Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 18

Artikel: Energieleitungen grosser Übertragungsleistung : vergleichende Betrachtungen

Autor: Imhof, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915972

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: 12.07.2025

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

Energieleitungen grosser Übertragungsleistung [1])

Vergleichende Betrachtungen

Von *A. Imhof*, Zürich

807-813

621.315

Wesentliche Merkmale der heutigen und der in Entwicklung begriffenen Energietransportsysteme für grosse Leistungen und Übertragungsdistanzen werden vergleichend betrachtet unter Hinweis auf die rasch weiterwachsenden Verbrauchsmengen und die damit sich anbahnenden Schwierigkeiten. Der Verfasser vertritt die Ansicht, dass man in fernerer Zukunft gezwungen sein wird, stark überwiegend mit unterirdischem Energietransport auszukommen und deshalb, was die Elektrizität belangt, die diesbezügliche Forschung dementsprechend gelenkt und intensiviert werden sollte.

Les caractéristiques essentielles des systèmes actuels de transport d'énergie sont comparées à celles des systèmes en voie de développement pour de grandes puissances et distances de transfert, ceci en se basant sur l'accroissement futur et rapide de la consommation, et en face des difficultés inhérentes qu'il sera nécessaire d'envisager. L'auteur pense qu'il faudra, dans un avenir plus ou moins éloigné, arriver à un transport d'énergie en grande partie souterrain, car, en ce qui concerne l'électricité, et du fait des circonstances, la recherche à ce sujet devra être dirigée et intensifiée dans ce sens.

1. Einleitung

Unser Jahrhundert wird sich in bezug auf seine rasch vorangetriebene technische Entwicklung verschiedenste Bezeichnungen erwerben: Jahrhundert der Kunststoffe — der Atomenergie — der Elektronik — des Transistors — des Computers — der Weltraumfahrt u.s.f. Man könnte es auch treffend charakterisieren als Jahrhundert der Energiefernleitungen grosser Leistung. Diese Leitungen ziehen sich unter der Erde, auf der Erde und über der Erde. Dazu kommt ein beträchtlicher auf Strassen und Schienen rollender und in Schiffen gleitender Energietransport. Gegenstand dieser Betrachtungen sind die rasch immer dichter wachsenden, heute schon ungeheuren Netze von Energieleitungen für die latenten Energieträger Mineralöle und Brenngase einerseits, für die dynamische Energie der Elektrizität anderseits. Welche Entwicklung die Energieerzeugung und der Energieverbrauch genommen hat, und welche Prognosen etwa der weitern Entwicklung gegeben werden, geht aus den Beispielen der Fig. 1 und Tabelle I hervor. Ähnliches gilt für die ganze industrialisierte Welt.

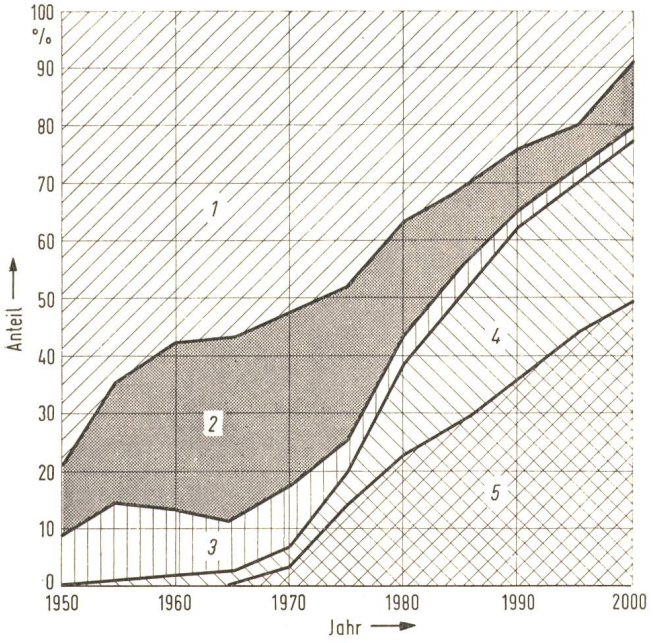

Fig. 1
Energiequellen der Kraftwerke westlicher Gebiete der USA
1 Energie aus Wasser; *2* Energie aus Gas; *3* Energie aus Öl; *4* Energie aus Kohle; *5* Kernenergie

Die strukturelle Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in der DBR

Tabelle I

	1950	1955	1960	1965	1966	1967	1970	1975
	in Mill. t SKE							
Steinkohle	91,8	121,1	128,9	114,7	102,5	97,0	89	84
Braunkohle	22,1	28,9	31,1	32,1	28,2	27,4	30	30
Mineralöl	6,5	17,4	46,9	111,3	125,5	130,5	160	200
Erdgas	6,5	7,4	0,8	3,3	4,0	5,6	12	30
Wasserkraft			6,5	7,4	9,3	9,0	10	10
Kernenergie			—	0,0	0,1	0,4	2	10
Sonstige			2,1	2,1	2,0	1,8	2	1
Total	126,9	175,1	216,4	270,9	271,6	271,7	305	365
	in % des Primärenergieverbrauchs							
Steinkohle	72,2	69,1	59,5	42,3	37,7	35,7	29,2	23,0
Braunkohle	17,4	16,5	14,4	11,9	10,4	10,1	9,8	8,2
Mineralöl	5,2	10,0	21,7	41,1	46,2	48,0	52,4	54,8
Erdgas	5,2	4,4	0,4	1,2	1,5	2,1	3,9	8,2
Wasserkraft			3,0	2,7	3,4	3,3	3,3	2,7
Kernenergie			—	0,0	0,0	0,1	0,7	2,7
Sonstige			1,0	0,8	0,8	0,7	0,7	0,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Der latente Energiestrom des Erdöles, des Erdgases, des Stadtgases und verschiedener Produkte dieser Stoffe geschieht durch Pipelines (PL), meistens dem Auge entzogen, eingegraben im Erdboden in einer Tiefe von etwa 1 m. Die PL sind Stahlrohre hoher mechanischer Festigkeit, deren Durchmesser, je nach geforderter Durchflussmenge, zwischen etwa 150 und 1100 mm beträgt. Im Zuge der PL befinden sich, in Abständen von 35...300 km Verdichter- bzw. Pumpstationen. Ein System von elektrischen Signalkabeln entlang der PL dient der Überwachung.

[1]) Gerne unterbreiten wir diese Studie unseren Lesern, allerdings ohne den Auffassungen des Autors in allen Teilen beizupflichten. *Red.*

2. Aus der Geographie der Energieleitungen

2.1 Mineralöl

Die theoretische Jahreskapazität der westeuropäischen Rohölpipelines erreichte Ende 1967 bereits 225 Mill. t. Daneben sind weitere Pipelines mit einer Leistung von 30 Mill. t im Bau (Fig. 2). Die Länge der verlegten Rohölpipelines betrug in Westeuropa Anfang 1968 5375 km, und weitere 355 km waren im Bau. Dies entspricht einer Vervierfachung

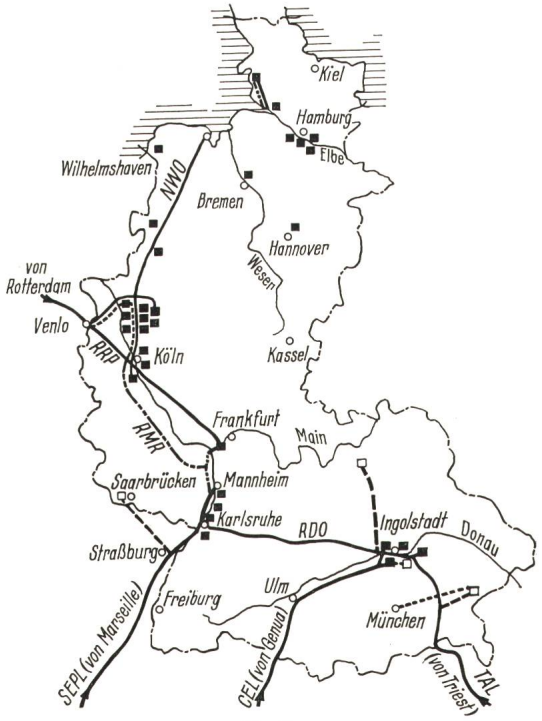

Fig. 2
Raffineriestandorte und Pipelinenetz in der Bundesrepublik Deutschland [35]

seit 1961. Neben diesen Rohölleitungen besteht ein 2000 km umfassendes Leitungsnetz für Fertigprodukte, wobei einige Stränge doppelt und dreifach angelegt sind. Diese Produkteleitungen führen von den Raffineriezentren in grosse Konsumzentren, deren Schwergewicht im Pariserbecken, in Oberitalien und im Ruhrgebiet liegen. Im Entstehen ist (anfangs 1968) eine Produktleitung von Lavéra und Feyzin nach Lyon und Grenoble mit einer Verlängerung nach Genf.

Der mitteleuropäische Raum wird sowohl von der Nordsee als auch vom Mittelmeer her erschlossen (Fig. 3): Ausgangspunkte im Norden sind der Europort bei Rotterdam und Wilhelmshaven, im Süden Lavéra bei Marseille, Genua und Triest. Noch 1961 waren die Leitungen von Wilhelmshaven nach Köln mit 385 km und Rotterdam–Ruhrgebiet mit 290 km die längsten europäischen PL. Heute beginnt die Rangliste mit der Südeuropäischen PL (SEPL, Lavéra–Karlsruhe) mit 782 km, gefolgt von Genua–Ingolstadt (CEL) mit 650 km. Mit dem Anschluss des Teilstückes Karlsruhe–Neustadt (286 km), das heute noch die Fortsetzung der SEPL bildet, an die Transalpine Pipeline (TAL, Triest–Ingolstadt) erreicht dann diese 1968 schon 460 km messende Leitung annähernd die Länge der SEPL.

Bemerkenswert ist auch die russische Komekon-Ölleitung aus dem Ural, die in zwei Armen Ostdeutschland einerseits und Ungarn und die Tschechoslowakei anderseits erreicht. Wie relativ auf dem Gebiete der PL gegenwärtige Grössenangaben sind, zeigt das Beispiel der Südeuropäischen PL. Im Jahre 1962 für die Speisung von vier Raffinerien mit einer Kapazität von 13 Mill. t erbaut, hat sie bereits vier Jahre später 31 Mill. t nach Frankreich, Deutschland und der Schweiz gepumpt.

Es ist noch nicht lange her, seit der Anschluss der Schweiz an das wachsende europäische Erdölrohrleitungsnetz erfolgte. 1963 konnte die Pipeline durch den grossen St. Bernhard nach Aigle und danach der Abzweiger der Südeuropäischen PL von Besançon nach Cressier in Betrieb genommen werden. Es folgte die Rohrleitung über die Jurahöhen. Die dritte PL auf Schweizerboden, ein Teilstück der Rohrleitung Genua–Ingolstadt, dient vorläufig nur dem Transit.

Die Transportkapazität der in der Schweiz endenden zwei Ölpipelines betrug anfangs 1968 5,5 Mill. t im Jahr, sie könnte durch den Einbau von weiteren Pumpstationen noch erhöht werden.

2.2 Erdgas

Neben dem Mineralöl ist es besonders das Erdgas, das als Energieträger über grosse Distanzen geleitet wird.

Ausser den französischen, westdeutschen, österreichischen, italienischen und britischen Erdgasvorkommen treten die Vorkommen in Russland, Algerien und in den Niederlanden in den Vordergrund. Mitteilungen aus der Sowjetunion sprechen von 60 000...80 000 Mill. m³ sicheren und wahrscheinlichen Reserven; neuerdings wird das Vorkommen in Westsibirien allein auf 40 000 Mill. m³ geschätzt. Die Naturgasförderung — die zweitgrösste der Welt — soll bis 1970 Fernpipelines von 16 000 km umfassen und zwar mit Rohren von 1420...2500 mm Durchmesser. Bis 1980 sollen allein die aus den Ostgebieten nach Zentralrussland führenden Leitungen jährlich etwa 400...500 Mrd. m³ Naturgas befördern.

Gewaltige Erdgasvorkommen wurden vor ungefähr zehn Jahren in den Niederlanden entdeckt. Die heutige Gronin-

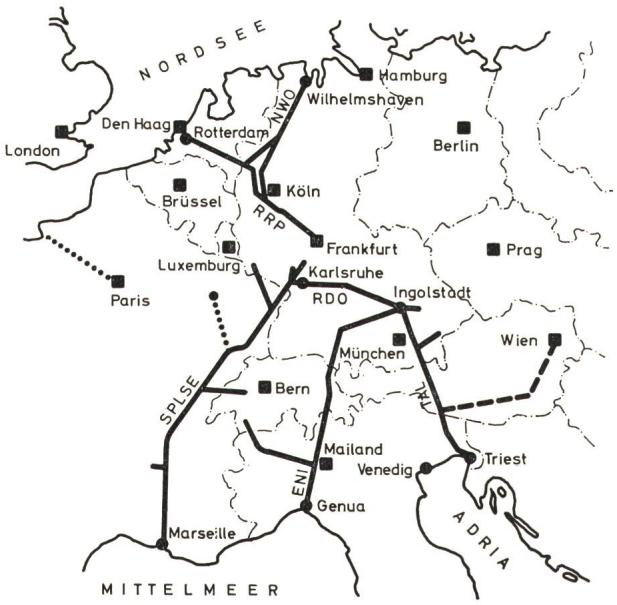

Fig. 3
Öl-Fernleitungen in Mitteleuropa [37]

ger Erdgasreserve wird zu 1850 Mrd. m³ geschätzt. Die N.V. Nederlandse Gasunie gedenkt, im Jahre 1969 14 Mrd. m³ im Inland und 7,5 Mrd. m³ im Ausland abzusetzen. Für 1975 wird ein gesamter Gasabsatz von 50 Mrd. m³ erwartet. Die erwähnte Gesellschaft liess in den vergangenen fünf Jahren rund 1500 km Haupt-Pipelines mit Durchmessern von 460...1060 mm legen, bemessen für einen Gasdruck von 67,5 at. Ferner wurden 2300 km Regional- und Anschlussleitungen mit Durchmessern von 100...400 mm, bemessen für 40 at Arbeitsdruck verlegt. Dazu 42 Mess- und Regelstellen, 7 Exportstellen und 740 Empfangsstellen. Der bis 1968 investierte Betrag beläuft sich auf etwa 2300 Mill. Gulden.

Fig. 4 zeigt das Erdgastransportsystem der Bundesrepublik Deutschland. Das gesamte Hochdruck-Pipelinenetz dieses Landes ist bereits ausserordentlich dicht.

Das italienische Erdgas-Pipelinenetz hatte 1968 eine Länge von 6000 km. Die Erdgasförderung erreichte 9,1 Mrd. m³. Die Ausbeutung weiterer eigener Vorkommen ist im Gange, ferner die Zuführung von 3 Mrd. m³ aus dem Britischen Sektor der Nordsee.

Die schweizerische Gaswirtschaft erstrebt den Anschluss an die grossen Versorgungssysteme für Erdgas, die in Europa aufgebaut werden. Sie befindet sich am Ende langer Leitungen, die von den peripheren Naturgasfeldern ausgehen. In einer ersten Phase soll Erdgas in mässigen Mengen der allgemeinen Gasversorgung zugewiesen werden. In einer spätern, zweiten Phase soll — unter der Voraussetzung niedrigerer Bezugspreise — Erdgas in grösseren Mengen einem gesamtschweizerischen Erdgasnetz zugeführt werden.

Während in Europa (ausser der Schweiz) die Energieerzeugung für Kraftwerke aus Öl und Gas zur Zeit im Wachstum begriffen ist, lautet die Prognose für die USA anders (Fig. 1). Der Anteil der Energieerzeugung an Öl ist heute in den USA noch etwa 11 %, an Gas 30 %.

In Kanada deckt Naturgas bereits 21 % des gesamten kanadischen Energiebedarfes. Die Förderung stieg von 1960 bis 1968 von 9 Mrd. m³ auf 54 Mrd. m³.

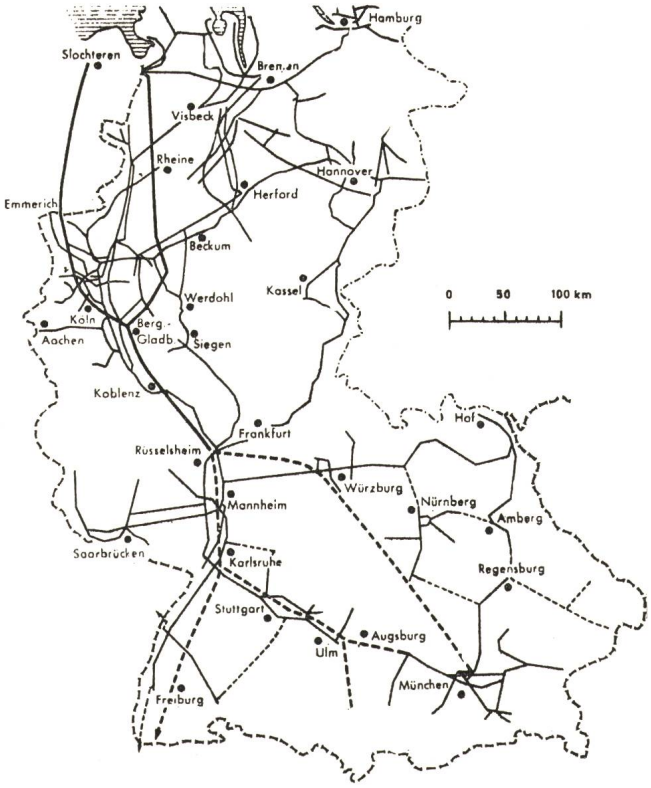

Fig. 4
Das Ferngas-Hochdrucknetz in der Bundesrepublik Deutschland

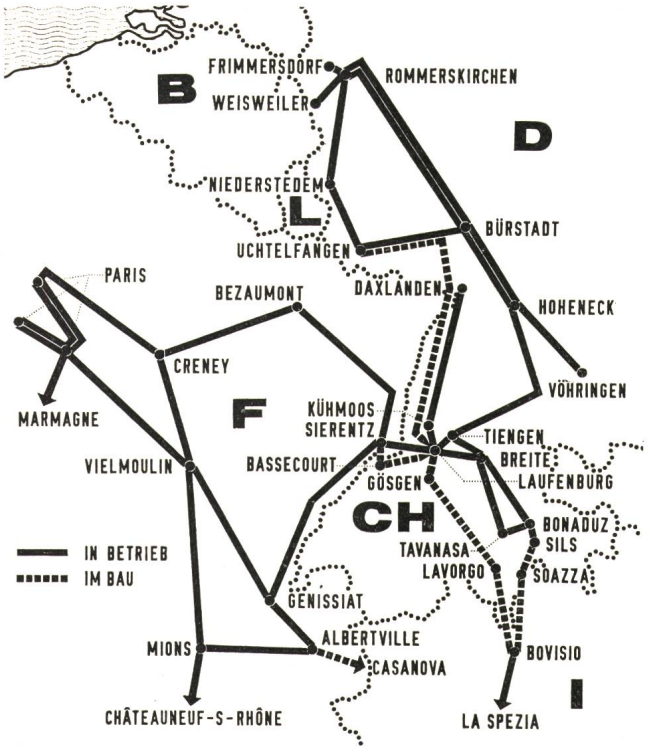

Fig. 5
Ausschnitt aus dem westeuropäischen 380-kV-Netz mit Laufenburg als Sternpunkt

2.3 Elektrizität (Fig. 5, 6 und 7)

Für den Transport elektrischer Energie kennt man heute mehrere verschiedenartige Leitungssysteme:

Hochspannungsfreileitungen	für Wechselstrom	in praktischer Verwendung
Hochspannungsfreileitungen	für Gleichstrom	
Hochspannungskabel	für Wechselstrom	
Hochspannungskabel	für Gleichstrom	
Hochspannungsleitungen mit Gasisolation		im Studium
Supraleitende Kabel für Wechsel- oder Gleichspannung		
Mikrowellenleitungen		

Die Hochspannungsfreileitungen für Wechselstrom dominieren heute eindeutig. Kabel haben erhebliche Bedeutung für kleine Distanzen, besonders für Ortsnetze in Städten. In den letzten Jahren besteht eine deutliche Tendenz zur Energieübertragung grosser Leistung über Freileitungen — seltener durch Kabel — mittels Gleichspannung, wobei sowohl am Ausgangs- wie am Empfangsort die Transformation in Gleichspannung, bzw. wieder in Wechselspannung stattfindet. Diesbezüglich werden vielenorts experimentelle und theoretische Studien gemacht, deren Ergebnis bis zur Zeit z. Teil noch zugunsten des Wechselstromes, in andern Fällen aber doch auch zugunsten des Gleichstromes ausfallen. Die Höhe der Übertragungsspannung, die Grösse der Leistung, die Übertragungsdistanz, Gesichtspunkte der Betriebssicherheit, die Trassenbreite (Tabelle II), die Kosten usw. spielen bei den Vergleichen wesentliche Rollen. Während vor einigen Jahrzehnten die Gleichrichtung noch erhebliche Schwierig-

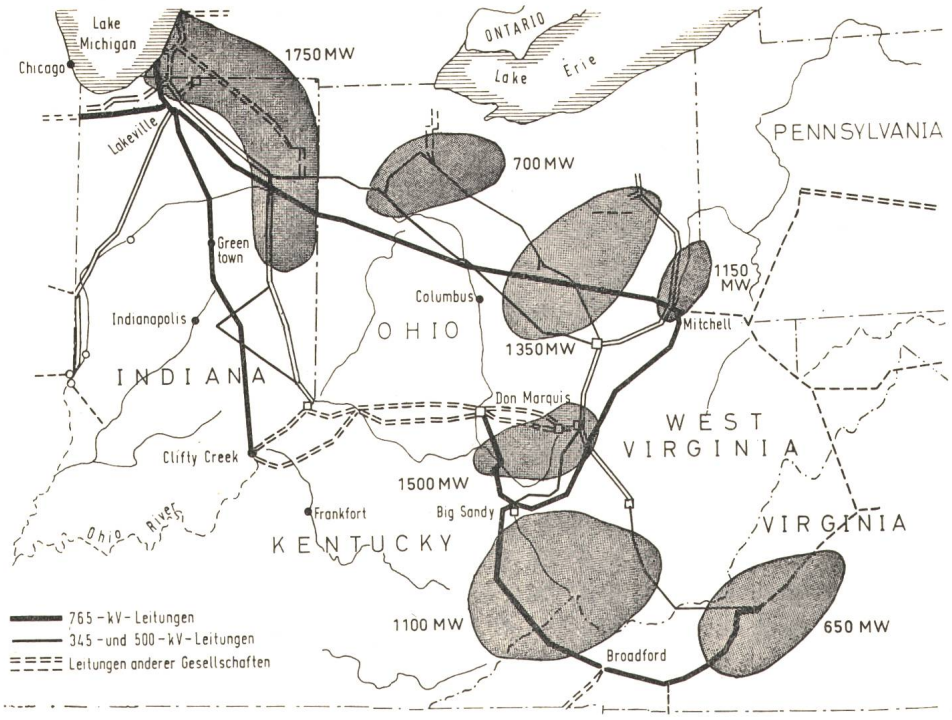

Fig. 6
Das Netz der American Electric Power Corporation und die geographische Verteilung der Last [36]

keiten bot, haben im letzten Jahrzehnt die Halbleiter-Thyristoren hierin überzeugende Fortschritte gebracht. Bereits sind gigantische Gleichstrom-Übertragungsanlagen projektiert und im Bau.

Die Technik der Kabel kämpft, soweit es die Übertragungsleistung betrifft, noch intensiv mit dem Problem der Verlustwärmeableitung. Zwar ist es gelungen, die anwendbaren Nennspannungen auf Werte von 275 kV und sogar 400 kV zu erhöhen, für Gleichspannung auf 500 kV, ohne aber dadurch die Übertragungskapazität einer Freileitung zu erreichen. Dies gelang auch nicht vollauf mit ölgekühlten und wassergekühlten Kabelleitungen. Die nötigen Kapitalinvestitionen sind zudem für Kabel beträchtlich höher als für Freileitungen und das Zutrauen in die Betriebssicherheit, bzw. in die im Störungsfalle rasche Behebbarkeit der Störung, sprechen heute noch zugunsten der Freileitungen.

Kunststoffolien versprechen in technischer Hinsicht Fortschritte gegenüber der ölimprägnierten Papierisolierung, sind aber sehr teuer. Die extrudierte Kunststoffisolierung (mit Polyäthylen) wurde neuerdings — grossenteils im Sinne von Studien — eingesetzt, sie vermag aber in bezug auf die Spannungshöhe und die Übertragungsleistung noch keineswegs mit dem Ölpapierkabel Schritt zu halten.

Bereits befasst sich die Fachliteratur auch mit konstruktiven und rechnerischen Vorschlägen für supraleitende Kabel [35][2]). Sie würden sehr grosse Übertragungsleistungen versprechen — nach vorliegenden Studien mehrere Hundert MW. Doch dürfte noch geraume Zeit verstreichen, bis die praktischen Schwierigkeiten — namentlich auch hinsichtlich der Betriebssicherheit — behoben sein werden. Das Prinzip ist sehr aussichtsreich.

Angeregt wurde ferner die Verwendung tiefgekühlter konventioneller Isolierstoffe zur Kabelisolierung, wobei nicht die Supraleitung in Anspruch genommen würde [40; 41].

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Des weitern wird die Hochleistungsübertragung über grosse Entfernungen mit Mikrowellen in Betracht gezogen [26].

Die Tabelle III zeigt anhand vieler Beispiele, welche Resultate in technischer Hinsicht von den erwähnten Übertragungssystemen erreicht wurden bzw. durch ernsthafte Studien erreichbar erscheinen.

Die erste in der Fachliteratur gegebene Emfehlung, elektrische Hochspannungsleitungen grosser Leistung unter Verwendung von SF_6 zu bauen, datiert m. W. aus dem Jahre 1967 [6]. Seither wurde indessen bekannt, dass in Japan mit diesbezüglichen Versuchen begonnen wurde, deren Resultate günstig sein sollen [5, 9].

Die Preise der Rohrleitungen sind aus dem Gas-Pipelinebau mit einiger Näherung bekannt, sie dürften für elektrische Übertragungsleitungen von gleicher Grössenordnung sein. Unter Annahme eines Gasdruckes von 3 at würde das SF_6-Gas für einen Rohrinnendurchmesser von 80 cm heute pro km Länge rund Fr. 180 000 kosten, das sind ungefähr 33...35 % der Rohrkosten. Dies unter Annahme eines Gaspreises von 15 Fr./kg bei Normaldruck und -temperatur und der Annahme, dass 10 % des Querschnittes für Stromleiter und Isolatoren benötigt werden. Die SF_6-Gasisolation ist also bei heutigen Preisen (es ist anzunehmen, dass sie bei so hohem Bedarf noch sinken werden) teuer, aber nicht unmöglich.

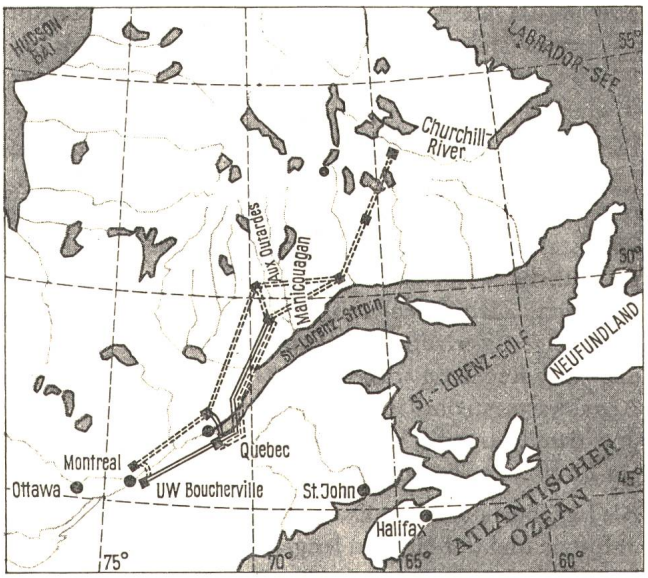

Fig. 7
Das 735-kV-Netz der Quebec Hydro-Electric Commission [34]
═══ in Betrieb;
=== projektiert

Vergleich von Kenngrössen verschiedener Übertragungsleitungen [34]

Tabelle II

Gegenstand		220-kV-Doppelleitung	380-kV-Doppelleitung		380-kV-Vierfachleitung	750-kV-Einfachleitung	750-kV-Doppelleitung
Beseilung		Zweierbündel Al/St. 240/40	Viererbündel Al/St. 240/40	Viererbündel Al/St. 690/35	Viererbündel Al/St. 240/40	Viererbündel Al/St. 690/35	
Thermische Grenzleistung	MW	980	3400	6100	6800	6100	12 200
Trassenbreite	m	55	70		78	92	95
Auf Trassenbreite bezogene thermische Übertragungsfähigkeit	MW/m m	18	49	87	87	67	128

Die japanischen Studien wurden mit einem SF_6-Druck von 6 at vorgenommen. Das ist ein relativ hoher Druck im Vergleich zu einem Druck von 2...3 at bei vollgekapselten Schaltanlagen. Da in einer gewissen Tiefe des Erdreichs befindliche Rohre nie wesentlich unter 0 °C liegende Temperaturen annehmen, ist der höhere Druck in bezug auf eine Verflüssigungsgefahr zulässig und natürlich wirtschaftlich.

Die Leistung von Hochspannungsleitungen mit Gasisolation der japanischen Versuche beträgt 2500 MW bei 275 kV; bei 500 kV würde sie bereits auf 4500 MW kommen. Es erscheint indes als wahrscheinlich, dass mit gasisolierten Hochspannungsleitungen ähnlich grosse Übertragungsleistungen möglich sein werden wie mit den grössten der projektierten Freileitungen für Drehstrom und für Gleichstrom.

In neuester Zeit ist auch die Mischübertragung Drehstrom-Gleichstrom auf derselben Leitung vorgeschlagen, dies zwecks besserer Ausnützung vorhandener Drehstromleitungen unter Beibehaltung von Drehstromschaltern und Zwischenabnahmen. Ferner denkt man an Drehstrom-Halbwellenübertragungen, bei denen keine Stabilitätsschwierigkeiten auftreten sollen und keine Kompensationseinrichtungen auf der Leitung nötig sind [40].

Beispiele ausgeführter und im Studium befindlicher Energieleitungen

Tabelle III

Nr.	Energieträger und Übertragungsmittel	Rohrdurchmesser mm	Nennspannung kV	Leistung MW	Bemerkungen	Literaturstelle
1	Elektr. Freileitung ~		600	1 800	Einfachleitung, Drehstrom	10
2	Elektr. Freileitung ~		450	1 500	Doppelleitung, Drehstrom	10
3	Elektr. Freileitung ~		240	360	Doppelleitung, Drehstrom	10
4	Elektr. Freileitung ~		1500	10 000	Studie CESI, Einfachleitung, 14 Leiter/Phase	11
5	Elektr. Freileitung ~					
6	Elektr. Freileitung ~		735	8 000	Chutes Churchill-Montreal, 19000 MW ab 1980	20
7	Elektr. Freileitung ~		400	20 000	Leitung «Konti-Skan» Schweden–Jütland	(—)
8	Elektr. Freileitung ~		400	650	Kraftw. Infierillo–Mexiko 325 km, Höhe bis 3000 m	(—)
9	Elektr. Freileitung ~		765		USA, 1600 km 1972, 40000 km	34
10	Elektr. Freileitung ~		765		American Electric Power Serv. Corp., Trassenbreite 60 m	36
11	Elektr. Freileitung —		± 400	750	Volgograd–Donbass, 500 km	15
12	Elektr. Freileitung —		± 750	6 000	Centre d'Ekibastus 2500...4000 km, Al/St.-Teilleiter je 1000 mm², 400 mm Abstand	15; 18
13	Elektr. Freileitung —		± 1000	13 500	Projekt (1969), Russland	15
14	Elektr. Freileitung —		± 500	4 500	Studie	24
15	Elektr. Freileitung —		± 500	5000...10 000	Studie, James-Bay–Montreal	18
16	Elektr. Freileitung —		± 400	1 440	Celilo (Orégon)–Sylmar (Los Angeles) 1969, 1330 km	18
17	Elektr. Freileitung —		± 266	640	Kingsnorth–London 1970	18
18	Elektr. Freileitung —		± 450		Manitoba–Fleuve Nelson 1971	18
19	Elektr. Freileitung —		± 750	6 000	Russland, Kazakhstan Nord–Tambow, Projekt Al/St., Teilleiter von je 1000 mm², 400 mm Abstand, 2500 km	34
20	Elektr. Freileitung —		± 750		USA, 1400 km	34
21	Elektr. Kabel ~		275	375	Japan	(—)
22	Elektr. Kabel ~		275	360	Japan	(—)
23	Elektr. Kabel ~		275	760	Englische Studie 1600 A	23
24	Elektr. Kabel mit Wasserkühlung ~		400	1 100	Englische Studie 1600 A	23
25	Elektr. Kabel mit Wasserkühlung ~		400	2 200	Englische Studie 3200 A	23
26	Elektr. Kabel mit Ölkühlung ~		400	1 000	Studie 1958...1968	24
27	Polyäthylen-Kabel ~		138	210	Studie, 1966...1968	25
28	Elektr. Kabel —		200	200 (1000 A)	Sardinien–Ital. Festland, Rückleitung im Meer, 400 km	
29	Elektr. Kabel —		± 266	640	London	
30	Elektr. Kabel —		± 500	5000...10 000	Studie, James-Bay–Montreal	18
31	Elektr. Kabel —		± 266	3/2	Canada continental–Ile de Vancouver 1967/68	18
32	Supraleitendes Kabel ~		37/21,4	640 (1660 A/Phase)	Entwurf W. Kafka, Drehstrom mit 1 Reserveleitersystem	5, 9
33	Elektr. SF_6-Pipeline ~		275	2 500	Japan, Experim.-Studie	6
34	Elektr. Mikrowellen-Kabel, 3 GHz	Hohleiter 1300		4 000 therm. | elektr.	Studie, Länge 1000 km, Luftkühlstationen alle 100 km, $\eta = 0{,}78$	26
35	Mineralöl	1050		110 000 | 38000 85 t/Jahr	Fliessgeschwindigkeit = 2,65 m/s	1
36	Mineralöl	800		58 000 | 20 000 45 t/Jahr		
37	Mineralöl	200		2000 | 700 1,5 t/Jahr		
38	Mineralöl	860		12 700 | 4400 9,5 t/Jahr	Kanada (interprovincial), 3100 km	27
39	Erdgas	1100		3000 | 1050	Emerich–Köln 1968/69, $v = 1{,}95$ m/s, 67,5 at	1
40	Erdgas	900		2000 | 700		(—)

3. Charakteristische Daten

3.1 Mineralöle

Charakteristische Daten für Mineralöle sind:

Raumgewicht ca. 0,85, Heizwert 10 000 kcal/kg $\pm 10\,\%$, Strömungsgeschwindigkeit in den Pipelines $\approx$ 7,2 km/h (so z. B. errechnete man bei einer PL von 860 mm Durchmesser in Libyen im Jahresmittel 7,1 km/h, aus der Jahres-Durchflussmenge von 30 Mill. t/a).

Die Leistung des Ölstromes einer grossen PL von 860 mm Durchmesser bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 7,2 km/h beträgt 39 000 MW. Bei einem Gesamtwirkungsgrad eines Dampfkraftwerkes von 35 % würde die entsprechende elektrische Leistung ca. 12 000 MW betragen.

3.2 Gase

3.2.1 Erdgase, auch Naturgase genannt, und Erdölgase

Man unterscheidet zwischen «trockenen» und «nassen» Erdgasen. Letztere werden meist mit «Erdölgase» benannt. Beiden ist Methan der Hauptbestandteil (80...100 Vol.-%). Die trockenen Erdgase enthalten im allgemeinen Beimengungen von inerten Gasen wie N_2, CO_2, He (bis 20 Vol.-%), z. Teil auch geringe Mengen an höheren Paraffin-Kohlenwasserstoffen. Die Erdölgase enthalten in der Regel, neben grösseren Mengen an höheren Kohlenwasserstoffgasen, auch kleinere Mengen von Kohlenwasserstoffdämpfen.

Das Gewicht der Erdgase pro 1 m³ bei 0 °C und 760 mm Druck beträgt 0,6...0,8 kg. Der Heizwert ist 7500...11 500 kcal/m³ bei Normaldruck und 0 °C. In einem Dampfkraftwerk erzeugt 1 m³ Erdgas ca. 3,5 kWh elektrische Energie bei einem Wirkungsgrad für Turbine + Generator + Transformator von $\eta = 35\,\%$. Der Gasdruck für Gebrauch beträgt 200 mm WS. Die Leistung der Pumpstationen (Verdichterstationen) beträgt pro km $\approx$67 PS (berechnet nach Angaben in den Tabellen I und II und in [1]).

Der Gasdruck in den PL beträgt 60...75 at, die Strömungsgeschwindigkeit erreicht je nach Bedarf Werte von etwa 2...6 m/s.

Bei der Verbrennung werden Kohlendioxid CO_2 (9,6 Vol-%) und Wasserdampf (18,8 Vol.-%) erzeugt. Der Anteil an Stickstoff N_2 beträgt 21,6 Vol.-%. Diese Werte gelten für trockenes Erdgas.

Die Leistung des Gasstromes einer grossen PL von 1100 mm Durchmesser beträgt bei 67,5 at Gasdruck und 1,95 m/s Strömungsgeschwindigkeit ca. 3000 MW Wärmeleistung, oder ca. 1050 MW elektrische Leistung. Bei 6 m/s Strömungsgeschwindigkeit würde die thermische Leistung 9500 MW bzw. die elektrische Leistung 3300 MW betragen.

3.2.2 «Klassische Gase», Stadtgas

Darunter versteht man durch Steinkohlendestillation entstehende, umfangreichen physikalischen und chemischen Prozessen unterzogene Gase. Heute werden sie durch Entzug ihres CO-Gehaltes entgiftet. Ihre Bedeutung ist nicht mehr gross, seitdem Spaltgase hergestellt werden und Naturgas in grossen Mengen gewonnen wird. Der Heizwert des klassischen «Stadtgases» beträgt etwa 4200 kcal/Nm³. Vergleichsweise sei erwähnt, dass Flüssiggas Propan, das in Druckflaschen und Drucktanks transportiert wird, einen Heizwert von 24 000 kcal/Nm³, oder mit Luft gemischt zwecks Anpassung an die Gasapparate 6500 kcal/Nm³ hat.

Die «klassischen» Gase enthalten 35 bis 60 Vol.-% Wasserstoff, 20...30 % Kohlenwasserstoffe, 10...20 % inerte Gase ($N_2 + CO_2$). Die Verbrennungsprodukte sind 7,3...7,9 Vol.-% CO_2, 21,5...22,5 Vol.-% Wasserdampf und 70,2...70,6 Vol.-% N_2.

3.2.3 Spaltgas-Stadtgas

Dieses wird aus Leichtbenzin, meist durch kontinuierliche Spaltung unter Hochdruck, entwickelt. Der Enddruck des Hochdruck-Spaltgases beträgt etwa 25 atü.

Die in PL übertragbare thermische bzw. ihr entsprechende elektrische Leistung würde ungefähr halb so gross sein wie die für Erdgase angegebenen Werte.

4. Vergleich der möglichen Energietransportleistungen

Aus den Angaben unter Abschn. 2 und aus Tabelle III geht hervor, dass mit dem heutigen Stand der Technik ungefähr die folgenden Maximalleistungen erreichbar sind:

a)	Mineral-Öl-PL	40 000 MW kalorische Leistung bzw. 12 000 MW elektrische Leistung
b)	Erdgas-PL	10 000 MW kalorische Leistung bzw. 3 500 MW elektrische Leistung
c)	Stadtgas	5 000 MW kalorische Leistung bzw. 1 800 MW elektrische Leistung
d)	Drehstrom-Freileitungen (thermische Grenzleistung)	
	750 kV	12 000 MW elektrische Leistung
	380 kV	7 000 MW elektrische Leistung
e)	Gleichstrom-Freileitungen	6 000...13 500 MW elektrische Leistung
f)	Drehstromkabel	375 MW
g)	Gleichstromkabel	640 MW
h)	Kabel mit künstlicher Kühlung für Drehstrom	760 MW bei 275 kV 2200 MW bei 400 kV
i)	Supraleitendes Kabel für Drehstrom	640 MW
j)	SF_6-Kabel für Drehstrom	2500 MW
k)	Mikrowellen-Hohlleiter	4000 MW

Die grösste thermische Übertragungsleistung erreichen also die Mineral- und danach die Erdgas-PL. Für allgemeine Verwendung ist jedoch die elektrische Energie am universalsten einsetzbar, so dass die Vergleichsskala sich in erster Linie auf die elektrische Leistung beziehen muss.

Selbstverständlich spielen bei der Beurteilung der verschiedene Systeme noch viele Fragen eine Rolle, wie Kosten der Erstellung und des Unterhaltes, Zweckbestimmung des Energieträgers, Zuverlässigkeit der Übertragung, Kontrollierbarkeit, Dauer von Reparaturen, Übertragungsverluste bzw. Übertragungswirkungsgrad, beanspruchter Boden, mögliche Trasseführung, rechtliche und politische Belange, Anpassungsfähigkeit bei notwendigen Änderungen usw.

5. Betrachtungen über eine «integrierte» Energieübertragung»

Für die verschiedenen Energieformen: latente flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe einerseits, elektrische Energie anderseits bestehen heute in ganz getrennten Wegen schreitende Fachkörperschaften: Fachverbände, Gesellschaften und industrielle Unternehmen für die Energien der Kohlenwasserstoffe einerseits, für die elektrische Energie ander-

seits. Ihre Forschungsstätten, ihre Literatur, ihre Propaganda, ihre Finanzverwaltung, ihre Fertigungsstätten liegen grossenteils auf eigenen Wegen.

Die Verdichtung der Energieleitungen aller Art in allen Industriegebieten der Erde lässt das Problem einer integrierten Energieübertragung akut werden. Es geht um die Frage, ob nicht ein beachtlicher Teil der grossen Energiepfade sich so ausbilden und zusammenlegen liesse, dass die Zahl der unterirdischen Pfade relativ zu den Leistungskapazitäten vermindert werden könnte. Hiezu einige Andeutungen: Verlegung latenter und elektrischer Energieübertragung auf grossen Strecken in ein und denselben Graben. Führung elektrischer Stromleiter im Innern der Gas-Pipelines.

Da in Gas-Pipelines im allgemeinen das Gas unter dem hohen Druck von 60...70 at steht, besitzt es eine hohe Durchschlagfestigkeit. Die Überlegung drängt sich deshalb auf, es könnte dieses Gas zur Isolierung von elektrischen Stromleitern herangezogen werden. Freilich würden dabei neben den wahrscheinlich recht schwierigen technischen Problemen noch solche der Administration, Organisation und Kostenaufteilung treten. Der Gasdruck müsste stets auf ein gewisses Minimum einreguliert werden. Ernste Probleme dürfte die Reinhaltung der Rohre stellen, da es nicht möglich wäre, hiefür den sog. Molch zu verwenden. Soweit bedarfsmässig die elektrische Energie nach andern Richtungen abgezweigt werden müsste, ferner zur Shuntung der Gas-Pumpstationen und -Ventile, wären SF_6- oder Druckluft-Pipelines zu verlegen. Der elektrische Übergang in Pipelines von einer Gasart zu einer andern bietet verhältnismässig leichte technische Probleme.

6. Schlussbetrachtungen

Die in der Tabelle III zusammengestellten Beispiele bestehender und im Studium befindlicher Energietransportleitungen zeigt, dass die erreichbare Belastbarkeit für «latente» Energien — Öl, Erdgas, Stadtgas — von gleicher Grössenordnung ist wie für die «dynamische» Energie der Elektrizität. Die latenten Energien werden zum Teil — vorwiegend über mässige Distanzen — durch Fahrzeuge an ihren Verbraucherort transportiert, in imposantem Ausmasse aber durch Pipelines unter dem Erdboden. Die elektrische Energie dagegen wird meistens durch Freileitungen transportiert. Die angeführten Zahlen zeigen, dass von Freileitungen die grössten elektrischen Leistungen heutiger Energiekanäle aufgenommen werden können. Zudem ist dieses Leitungssystem relativ preisgünstig, mit kurzen Bauzeiten erstellbar und im Störungsfalle sehr rasch reparierbar. Doch wachsen die Widerstände hinsichtlich der Trasseeführung, der Bodenbeschaffung, der Verschandelung schöner Landschaften mit annähernd exponential weiterwachsendem Energiebedarf schliesslich ins Unüberwindbare, so dass mit grossem Nachdruck neue Leitungssysteme erdacht und entwickelt werden müssen. Als solche kommen in Betracht: Künstlich gekühlte Kabel, SF_6- oder Druckluft-isolierte elektrische Pipelines, Supraleiterkabel, Mikrowellenkabel und integrierte Systeme von Gas- und Elektrizitäts-PL. Gewisse Verschiebungen des Kostenanteiles von den Energieproduktionsanlagen auf die Leitungsanlagen müssen dabei wahrscheinlich in Kauf genommen werden.

Literatur

[1] Pipelines — Adern der Wirtschaft. Haus der Technik E. V. Essen, Vortragsveröffentlichungen Heft 196(1969).

[2] Rohrleitungstechnik in der chemischen Industrie. Haus der Technik E. V. Essen, Vortragsveröffentlichungen Heft 154(1968).

[3] *W. Bänninger:* Naturgas für die Schweiz. Wirtschaftspolitische Mitt. 16(1960)12, S. 1...14.

[4] Das Gasverbundnetz in der Ostschweiz im Bau. Schweiz. Energie-Konsum. 48(1968)10, S. 191...193.

[5] *H. Prinz:* 50 Tage als Gastprofessor in Japan. Bull. SEV 59(1968)19, S. 899...913.

[6] *A. Imhof:* Vollgekapselte Hochspannungs-Schaltanlagen — Eine Übersicht. Schweiz. Techn.-Ztschr. 64(1967)8, S. 153...164+Nr. 9, S. 173...183.

[7] *W. Kafka:* Entwurf eines Supraleitungs-Drehstromkabels. ETZ-A 90(1969)4, S. 89...92.

[8] *D. Kind:* Hochspannungstechnik heute. ETZ-B 21(1969)3, S. 49...72.

[9] *S. Takahashi:* Transport souterrain de forte puissance, sous très haute tension, au Japon. Rapport CIGRE No. 21–04, 1968.

[10] *J. Biermanns:* Energieübertragung auf grosse Entfernungen. Karlsruhe, Verlag G. Braun, 1949.

[11] *H. Prinz:* Warum Höchstspannungsprüffelder? ETZ-B 21(1969)4, S. 73...78.

[12] Energiewirtschaftliche Bilanz am Jahresende 1968. Schweiz. Energie-Konsum. 48(1968)12, S. 224...230.

[13] *J. G. Hannemann* et *I. B. Mogensen:* Les pylones de la ligne à 400 kV Konti-Skan dans le Jutland, (Danemark). Rapport CIGRE No. 22–05, 1968.

[14] *V. Ciallella e. a.:* Essais et expérience d'exploitation de la liaison à courant continu Sardaigne — Italie continentale. Rapport CIGRE No. 43–09, 1968.

[15] *A. M. Berkovski* e. a.: L'expérience d'exploitation de la ligne de transport à courant continu Volgograd-Donbass et ses applications aux transports de grande puissance en courant continu à très haute tension. Rapport CIGRE No. 43–07, 1968.

[16] *W. Wanger:* Probleme der 380-kV-Drehstromübertragung. In: Fortschritte der Hochspannungstechnik. Bd. 2: 380-kV-Drehstromübertragung. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1954, S. 1...27.

[17] *G. Hunziker:* Energietransport über die Alpen. In: Fortschritte der Hochspannungstechnik. Bd. 2: 380-kV-Drehstromübertragung. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG, 1954, S. 78...99.

[18] *F. J. Lane* et *F. H. Last:* Rapport d'activité du comité d'études No. 10. Transport d'énergie par courant continu à très haute tension. Rapport CIGRE No. 43–01, 1968.

[19] *L. A. Bateman, L. S. Butler* et *R. W. Haywood:* Le réseau de transport en courant continu à ±450 kV de l'aménagement du fleuve Nelson. Rapport CIGRE No. 43–02, 1968.

[20] *R. Fournier, D. McGillis* et *J.-C. Roy:* Etude pour l'intégration de l'énergie des chutes Churchill au réseau de l'Hydro-Québec qui comprendra 5500 kilomètres de lignes à 735 kV. Rapport CIGRE No. 42–02, 1968.

[21] *J. Paschoud:* Rapport d'activité du comité d'études No. 7 (Pylones et fondations). Rapport CIGRE No. 22–01, 1968.

[22] *R. F. Goossens:* Rapport d'activité du comité d'études No. 2 (Câbles à haute tension). Rapport CIGRE No. 21–01, 1968.

[23] *H. K. Beale* e. a.: Application de techniques de refroidissement forcé intense aux câbles à huile fluide et a leurs accessoires pour circuits de transport de forte puissance. Rapport CIGRE No. 21–09, 1968.

[24] *G. Pasqualini, R. Wauthier, G. Terramorsi* et *C. A. Flamand:* Refroidissement des câbles transportant de grandes puissances à de grandes distances. Rapport CIGRE 21–08, 1968.

[25] *N. D. Kenney* et *M. J. Koulopoulos:* Installations de câbles à 115 kV et 138 kV isolés au polyéthylène et éléments d'évaluation des câbles. Rapport CIGRE No. 21–07, 1968.

[26] *H. Paul:* Hochleistungsübertragung über grosse Entfernungen mit Mikrowellen. Bull. SEV 60(1969)14, S. 609...621.

[27] Das Buch vom Erdöl. BP, Benzin und Petroleum AG Hamburg. Hamburg, Reutner & Klöckner, 1967.

[28] *F. Schuster:* Gasverwendung. Gasfachliche Grundlagen. Schriftenreihe GE: Gas, Erdgas Heft 1. München/Wien, Verlag Oldenbourg, 1969.

[29] Öl, Gas und Elektrizität im Wettbewerb. Elektr.-Verwertg. 44(1969)6, S. 181...183.

[30] *G. Falomo:* L'économie du transport à grande distance du combustible et de la transmission de l'électricité. Conférence mondiale de l'énergie, session partielle Madrid, 5...9 juin 1960. Comptes rendus, Vol. VI, p. 3007...3026.

[31] *R. Hochreutiner:* Das schweizerische Verbundnetz und der internationale Stromaustausch. Wasser- und Energiewirtschaft 56(1964)9/10, S. 291...297.

[32] *H. R. Siegrist:* Überblick über die gesamte Energiewirtschaft der Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft 56(1964)9/10, S. 265...278.

[33] *L. von Planta:* Die Brennstoffwirtschaft in der Schweiz: Kohle, Öl, Gas. Wasser- und Energiewirtschaft 56(1964)9/10, S. 298...308.

[34] *H. Mors:* Höchstspannungs-Freileitungen. ETZ-A 89(1968)19/20, S. 493...500.

[35] *G. Oplatka:* Wirtschaftlicher Ausbau eines Energieversorgungsnetzes. Brown Boveri Mitt. 56(1969)4, S. 164...174.

[36] *G. Stauch:* 765 kV als neue Spannungsebene im Netz der American Electric Power Service Corporation. ETZ-A 90(1969)15, S. 372...376.

[37] Die Entwicklung der Erdölpipelines in Europa. Schweiz. Techn.-Zschr. 65(1968)7, S. 125...126.

[38] *H. Klotz:* 700-kV-Transformatoren für die Quebec Hydro-Electric Commission. Siemens Z. 43(1969)8, S. 671...679.

[39] *W. Stein:* Netzleitstellen in Gasnetzen. ETZ-A 90(1969)10, S. 239...243.

[40] *D. Oeding:* Prinzipien und Grenzen der elektrischen Energieübertragung. ETZ-A 91(1970)1, S. 29...36.

[41] *A. Imhof:* Tieftemperatur-Hochspannungsisolation — eine Anregung. Schweiz. Techn.-Ztschr. 66(1969)13, S. 237...245.

Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. h. c. *Alfred Imhof,* Winzerstrasse 113, 8049 Zürich.