

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	73 (1982)
Heft:	24
Artikel:	Energieübertragung und Kabeltechnik
Autor:	Fischer, M.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905045

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Energieübertragung und Kabeltechnik

Von M. Fischer

Die technischen und betrieblichen Eigenschaften der einzelnen Übertragungseinrichtungen (Freileitung, Kabel, Rohrleiter) werden dargestellt und darauf aufbauend verschiedene Aspekte der Planung, des Baues, des Betriebes und des Unterhaltes elektrischer Übertragungsnetze behandelt. Zusammenfassend werden die Möglichkeiten und Grenzen der Kabeltechnik abgesteckt und die Anforderungen aus der Sicht des Betreibers elektrischer Netze formuliert.

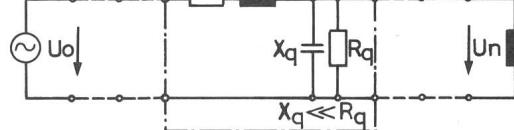
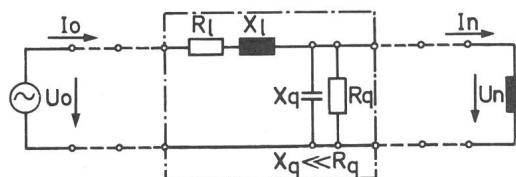
1. Die technischen Eigenschaften der Übertragungsleitungen

Die typischen Übertragungseinrichtungen, die Freileitungen, die verschiedenenartigen Kabel und die Rohrleiter besitzen aufgrund ihres Aufbaus sehr unterschiedliche technische Eigenschaften, die zunächst etwas ausführlicher und in bezug auf die Leistungsübertragung im stationären Betrieb dargestellt werden.

Allen Übertragungseinrichtungen gemeinsam ist das Vierpolersatzschema des Kettenleiters, mit Längswiderstand und Längsinduktivität, beide vom Leiterstrom durchflossen, sowie mit einer Querkapazität und einem Querwiderstand, welche an der Spannung liegen.

Für Freileitungen im Bereich von 60...380 kV und mit üblicher Auslegung der Leiterseile und Mastkonfigurationen ist im Ersatzschema mit spezifischen Impedanzwerten gemäss Figur 1 zu rechnen.

Der Längswiderstand stellt die ohmschen und die Zusatzverluste der Leiter dar. Bei üblichen Betriebsströmen von 500...2000 A kann die Verlustleistung von etwa 50...100 W pro Meter, auch bei hohen Umgebungstemperaturen, problemlos an die Luft abgegeben werden. Die wegen grosser Leiterabstände verhältnismässig hohe Längsreaktanz ist



Freileitungen	E			
	60 kV	150 kV	220 kV	380 kV
d/r	250	400	120	100
Z_w	340	370	300	280
R_l	0,08	0,08	0,06	0,03
X_l	0,34	0,39	0,32	0,30
C_q	10,0	9,4	11,6	12,1
P_{nat}	11	65	180	570
S_n	83	210	480	1350
Q_c	0,01	0,07	0,2	0,6
				Mvar/km

Fig. 1 Typische elektrische Werte für Freileitungen

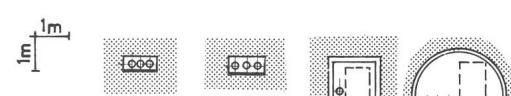
Cet article présente les caractéristiques techniques et d'exploitation des divers dispositifs de transmission (lignes aériennes, câble, conduite) et, dans ce contexte, divers aspects concernant la planification, la construction, l'exploitation et l'entretien des réseaux de transmission. En résumé, on fixe les possibilités et les limites de la technique des câbles et l'on formule les exigences exprimées de la part de l'exploitation de réseaux électriques.

im wesentlichen für den Spannungsabfall verantwortlich und führt bei den in der Schweiz üblichen Leitungslängen zu noch tragbar engen Betriebsspannungsbereichen und genügender Kurzschlussdämpfung.

Grosse Leiter- und Erdabstände ergeben bei Freileitungen auch mässige Werte für die Querkapazität. Erst Betriebsspannungen von 380 kV können bei Leerlaufbetrieb von Freileitungen den Blindleistungshaushalt erschweren. Korona und Ableitströme entlang den Isolatoren bestimmen den sehr grossen Querwiderstand.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den verschiedenen Kabeltypen.

Die im Ersatzschema in Fig. 1 und 2 dargestellten Längs- und Querwiderstände entsprechen den Leiter- und Mantelverlusten bzw. der im Dielektrikum entstehenden Wärme. Diese Wärme muss insgesamt über ein komplexes dreidimensionales Strömungsfeld im Erdreich ebenfalls an die Umgebungsluft oder an ein zweckmässig angeordnetes Kühlssystem mit forciertter Kühlung abgegeben werden. Zur Bestimmung dieser Verluste ist der maximale Belastungsstrom massgebend. Gelegentlich wird vorgeschlagen, für die Berechnung der Verluste die von den Verbrauchern mo-



Kabel	60 kV	150 kV	220 kV	380 kV
d/r	13	15	15	16
Z_w	42	43	44	50
R_l	0,04	0,04	0,02	0,02
X_l	0,18	0,19	0,19	0,19
C	330	320	310	240
P_{nat}	86	560	1200	3200
S_n	83	210	480	830
Q_c	0,4	2,4	5,2	12
				Mvar/km

Fig. 2 Typische elektrische Werte für Kabelleitungen (hohe Übertragungsleistung)

dulierte Belastung, die sogenannte EVU-Last, zu berücksichtigen. Abgesehen davon, dass die Berechnung des Temperaturfeldes durch das Hinzufügen der vierten Dimension noch schwieriger wird, scheint dieses Verfahren bei Übertragungsleitungen kaum zulässig und auch im eigentlichen Verteilnetz nur beschränkt anwendbar, wenn der Einsatz der Produktionsanlagen bzw. die Entwicklung der Laststruktur nicht von vornherein präjudiziert werden soll. So könnte z. B. ein für EVU-Last ausgelegtes Netz im Extremfall später keine zusätzliche Nachtbelastung für Heizzwecke aufnehmen.

Die zulässigen Temperaturen sind je nach Kabelkonstruktion, Anordnung des Kabels oder Kühlungsart recht verschieden und im allgemeinen niedriger als für Freileitungsseile. Kabelleitungen erfordern daher stärkere Leiterquerschnitte als Freileitungen gleicher Übertragungskapazität. Dies erklärt den kleinen spezifischen Längswiderstand im Ersatzschema.

Aber auch die Längsreaktanz ist klein, entsprechend der geringen Dimension der massgebenden Stromschlaufen. Diese für die Spannungshaltung im Netz günstigsten Eigenschaften des Kabels haben aber auch wesentliche Nachteile in bezug auf die Begrenzung der Kurzschlussleistung der Netze.

Am augenfälligsten ist im Ersatzschema der Kabelleitung (Fig. 2) jedoch die beträchtliche Querkapazität. Dafür verantwortlich sind die hohe Dielektrizitätskonstante sowie die hohe Feldstärke, welche beim Abbau der Spannung über die kurze Isolationsstrecke entsteht. Kabelleitungen ergeben bereits bei kurzen Leitungslängen grosse Blindleistungsüberschüsse, welche bei Leerlauf die Blindleistungsbilanz ungünstig beeinflussen können. Zudem wird vielfach übersehen, dass die grosse Leerlaufstromaufnahme des Kabelvierpols dessen Übertragungskapazität für Wirkleistung bereits bei verhältnismässig kurzen Leitungslängen stark einschränkt (Fig. 3).

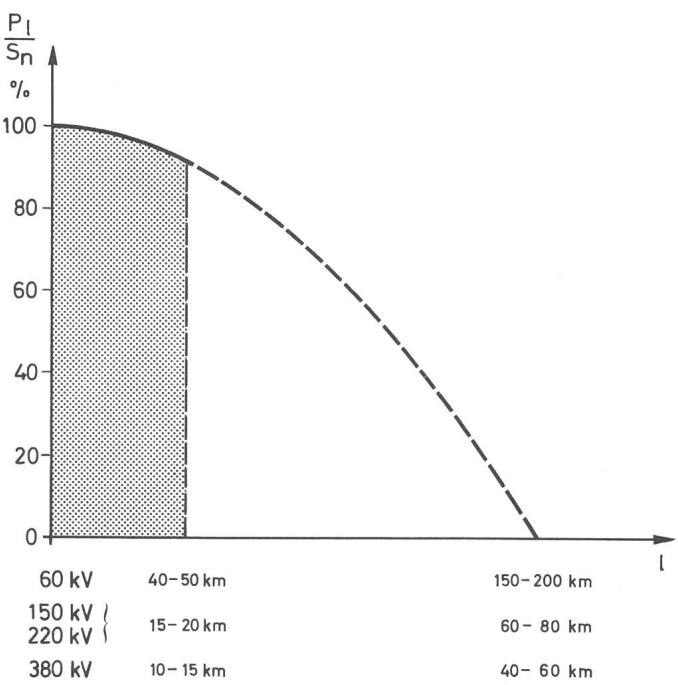


Fig. 3 Kabel-Transportleistung in Funktion der Leitungslänge

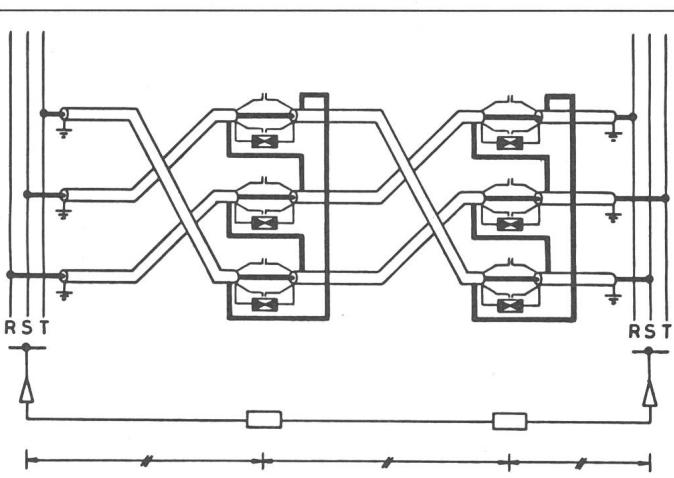


Fig. 4 Kabelleitung mit ausgekreuzten Mänteln (cross bonding) und Phasenleitern

So wäre ein 150-kV-Kabel von etwa 70 km Länge durch die eigene Blindstromabgabe bereits voll ausgelastet, und ein typisches 380-kV-Kabel könnte bei einer Länge von etwa 40 km keine Wirkleistung mehr übertragen.

Im Ersatzschema der Rohrleiter liegen die Impedanzwerte zwischen denjenigen der Freileitung und der Kabelleitung, wobei insbesondere die Querkapazität weniger ins Gewicht fällt als bei Kabelleitungen infolge kleinerer Feldstärke und tieferer Dielektrizitätskonstante.

Eine Besonderheit der Kabelleitungen bildet der metallische Kabelmantel. Dieser für die thermische Kurzschlussbeanspruchung ausgelegte Leiter ist eine willkommene Hilfe bei der Lösung der Erdungsprobleme in den angeschlossenen Anlagen. In älteren Anlagen sind die Kabelmäntel jeder Phase an beiden Enden fest geerdet. Neuere Kabelanlagen sind mit Crossbonding ausgeführt: ein System, welches mittels zyklischer Vertauschung der Mantelabschnitte auf die drei Phasen die induzierten Spannungen etwa ausgleicht und im Normalbetrieb das Fliessen eines Mantelstromes praktisch unterdrückt (Fig. 4).

Bei dynamischer Beanspruchung können an den Kreuzungsstellen Überspannungen entstehen, welche durch den Einbau von Ableitern begrenzt werden müssen.

2. Der Bau und die Betriebseigenschaften der Übertragungseinrichtungen

Wesentliche Unterschiede in der Beurteilung der Freileitungs- und Kabeltechnik ergeben sich, immer aus der Sicht des Betreibers, auch bezüglich des Baues, des Unterhaltes und der Störungsbehebung.

Der Freileitungsbau stützt sich auf eine jahrzehntelange Tradition. Die technischen und personellen Voraussetzungen für die Lösung der anfallenden Bau- und Unterhaltsprobleme sind erfüllt. Die Anforderungen und Belastungen, welchen Freileitungen genügen müssen, sind bekannt.

Wie in anderen Bereichen der Technik steht auch im Freileitungsbau die Entwicklung nicht still, und es werden dauernd Anstrengungen unternommen, durch Verbesserung der Mastkonstruktion, der Isolationsanordnung und des Schwingungsverhaltens der Leiterbündel möglichst

normales Leiterbild

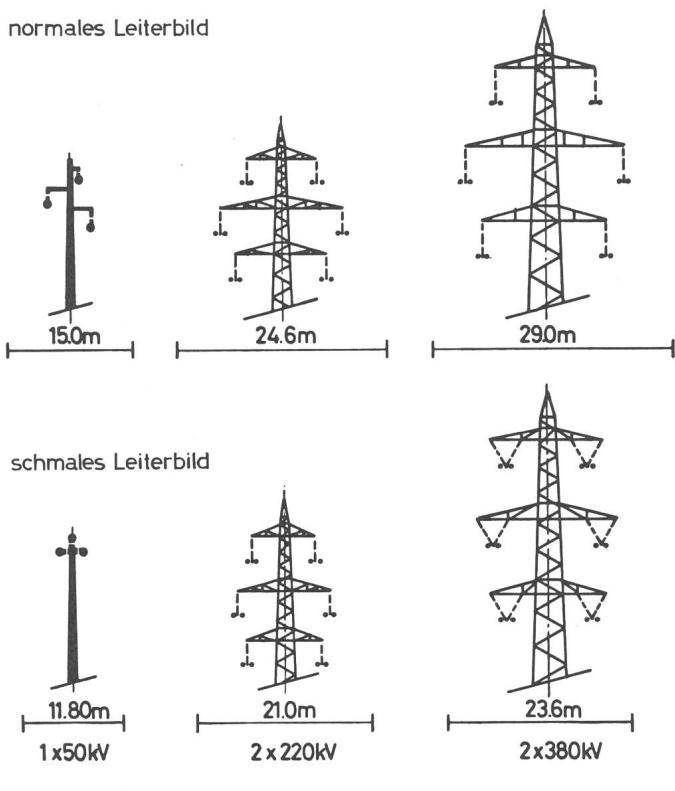


Fig. 5 Trassebreiten von Freileitungen

kompakte Leitungstrassees zu verwirklichen (Fig. 5). Mit Ausnahme der Störungsfälle, welche durch Naturkatastrophen wie Lawinen und Erdrutsche oder willentlich durch Sabotage ausgelöst werden, sind Defekte an Freileitungen erfahrungsgemäss rasch geortet und repariert, die Ausfallzeit entsprechend kurz.

Auch die Kabeltechnik kann sich auf eine lange Praxis berufen. Allerdings, und das muss mit aller Deutlichkeit gesagt werden, beruht diese Technik in der Schweiz hauptsächlich auf den Erfahrungen im Bereich der Spannungen zwischen 50 und 150 kV, und sie umfasst, sowohl was die Länge der einzelnen Strecke betrifft als auch bezüglich der gesamten verlegten Kabellänge, einen recht bescheidenen Anteil im Vergleich zu den Freileitungen im Höchstspannungsnetz (s. auch Tabelle I).

Hochspannungsleitungen in der Schweiz 1979 (VSE)

Tabelle I

Stranglängen	Total	Freileitungen	Kabel
60 kV	5300 km	90%	10%
110...170 kV	3000 km	95%	5%
220 kV	6500 km	99,3%	0,7%
380 kV	1300 km	100%	-

Hochspannungskabel sind früher als Öl-, Masse- oder Gaskabel mit Bleimantel versehen und in vorgeschriebener Tiefe in Kabelsteine verlegt worden. Solche Anordnungen sind heute noch in Betrieb. Schwierigkeiten bereiten bei diesen z. T. noch mit Jute umhüllten Bleimantelkabeln die Korrosion und die Rissbildung am Mantel bei gewissen ungeeigneten Legierungen. Der Dilatation der belasteten Ka-

bel wurde anfänglich zu wenig Beachtung geschenkt. Durch die mechanische Belastung der Lötstellen am Übergang zu den Muffen entstanden verschiedentlich Leckstellen, die mühsam gesucht und repariert werden mussten.

Kabelleitungen werden vorzugsweise im Bereich des öffentlichen Grundes, also in Strassen, Wegen und Gehwegen, verlegt. Mit zunehmender Belastung des öffentlichen Grundes durch den privaten und öffentlichen Verkehr wurde die Verlegung in Kabelsteine – ein Verfahren, welches die Offenhaltung des Kabelgrabens über längere Zeitschnitte erfordert – immer ungeeigneter. Es wurden daher Verlegemethoden gesucht, die eine raschere Wiederinstandstellung der Verkehrsflächen ermöglichen. In Zürich wurde die Verlegung in Rohrblöcken weiterentwickelt und gefördert, andere Städte entschieden sich für das Aussendruckkabel.

Beide Methoden gehen davon aus, im abschnittsweise kurzzeitig geöffneten Graben ein oder mehrere Rohre einzulegen, die in geeigneter Weise miteinander verbunden, schliesslich durchgehende Kanäle von Muffenschacht zu Muffenschacht ergeben, in welche dann im geeigneten Zeitpunkt und unabhängig vom Bauvorgang die Kabel eingezogen werden können (Fig. 6).

Bis zu Leiterquerschnitten von 300...400 mm² gewährleisten Rohrblöcke mit geeignetem Rohrdurchmesser eine genügende Bewegungsfreiheit für die Dehnung des Kabels bei Belastungsänderungen. Dicke und steifere Kabel, also insbesondere solche für 220-kV-Verbindungen, müssen, wie bestehende Ausführungen in Spreitenbach zeigen, in geeigneten Abständen so aufgehängt werden, dass die Dehnung abschnittsweise durch Verlängerung der Seilkurve aufgenommen werden kann. Diese Befestigungsart bedingt begehbarer Kanäle.

Diese Verlegemethode findet verständlicherweise in der Öffentlichkeit breiteste Zustimmung. Die Idee wurde weiterentwickelt und der bergmännische Vortrieb eines

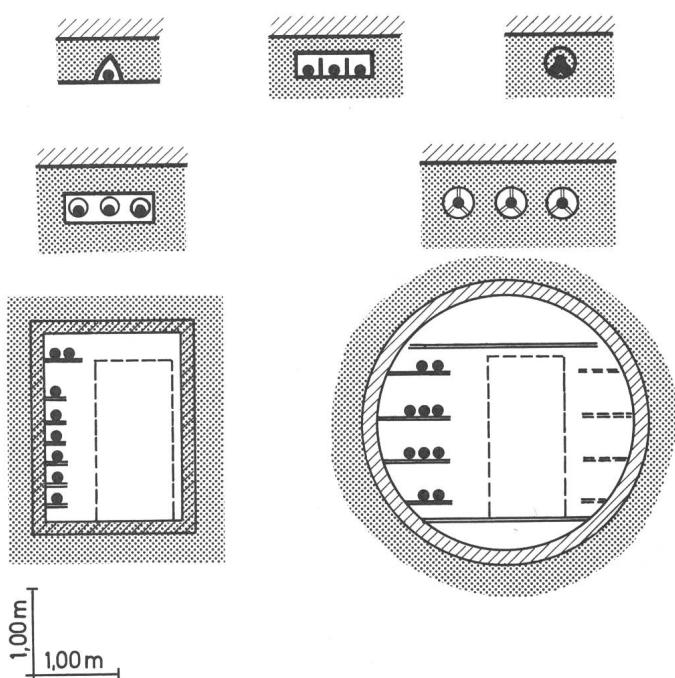


Fig. 6 Kabelverlegungarten (Beispiele)

Tunnels bereits für eine innerstädtische 150-kV-Verbindung mehrerer Kilometer Länge vorgeschlagen. Solche Lösungen können durchaus sinnvoll sein. Gute Beispiele sind der vor wenigen Monaten in der Presse stark beachtete Kabelstollen in Lugano oder die Kabelstollen der Maggia-Kraftwerke und im Pumpspeicherwerk Oberaar-Grimsel. Die Popularisierung dieser Technik ist trotzdem nicht ungefährlich. Sie leistet der weitverbreiteten Auffassung Vorschub, Wachstum und Ausbau der Infrastruktur seien ohne Immisionen möglich. Die genaue Prüfung der Bauvorgänge zeigt, dass dies meistens nicht stimmt, sondern in Wirklichkeit die Immissionen des Bauvorganges nur unter grossem Kostenaufwand verlagert werden.

Das Höchstspannungskabel heutiger Ausführung ist in ganz besonderem Masse das Resultat enger Zusammenarbeit zwischen den Fabrikanten und den Betreibern der elektrischen Netze. Die Fabrikanten haben es verstanden, und dies scheint doch erwähnenswert, immer rechtzeitig Lösungen für die Probleme und Sorgen der Kabelbetreiber bereitzustellen. So wurden aufgrund der Schwierigkeiten mit den Bleimantelkabeln verschiedene Varianten metallischer Kabelumhüllungen entwickelt und neuerdings, als Antwort auf die Forderungen eines bezüglich des Öleinsatzes sehr weitgehenden Gewässerschutzgesetzes, der Anwendungsbereich des Kunststoffkabels für höhere Betriebsspannungen erweitert. Auch dem Zubehör wurde die nötige Beachtung geschenkt, und neueste Entwicklungen, wie vorfabrizierte Isolationen für Endverschlüsse oder vulkanisierte Kabelverbindungen für Muffen, dürften in naher Zukunft die heikelsten Arbeiten am Montageort wesentlich vereinfachen.

Zur Diskussion der Betriebseigenschaften einer Energieübertragungsanlage gehört auch die Beurteilung der Störanfälligkeit und der Reparaturfreundlichkeit. Beide Kriterien zusammen bestimmen die Zuverlässigkeit des Betriebsmittels. Wie schon erwähnt, ist die Zuverlässigkeit der Freileitung vorzüglich.

Auch Kabelleitungen weisen, wie die spärlich vorhandenen statistischen Unterlagen zeigen, wenig Störungen auf. So hat sich tatsächlich in rund 30 Jahren im heute gegen 47 km langen 150-kV-Kabelnetz der Stadt Zürich noch kein einziger Kurzschluss ereignet. Wenn trotzdem, vielleicht rein gefühlsmässig, bei den Betriebsleuten die Zuverlässigkeit der Kabelleitung deutlich schlechter als jene der Freileitung eingeschätzt wird, so sind dafür unangenehme Erfahrungen verantwortlich, die an einigen Beispielen erläutert werden sollen.

Die schlechtesten Erfahrungen stehen in Zusammenhang mit den bereits erwähnten Bleimantelrissen. Eine derartige Störung wird aus der Tatsache erkennbar, dass zur Aufrechterhaltung des Druckes in den Expansionsgefässen Isolieröl nachgefüllt werden muss. Übersteigt die Nachfüllmenge einen bestimmten Betrag, was je nach Grösse der Leckage nach Tagen, Wochen oder Monaten der Fall sein kann, muss mit der Suche des Defektes begonnen werden. Dieses, an das Einschiessen der Artillerie erinnernde Verfahren, welches in den Strassen und Plätzen entlang dem Kabeltrasse ebenso viele Sondiergräben wie das Einschiesen bei schlechter Feuerleitung benötigt und erfahrungsge-mäss im verkehrstechnisch ungünstigsten Zeitpunkt an Weihnachten oder während der Sommerferien stattfindet, soll hier nicht näher erläutert werden.

Ein weiterer bedeutender Unsicherheitsfaktor ergibt sich bei der Kabelleitung, im Gegensatz zur weitverbreiteten Auffassung, gerade wegen der unsichtbaren, schwer zugänglichen und unbeweglichen Verlegung im Untergrund. Dieser Untergrund als Träger der gesamten Infrastruktur einer modernen Stadt unterliegt einem dauernden Wandel. Unzählige über die ganze Stadt verteilte Baustellen privater und öffentlicher Institutionen tangieren meistens auch das Kabelnetz. Dies erfordert selbstverständlich einen arbeitsintensiven engen Kontakt mit allen an den Bauten beteiligten Instanzen. Trotzdem vermag das ausgeklügelte Informations- und Meldesystem nicht zu verhindern, dass Kabelleitungen aus Sicherheitsgründen während Monaten ausgeschaltet werden müssen, dass Kabelleitungen immer wieder durch Baumaschinen aus dem Trasse herausgerissen oder mit Sondierstangen und Bohrern beschädigt werden. Solchen Einwirkungen sind Kabel übrigens bei allen Verlegungsarten, sogar in begehbarer Kanälen, ausgesetzt.

Auch die chemischen und mechanischen Eigenschaften des Untergrundes sind im Stadtbereich nicht über alle Zweifel erhaben. Besonders gefährdet sind ältere Bleimantelkabel ohne Kunststoffumhüllung, die auch häufig zu Störungen Anlass geben. Im Rohrblock verlegte Kabel sind diesbezüglich viel besser geschützt. Kopfzerbrechen bereitet auch die Festlegung der für die Belastbarkeit des Kabels massgebenden Wärmeleitfähigkeit des Bodens, wenn man bedenkt, wie oft im Laufe der Jahre und in unmittelbarer Nähe der Leitungen der Untergrund für alle möglichen Vorhaben aufgerissen und wieder aufgefüllt wird.

Schliesslich ist auch der Ersatz der bewährten Papier-Öl-Isolation durch neue Kunststoffisolationen skeptisch zu beurteilen, nicht zuletzt im Hinblick auf die erforderliche lange Lebensdauer der Kabel von 40 bis 50 Jahren.

3. Kabel und Freileitung im Übertragungsnetz

Die elektrische Energieversorgung ist, obschon das System kaum zu Beanstandungen Anlass gibt, ein recht komplexer Regelkreis. Die Übertragungseinrichtungen sind wichtige Bestandteile dieses Regelkreises, und es lohnt sich, kurz auf dieses Thema einzugehen.

Bezeichnet man die Gesamtheit der z. B. an einem 150/11-kV-Unterwerk angeschlossenen Abonnenten als Konsumstelle, so hat der Regelkreis die Aufgabe, eine Vielzahl örtlich verteilter Konsumstellen veränderlicher Lastimpedanz, bei einer festen Frequenz von etwa 50 Hz und innerhalb eines bestimmten Spannungsbereiches, jederzeit zu versorgen. Dies geschieht durch den Einsatz der örtlich ebenfalls gestreuten Wirk- und Blindleistungsquellen sowie durch Veränderung der Übersetzungsverhältnisse an geeigneten Transformatoren. Kraftwerke und Konsumstellen als Knotenpunkte sind netzartig mittels Übertragungseinrichtungen verbunden, wobei jedes Strahlelement durch einen von der tatsächlichen Streckenlänge abhängigen Er-satzvierpol dargestellt werden kann.

Die Belastung jedes Netzelementes wird durch die maximal zulässigen Betriebs- und Kurzschlussströme begrenzt, und der Regelkreis sollte funktionsfähig bleiben, wenn einzelne Elemente nur teilweise verfügbar sind oder ganz ausfallen.

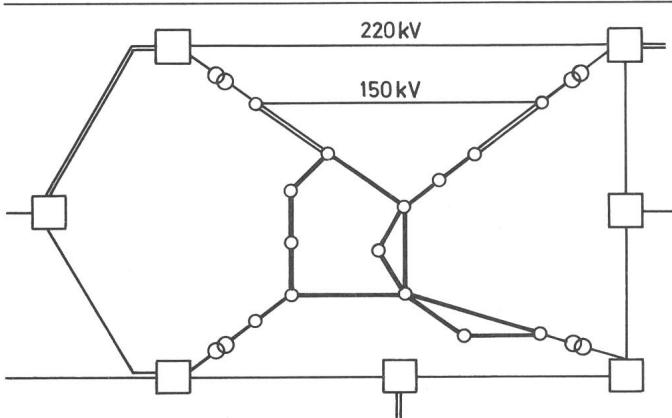


Fig. 7a 150-kV-Netz voll vermascht

Wenn man an den grossen Rechenaufwand zurückdenkt, der zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines einfachen Vierpols erforderlich ist, oder an die mühsame Handhabung früherer Netzmodelle, so erstaunt es tatsächlich, dass betriebsfähige elektrische Netze noch vor der Einführung der Rechner überhaupt ausgebaut werden konnten.

Anhand der Netzstruktur lassen sich gewisse wesentliche Schlussfolgerungen ableiten, die im folgenden als Thesen aufgezählt werden.

These 1: Kabelnetze erfordern eine stärkere Verknüpfung, d. h. mehr Leitungsstränge als Freileitungsnetze.

Dieser These entsprechend werden in Zürich neue Unterwerke in Kabelnetzen mit mindestens drei bis vier Zuleitungen in das Netz eingefügt, im Gegensatz zu den üblichen ein bis zwei Zuleitungen in Freileitungsnetzen.

These 2: Kabel und Freileitungen sollten in zusammenhängenden Netzen nicht nebeneinander vorgesehen werden.

Die Figuren 7a und 7b zeigen, wie das in Zürich heute noch parallel zum 220-kV-Freileitungsnetz durchgeschaltete 150-kV-Netz zukünftig in unabhängige Sektoren aufgeteilt werden wird.

These 3: Die nutzbare Übertragungskapazität eines Netzes bei gleicher zulässiger Kurzschlussleistung ist bei Kabelausführung geringer als mit Freileitungen.

These 4: Die für Kabelnetze erforderliche Kompensationsleistung ist wesentlich grösser als für Freileitungsnetze gleicher Übertragungskapazität. Die Spannungshaltung in Kabelnetzen ist schwieriger und erfordert kostspielige Kompensationseinrichtungen.

These 5: Der Wiederaufbau zusammengebrochener Kabelnetze als Folge des hohen Blindleistungsüberschusses ist wesentlich schwieriger als in Freileitungsnetzen. Der Beweis wird von Zeit zu Zeit in Manhattan dramatisch vorgeführt.

An dieser Stelle muss allerdings auf einen wesentlichen Einwand gegen die Schlussfolgerungen dieses Berichtes eingegangen werden. Er ist begründet in der bekannten Tatsache, dass die Übertragungseigenschaften eines Vierpols durch Hinzufügen geeigneter Impedanzen verändert werden können. Wenn jedoch die Leistung der erforderlichen Filter und die zusätzlich notwendigen Schalt- und Schutzeinrichtungen für deren Anschluss in Betracht gezogen werden, ist sofort zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit solcherart pupinisierter Kabelleitungen weiter verschlechtert und die Anlagekosten beträchtlich ansteigen würden.

4. Planungsfragen und Rechtserwerb beim Bau von Übertragungsleitungen

Die Leitungsführung von Freileitungen kann in unserem meist coupierten Gelände recht gut in die Topographie eingepasst werden. Durch Überspannung der Wälder werden heute unschöne Waldschneisen weitgehend vermieden. Die unter bestimmten Voraussetzungen statthafte Überspannung von Gebäuden erleichtert die Überwindung von Engpässen im Bereich von Siedlungen.

Trotz all dieser Erleichterungen wird es immer schwieriger, die Genehmigung selbst für Leitungsumbauten auf bereits bestehenden Trassen zu erhalten. Nur noch in seltenen Fällen wagen es die Elektrizitätswerke, Projekte für neue Freileitungen in der Öffentlichkeit vorzustellen.

Die Baubewilligung und der Erwerb der Durchleitungsrechte können im mehrstufigen Verfahren immer wieder angefochten werden, und die Auseinandersetzung endet oftmals vor dem Bundesgericht. Der Zeitbedarf für die Erstellung geplanter Freileitungen beansprucht stets mehrere Jahre.

Im Gegensatz zu den Freileitungen muss bei Kabelleitungen das Trassee weniger der Topographie des Geländes, sondern primär der Nutzungsart des durchquerten Gebietes angepasst werden. Kabelleitungen sind bedeutende Bauhindernisse, die, wenn überhaupt, nur mit grossen Kosten später noch angepasst werden können. Privater Grundbesitz wird daher möglichst gemieden und die Leitungsführung vorzugsweise im öffentlichen Grund geplant, auch wenn dieser – es handelt sich um Strassen, Wege und Gehwege – keine optimale Linienführung erlaubt und durch andere Infrastrukturanlagen meistens schon hoffnungslos belastet ist.

Diese Planungs- und Koordinationsaufgabe ist bereits sehr anspruchsvoll, wenn das Elektrizitätswerk, wie in Zürich, ein Teil der Gemeindeverwaltung ist.

Es ist aber leicht zu ermessen, welche Schwierigkeiten entstehen, wenn dieselbe Aufgabe mit unzähligen Gemein-

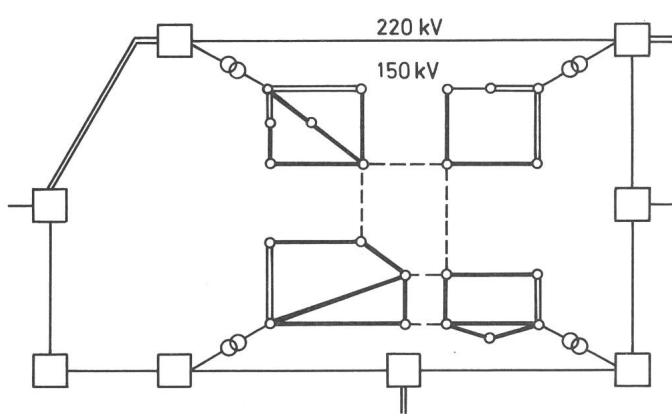


Fig. 7b 150-kV-Netz aufgetrennt

deverwaltungen gelöst werden muss, die in der politisch feinstrukturierten Schweiz bei jeder längeren Kabelleitung automatisch in das Projekt mit einbezogen werden. Jedenfalls wäre es falsch, den Zeitbedarf für Projektierung und Bau von Kabelleitungen kürzer als jenen für Freileitungen anzusetzen.

5. Die Übertragungsleitungen als Kostenfaktor

In einer Zeit, in welcher sich Industrienationen noch alles, sogar den Mondflug, leisten können, fällt es schwer, über Kosten zu sprechen. Immerhin darf als erfreuliche Tatsache festgestellt werden, dass selbst das Bundesgericht mehrere Auseinandersetzungen zur Frage der Verkabelung von Freileitungen aufgrund der Kostendifferenz entschieden hat.

Alle Expertisen und Berichte, die für konkrete Vergleiche erstellt werden, rechnen gegenüber Freileitungen mit fünf- bis zehnmal höheren Investitionen für jeden Kilometer Kabelleitung.

Anhand der Investitionsrechnung des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich (EWZ), welche die gesamten Aufwendungen für Produktion, Umformung, Übertragung und Verteilung bis zum Abonnenten umfasst, kann, ohne auf Details einzugehen, die Auswirkung einer Verkabelung des bestehenden Freileitungsnetzes grob abgeschätzt werden. Bis zum Jahr 1980 sind vom EWZ 2,1 Mia Schweizer Franken, wovon rund 0,1 Mia Franken für Freileitungen des Übertragungsnetzes, investiert worden. Wären diese Freileitungen als Kabelleitungen ausgeführt, so wären für diesen Investitionsanteil 0,5 bis 1 Mia Franken einzusetzen. Als Kostenfaktor würde das Übertragungsnetz statt mit 5% mit 20...30% der Gesamtinvestitionen in die Rechnung eingehen und den Strompreis entscheidend beeinflussen. Nur schon diese rein theoretische und im übrigen zu stark vereinfachte Kostenextrapolation zeigt mit aller Deutlichkeit, dass neben den technischen und betrieblichen eben auch wirtschaftliche Grenzen bestehen, welche Verkabelungen im Übertragungsnetz einschränken.

Während es in Ballungszentren mit grosser Absatzdichte gelingt, die Investitionen für Kabelnetze mittels eines angemessenen Zuschlages auf dem Strompreis zu finanzieren – in Zürich werden über ein 150-kV-Kabelnetz von nur 47 km Gesamtlänge jährlich rund 2 Mia kWh abgesetzt –, könnten im weiträumigen Übertragungsnetz die hohen spezifischen Kosten der Kabelleitungen kaum noch verkraftet werden.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Entwicklung der Ballungszentren im engbegrenzten schweizerischen Lebensraum hat dazu geführt, dass der moderne Mensch nicht nur seinen Lebensrhythmus in Arbeits- und Freizeit zweiteilt, sondern auch den Lebensraum in diesen Kategorien empfindet. Er reagiert daher besonders empfindlich auf alle Immissionen, die auch nur scheinbar die vermeintliche Qualität seines Erholungsraumes tangieren.

Es ist in der Folge schwieriger geworden, das im wesentlichen aus Freileitungen bestehende Energieübertragungsnetz zu erhalten oder zu verstärken. Der noch für viele Ingenieure massgebende Glaubenssatz, wonach alles, was technisch möglich ist, auch machbar sei, hat sich als Bumerang erwiesen, und es ist ausserordentlich schwierig, der Öffentlichkeit die Grenzen der Kabeltechnik im Energieübertragungssystem überzeugend darzulegen.

Dies ist um so schwieriger, als die Kabeltechnik einen nachweisbar hohen Stand der Zuverlässigkeit erreicht hat und Kabelnetze notwendigerweise und in zunehmendem Masse für die Versorgung der Ballungszentren eingesetzt werden müssen. Die Betreiber elektrischer Übertragungsanlagen sind zur Lösung ihres Versorgungsauftrages auf beide Techniken angewiesen, und die Elektrizitätswerke müssen zusammen mit den Kabelherstellern an der Vervollkommenung und Verbilligung der Kabeltechnik mitwirken, auch wenn sie dadurch mithelfen, die einfachen und handfesten Argumente zu entkräften.

So bleibt vorläufig die Frage offen, ob die Kabeltechnik ein Segen sei, weil sie den Bau von Übertragungsanlagen unter widrigen Umständen überhaupt noch ermöglicht, oder ob die Kabeltechnik ein Fluch sei, weil sie dem Publikum Alternativen vortäuscht, die wirtschaftlich und betrieblich nicht verkraftet werden können.

Wie in vielen anderen kontroversen technischen Fragen ist den Ingenieuren als Mitverantwortliche für die sichere elektrische Energieversorgung die unangenehme Aufgabe übertragen, immer wieder für die technisch-ökonomisch richtige Lösung einzutreten.

In diesem Sinne wird auch weiterhin der Einsatz von Freileitungen im Übertragungsnetz verlangt und die Kabeltechnik auf Anwendungen in den Versorgungsnetzen der Ballungsgebiete beschränkt werden.

Adresse des Autors

M. Fischer, stellv. Direktor des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich,
Postfach, 8023 Zürich.