

# HÖCHSTSPANNUNGSÜBERTRAGUNGSLEITUNGEN FÜR DIE VERLEGUNG IN LANGEN TUNNELN

Rudolf WOSCHITZ<sup>1</sup>

## 1. Einleitung

Im vorliegenden Bericht werden auszugsweise die Ergebnisse einer Studie vorgestellt, welche im Rahmen eines EU-Projekts in Kooperation zwischen GRTN (italienischer Netzbetreiber), TIRAG (Tiroler Regelzone), der Universität Padua sowie dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, durchgeführt wurde. Es handelt sich dabei um eine 380 kV Leitung, welche durch den geplanten Brennerbasistunnel führen und einen Energieaustausch zwischen Italien und Österreich verbessern soll. So musste Italien z.B. im Jahre 2004 14,3% (46 TWh) des Gesamtenergiebedarfs (322 TWh) importieren, wie Abb. 1 zeigt.

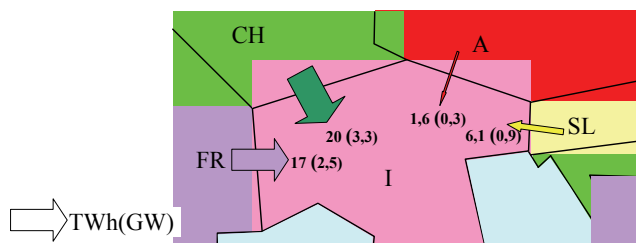


Abb. 1: Energieaustausch an Italiens Grenze (2004)

## 2. Projektbeschreibung

Der geplante Tunnel durch den Brennerpass soll eine Verkehrsverbindung für die Bahn von Innsbruck (A) nach Franzensfeste (I) in Form eines 60 km langen Tunnels herstellen, welcher zwei Verkehrsröhren und eine Pilotröhre aufweisen wird. In der Pilotröhre (Abb. 2) soll die 380-kV-Leitung untergebracht werden (2 Systeme). Für die Leitung durch den Brennerbasistunnel wurde ein Leistungsbereich zwischen 2000 und 3000 MVA angenommen.

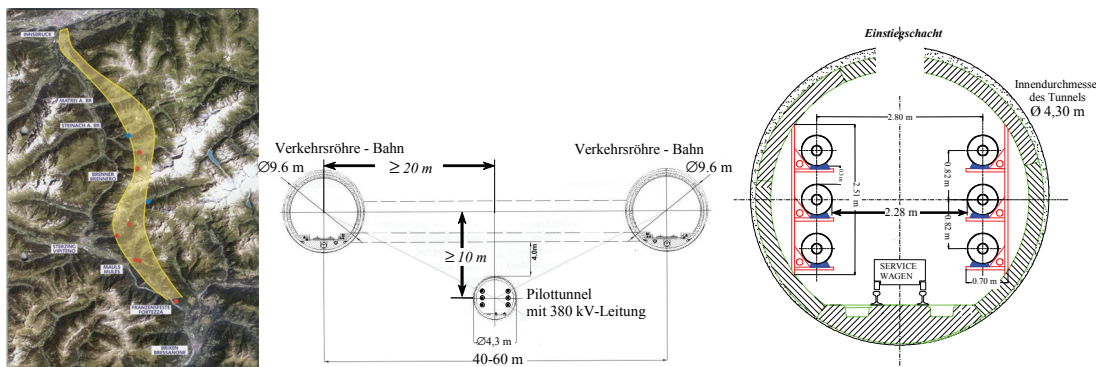


Abb. 2.a) Übersichtsplan;

b) Tunnelanlage;

c) Pilottunnel mit 380-kV-Leitung (2 Systeme)

Für die Ausführung der elektrischen Leitung wurden die beiden Technologien Hochspannungskabel und gasisolierte Leitung (GIL) untersucht.

<sup>1</sup> Rudolf Woschitz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Tel. +43316 8737410, Fax: +43316 8737407, e-mail: woschitz@tugraz.at, www.hspt.tugraz.at

### 3. Beschreibung der Komponenten GIL - VPE-Kabel

#### 3.1 GIL

Ein modernes GIL-System besteht aus drei einphasig gekapselten Rohren. Abb. 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer GIL. Innen befindet sich der Leiter (Hohlleiter) aus Aluminium. Dieser wird mittels Stützisolatoren in der Mitte des mit Isoliergas gefüllten, geerdeten Mantelrohres fixiert. Als Isoliergas dient bei modernen GIL-Anlagen ein Gasgemisch ( $N_2/SF_6$ ), welches den Einsatz des problematischen Treibhausgases  $SF_6$  bei ähnlichen Isolations- und Löscheigenschaften minimiert.

Typische Abmessungen für eine solche Anordnung sind ein Außendurchmesser des Leiterrohres von 180 - 250 mm bei einer Dicke von 8-15 mm, wodurch sich Leiterquerschnitte von bis zu über 5000  $mm^2$  ergeben. Entsprechend hohe mögliche Ströme ergeben eine hohe übertragbare Leistung dieses Systems. Das Mantelrohr wird aus einer Aluminiumlegierung hergestellt, wobei die Dicke zwischen 6 und 10 mm und der Außendurchmesser zwischen 460 - 600 mm variieren.

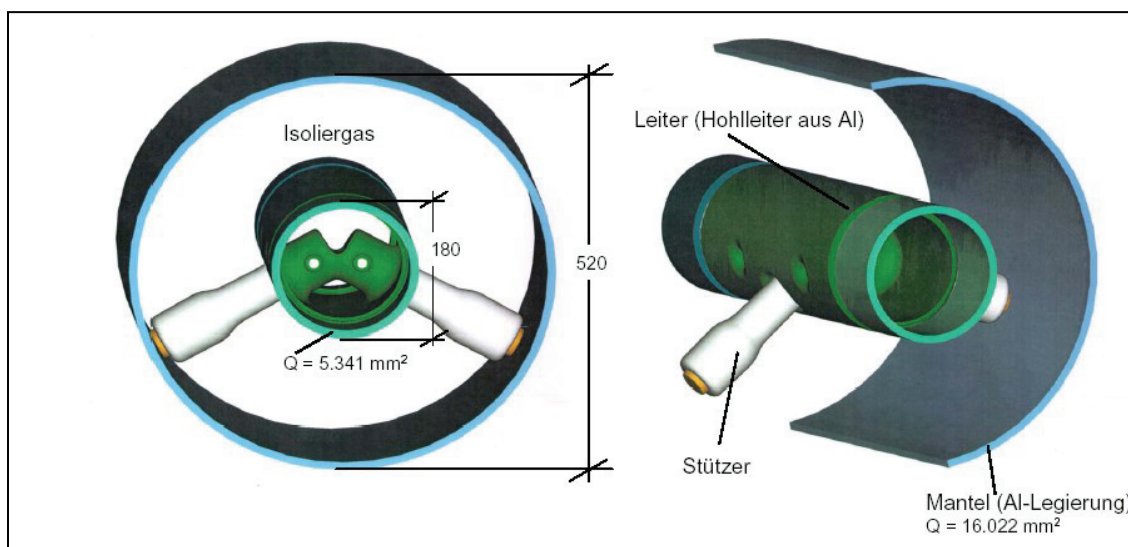


Abb.3 Beispiel für GIL-Aufbau

Um den Einsatz von GIL Systemen auch wirtschaftlich interessant zu machen, wurde bei den gasisolierten Leitungen der 2. Generation ein Hauptaugenmerk auf die Kostenreduktion gelegt. Dies konnte durch die Einführung von standardisierten Systemkomponenten erreicht werden. Durch vier verschiedene, so genannte Standardbausteine kann eine GIL praktisch jedem geforderten Trassenverlauf leicht angepasst werden.

Man unterscheidet zwischen geraden Bausteinen, Winkelbausteinen, Trennbausteinen und Kompensatorbausteinen. Der gerade Baustein (Abb. 4a) besteht aus dem Leiterrohr, dem Mantelrohr, den Stützisolatoren und den Durchführungen. Solche gerade Bausteine können in gewünschter Länge durch Gleitkontakte aneinander gefügt werden. Sind größere Richtungsänderungen zu bewältigen (größer als die mögliche Richtungsänderung durch den maximalen Biegeradius der GIL) werden Winkelbausteine (Abb. 4b) eingesetzt, mit welchen Richtungsänderungen zwischen  $4^\circ$  und  $90^\circ$  realisiert werden können. Um das Leiterrohr bei jeder gewünschten Richtungsänderung in der richtigen Position zu halten, wird im Winkelbaustein ein Festpunkt für den Leiter durch eine Durchführung eingebracht. Trennbausteine (Abb.4c) werden eingesetzt, um die GIL in einzelne Gasräume zu unterteilen. Das ist notwendig, um zu verhindern, dass im Falle eines Gaslecks nicht das Isoliergas der gesamten Übertragungsleitung in die Atmosphäre entweicht, sondern nur jenes des betroffenen Gasraumes. Die Länge eines solchen Teilabschnittes kann heute durch den Einsatz moderner Gashandhabungsgeräte (Gasmischeinrichtungen, Vakuumpumpen, Kompensatoren, Filter) bis zu 1000 m betragen. Schlussendlich sind noch Kompensatorbausteine (Abb. 4d) notwendig, um

die Wärmeausdehnungen des Mantelrohres auszugleichen. Abhängig von der Verlegungsart werden unterschiedliche Typen eingesetzt. Man unterscheidet zwischen Axialkompensatoren und Kardangelnkkompensatoren, welche beide bei oberirdischer oder Tunnelverlegung Anwendung finden sowie den Universalkompensator für Erdverlegung. Abb. 4d zeigt einen Axialkompensator, bestehend aus Edelstahlwellenrohren, zur Kompensation der Wärmeausdehnung und Kupferbändern zur elektrischen Überbrückung der Wellenrohre.

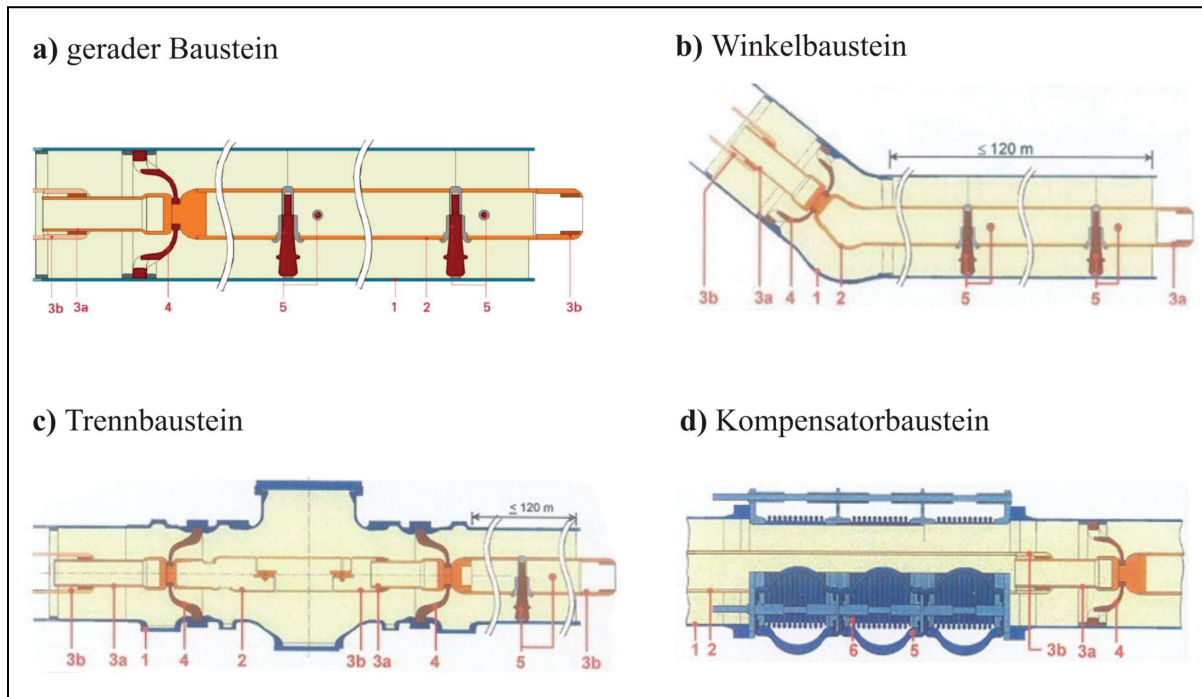


Abb. 4: Standardbausteine für GIL

### 3.2 VPE-Kabel

Im wesentlichen besitzen Hochspannungskabel folgende Konstruktionsmerkmale:

Ein Kupferleiter (Miliken Typ zur Verminderung des Skineffekts, typische Querschnitte sind z.B. 1200 mm<sup>2</sup>, 1600 mm<sup>2</sup>, 2000 mm<sup>2</sup> und 2500 mm<sup>2</sup>. Fertigung bis zu 4000 mm<sup>2</sup> ist möglich) wird von einer inneren Leitschicht, der VPE-Isolierung und einer äußeren Leitschicht umgeben, welche gemeinsam in einem Extrudierprozess aufgebracht werden. Das garantiert eine gute Verbundenheit der einzelnen Schichten und vermindert die Gefahr von Fremdeinschlüssen. Über der äußeren Leitschicht werden aus Gründen des Längswasserschutzes quellfähige Bänder aufgebracht. Diese schützen im Falle eines Kabelschadens gegen Wassereindringen in Längsrichtung. Über diesen Bändern befindet sich der metallische Schirm. Ein metallischer Mantel aus Aluminium dient neben dem metallischen Schirm als bestimmende Größe für den Nennkurzschlussstrom sowie als querwasserdichte Sperre für das Kabel. Darüber befindet sich der Außenmantel, der als Korrosionsschutzhülle und mechanischer Schutz wirkt. Abb. 5 zeigt den Aufbau eines VPE-Hochspannungskabels.

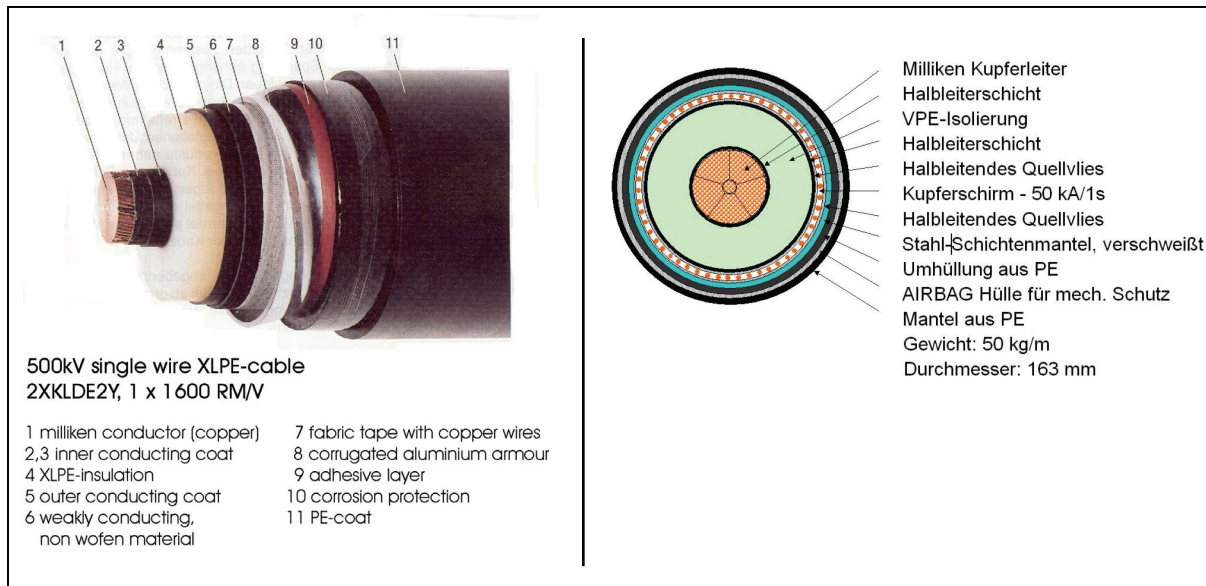


Abb. 5: Aufbau eines Hochspannungskabels

Da aus Transportgründen die einzelnen Teillängen des Kabels je nach Querschnitt zwischen 400 m und 900 m liegen, müssen diese für große Übertragungsstrecken mit Verbindungsmuffen miteinander verbunden werden. Zusätzlich müssen die Kabelenden mit geeigneten Elementen elektrisch abgeschlossen werden. Hierfür werden spezielle Kabelendverschlüsse verwendet. Zusätzlich zu diesen beiden Garnituren werden außerdem noch Muffen zum Auskreuzen der Kabelschirme zur Verlustminderung (Crossbonding, Abb. 6) eingesetzt.

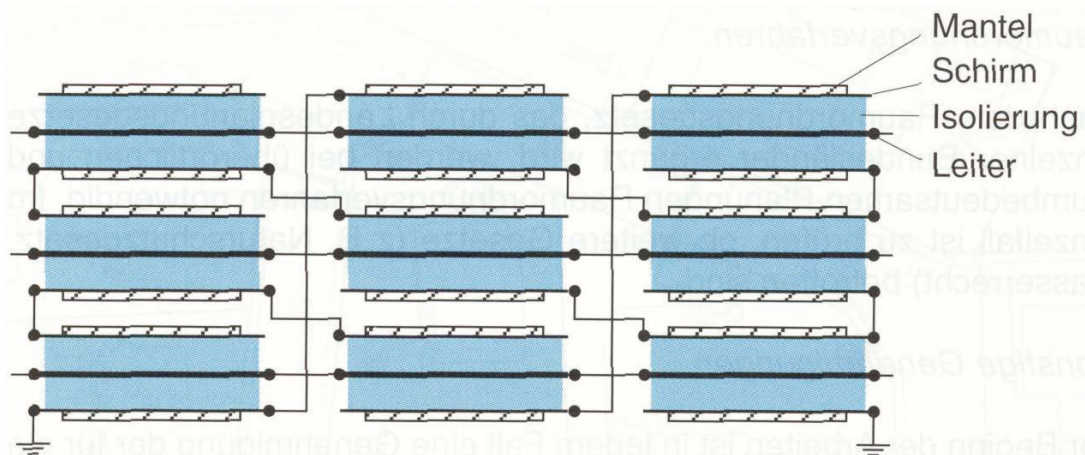


Abb.6: Crossbonding zur Verlustminderung

400 kV-Kabelmuffen für einen Leiterquerschnitt von  $2500 \text{ mm}^2$  Cu haben eine Länge von etwa 3 m, der elektrisch aktive Teil misst etwa 1m. Der Durchmesser des elektrisch aktiven Teiles beträgt ca.  $3 \cdot D_{\text{Isolation}}$ . Im Einsatz sind unterschiedlichste Konstruktionen wie Epoxydharzkörper mit Stresskonus aus Silikonkautschuk, Aufschiebemuffen aus Silikonkautschuk und Aufschiebemuffen aus EPDM (Abb. 7a).

Freiluftendverschlüsse für 400 kV-VPE-Kabel bestehen aus einem keramischen Isolierkörper mit Stresskonus zum Feldabbau in der Isolierflüssigkeit. Die Gesamthöhe beträgt etwa 4,9 m, von der ca. 3.6 m auf den Isolierkörper (Abb. 7b) entfallen.

Weitere benötigte Betriebsmittel zum Betrieb einer Kabelstrecke sind Kompensationsdrosseln, welche für die Kompensation der Blindleistung ab bestimmten Längen eines Kabels erforderlich sind.

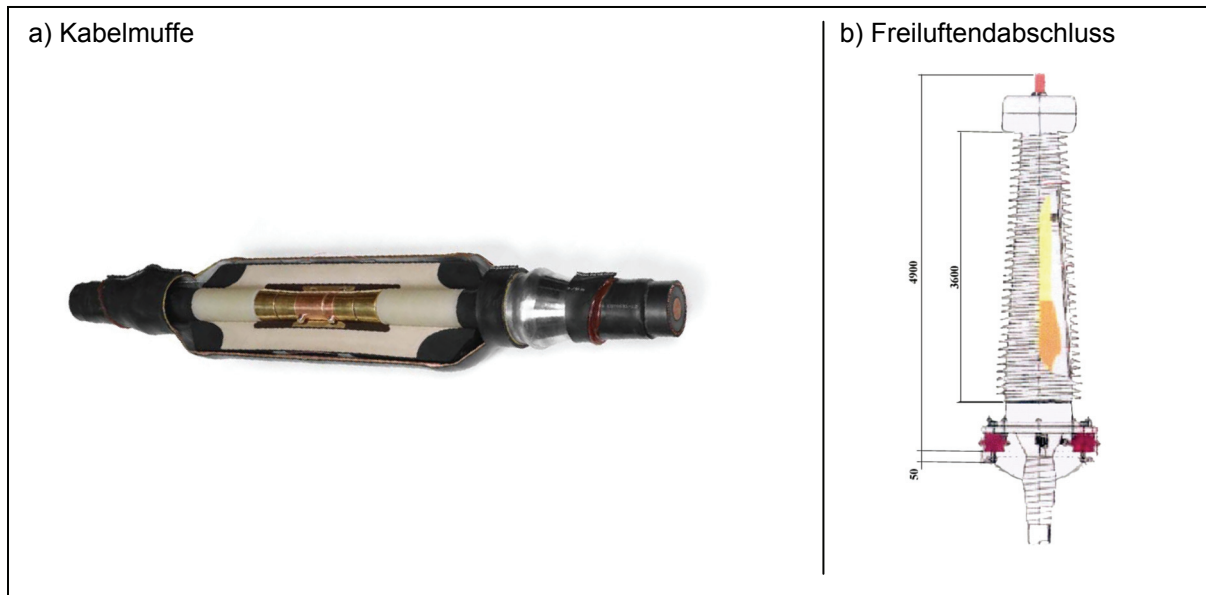


Abb: 7: Kabelmuffe und Kabelendverschluss für 400kV

## 4. Elektrische Parameter, kritische Längen

### 4.1 GIL

In Tabelle 1 sind die elektrischen Parameter einer GIL zusammengestellt. Um die Verluste mit jenen eines Kabelsystems vergleichen zu können (siehe Tab. 2), sind diese hier für 1000 MVA und 2000 MVA angegeben, obwohl GIL aus wirtschaftlichen Gründen erst ab höheren Übertragungsleistungen eingesetzt werden.

Querschnitt Leiterrohr/Durchmesser/Dicke	5300 mm <sup>2</sup> /250 mm/15 mm
Ohmscher Leitungsbelag $R'_L$	0,0063 [Ω/km]
Querschnitt Mantelrohr/Durchmesser/Dicke	16000 mm <sup>2</sup> /600 mm/10 mm
Ohmscher Leitungsbelag $R'_L$	0,003[Ω/km]
Induktiver Leitungsbelag $X_L$	0,22 [mH/km]
Kapazitätsbelag $C_L$	0,05 [μF/km]
Verluste bei 1000 MVA (1 System)	26 kW/km
Verluste bei 2000 MVA (1 System)	105 kW/km

Tabelle 1: Parameter einer 400-kV-GIL

Aufgrund des geringen Kapazitätsbelags der GIL werden normalerweise bis Längen von ca. 200 km keine Kompensationsmaßnahmen erforderlich sein. Die zulässige Länge (kritische Länge) einer GIL wird im wesentlichen von der Kurzschlussimpedanz im 400 kV-Netz bestimmt. Aus diesem Grunde sind Netzstudien bei der Planung von langen GIL erforderlich, wie folgende einfache Betrachtung zeigt. Im Falle der unbelasteten Leitung darf die Spannungsanhebung (Ferranti-Effekt) die zulässige Phasenspannung von 242,5 kV nicht überschreiten. Bei starken Netzen ergeben sich lange zulässige

Systemlängen, während bei schwachen Netzen die zulässigen Längen erheblich geringer sein können (Abb.8).

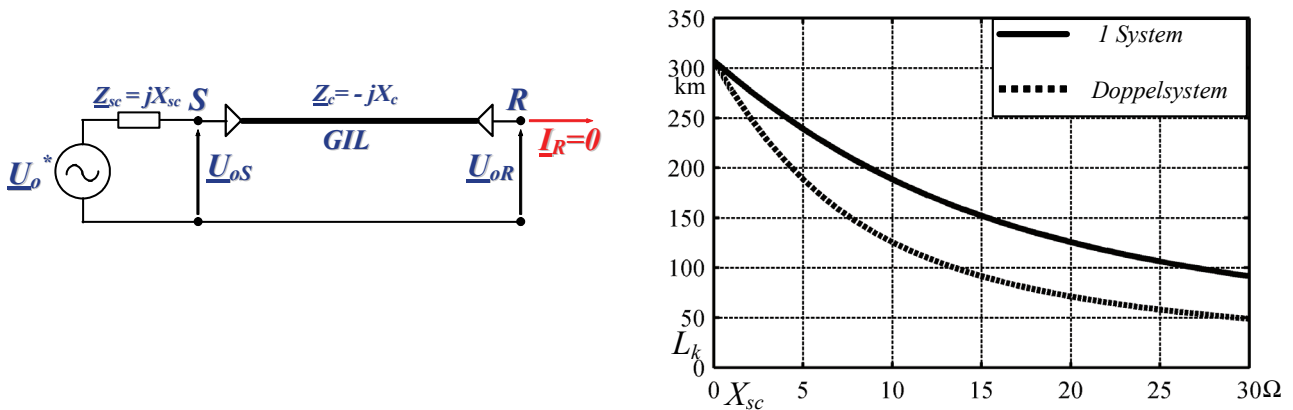


Abb. 8: Kritische Länge einer GIL in Abhängigkeit der Kurzschlussimpedanz  $X_{sc}$  des Netzes

## 4.2 VPE-Kabel

In der folgenden Tabelle sind die Kabeldaten für das 400 kV-VPE-Kabel mit einem Leiterquerschnitt von  $2500\text{mm}^2$  zusammengefasst. Die übertragbare Leistung dieses Kabel beträgt ca. 1100 MVA.

Leiterquerschnitt	$2500\text{mm}^2$
Kabeldurchmesser	144,5mm
Ohmscher Leitungsbelag $R'_L$	0,0108 [ $\Omega/\text{km}$ ]
Induktiver Leitungsbelag $X'_L$	0,546 [mH/km]
Kapazitiver Leitungsbelag $C'_L$	0,234 $\mu\text{F}/\text{km}$
Verluste bei 1000 MVA (1 System)	80 kW/km
Verluste bei 2000 MVA (2 Systeme erforderlich)	160 kW/km

Tabelle 2 Kabeldaten für 400 kV-VPE-Kabel mit  $2500\text{mm}^2$  Leiterquerschnitt

Aufgrund ihrer Geometrie und der eingesetzten Isolierstoffe weisen Hochspannungskabel einen hohen Kapazitätsbelag  $C'_L$  auf. Die Ladeleistung  $Q'_C$  (kapazitive Blindleistung) ist nur von der Betriebsspannung  $U_N$  abhängig. Diese Ladeleistung  $Q'_C$  stellt einen kapazitiven Blindleistungsverbrauch bzw. einen induktiven Blindleistungserzeuger dar und wirkt dem vom Belastungsstrom  $I$  abhängigen Blindleistungsverbrauch  $Q'_L$  entgegen. Als Belastungsstrom wurde für diese Berechnung 1500 A gewählt. Es gelten folgende Beziehungen:

$$Q'_C = U_N^2 \cdot \omega \cdot C'_L \quad [\text{MVar}/\text{km}] \quad \text{mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1)$$

$U_N$       Betriebsspannung [kV]  
 $C'_L$       Kapazitätsbelag [F/km]  
 $f$         Betriebsfrequenz ... 50Hz  
 $\omega$         Kreisfrequenz [s<sup>-1</sup>]

$$\underline{Q}'_C = 380^2 \cdot 314 \cdot 234 \cdot 10^{-9} = \underline{10,61} \text{ [MVar/km]}$$

$$\underline{Q}'_L = 3 \cdot I^2 \cdot X'_L \quad \text{[MVar/km]} \quad (2)$$

$I$         Belastungsstrom [kA]  
 $X'_L$       Induktiver Leitungsbelag je Leitung [Ω/km]

$$\underline{Q}'_L = 3 \cdot 1500^2 \cdot (\omega \cdot 0,546) = \underline{1,157} \text{ [MVar/km]}$$

Aus diesen Beziehungen ergibt sich die resultierende Blindleistung  $\underline{Q}'_R$  der Leitung pro km:

$$\underline{Q}'_R = \underline{Q}'_L - \underline{Q}'_C \quad \text{[MVar/km]} \quad (3)$$

Der maximale Belastungsstrom des Kabels wird mit 1500 A angenommen. Es ergibt sich also eine längenbezogene resultierende Blindleistung  $\underline{Q}'_R$  von:

$$\underline{Q}'_R = 1,157 - 10,61 = \underline{-9,453} \text{ [MVar/km]} \dots \text{kapazitiv}$$

Zur Kompensation der Blindleistung werden Kompensationsdrosseln verwendet. Da der Brennerbasistunnel zwei Notfallbahnhöfe (Abstand ca. 20 km) im Tunnel aufweisen wird, sind an diesen Stellen die Kabel aus dem Pilotstollen herauszuführen, um die Kompensationseinrichtungen unterzubringen. Insgesamt sind 4 Kompensationsdrosseln (3-phasig) zu je 140 MVar erforderlich.

Für die kritischen Längen des Kabels ergeben sich wegen des hohen Kapazitätsbelages in Abhängigkeit des Kompensationsgrades  $\zeta_{sh}$  wesentlich kürzere Längen, wie aus Abb. 9 ersichtlich wird.

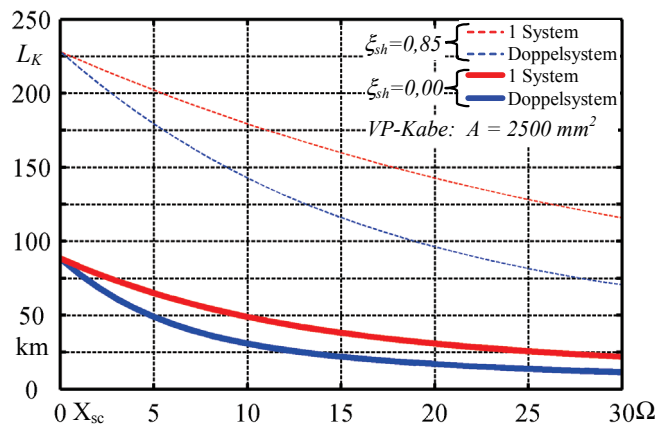


Abb. 9: Kritische Länge für 400 kV-Kabel in Abhängigkeit der Kurzschlussimpedanz des Netzes und des Kompensationsgrades

## 5. Verlegung im Tunnel

### 5.1 GIL

Die gasisolierte Leitung besteht aus 3 Rohren je System. Normalerweise werden 2 Systeme verlegt oder ein System mit 4 Rohren, wobei das 4. Rohr als Reserve dient. Das Gewicht eines Rohres einer 400 kV GIL beträgt ca. 300 N/m. Die Rohre werden bei Wandmontage in Abständen von ca. 25 m befestigt. Für eine Betriebstemperatur von bis zu 60 °C ist eine Ausdehnung von etwa 500 mm/km zu berücksichtigen, welche durch die Kompensationsbausteine aufgenommen wird. Der zulässige Biegeradius beträgt 400 m. Kleinere Krümmungsradien werden mit Winkelbausteinen (siehe Abb. 4) ausgeführt. Bei der Verlegung in Tunneln ist die GIL mit einem Schutz gegen Korrosion zu versehen.

Die Verlegung der GIL kann grundsätzlich auf 2 Arten erfolgen: Das Schweißen der 20 m langen Rohre erfolgt an einer Stelle und die produzierten Längen werden in den Tunnel gezogen.



Abb.10 a: Anlieferung der 20 m Rohre einer GIL

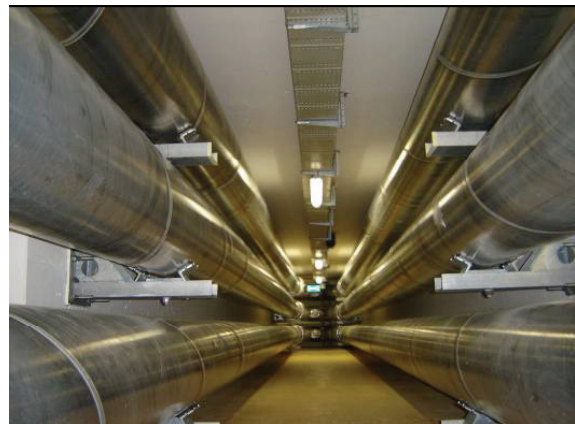


Abb. 10 b: GIL in Tunnelverlegung (Genf)

Dies kann bis zu Längen von etwa 1500 m erfolgen. Dies entspricht in etwa den vorgesehenen Abständen für die einzufügenden Trennbausteine zur Gasabschottung. Alternativ kann auch die Schweißposition bewegt werden. Dabei ist für entsprechende Reinheit am Schweißplatz zu sorgen.

Für die 60 km lange GIL in der Ausführung als Doppelsystem werden 360 km Rohr benötigt. Die ergibt eine Anzahl von 18.000 Rohren und Schweißungen. Zum Vergleich dazu wurde die 410 m lange GIL in Genf nach einer Bauzeit von 11 Monaten in Betrieb genommen.

### 5.2 KABEL

Die Teillängen des Hochspannungskabel werden auf Kabeltrommeln mit vom Leiterquerschnitt abhängigen Längen (z.B. 450 m für 2500 mm<sup>2</sup> Querschnitt) geliefert und können so bis zum Tunneleingang transportiert werden.

Aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse im Tunnel (Durchmesser 5 m) müssen die Kabelabschnitte im Freien abgewickelt werden und danach mit entsprechenden Transporteinrichtungen (Rollen, Wagen oder ähnliches) im Tunnel weitertransportiert werden. Die Muffenmontage erfolgt Vor-Ort im Tunnel.

Nach DIN VDE 0276 ist eine maximale Zugspannung von 50 N/mm<sup>2</sup> zulässig, was bei einem Leiterquerschnitt von 2500mm<sup>2</sup> einer zulässigen Zugkraft von 125000 N entspricht. Durch entsprechende Transportrollen kann das Einbringen der Kabel erleichtert werden.



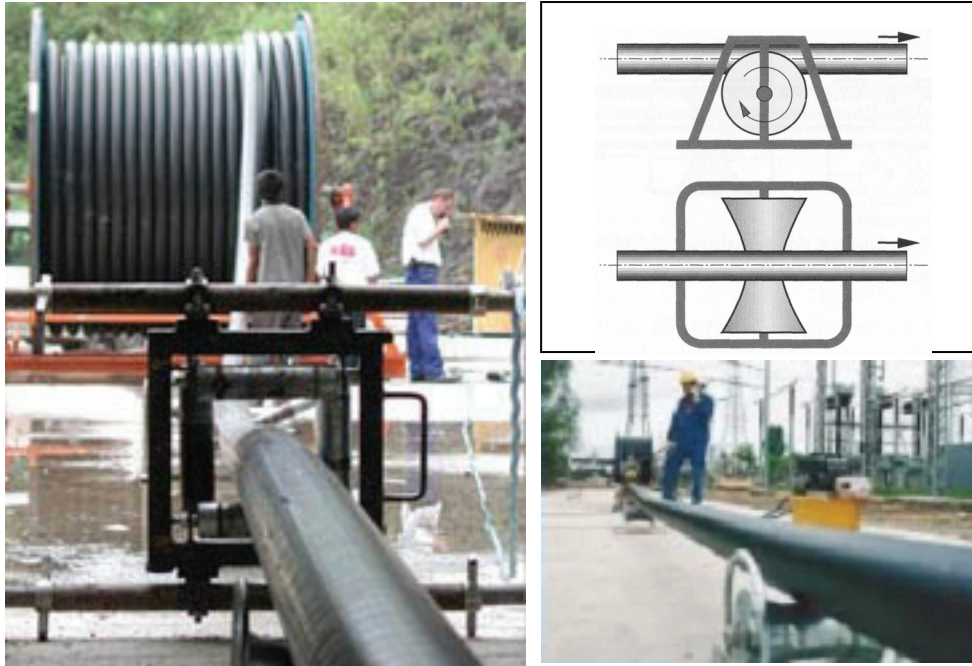


Abb. 11: Abrollen des Hochspannungskabels

Zusammenfassend werden für die geplante 60 km Kabelverbindung folgende Komponenten pro installiertem System benötigt:

• VPE-Kabel 400kV, Stück bei 450m Lieferlänge	402
• Muffen	399
• Freiluftendverschlüsse	6
• Erdungsboxen, einphasig für Freiluftendverschlüsse	6
• Erdungsboxen, einphasig für Muffen	133
• Erdungsboxen, dreiphasig für Muffen	266
• Kabelabgangsmasten/Übergangsfeld	2
• Überspannungsableiter für Kabelübergangsmasten	6
• Kompensationsdrosseln, 3-phasig, 400kV, 160MVAr	4

## 6. Kühlung

Die durch den Belastungsstrom erzeugte Verlustleistung wird in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Die Belastbarkeit der Leitung wird hier wesentlich von der Art der Kühlung bestimmt. Die Wärmeabfuhr erfordert eine forcierte Kühlung mit Wasser (Rohrsystem) oder mit Luft. Der für die Luftströmung nutzbare Querschnitt des Pilotstollens beträgt etwa  $13,65 \text{ m}^2$ , d.h. es stehen ca.  $15.4 \text{ kg Luft/m}$  (bei  $40^\circ\text{C}$ ) zur Verfügung. Bei einer angenommenen Wärmekapazität von  $1000 \text{ J/kg}$  und einer mittleren Kühllufttemperatur von  $30^\circ\text{C}$  ergibt sich eine erforderliche Strömungsgeschwindigkeit von  $5 \text{ m/s}$  ( $18 \text{ km/h}$ ) und eine Länge von ca.  $2 - 3 \text{ km}$  für die einzelnen Kühlabschnitte (Abb. 12). Da die Verlustleistung im MW-Bereich liegt, wird die technische Nutzung der Abwärme in Erwägung gezogen.

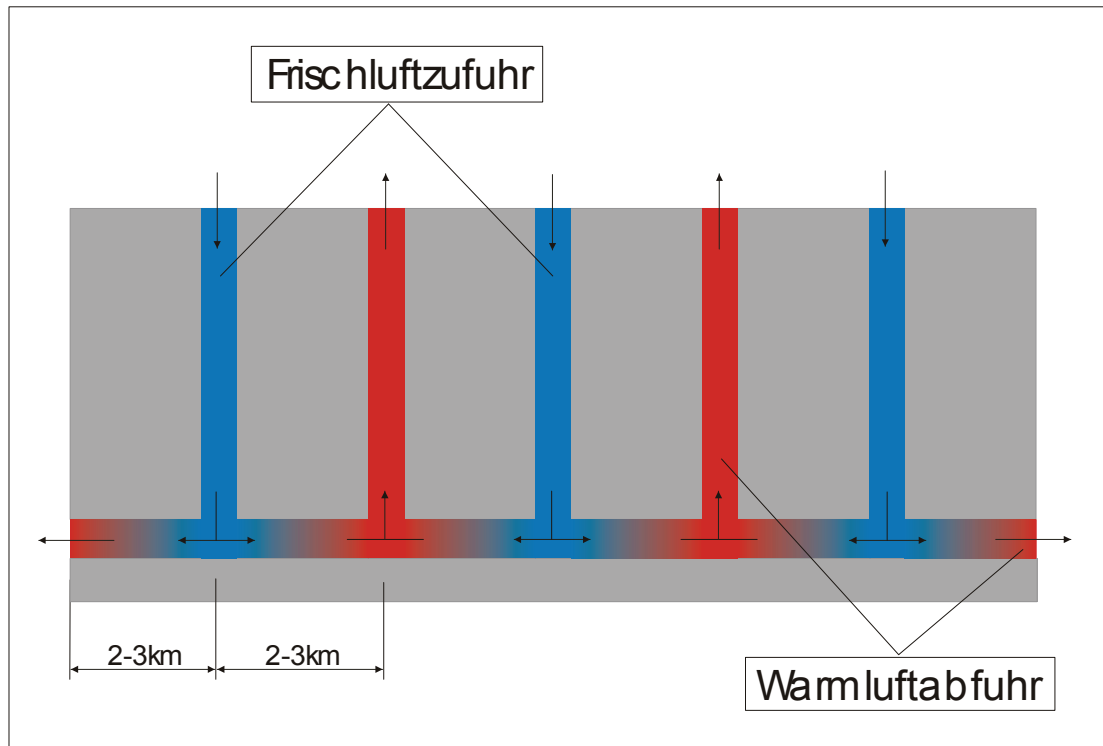


Abb. 12: System mit Luftkühlung

## 7. Diagnostik, Monitoring

### 6.1 GIL

Zur Feststellung der korrekten Ausführung einer GIL sowie zur Überwachung während des Betriebs sind diverse Diagnostikmethoden anzuwenden. Durch dielektrische Messungen wird überprüft, ob die elektrischen Isoliereigenschaften den Vorgaben entsprechen. Zusätzlich dazu werden Widerstandsmessungen an den Strompfaden (Hauptstrombahn und Kapselung) und Lastzyklentests durchgeführt. Ultraschalltests an den Schweißnähten garantieren eine fehlerfreie Schweißnaht und damit auch die Gasdichtheit der GIL. Ist die GIL Tropfwasser, ständiger Feuchtigkeit oder anderen Umwelteinflüssen ausgesetzt, so muss ein ausreichender Korrosionsschutz vorgesehen werden. Neben dem passiven Korrosionsschutz in Form eines Kunststoffmantels kann hier zusätzlich ein aktiver Korrosionsschutz verwendet werden.

Von entscheidender Bedeutung für die Funktionalität einer GIL ist die Sicherstellung des korrekten Gasdruckes und des Gaszustandes. Neue Entwicklungen in Japan verwenden für das Monitoring von langen GIL-Strecken optische Lichtwellenleiter mit entsprechenden Sensoren, anstelle von Gasdichteschaltern. Im Gegensatz zu konventionellen Gasdichteschaltern, wo bei Auftreten von Gasverlust ein elektrischer Kontakt geschlossen und somit Alarm ausgelöst wird, kann mit dieser neuen Methode durch die vom Gasdruck abhängige Biegung des LWL auch ein Trend des Gasverlustes festgestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit des Monitorings während des Betriebes stellt die Teilentladungsmessung dar. Durch Teilentladungen lassen sich bereits frühzeitig Einschlüsse von Fremdkörpern oder Fehler in der Isolation feststellen bevor es zu einem Versagen der Isoliereigenschaften kommt. Dadurch werden Zustandüberwachung sowie vorausschauende Wartung möglich.

## 6.2 VPE KABEL

Zur Detektion von Fehlerstellen in Kabelsystemen bieten sich Prüfverfahren (Spannungsprüfungen, Teilentladungsmessung) an, welche vor Inbetriebnahme der Kabelanlage durchgeführt werden müssen. Die Vor-Ort-Prüfung von VPE-isolierten Hochspannungskabeln wird meist mit mobilen Prüfanlagen (Resonanzkreise) durchgeführt.

Während des Betriebs kann die Kabelstrecke mit Monitoring-Systemen kontinuierlich beobachtet werden. Neben Temperatur-Monitoring können auch on-line Teilentladungsmessungen erfolgen. Zur Überwachung der Kabeltemperatur wird ein Lichtwellenleiter eingesetzt, der entweder im Kabelschirm integriert ist oder mitverlegt werden muss. Dadurch können eventuell auftretende 'hot spots' während des normalen Betriebes der Anlage erkannt werden bzw. eine optimale Ausnutzung der Kabelstrecke (RTTR-Temperaturmonitorings - Real Time Thermal Rating ... thermische Bewertung in Echtzeit) erfolgen.

Bei Kabelanlagen ohne spezielle Einrichtungen zur Feuchtigkeitsdetektion können Mantelfehler nur mittels einer Gleichspannungsprüfung erkannt werden. Deren Durchführung erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand und eine Freischaltung der Kabelstrecke, was unerwünscht ist. Deswegen wurden speziell für kunststoffisolierte Hochspannungskabel Sensoren entwickelt, welche ähnlich der Temperaturüberwachung mittels LWL eine kontinuierliche Überwachung gewährleisten.

## 8. Zusammenfassung

Die Übertragung elektrischer Energie in Höchstspannungsnetzen über große Entfernungen erfolgt üblicherweise mit Freileitungssystemen. In manchen Fällen bieten jedoch bauliche Strukturen, wie etwa Brücken oder Verkehrstunnel, die Möglichkeit einer Mitverlegung von Höchstspannungsübertragungsleitungen in Form von Kabeln oder gasisolierten Leitungen (GIL). Die Auswahl des geeigneten Systems zur Energieübertragung wird dabei primär von den Rahmenbedingungen des jeweiligen Projekts bestimmt, wobei neben den technischen Gesichtspunkten auch die Kosten des Übertragungssystems eine bedeutende Rolle spielen. Wesentlich dabei ist auch mitzuführende Übertragungsleitungen bereits in der Planungsphase baulicher Strukturen zu berücksichtigen, da die Integration in bereits bestehende Strukturen oft gar nicht oder nur unter erheblichem Aufwand möglich ist.

Im vorliegenden Beitrag werden die technischen Eigenschaften von Kabel und GIL sowie deren Betriebseigenschaften anhand eines geplanten Projekts einer 60 km langen Übertragungsleitung in Tunnelverlegung behandelt. Neben den unterschiedlichen Betriebseigenschaften werden auch die Zusatzeinrichtungen, welche für die jeweilige Technologie erforderlich sind, beschrieben. Betrachtet werden die jeweils typischen Übertragungsleistungen als auch die im Betrieb auftretenden Verluste sowie das Temperaturverhalten der beiden Systeme. Die Abfuhr der entstehenden Verlustwärme in einem langen Tunnel stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere beim Kabel ist gegebenenfalls für die notwendige Abfuhr der Verlustwärme durch den Einsatz forcierter Kühlung zu sorgen.

Hochspannungskabel werden bis zur 500 kV Ebene eingesetzt, wobei als Isoliermedium hauptsächlich vernetztes Polyäthylen (VPE) verwendet wird. VPE-Kabel mit Leiterquerschnitten bis zu 2500 mm<sup>2</sup> befinden sich bereits in Betrieb. Die erzielbare Übertragungsleistung liegt zur Zeit etwa bei 1500 MVA je System. Um größere Leistungen zu beherrschen, ist dabei eine Aufteilung in zwei oder mehrere Systeme erforderlich. Die Herstellung von Kabeln mit Leiterquerschnitten bis zu 4000 mm<sup>2</sup> für höhere Übertragungsleistungen ist aber bereits möglich. Gasisolierte Übertragungsleitungen werden für Spannungsebenen zwischen 200 kV und 550 kV und Übertragungsleistungen im Bereich von 2000-4000 MVA je System ausgeführt. Die hohen Übertragungsleistungen werden einerseits durch

große Leiterquerschnitte und der im Vergleich zu Kabelstrecken niedrigeren Verlustleistung sowie geringerer Temperaturempfindlichkeit möglich. Dadurch kann die Weiterführung der zu übertragenden Energie einer Freileitung mittels GIL mit einem System erfolgen.

Für das Verhalten im Netz sind die Übertragungseigenschaften der beiden Systeme Kabel und GIL maßgebend. So ist z.B. die kapazitive Ladeleistung einer gasisolierten Leitung wesentlich geringer als jene eines Kabels und weist der Freileitung sehr ähnliche Übertragungseigenschaften auf. Kabelstrecken erfordern ab einer Länge von ca. 20 km Kompensationseinrichtungen zur Reduzierung der kapazitiven Ladeleistung, welche im Tunnel untergebracht werden müssen. Erfolgt die Kompensation nur an beiden Enden des 60 km langen Kabels, ist mit einer Reduzierung der übertragbaren Leistung um ca. 30 % zu rechnen. Bezüglich Betriebssicherheit ist davon auszugehen, dass im Fehlerfall die Reparatur an einer 60 km langen GIL inklusive Wiederinbetriebnahme etwa 20 Tage in Anspruch nimmt. Bei der Kabelanlage kann der Fehler in etwa 10 Tagen behoben werden. Auf Grund der geforderten hohen Betriebssicherheit sind hier generell Monitoring-Systeme einzusetzen, um Zustandsänderungen der Übertragungsstrecke rasch zu erkennen. Für beide Systeme kann eine Lebensdauer von etwa 40 Jahren angenommen werden.

#### Quellenhinweis:

Framework of the TEN-Energy Programme: "Studies for a new 380 kV transmission line between Italy and Austria through the Brenner pass: Integration of Electricity and Rail Transport in Tunnel", GRTN, TIRAG, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, University of Padua, 2005