

Grundlagen der Energieübertragungs- und Verteilnetze

Die elektrische Energie gelangt über Übertragungs- und Verteilnetze mit Höchst-, Hoch- und Mittelspannung von den Kraftwerken zum Verbraucher. Der Beitrag zeichnet die einzelnen Stationen auf diesem Weg nach und beschreibt die dabei verwendeten Einrichtungen und Betriebsmittel.

1 Verlustarme Energieübertragung

Für die Energieübertragung vom Kraftwerk zum Verbraucher wird ein Leitungsnetz benötigt, das die angeforderte Leistung zu jeder Zeit transportieren kann. Dabei hat die Dimensionierung eines solchen Netzes zu berücksichtigen, dass der elektrische Widerstand der Leitungen Verluste verursacht, die dem Quadrat des Stroms proportional sind ($P=I^2 \cdot R$). Um Energie auch über weite Strecken wirtschaftlich übertragen zu können, ist der Strom so niedrig wie möglich zu halten und stattdessen die höchstmögliche Spannung zu verwenden. In Europa sind Übertragungs- und Verteilnetze mit Spannungen von 380 kV am Kraftwerksausgang und bis zu 6 kV am letzten Trafo üblich. Darunter folgen die Niederspannungsnetze mit 230/400 V.

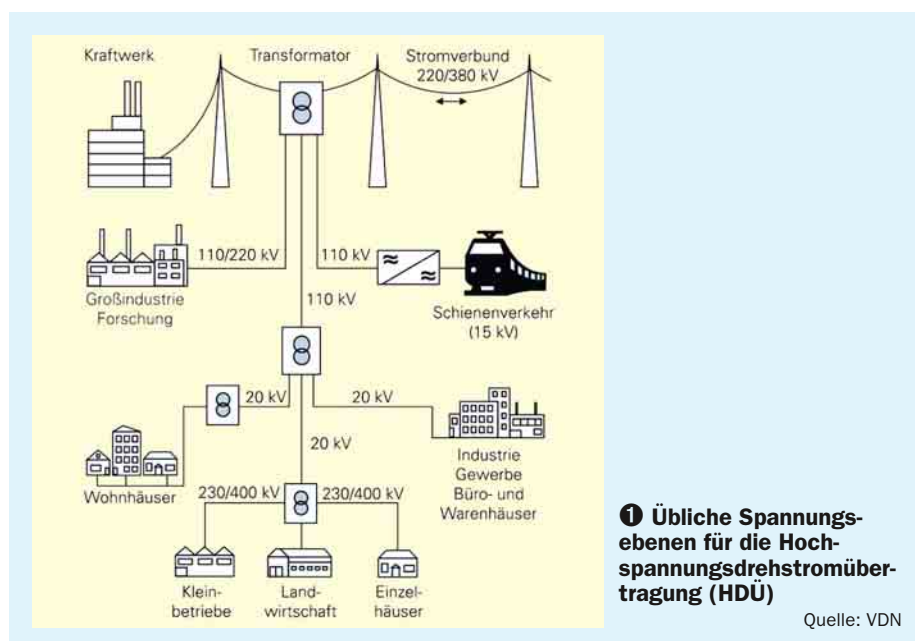
1.1 Hochspannungsdrehstromübertragung (HDÜ)

Der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Verlustleistung gilt für Drehstrom- und Gleichstromnetze gleichermaßen. In Drehstromnetzen sind aber neben den ohmschen Widerständen zu berücksichtigen. Zum einen wirken Freileitungen und insbesondere Kabel elektrisch wie Kapazitäten mit einem kapazitiven Blind-

strom, der für die Leistungsübertragung nicht zur Verfügung steht und die Leitung im Leerlauf belastet. Zum anderen entstehen als Folge des Energieflusses magnetische Felder bzw. Induktivitäten mit induktiven Blindströmen, die zu erheblichen Spannungsabfällen führen und eine Phasenverschiebung zwischen der Spannung am Anfang und am Ende der Leitung nach sich ziehen. Positiv ist, dass die damit einhergehenden Verlustleistungen um 180° verschoben sind und sich zum Teil oder ganz aufheben. Im letzten Fall wäre das Übertragungsverhalten eines Drehstromnetzes als optimal anzusehen.

Die in Kraftwerken bereitgestellte elektrische Energie hat in der Regel eine Spannung zwischen 6 und 21 kV. Für den möglichst verlustfreien Transport des Stroms über weite Strecken ist diese Spannung aber immer noch viel zu niedrig. Sie wird deshalb auf ein Niveau von mehreren hunderttausend Volt transformiert. Mit zunehmender Spannungshöhe steigen allerdings auch die Kosten für Isolationsmaßnahmen, die die gewünschte Wirtschaftlichkeit ab einem bestimmten Punkt wieder in Frage stellen können.

Spannungen über 1 kV werden in Europa häufig in Mittel-, Hoch- und Höchstspannung unterteilt, genormte Festlegungen gibt es allerdings nicht. Eine gewisse Orientierung gibt der Verband der Netzbetreiber (VDN), der





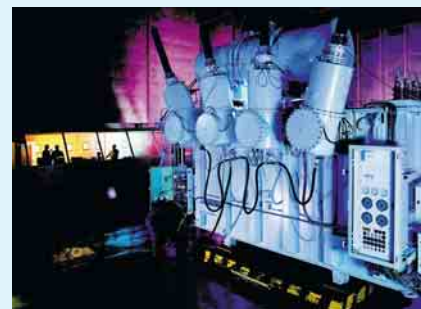
② Freiluftschaltanlage

Foto: Siemens



③ Gasisolierte Schaltanlage

Foto: ABB



④ 80-MVA-Trafo im Prüffeld

Foto: ABB

vier Netzebenen unterscheidet und mit Spannungswerten definiert (Bild ①). Das führt zu folgender Hierarchie:

Höchstspannungsleitungen mit Betriebsspannungen über 150 kV. Die Höchstspannungsleitungen mit Spannungen von 220 kV oder 380 kV transportieren die elektrische Energie von den Großkraftwerken zu den Umspannanlagen in der Nähe der Verbraucherschwerpunkte. Sie eignen sich für die Stromübertragung über große Entfernungen und können als das Rückgrat der Stromversorgung in Deutschland angesehen werden. Für die Entfernung gilt eine Faustregel: Elektrische Energie lässt sich wirtschaftlich sinnvoll über so viele Kilometer transportieren, wie die Nennspannung der Leitungen in Kilovolt be-

trägt. Bei einer Nennspannung von 380 kV wäre das eine Übertragungsstrecke von etwa 380 km ohne Zwischenstation. Über das Höchstspannungsnetz ist Deutschland mit dem europäischen Verbundnetz gekoppelt.

Hochspannungsleitungen mit Betriebsspannungen über 60 kV bis 150 kV. Die Verteilung der elektrischen Energie zu den Verbraucherschwerpunkten übernehmen üblicherweise 110-kV-Hochspannungsleitungen. Die Energie stammt dann entweder direkt aus einem Kraftwerk oder, mit einem Umweg über eine Umspannanlage, aus dem Höchstspannungsnetz. Hochspannungsleitungen versorgen größere Gebiete und Ballungszentren.

Mittelspannungsleitungen mit Betriebsspannungen über 1 kV bis 60 kV. Die Anspeisung der Mittelspannungsnetze aus dem 110-kV-Netz erfolgt über Umspannwerke mit Sekundärspannungen von 6 bis 40 kV. Für die Versorgung von Stadtgebieten kommen meistens 10-kV-Netze in Frage, während im ländlichen Bereich 20-kV-Netze vorherrschen, da hier größere Entfernungen zu überbrücken sind. Auch Industriebetriebe decken aus dieser Spannungsebene ihren Leistungsbedarf, der dann bis zu 10 MW betragen kann.

Niederspannungsleitungen mit Betriebsspannungen bis 1 kV. Die unterste Netzebene arbeitet mit einer vergleichsweise geringen Spannung von 230/400 V. Sie wird üblicherweise von einem Trafo in einer so genannten Ortsnetzstation bereitgestellt. Die Einspeisung auf der Primärseite des Trafos kommt aus dem Mittelspannungsnetz. Eine Ortsnetzstation versorgt Gebäude und Betriebe der näheren Umgebung. Als Zuleitungen kommen sowohl Kabel als auch – zumeist in dünn besiedelten Regionen – Freileitungen in Frage.

1.2 Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)

Eine Alternative zur Hochspannungsdrehstromübertragung ist die so genannte HGÜ-Technik, die mit hochgespanntem Gleichstrom arbeitet. Sie ist immer dort anzutreffen, wo es darum geht, Energie über Seekabel zu übertragen oder Netze mit unterschiedlichen Frequenzen zu verbinden.

Bei Seekabelverbindungen mit Hochspannungsdrehstromübertragung ist eine Kompensation des auftretenden Blindstroms nur mit großem Aufwand möglich und mit hohen Kosten verbunden. Deshalb ist in diesem Fall die HGÜ-Technik im Vorteil. Ein aktuelles Anwen-

dungsbeispiel aus den USA: Um den im Sommer erhöhten Strombedarf von Long Island zu decken, installieren die Firmen Siemens und Prysmian Cables and Systems zurzeit zwischen den Kraftwerken in Sayreville (New Jersey) und Long Island (New York) eine Energieübertragungsstrecke in HGÜ-Technik. Ab Sommer 2007 werden See- und Landkabel von insgesamt 105 km Länge mit einer auf 500 kV transformierten Gleichspannung eine elektrische Leistung von bis zu 750 MW übertragen. Ein zweites Anwendungsbeispiel: Elektrische Energieübertragungsnetze unterschiedlicher Frequenz lassen sich nur über Gleichstrom-Zwischenkreise verbinden. Dabei wird einem Drehstromnetz über einen Gleichrichter Energie entnommen und über einen Wechselrichter einem anderen Drehstromnetz zur Verfügung gestellt. Eine solche Netzverbindung über einen zwischengeschalteten Gleichstromkreis hat den Vorteil, dass sich der Energiefluss nach Belieben regeln lässt. So tragen HGÜ-Anlagen zur Stabilisierung der angeschlossenen Netze bei und können Störungen wie große Blackouts verhindern.

Dem besseren Übertragungsverhalten der Gleichstromübertragung stehen zusätzliche Investitionen und Betriebskosten für die Stromrichterstationen am Anfang und Ende gegenüber, die aus dem Wechselstrom einen definierten Gleichstrom erzeugen bzw. aus diesem wieder einen Wechselstrom formen. Außerdem erfordern HGÜ-Anlagen Maßnahmen zur Kompensation der von den Stromrichtern verursachten Blindleistung und Filter zur Reduktion von Oberschwingungen. Trotzdem wird die Übertragungstechnik im Zuge des weltweit steigenden Energiebedarfs an Bedeutung gewinnen, wenn verstärkt Energiequellen genutzt werden sollen, die weit vom Verbrauchsschwerpunkt entfernt liegen – wie etwa Wasser-, Wind- oder Solarkraftwerke.

1.3 Netzstrukturen

Unter den vielfältigen Strukturen elektrischer Netze lassen sich zwei Grundmuster unterscheiden: unvermaschte und vermaschte Netze. Vermaschte Netze lassen sich noch einmal unterteilen in Ring- und Maschennetze. In einem unvermaschten Netz, auch Strahlennetz genannt, fließt die Energie strahlenförmig über mehrere Leitungsstrecken bis zum letzten Verbraucher. Vorteil ist die einfache Netzüberwachung. Nachteile sind der zum Leitungsende hin zunehmende Spannungsfall

mit den damit verbundenen Leitungsverlusten sowie eine geringere Versorgungssicherheit, da bei einer Störabschaltung alle nachgeordneten Verbraucher von der Energieversorgung ausgeschlossen sind.

Werden mehrere strahlenförmige Leitungsstrecken untereinander verbunden, entsteht – je nach dem Grad der Vermaschung – ein Ring- oder ein Maschennetz. Ein Ringnetz lässt sich einfach durch die Verbindung zweier Leitungsstrecken mithilfe eines Kuppelschalters herstellen. Durch weitere Querverbindungen wächst die Kombination von Strahlen- und Ringnetz zu einem mehr oder minder dicht geknüpften Maschennetz. Die Energieversorgung über ein Maschennetz bietet gewichtige Vorteile wie geringere Leitungsverluste und höhere Versorgungssicherheit. Dem stehen die Nachteile hoher Kurzschlussströme und aufwändiger Schaltanlagen gegenüber.

Da keine der beschriebenen Grundstrukturen nur Vorteile hat, wird häufig eine flexible Lösung bevorzugt: Das Netz wird zunächst als vermaschtes Netz (Ringnetz, Maschennetz) erstellt, im Betrieb aber so aufgetrennt, dass mehrere unvermaschte Zweige entstehen. Damit lassen sich im ungestörten Betrieb die Vorteile des Strahlennetzes nutzen. Bei einer Störung hingegen besteht die Möglichkeit, durch Schaltmaßnahmen die defekte Netzstrecke herauszutrennen und die nachgeschalteten Verbraucher durch Zuschaltung an einen anderen Maschenzweig weiter zu versorgen.

2 Umspannanlagen

Eine Umspannanlage ist ein wichtiges Bindeglied zwischen den einzelnen Spannungsebenen. Sie beherbergen alle für einen zuverlässigen Anlagenbetrieb und eine sichere Energieversorgung notwendigen Betriebsmittel wie Transformatoren, Trenn- und Leistungsschalter, Regelanlagen und zahlreiche Hilfseinrichtungen. Sie haben mehrere Aufgaben und werden als Freiluftschaltanlagen (Bild 2) oder – häufig in Ballungsgebieten – als metallgekapselte SF₆-gasisolierte Anlagen (Bild 3) für Innenraumaufstellung errichtet.

2.1 Aufgaben

Umspannanlagen übernehmen im Verlauf der Energieverteilung und -übertragung zentrale Aufgaben: Ihre Transformatoren funktionieren als Bindeglieder zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen. Oft umfangreiche Schalt-, Steuerungs- und Regelanlagen ermöglichen das gezielte Ein- und Ausschalten einzelner Freileitungs- oder Kabelstrecken. Sicherungskomponenten trennen Anlagenteile oder Netzsegmente bei Störungen und Gefahren (Überlast, Kurzschluss) fast verzögerungsfrei vom übrigen Netz.

Umspannanlagen können bei umfangreichen Aufgaben mitunter große Ausmaße erreichen. Das ist häufig dort der Fall, wo mehrere Hochspannungsebenen über Kuppeltransformatoren

verbunden werden sollen. In einigen Fällen sind dann bis zu dreißig Hochspannungsleitungen mit 110 kV, 220 kV und 380 kV in einem Umspannwerk versammelt.

2.2 Freiluftschaltanlagen

Umspannwerke werden, wann immer möglich, als Freiluftschaltanlagen ausgeführt und außerhalb der Städte im Bereich der Trasse der Übertragungs- und Verteilnetze errichtet. Sie sind mit einer Umzäunung von mindestens 1,80 m Höhe umgeben. Der typische Aufbau einer Umspannanlage sieht – vereinfacht dargestellt – so aus: Die von den Gittermasten herunterkommenden Freileitungen werden zunächst auf ein so genanntes Abspanngerüst und von dort auf ein Sammelschienensystem geführt. Es folgen ein Sammelschienentrenner, ein Leistungsschalter, ein Abgangstrenner, ein Stromwandler und – direkt vor dem Transformator – ein Überspannungsableiter.

2.3 SF₆-gasisolierte Schaltanlagen

Nicht immer ist für Freiluftschaltanlagen genügend Platz vorhanden, wie beispielsweise im innerstädtischen Bereich oder in Industrieanlagen. In solchen Fällen kommen gasisolierte Schaltanlagen (GIS-Anlagen) zum Einsatz. Sie bestehen aus einer druckfesten Aluminiumrohrkonstruktion, die alle Spannung führenden Teile aufnimmt und mit Schwefelhexafluorid (SF₆) als Lösch- und Isoliergas gefüllt ist. Das Anwendungsgebiet reicht bis zu Betriebsspannungen von 800 kV. Mit der GIS-Technik lassen sich sehr kompakte Anlagen bauen, die meist in Gebäuden untergebracht werden. Vorteile sind der geringe Raumbedarf, geringes Gewicht, hohe Betriebssicherheit, Wartungsarmut und lange Lebensdauer. Die vollständige Kapselung erlaubt die Anwesenheit von Personen im selben Raum. Der technische Aufbau einer SF₆-Innenraumanlage gleicht im Prinzip dem einer Freiluftanlage.

Das Schwefelhexafluorid wird in den Bauteilen der gesamten Anlage zur Isolierung und in Leistungs- und Lastschaltern auch zur Lichtbogenlöschung verwendet. Es ist ein Gas, dessen dielektrische Festigkeit bei Atmosphärendruck etwa dreimal so hoch ist wie die von Luft. Es brennt nicht, ist ungiftig, chemisch nicht aktiv und hat drei- bis viermal bessere Lichtbogenlöscheigenschaften als Luft bei gleichem Druck. Handelsübliches Schwefelhexafluorid ist kein Gefahrstoff und unterliegt deshalb auch nicht der Gefahrstoffverordnung. Es ist allerdings, wenn auch in geringem Umfang, den Treibhausgasen zuzurechnen und deshalb grundsätzlich nur in einem geschlossenen Kreislauf wiederzuverwenden.

3 Transformatoren

Am Kraftwerksausgang werden Transformatoren hoher Leistung aufgebaut, die die vom Generator kommende Spannung bis auf eine

Höchstspannung von 380 kV (in Deutschland) oder mehr transformiert und später sukzessive je nach Bedarf auf Hochspannung (um 110 kV), Mittelspannung (um 20 kV) und Niederspannung (230/400 V) herunterspannt. Wie die Spannungsebenen variieren auch die Leistungen. Transformatoren zur Kupplung der Hochspannungsebenen haben typischerweise Leistungen zwischen 100 und 1000 MVA. Die Speisung der Mittelspannungsebene aus dem 110-kV-Netz erfolgt über Transformatoren der Leistung 15 bis 63 MVA. Verteil- und Netztransformatoren im Leistungsbereich zwischen 50 bis 2500 kVA dienen Versorgung der Endverbraucher im Niederspannungsnetz bei 230/400 V (Bild 4).

Bei den Bauformen ist zwischen Einphasenkerntransformatoren (Kern- und Manteltransformatoren) und Drehstromkerntansformatoren zu unterscheiden. Bei den in Übertragungs- und Verteilnetzen eingesetzten Drehstromtransformatoren liegen alle drei Schenkel in einer Ebene und bilden eine Einheit. Auf jedem der drei Schenkel sitzen jeweils die Primär- und die dazugehörige Sekundärwicklung. Um die Spannung dem unterschiedlichen Lastfluss anpassen zu können, haben Transformatoren häufig zusätzlich Regelwicklungen, mit denen sich die Spannung stufenweise verkleinern oder vergrößern lässt. Bei Transformatoren großer Leistung befinden sich die Wicklungen in einem ölgefüllten Kessel. Das Öl dient zur Isolation und zur Kühlung. Die Wärme wird über Kühlrippen oder Kühlanlagen abgeführt. Die Stromzufuhr erfolgt über Durchführungen, die die Isolation zwischen Stromanschluss und Gehäuse sicherstellen. Die größten Transformatoren können heute mehr als 1000 MVA elektrischer Leistung übertragen und haben ein Transportgewicht von über 500 t. Um solche hohen Leistungen besser handhaben zu können, werden die Wicklungen großer Transformatoren häufig auf drei einphasige Pole aufgeteilt.

4 Hochspannungsapparate

4.1 Trennschalter

Aufgabe von Trennschaltern ist es, Netzsegmente oder Teile von Schaltanlagen für Revisionsarbeiten vom Netz zu trennen und diese Trennung auch durch die Schalterstellung deutlich sichtbar zu machen. Man findet sie in Schaltanlagen stets auf der spannungsführenden Seite, bei doppelseitiger Einspeisung also auf beiden Seiten des Leistungsschalters. Im Vergleich zu Leistungsschaltern, die eine Anlage auch unter maximaler Strombelastung abschalten können, sind bei Trennschaltern nur Schaltströme < 0,5 A zugelassen. Größere Ströme lassen sich allerdings dann schalten, wenn beim Schaltvorgang zwischen den Kontaktstücken keine wesentliche Änderung der Spannung auftritt, beispielsweise bei einem Sammelschienenwechsel ohne Strom-

unterbrechung. Trennschalter können Betriebsströme dauernd führen, Kurzschlussströme hingegen nur für eine festgelegte Zeitdauer.

Je nach Spannungsebene kommen unterschiedliche Bauformen zum Einsatz:

- In Mittelspannungsanlagen bis 30 kV mit relativ geringen Nennströmen genügen Lasttrennschalter, die eine sichtbare Trennstrecke und eine Lichtbogenlöscheinrichtung besitzen (Bild 5).
- Im Mittelspannungs- und Hochspannungsbereich bis zu 110 kV werden häufig so genannte Hebeltrenn- und Drehtrennschalter verwendet.
- Für den Hochspannungsbereich oberhalb von 220 kV stehen Greifer- oder Scherentrennschalter zur Auswahl.

Trennschalter besitzen im Normalfall einen Motor- oder Druckluftantrieb, bei Spannungen von weniger als 30 kV sind manuell bedienbare Trenner üblich.

4.2 Hochspannungsleistungsschalter

Hochspannungsleistungsschalter für Freiluftschaltanlagen dienen zum Schalten von Freileitungen, Kabelabzweigen, Transformatoren, Drosselspulen und Kondensatoren. Sie müssen in der Lage sein, elektrische Ströme einzuschalten, dauernd zu übertragen und zu unterbrechen – auch bei maximaler Strombelastung wie im Kurzschlussfall – sowie den beim Schaltvorgang entstehenden, bis zu 10000 °C heißen Lichtbogen zu löschen. Hochspannungsleistungsschalter für Freiluftschaltanlagen werden in Modulbauweise hergestellt. Die in Europa bevorzugte Bauform besteht aus den Baugruppen Isolatoren, Löschkammer und Steuerkondensator. Für den Schaltvorgang stehen Druckluft- und Hydraulikantriebe oder Federkraftspeicher zur Auswahl. Der Aufbau von Leistungsschaltern für GIS-Schaltanlagen ist denen für Freiluftanlagen ähnlich.

Eine große Bedeutung kommt der Lichtbogenlöschung zu. Hier stehen je nach Leistung Ein- oder Mehrkammerausführungen zur Verfügung. Für Anlagen mit einer Spannung bis 170 kV und einem Ausschaltstrom bis 40 kA werden in der Regel Selbstblaslöschkammern eingesetzt. Als Löschmittel dienen Druckluft, Öl oder SF₆. Die geschalteten Stromstärken betragen im Normalfall 1000 bis 2000 A. Im Kurzschlussfall kann die Stromstärke bis zu 50 kA betragen.

4.3 Messwandler

Um den Energiefluss sowie die Netz- und Betriebsmittelauslastung ermitteln zu können, müssen zuvor Strom und Spannung auf einheitliche und ungefährliche Werte transformiert werden. Das ist Aufgabe der Strom- und Spannungswandler. Es gilt zu unterscheiden zwischen Wandlern für Messzwecke und solchen für Schutzaufgaben. Neuere Entwicklungen gehen dahin, Sensoren einzusetzen. Sie erreichen die gleiche Genauigkeit.



5 Dreistellungs-Lasttrennschalter (Ein/Aus/Erde) einer gasisolierten Mittelspannungs-Lastschaltanlage für alle Leistungsklassen

Foto: Siemens



6 Freileitungen für zwei Drehstromkreise an einem Donaumast

Foto: RWE

4.4 Überspannungsableiter

Überspannungsableiter dienen dazu, die Betriebsmittel der Umspannanlage vor Spannungsspitzen zu schützen, die beispielsweise durch Blitzschlag entstehen können. Heute gängige Bauarten verwenden eine funkenstreckenlose Ableitertechnik mit Metalloxidwiderständen. Das Isoliergehäuse besteht aus Porzellan oder Kunststoff, wobei letzterer vor allem in Mittelspannungsanlagen weit verbreitet ist.

4.5 Erdungsschalter

Erdungsschalter werden gebraucht, um vom Netz getrennte Anlagenteile zu erden und kurzzuschließen. Sie müssen Kurzschlussströme während einer festgelegten Zeit standhalten können. Im Normalfall sind sie Teil der Schalteinheit, die auch den Trennschalter enthält. Gelegentlich findet man sie aber auch als separat installierte Anlagenteile.

5 Kabel und Freileitungen

In der Hoch- und Höchstspannungsebene dominieren Freileitungen (Bild 6), da sie gegenüber dem Kabel technische und wirtschaftliche Vorteile besitzen: Kabel haben bei gleichem Leiterquerschnitt eine geringere Übertragungsleistung, sind nur in geringem Maße zu überlasten, benötigen eine längere

Zeit für Reparaturen und Kosten das Mehrfache einer Freileitung. Dabei gilt: Je höher die Spannung, desto teurer wird ein Kabel im Verhältnis zu einer Freileitung. In den meisten Fällen können nur Freileitungen eine wirtschaftliche Stromübertragung gewährleisten.

Anders sieht es in der Mittel- und Niederspannungsebene aus. Vor allem in dicht bebauten Gebieten mit hohem Strombedarf, aber zunehmend auch in dünner besiedelten Räumen werden dort zum Energietransport überwiegend Kabel eingesetzt. Sie transportieren den Strom von den Verteil- zu den Ortsnetzstationen und von dort mit der üblichen 230/400-V-Netzspannung zu den Verbrauchern. Der Kabelanteil im Mittel- und Niederspannungsnetz wächst kontinuierlich. Denn Kabel haben auch Vorteile: Sie sind unempfindlicher gegen Störungen wie Unwetter oder Blitzschlag.

5.1 Freileitungen

Hochspannungsfreileitungen bestehen aus den Masten, den Leiterseilen, durch die der Strom fließt, den Erdseilen als Sicherheitseinrichtung sowie den Isolatoren und Armaturen.

Freileitungsmaste. Bei Freileitungsmasten gibt es zahlreiche unterschiedliche Ausführungen. Sie lassen sich zunächst nach dem Kriterium der Funktion unterscheiden.

- **Tragmaste** werden in erster Linie auf gerader Strecke verwendet. Sie haben die Aufgabe, die Leiterseile zu tragen. Bei Tragmasten hängen die Isolatorketten senkrecht nach unten.
- **Abspannmaste** nehmen die Zugkräfte der Leiterseile auf. Sie bilden die Festpunkte in der Freileitung. In Höchst- und Hochspannungsnetzen entfallen im Mittel vier bis sieben Tragmaste auf einen Abspannmast. Auffälliges sichtbares Merkmal: Die Isolatorketten zeigen in dieselbe Richtung wie die Leiterseile. Winkelspannmaste sind dann erforderlich, wenn die Freileitung ihre Richtung ändert. Auch der Verdrillmast zählt zu den Abspannmasten. Er wird benötigt, wenn die Phasen eines Stromkreises auf dem Mast ihren Platz tauschen sollen.
- Ein **Endmast** bildet den Punkt, an dem eine Freileitung endet. In der Regel wird der dort eingesetzt, wo die Freileitung auf ein Erdkabel heruntergebracht werden soll.

Die Unterscheidung nach Anordnung der Leiterseile zeigt folgendes Bild:

- Von **Masten mit einer Enebenenanordnung** spricht man dann, wenn alle Leiterseile auf einer Ebene geführt werden, was zu einer niedrigen Bauhöhe, aber auch breiten Trasse führt. Solche Maste werden fast ausschließlich für Hochspannungsgleichstromübertragungen und Bahnstromversorgungen verwendet.
- Der **Donaumast** besitzt zwei Traversen und kann zwei Drehstromkreise tragen. Wenn beide Drehstromkreise installiert sind, befinden sich auf der untersten Traverse vier und auf der obersten zwei Leiterseile (Bild 6).

- Darüber hinaus gibt es **Masten mit einer Dreiebenenanordnung**. Sie sind zwar höher, haben aber den großen Vorteil einer geringeren Trassenbreite. Sonderformen sind der Tannenbaum- und der Tonnenmast, bei denen die Form der Traversenanordnung der Namensgeber ist.

Bei der Unterscheidung nach dem verwendeten Material wären zunächst **Holzäste** zu nennen. Sie kommen im Normalfall nur für Leitungen mit Spannungen bis etwa 30 kV in Frage. **Betonäste** sind darüber hinaus auch in 110-kV-Netzen anzutreffen. **Stahlrohräste** werden in Deutschland überwiegend für Mittelspannungs- und Hochspannungsleitungen mit ein oder zwei Stromkreisen für Betriebsspannungen von bis zu 110 kV errichtet. Darüber hinaus sind die **Gitteräste aus Stahl** zu nennen, die sich für alle Spannungsebenen eignen. Allerdings sind sie bei Leitungen unter 50 kV eher selten, während sie bei Spannungen über 50 kV die am meisten verwendete Form von Freileitungsmasten sind.

Leiterseile. Als Leiterseile werden Verbundseile verwendet. Sie bestehen im Kern aus Stahlseilen, die die mechanische Festigkeit erhöhen, und einem gut leitenden Mantel aus Aluminium oder einer Aluminiumlegierung. Für 380-kV-Leitungen werden beispielsweise Seile mit einem Aluminiumquerschnitt von 680 mm² und einem Stahlquerschnitt von 85 mm² verwendet (Al/St 680/85). Der Seildurchmesser beträgt in diesem Fall etwa 35 mm, die elektrische Dauerbelastbarkeit etwa 1100 A. Die Seiltemperatur liegt bei Normalbelastung um 40 °C.

Bei einer Hochspannungsdrehstromübertragung bilden jeweils drei Leiterseile ein System. Sie sind in der Regel gemeinsam auf einer Seite des Mastes angeordnet.

Über den Mastspitzen ist ein Erdseil verlegt, das die Strom führenden Leiterseile vor Blitzeinschlägen schützt. Es beherbergt häufig noch ein Glasfaserkabel für die Übermittlung von Informationen. Dieser Lichtwellenleiter kann bei Hochspannungsleitungen ab 110 kV auch im Leiterseil integriert sein.

5.2 Kabel

In Mittel- bis Höchstspannungsanwendungen sind Kabel mit unterschiedlichen Isolierstärken im Einsatz. Bestand in der Vergangenheit die Isolierung häufig aus ölgetränktem Papier, wobei das Papier lagenförmig um den Leiter gewickelt wurde, sind heute Polyethylen und – bei Spezialkabeln – auch elastomere Kunststoffe wie beispielsweise Silikon die bevorzugten Isoliermaterialien. Diffusionssperren und Quellmedien im Innern verhindern das Eindringen von Feuchtigkeit. Hochspannungskabel der neuesten Generation erlauben Spannungen von bis zu 420 kV. Bei speziellen Ausführungen verlegt man die einzelnen Leiter in Rohren, die dann unter hohem Druck mit Stickstoff (Gasaußendruckkabel) oder mit dem von gasisolierten Schaltanlagen bekannten Schwefelhexafluorid (SF₆) gefüllt werden. ■