Energietransport auf grosse Distanz

Autor(en): **Trümpy, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie**

Band (Jahr): **52 (1960)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-921745

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Energietransport auf große Distanzen

Von Dr. *E. Trümpy*, Olten

DK 621.315

Elektrische Kraftwerke werden im allgemeinen dort errichtet, wo wirtschaftliche Erstellungsmöglichkeiten vorhanden sind. Für die Schweiz, welche zur Hauptsache hydraulische Energie erzeugt, ergeben sich die Standorte der Werke aus den topographischen und hydrologischen Verhältnissen. Aus Bild 1 geht deutlich hervor, daß wir einerseits entlang den Flußläufen im Mittelland über viele kleinere und mittlere Laufwerke verfügen, welche übrigens zur Zeit ihrer Erstellung als große Werke galten. Demgegenüber ist im Alpengebiet, und zwar vor allem in den Kantonen Tessin, Graubünden und Wallis, speziell unter Berücksichtigung der projektierten und der sich im Bau befindenden Werke, eine beträchtliche Anzahl Maschinengruppen mit großer Leistung konzentriert. Die Steigerung des Verbrauches an elektrischer Energie führt dazu, daß immer mehr Werke gebaut werden müssen und in der Folge immer größere Energiemengen von den Erzeugungsorten zu den Verbrauchszentren zu übertragen sind. Außerdem liegt es im Interesse der rationellen Ausnutzung der Wasserkraftanlagen, Gebiete mit verschiedenen hydrologischen Verhältnissen elektrisch zu verbinden, da sich ihre Energiedarbietungen in wertvoller Weise ergänzen.

Normalerweise ist der Wasseranfall in den Laufwerken im Winter, also bei erhöhter Belastung, wesentlich geringer als im Sommer. Wegen diesen großen Produktionsschwankungen muß die Stromerzeugung in den Laufwerken durch Energie aus den Jahresakkumulierwerken ergänzt werden. Die Schaffung solcher Speicherwerke ist zwar nur im Gebirge möglich, doch läßt sich ihre Energieabgabe leicht regulieren. Sie bilden in allen Ländern, deren Energiewirtschaft auf hydraulischer Basis beruht, zusammen mit den Laufkraftwerken im Flachland bei der stark variierenden Wasserführung der Flüsse die Voraussetzung für den Jahresausgleich der Energiedarbietungen.

Parallel mit dem Bau von großen Energieerzeugungszentren im Gebirge, welche also weit weg vom Konsumenten liegen, sowie allgemein als Folge der erhöhten Übertragungsleistungen, hat sich in den letzten Jahrzehnten die Betriebsspannung der Übertragungsleitungen im schweizerischen Hochspannungsnetz etappenweise erhöht. Während zu Beginn dieses Jahrhunderts Leitungen mit einer Betriebsspannung von 8 bis 16 kV den Bedürfnissen vollauf genügten, mußte bald auf die nächsthöhere Stufe von 50 kV übergegangen werden. Heute werden bereits 150-kV-Leitungen für die lokale Energieversorgung herangezogen; die Verbindungsleitungen zwischen den Speicherwerken in den Alpen und den Verbrauchszentren im Mittelland weisen in gewissen Fällen bereits eine Betriebsspannung von 220 kV auf, wobei einige dieser zuletzt genannten Hauptadern für eine zukünftige Spannung von 380 kV ausgebaut wurden (Bild 2). Nebenbei sei noch erwähnt, daß an einer kürzlich in Belgien abgehaltenen internationalen Tagung sogar die Voraussetzungen zur Einführung von 380-kV-Übertragungssystemen für die Regionalversorgung eingehend diskutiert wurden.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, haben sich die Übertragungsdistanzen ständig erhöht. Gleichzeitig hat der Begriff der «großen Übertragungsdistanz» eine Wandlung erfahren, denn wenn kurz nach der Jahrhundertwende eine Leitungsstrecke von 100 km als außerordentlich galt, werden heute schon verschiedentlich Schaltstationen auf Entfernungen von ungefähr 1000 km durch Leitungen miteinander verbunden. Bei den in der Schweiz in Betrieb stehenden Höchstspannungsleitungen kann im technischen Sinne meist nicht mehr von langen Übertragungswegen gesprochen werden. Mit der ständigen Erhöhung der Betriebsspannungen hat die Übertragungskapazität des Netzes in einem großen Ausmaß zugenommen, so daß bedeutend höhere Leistungen übertragen werden können. In Bild 3 wurde

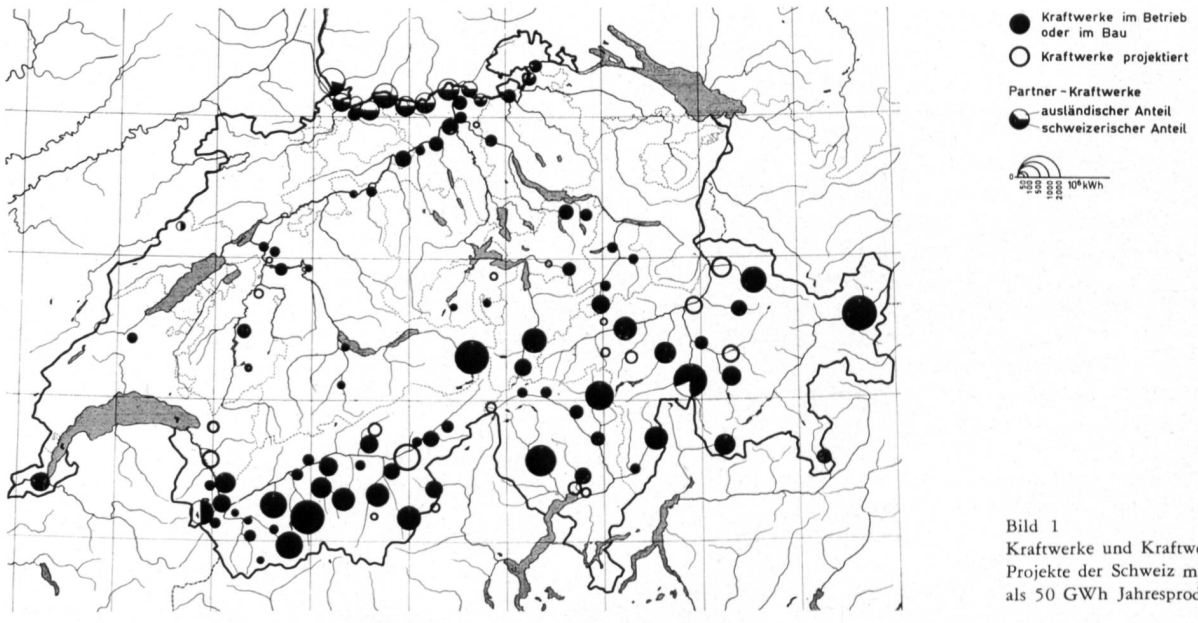


Bild 1
Kraftwerke und Kraftwerk-Projekte der Schweiz mit mehr als 50 GWh Jahresproduktion

für die Schweiz die Entwicklung der Netzlänge in den letzten Jahrzehnten und im Vergleich dazu die jeweilige maximale Leistung der gesamten Inlandabgabe dargestellt. Allerdings geht die mit der Erhöhung der Leistung verbundene starke Vergrößerung der Distanzen des Energietransportes vom Erzeugungsort zum Verbraucher infolge der erwähnten Steigerung der Übertragungskapazität der einzelnen Leitungen aus diesem Diagramm nicht hervor.

Die Einführung einer neuen Höchstspannung bedeutet jeweils einen gewagten Schritt in unbekanntes Neuland. Gewisse physikalische Erscheinungen können plötzlich bei erhöhter Spannung in den Vordergrund treten und die Projektierung wesentlich beeinflussen. Bevor aber einige dieser Probleme gestreift werden, sei daran erinnert, daß eine der wichtigsten Aufgaben bei der Planung und dem Bau von Übertragungsanlagen darin besteht, die elektrische Energie mit geringstem Aufwand vom Erzeugungsort zum Verbraucherort zu übertragen. Nebst den Kapitalkosten sind dabei die Aufwendungen für den Unterhalt sowie vor allem die Energieverluste zu berücksichtigen. Im speziellen kann die Verminderung der Energieverluste bei der Projektierung von Netzen eine ausschlaggebende Bedeutung erlangen. Dabei muß man sich vor Augen halten, daß die Energieverluste in den verschiedenen Ländern nicht einheitlich beurteilt werden, so daß bei wirtschaftlichen Vergleichen diesem Punkt besondere Beachtung zu schenken ist. Für die Erfassung der Energieverluste ist zudem von Bedeutung, daß die Belastungen je nach der Jahreszeit, ja sogar je nach Tagen, sehr verschieden sein können. Es wäre selbstverständlich wegen den Verlusten und der damit zusammenhängenden Ausnützung der Leitungen am günstigsten, die Energiemengen möglichst mit konstanter Leistung übertragen zu können, was sich aber aus betrieblichen Gründen nicht realisieren läßt.

Die grundsätzlichen Überlegungen für den Energietransport auf Hochspannungsleitungen bleiben sich für die verschiedenen Spannungsstufen gleich. Um die bezüglichen Kriterien zu verstehen, ist ein kurzes Eindringen in die Theorie der Energieübertragung nicht zu umgehen. Die Erklärung der einzelnen Faktoren geschieht am besten in der Weise, daß man eine Hochspannungsleitung elektrisch nachbildet, das heißt, indem man einige allgemein bekannte Schaltelemente dermaßen zusammenfügt, daß sich das erhaltene Ersatzgebilde elektrisch gleich wie die Leitung verhält. Diese Schaltelemente sind Ohmscher Widerstand, Induktivität und Kapazität. Werden sie gemäß Bild 4 zusammengeschaltet, so erhält man die gewünschten elektrischen Nachbildungen. Die Anordnungen gemäß Bild 4a (π-Glied) und Bild 4b (T-Glied) sind einander gleichwertig. Den Er-

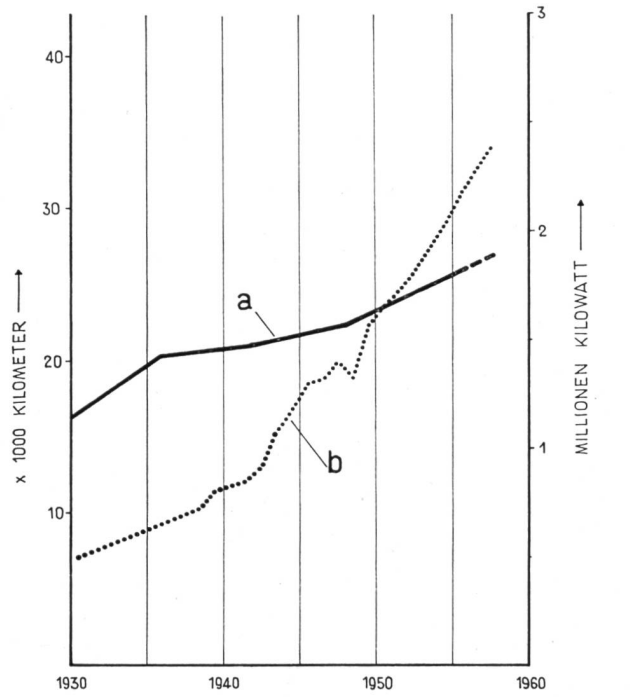


Bild 3 Entwicklung des Leitungsnetzes im Vergleich mit der maximalen Belastung des Netzes
a) einsträngige Leitungslänge des schweizerischen Hochspannungsnetzes
b) maximale jährliche Leistung der gesamten schweizerischen Inlandabgabe an elektrischer Energie

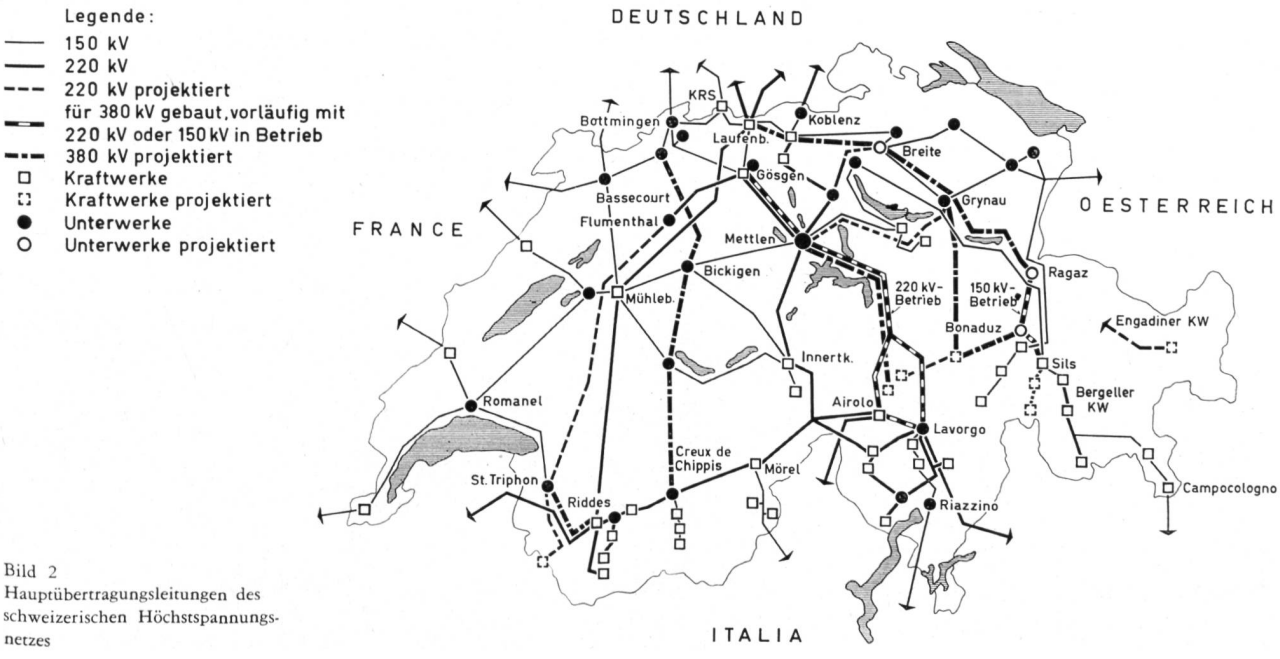


Bild 2
Hauptübertragungsleitungen des schweizerischen Höchstspannungsnetzes

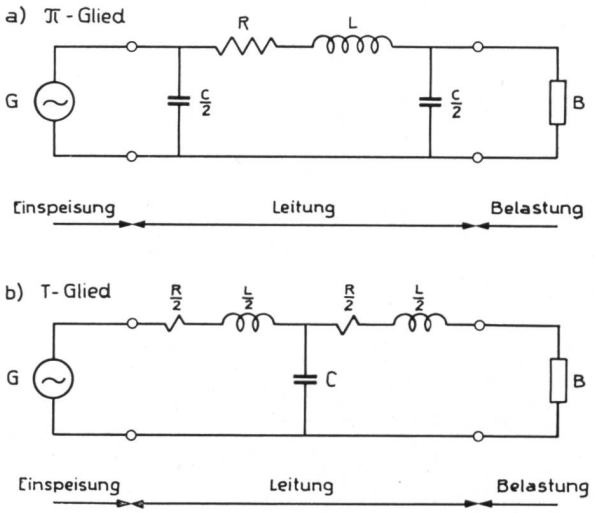


Bild 4 Ersatzschaltbild einer Hochspannungsleitung
R Ohm'scher Widerstand
L Induktivität der Leitung
C Kapazität der Leitung
G Generator
B Belastung

satzkreisen wird nun auf der einen Seite Leistung eingespiesen und auf der andern Seite eine Belastung angehängt. Damit erhält man ein ziemlich getreues Abbild der Verhältnisse bei der Energieübertragung.

Jedes der drei verwendeten Schaltelemente, mit dem Fachausdruck Impedanz genannt, übt einen spezifischen Einfluß auf die Energieübertragung aus. Die Wirkung der Induktivität in Bild 4 kennen wir von Drosseln und Transformatoren her. Diese konsumieren Blindleistung und erzeugen einen Spannungsabfall zwischen Leitungsanfang und Leitungsende. Die Kondensatoren erzeugen Blindleistung und vermindern den Spannungsabfall auf der Leitung. Die Kapazität (Kondensatoren) versucht demnach den störenden Einfluß der Induktivität aufzuheben. Aus dieser Tatsache ist leicht ersichtlich, daß dem Verhältnis zwischen Induktivität und Kapazität in der Energieübertragung eine große Bedeutung zukommt. Nebst der Betriebsspannung ist dieses Verhältnis maßgebend für die Übertragungsfähigkeit auf der Hochspannungsleitung. Der Ausdruck

$$P_N = \frac{U^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

in welchem die drei wichtigsten Größen der Energieübertragung auf einfache Art miteinander verknüpft sind, ist deshalb für jede Leitung charakteristisch.

Es bedeuten:

U Betriebsspannung
L Größe der Induktivität
C Größe der Kapazität
P_N natürliche Leistung

Die Besonderheit der natürlichen Leistung besteht darin, daß bei ihrer Übertragung auf einer Leitung die Spannungen auf der Speise- und auf der Belastungsseite gleich sind. Die Energieübertragung erzeugt also in diesem Falle keinen Spannungsabfall, da die Kapazität der Leitung die Wirkung der Induktivität aufhebt. Wird eine kleinere Leistung übertragen, so tritt auf der Belastungsseite eine Spannungserhöhung ein. Übersteigt die Leistung den natürlichen Wert, so ergibt sich auf der Belastungsseite eine Spannungssenkung. Da selbstverständlich in einem Verbundbetrieb — schon mit Rücksicht auf die Isolationsfestigkeit der Transformatoren, Schalter und übrigen Apparate — nicht beliebige Spannungsgefälle auftreten dürfen, muß bei steigenden Belastungen nach Mitteln gesucht werden, um die natürliche Leistung zu erhöhen. Obige Formel zeigt, daß folgende Vorgehen in Betracht kommen:

1. Erhöhung der Betriebsspannung
2. Verkleinerung der Leitungsinduktivität
3. Erhöhung der Leitungskapazität

Zu diesen Maßnahmen ist folgendes zu sagen:

Die Erhöhung der Betriebsspannung läßt die Übertragungsfähigkeit einer Hochspannungsleitung rasch ansteigen. In Tabelle I sind für Hochspannungsleitungen verschiedener Spannungen einerseits die natürlichen Leistungen und andererseits die für die schweizerischen Verhältnisse als maximal zu betrachtenden Übertragungsleistungen aufgeführt.

Tabelle I

Natürliche Leistung und Übertragungskapazität von Freileitungen für verschiedene Spannungen

Betriebsspannungen in kV	Natürliche Leistung eines Stranges in MW	Ungefähre Übertragungskapazität eines Stranges in MW
50	9	25
150	60	100 ... 150
220	120 ... 155*	250 ... 325*
380	450*	600*... 1000*

* Bündelleiter

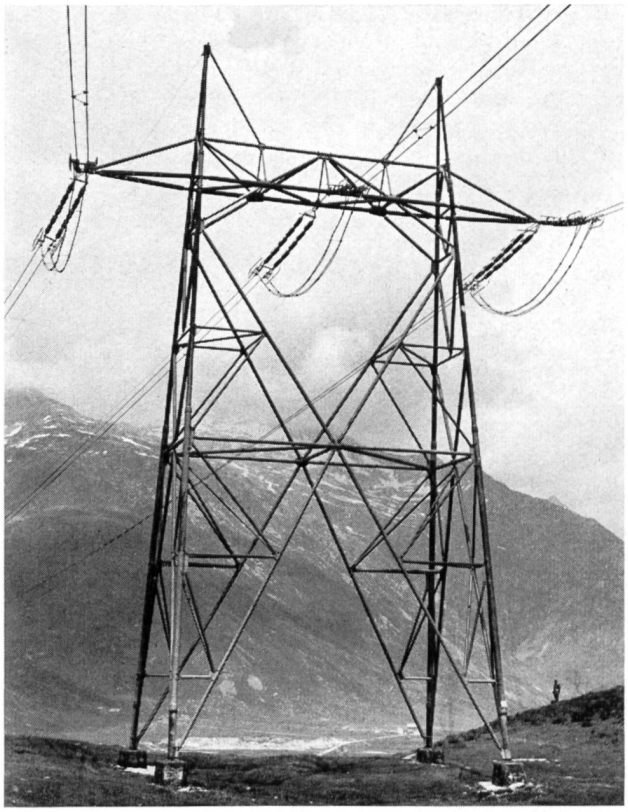


Bild 5 Winkelmast der Lukmanierleitung, 380 kV, vorläufig mit 220 kV in Betrieb (Photo Borelli, Airolo)

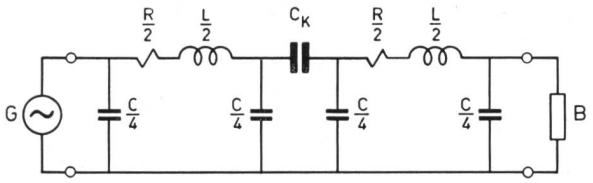


Bild 6 Ersatzschaltbild einer Hochspannungsleitung mit Seriekondensatoranlage in der Mitte der Leitung

C_k Kompensationskapazität R Ohm'scher Widerstand
G Generator L Induktivität der Leitung
B Belastung C Kapazität der Leitung

Da sich aber eine Erhöhung der Betriebsspannung unter Umständen als sehr kostspielig erweisen kann (Erhöhung der Isolation, evtl. Mastverstärkungen, evtl. Auswechseln der Leiterseile usw.), wird vorher oft versucht, die Kapazität bzw. die Induktivität im entsprechenden Sinne zu beeinflussen. So hat beispielsweise die ATEL durch den Einbau von Shunt-Kondensatoren und einem rotierenden Phasenschieber schon seit Jahren die Möglichkeit, ihrem Hochspannungsnetz etwa 70 MVar kapazitive Blindleistung und bis zu 30 MVar induktive Blindleistung abzugeben. Im schwedischen Hochspannungsnetz wurden erstmals Kondensatoren in Serie auf einer 480 km langen 220-kV-Leitung in Betrieb genommen. Da die Erfahrungen sehr gut waren, wurden in der Folge im schwedischen 380-kV-Netz Seriekondensatorenanlagen eingesetzt.

In Bild 6 ist das Ersatzschaltbild einer Hochspannungsleitung mit einer Seriekondensatorenanlage in der Mitte der Leitung schematisch dargestellt. Zu beachten ist, daß die Wirkung der Reihenkondensatoren jener der Leitungsinduktivität entgegengesetzt ist. In der Praxis werden die Kompensationsgrade zwischen 20 und 40 % gewählt. Größere Werte können speziell bei kleinerer Wirkbelastung eine störende Ferroresonanz-Schwingung nach sich ziehen.

Kapazität und Induktivität einer Leitung hängen hauptsächlich von der geometrischen Anordnung der Leiterseile ab. Diese Zusammenhänge sind eingehend untersucht worden; vor allem beim Übergang auf die hohen Betriebsspannungen von 220 und 380 kV erwiesen sich die bisher verwendeten Leiteranordnungen als unzweckmäßig. Markt und Mengele wiesen bereits 1932 erstmals nach, daß durch das Aufspalten eines jeden Phasenleiters in zwei bis vier Teilleiter («Bündelleiter») von ähnlichem Summenquerschnitt die natürliche Leistung stark erhöht und die Übertragungsfähigkeit einer Leitung bis zu 50 Prozent gesteigert werden kann. Durch die Verwendung mehrerer Teilleiter pro Phase erhöht sich nämlich einerseits die Betriebskapazität der Leitung, während anderseits deren Induktivität gesenkt wird. Diese Erkenntnis bedeutet bestimmt einen Wendepunkt in der Geschichte der Hochspannungs-Freileitungen, denn es macht den Anschein, daß in Zukunft 220-kV- und 380-kV-Freileitungen nur noch als Bündelleitungen gebaut werden. Wenn diese praktisch erst in den letzten Jahren zur Ausführung gelangt sind, so liegt der Grund darin, daß in der Schweiz einerseits die Meinungen über die Wirtschaftlichkeit der Bündelleiter lange Zeit geteilt waren (hauptsächlich wegen den gefürchteten starken Zusatzlasten, verursacht durch Schnee und Eis) und anderseits Leitungen für eine Betriebsspannung von 380 kV, bei der die Überlegenheit der Bündelleiter speziell in Erscheinung tritt, erst vor kurzer Zeit in Betrieb gekommen sind.

Außer der Erhöhung der natürlichen Leistungen weisen die Bündelleiter noch andere wesentliche Vorteile auf. Die Koronafestigkeit der Leitung wird fühlbar gehoben. Bekanntlich treten bei steigender Spannung an einem Leiterseil elektrische Entladungen auf, welche sich als empfindliche Energieverluste (Koronaverluste) bemerkbar machen und unerwünschte Quellen von Radiostörungen bilden können. Es gibt nun auch hier verschiedene Möglichkeiten, die Koronaverluste und Radiostörungen herabzusetzen. Früher wurde die Lösung darin gesehen, den Leiterquerschnitt unter Verwendung von Hohlseilen zu vergrößern; heute ist man zur Erkenntnis gelangt, daß sich auch dieses Problem viel wirtschaftlicher mit Bündelleitern lösen läßt. Da sich Radiostörungen, verursacht durch die elektrischen Entladungen, viele Kilometer weit der Leitung entlang fortsetzen, hat dieses Problem speziell in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen.

In den Bildern 9 und 10 sind einige interessante Resultate der Messungen in der Koronareuse Gösgen, der Forschungskommission für Hochspannungsfragen, graphisch dargestellt. In Bild 9 sind die Koronaverluste in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen, wobei die Messungen der Einleiter-Anordnung 1×550 mm² Aldrey-Seil pro Phase der Zweierbündel-Anordnung 2×550 mm² pro Phase gegenübergestellt werden. In Bild 10 ist die Radiostörspannung dargestellt, wiederum unter Gegenüberstellung der beiden genannten Leitersysteme.

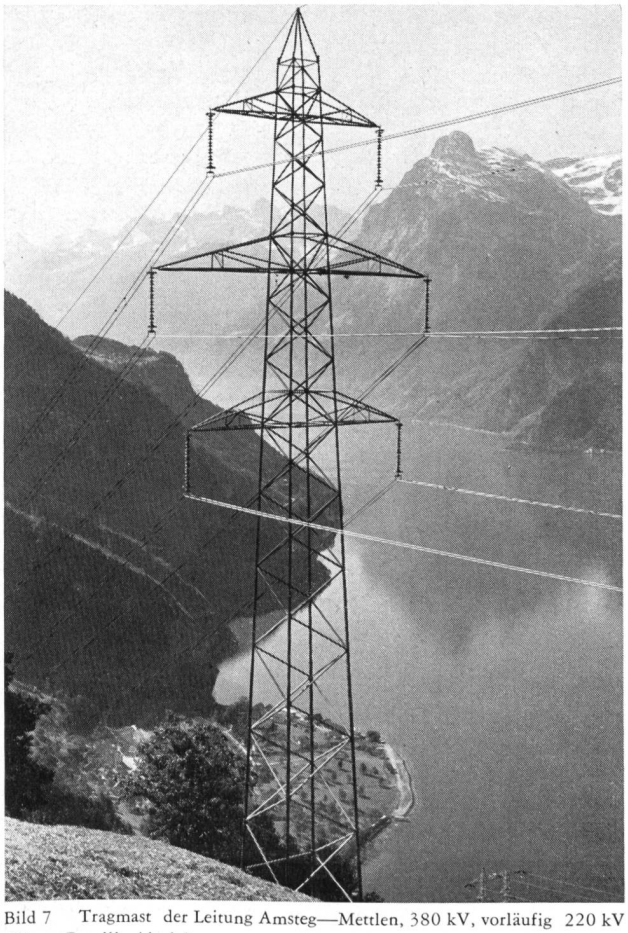


Bild 7 Tragmast der Leitung Amsteg—Mettlen, 380 kV, vorläufig 220 kV (Photo Borelli, Airolo)

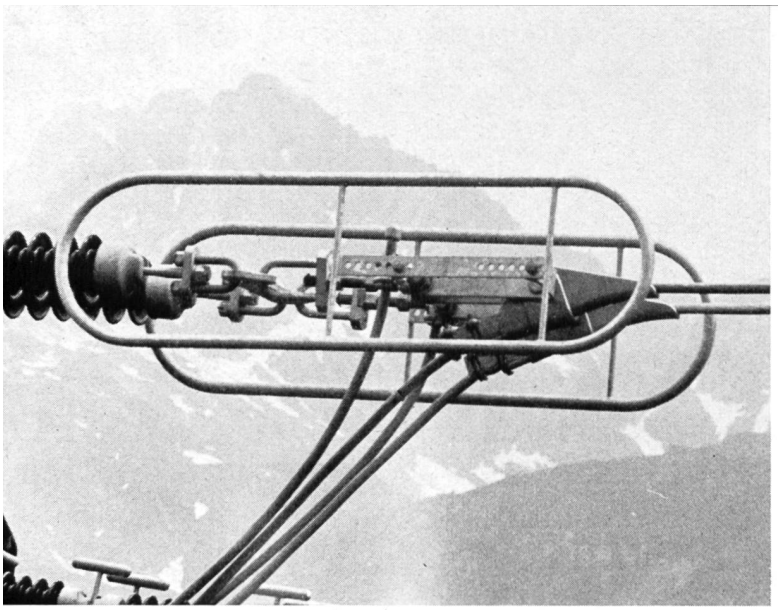


Bild 8 Abspannvorrichtung für Bündelleiter; Gotthardleitung, 380 kV, vorläufig 220 kV (Photo Borelli, Airolo)

Es geht deutlich hervor, daß sich bei Regen und einem Betrieb mit 380 kV ungefähr dieselben Verhältnisse einstellen werden wie heute bei einer Betriebsspannung von 220 kV.

Es sei hier noch bemerkt, daß die ATEL als erstes Unternehmen in der Schweiz in den Jahren 1957 bis 1959 die beiden Alpenleitungen über den Lukmanier und den Gotthard mit Zweierbündel ausgerüstet und dadurch die Übertragungskapazität um 30 % gesteigert hat.

Nachdem in den bisherigen Ausführungen einiges über die Bedeutung von Induktivität, Kapazität und natürlicher Leistung sowie deren Zusammenhänge gesagt worden ist, sei noch kurz auf den Ohmschen Widerstand R der Leitung hingewiesen. Er verursacht bei der Übertragung die Energieverluste, übt hingegen bei größeren Distanzen in einem Drehstromsystem keinen wesentlichen Einfluß auf den Spannungsabfall aus. Falls für die Dimensionierung der Leiterquerschnitte nicht die Koronaverluste und Radiostörungen maßgebend sind, ist den Phasenleitern mit den wirtschaftlichsten Querschnitten der Vorzug zu geben.

Bei Störungen ist es wichtig, die thermischen Grenzdaten zu kennen, da in diesem Falle die Energieversorgung auch bei einem zu großen Spannungsgefälle aufrecht erhalten werden muß. Von Bedeutung ist dabei, daß die Übertragungsverluste mit dem Quadrat der Belastung, also außerordentlich stark, steigen. In der Praxis werden selbstverständlich jeweils normierte Querschnitte verwendet. Aus diesen Gründen sowie aus Gründen der Spannungshaltung dürfte es speziell bei Höchstspannungsleitungen unzweckmäßig sein, die Leiterseile bis zu ihrer thermischen Grenze zu beanspruchen.

Die Freileitungen durchziehen das freie Gelände über Hunderte, ja sogar über Tausende von Kilometern. Ihre Leiter sind schutzlos den atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt. Man muß deshalb versuchen, ihnen mit tragbaren Mitteln eine ähnliche Betriebssicherheit zu verschaffen, wie dem übrigen elektrischen Material. Als Ursachen, welche den stationären Betrieb der Freileitungen stören, sind in erster Linie die direkten oder indirekten Blitzeinschläge in die Leitungen zu nennen. Aus diesen Gründen wurde im Laufe der letzten Jahre an der Erforschung der Charakteristiken der Blitze intensiv gearbeitet. Es sei hier speziell die Station auf dem San Salvatore erwähnt, welche unter der bewährten Leitung von Professor Dr. Karl Berger steht und wo bemerkenswerte Ergebnisse erzielt wurden. Auf Grund dieser Forschungen glauben wir, die Haupteigenschaften der Blitze kennen gelernt zu haben, womit der Ausgangspunkt geschaffen wurde, um die Blitzstörungen wirksam zu bekämpfen.

Der Blitzeinschlag an sich beschädigt weder die Leitung noch die Isolatoren. Wenn Zerstörungen festgestellt werden, so rühren diese fast immer von dem durch den Blitz eingeleiteten Kurzschluß- oder Erdschlußlichtbogen her. Eingehende Versuche sowie auch die Betriebserfahrung haben gezeigt, daß Blitzschäden vermieden werden, wenn der Lichtbogen innerhalb sehr kurzer Zeit, d. h. innerhalb von 0,1 bis 0,15 Sekunden, gelöscht werden kann. Gelingt es, die Leitung nach einem Blitzeinschlag innerhalb dieser Zeit außer Betrieb zu setzen, so tritt wohl ein Unterbruch im Energietransport ein, hingegen wird die Leitung in keiner Weise beschädigt. Obschon damit Schäden durch Blitzeinwirkung auf der Leitung vermieden werden können, darf man sich natürlich mit dem Abschalten wichtiger Versorgungsadern während des Betriebes nicht zufrieden geben.

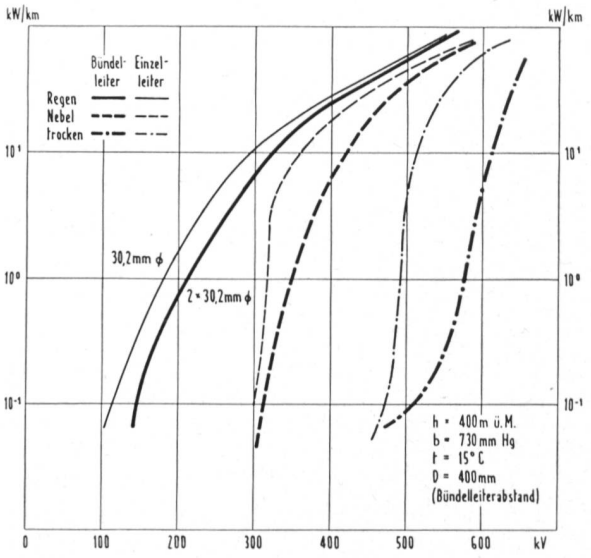


Bild 9 Koronaverluste. Vergleich zwischen Bündel- und Einzelleitern

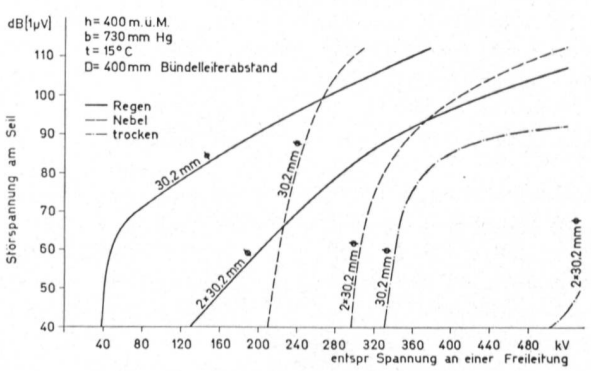


Bild 10 Radiostörspannung. Vergleich zwischen Bündel- und Einzelleitern

Im Prinzip ist die Behebung dieser Betriebsstörung sehr einfach, indem man die Leitung nach einem kurzen Betriebsunterbruch automatisch wieder zuschaltet. Eines der wichtigsten Probleme dieser sogenannten Schnellwiedereinschaltung ist die Festlegung der spannungslosen Pause. Wichtige Gründe verleiten dazu, diese möglichst lang zu machen, ebenso wichtige Gründe sprechen jedoch für eine möglichst kurze Unterbrechungszeit. Die Lösung besteht hier in einem Kompromiß, welcher sich aus folgenden Überlegungen ergibt:

Nach der beidseitigen Abschaltung des defekten Leitungsstückes erlischt der Lichtbogen sofort. Es bleiben jedoch ionisierte Gase zurück, welche die Lichtbogenstrecke leitend halten. Erst wenn die Entionisation genügend fortgeschritten ist, darf wieder zugeschaltet werden. Bei zu frühem Wiedereinschalten würden Rückzündungen entstehen. Man ist sich darüber einig geworden, daß in den weitaus häufigsten Fällen bei einer Pausenzeit von 0,2 bis 0,3 Sekunden die Entionisierung soweit fortgeschritten ist, daß ein Rückzünden nach erfolgter Wiedereinschaltung nicht mehr zu befürchten ist. Anderseits darf die Pausenzeit nicht zu sehr ausgedehnt werden. Bei Parallelbetrieb zwischen verschiedenen Kraftwerken werden durch die sogenannten synchronisierenden Kräfte die verschiedenen Generatoren auf der genau gleichen Drehzahl gehalten. Bei einem Unterbruch der Verbindungsleitung zweier Werke fallen diese synchronisierenden Kräfte weg; zudem werden im Moment des Kurzschlusses die Generatoren der beiden Kraftwerkgruppen entsprechend ihren ungleichen Trägheitsmomenten verschieden beschleunigt. Mit andern Worten heißt dies, daß schon nach kurzer Zeit ein Parallelschalten der Kraftwerke nicht mehr ohne weiteres möglich ist. Wird die Leitung aber nach sehr kurzer Zeit wieder zugeschaltet, so sind die Drehzahlen der beiden Kraftwerkgruppen noch nicht allzu verschieden, womit eine Schnellwiedereinschaltung erfolgreich sein kann. Sowohl spezielle Berechnungen als auch die Erfahrung haben gezeigt, daß bei einer Wahl der Entionisierungszeit von 0,2 bis 0,3 Sekunden die Schnellwiedereinschaltung von Erfolg gekrönt ist. Mit dieser Methode ist es nun gelungen, die Leitungen gegenüber Blitzeinwirkungen praktisch unempfindlich zu machen. Sollte allerdings die Störungsursache eine dauernde sein, wie der Riß eines Leiterseiles oder der Sturz eines hohen Baumes in die Leitung, so öffnet sich der Schalter nach der ersten Wiedereinschaltung automatisch wieder und bleibt dann definitiv geöffnet.

Der Vollständigkeit halber seien noch einige Worte über die Gleichstromübertragung gesagt. Seit der Inbetriebnahme einer Leitung zwischen Lyon und Moutier im Jahre 1906 (System Thury) ist dieses Problem immer wieder diskutiert worden. Die Vorteile der Gleichstromübertragung sind die folgenden:

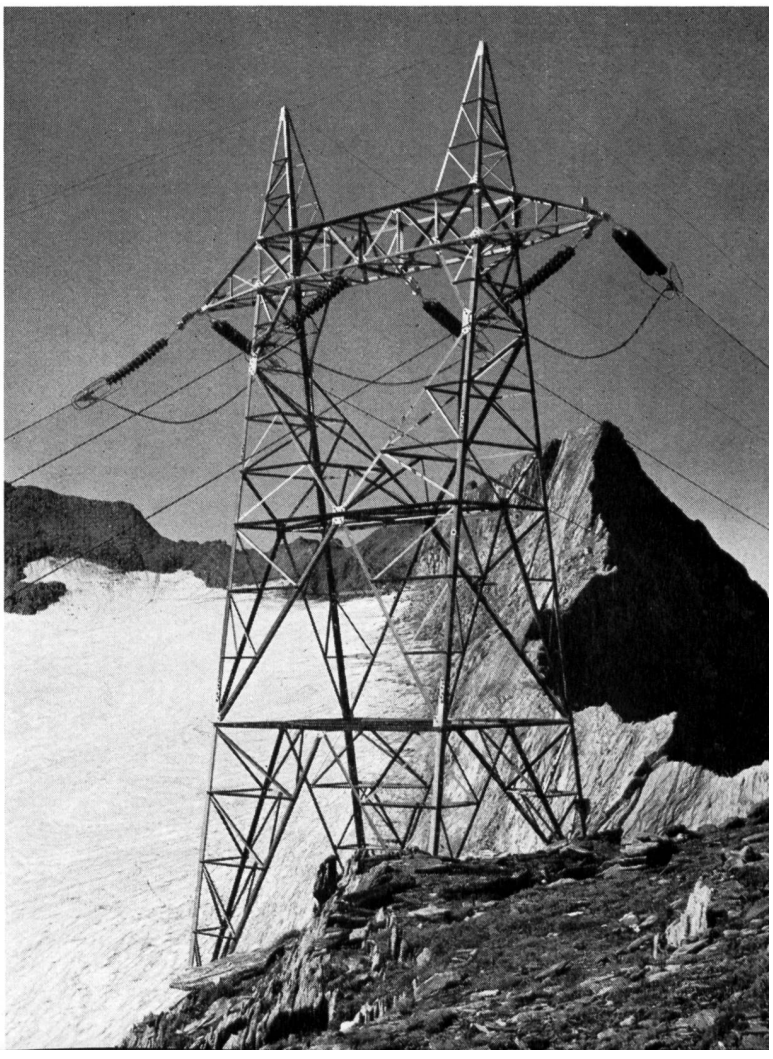
1. Stabilitätsprobleme fallen weg.
2. Bei gleicher mittlerer Nennspannung kann die Feldstärke an der Oberfläche der Leiterseile kleiner gehalten werden, womit sich die Koronaverluste und auch die Radiostörungen reduzieren.
3. Kein Blindleistungsproblem.
4. Möglichkeit der Verlegung von Kabel für sehr hohe Spannungen über größere Strecken.

Eingehende Untersuchungen haben aber gezeigt, daß sich — verglichen mit der Drehstromübertragung — die Gleichstromübertragung erst bei sehr großen Distanzen (über 400 km) als wirtschaftlich erweist. Erschwerend fällt für die Wirtschaftlichkeit ins Gewicht, daß im allgemeinen die Rückleitung wegen der Korrosionsgefahr in unsern Verhältnissen nicht über die Erde erfolgen kann. Als neuere realisierte Gleichstromübertragung ist die 1954 in Betrieb genommene 100-kV-Kabelverbindung vom schwedischen Festland zur Insel Gotland zu nennen. Bei einer Entfernung von 100 km beträgt die übertragene Leistung 20 MW. Da in diesem Falle ein übliches Kabel für Wechselspannung nicht in Frage kam, wurde trotz der relativ kurzen Distanz die Gleichstromübertragung angewendet.

*

Wenn wir noch einen Blick auf die neueste Entwicklung werfen, stellen wir fest, daß auf dem europäischen Kontinent bereits in Schweden, Frankreich, Deutschland und Rußland 380-kV-Leitungen in Betrieb stehen. In der Schweiz werden wir in kürzester Zeit für den Abtransport der Bündner Energie in Richtung Zürich eine erste Leitung mit einer Betriebsspannung von 380 kV verwirklichen. Doch schon hört man von schwedischen und russischen Projekten, die eine Fernübertragung in 500 kV, ja sogar 750 kV vorsehen. In unseren Verhältnissen dürfte allerdings für die voraussehbare Zukunft eine höchste Betriebsspannung von 380 kV genügen.

Bild 11 Abspannmast auf der Bocchetta di Formazzora (2700 m ü.M.) der Grandinagia-Leitung, der höchsten Alpenleitung der Schweiz, 220 kV; im Hintergrund der Cavagnoligletscher und der Pizzo San Giacomo (Photo BKW)



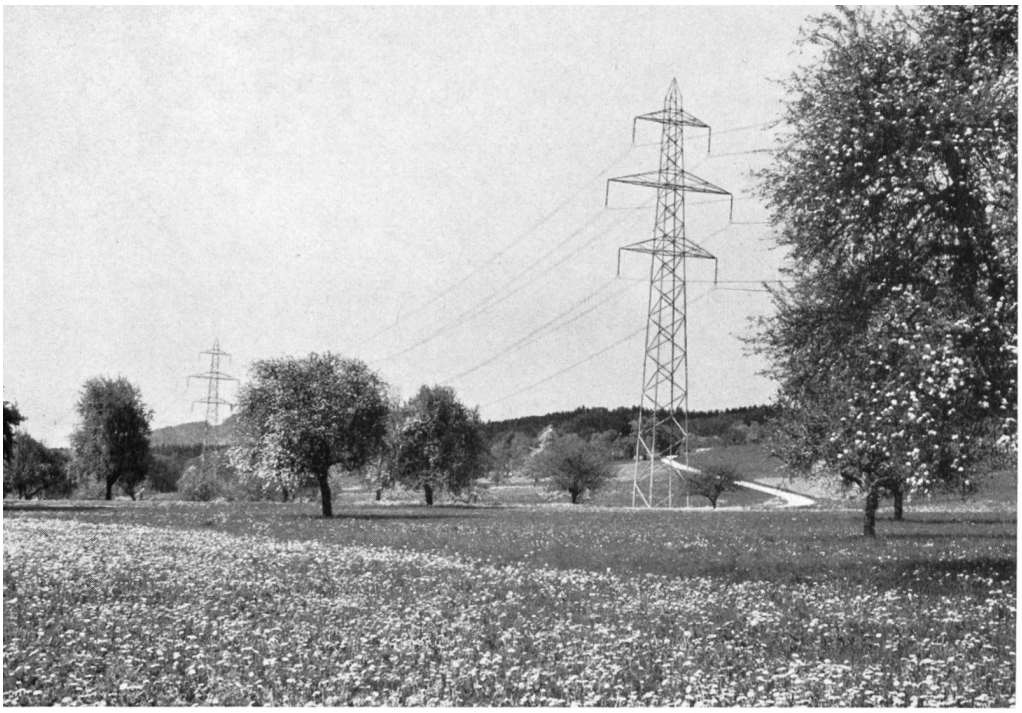


Bild 12
Leitungsführung oberhalb Geuensee der 380-kV-Leitung Mettlen—Gösgen, vorläufig mit 220 kV in Betrieb
(Photo ATEL)

Abschließend sei bemerkt, daß das Eidg. Starkstrominspektorat für die nähere Zukunft, d. h. bis zum Endausbau unserer Wasserkraftanlagen, in einem Plan die im Rahmen des internationalen Verbundbetriebes noch zu verwirklichenden Höchstspannungsleitungen zusammengefaßt hat. Wie sich der Leitungsbau in der weitern Zukunft, speziell unter Berücksichtigung allfälliger Atomkraftwerke, die zum größten Teil in der Nähe der Verbrauchszentren entstehen dürften, entwickeln wird, kann heute noch nicht abgesehen werden.

Energiewirtschaft in Gegenwart und Zukunft

Dr. h. c. *A. Winiger*, Zürich[1]

DK 620.9

I.

Ein Bewohner Westeuropas oder Nordamerikas bedarf im Mittel einer täglichen Nahrungsmenge, deren Energieinhalt rund 3000 Kalorien entspricht. Die erforderlichen Lebensmittel müssen erzeugt, gelagert, transportiert und verteilt werden. Diese Leistungen sind nur mit Hilfsmitteln durchführbar, die ihrerseits Energie absorbieren. Damit der zivilisierte Mensch sich vor Kälte schützen, angemessen kleiden, dezent wohnen, arbeiten, reisen und sich erholen kann, müssen ihm weitere Mengen von Energie zur Verfügung gestellt werden. Bezeichnen wir das in der täglichen Nahrung enthaltene Quantum an Rohenergie mit Eins, so erfordert die Befriedigung der übrigen Bedürfnisse Energiemengen, die weit über dieser untersten Grenze liegen. Die USA stehen an der Spitze mit einem zusätzlichen Energieverbrauch pro Kopf der Bevölkerung und pro Tag von 50 Einheiten, während Westeuropa und die UdSSR rund 14 Einheiten benötigen; der Rest der Welt muß sich im Mittel mit nur 3 Einheiten begnügen. Diese Vergleiche sind sehr aufschlußreich. Sie beleuchten die ungeheure zivilisatorische Leistung, die den vor Hunderttausenden von Jahren lebenden primitiven Menschen vom heutigen unterscheidet. Sie zeigen aber auch die Unterschiede zwischen den sogenannten entwickelten und unterentwickelten Gebieten unserer Erde. Den USA mit ihrem enormen Energieverbrauch stehen die großen Völker Asiens gegenüber, die erst am Beginn der Industrialisierungsperiode stehen und deren größte Sorge zur Zeit noch darin besteht, den Hunger zu bekämpfen. Es steht außer allem Zweifel, daß unsere hochgezüchtete industrielle Zivilisation nicht denkbar wäre ohne die Hilfe der riesigen Energiemengen, die uns von der Natur zur Verfügung gestellt werden und die direkt oder indirekt auf die wärme- und lichtspendende Sonne zurückgehen, die sie ihrerseits aus Kernumwandlungsprozessen erzeugt.

Bevor ich näher auf die uns dargebotenen Energiequellen eingehe, gestatten Sie mir — auf die Gefahr hin, bereits Bekanntes zu wiederholen — über den Begriff der Energie als solcher einige Worte zu verlieren. In einer Rektoratsrede an der ETH über Energie hat Herr Professor Tank am Schluß seines Vortrages eine Definition gegeben, die den komplexen Charakter dieser Größe ins volle Licht setzt. Er sagte: «Energie ist zugleich höchste Realität und äußerste Abstraktion. Für den Physiker ist sie eine durch Messung gewonnene Erfahrung, für den Mathematiker eine Rechengröße, für den Kaufmann Reichtum und schließlich für uns alle, wie der ganze Schöpfungsplan, — ein Wunder». Wir wissen heute, daß Energie und Materie gleichen Wesens sind und daß in den unermeßlichen Weiten des Weltalls Umwandlungen riesigen Ausmaßes zwischen diesen Bausteinen des Universums stattfinden, wobei die Summe aller im Weltall vorhandenen Energie und Masse sich nicht verändert. Mit anderen Worten entspricht jeder Zunahme der Energie eine dem Aequivalenzgesetz Einsteins entsprechende Verminderung der Masse und umgekehrt. Die Energie kann in verschiedenen Formen wirksam werden. Als mechanische Arbeit

[1] Nach einem Vortrag vom 20. Januar 1960 in der Zürcher Volkswirtschaftlichen Gesellschaft