

MARKUS PALIC
KONSTANTIN O. PAPAILIOU
GUNTRAM SCHULTZ



Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen

kompakt

expert›



WENN KNOW-HOW AUF BEGEISTERUNG TRIFFT

Die Omexom Hochspannung GmbH bringt Energie zu den Menschen. Sie ist Komplettdienstleister für Infrastruktur im Freileitungs- und Erdkabelbau.

www.omexom.de



Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen kompakt

Markus Palic, Konstantin O. Papailiou, Guntram Schultz

Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen

kompakt

expert›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

DOI: <https://doi.org/10.24053/9783381104826>

© 2023 expert verlag

– ein Unternehmen der Narr Francke Attempto Verlag GmbH + Co. KG

Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen. Diese Publikation enthält gegebenenfalls Links zu externen Inhalten Dritter, auf die weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen Einfluss haben. Für die Inhalte der verlinkten Seiten sind stets die jeweiligen Anbieter oder Betreibenden der Seiten verantwortlich.

Internet: www.expertverlag.de

eMail: info@verlag.expert

Elanders GmbH

ISBN 978-3-381-10481-9 (Print)

ISBN 978-3-381-10482-6 (ePDF)

ISBN 978-3-381-10483-3 (ePub)

Inhalt

Geleitwort	11
Vorwort der Autoren	13
1 Geschichte und Grundlagen der elektrischen Energieübertragung	15
1.1 Historie der Stromübertragung	15
1.2 Entwicklung der Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen	20
1.3 Entwicklung der Hoch- und Höchstspannungskabel	23
1.4 Gleich- und Drehstrom in der Energieübertragung	27
1.5 Aufgaben und Strukturen elektrischer Energienetze	30
1.6 Grundlagen der Netzplanung	33
1.7 Netzbetrieb	36
2 Gestaltung von Freileitungs- und Kabeltrassen	41
2.1 Freileitungstrassen	41
2.1.1 Mastformen und Landschaft	43
2.1.2 Kompakte Doppelfreileitungen	45
2.1.3 Kompakte Mehrfachfreileitungen	47
2.1.4 Schutzbereiche von Freileitungen	47
2.1.5 Landwirtschaftlich genutzte Bereiche	51
2.1.6 Waldflächen	51
2.1.7 Bereiche mit Höhenbeschränkungen	54
2.1.8 Siedlungsbereiche	55
2.2 Kabeltrassen	56
2.2.1 Drehstrom-Kabeltrassen	57
2.2.2 Gleichstrom-Kabeltrassen	59
2.2.3 Verlegearten	60
2.2.4 Muffen- und Übergangsanlagen	67
2.2.5 Kreuzungen	70
2.2.6 Trassen mit temporären Gestängen	72
2.2.7 Trassenausnutzung	72
3 Genehmigungsverfahren und Umweltverträglichkeit	75
3.1 Verfahren für Hochspannungsleitungen (110 kV)	75

3.2	Verfahren und Gesetze für vordringliche Höchstspannungsleitungen	77
3.2.1	Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG)	77
3.2.2	Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG)	77
3.2.3	Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG)	78
3.3	Verfahren für nicht vordringliche Höchstspannungsleitungen	82
3.4	Entwicklung des Europäischen Netzverbundes	82
3.5	Raumordnungsverfahren (ROV)	83
3.5.1	Aufgabe der Raumordnung	84
3.5.2	Ablauf eines Raumordnungsverfahrens	85
3.5.3	Raumordnerische Beurteilung	86
3.6	Bundesfachplanung (BFP)	87
3.7	Planfeststellungsverfahren (PFV)	89
3.7.1	Ablauf des Planfeststellungsverfahrens	90
3.7.2	Der Planfeststellungsbeschluss	92
3.8	Das NOVA-Prinzip	93
3.9	Umweltverträglichkeit von Freileitungen und Kabeln	95
3.9.1	Strategische Umweltprüfung (SUP)	95
3.9.2	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	97
3.9.3	Beeinträchtigungen der Avifauna	100
3.9.4	Landschaftspflegerischer Begleitplan und Eingriffsausgleich	102
3.10	Entschädigungen	103
4	Freileitungstechnik	107
4.1	Bemessung von Freileitungen	107
4.1.1	Seilgewicht	108
4.1.2	Eislasten	108
4.1.3	Windlasten	108
4.1.4	Bemessung der Komponenten	109
4.1.5	Elektrische Anforderungen	109
4.2	Leiteseile	110
4.2.1	Typen und grundlegende Eigenschaften von Leiteseilen	111
4.2.2	Kriechen	112
4.2.3	Seilverhalten	113
4.2.4	Seildurchhang	114
4.2.5	Seilbelastung	115
4.2.6	Thermisches Verhalten	115
4.2.7	Korona	117
4.2.8	Bündelleiter	118
4.2.9	Erdseile	118
4.2.10	Hochtemperatur-Leiteseile	119

4.2.11	Freileitungs-Monitoring	121
4.2.12	Seilschwingungen	123
4.3	Isolatoren	127
4.3.1	Klassifizierung	128
4.3.2	Porzellanisolatoren	132
4.3.3	Glasisolatoren	133
4.3.4	Verbundisolatoren	133
4.4	Armaturen	137
4.4.1	Seilarmaturen	138
4.4.2	Isolatorkettenarmaturen	140
4.4.3	Schwingungsdämpfer	141
4.4.4	Abstandshalter	141
4.5	Tragwerke	142
4.5.1	Materialien	143
4.5.2	Mastarten	143
4.5.3	Entwurf der Tragwerks-Geometrie	144
4.5.4	Auf Tragwerke wirkende Belastungen	144
4.5.5	Blitzschutz	145
4.5.6	Erdung	145
4.5.7	Gründungen	146
4.6	Leitungsbau	147
4.6.1	Vermessung und Mastausteilung	147
4.6.2	Vorbereitung der Baustelle	147
4.6.3	Gründungen	148
4.6.4	Mastbau	150
4.6.5	Seilverlegung	152
4.7	Inspektion und Wartung von Freileitungen	154
4.8	Verstärkung und Ertüchtigung von Freileitungen	155
4.8.1	Verstärkung	155
4.8.2	Ertüchtigung	155
5	Kabeltechnik	157
5.1	Kabelaufbau	157
5.2	Kabelkonstruktionen	162
5.3	Kabel für Mittel-, Hoch- und Höchstspannung	163
5.3.1	Mittelspannungskabel	164
5.3.2	Hochspannungskabel	165
5.3.3	Höchstspannungskabel	168
5.4	Gasisolierte Rohrleitungen	169
5.5	Kabel zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung	171

5.6	Kabel-Garnituren	171
5.6.1	Muffen	173
5.6.2	Endverschlüsse	175
5.6.3	Steckbare Anschlusssysteme	177
5.7	Kabel- und Bodenerwärmung	178
5.8	Einsatzgebiete	181
6	Freileitungen und Kabel im Versorgungsnetz	183
6.1	Elektrotechnische Aspekte	183
6.1.1	Vergleich der elektrischen Eigenschaften	184
6.1.2	Betriebsverhalten	185
6.1.3	Strombelastbarkeit	188
6.1.4	Verluste	188
6.1.5	Blindleistungsverhalten und übertragbare Leistung	189
6.2	Zuverlässigkeit und Lebensdauer	191
6.3	Elektrische und magnetische Felder (EMF)	192
6.4	Lastfluss- und Kurzschlussverhältnisse im Netz	196
6.5	Zwischenverkabelung	197
6.6	Integration von Gleichstromleitungen in ein bestehendes Drehstromnetz	199
6.7	Kostenvergleich zwischen Freileitungen und Kabeln	201
6.7.1	Kostenkomponenten einer Leitung	201
6.7.2	Kostenvergleich in der Hochspannungsebene	203
6.7.3	Kostenvergleich in der Höchstspannungsebene	204
7	Entwicklungstendenzen und Ausblick	207
7.1	Übertragungsnetz	208
7.2	Verteilnetze	209
7.3	Sektorenkopplung	210
7.4	Technische Entwicklungen im Netzbau	211
7.4.1	Hochtemperaturseile	211
7.4.2	Kompaktleitungen mit Verbundisolatoren	212
7.4.3	Gasisolierte Leitungen (GIL) für Drehstrom und Gleichstrom	212
7.4.4	Supraleiterkabel	213
7.4.5	Kabel zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung – Overlay-Netz	214
	Danke	217
	Literaturverzeichnis	219
	Register	231

Abbildungsverzeichnis	235
Tabellenverzeichnis	242

Geleitwort

Der Netzausbau steht seit Jahrzehnten im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion. Mal stärker, mal weniger stark. Das steigende Umweltbewusstsein und der nötige Ausbau der Energieinfrastruktur prallen immer wieder aufeinander. Einerseits sind Energieversorger und Netzbetreiber gesetzlich verpflichtet, die Infrastruktur den wachsenden und sich derzeit massiv verändernden Rahmenbedingungen durch die Energiewende und der angestrebten Sektorenkopplung anzupassen. Andererseits ist der Ausbau der hierfür dringend nötigen Anlagen, seien es Windkraftanlagen, Energieleitungen, Umspannanlagen oder Konverterstationen mit Eingriffen in Natur und Landschaft verbunden, die vielerorts von weiten Teilen der Bevölkerung abgelehnt werden. Trotz immer wieder neuer gesetzlicher Regelungen zum beschleunigten Ausbau geht es gemessen an den politischen Zielen zu langsam voran. Ein Dilemma, dass sich nicht abstellen, aber deutlich versachlichen ließe, wenn sich alle Beteiligten über die ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten zum Infrastrukturausbau ausführlicher informieren würden. Erfahrungsgemäß entstehen die meisten Konflikte dadurch, dass sich die Experten in den einzelnen Disziplinen zu wenig mit den jeweils anderen austauschen.

Das vorliegende Buch widmet sich einem derzeit sehr wichtigen Anliegen: dem Netzausbau. In einer kompakten und für jedermann verständlichen Weise beschreibt es die einzelnen technischen Komponenten, geht auf deren Umweltverträglichkeit ein und schildert die wichtigsten Verfahren zur Realisierung von Freileitungen und Kabeln in Hoch- und Höchstspannungsnetzen. Eine empfehlenswerte Lektüre für Einsteiger in das Thema Netzausbau und für Beteiligte an öffentlichen Genehmigungsverfahren für überregionale Energieleitungen.

Matthias Otte

Abteilungsleiter Netzausbau bei der Bundesnetzagentur

Vorwort der Autoren

Durch die beschleunigte Verschiebung der Erzeugungsschwerpunkte im Zuge der Energiewende, weg von den traditionellen, meist nuklear und fossil betriebenen Kraftwerken in der Nähe der Lastschwerpunkte, hin zur regenerativen Stromerzeugung aus Windkraft in der Nord- und Ostsee, muss der Strom über mehrere leistungsstarke Leitungsverbindungen über viele hundert Kilometer in die Mitte und den Süden Deutschlands transportiert werden. Darüber hinaus muss das bestehende Drehstromnetz in allen Spannungsebenen massiv verstärkt und ausgebaut werden. Die anfängliche Absicht, den Ausbau des Hoch- und Höchstspannungs-Drehstromnetzes mehrheitlich in Form von Freileitungen zu realisieren, scheiterte am Widerstand der Bevölkerung. Durch die inzwischen etablierten Beurteilungs- und Genehmigungsverfahren, mit zum Teil exzessiver Öffentlichkeitsbeteiligung, befassen sich neben den Planern, den Genehmigungsbehörden und den Trägern öffentlicher Belange inzwischen auch Heerscharen von Bürgerinnen und Bürgern mit diesem Thema.

Im Mittelpunkt der Diskussion stand und steht neben der grundsätzlichen Frage nach der Notwendigkeit von Leitungsprojekten stets der dringende Wunsch nach deren vollständigen Verkabelung. Die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen, insbesondere im Hoch- und Höchstspannungsnetz, sind vielschichtig und komplex. Deshalb werden sie meist ignoriert. Die in den vergangenen rund 40 Jahren hinzugekommenen verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen und ihre fortwährende Novellierung verlangen von allen Verfahrensbeteiligten neben einem soliden Grundwissen über die technische Ausgestaltung ein stetes Hinzulernen und gleichzeitig ein Höchstmaß an Flexibilität.

Das vorliegende Buch stellt eine Kompaktversion des gleichnamigen Fachbuchs der Autoren dar. Es ist vorgesehen für Techniker und Ingenieure, die neu in das Thema einsteigen. Ebenso soll es technische Laien ansprechen, die an Genehmigungsverfahren für Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen und -kabel beteiligt sind. Es verzichtet auf wissenschaftlichen Tiefgang und führt leicht verständlich und umfassend in das Thema ein. Demzufolge ist es in einen technischen und einen verfahrenstechnischen Teil gegliedert. Im technischen Teil werden die beiden Betriebsmittel Kabel und Freileitung beschrieben, in ihrer Funktionsweisen miteinander verglichen und ihr Zusammenwirken im Netz beschrieben. Der vorangestellte verfahrens- und umwelttechnische Teil gibt einen Überblick über die durchzuführenden Planungs- und Genehmigungsverfahren, die inzwischen größtenteils durch die Bundesnetzagentur detailliert vorgegeben werden.

Karlsruhe/Malters, im März 2023

Markus Palic, Konstantin O. Papailiou, Guntram Schultz

1 Geschichte und Grundlagen der elektrischen Energieübertragung

1.1 Historie der Stromübertragung

Wie so oft in der Geschichte, beginnen bedeutende Entwicklungen mit einem Streit unter Experten. So auch bei der grundlegenden Entscheidung über die Spannungsart- und -höhe bei der Fernübertragung elektrischer Energie. Die beiden Protagonisten Thomas Alva Edison und Nikola Tesla stritten im ausgehenden 19ten Jahrhundert unerbittlich darüber. Während sich Edison als Verfechter des Gleichstroms (DC, aus dem Englischen: *direct current*) vehement für die Gleichstromübertragung einsetzte, bewies Tesla den größeren Weitblick, indem er eine Wechselstromübertragung bzw. mit deren Erweiterung auf drei Leiter eine Drehstromübertragung (AC, aus dem Englischen: *alternating current*) forderte, die wir heute auf unterschiedlichen Spannungsebenen in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung europaweit mit einer Frequenz von 50 Hertz (Hz) einsetzen. Weshalb sich die Wechsel- bzw. Drehstromtechnik für die Fernübertragung elektrischer Energie besser eignet, wird in den folgenden Kapiteln eingehend behandelt. Dass wir uns heute erneut mit der Gleichstromübertragung in der Höchstspannungsebene befassen, hat mit dieser Entscheidung erst einmal nichts zu tun. Davon später.

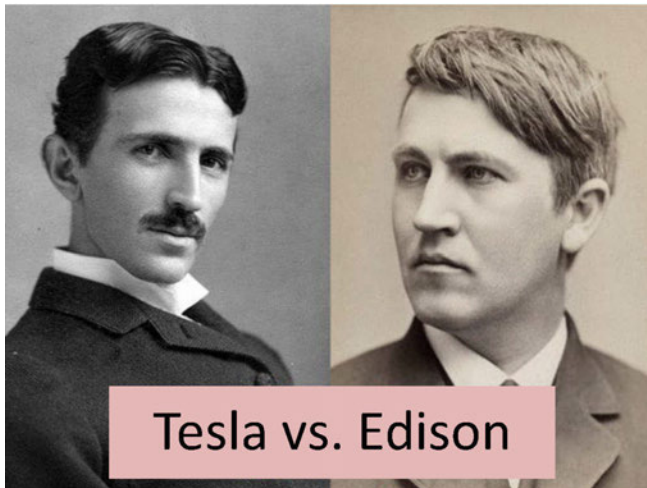


Abb. 1 Nikola Tesla (links) und Thomas Alva Edison (rechts) – zwei Protagonisten im Stromkrieg [1]

Nicola Tesla war ein serbischer Ingenieur, der sein Studium an der technischen Hochschule in Graz unvollendet abbrach. Danach folgten mehreren Stationen als Konstrukteur und Erfinder. Schließlich landete er 1882 bei „Continental Edison“ in Paris und arbeitete an der elektrischen Straßenbeleuchtung der Stadt. Der dortige Vorsteher Edisons kontinentaler Zweigstelle ermunterte ihn, der besseren Karrierechancen wegen, an den Hauptsitz der Firma nach New York zu wechseln. Dem Vernehmen nach begann dessen Empfehlungsschreiben an den Chef in den USA mit folgendem Wortlaut:

„Mein lieber Edison: ich kenne zwei großartige Männer und sie sind einer von ihnen. Der andere ist der junge Mann.“

Der Autodidakt Edison begann seine Karriere ohne eine besondere Ausbildung bei der mit Gleichstrom betriebenen Telegrafie und war der festen Überzeugung, dass auch die *Starkstromübertragung* mit Gleichstrom erfolgen müsste. Er erkannte Teslas Genialität und beauftragte ihn, mit Aussicht auf eine erkleckliche Prämie, seine Gleichstrommotoren zu verbessern, um sich nicht weiter mit der vermeintlich untauglichen Wechselstromtechnik zu befassen. Als die versprochene Prämie trotz erfolgreicher Bewältigung der Aufgabe ausblieb, kündigte Tesla.

Anschließend entwickelte er gemeinsam mit dem Großindustrielle George Westinghouse die Wechselstromtechnik weiter und begann, sie auch zur Fernübertragung von Elektrizität einzusetzen. So gerieten Edison und Westinghouse, der Teslas Wechselstromforschung unterstützte und deren Ergebnisse vermarktete, heftig aneinander.

In dem Streit beschwor Edison stets die Gefahr, die von Wechselstrom ausgehe und verwies immer wieder auf den mit Wechselstrom betriebenen elektrischen Stuhl, der 1890 im Bundesstaat New York erstmals zum Einsatz kam. Edison unternahm einige Versuche, Wechselstrom wegen dessen Gefährlichkeit behördlich verbieten zu lassen. Ohne Erfolg.

Für die Elektrizitätsübertragung über weite Strecken erwies sich Gleichstrom als weniger geeignet. Die erste Gleichstrom-Überland-Freileitung, die Oskar von Miller (Abb. 2), der spätere Gründer des Deutschen Museums, anlässlich der „Münchener Elektrizitätsausstellung“ 1881 bauen ließ, zeigte es überdeutlich. Der von einer 1,5-PS-Dampfmaschine angetriebene Gleichstromgenerator im 57 km entfernten Miesbach erzeugte die nötige elektrische Energie mit einer Anfangsspannung von etwa 2 kV. Am Leitungsende, auf dem Münchner Ausstellungsgelände, wo sie eine Pumpe für einen kleinen Wasserfall antrieb, betrug sie lediglich noch rund 1,5 kV. Die zur Hochspannungsleitung missbrauchte Telegrafienleitung hatte einen Leitungswiderstand von 3.000 Ohm (Ω) und brachte es gerade einmal auf einen Wirkungsgrad von rund 25 % [1]. Die Wahl eines größeren Querschnitts hätte das Ergebnis sicher verbessert, zufriedenstellend wäre es dennoch nicht gewesen. Da sich die übertragene elektrische Leistung aus dem Produkt aus Strom und Spannung ergibt, wären für die Übertragung höherer Leistungen über längere Strecken, wegen der damals begrenzten Spannungshöhe, große Querschnitte aus teurem Kupfer notwendig gewesen. Obendrein führte das

Schalten hoher Gleichströme durch Lichtbögen an den Schaltkontakten fortwährend zu einem unerwünschten Abbrand.



Abb. 2 Oskar von Miller [2]



Abb. 3 Internationale Frankfurter Elektrizitätsausstellung 1891 [3]

Rund zehn Jahre später war es erneut Oskar von Miller, der sich als Pionier hervor tat. Für die 1891 in Frankfurt am Main stattfindende „Internationale Elektrotechnische Ausstellung“, die er organisierte, ließ er wieder eine Überlandleitung bauen (Abb. 3). Diesmal mit Drehstrom betrieben, einer Wechselstromvariante für die Übertragung höherer Leistungen, und in einem Design, welches sich für spätere Hochspannungs-Freileitungen als maßstäblich erweisen sollte. Die Einspeisung erfolgte in Lauffen am Neckar und die Leitungslänge betrug stattliche 175 km. Der Clou war diesmal die niedrige Generator-Spannung von 55 V, die über einen Transformator auf 15 000 V hochtransformiert und über die Freileitung nach Frankfurt weitergeleitet wurde, um im dortigen Ausstellungsgelände auf die Betriebsspannung der dort befindlichen Motoren und Glühlampen heruntertransformiert zu werden.

Wie aber ist es möglich, Übertragungsspannungen in dieser atemberaubenden Höhe am Leitungsanfang herauf- und am Ende herunterzutransformieren? Das wollen wir uns im Folgenden genauer betrachten.

Die Entdeckung der, dieses Phänomen beschreibenden Elektrodynamik reicht in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts zurück. Seither wurden deren Anwendungen weiterentwickelt und perfektioniert. Jeder, der in der Schule die Mittelstufe durchlief, kennt den Versuch, bei dem die Lehrerin oder der Lehrer einen Dauermagneten in eine mit Kupferdrähten umwickelte *Spule* tauchte. Der an den beiden Enden der Kupferwicklung angeschlossene Spannungsmesser schlug aus. D. h., eine Spannung wurde erzeugt. Sobald der Dauermagnet zur Ruhe kam, zeigte der Spannungsmesser keine Spannung mehr an. Das bedeutet, dass eine Spannung, die einen Stromfluss ermöglicht, nur dann erzeugt wird, wenn der Dauermagnet im Ringspalt der Spule ständig hin und her bewegt wird. Hierbei handelt es sich um das sogenannte Dynamo-Prinzip, als eine der Möglichkeiten der Stromerzeugung, wie sie beispiels-

weise im Fahrrad-Dynamo und in Generatoren zur Stromerzeugung genutzt wird. Taucht man in die Spule einen Eisenkern und legt eine Spannung an, entwickelt sich der Eisenkern zu einem Magneten, der wie ein Permanentmagnet eiserne Gegenstände anzieht. Das Prinzip ist also umkehrbar. Einerseits lässt sich durch Bewegung mit einem Permanentmagneten in einer Spule eine Spannung erzeugen, und andererseits erzeugt eine stromdurchflossene Spule in einem Eisenkern ein Magnetfeld. Der nächste Gedankenschritt führt uns zu einer Anordnung, bei der eine Spule mit einem Eisenkern an eine Wechselspannung angeschlossen wird, die die Bewegung des Permanentmagneten aus der ersten Betrachtung ersetzt. Führt man den Eisenkern so weit aus der Spule heraus, dass eine zweite Spule aufgeschoben werden kann, so erzeugt die Wechselspannung in der ersten Spule über die magnetische Kopplung in der zweiten Spule ebenfalls eine Wechselspannung mit derselben Frequenz. Dies ist die Grundlage der Transformation. Entsprechend dem Verhältnis der Windungsanzahl in der einen Spule zur Windungsanzahl in der zweiten, ergeben sich nämlich die jeweiligen Höhen der Wechselspannungen in den Spulen. So induziert man beispielsweise (Abb. 4) von einer Spule mit der Windungszahl von $N_1=50$ und einer angelegten Wechselspannung von $U_1=220$ V in einer zweiten Spule mit einer Windungszahl von $N_2=25$, eine Spannung von $U_2=110$ V. Da sich die übertragene Leistung aus dem Produkt von Strom und Spannung ergibt, verhalten sich die Ströme auf der Primär- und Sekundärseite umgekehrt proportional zu den Spannungen. Das bedeutet in unserem Beispiel, dass bei einem Wechselstrom von $I_1=50$ A auf der Primärseite, auf der Sekundärseite ein Strom von annähernd $I_2\approx 100$ A erzeugt wird. Annähernd deshalb, weil diese Anordnung, wie alle in der Technik, nicht verlustfrei arbeitet. Zur Optimierung des magnetischen Flusses innerhalb des Eisenkerns werden die Spulen wie in Abb. 4 gezeigt angebracht. In dieser Anordnung erreichen die Wirkungsgrade von Transformatoren 95-98 %. Bei dem als Drehstrom bezeichneten Dreiphasenwechselstrom werden alle drei Phasen in den drei Leitern über denselben Mechanismus transformiert. Über dieses physikalische Prinzip konnte in den Drehstromnetzen zwischen den Übertragungsspannungen und den Strömen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert werden.

In der Ausstellung präsentierten die Pioniere der Elektrizitätsübertragung das Projekt als „Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt“. Die ankommende Hochspannung wurde anschließend auf 100 V heruntertransformiert und betrieb neben rund 1000 Glühlampen einen 74 kW starken Drehstrom-Synchronmotor, der auf dem Ausstellungsgelände eine Pumpe für einen mehrere Meter hohen künstlichen Wasserfall antrieb. Und das alles mit einem Übertragungswirkungsgrad von immerhin 75 %. Der mit Wasserkraft angetriebene Synchrongenerator, am anderen Ende der Leitung in Lauffen, hatte eine Leistung von 221 kW und erzeugte eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 40 Hz [4].

Mit diesem Projekt bestätigte die Ausstellung eindrücklich die Leistungsfähigkeit der Elektrizität und deren vielfältige Nutzungsmöglichkeiten. Vor allem aber zeigte sie eines: Für eine wirtschaftliche Fernübertragung elektrischer Energie eignete sich

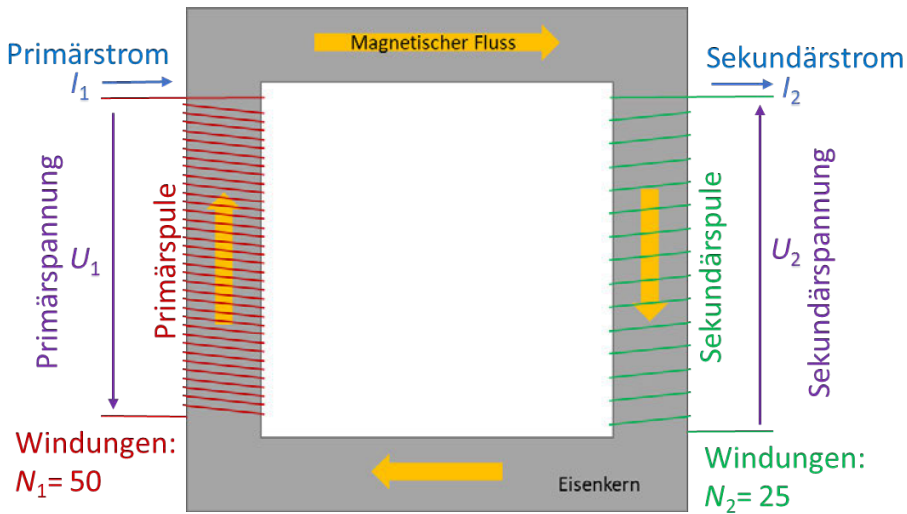


Abb. 4 Das Trafoprinzip

die Wechselstromtechnik weitaus besser als ihr gleichmäßig fließender Gegenpart. In der einschlägigen Literatur wird dieses Ereignis häufig als die „Geburtsstunde“ der elektrischen Energieübertragung und -versorgung bezeichnet [5]. Durch die auf dem elektromagnetischen Prinzip beruhende Transformation von niedrigen auf hohe und höchste Spannungen und umgekehrt, verbunden mit außerordentlich hohen Transformations-Wirkungsgraden, konnten große elektrische Leistungen in einer höheren Spannungsebene mit geringen Verlusten über weite Strecken übertragen werden. Obendrein konnte der Stromfluss leichter unterbrochen werden, da sowohl der Strom als auch die Spannung in ihrem zeitlichen Verlauf Null-Durchgänge hatten. Das war der eigentliche Durchbruch für die Übertragungstechnik mit Wechselstrom und für den Ausbau von Stromnetzen.

In den folgenden Jahren und Jahrzehnten stieg der Bedarf an Elektrizität rasant. Die Glühlampen verdrängten die Öl- und Gaslichter, und Elektromotoren der verschiedensten Gattungen übernahmen die individuellen Antriebe von Maschinen und verdrängten ebenso rasch die Dampfmaschinen mit ihren störungsanfälligen und unfallträchtigen Transmissionen, die sich an den Decken der Fabrikhallen entlangzogen. Die lokalen Erzeuger, die in der Nähe liegende Verbraucher versorgten, schlossen sich zusammen oder wichen großen, effizienteren Erzeugungseinheiten, die in größerer Entfernung zu den Lastschwerpunkten lagen und so Transportleitungen und später Transport- und Verteilnetze benötigten, um diese zu erreichen.

Da sich die elektrische Übertragungsleistung, wie erwähnt, aus dem Produkt von Spannung und Strom errechnet, konnten über Transformatoren beinahe beliebig hohe Spannungen erzeugt werden, die bei den Leitungen lediglich längere Isolatoren benötigten, die deutlich billiger herzustellen waren als Kupferleitungen mit großen

Querschnitten für hohe Ströme. So entstanden wirtschaftliche, an die Transportentfernung angepasste und optimierte Höhen von Strömen und Spannungen.

Die Transportentfernungen wurden immer größer, und sie zogen steigende Übertragungsspannungen nach sich. Bald gab es die noch heute gern benutzte Faustformel, wonach die Übertragungsspannung je km Entfernung zwischen den Kraftwerken, Umspann- und Schaltanlagen ungefähr 1 kV betragen sollte.

Damit wurde es möglich, die immer größer und effizienter werdenden Erzeugungseinheiten, die sich rasch zu Großkraftwerken auswuchsen, dort zu platzieren, wo die Primärenergie zur Verfügung stand. Dies galt und gilt für die Wasserkraft und die fossilen Rohstoffe, im Fall von Braunkohle, die im Tagebau gefördert oder bei der Steinkohle, die auf See- und Flusswegen leicht zu den Kraftwerken transportiert werden konnte. So wurden die Kraftwerke immer weiter ausgebaut und die erzeugte elektrische Energie über immer größere Strecken zu den Verbrauchszentren, den großen Industrieanlagen und Großstädten transportiert. Auf diese Weise ließ sich auch der Transport der Energieträger optimieren. Die Rohstoffe für die Stromproduktion, die schwer waren und in großen physischen Mengen benötigt wurden, hatten so kurze bzw. bequeme Wege und die Elektrizität konnte an jedem Netzknoten in nahezu beliebiger Menge ein- und ausgespeist werden.

1.2 Entwicklung der Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen

Bereits 1912 wurde die erste 110-kV-Doppelfreileitung Europas zwischen dem Brandenburgischen Lauchhammer und dem Sächsischen Riesa mit einer Länge von rund 50 km und einer Übertragungsleistung von 20 MW in Betrieb genommen. 1929 folgte die Spannungsstufe 220 kV. Die sogenannte „Nord-Süd-Leitung“ zog sich über insgesamt 600 km hin, von Brauweiler in der Nähe von Köln bis nach Tiengen, in Südbaden, unweit der Schweizerischen Grenze. Die erste 380-KV-Drehstrom-Freileitung in Deutschland nahm 1957 ihren Dienst auf, nachdem die Schweden bereits fünf Jahre zuvor eine Leitung in dieser Spannungsebene mit einer Übertragungsleistung von 1000 MW in Betrieb genommen hatten. Diese Leitung bildete den Ursprung des deutschen Höchstspannungs-Übertragungsnetzes in dieser Spannungsebene. Der Griff auf die bisher in Europa höchste Übertragungsspannung wurde nötig, weil die Braunkohlekraftwerke im rheinischen Revier stetig ausgebaut wurden, und die Übertragungskapazitäten der darunterliegenden Spannungsebenen nicht mehr ausreichten [4]. Die als Donaumast bezeichnete Mastform, die bei dieser Leitung zum Einsatz kam, sollte später in Deutschland für Doppelfreileitungen im freien Gelände zum Standard werden (Abb. 5).

Das Europäische Verbundnetz wird bis heute in dieser Spannungsebene und mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Dass sich hieran in Zukunft etwas ändert, gilt als äußerst unwahrscheinlich. Hinzukommen wird allerdings die geplante Höchstspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ), vorwiegend über Erdkabel, die künftig als

integrierter Bestandteil des bestehenden Übertragungsnetzes für die Übertragung hoher Leistungen zwischen weit voneinander entfernt liegenden Punkten vorgesehen ist. Die moderne Leistungselektronik und eine fortschrittliche Kabeltechnik ermöglichen, was in den Anfängen der Stromübertragung undenkbar war.

In dünnbesiedelten Flächenstaaten wie Russland, China und Kanada kamen zur Überbrückung größerer Distanzen bald Drehstrom-Freileitungen mit noch höheren Übertragungsspannungen zum Einsatz. So baute die Kanadische Hydro-Quebec 1965 die erste 735-kV-Freileitung über 500 km mit einer Übertragungsleistung von 5.300 MW. 1985 nahm der kasachische Energieversorger KEGOC die weltweit erste Drehstromfreileitung mit 1.150 kV in Betrieb. Nach mehreren Ausbaustufen misst die Leitung inzwischen über 1.400 km. Die Übertragungsleistung wird mit 5.500 MW angegeben. Bei dieser Spannungsebene sollte es im Drehstrombereich weltweit erst einmal bleiben. Die Entwicklung der Spannungsstufen zeigt Abb. 6.

Dank der modernen Halbleitertechnik können für den Transport von sehr großen Leistungen inzwischen auch hohe Gleichspannungen eingesetzt werden. Wie später zu sehen sein wird, bietet die Gleichspannungs- bzw. Gleichstromübertragung eine hervorragende Möglichkeit, Energie über große Entfernungen mit sehr geringen Verlusten zu übertragen. Allerdings handelt es sich dabei bisher stets um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. An beiden Enden einer solchen Leitung sind großräumige Umrichter-Stationen erforderlich, die die Leitungen in das bestehende Höchstspannungs-Drehstromnetz einbinden.



Abb. 5 Leitungsmast im Leitungszug der 380-kV-Leitung Rommerskirchen-Hoheneck [6]

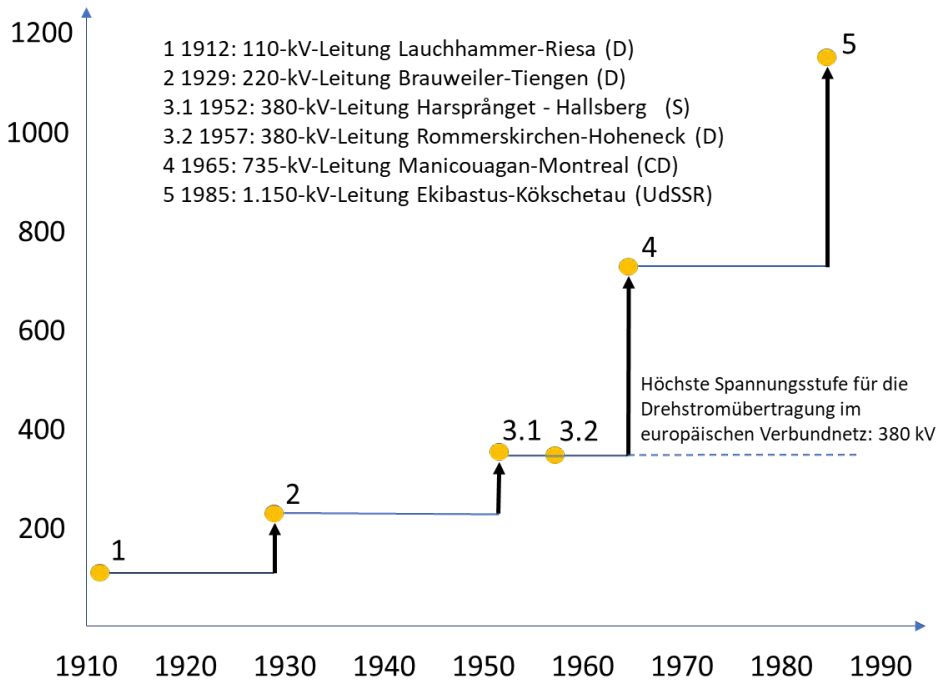


Abb. 6 Entwicklung der Drehstrom-Spannungsstufen mit Freileitungen weltweit

Die bisher höchste Spannungsebene für die Höchstspannungs-Gleichstromübertragung über Freileitungen beträgt ± 1.100 kV (also 2.200 kV zwischen Plus- und Minuspol).

Mit wachsenden Übertragungsspannungen, und den damit einhergehenden größeren Abständen zwischen den Leitern, steigen die resultierenden elektrischen Feldstärken in der Nähe von Freileitungen in der Höchstspannungsebene stark an. Sie können, wie später zu sehen sein wird, zu risikobehafteten Sekundäreffekten führen, vor denen in der näheren Umgebung von Leitungen Schutzvorkehrungen nötig sind. Unabhängig von den elektrischen Phänomenen stieg durch das zunehmende Umweltbewusstsein in der Bevölkerung, insbesondere in Ländern mit freiheitlichen Gesellschaftsordnungen, mit Beginn der 1980er Jahre der Widerstand gegen Freileitungen in den höheren Spannungsebenen. Während sie bis dahin zwar nicht beliebt, aber doch als nötig erachtet worden waren, kippte die Stimmung, teilweise bis hin zur strikten Ablehnung. Militante Gruppen verübten Mitte der 1980er Jahre sogar Anschläge auf Höchstspannungsmaste, indem sie die Eckstiele ansägten. Glücklicherweise verliefen die Aktionen glimpflich. Allenthalben hörte man die Forderung nach Verkabelung. Dies galt fortan nicht nur für neu geplante Leitungen. Auch die bestehenden Freileitungen kamen in die Kritik und sollten unabhängig von ihrer Spannungsebene und -art verkabelt werden.

1.3 Entwicklung der Hoch- und Höchstspannungskabel

Die Entwicklung gebrauchstauglicher Energiekabel dürfte mit einer Erfindung des gebürtigen Schweizers John Krüsi begonnen haben, der als Mitarbeiter von Edison drei isolierte Leiter in ein Stahlrohr einzog und mit heißem Teer vergoss. In der Patentschrift von 1883 wird auch eine Muffe beschrieben, in der die „Kabel“ verbunden werden (Abb. 7). Bis heute ähnelt der Aufbau von Muffen, also den Verbindungselementen von Kabelteilstrecken, diesem Grundmuster.

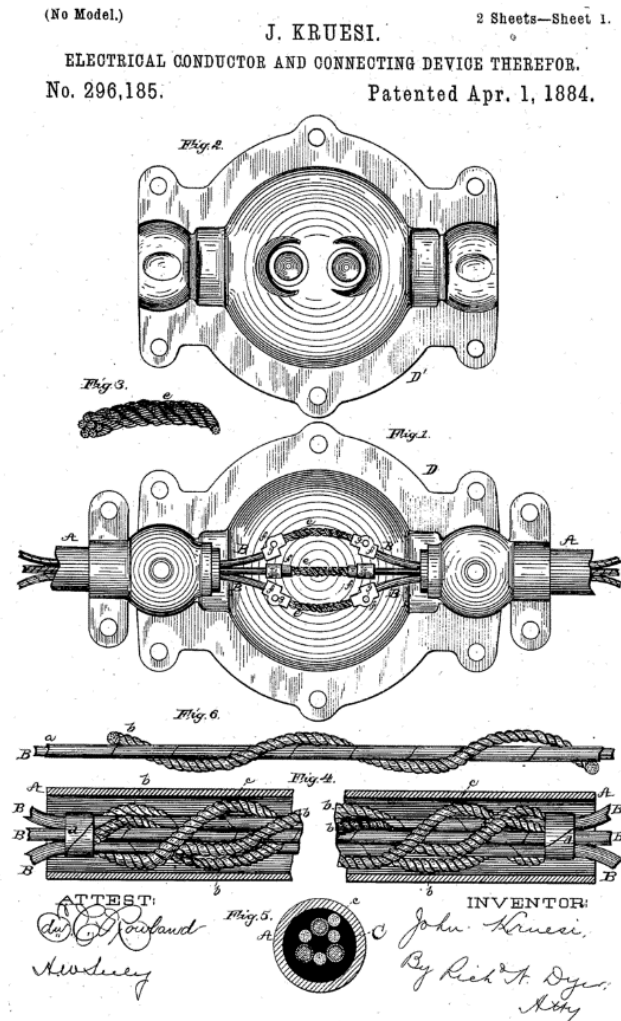


Abb. 7 Darstellung des Kruesi-Tubes mit den drei Leitern im Rohr (unten), einer offenen Muffe (mittig) und einer verschlossenen Muffe (oben) [8]

Das patentierte Kabel diente der Stromübertragung vom ersten US-Kraftwerk „Pearl Street“ in New York, welches einige 100 von zuvor von Edison erfundenen Glühfadenlampen in der Stadt versorgte, und die mit der von Edison bevorzugten Gleichstrom mit einer Gleichspannung von 110 V betrieben wurden.

Mit zunehmenden Übertragungsspannungen stiegen die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit des isolierenden Dielektrikums, das im Gegensatz zum Isoliermedium Luft bei Freileitungen, in den Kabeln auf wenige Zentimeter zusammenschrankte.

Ab der Jahrhundertwende verbesserten geschichtete, mineralölgetränkte Papierisolierungen die Spannungsfestigkeit der Starkstromkabel deutlich. Etwa zur gleichen Zeit kam auch die Umstellung der allgemeinen Stromversorgung von Gleich- auf Wechselstrom, die für die höheren Übertragungsspannungen auch eine höhere Spannungsfestigkeit benötigte. Bald folgten die ersten so genannten Gürtelkabel, die in den darauffolgenden Jahrzehnten zum Standard werden sollten. Sie bestanden aus drei mit ölgetränktem Papier umwickelten Adern, die noch einmal insgesamt eine weitere ölgetränkte, papierisolierte Lage als Gürtel und anschließend einen Bleimantel erhielten. Nach außen schützte sie eine innere Hülle, gefolgt von einer Bewehrung aus Stahlband und einer äußeren Schutzhülle aus Faserstoffen (Abb. 8+9).

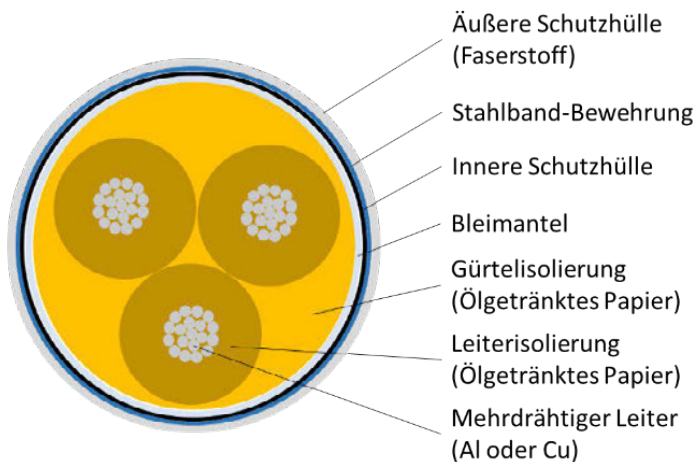


Abb. 8 Aufbau eines alten Gürtelkabels



Abb. 9 30-kV-Gürtelkabel im Jahr 1911 [9]

1911 kam dieser Kabeltyp mit einer Betriebsspannung von 30 kV erstmals auf dem europäischen Kontinent bei der Versorgung der Stadt Berlin und dessen umgebenden Landbereichen zum Einsatz [9].

Das erste deutsche 110-kV-Ölkabel, ebenso aus drei Einzelleitern bestehend, wurde 1928 in Nürnberg verlegt. Nachdem Anfang der 1930er Jahre erste 220-kV-Ölkabel getestet wurden, errichtete der Pariser Energieversorger 1936 ein großes 220-kV-Kabelnetz mit Niederdruckölkabeln in der Stadt [10].