

Stand der Technik im Leitungsbau;  
Freileitungen und Kabel, Möglichkeiten und Formen

(Karl Ranke)

1. Einleitung

Aufgabe der Energieversorgung

Probleme der Verteilung (zeitgleich, preiswert, Physik, Sicherheit)

Freileitung/Kabel

Stromwärme Spannungsebenen

Netze

2. Freileitung

Grundlage (Isoliermittel, Abstände, Kühlung)

Bauformen nach Spannungsebenen gegliedert

Maste und Leiter

Mehrfachsysteme

3. Kabel

Grundlagen (Isoliermittel, Kühlung, Physik)

Bauformen nach Spannungsebenen

Kabelverlegung

Sonderbauarten

SF<sub>6</sub>-Rohrkabel

Kryokabel

Supraleitung

Wenn wir uns mit dem Stand der Technik im Leitungsbau beschäftigen wollen und nicht die nur für den Spezialisten wichtigen Gesichtspunkte technischer Ausführungsformen dabei im Auge haben, müssen wir uns zunächst kurz mit der grundsätzlichen Aufgabenstellung der Elektrizitätsversorgung befassen.

Die Elektrizitätsversorgung hat die Aufgabe, das Land preiswert und sicher mit elektrischer Energie zu versorgen. Dies bedeutet, daß sowohl in der Erzeugung als auch in der Verteilung von elektrischer Energie nach Lösungsmöglichkeiten gesucht werden muß, die zu möglichst niedrigen Investitionskosten und niedrigen Betriebskosten führen, denn beide Faktoren haben einen erheblichen Einfluß auf den Strompreis.

Um die Forderungen der Versorgung mit elektrischer Energie in der gewünschten Form und Umfang zu erfüllen, sind eine Reihe von Bedingungen zu beachten, die den Elektrizitätsversorgungsunternehmen Schwierigkeiten bereiten. Hier sollen nur die herausgegriffen werden, die für unser Thema von besonderer Bedeutung sind. So müssen z.B. die Erzeugung und der Verbrauch von elektrischer Energie zu jedem Zeitpunkt gleichgroß sein, da die elektrische Energie praktisch nicht speicherbar ist. Aus dieser Eigenschaft erwächst die Notwendigkeit der unmittelbaren Verbindung zwischen Verbrauchs- und Erzeugungsstellen. Die Energie ist also leitungsgebunden, was entsprechende Wege und Einrichtungen verlangt.

Entlang dieser Wege entstehen Übertragungsverluste, die letztlich die Art dieser Wege mitbestimmen und ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Außerdem hat der in der Stromversorgung allgemein verwendete Wechselstrom noch einige weitere Eigenschaften, auf die hier nur insoweit eingegangen werden soll, als dies für das Verständnis der technischen Lösungen notwendig ist. Als wichtigste Besonderheit sei die Blindleistung erwähnt, die nach außen, d.h. für den Verbraucher nicht in Erscheinung tritt. Sie begrenzt aber die Übertragungsfähigkeit von Leitungen und spielt bei den verschiedenen Ausführungsformen der Übertragungswege eine wichtige Rolle, wie wir noch sehen werden.

Elektrische Energie soll aber nicht nur zu jeder Zeit und in jeder gewünschten Menge zur Verfügung stehen, sondern soll auch sicher sein. Wir alle kennen die Folgen, die eintreten, wenn die Stromversorgung, was ja Gott sei Dank höchst selten eintritt,

einmal unterbrochen wird. In solchen Momenten wird uns bewußt, wie sehr unser heutiges Leben mit dem Einsatz von elektrischer Energie verbunden ist. Die Stromversorgungsunternehmen streben deshalb nach Lösungen, die Unterbrechungen in der Versorgung so unwahrscheinlich und so kurz wie möglich machen.

Nun soll noch auf die verschiedenen Versorgungsstufen eingegangen werden. Wie gesagt, dienen Leitungen der Übertragung von elektrischer Energie. Da dies nicht ohne Verluste geschehen kann, wird es das Bestreben der planenden Ingenieure sein, diese Verluste so gering wie möglich zu halten. Die Verluste sind zum größten Teil nur von dem im Leiter fließenden Strom und dem Leiterquerschnitt abhängig und treten in Form von Wärme und Spannungsabfall auf. Der Stromfluß kann daher nicht beliebig gesteigert werden. Soll die auf einer Strecke zu übertragende Leistung angehoben werden, kann entweder der Strom gesteigert werden, was zusätzliche Verluste ergibt, oder die Spannung. Der letztere Weg wird heute allgemein beschritten. Die Leiterquerschnitte bleiben damit wirtschaftlich und technisch beherrschbar. Es ist in diesem Rahmen nicht möglich, näher auf diese Zusammenhänge einzugehen. Wir halten nur fest, je größer die zu übertragende Leistung, um so höher die Übertragungsspannung. Dieser Grundsatz hat zur Ausbildung der heute üblichen Spannungsstufen in den Übertragungsnetzen geführt. Es darf hier darauf hingewiesen werden, daß diese Darstellung natürlich eine starke Vereinfachung ist.

Wie sind die Aufgaben auf die einzelnen Spannungsstufen verteilt? Das Niederspannungsnetz mit einer Spannung von 380 V dient der kleinräumigen örtlichen Versorgung der Verbraucher in einem Umkreis von 0,5 - 3 km um die Einspeisestelle. Das überlagerte Mittelspannungsnetz, heute meist mit 10 bis 20 kV betrieben, versorgt mehrere Ortsnetze in einem Umkreis von 2 - 10 km um die Einspeisestellen. Der Abstand kann gelegentlich auch größer sein. Darüber spannt sich ein 110-kV-Hochspannungsnetz, das im Falle des Landes Bayern landesweit zusammengeschaltet ist und in entsprechenden Umspannwerken die Leistung aus dem Höchstspannungsnetz oder den Kraftwerken bezieht und an das Mittelspannungsnetz verteilt.

Das bereits genannte Höchstspannungsnetz mit Betriebsspannungen von 220 und 380 kV dient der landesweiten Versorgung und der Einbindung des Landesnetzes in den deutschen und internationalen

Verbund. So ist zu ersehen, daß jedes dieser Netze im Prinzip eine eigene Aufgabe besitzt und daß nicht beliebig zwischen den Stufen gewechselt werden kann, wenn es gerade gewünscht wird.

Nach diesen Vorbemerkungen wollen wir uns mit den Möglichkeiten der Übertragung von elektrischer Energie befassen, die uns heute zur Verfügung stehen. Dabei wird auch kurz auf die Besonderheiten einzugehen sein.

Grundsätzlich stehen für die Stromübertragung durch Leitungen zwei Systeme zur Verfügung, die Freileitung und das Kabel. Beiden ist gemeinsam, daß der zur Übertragung notwendige metallische Leiter gegenüber der Umgebung isoliert geführt wird. In allen anderen Punkten unterscheiden sich diese Systeme wesentlich.

Wenden wir uns als erstes der Freileitung zu.

Das wesentliche Kennzeichen dieser Bauweise ist der blanke, frei in der Luft verlegte metallische Leiter, der an in Reihe stehenden Stützpunkten, den Masten, aufgehängt ist. Am Anfang und Ende einer Leitung und bei jeder Richtungsänderung wird er an sogenannten Abspannmasten aufgehängt. Diese Maste nehmen die Zugspannung in Leitungsrichtung auf und sind kräftiger als die dazwischen liegenden Tragmaste. Das Isoliermittel zwischen den Leitern ist Luft, an den Masten ist der Leiter durch Keramik-, Glas- oder Kunststoffisolatoren angehängt und damit auch zur Erde hin isoliert.

Die Abmessungen einer Freileitung werden durch die zur Isolation notwendigen Luftstecken zwischen den Leitern und der Erde bestimmt. Je höher die Spannung, um so größer die jeweiligen Abstände, zunehmend von 380 V bis 380 kV. Ferner sind ein wesentliches Kriterium die Bodenabstände, die erforderlich sind, um gefahrlos unter der Leitung durchzukommen oder Hindernisse zu überqueren. Für diese Abstände gibt es Vorschriften, die eingehalten werden müssen.

Das Isoliermittel Luft hat einige sehr nützliche Eigenschaften, die der Freileitung zugute kommen. Erstens ist es kostenlos überall vorhanden, was sich bei den Investitionskosten auswirkt. Zweitens bewirkt die fast immer vorhandene Luftströmung eine intensive Kühlung des blanken Leiters, die es erlaubt, vor allem in der kalten Jahreszeit kurzfristige Belastungsspitzen, auch im Überlastbereich, zuzulassen, ohne den Leiter unzuläs-

sig zu erwärmen. Die dritte, sehr wichtige Eigenschaft, das Isoliermittel ist selbstheilend. Wenn aus irgendwelchen Gründen, z.B. Blitzschlag, ein Durchbruch der Isolation erfolgt, ist nach kürzester Zeit das volle Isoliervermögen wieder vorhanden. Bei Freileitungen höherer Spannung können so bis zu 98 % aller Fehler durch eine kurzfristige Unterbrechung (einige Zehntelsekunden) beseitigt werden, ohne besondere Reparaturmaßnahmen zu ergreifen. Nachhaltige Zerstörungen an den Leitungen sind nicht zu erwarten. Letztlich ist der offen verlegte Leiter jederzeit gut zu beobachten, evtl. Schäden sind kurzfristig zu finden und zu beheben.

Das elektrische Übertragungsverhalten ist bei Freileitungen relativ am besten. Die schon erwähnte zur Übertragung erforderliche Blindleistung ist niedrig, die Leiterquerschnitte können leicht den Bedürfnissen angepaßt werden und auch die sonstigen elektrischen Eigenschaften sind gut zu beherrschen. Aus diesen kurzen Ausführungen mag hervorgehen, warum die Freileitung die beste Möglichkeit zur Energieübertragung ist.

Nun noch einige Bemerkungen zu den verschiedenen Bauformen, die heute im Freileitungsbau angewendet werden.

Der Bau von Starkstromfreileitungen ist eine Entwicklung mit einer fast hundertjährigen Tradition und alle Entwicklungen haben das Prinzip nicht verändert. Für die verschiedenen Anwendungen wurden je nach Spannungsebene Mastformen entwickelt, die jeweils möglichst günstige Lösungen bieten.

So findet für Niederspannung der Holzmast mit angeschraubten Isolatoren Anwendung, in dicht bebauten Gebieten der Dachständer auf dem Hausdach. Die Maste werden meist ohne besondere Gründung entsprechend tief in den Boden eingegraben und Richtungsänderungen durch Zuganker aufgefangen. Die Mastabstände betragen etwa 80 m. Als Leiter wird Kupfer- oder Aluminiumseil verwendet mit Querschnitten von 25 - 100 mm<sup>2</sup>.

Im Mittelspannungsnetz, wo meist Einfachleitungen, d.h. nur ein Übertragungssystem, im Gegensatz zur Doppelleitung, gebaut werden, herrschen der Holz- oder Betonmast mit Querträger am Kopf vor. An Winkelpunkten oder bei schweren Leitungen trifft man auch Stahlgittermaste an. Die Maste werden mit Blockfundamenten im Boden verankert. Die Mastabstände liegen zwischen 100 und 250 m. Die Leiter sind heute meist Stahlaluminiumseile mit

einem Querschnitt von 40 - 150 mm<sup>2</sup>.

Im Hochspannungsnetz werden heute meist Doppelleitungen, d.h. zwei Systeme auf einem Mast, gebaut. Die Maste sind im allgemeinen Stahlgitter mit aufgeteilten Fundamenten. Jeder Eckstiel ist getrennt gegründet. Die Mastabstände betragen etwa 250 bis 400 m je nach Leitungstyp und Geländebeschaffenheit. In einigen Fällen werden auch Betonmaste eingesetzt. Hier besteht aber eine Vielzahl von Schwierigkeiten, angefangen vom großen Gewicht der Maste, der komplizierten Gründung bis zur sehr schwierigen Besteigbarkeit im Betrieb, so daß die Anwendung nur sehr begrenzt möglich erscheint. Der Mast hat am Fuß immerhin bis zu etwa 1,5 m Durchmesser und ein entsprechendes Gewicht. Stahlrohrmaste, die auch entwickelt wurden, konnten sich aus verschiedenen Gründen nicht durchsetzen. Die Spannweiten dieser Bauformen sind im allgemeinen kürzer als dies bei Stahlgittermasten möglich ist. Als Leiter werden Stahlaluminiumseile mit Querschnitten von 100 - 350 mm<sup>2</sup>, neuerdings auch bis 600 mm<sup>2</sup>, eingesetzt.

Im Höchstspannungsnetz finden ausschließlich Stahlgittermaste Verwendung. Andere Mastformen können wegen der Abstände am Mast und deren Höhe nicht ausgeführt werden.

Als Leiter werden Stahlaluminiumseile mit Querschnitten von 300 - 600 mm<sup>2</sup> verwendet. Bei 220 kV als Einfachseil oder Bündelleiter, d.h. zwei bis vier in engem Abstand aufgehängte Leiterseile, bei 380 kV nur als Bündelleiter.

Welche Mastformen gewählt werden und welche Ausführung in Frage kommt, hängt von der jeweiligen Aufgabe der Leitung und der zu übertragenden Leistung ab.

Noch ein Wort zu den Mehrfachleitungen.

Mehrfachleitungen werden immer dann gebaut, wenn der Wunsch besteht, auf einer vorhandenen Trasse eine zusätzliche Leitung zu bauen und keine Möglichkeit gegeben ist, ein getrenntes Gestänge einzusetzen. Wie die Praxis zeigt, ist das grundsätzlich möglich, es entstehen allerdings zusätzliche Probleme beim Bau und Betrieb. Meist werden Leitungen unterschiedlicher Spannungsstufen auf einem Mast zusammengefaßt, damit werden mögliche Störungen von einer Versorgungsebene in eine andere hineingetragen. Wegen der geringen Abstände müssen bei allen Arbeiten am Mast alle Systeme der betroffenen Seite abgeschaltet werden, was logischerweise eine Einschränkung der Versorgungssicherheit bedeutet. Dazu kommt

noch aus den letzten Erfahrungen mit Eisansätzen die Gefahr der gegenseitigen Berührung durch unterschiedliche Durchhänge in den Spannfeldern. Das kann immer dann auftreten, wenn die Seile die Eislast zu verschiedenen Zeiten abwerfen. In der Kürze der Zeit kann hier nur auf einige Schwierigkeiten hingewiesen werden, ohne sie im einzelnen zu begründen.

Weiterhin ist zu bedenken, daß die Maste größer, höher und damit auch entsprechend schwerer werden. Der optische Eindruck wird dadurch sicher nicht verbessert.

Der Vollständigkeit halber soll hier noch erwähnt werden, daß in letzter Zeit mit der Entwicklung einer weiteren Form der Freileitung begonnen wurde, die im Nieder- und Mittelspannungsbereich gelegentlich angewendet werden soll. Es handelt sich um die sogenannte isolierte Freileitung. Hier wird an den Masten ein Leiter aufgehängt, der mit einer Isolierhülle umgeben ist. Dadurch sollen geringere Abstände der Leiter untereinander und gegen geerdete Bauteile möglich gemacht werden. Der Einsatz kann sich aber wegen des größeren Gewichtes und des höheren Preises nur auf Einzelfälle erstrecken, wo die Vorteile der Freileitung auf engem Raum genutzt werden sollen.

Diese Sonderbauform ist so eine Art Übergang zu der zweiten Möglichkeit der Übertragung von elektrischer Energie, dem Kabel.

Das wesentlichste Kennzeichen dieser Bauweise ist der mit Isolierstoff umhüllte metallische Leiter, der entweder einzeln oder zusammengefaßt im Boden verlegt wird. Als Isolierstoff werden, abhängig von der Bauart und der Spannung, öl- oder massegetränktes Papier oder Kunststoffe verwendet. Betrachten wir zunächst wieder einige der physikalischen Eigenschaften, die hier wichtig sind. Es ist leicht einzusehen, daß ein mit Isolierstoff umhüllter Leiter die beim Stromfluß entstehende Wärme sehr viel schlechter an die Umgebung abgeben kann als der blanke Leiter, zumal die festen Isolierstoffe meist schlechte Wärmeleiter sind. Außerdem sind die im Kabelbau verwendeten Isolierstoffe wärmeempfindlich, sie verlieren mit steigender Temperatur zunächst wenig und dann sehr schnell ihre isolierenden Eigenschaften. Daraus ist abzuleiten, daß Kabel sehr empfindlich auf Überlastungen reagieren. Wird ein Kabel zu hoch belastet, so wird es wegen der Stromwärmeverluste zu warm, es kommt irgendwann zum Durchschlag der Isolationsstrecke und damit zum Schaden. Die-

ser Schaden ist stets ein bleibender Schaden, der durch Beseitigen der Durchschlagsstelle behoben werden muß. Diesen Vorgang bezeichnet man als Wärmedurchschlag.

Ist dieser Durchschlag nur von der Stromwärme als auslösendem Moment abhängig, so gibt es noch eine weitere Form, die von besonderer Bedeutung ist. Durch den Aufbau des Kabels, bei dem in einer relativ dünnen Isolierschicht um den metallischen Leiter die gesamte Spannung abgebaut werden muß, entstehen in der Isolierschicht entsprechend hohe elektrische Beanspruchungen. Überschreitet die Spannung aus irgendeinem Grund die Festigkeit der Isolierung, führt auch dies wieder zu einem Durchbruch, der, wie beim Wärmedurchschlag, einen bleibenden Schaden zur Folge hat. Kabel sind also sowohl gegen Überlastung wegen der Stromwärme als auch gegen Überspannungen wegen der Spannungsbeanspruchung sehr empfindlich und müssen dementsprechend ausgelegt und geschützt werden.

In einem Kabel sind, wie ausgeführt, die Abstände sehr klein, die elektrischen Eigenschaften sind deshalb anders als bei Freileitungen. Die für den Leitungstransport notwendige Blindleistung ist wesentlich größer und muß in der Bilanz des Stromflusses unbedingt berücksichtigt werden. Die Blindleistung hängt sehr stark von der Betriebsspannung ab, daher ist dieser Punkt vor allem im Hoch- und Höchstspannungsbereich von besonderer Bedeutung. Auf jeden Fall wird die Übertragungsfähigkeit der Kabel beschränkt.

Sehen wir uns nun den Aufbau eines Kabels näher an.

Der Einfachheit halber soll dies an einem Einleiterkabel geschehen. Beim Mehrleiterkabel sind nur mehrere Einzelkabel in einem gemeinsamen Mantel zusammengefaßt, sonst ist der Aufbau der gleiche.

Um den metallischen Leiter aus Aluminium oder Kupfer ist eine Isolierstoffhülle gelegt, über diesen ein Bleimantel angeordnet und dann zum mechanischen Schutz ein weiterer Mantel aus Stahlband oder Stahldrähten, der mit einem Jute- oder Kunststoffmantel gegen Korrosion geschützt wird. Es würde hier sicher zu weit führen, in die Einzelheiten von Kabelkonstruktionen weiter einzudringen. Für Niederspannung und Spannungen bis 30 kV stehen heute bewährte Konstruktionen zur Verfügung, die alle eingesetzt werden können.



Für 110-kV-Hochspannungsnetze kommen in den Gebieten, wo es keine andere Lösung gibt, heute im wesentlichen zwei Bauformen, das Niederdruckölkabel und das Druckgaskabel, in Frage. Das Niederdruckölkabel ist ein Einleiterkabel, das eine ölgetränkte Papierisolation besitzt und in dem alle freien Räume ständig mit Öl gefüllt sein müssen. Dazu wird das gesamte Kabel ständig unter einem Öldruck von 3 - 5 bar gehalten. Aus dieser kurzen Beschreibung kann man bereits entnehmen, daß es sich hier um ein kompliziertes Gebilde handelt, das eine ganze Palette von Störungsmöglichkeiten bietet.

Das Gasdruckkabel besteht aus drei in ein gemeinsames Stahlrohr eingezogenen Einleiterkabeln ohne Mantel und Armierung. Das Rohr ist mit Stickstoff gefüllt, der ständig unter einem Druck von rd. 15 bar steht. Auch hier ist eine ständige Überwachung erforderlich. Seit einiger Zeit beginnt man auch im 110-kV-Bereich mit dem Einsatz von Kunststoffkabeln, um die Schwierigkeiten mit Öl oder Gas zu umgehen. Diese Kabel sind im Aufbau weniger kompliziert, mit guten elektrischen Eigenschaften, aber wegen der schlechteren Wärmeabfuhr und der empfindlichen Isolation, sie unterliegt Alterungen und ist gegen Überspannungen sehr empfindlich, im Einsatz auch begrenzt. Ferner ist die Herstellung sehr teuer.

Im Hoch- und Höchstspannungsbereich, also bei 220 kV und 380 kV werden bisher nur Niederdruckölkabel eingesetzt. Andere Bauformen, wie Kunststoffkabel, sind in der Entwicklung. Wir haben aber noch keine ausreichenden Betriebserfahrungen. Bei verschiedenen Projekten werden die in Rohren verlegten Einleiterölkabel direkt oder indirekt mit Wasser gekühlt, um eine größere Übertragungsleistung zu erreichen. Das Verfahren ist sehr umständlich und aufwendig, da entsprechende zusätzliche Einrichtungen benötigt werden.

Bevor auf die besonderen Entwicklungen im Kabelbau eingegangen wird, möchte ich noch kurz die Probleme bei der Verlegung von Kabeln streifen.

Im Nieder- und Mittelspannungsbereich ist der Einsatz von Kabeln noch relativ einfach. Ist es hier hauptsächlich ein Problem der zu übertragenden Leistung und damit des Querschnitts und des Preises, so kommen für die Anwendung im Hoch- und Höchstspannungsbereich noch elektrische Probleme hinzu. Empfindlich

gegen Überlastung, Überspannung und Beschädigungen sind alle Kabel. Da sie im Boden liegen, kann eine Beschädigung leicht auftreten, und solch eine Störung ist jedesmal ein Totalschaden. Die Fehlersuche und die Reparaturzeit sind stark von der Betriebsspannung und der verwendeten Konstruktion abhängig und nimmt mit ansteigender Spannung sehr schnell zu, da die komplizierten Konstruktionen notwendigerweise zeitaufwendigere Arbeiten erfordern. Wenn auch je nach Verlegung und Kabelart ein mechanischer Schutz über dem Kabel angebracht wird, so zeigt die Erfahrung, daß solche Maßnahmen nur sehr bedingt wirksam sind. Ein sehr wichtiger Punkt bei der Verlegung von Kabeln ist die Wärmeübertragung im Boden. Nur, wenn eine ausreichende Bodenfeuchte vorhanden ist, kann diese Wärmeübertragung erfolgen. Es muß also besonders darauf geachtet werden, daß nicht durch unzulässige Erwärmung der Boden austrocknet und damit die weitere Kühlung verhindert. Wegen dieser Probleme kann der zur Verfügung stehende Leiterquerschnitt nur teilweise ausgenutzt werden, vor allem dann, wenn mehrere Kabel parallel verlegt werden. Wie oben schon kurz gesagt, kann man durch künstliche Kühlung die Temperatur niedrig halten, eben durch Wasserrohre, die Parallel zu den Kabeln liegen und ständig mit kaltem Wasser durchströmt werden. Dieses Verfahren wurde bei innerstädtischer Hochleistungsverbindungen im Höchstspannungsbereich in Berlin und Wien angewendet.

Ein weiteres, sehr wichtiges Problem sind bei Kabeln mit Masse- oder Öltränkung die Höhenunterschiede. Das Isoliermittel wird, wenn dieses nicht durch besondere Einrichtungen verhindert wird, zum tiefsten Punkt abzufließen versuchen und erzeugt hier zusätzlichen Druck, der den Mantel beansprucht. Dafür entstehen an den höchsten Punkten Hohlräume, die zum Durchschlag führen. Bei Kunststoffkabeln ist etwas derartiges nicht zu erwarten. Wie ausgeführt, ist bei Kabeln die Wärmeabfuhr das gravierende Problem und die Schwierigkeiten wachsen mit der zu übertragenden Leistung sehr schnell an. In den letzten Jahren wurden deshalb eine Reihe von Systemen entworfen, die entweder die Wärmeabfuhr wesentlich verbessern oder die Entstehung der Verlustwärme herabsetzen oder ganz verhindern. Der erste Weg wird beim SF<sub>6</sub>-Rohrleiter beschritten, der zweite beim Kryo- oder Supraleiterkabel. Auf diese Konstruktionen soll noch kurz eingegan-

gen werden. Beiden ist allerdings gemeinsam, daß die Technik sehr aufwendig ist und nur für die Übertragung sehr großer Leistungen, um 3000 MVA pro System, interessant werden könnte.

Als erstes der Übertragungssysteme, die hier angeführt werden sollen, sei der SF<sub>6</sub>-Rohrleiter genannt. Hier wird der metallische Leiter auf Stützringen in einem mit Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) gefülltes Rohr eingebaut. SF<sub>6</sub> hat sehr gute Isoliereigenschaften, verbunden mit guter Wärmeleitung. Als Leiter wird meist ein Aluminiumrohr verwendet, das mit großem Querschnitt ausgeführt werden kann, was große Leistungsübertragungen bei relativ geringen Verlusten zuläßt. Durch die größeren Abmessungen ist der Blindleistungsbedarf erheblich geringer als bei Kabeln. Die Wärmeabführung ist sehr gut, die Umgebung muß die Verlustwärme allerdings gut aufnehmen können. Diesen Vorteilen stehen die Nachteile des komplizierten Aufbaues gegenüber, der sehr auffällig gegen Störungen ist und einer ständigen Überwachung bedarf. Der Rohrleiter ist starr und wird in Schüssen gefertigt, deren Verbindung ziemlich schwierig ist. Ferner ist der Platzbedarf sehr groß. Dieses System kann sicher nur auf kurzen Strecken eingesetzt werden, wenn einmal ausreichende Betriebserfahrungen vorliegen. Bisher bestehen nur ganz wenige Anlagen mit maximal 800 m Länge bei 380 kV Betriebsspannung.

Eine andere Entwicklung der unterirdischen Übertragung geht von der zweiten oben genannten Möglichkeit zur Leistungssteigerung aus. Durch Abkühlung des Stromleiters auf sehr niedrige Temperaturen kann sein Widerstand stark vermindert und damit die Verluste stark herabgesetzt werden. Im Kryokabel wird der Leiter durch flüssigen Stickstoff auf sehr niedrige Temperaturen, rd. -200° C oder 80° K, abgekühlt und bei dieser Temperatur betrieben. Dadurch vermindern sich Stromwärmeverluste erheblich, die Außenwand des Kabels braucht keine Wärme an die Umgebung abzugeben. Die Bodenaustrocknung wird vermieden und es können ohne Einschränkungen der Übertragungsfähigkeit mehrere Kabel parallel verlegt werden. Diesen Vorteilen stehen auch in diesem Fall sehr gewichtige Nachteile gegenüber. Die Bauart ist sehr aufwendig und erfordert eine Vielzahl von Hilfsanlagen für Kühlung, Stickstofftransport, Vakuumhaltung usw. Diese Entwicklung ist ein Übergang zum Supraleiter-Kabel und hat eigentlich bisher

keine besondere Bedeutung gewonnen.

Die Weiterentwicklung dieses Kryokabels ist das Supraleiter-Kabel. Hier wird der Effekt ausgenützt, daß in der Nähe des absoluten Nullpunktes  $0^{\circ}$  K oder  $-273^{\circ}$  C der elektrische Widerstand bestimmter metallischer Leiter praktisch verschwindet. Damit entstehen entlang der Leiter keine Stromwärmeverluste und es können große Stromstärken übertragen werden. Die Versuchskabel werden bei der Temperatur des flüssigen Heliums bei  $6^{\circ}$  K betrieben und sind ähnlich zweier ineinander geschobener Thermosflaschen aufgebaut. Es muß verhindert werden, daß von außen Wärme in das Kabel hineintransportiert wird. Das äußere System wird durch flüssigen Stickstoff auf  $80^{\circ}$  K gehalten, das innere durch flüssiges Helium auf  $6^{\circ}$  K. Als Leiter wird eine Niob-schicht auf einem Kupferträger verwendet. Zwischen dem Leiter und inneren Mantel sind Stützwendeln eingebaut, um den Leiter zu zentrieren. Darüber befindet sich ein evakuierter Ringraum, dann kommt ein mit flüssigem Stickstoff gefüllter Bereich, um den sich wieder eine Vakuumzone legt. Darüber kommen dann der Außenmantel und der mechanische Schutz. Aus dieser kurzen Beschreibung ist leicht zu sehen, daß eine derart aufwendige Konstruktion nur dann eingesetzt werden kann, wenn sehr große Leistungen auf engstem Raum zu übertragen sind. Die Hilfsanlagen für Helium-, Stickstoff- und Vakuumhaltung sind kompliziert und umfangreich. Ihre Größe hängt von der Kabellänge ab. Sehr schwierig sind auch die Endverschlüsse zu beherrschen, an denen die Trennung zwischen dem Tiefsttemperaturbereich und dem Bereich normaler Temperaturen vorgenommen werden muß. Gleichzeitig muß der Leiter isoliert herausgeführt werden. Die Entwicklung ist soweit abgeschlossen, daß Versuchsmuster betriebsfähiger Kabel und Endverschlüsse mit einer Nennspannung von 110 kV zur Verfügung stehen. Bis zum großtechnischen Einsatz ist aber noch ein weiter Weg, der bisher aber nicht beschritten wird, da bis jetzt keine Anwendung in Sicht ist. Sicher kann ein solches System nur dann eingesetzt werden, wenn Leistungen über 3000 MVA zu übertragen sind.

Fassen wir zusammen.

Das sicherste und preiswerteste Übertragungssystem, das uns heute zur Verfügung steht, ist die Freileitung mit ihrem einfachen Aufbau und ihren guten Übertragungseigenschaften. Ihre Nachteile

sind die Sichtbarkeit, die beschränkt nutzbare Trasse und die Behinderung an den Maststandorten.

Im Nieder- und Mittelspannungsbereich stehen Kabelkonstruktionen für die verschiedenen Anwendungen zur Verfügung. Ihr Vorteil liegt in der Unsichtbarkeit.

Als hauptsächliche Nachteile sind die Störanfälligkeit, der Preis und bei höheren Spannungen ihr schlechteres Übertragungsverhalten zu nennen. Auch hier ist eine erhebliche Einschränkung in der Nutzung der Trasse gegeben.

Im Hoch- und Höchstspannungsbereich stehen ebenfalls Kabelkonstruktionen zur Verfügung, deren Nachteile aber so gravierend sind, daß der Einsatz auf die Fälle beschränkt bleiben muß, in denen keine andere Lösung möglich ist. Die Sonderbauarten Kryokabel, Supraleiter-Kabel sind bisher nicht einsetzbar, der SF<sub>6</sub>-Rohrleiter kann in extremen Sonderfällen, in denen es keine Alternative gibt, auf kurzen Strecken eine Lösung der Übertragungsaufgabe bieten.

Ich bin mir völlig darüber im klaren, daß diese Ausführungen eine außerordentliche Verkürzung und Vereinfachung der Probleme darstellen, und daß vieles, was zu diesem Thema noch zu sagen wäre, nicht gesagt werden konnte. Diese Komprimierung mußte in Kauf genommen werden, um den Rahmen dieses Vortrags nicht zu sprengen.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.Ing. Karl Ranke  
Bayernwerk AG  
Postfach 200340  
8000 München 2

<u>Versorgungsstufen</u>	
Spannungsebenen (Drehstrom)	Anwendung
Niederspannung 380/220 V	Ortsnetze; kleinräumige Versorgung, Umkreis 0,5 - 3 km um die Einspeisestelle
Mittelspannung 10 - 30 kV meist 20 kV	Versorgung mehrerer Ortsnetze, Umkreis 2 - 10 km um die Einspeisestelle
Hochspannung snetz 110 kV	Regionale Versorgung Landesweit zusammengeschaltet
Höchstspannungsnetz 220 kV und 380 kV	Landesweite Versorgung Einbindung in das deutsche und internationale Verbundnetz

### Aufgabenstellung der Elektrizitätsversorgung

Bereitstellung von elektrischer Energie

Preiswert im gewünschten Umfang

Sicher, d.h. ohne Unterbrechung

### Besondere Eigenschaften der elektrischen Energie

Nicht speicherbar

Leitungsgebunden

Verlustbehaftete Übertragung

# Ü b e r t r a g u n g s s y s t e m e

Freileitung

Kabel

Metallische Leiter gegenüber der Umgebung isoliert

## Kennzeichen

Leiter blank

frei in Luft verlegt

Maste

Isoliermittel Luft

Kühlmittel Luft

Leiter mit Isolierstoff  
umhüllt

in Erde verlegt

-

Isoliermittel Papier,  
Kunststoff

Kühlmittel Bodenfeuchtig-  
keit oder künstliche Kühlung

## Übertragungsverhalten

Niedrige Blindleistung

Günstige Querschnitte  
gut ausnützbar

Unempfindlich gegen  
Überspannungen

Störungen häufig kurz,  
da Isolierung selbstheilend

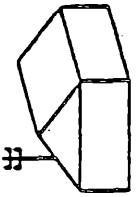
Hohe Blindleistung

Ungünstige Querschnitte  
wegen Verlustbegrenzung  
nur teilweise ausnützbar

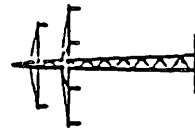
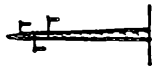
Sehr empfindlich gegen  
Überspannungen

Störung immer bleibender  
Fehler, da die Isolierung  
zerstört ist

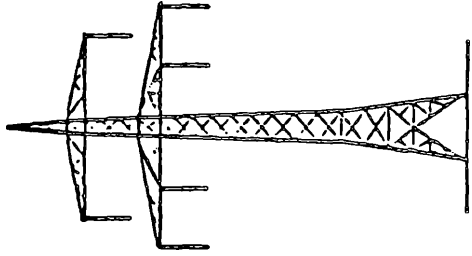
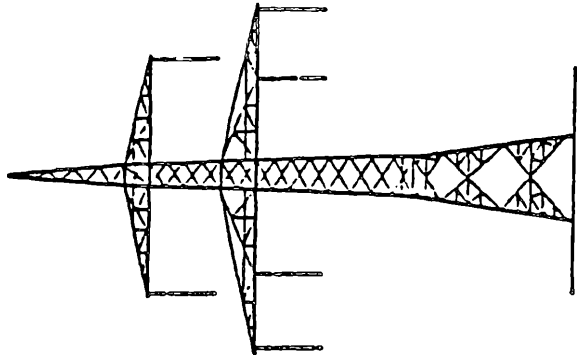
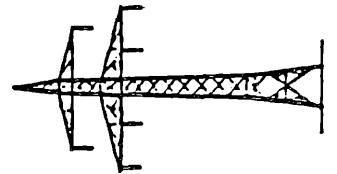
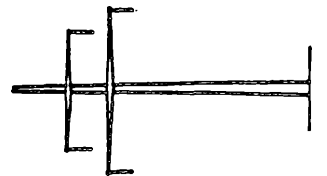
Niederspannung 380 V  
Holzmaste  
Dachständer



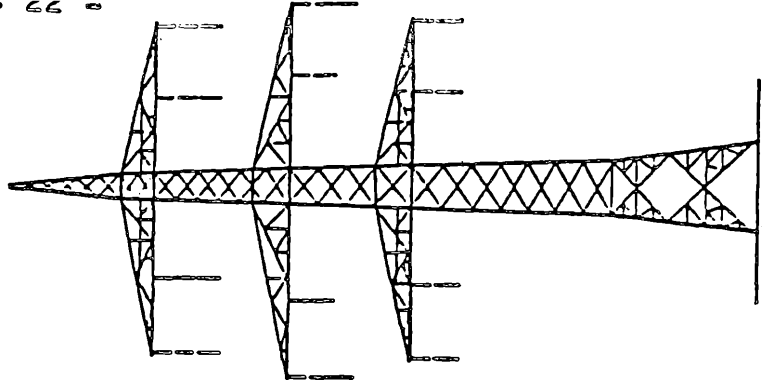
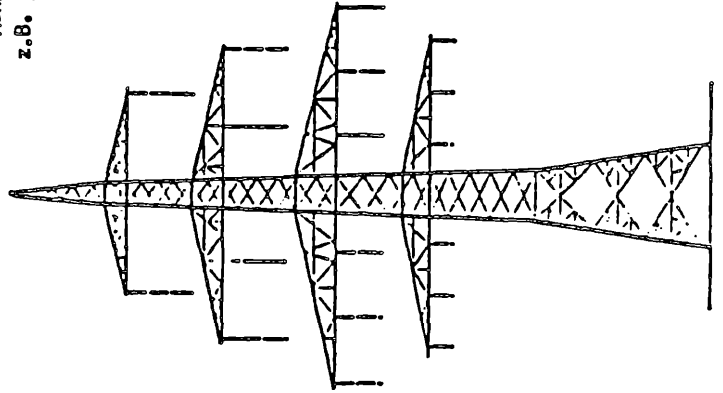
Mittelspannung 10  
10-30kV  
Holz-Beton-Stahl-  
gittermast  
vorwiegend Einfachltg.  
gelegentlich  
Doppeltg.



Hochspannung 110kV  
vorwiegend Doppeltg.  
Beton-Stahlgitter-  
maste



Mehrfachleitung  
z.B. 380/220/110kV





# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1980

Band/Volume: [8\\_1980](#)

Autor(en)/Author(s): Ranke Karl

Artikel/Article: [Stand der Technik im Leitungsbau; Freileitungen und Kabel, Möglichkeiten und Formen 7-22](#)