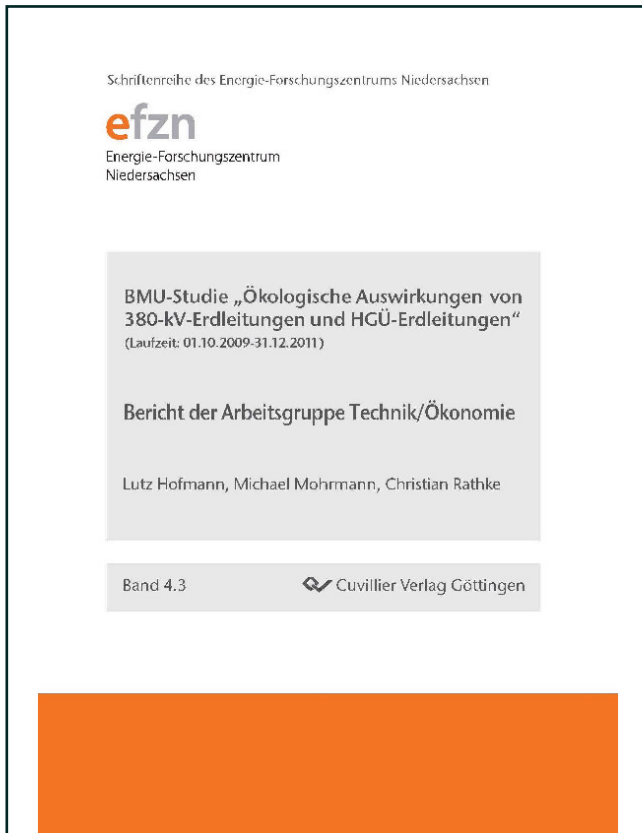




Lutz Hofmann (Autor)  
Michael Mohrmann (Autor)  
Christian Rathke (Autor)

**BMU-Studie "Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen"**  
Bericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/66>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Stand der Technik bei Übertragungssystemen

## 1.1 Aufbau des europäischen Elektroenergiesystems

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt im europäischen Verbundnetz der ENTSO-E in der Regel mit Dreiphasen-Wechselstrom, der auch als Drehstrom bezeichnet wird, mit einer Frequenz von 50 Hz. Um die steigenden Anforderungen an die Energieübertragung über immer weitere Strecken zu erfüllen, wurden im Laufe der Zeit immer höhere Spannungsebenen eingeführt. Die höchste Spannungsebene in Europa ist – mit Ausnahme einer 750-kV-Leitungsverbindung zwischen Ungarn und der Ukraine – die 380-kV-Ebene. Andere Stromarten als Drehstrom werden nahezu ausschließlich für Sonderfälle eingesetzt. Beispiele hierfür sind der bei der Bahn eingesetzte Wechselstrom mit einer Frequenz von  $16\frac{2}{3}$  Hz oder der Einsatz von Gleichstrom für Straßenbahnen, Seekabelverbindungen oder die Kupplung asynchroner Netze.

Abhängig von der Spannungsebene wird das Stromnetz in die Bereiche Höchstspannung (380 und 220 kV), Hochspannung (i.d.R. 110 kV), Mittelspannung (i.d.R. 10/20 kV) und Niederspannung (400 V) eingeteilt. Je nach installierter Leistung der Kraftwerke speisen diese in die verschiedenen Spannungsebenen ein, wobei die großen Kraftwerksblöcke (z. B. Kernkraftwerke) mit den Höchstspannungsnetzen verbunden werden. Die Kupplung der verschiedenen Spannungsebenen erfolgt über Drehstromtransformatoren.

Darüber hinaus wird das Netz noch in das Übertragungsnetz (Höchstspannungsnetz) und das Verteilungsnetz (Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz) eingeteilt. Das Übertragungsnetz dient dem Energietransport über große Entfernungen und stellt weiterhin auch den Verbundbetrieb mit den benachbarten Übertragungsnetzen sicher. Der Verbundbetrieb, das heißt die Zusammenschaltung der Netze von verschiedenen Übertragungsnetzbetreibern, ermöglicht den europaweiten Stromhandel und stellt zum anderen im Fehlerfall eine gegenseitige Stützung der Netze sicher. Im Gegensatz zum Übertragungsnetz dient das Verteilnetz der Energieverteilung bis zum Endkunden, wobei das Hochspannungsnetz auch regionale Übertragungsaufgaben übernimmt. **Abbildung 1.1** zeigt den Aufbau des Elektroenergiesystems mit den verschiedenen Spannungsebenen.

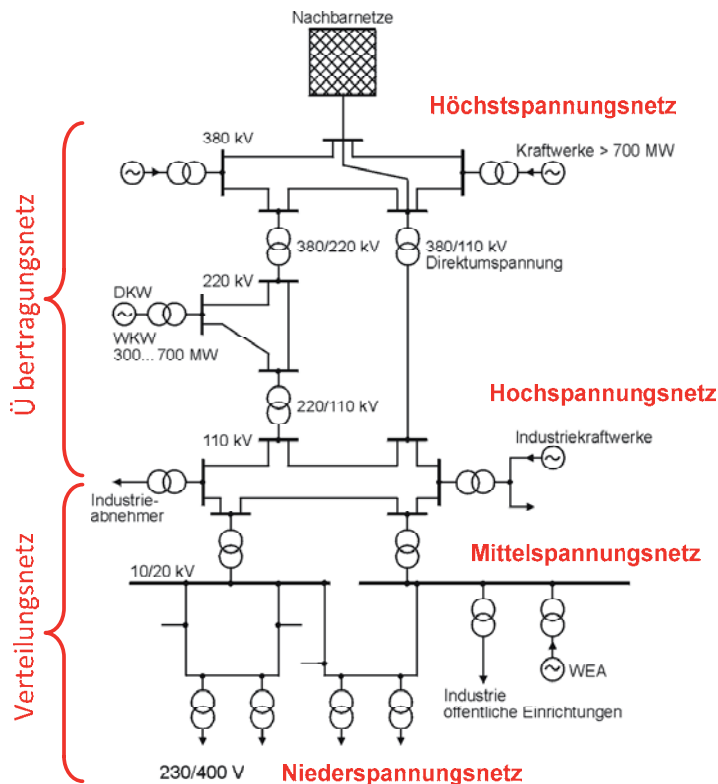
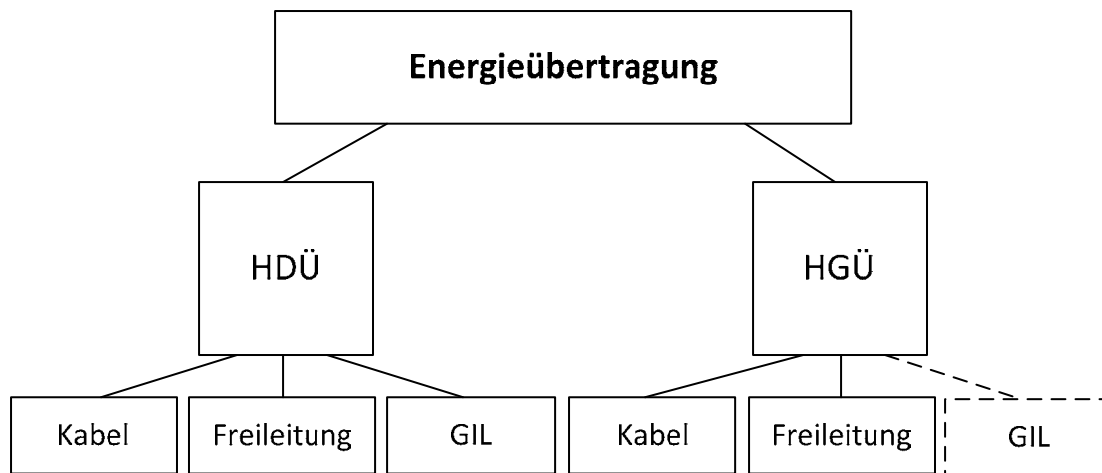


Abbildung 1.1 Aufbau des Elektroenergiesystems

## 1.2 Drehstrom- und Gleichstromübertragungstechniken

Neben der Drehstromübertragung hat sich, insbesondere für die Energieübertragung über große Entfernungen und für Seekabelverbindungen, die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) etabliert. Mit dieser Technik ist es z. B. auch möglich, Netze mit unterschiedlichen Frequenzen zu koppeln. Darüber hinaus zeigt die HGÜ bessere Übertragungseigenschaften für große Leitungslängen. In Europa existieren zum jetzigen Zeitpunkt mehrere HGÜ-Seekabelverbindungen, wie zum Beispiel die Verbindung zwischen den britischen Inseln und dem europäischen Festland. Die längste HGÜ-Seekabelverbindung ist bislang das 2008 von Statnet und TenneT in Betrieb genommene NorNed-Kabel, das über 580 km Feda in Norwegen mit Eemshaven in den Niederlanden verbindet.

Sowohl die Hochspannungs-Drehstromübertragung (HDÜ), als auch die HGÜ können in Verbindung mit unterschiedlichen Übertragungssystemen eingesetzt werden (**Abbildung 1.2**). Diese unterscheiden sich durch ihre Bauart und Geometrie sowie die eingesetzten Materialien und Isolierstoffe deutlich in ihren elektrischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie in der Art der Errichtung und Betriebsführung. Hierdurch ergeben sich deutliche Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften, im Betriebsverhalten und in den Gesamtkosten.



**Abbildung 1.2** Einordnung verschiedener Stromarten und Übertragungssysteme

## 1.3 Drehstrom-Freileitung

### 1.3.1 Allgemeines

Die ersten Hochspannungs-Drehstrom-Übertragungsleitungen wurden in Freileitungsbauweise errichtet. Bereits 1891 wurde die erste Drehstrom-Fernleitung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main erfolgreich eingesetzt. Die erste Freileitung für eine Spannung von 380 kV mit einer maximalen Übertragungsleistung von 460 MW wurde 1952 in Schweden für die 950 km lange Strecke von Harspränget nach Halsberg errichtet. Bereits 1929 entstand mit der sogenannten Rheinleitung Brauweiler-Hoheneck die erste für 380 kV ausgelegte, aber zunächst mit 220 kV betriebene Freileitung in Deutschland. Diese Leitung wurde später umgerüstet und 1958 für den Abschnitt Rommerskirchen-Hoheneck mit 380 kV unter Spannung gesetzt.

Durch ihren einfachen Aufbau besitzen Freileitungen vergleichsweise niedrige Investitionskosten und lassen sich schnell und einfach errichten. Sie zeigen außerdem ein gutes und robustes elektrisches Betriebsverhalten. Die oberirdische Bauweise ermöglicht zusätzlich eine schnelle Fehleridentifikation und kurze Reparaturzeiten, woraus sich auch eine hohe Verfügbarkeit ergibt. Aus diesen und anderen Gründen ist heute nahezu das gesamte europäische kontinentale 380-kV-Verbundnetz mit einer Gesamttrassenlänge von etwa 110.000 km als Freileitungsnetz errichtet. Andere Übertragungssysteme, wie Kabel und GIL, wurden in Europa in dieser Spannungsebene bisher auf insgesamt weniger als 150 km Trassenlänge eingesetzt (vergleiche auch **Tabelle 1.2**). In Deutschland wurden bis zum Jahr 2008 Höchstspannungskabel mit einer Stromkreislänge von etwa 100 km errichtet. Wie **Tabelle 1.1** zeigt, beträgt der Anteil der Kabel an der gesamten Stromkreislänge in der deutschen Höchstspannungsebene damit weniger als 0,3 %.

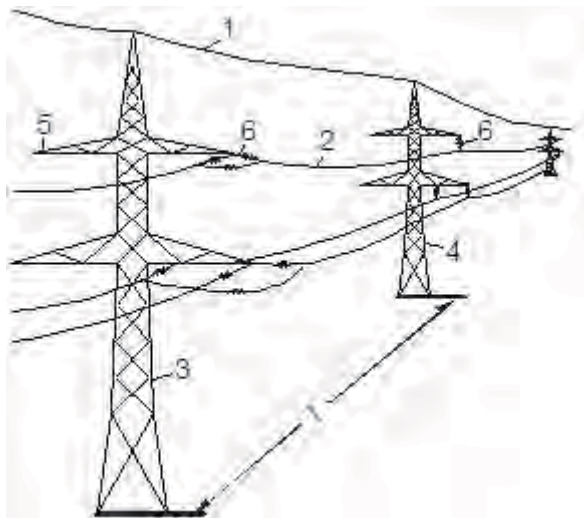
**Tabelle 1.1** Stromkreislängen und Kabelanteil in Deutschland im Jahr 2008 sortiert nach Spannungsebene [1]

	<b>Gesamtlänge der Stromkreise</b>	<b>Stromkreislänge Freileitungen</b>	<b>Stromkreislänge Kabel</b>	<b>Kabelanteil</b>
<b>Höchstspannung</b>	35.709 km	35.607 km	102 km	0,27 %
<b>Hochspannung</b>	76.279 km	70.618 km	5.661 km	7,4 %
<b>Mittelspannung</b>	507.210 km	131.326 km	375.884 km	74,1 %
<b>Niederspannung</b>	1.164.012 km	144.507 km	1.019.505 km	87,6 %
<b>Gesamt</b>	1.783.209 km	382.058 km	1.401.152 km	78,6 %

## 1.3.2 Aufbau von Freileitungen

### 1.3.2.1. Allgemeines

Freileitungen bestehen aus den Masten mit den entsprechenden Fundamenten inklusive der Masterdungen, den Isolatoren aus Glas, Porzellan oder Kunststoff, einem oder mehreren Blitzschutzseilen, sowie den Leiterseilen. Der grundsätzliche Aufbau einer Freileitung ist in **Abbildung 1.3** gezeigt.



**Abbildung 1.3** Aufbau einer Freileitung: 1 Erd- oder Blitzschutzseil, 2 Leiterseil, 3 Abspannmast, 4 Tragmast, 5 Traverse, 6 Isolator und l Spannfeldlänge [2]

Bei Freileitungen wird die umgebene Luft als Isoliermedium genutzt. Die Beherrschung der Spannung erfolgt durch große Isolationsabstände und ausreichend lang dimensionierte Isolatoren. Luft als Isoliermedium hat den großen Vorteil, dass sie sich ständig erneuert und keiner Alterung unterliegt. Hieraus ergibt sich auch bei fehlerbedingten Überschlägen in Form von Lichtbögen ein Selbstheilungseffekt, der den Weiterbetrieb der Leitung nach Anwendung der sogenannten Automatischen Wiedereinschaltung (AWE) und dem Verlöschen des Lichtbogens ermöglicht [3]. Darüber hinaus wird die durch den Stromfluss im Leiter entste-

hende Verlustwärme durch die Luft gut abgeführt, so dass kein Wärmestau entstehen kann. Die guten thermischen Eigenschaften einer Freileitung ermöglichen es auch, sie ohne weitere Nachteile oder größere Probleme zeitlich begrenzt zu überlasten.

Die sichere Einhaltung der für die jeweilige Spannungsebene notwendigen Isolationsabstände bestimmt auch die Abmessungen der Maste, die Mastabstände, sowie den zulässigen Seildurchhang. Da die Leiterseile einer Freileitung nicht isoliert ausgeführt sind, ist zur Sicherstellung der Isolationswirkung ein ausreichender Abstand zum Erdboden sowie zu Gebäuden oder hohem Bewuchs notwendig. Für 380 kV beträgt beispielsweise der Mindestabstand der Leiterseile zur Erdoberkante im freien Gelände 7,80 m. Dieser wird allerdings nur an sehr wenigen Stellen entlang der Leitungstrasse erreicht, da man heute mit Rücksicht auf größere landwirtschaftliche Geräte in der Regel größere Bodenabstände wählen wird. Laut [4] kann man heute von einem durchschnittlichen Bodenabstand von etwa 12,00 m ausgehen<sup>1)</sup>.

Zur Einhaltung der notwendigen Isolationsabstände muss entlang der Freileitung ein Schutzstreifen von hoch wachsendem Bewuchs und Bebauung freigehalten werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Leiterseile einer Freileitung bei entsprechenden Windlasten auch seitlich ausschlagen können. Der Schutzstreifen wird daher über die lotrechte Projektion der maximal ausgeschlagenen Leiterseile auf den Erdboden zuzüglich eines Sicherheitsabstandes bestimmt und nimmt damit eine parabolische Form an. Hierbei wird die größte Breite in der Spannungsmitte erreicht, wobei für eine typische 380-kV-Freileitung mit Donaumastgestänge von ca. 70 m ausgegangen werden kann. Im Schutzstreifen bestehen Nutzungseinschränkungen. Bei Einhaltung der Mindest-Isolationsabstände ist jedoch eine landwirtschaftliche Nutzung unterhalb der Trasse möglich. In Industriegebieten ist ebenfalls unter Einhaltung der Mindest-Isolationsabstände auch eine Bebauung möglich.

### 1.3.2.2. Freileitungsmaste

Freileitungsmaste werden allgemein in Tragmaste, Abspannmaste und weitere Sondermaste unterschieden. Während Tragmaste nur das Gewicht der Leiterseile tragen müssen, dienen Abspannmaste auch zur Aufnahme der Seilzugkräfte und müssen daher wesentlich stabiler ausgeführt werden. Mit Abspannmaste können auch Richtungsänderungen realisiert werden, wobei man dann von Winkelabspannmaste spricht. Allgemein müssen alle Maste stets so dimensioniert werden, dass sie die auftretenden Seilzugkräfte auch unter Berücksichtigung von zusätzlichen Wind- und Eislasten sicher aufnehmen können. Für den Abstand der Maste

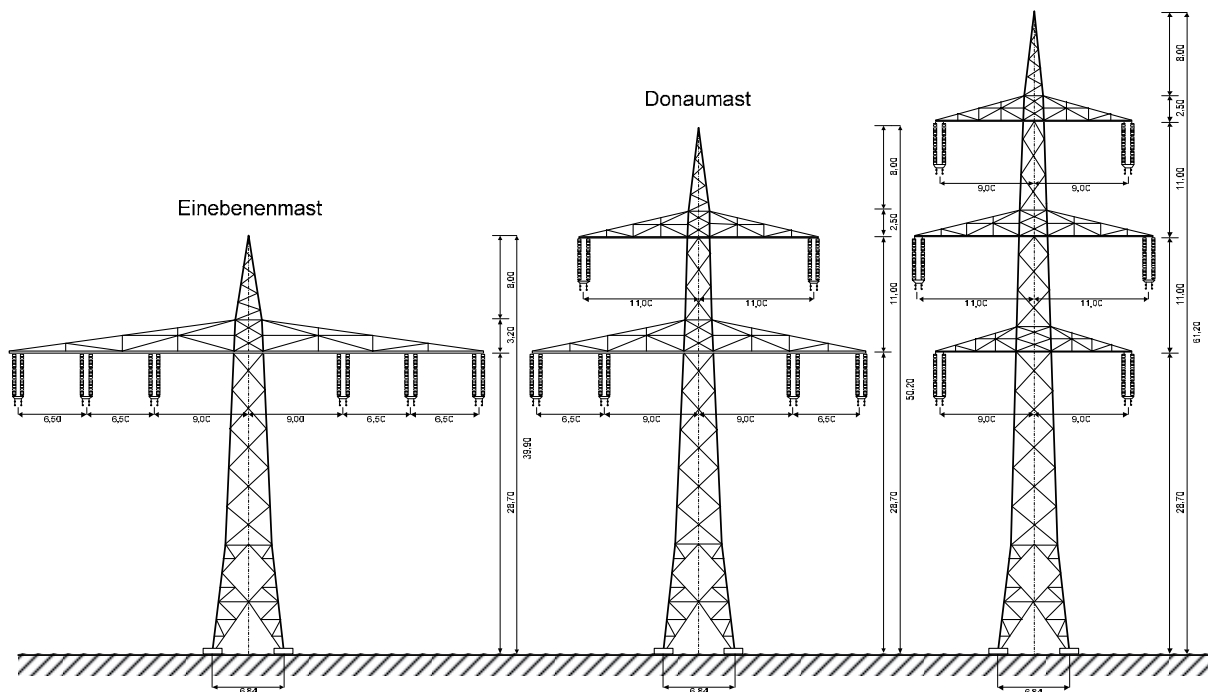
---

<sup>1)</sup>Diese Aussage wurde auch durch den Vertreter eines ÜNB im projektbegleitenden Arbeitskreis bestätigt.

voneinander kann für die 380-kV-Ebene von Spannweiten zwischen 300 und 500 m ausgegangen werden.

Grundsätzlich existiert weltweit eine Vielzahl unterschiedlicher Mastformen. Die genauen Abmessungen der Maste hängen grundsätzlich von der gewählten Mastform, der Spannungsebene und der Anzahl der aufgehängten Dreh- oder Gleichstromsysteme ab. In Deutschland werden vorwiegend Stahlgittermaste mit dem sogenannten Donau-Mastbild eingesetzt, da dieser in der Regel ein technisches, wirtschaftliches und ästhetisches Optimum für die deutschen Bedingungen darstellt. Bei einer Regelspannweite von etwa 400 m beträgt die erforderliche Masthöhe für Donau-Maste mit zwei Drehstromsystemen und einer Betriebsspannung von 380 kV etwa 54 m (siehe auch **Abbildung 1.4**). Sind größere Spannweiten erforderlich, z. B. zur Kreuzung von Gewässern oder größeren Verkehrswegen, so können auch wesentlich höhere Maste erforderlich werden (siehe auch Abschnitt 1.3.4).

Neben der Ausführung mit Donaumastbild besteht auch die Möglichkeit in besonderen Fällen andere Mastformen einzusetzen, um mögliche Konflikte zu mindern. Je nach den spezifischen Anforderungen kann zur Minimierung der Trassenbreite (z. B. in Waldgebieten) auch ein Tonnenmast oder zur Querung von Vogelschutzgebieten wegen seiner geringeren Gesamthöhe auch ein Einebenenmast eingesetzt werden.



**Abbildung 1.4** Größenvergleich verschiedener Freileitungsmaste für jeweils zwei Drehstromsysteme

In der Vergangenheit wurde auch eine Vielzahl von alternativen Masttypen entwickelt, mit denen eine kompaktere Bauform von Freileitungen erreicht werden soll. Hierdurch sollten insbesondere Vorteile in Bezug auf die auftretenden Mag-



netfelder als auch auf die Sichtbarkeit und die notwendige Trassenbreite erreicht werden. Eine kompaktere Bauweise kann z. B. durch die Verwendung von isolierenden Traversen aus Verbundmaterial in Verbindung mit Masten in Vollwandkonstruktion erreicht werden. Hierbei wird allerdings die Zugänglichkeit der einzelnen Systeme für die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen eingeschränkt. Durch die engere Leiterseilführung ist es, anders als bei den üblichen Stahlgitterkonstruktionen, nicht mehr möglich, ein einzelnes System z. B. zu Wartungszwecken abzuschalten, während das zweite System weiter unter Spannung verbleibt<sup>2)</sup>, da die vorgeschriebenen Mindestabstände zu den spannungsführenden Teilen nicht mehr eingehalten werden können. Das gleichzeitige Abschalten beider Systeme führt zu stark geänderten Leistungsflüssen im Verbundnetz. Dies führt zu betrieblichen Einschränkungen. Es kann in hochausgelasteten Netzen zu einer Gefährdung oder im schlimmsten Fall sogar Verletzung der (n-1)-Sicherheit kommen. Aus diesem Grund werden in Deutschland Kompaktbauweisen, wie sie z. B. von Tennet in den Niederlanden beim Wintrack-Projekt entwickelt wurden (siehe **Abbildung 1.5**), bisher ausschließlich für Sonderanwendungen eingesetzt.



**Abbildung 1.5** Sondermaste beim Wintrack-Projekt [5]

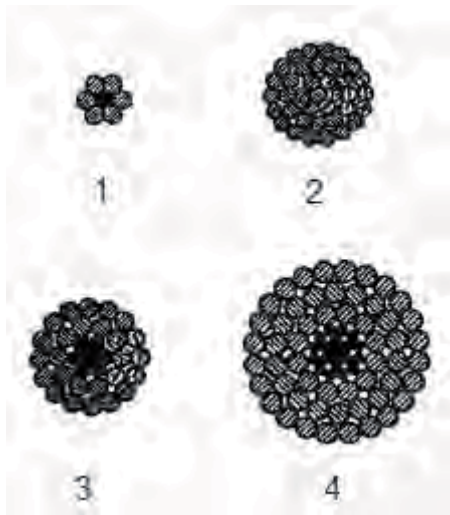
### 1.3.2.3. Leiterseile

Freileitungsseile (siehe **Abbildung 1.6**) bestehen aus mehreren Einzeldrähten aus Aluminium (Reinaluminium 99,5 %), Aluminiumlegierungen (Aldrey: 0,3 bis 0,5 % Mg, 0,4 bis 0,7 % Si, 0,3 % Fe, Rest Al) oder Kupfer (Cu). Für die in der Höchstspannungsebene üblichen Leiterquerschnitte werden aus Gewichts- und Kostengründen sogenannte Aluminium-Stahl-Seile eingesetzt. Hierbei werden

<sup>2)</sup> Aussage des Vertreters eines ÜNB im projektbegleitenden Arbeitskreis.

Aluminiumdrähte in einer oder mehreren Lagen auf ein Stahlseil aufgebracht. Das Stahlseil hat hierbei die Aufgabe, die auftretenden Zugkräfte aufzunehmen, trägt aber aufgrund seines im Vergleich zu Aluminium deutlich höheren Widerstandes nicht nennenswert zur Stromleitung bei.

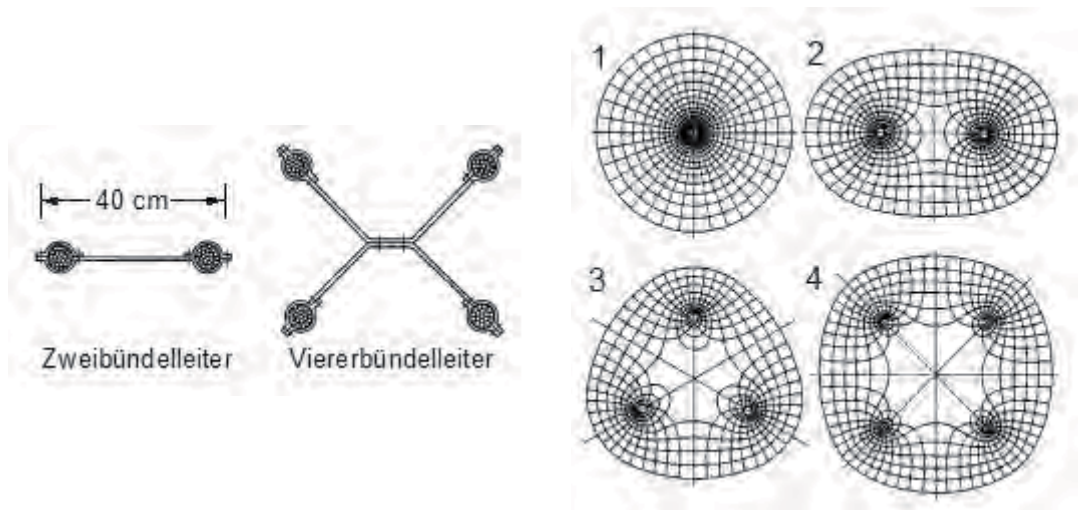
Die Dimensionierung der Leiterseile beeinflusst primär die Größe des elektrischen Widerstandes und die hieraus resultierenden Strom-Wärme-Verluste sowie den Spannungsabfall entlang der Leitung. Die Wahl des Querschnittes bestimmt somit neben der zulässigen Übertragungsleistung auch die Höhe der entstehenden Verlustkosten. In Abhängigkeit von den zu erwartenden Leiterströmen ist der Leiterquerschnitt so zu wählen, dass die höchstzulässige Seiltemperatur weder im Normalbetrieb noch im Kurzschlussfall überschritten wird. Für Standardseile liegt die zulässige Betriebstemperatur für den Dauerbetrieb bei 80°C. Da der Seildurchhang einer Freileitung aufgrund der Längenänderung der Leiterseile temperaturabhängig ist, muss die Freileitung so ausgelegt werden, dass auch bei Erreichen dieser Maximaltemperatur die vorgeschriebenen Mindestabstände eingehalten werden. Weiterhin ist bei der Wahl des Querschnittes zu beachten, dass die Leiterseile über eine ausreichende Bruchfestigkeit zur Beherrschung der maximal zu erwartenden mechanischen Belastungen verfügen. Hierbei sind die zu erwartenden Zusatzlasten, zum Beispiel durch Wind oder starken Eisbehang, zu beachten und durch entsprechende Sicherheitsfaktoren mit einzubeziehen.



**Abbildung 1.6** Aufbau von Freileitungsseilen  
1 Al/St-Seil (eine Lage Al), 2 Al- oder Cu-Seil (3 Lagen, 37 Drähte), 3 Al/St-Seil (2 Lagen Al), 4 Al/St-Seil (3 Lagen Al)

Für Leitungen mit Betriebsspannungen von 220 kV und mehr kommen in der Regel sogenannte Bündelleiter zum Einsatz (siehe **Abbildung 1.7**). Diese haben den Vorteil, dass sich für die elektrische Randfeldstärke deutlich kleinere Werte einstellen als bei Einzelleitern, was sich positiv auf den sogenannten HF-Störpegel und die Geräuschentwicklung auswirkt. Ein weiterer Vorteil von Bündelleitern ist, dass

größere Querschnitte durch den Einsatz von verhältnismäßig leichteren Einzelseilen erreicht werden können, was die Bauarbeiten erleichtert. Damit der Abstand zwischen den Teilleitern (in der Regel 40 bis 50 cm) auch bei Wind eingehalten wird, werden in regelmäßigen Abständen Abstandshalter eingesetzt.



**Abbildung 1.7** Aufbau von Bündelleitern [2]

links: Bündelleiter mit Abstandshalter

rechts: Feldbilder eines Einzelleiters und verschiedener Bündelleitern

Um Ermüdungserscheinungen in den Seilen und an den Aufhängungen zu vermeiden und das Risiko von Ermüdungsbrüchen zu senken, müssen mechanische Schwingungen, die sich windbedingt oder durch elektrische Stromkräfte entlang der Leiterseile ausbilden, gedämpft werden. Dies kann zum einen durch eine Optimierung des Seildurchhanges, zum anderen durch die Installation dämpfend wirkender Zusatzmassen (Schwingungsdämpfer) erfolgen (siehe **Abbildung 1.8**).



**Abbildung 1.8** Schwingungsdämpfer [6]

Aluminiumseile besitzen eine hohe Lebensdauer und sind relativ unempfindlich gegen Korrosion, da sie durch eine Oxidschicht an der Oberfläche vor äußeren Einflüssen geschützt werden. Damit können Freileitungen ohne weiteres auch in Bereichen errichtet werden, in denen mit einer erhöhten Korrosionsbelastung (z. B. durch salzwasserhaltige Luft) zu rechnen ist. Bei Aluminium-Stahl-Verbundseilen muss hierbei jedoch auf den Schutz der inneren Stahlseele geachtet werden, z. B. durch den Einsatz von verzinkten Stahldrähten.

Neben den genannten Standardseilen ist heute auch eine Vielzahl von Sonderseilen erhältlich. Hiermit sollen niedrigere Seilgewichte und höhere Übertragungsleistungen erreicht werden. Seile die eine höhere Leiterseiltemperatur ohne Schaden verkraften und dadurch höhere Übertragungsleistungen ermöglichen, werden als Hochtemperatur-Leiterseile bezeichnet. Grundsätzlich können zwei Arten von Hochtemperaturleiterseilen unterschieden werden.

Konventionelle Hochtemperaturseile (sog. TAL-Seile<sup>3)</sup>) unterscheiden sich im Aufbau nicht von konventionellen Leiterseilen. Das verwendete Aluminium wird allerdings so behandelt, dass höhere Temperaturen bis etwa 150°C zugelassen werden können. Hierbei ist zu beachten, dass der Durchhang dieser Seile durch die höheren Temperaturen größer ist als bei Standardseilen. Dies führt dazu, dass gegebenenfalls die vorhandenen Maste erhöht werden müssen oder die Statik der Maste für die größeren Seilzugkräfte angepasst werden muss.

Neben den konventionellen Hochtemperaturleiterseilen sind heute auch Leiterseile erhältlich, deren Aufbau so gewählt wurde, dass auch bei größeren Seiltemperaturen keine übermäßige Längendehnung und damit keine erhöhten Seildurchhänge auftreten. Dies wird dadurch erreicht, dass die Leiterseile alleine am Leiterkern abgespannt werden, so dass dieser alleine das Ausdehnungsverhalten bestimmt. Für den Kern werden außerdem besondere Werkstoffe eingesetzt, die eine geringere Ausdehnung für hohe Temperaturen besitzen. Neben Seilen mit einem Kern aus einem Kohlefaser-Werkstoff (sog. ACCC) sind auch Seile mit einem Kern aus einem Keramikfaser-Aluminium-Verbundwerkstoff (sog. ACCR) erhältlich. Für beide Seiltypen werden Spezialarmaturen benötigt, die ausschließlich bei US-Herstellern nach US-Norm erhältlich sind. Eine durchgängige europäische Normung existiert zurzeit hierzu noch nicht.

Der Vorteil von Hochtemperaturseilen liegt darin, dass vorhandene Trassen hinsichtlich einer höheren Übertragungsleistung ertüchtigt werden können und so der Bedarf für den Netzausbau zumindest vermindert werden kann. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass durch die höheren Ströme und den durch die hohen Temperaturen vergrößerten Leiterseilwiderstand ein erheblicher Zuwachs der Übertragungsverluste (vgl. Abschnitt 2.4) zu erwarten ist. Außerdem sind die Kosten für die Hochtemperatur-Leiterseile um den Faktor 1,1 bis 6 höher als für Standardseile [7].

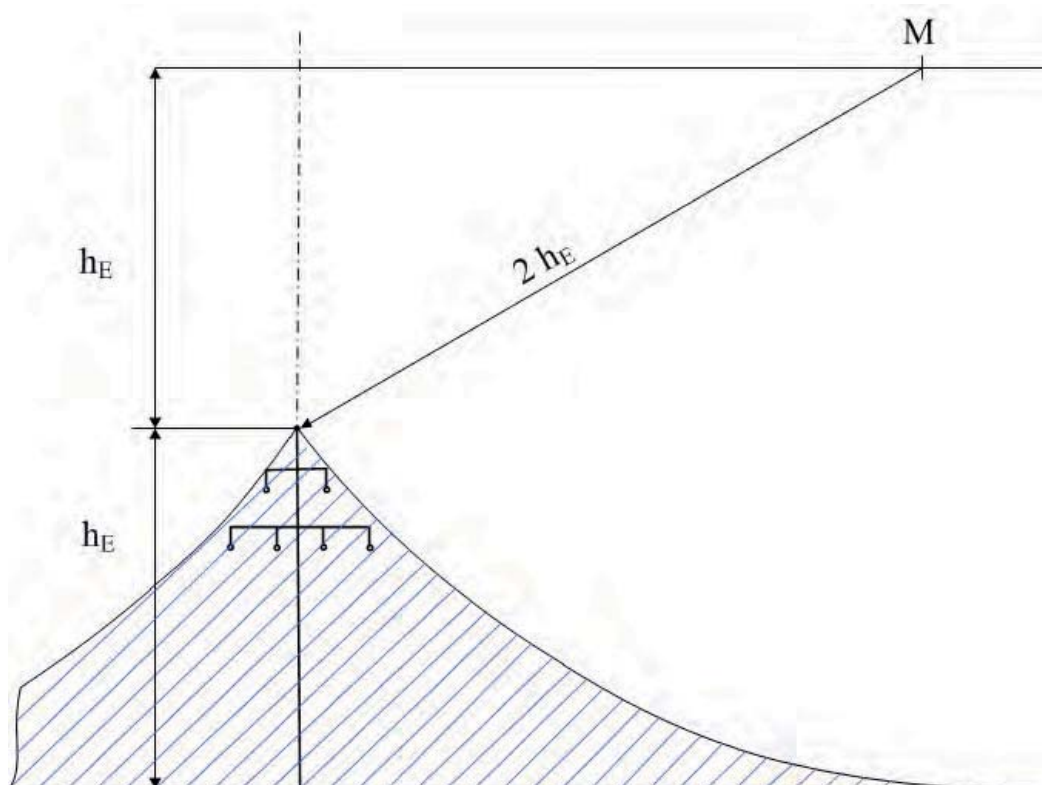
#### 1.3.2.4. Erdseil

Freileitungen mit Nennspannungen über 110 kV werden üblicherweise mit einem oder mehreren Leiterseilen an der Mastspitze ausgestattet. Diese werden an jedem Freileitungsmast mit der Masterdungsanlage verbunden und besitzen damit Erdpotential. Der Hauptzweck des Erdseils besteht im Schutz der Leiterseile vor direk-

---

<sup>3)</sup> TAL steht hierbei für temperaturbeständiges Aluminium

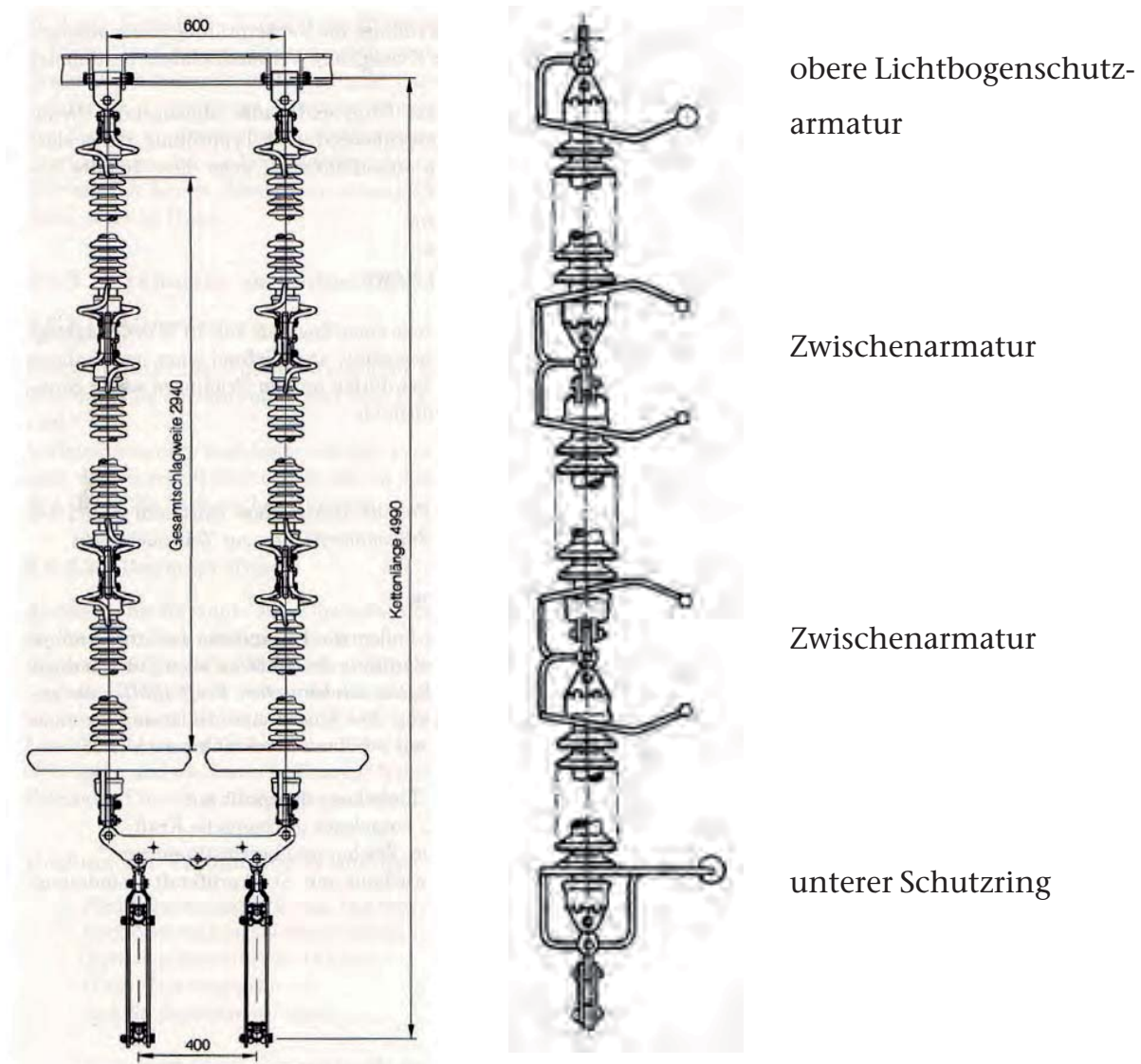
ten Blitzeinschlägen. Unterhalb des Erdseils bildet sich ein sogenannter Blitzschutzraum entsprechend **Abbildung 1.9** aus, der näherungsweise durch die Segmente zweier Kreise begrenzt wird, die durch die Erdseilaufhängung am Mast laufen und den Erdboden als Tangente haben. Der Radius der Kreise ist das Doppelte der Aufhängehöhe  $h_E$  des Erdseils am Mast. Werden mehrere Erdseile eingesetzt, dann bildet sich unter jedem einzelnen Erdseil ein Blitzschutzraum entsprechend **Abbildung 1.9** aus, wodurch der geschützte Gesamtraum entsprechend vergrößert wird. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitz direkt in eines der Leiterseile einschlägt wird hierdurch erheblich reduziert. Man schätzt, dass trotz der Erdseile noch 1-2 % der Blitze in die Leiterseile einschlagen [3].



**Abbildung 1.9** Blitzschutzraum unterhalb des auf den Mastspitzen verlegten Erdseils

#### 1.3.2.5. Isolatoren und Armaturen

Als Isolatoren werden in der Höchstspannungsebene Hängeisolatoren eingesetzt. In Deutschland werden hierbei zumeist sogenannte Langstabisolatoren aus Porzellan und neuerdings auch Verbundisolatoren aus glasfaserverstärkten Kunststoffen mit Silikongummiüberzug verwendet. Für Spannungen über 110 kV werden diese zu Ketten von zwei (i.d.R. 220 kV) bis drei (i.d.R. 380 kV) Isolatoren zusammengefügt (siehe auch **Abbildung 1.10**).



obere Lichtbogenschutz-  
armatur

Zwischenarmatur

Zwischenarmatur

unterer Schutzring

**Abbildung 1.10** links: 380-kV-Doppeltragkette für Viererbündel [8]  
 rechts: Isolator-kette mit Einhorn-Lichtbogenschutzarmaturen [2]

Die Isolatoren von Freileitungen sind sowohl mechanischen als auch elektrischen Belastungen ausgesetzt und müssen daher so ausgelegt werden, dass beide Beanspruchungen sicher beherrscht werden. Der gewellte Aufbau aus einzelnen Kap-pen dient dazu, dass die Kriechstrecke entlang des Isolators möglichst lang wird. Hierdurch soll erreicht werden, dass auch verschmutzte Isolatoren (z. B. durch Wasser, Salz oder andere Einflüsse) der Betriebsspannung standhalten, und so die Isolierung gegen die geerdeten Masten sichergestellt wird [9].

Als Hochspannungsarmaturen werden sämtliche Zubehörteile bezeichnet. Diese teilen sich gemäß [10] in Leiterseil- und Isolator-Zubehörteile sowie Schutzarmaturen auf. Zu den Leiterseil-Zubehörteilen gehören neben verschiedenen Klemmen und Verbindern auch die Schwingungsdämpfer, Abstandshalter, Flugwarnkugeln, Vogelschutzmarkierungen und Radarmarker. Zu den Isolator-

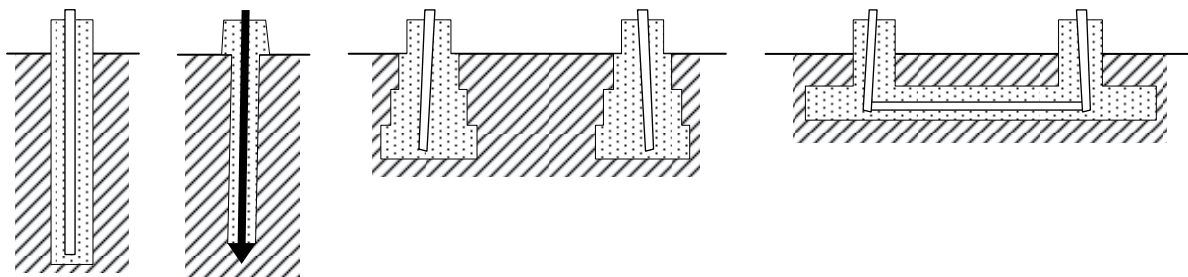
Zubehörteilen zählen Abstandshalter, verschiedene Klemmen und weitere spezielle Teile.

Die Schutzarmaturen haben die Aufgabe den Isolator gegen die Einwirkungen von Lichtbögen zu schützen und die Potentialverteilung längs des Isolators zu verbessern. Außerdem sollen sie die Randfeldstärken im Bereich der Klemmen reduzieren und hierdurch Sprühercheinungen und Funkstörungen vermindern. Sie müssen so konstruiert sein, dass sie den im Fehlerfall entstehenden Lichtbogen möglichst schnell übernehmen und vom Isolator wegführen. Hierdurch soll eine thermische Beschädigung der Isolatoroberfläche verhindert werden.

### 1.3.3 Errichtung von Freileitungen

Die baulichen Maßnahmen bei der Errichtung einer Freileitung beschränken sich im Wesentlichen auf die Maststandorte selbst. Vor Beginn der Bauarbeiten ist die gesamte Trassenlänge auf der vollen Schutzstreifenbreite von hohem Bewuchs (Bäumen) zu befreien. Niedriger Bewuchs (z. B. Büsche) kann auf der überspannten Fläche erhalten bleiben, hier sind lediglich die Maststandorte frei zu machen. Danach sind die Baustellen einzurichten und zu sichern. Die für die Montage des Mastes notwendige Arbeitsfläche beträgt etwa 40 x 40 m. Weiterhin ist die Schaffung einer temporären Zuwegung von etwa 4 m Breite notwendig. Hier ist es häufig ausreichend, wenn diese durch Bohlen, Bauplatten oder Baggermatten befestigt werden, je nach Baugrund müssen gegebenenfalls aber auch Baustraßen eingerichtet werden.

Die einzelnen Segmente eines Freileitungsmastes werden direkt an der Baustelle aus einzelnen Bauteilen aus verzinktem Stahl vormontiert und in der Regel mit Hilfe eines Autokranes aufgestellt (siehe Abbildung 1.11, links). Als Fundament (Abbildung 1.11) kommen entweder Bohrfundamente, Rammpfahlgründungen oder vor Ort aus Fertigbeton gegossene Stufenfundamente zum Einsatz. In Sonderfällen, wie z. B. in Bergsenkungsgebieten, können gegebenenfalls auch Plattenfundamente vorgesehen werden.



**Abbildung 1.11** Mastgründungen: Bohr-, Rammpfahl-, Stufen- und Plattenfundament [11]

Die Auswahl und die Abmessungen eines geeigneten Fundamenttyps sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Hierzu zählen im Wesentlichen die aufzuneh-