

MICAFIL Symposium 1999

„380-kV-Diagonale“ durch die Lastschwerpunkte Berlins

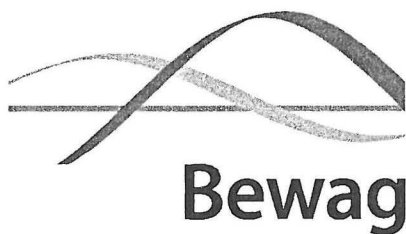
Einsatz von 400-kV-Kunststoffkabeln

Gasisolierte Übertragungsleitung (GIL) als Alternative zur Kabeltechnik

Dipl.-Ing. Claus-Georg Henningsen

Bewag Aktiengesellschaft

Puschkinallee 52
12435 Berlin



1 Einleitung

Die Auswirkungen des zweiten Weltkrieges führten neben der politischen Trennung auch zu Konsequenzen in der überregionalen Stromversorgung. Die Stromversorgungsunternehmen der west- wie auch der osteuropäischen Länder schlossen sich über die Landesgrenzen hinweg jeweils zu Verbundnetzen zusammen. Nachdem am 05. März 1952 die letzte Stromverbindung zum Umland durchtrennt wurde, war die Bewag Aktiengesellschaft als Versorgungsunternehmen für den „Westteil“ der Stadt Berlin gezwungen, die Energieversorgung in einem Inselnetz zu betreiben.

1994 konnte das Inseldasein der Bewag durch den Anschluß an das UCPT-Netz beendet werden. Bestandteil der Verbindung ist eine ca. 170 km lange Freileitung von Helmstedt über das Umspannwerk Wolmirstedt bei Magdeburg bis zum Umspannwerk Teufelsbruch im Spandauer Forst. Der innerstädtische Anschluß bis zum Umspannwerk Reuter wurde über eine 400-kV-Ölkabelanlage realisiert.

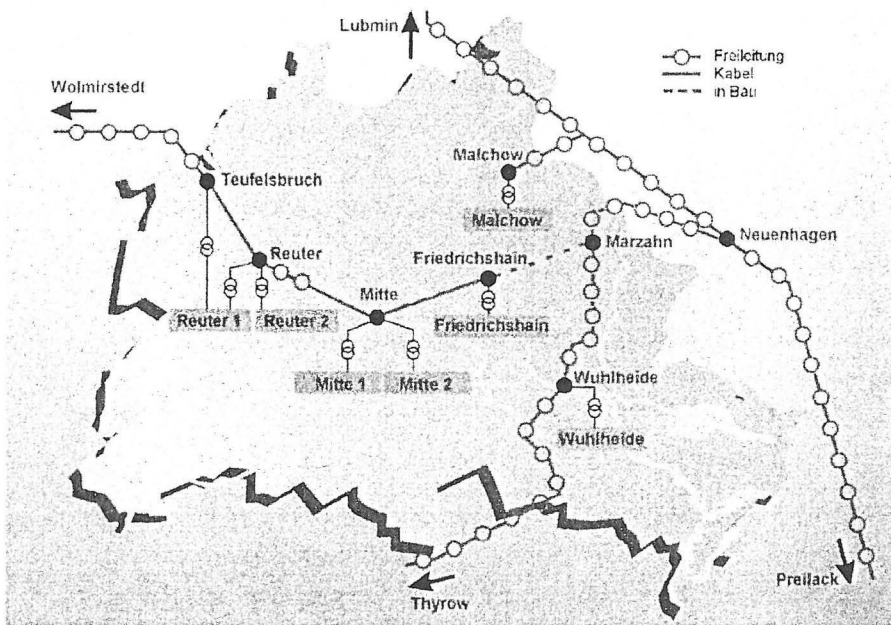


Bild 1

**„380-kV-Diagonale“
mit unterlagerten
110-kV-Teilnetzen**

Die Wiedervereinigung Deutschlands und die Vereinigung der beiden Energieversorgungsunternehmen Berlins zu einem Unternehmen, das für die Stromversorgung ganz Berlins verantwortlich ist, verlangte nach einem Konzept um die zukünftige Stromversorgung der Hauptstadt Berlin sicherzustellen. Grundsatzuntersuchungen ergaben, daß unter Benutzung der bereits vorhandenen 400-kV-Verbindungen die wirtschaftlichste und technisch sinnvollste Lösung die Realisierung einer „380-kV-Diagonale“ darstellt.

Die ersten Schritte sind bereits ausgeführt. Ende 1998 wurde eine leistungsstarke 400-kV-Kabelverbindung zwischen dem „Ostteil“ (Umspannwerk Friedrichshain) und dem „Westteil“ Berlins (Umspannwerk Mitte) ausgeführt. Ebenfalls erfolgte die Errichtung der Freileitungsverbindung zum Umspannwerk Neuenhagen. Die Schließung der Diagonale ist für das Jahr 2000 geplant.

2 Tunnel durch Berlin

Zum Zeitpunkt der Entscheidung über den Bau der „380-kV-Diagonalverbindung“ waren als 400-kV-Übertragungstechniken nur Ölkabel- und Freileitungsverbindungen im Netz der Bewag im Einsatz. Der Bau einer Freileitung im Stadtgebiet war in den Randbereichen nur mit aufwendigen Kompensationsmaßnahmen möglich. Für die Querung des Stadtzentrums kam nur eine unterirdische Bauweise in Frage. Es zeigte sich, daß aufgrund der vielen Baumaßnahmen im Stadtgebiet (u.a. Potsdamer Platz, Regierungsviertel) und dem engen Terminplan zur Inbetriebnahme der Diagonalverbindung ein tiefer Tunnel die technisch sinnvollste und auch die wirtschaftlichste Variante darstellt.

Durch die direkte Tunnelverbindung zwischen den Umspannwerken Mitte und Friedrichshain verkürzte sich die Trassenlänge, die im konventionellen Tiefbau dem Straßenverlauf hätte folgen müssen um 1,1 km auf ca. 6,3 km. Der weiterführende Tunnel vom Umspannwerk Friedrichshain bis zum Umspannwerk Marzahn weist eine Länge von ca. 5,2 km auf. Der lichte Innendurchmesser des Tunnels beträgt ca. 3 m und wurde so gewählt, daß an jeder Stelle im Tunnel eine Muffe installiert werden kann. Der Tunnel verläuft in einer Tiefe zwischen 15 m und 35 m unter der Erdoberfläche.

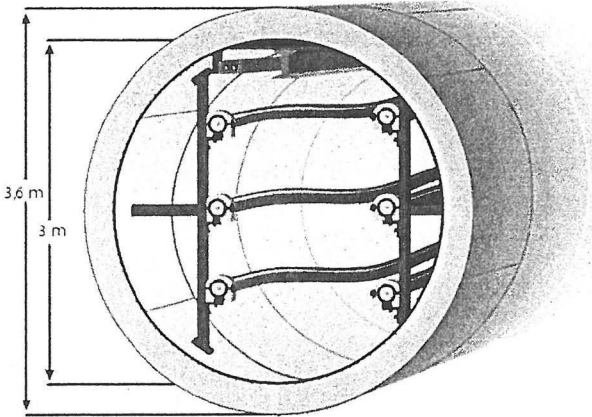


Bild 2

Querschnitt Tunnel

Als mögliche Übertragungstechnik für den ersten 6,3 km langen Tunnelabschnitt zwischen den Umspannwerken Mitte und Friedrichshain stand zunächst nur die Ölkabeltechnik mit mehr als 20 Jahren guter Betriebserfahrung zur Verfügung. Die ebenso verfügbare Rohrleitertechnik mit 100% SF₆ Isoliergas schied wegen der großen Menge an SF₆ aus genehmigungstechnischen Gründen aus.

Die Überprüfung der Einsatzfähigkeit von kunststoffisolierten 400-kV-VPE-Kabeln als Alternative zur Ölkabeltechnik war zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

Für den 110-kV-Spannungsbereich weisen Kunststoffkabel aus vernetztem Polyethylen (VPE) ähnlich geringe Ausfallraten wie die Ölkabel auf. Von der Kabelindustrie wurde daher in Anlehnung an die seit Jahren bewährten Herstellungsverfahren im 110-kV-Bereich die Entwicklung der Kunststoffkabel für die 400-kV-Spannungsebene und der dazugehörigen Garnituren erfolgreich vorangetrieben.

Der Einsatz von Kunststoffkabeln bringt aus Sicht der Bewag wesentliche Vorteile. Aus umwelttechnischen Gesichtspunkten sind feststoffisolierte Kabel den Ölkabeln vorzuziehen. Die Aufwendungen für die erforderlichen Sekundäranlagen, wie beispielsweise die Öldruckhaltung und -überwachung werden geringer bzw. können ganz entfallen. Die dielektrischen Verluste von kunststoffisolierten Kabeln betragen ungefähr nur 25% der lastunabhängigen Verluste von Ölkabeln. Ebenso ist die für Kunststoffkabel notwendige Ladeleistung geringer.

Betriebserfahrungen mit 400-kV-Kunststoffkabeln und deren Garnituren lagen bisher nicht vor. Um eine Entscheidung über deren Einsatz bei der für die Versorgung Berlins sehr wichtigen Diagonale treffen zu können, wurde in enger Zusammenarbeit mit der Kabelindustrie festgelegt, Kabel und Garnituren in einem Langzeitversuch prüfen zu lassen. Die Voraussetzung zur Teilnahme war die erfolgreich durchgeführte Typprüfung an Kabel, Muffen und Endverschlüssen.

3.1 Erster Langzeitversuch

Das erste und wichtigste Ziel des Langzeitversuchs war der Nachweis der betrieblichen Einsatzfähigkeit von Kabeln, Feststoffmuffen und SF₆- bzw. Freiluftendverschlüssen. Hierbei sollten das dielektrische Alterungsverhalten und die thermomechanischen Eigenschaften entsprechend der betrieblichen Anforderungen geprüft werden.

Bewag-Prüfbedingungen für 400-kV-Kunststoffkabel:

Trassenlänge	120 m	
Heiz-/Abkühlzyklus	16 h / 32 h	
maximale Leitertemperatur	90°C	(Toleranz -0 K, +5 K)
Prüfspannung 50 Hz	400 kV	(70 % über Nennspannung 230 kV)
Versuchsdauer	8.760 h	(1 Jahr)
Schaltstoßspannung (250/2.500 µs)	950 kV	(5x positiv, 5x negativ)
Blitzstoßspannung (1,2/50 µs)	1.175 kV	(10x positiv, 10x negativ)

Bedingungen wurden in enger Anlehnung an die CIGRE-Empfehlung (September 1993) Qualifikationstests (CIGRE WG 21-03) festgelegt. Als Prüfinstitut wurde CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) in Mailand gewählt, weil es aus terminlicher und finanzieller Sicht in der Lage war, die anstehenden Aufgaben kurzfristig umzusetzen.

Spannung von 400 kV bildete über die Versuchsdauer von einem Jahr das Zeitklima einer Kabelanlage unter Nennspannung (230 kV) von ca. 50 Jahren nach. Thermomechanischen Belastungen erfolgten durch Heizströme, die induktiv über Heiztransformatoren aufgebracht wurden.

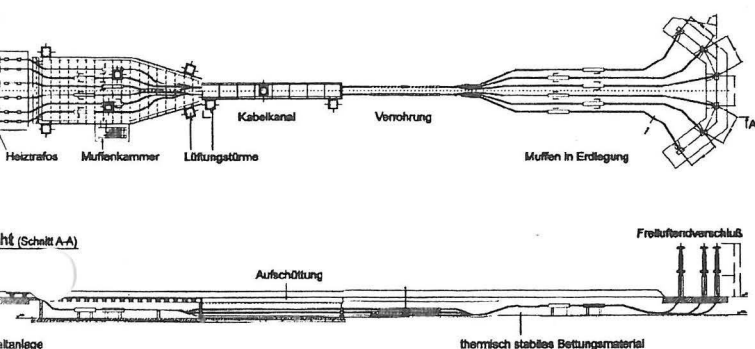


Bild 3

**Versuchsaufbau für
Landzeitversuch an
400-kV-VPE-Kabeln**

In der ersten Versuchsreihe beteiligten sich sechs Kabelhersteller. Die Versuchsanlage wurde am 6. September 1993 eingeschaltet. Zwischenzeitlich aufgetretene Fehler an den Verbindungen führten dazu, daß der Versuch bis zum April 1995 verlängert werden mußte. Es wurde festgestellt, daß die von verschiedenen Herstellern eingebauten Wickelmuffen nicht den Anforderungen standhielten. Am Ende konnte nur ein Kabelhersteller alle Prüfbedingungen erfüllen. Die hierbei eingesetzte Verbindungsmuffe bestand aus vorgefertigten und montierten Aufschiebeelementen.

weiter Langzeitversuch

Nach dem Abschluß des ersten Versuchs wurde eine zweite Versuchsreihe mit sechs Kabelherstellern aufgebaut und am 24. August 1995 in Betrieb genommen. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe, bei der nur ein Kabelhersteller eine vorgefertigte und geprüfte Verbindungsmuffe einsetzte, wurde nun von allen Versuchsteilnehmern die Verbindungsmuffentechnik verwendet. Bedingt durch zwischenzeitliche Versuchsunterbrechungen und kurzzeitige Reparaturphasen konnten fünf Kabelhersteller den Versuch im April 1997 erfolgreich beenden.

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe gaben der Bewag die Sicherheit, daß die VPE-Kabeltechnik eine sichere Alternative zur Ölkabeltechnik darstellt, und bestätigten den Entschluß, die 400-kV-Verbindung zwischen den Umspannwerken Mitte und Nord mit VPE-Kabeln zu realisieren.

Die erfolgreiche Inbetriebnahme der ersten 400-kV-VPE-Kabelverbindung im Netz der Be-triebsgesellschaft am 7. Dezember 1998.

te Übertragungsleitungen zeichnen sich gegenüber Kunststoffkabeln durch geringe Übertragungsverluste sowie eine geringere Ladeleistung und damit durch die Einsparung von Ladestromkompensationsspulen aus. Die lastunabhängigen Verluste sind vergleichbar gering.

Umweltschutztechnischen Gründen schieden mit 100 % SF₆-Gas isolierte Leitungen als Übertragungstechnik für die Verbindung UW Mitte nach UW Friedrichshain aus. Beim Umstieg auf SF₆ liegen aus dem Bereich der Schaltanlagen (GIS) jahrelange, sehr gute Erfahrungen vor. Beim Einsatz für eine Übertragungsstrecke von mehreren Kilometern ist die große Menge an SF₆, aufgrund der Relevanz für den Treibhauseffekt, ein umweltschutzrechtliches Problem dar. Um den Einsatz von gasisolierten Übertragungsleitungen zu erwägen, forderte die Bewag von den Herstellern einen SF₆-Isoliergas von < 20%.

Das sollte als Anreiz für die Weiterentwicklung der Technik mit einem Isoliergasgemisch und der dafür erforderlichen sekundärtechnischen Einrichtungen. Inzwischen ist die GIL-Technik soweit ausgereift, daß sie mit einem Isoliergasgemisch von mehr als 80% Stickstoff und einem SF₆-Anteil von unter 20% auskommt.

Die Schritte veranlaßten die Bewag, einen Dauerversuch mit gasisolierten Übertragungsleitungen, vergleichbar den 400-kV-VPE-Kabelversuchen, durchzuführen. Voraussetzung für Teilnahme an diesem Versuch war auch hier die erfolgreiche Durchführung der Prüfung aller Anlagenkomponenten.

Präqualifikationstest

Ziel des Präqualifikationstests war der Nachweis über die Einsatzfähigkeit im Bewag-Betrieb. Insbesondere sollten dabei die betriebliche Eignung der Anlagenkomponenten und die thermomechanischen Eigenschaften der Rohrleitungen getestet werden. Als Prüfinstitut wurde das IPH (Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik“ GmbH) in Berlin mit seinem neu errichteten Hochspannungsprüffeld gewählt.

Aufgrund des engen Terminplans stellte der Hersteller eine große Herausforderung an den GIL-Hersteller und an das Prüfinstitut dar. Um die GIL-Technik bei der Ausschreibung der Übertragungstechnik für die 400-kV-Verbindung zwischen den Hochspannungswerken Friedrichshain und Marzahn berücksichtigen zu können, mußte der Versuch innerhalb eines Jahres projektiert, aufgebaut und durchgeführt werden.

Die Festlegung der Prüfbedingungen erfolgte in Anlehnung an die IEC- und die FCD-Empfehlungen:

Bewag-Prüfbedingungen für Präqualifikationstest 400-kV-GIL:

Trassenlänge	ca. 70 m	
Heizzyklen	5 h Heizen	3.200 A (ohne Spannung)
	7 h Abkühlen	480 kV (ohne Strom)
Versuchsdauer	2.500 h	

als Inbetriebnahme-, Reparatur- und Abschlußprüfungen:

Wechselspannung (1 min)	630 kV	(gegen Erde)
Schaltstoßspannung (250/2500 μ s)	1.050 kV	(15x positiv, 15x negativ)
Blitzstoßspannung (1,2/50 μ s)	1.300 kV	(15x positiv, 15x negativ)
Wechselspannung + TE-Messung	480 kV	(24 h)

als Zwischenprüfung alle 480 h:

Schaltstoßspannung (250/2500 μ s)	1.000 kV	(15x positiv, 15x negativ)
---------------------------------------	----------	----------------------------

an allen Anlagenkomponenten:

separate Lichtbogenprüfungen	50 kAeff	(330 ms)
------------------------------	----------	----------

Die Zuschaltung des Prüfaufbaus erfolgte im April 1998. Alle zwischenzeitlichen Stoßspannungsprüfungen wie auch eine planmäßige Reparaturmaßnahme bei der der komplette Austausch eines ca. 2 m langen GIL-Teilstücks (Mantelrohr und Leiter) im Tunnel demonstriert werden mußte, verliefen ohne Probleme. Der Versuch wurde am 25.09.1998 erfolgreich abgeschlossen.

4.2 Entscheidung zur Übertragungstechnik

Bezüglich der Übertragungstechnik standen nun die beiden Kabeltechniken Öl und Kunststoff sowie auch die neu präqualifizierte GIL-Technik zur Verfügung. Bei der Gestaltung der Schächte und des Tunnels wurde die Einsatzmöglichkeit für alle drei Übertragungstechniken berücksichtigt, damit alle drei Übertragungstechniken technisch vergleichbar waren. Die Entscheidung fiel letztendlich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu Gunsten der Kunststoffkabeltechnik.

Mit den Kabellege- und Montagearbeiten wurde nach Abschluß der Tiefbauarbeiten im Juli 1999 begonnen.

5 Vergleich der Übertragungstechniken

Für die Legung und Montage in einem unterirdischen Tunnelbauwerk wurden folgende 400-kV-Übertragungstechniken in Erwägung gezogen:

- Ölkabel: NÖKLD2Y 1x 2000 RM 22H 230/400 kV
- VPE-Kabel: 2XS(FL)2Y 1x 1600 RMS / 250 230/400 kV
- GIL: Leiterrohr 5.341 mm² / Mantelrohr 16.022 mm² Al-Legierung

Die Angaben für die lastabhängigen Verluste gelten für eine geforderte Nennübertragungsleistung von 1.100 MVA. Die Schirmverluste der Kabel wurden durch Cross-Bonding optimiert.

Angaben in [kW / km]	Ölkabel (Cross-Bonding)	VPE-Kabel (Cross-Bonding)	GIL
lastunabhängige (dielektrische) Verluste	ca. 40	5 .. 10	≈ 0
lastabhängige Verluste (Leiter- und Schirm- bzw. Mantelverluste)	ca. 110	ca. 125	ca. 85

Die dielektrischen, lastunabhängigen Verluste hängen wesentlich vom verwendeten Isoliermedium ab. Sie sind bei der GIL vernachlässigbar gering.

Die lastabhängigen Verluste sind näherungsweise proportional zum Quadrat des Laststromes und hängen vom Leiterquerschnitt und der Leiteranordnung ab. Aufgrund des größeren Leiterquerschnitts besitzen das Ölkabelsystem und insbesondere das GIL-System deutlich geringere Leiterverluste als das VPE-Kabelsystem. Bild 4 zeigt die Übertragungsverluste in Abhängigkeit von der Übertragungsleistung für die drei 400-kV- Übertragungstechniken bezogen auf das Ölkabelsystem.

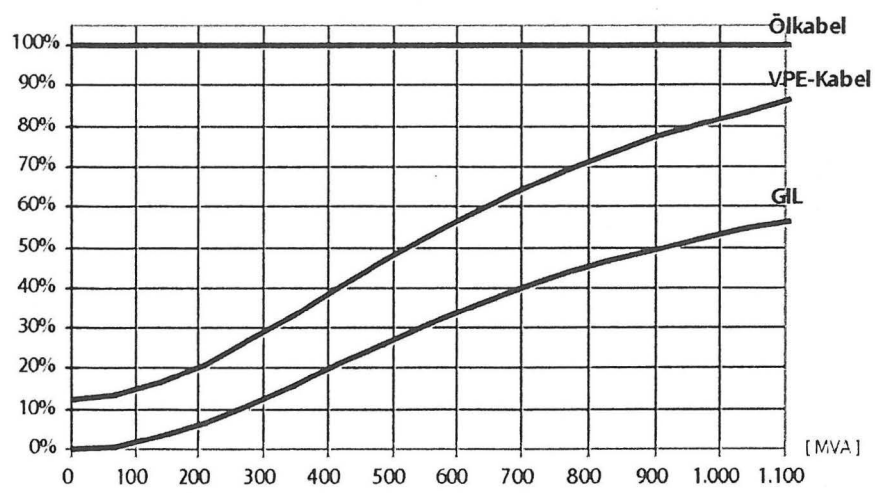


Bild 4
Vergleich Übertragungsverluste der 400-kV-Übertragungstechniken bezogen auf Ölkabel

Die folgende Tabelle zeigt Richtwerte für die Größenordnung der induktiven und kapazitiven Leitungsbeläge. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Ladeleistung (proportional zum kapazitiven Leitungsbelag C_b') bei der GIL deutlich geringer ist als beim Kabel. Das bedeu-

tet, daß je nach Netzform der Aufwand für Ladestromkompensationsspulen beim Einsatz von GIL reduziert werden kann.

Die natürliche Übertragungsleistung ist proportional zum Wellenwiderstand. Hier zeigt es sich, daß die GIL ähnliche Werte aufweist wie ein VPE-Kabel und damit auch eine vergleichbare natürliche Übertragungsleistung besitzt.

	Ölkabel (Cross-Bonding)	VPE-Kabel (Cross-Bonding)	GIL
Induktiver Leitungsbelag L_b' in [mH/km]	0,68	0,73	0,22
Kapazitiver Leitungsbelag C_b' in [μ F/km]	0,27	0,18	0,05
Widerstandsbelag R' in [m Ω /km]	19	23	10
Wellenwiderstand Z in [Ω] mit $Z^2 = L_b' / C_b'$	50	64	66

Werden nur die reinen Anlagenkosten (ohne Betriebskosten) betrachtet, zeigt es sich, daß für niedrigere Übertragungsleistungen ein natürlich gekühltes Kabelsystem geringere Anlagenkosten aufweist, wie ein vergleichbares GIL-System. Eine höhere Übertragungsleistung läßt sich bei einer Kabelanlage nur noch durch Zwangskühlung bzw. ein zweites Parallelsystem realisieren. Damit steigen auch die spezifischen Anlagenkosten. Bild 5 zeigt diesen Zusammenhang in einer schematischen Prinzipdarstellung. Ein natürlich gekühltes GIL-System besitzt bei höheren Übertragungsleistungen geringere Anlagenkosten als eine vergleichbare Kabelanlage.

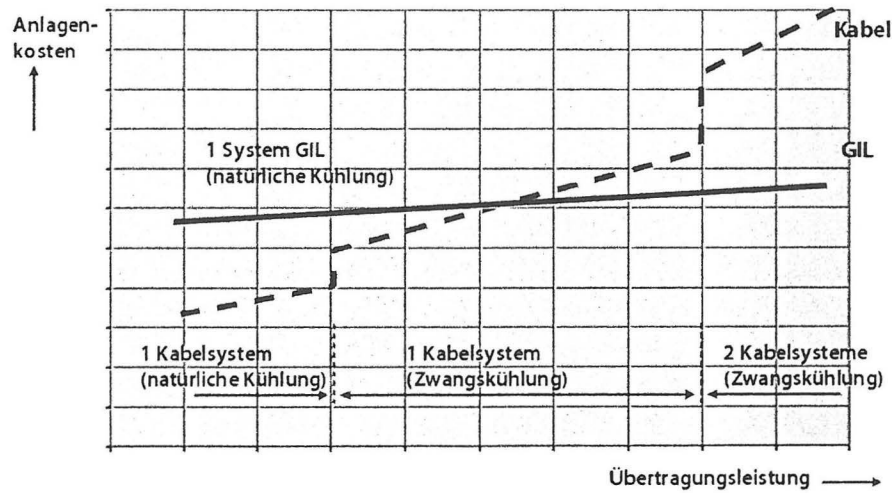


Bild 5
Schematische Prinzipdarstellung
Vergleich der Anlagenkosten von Kabel und GIL

Wenn es darum geht, eine Freileitungsverbindung mit hoher Übertragungsleistung in unterirdischer Bauweise zu ersetzen, kann die GIL aufgrund der Betriebseigenschaften und der Anlagenkosten eine Alternative zur Kabeltechnik darstellen. Bei geringeren Übertragungsleistungen müssen die verschiedenen 400-kV-Übertragungstechniken im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung gegenübergestellt werden.