehäuse & Leiter aus Metall: Nicht brennbar
<b>Leiterquerschnitt (Einzel oder als Bündel)</b>	240 - 1600 mm <sup>2</sup>	Mindestens 2200 mm <sup>2</sup> Maximal: 5000 mm <sup>2</sup>
<b>AC-Widerstand bei Betriebstemperatur</b>	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
<b>Kapazitätsbelag</b>	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
<b>Kapazitiver Ladestrom je km je Phase bei Nennspannung</b>	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
<b>Blindleistungsbedarf 3-phasig</b>	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
<b>Kompensationsbedarf</b>	Nur in Spezialfällen nötig.	Erforderlich ab ~60 km
<b>Richtungsänderungen (seitlich, vertikal)</b>	Gerade Seile zwischen Masten. Winkel je Abspannmast: ≤ 60°	Kontinuierliche Biegung oder 90° Winkelstücke bei Bedarf
<b>Störlichtbogenfestigkeit</b>	Ja. Aber Lichtbogen, Knall und Wärmeemission	Ja. Lichtbogen bleibt intern. Druckaufbau < Berstwert.
<b>Thermische Überlastbarkeit</b>	Sehr gut. Hochtemperaturseile bis 350 °C bei hohen Verlusten.	>1h bis 1.5* I <sub>r</sub> . Gute Wärmeableitung via Alu-Gehäuse.