



**MARKUS PALIC  
KONSTANTIN O. PAPAILIOU  
GUNTRAM SCHULTZ  
HERBERT LUGSCHITZ**

# **Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen**

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

**expert** ›

# OMEXOM



## WENN KNOW-HOW AUF BEGEISTERUNG TRIFFT

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



[omexom.de](https://www.omexom.de)

Werde Teil der Energiewende!



VINCI  
ENERGIES



Freileitungsbau

Mobilfunkmastbau

Engineering

Mobiler Bodenschutz

**Competence die verbindet.**

[www.cteam.de](http://www.cteam.de)



**Cteam** Consulting & Anlagenbau GmbH  
Im Stocken 6  
D-88444 Ummendorf  
Fon +49 7351 44098-0  
Fax +49 7351 44098-99  
[info@cteam.de](mailto:info@cteam.de)  
[www.cteam.de](http://www.cteam.de)



## Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen



Markus Palic / Konstantin O. Papailiou /  
Guntram Schultz / Herbert Lugschitz

# **Freileitungen und Kabel in Hoch- und Höchstspannungsnetzen**

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

**expert** ›

Umschlagabbildung: © Amprion GmbH, Dortmund

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.

2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2024

1. Auflage 2022

DOI: <https://doi.org/10.24053/9783381113323>

© 2024 · 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](http://www.expertverlag.de)

eMail: [info@verlag.expert](mailto:info@verlag.expert)

Elanders Waiblingen GmbH

ISBN 978-3-381-11331-6 (Print)

ISBN 978-3-381-11332-3 (ePDF)

ISBN 978-3-381-11333-0 (ePub)



# Inhalt

Geleitwort .....	11
Vorwort zur zweiten Auflage .....	13
Einleitung .....	15
1 Grundlagen der elektrischen Energieübertragung .....	17
Zusammenfassung .....	17
1.1 Elektrotechnische Grundlagen .....	17
1.1.1 Trafoprinzip und Effektivwert .....	17
1.1.2 Wirk-, Blind- und Scheinleistung .....	21
1.2 Historie der Stromübertragung .....	25
1.2.1 Freileitungsentwicklung .....	29
1.2.2 Kabelentwicklung .....	32
1.2.3 Bedeutung und Entwicklung des Normenwesens .....	37
1.3 Gleich- und Drehstrom in der Energieübertragung .....	39
1.4 Aufgaben und Strukturen elektrischer Energienetze .....	41
1.4.1 Verbundnetze und Netzverbände .....	42
1.4.2 Netzstrukturen .....	46
1.4.3 Schalt- und Umspannanlagen .....	47
1.5 Einführung in die Netzplanung .....	49
1.5.1 Planungsgrundsätze .....	49
1.5.2 Das (n-1)-Kriterium .....	51
1.5.3 Planungsarten .....	53
1.6 Einführung in den Netzbetrieb .....	54
1.6.1 Leistungsgleichgewicht .....	55
1.6.2 Bedeutung der Frequenz .....	56
1.6.3 Regelleistung .....	57
1.6.4 Lastabwurf bei Unterfrequenz .....	59
1.6.5 Netzzustände .....	60
1.7 Literatur .....	62
2 Trassengestaltung .....	65
Zusammenfassung .....	65

2.1	Freileitungstrassen . . . . .	65
2.1.1	Mastformen und Landschaft . . . . .	67
2.2	Schutzbereiche von Freileitungen . . . . .	73
2.2.1	Beschränkungen innerhalb einer Freileitungstrasse . . . . .	76
2.2.2	Schutzstreifen . . . . .	80
2.2.3	Trassenführung und Raumnutzung . . . . .	80
2.2.4	Bereiche mit Höhenbeschränkungen . . . . .	84
2.2.5	Siedlungsbereiche . . . . .	85
2.3	Kabeltrassen . . . . .	86
2.3.1	Drehstrom-Kabeltrassen . . . . .	86
2.3.2	Gleichstrom-Kabeltrassen . . . . .	89
2.4	Verlegetechniken . . . . .	90
2.4.1	Offene Bauweise . . . . .	90
2.4.2	Einpflügen . . . . .	94
2.4.3	Verlegung in Mantelrohren und Infrastrukturröhren . . . . .	94
2.4.4	Verlegung im Infrastrukturkanal . . . . .	99
2.5	Muffen und Übergangsanlagen . . . . .	101
2.5.1	Muffen . . . . .	101
2.5.2	Übergangsanlagen Kabel-Freileitung . . . . .	102
2.6	Trassenausnutzung . . . . .	104
2.7	Kreuzungen, Näherungen und Parallelführungen . . . . .	105
2.8	Trassen mit temporären Freileitungsgestängen . . . . .	108
2.9	Nachtrassierung . . . . .	109
2.10	Biodiversität in Leitungstrassen . . . . .	110
2.11	Literatur . . . . .	112
3	Genehmigungsverfahren und Umweltprüfungen in Deutschland . . . . .	115
	Zusammenfassung . . . . .	115
3.1	Verfahren für Hochspannungsleitungen . . . . .	116
3.2	Verfahren für nicht vordringliche Höchstspannungsleitungen . . . . .	117
3.3	Verfahren und Gesetze für vordringliche Höchstspannungsleitungen . . . . .	117
3.3.1	Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG) . . . . .	117
3.3.2	Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG) . . . . .	118
3.3.3	Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) . . . . .	118
3.3.4	Entwicklung des Europäischen Netzverbundes . . . . .	123
3.4	Raumordnungsverfahren (ROV) . . . . .	124
3.4.1	Aufgabe der Raumordnung . . . . .	125
3.4.2	Ablauf eines Raumordnungsverfahrens . . . . .	126
3.4.3	Raumordnerische Beurteilung . . . . .	127
3.5	Bundesfachplanung (BFP) . . . . .	127

3.6	Planfeststellungsverfahren (PFV) . . . . .	130
3.6.1	Ablauf des Planfeststellungsverfahrens . . . . .	131
3.6.2	Der Planfeststellungsbeschluss . . . . .	132
3.7	Das NOVA-Prinzip . . . . .	134
3.8	Umweltverträglichkeit von Freileitungen und Kabeln . . . . .	136
3.8.1	Strategische Umweltprüfung (SUP) . . . . .	136
3.8.2	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) . . . . .	138
3.8.3	Schutzgüter bei Umweltprüfungen . . . . .	142
3.8.4	Landschaftspflegerischer Begleitplan und Eingriffsausgleich . . . . .	151
3.9	Entschädigungen . . . . .	151
3.10	Literatur . . . . .	154
4	Freileitungstechnik . . . . .	157
	Zusammenfassung . . . . .	157
4.1	Einleitung . . . . .	157
4.2	Bemessung von Freileitungen . . . . .	160
4.2.1	Lastannahmen . . . . .	160
4.2.2	Dimensionierung . . . . .	169
4.3	Leiterseile . . . . .	172
4.3.1	Typen und grundlegende Eigenschaften von Leiterseilen . . . . .	173
4.3.2	Mechanisches Verhalten von Al/St-Seilen . . . . .	180
4.3.3	Seildurchhang . . . . .	184
4.3.4	Zustandsgleichung . . . . .	187
4.3.5	Strombelastbarkeit . . . . .	191
4.3.6	Korona . . . . .	194
4.3.7	Bündelleiter . . . . .	196
4.3.8	Erdseile . . . . .	197
4.3.9	Hochtemperatur-Leiterseile . . . . .	198
4.3.10	Monitoring . . . . .	202
4.3.11	Seilschwingungen . . . . .	204
4.4	Isolatoren . . . . .	215
4.4.1	Klassifizierung . . . . .	216
4.4.2	Bemessung . . . . .	222
4.4.3	Porzellanisolatoren . . . . .	224
4.4.4	Glasisolatoren . . . . .	226
4.4.5	Verbundisolatoren . . . . .	227
4.5	Armaturen . . . . .	243
4.5.1	Seilarmaturen . . . . .	245
4.5.2	Isolatorkettenarmaturen . . . . .	258
4.5.3	Bemessung von Seil- und Kettenarmaturen . . . . .	262
4.5.4	Schwingungsschutzarmaturen . . . . .	262

4.6	Tragwerke	267
4.6.1	Materialien und Gestaltung der Stahlgittermaste	268
4.6.2	Mastarten	269
4.6.3	Bemessung	270
4.6.4	Mastkopfgeometrie	270
4.6.5	Belastungen	271
4.6.6	Ermittlung der Stabkräfte	272
4.6.7	Festigkeitsberechnung	274
4.6.8	Kompaktleitungen	277
4.6.9	Blitzschutz	278
4.6.10	Erdung	278
4.6.11	Gründungen	280
4.7	Leitungsbau	286
4.7.1	Vermessung und Mastaufteilung	286
4.7.2	Vorbereitung der Baustelle	287
4.7.3	Gründungen	288
4.7.4	Mastbau	290
4.7.5	Seilzug	295
4.8	Inspektion und Wartung von Freileitungen	303
4.8.1	Wartungsaktivitäten und -strategien	303
4.8.2	Defekte	305
4.8.3	Arbeiten unter Spannung (AuS)	310
	<b>4.8.4 Robotik für Freileitungen</b>	<b>311</b>
4.9	Aufwertung und Ertüchtigung von Freileitungen	313
4.9.1	Aufwertung	314
4.9.2	Ertüchtigung	316
4.10	Hybridleitungen	320
4.11	Literatur	321
5	Kabel	331
	Zusammenfassung	331
5.1	Einführung	331
5.2	Kabelaufbau	332
5.3	Die gebräuchlichsten Kabeltypen	341
5.4	Kabel für Hoch- und Höchstspannung	341
5.4.1	Kabel für Drehstrom in der Hochspannungsebene	343
5.4.2	Kabel für Drehstrom in der Höchstspannungsebene	347
5.4.3	Gasisolierte Rohrleitungen	348
5.4.4	Kabel zur Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	350
5.4.5	Seekabel	353

5.5	Kabelgarnituren für Drehstromsysteme . . . . .	355
5.5.1	Muffen . . . . .	355
5.5.2	Endverschlüsse . . . . .	359
5.6	Kabelgarnituren für Hochspannungs-Gleichstromsysteme . . . . .	365
5.7	Erdung von Hochspannungs-Kabelsystemen . . . . .	365
5.8	Vorgehensweise bei der Kabelverlegung . . . . .	369
5.8.1	Verlegung im offenen Graben mit und ohne Schutzrohre . . . . .	369
5.8.2	Kabeltransport und Kabelzug . . . . .	373
5.8.3	Zugkräfte bei der Kabelverlegung . . . . .	375
5.9	Kabelerwärmung und Wärmeabfuhr . . . . .	378
5.9.1	Erdverlegte Kabel . . . . .	379
5.9.2	Indirekte Kühlung mit Kühlrohren . . . . .	383
5.9.3	Indirekte Kühlung in Tunnelanlagen . . . . .	385
5.10	Inbetriebnahme von Hochspannungskabeln . . . . .	387
5.11	Monitoring von Kabelanlagen . . . . .	387
5.12	Diagnose von Kabelanlagen . . . . .	389
5.13	Einsatzgebiete . . . . .	391
5.14	Literatur . . . . .	392
6	Freileitungen und Kabel im Versorgungsnetz . . . . .	395
	Zusammenfassung . . . . .	395
6.1	Material- und geometriebedingte Unterschiede im elektrischen Verhalten . . . . .	395
6.2	Strombelastbarkeit . . . . .	398
6.3	Verluste . . . . .	399
6.3.1	Stromabhängige Verluste in Freileitungen . . . . .	399
6.3.2	Spannungsabhängige Verluste in Freileitungen . . . . .	400
6.3.3	Stromabhängige Verluste in Kabeln und gasisolierten Leitungen . . . . .	401
6.3.4	Spannungsabhängige Verluste in Kabeln und gasisolierten Leitungen . . . . .	402
6.4	Elektrische und magnetische Felder . . . . .	403
6.4.1	Elektrische Felder . . . . .	405
6.4.2	Magnetische Felder . . . . .	406
6.5	Zuverlässigkeit und Lebensdauer . . . . .	408
6.6	Zwischen- und Teilverkabelung . . . . .	412
6.7	Leitungen im Netzbetrieb . . . . .	413
6.7.1	Berechnung unterschiedlicher Lastfälle . . . . .	414
6.7.2	Beispiele unterschiedlicher Lastfälle . . . . .	421
6.7.3	Blindleistungsverhalten und übertragbare Leistung . . . . .	425
6.7.4	Lastfluss- und Kurzschlussverhältnisse im Netz . . . . .	427
6.7.5	Sternpunktbeschaltung . . . . .	428
6.8	Integration von Gleichstromleitungen in bestehende Drehstromnetze . . . . .	432

6.9	Freileitungs- und Kabelanteile in den Netzen .....	438
6.10	Kostenvergleich Freileitung/Kabel .....	440
6.10.1	Kostenvergleich in der Hochspannungsebene .....	442
6.10.2	Kostenvergleich in der Höchstspannungsebene .....	443
6.11	Literatur .....	446
7	Entwicklungstendenzen und Ausblick .....	449
	Zusammenfassung .....	449
7.1	Übertragungsnetz .....	450
7.2	Verteilnetze .....	451
7.3	Sektorenkopplung .....	452
7.4	Technische Entwicklungen im Netzbau .....	453
7.4.1	Hochtemperatur-Leiteseile .....	453
7.4.2	Kompaktleitungen und alternatives Mastdesign .....	454
7.4.3	Gasisolierte Leitungen (GIL) für Drehstrom und Gleichstrom .....	459
7.4.4	Supraleiterkabel .....	461
7.4.5	HGÜ-Kabel – Overlay-Netz .....	463
7.5	Literatur .....	464
	Danke .....	466
	Register .....	467
	Abbildungsverzeichnis .....	473
	Tabellenverzeichnis .....	490

## Geleitwort

Die weltweiten Veränderungen in der Energiewirtschaft, getrieben durch die rasant wachsende Weltbevölkerung bei stark steigendem Pro-Kopf-Energieverbrauch versus endliche Ressourcen fossiler Brennstoffe, die notwendigen Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und Akzeptanz von Energiewandlungs-, -transport- und -verteilungsanlagen, Forderungen an die Klimaneutralität und durch den liberalisierten Strommarkt gehen auch an Europa und Deutschland nicht vorbei. Außerdem stehen die Anforderungen hochtechnologischer und digitalisierter Industriegesellschaften an die Versorgungszuverlässigkeit und Sicherheit der Energieversorgung nicht immer im Einklang mit der politischen Stabilität von Ländern, aus denen Primärenergieträger bezogen werden, was einen deutlichen Trend zur weitgehenden Unabhängigkeit bei der Bereitstellung von Elektroenergie aus regenerativen Energiequellen erkennen lässt. Die damit verbundene räumliche Trennung von Erzeuger- und Verbraucherstandorten sowie die volatile Verfügbarkeit von Wind und Sonne stellen die Branche vor große Herausforderungen an das Elektroenergieversorgungssystem, seine Netze, Anlagen und Komponenten. Genau an diesem Punkt setzt das vorliegende Buch an. Es konzentriert sich dabei auf Kabel und Freileitungen zur Übertragung und zur Verteilung elektrischer Energie in Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetzen. Dabei gelingt es den Autoren sehr gut, zum einen die Dreifaltigkeit von Historie, bewährter Tradition und ingenieurtechnischer Erfahrung, zum anderen wissenschaftlich-technisches Grundlagen- und Fachwissen sowie aktuelle Herausforderungen für Hersteller, Planer, Errichter und Betreiber aufzuzeigen.

Das Buch richtet sich an Lernende und Studierende ebenso wie an gestandene Fachleute, die sich weiterbilden und auf neue Aufgabenstellungen vorbereiten wollen. Es setzt im fachlichen Teil elektrotechnische Grundlagenkenntnisse des Lesers voraus, holt ihn dort ab und führt ihn auf verständliche Weise zu den aktuellen Fachthemen und Fragen. Dabei werden auch gesellschaftliche, juristische, verwaltungstechnische, wirtschaftliche, ökologische und Akzeptanzfragen nicht ausgelassen, was die Interdisziplinarität der Thematik deutlich macht. Eine Vielzahl von Beispielen mit konkreten Werten ist sehr hilfreich, nicht nur, um Zusammenhänge zu vertiefen, sondern insbesondere auch, um Größenordnungen einschätzen und damit Entscheidungen aus ingenieurtechnischer Sicht treffen zu können. Sehr nützlich erscheint die Einführung wichtiger englischer Fachbegriffe.

Inhaltlich widmet sich das Buch zunächst den Grundlagen von Strukturen und Netzen, um ein Verständnis zu entwickeln, warum und in welchem Umfang elektrische Verbindungen zwischen den Knotenpunkten eines Netzes erforderlich sind und welche Randbedingungen dazu zu beachten sind. Daraus leitet sich die Frage ab, welche Art der Verbindung zu wählen ist – Freileitung oder Kabel – und wie die Trasse aus technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und genehmigungsrechtlichen Aspekten verlaufen sollte. Die dabei zu beachtenden Genehmigungsverfahren werden verständ-

lich erläutert. Einen Schwerpunkt bilden die nachfolgenden Kapitel mit technischen Erläuterungen zu Funktion, Aufbau, Komponenten und Errichtung von Freileitungen und Kabelanlagen. In gebotener Kürze erhält der Leser einen weitreichenden Überblick, während Quellenangaben auf weiterführende Literatur verweisen. Mit dem vergleichenden Kapitel Freileitungen und Kabel in Übertragungs- und Verteilnetzen schließen die Autoren eine wichtige Lücke in der Diskussion um diese Thematik. Aus neutraler Sicht werden Vor- und Nachteile beider Arten elektroenergiertechnischer Verbindungen wertfrei zusammengestellt. Ein letztes Kapitel gibt einen fundierten Ausblick auf technische Entwicklungen in der Freileitungs- und Kabeltechnik, denen wir uns zeitnah stellen müssen.

Aufbau, Inhalt und Darstellung des Buches lassen unschwer erkennen, dass die Autoren Markus Palic, Konstantin O. Papailiou, Guntram Schultz und Herbert Lugschitz Ingenieure mit jahrzehntelangen praktischen Erfahrungen, aber auch soliden Grundlagenkenntnissen sind, die dankenswerterweise ihr Wissen an interessierte, auch jüngere Fachpersonen anschaulich weitergeben.

Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

## Vorwort zur zweiten Auflage

Die Frage nach der Gestaltung und dem Verlauf von überregionalen elektrischen Versorgungsleitungen im Hoch- und Höchstspannungsbereich steht seit Jahrzehnten im Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion. Mal mehr, mal weniger. Einerseits führen ein steigendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung und andererseits die Pflicht der Netzbetreiber, die Netze durch deren Ausbau den wachsenden Erfordernissen anzupassen, in vielen Fällen zu teilweise erheblichen Konflikten. 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 erzeugte Strom über mehrere leistungsstarke Leitungsverbindungen über viele hundert Kilometer in die Mitte und den Süden Deutschlands transportiert werden. Unabhängig davon muss das bestehende Drehstromnetz in allen Spannungsebenen verstärkt und ausgebaut werden. Die anfängliche Absicht, den nötigen Ausbau des Höchstspannungs-Drehstromnetzes 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 inzwischen neben den Planern, den Genehmigungsbehörden und den Trägern öffentlicher Belange auch Heerscharen von Bürgerinnen und Bürger, die sich zu Bürgerinitiativen zusammenschließen, 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 Höchstspannungs-Drehstromnetz, 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 führt umfassend und dennoch leicht verständlich in das Thema ein und soll sowohl den Planern als auch den Verfahrensbeteiligten helfen, die jeweils anderen Themengebiete kennenzulernen. Hierzu ist es in einen ausführlichen 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 an den Anfang gestellte verfahrenstechnische und umweltrechtliche Teil gibt einen Überblick über die durchzuführenden Planungs- und Genehmigungsverfahren, die in Deutschland inzwischen durch die Bundesnetzagentur detailliert vorgegeben werden.

Das Manuskript entstand aus der engen Zusammenarbeit der Autoren im Rahmen von Lehr- und Informationsveranstaltungen bei der Aus- und Weiterbildung des Ingenieur Nachwuchses. In der zweiten Auflage wurden die Fehler aus der ersten korrigiert und missverständliches präzisiert. Darüber hinaus wurde sie mit zahlreichen Ausführungs- und Berechnungsbeispielen deutliche erweitert. Das Buch eignet sich als Unterrichtsmaterial für Studierende ebenso wie als Nachschlagewerk für Praktiker im Tätigkeitsfeld „Hoch- und Höchstspannungsnetzbau“.

Karlsruhe, Malters, Wien, im Mai 2024

Markus Palic, Konstantin O. Papailiou, Guntram Schultz und Herbert Lugschitz

## Einleitung

Freileitung und Kabel sind beides Möglichkeiten zur Übertragung von elektrischer Energie. Beide Techniken haben ihre Vorteile und Nachteile, beide haben ihre optimalen Anwendungsbereiche. Das unmittelbare, das regionale, und manchmal auch das überregionale Umfeld eines Projektes beeinflussen die Entscheidung für die Freileitung oder für das Kabel, ebenso wie die technische, betriebliche und kaufmännische Sicht. Es hat sich immer wieder gezeigt, dass jedes Vorhaben für sich und aufs Neue zu betrachten ist. Allgemeine Aussagen oder Verweise auf andere Projekte, bei denen aus diesen oder jenen Gründen die Freileitung oder das Kabel errichtet wurden, sind nicht sinnvoll und nicht hilfreich – das wird oft übersehen.

Über Freileitungen und Kabel gibt es eine große Anzahl technischer Publikationen und Informationsbroschüren von Anwendern und Herstellern, Studien und Untersuchungen von Wissenschaftseinrichtungen, Vorgaben von nationalen und internationalen Normungsgremien wie IEC, CENELEC und DIN, Ausarbeitungen, Symposien und Kongresse von Fachorganisationen, und das Internet ist voll mit Beiträgen zum Thema. Die Übersicht ist nicht leicht, ganz im Gegenteil. Genau hier setzt das Buch an. Die Autoren stellen Aspekte der Freileitungen und Kabel dar. Das Buch hilft den Lesern zu einer neutralen Sichtweise dieses oft heftig diskutierten Themas.

Die Autoren greifen dabei auf ihre jahrzehntelangen Erfahrungen im Bereich der Stromübertragung und elektrischer Netze zu, auf ihre universitären Lehrtätigkeiten und Kurse, ihre zahlreichen Veröffentlichungen, Diskussionsbeiträge bei Kongressen, Symposien und Workshops, nicht nur im deutschsprachigen Raum, sondern darüber hinaus.

Um über das Thema zu sprechen, benötigt man ein Grundwissen über die allgemeine Hochspannungstechnik und auch über die Besonderheiten von Freileitungen und Kabeln. Das Besondere dieses Buches ist eben, dass beide Techniken in einem Buch behandelt werden. Es vermittelt auch aktuelles Wissen über die Netzsituation und die Rechtslage mit dem Schwerpunkt auf Deutschland und Europa. Wie in vielen Bereichen unseres Lebens hat auch unsere heutige Technik einen historischen Hintergrund, der für das Verständnis ihrer Anwendung wichtig ist. Auch dieser Aspekt wird im Buch aufgegriffen.

Die Leser können mit diesem Buch ihr Wissen vertiefen, ihre bisherigen Betrachtungsweisen überprüfen, festigen, ändern oder kalibrieren – das alles auch als Ergänzung zu bereits bestehenden Publikationen und Darstellungen. Andere werden vielleicht in eine für sie neue Welt unseres alltäglichen Technikfeldes eintauchen. So vermittelt das Buch einen wichtigen Beitrag in der öffentlichen, aber auch in der fachspezifischen Diskussion.



# 1 Grundlagen der elektrischen Energieübertragung

## Zusammenfassung

Im ersten Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen der Elektrotechnik, wie das Trafoprinzip, der Effektivwert sowie die Leistungsarten Wirk-, Blind- und Scheinleistung als Basis für das Verständnis der Stromübertragungstechnik erläutert. Ihnen folgt die historische Entwicklung der Stromübertragung mit Freileitungen und Kabeln. Dabei wird deren Entwicklung anhand von historischen Entwicklungsschritten von den Anfängen im ausgehenden 19ten Jahrhundert bis in die Gegenwart dargestellt. Die Schwerpunkte dabei liegen zunächst beim Streit um die Wahl der Spannungsart und die darauffolgende Entwicklung der Spannungshöhen bis hin zur Bildung von Versorgungs- und Verbundnetzen. Ebenso werden die Planungsgrundsätze wie das  $(n-1)$ -Kriterium sowie die Bedeutung der Frequenz als Stabilitätskriterium für eine sicher Stromversorgung erläutert.

## 1.1 Elektrotechnische Grundlagen

Um die Stromübertragungstechnik zu verstehen ist die Kenntnis der Grundphänomene der Elektrotechnik unabdingbar. Deshalb stehen sie hier am Anfang des Buches. Weitere wichtigen Phänomene werden an anderer Stelle ausführlich erklärt. Die Darstellung der elementaren elektrischen bzw. elektromagnetischen Effekte wird auch von Lesern verstanden, die sich bisher mit Elektrotechnik nur sehr wenig oder gar nicht beschäftigt haben. In den Ausführungen und Berechnungsbeispielen werden die Normspannungen mit 230 V und 400 V verwendet. Im Hoch- und Höchstspannungsbereich hingegen werden die Nennspannungen in den Spannungsstufen 110, 220 und 380 kV angegeben. Hier gelten jeweils die höchsten Betriebsspannungen von 123, 245 und 420 kV.

### 1.1.1 Trafoprinzip und Effektivwert

Zunächst zum *Trafoprinzip*. Die Entdeckung der 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, das heißt, eine Spannung wurde erzeugt. Sobald der Dauermagnet zur Ruhe kam, zeigte der Spannungsmesser keine Spannung mehr an. Das bedeutet, dass eine Spannung nur dann erzeugt wird, wenn der Dauermagnet in der Spule ständig hin und her bewegt wird. Hier handelt es sich um das *Dynamo-Prinzip* als eine der Möglichkeiten der Stromerzeugung, wie sie beispielsweise

in Generatoren genutzt wird. Der charakteristische Sinusverlauf der in Generatoren erzeugten Wechselspannung und des damit verbundenen Wechselstroms ergibt sich aus der Drehbewegung, mit der im Generator eine Leiterschleife bzw. eine Wicklung mit konstanter Drehgeschwindigkeit in einem Magnetfeld bewegt, und auf diese Weise eine Wechselspannung erzeugt wird. Eine spezielle Form der Wechselspannung entsteht, wenn drei Wicklungen, jeweils um  $120^\circ$  versetzt, Wechselströme erzeugen. In diesem Fall bilden die Wechselströme ein System, das als *Dreiphasenwechselstrom* bzw. *Drehstrom* bezeichnet wird. Dieses System findet weltweit in der öffentlichen Stromversorgung Verwendung. Der charakteristische Sinusverlauf der Spannung bewirkt, dass der *Effektivwert*, also der tatsächlich wirksame Wert, niedriger ist als der Scheitelwert. Der Effektivwert ergibt sich aus dem quadratischen Mittelwert (engl. RMS: Root Mean Square) der Spannung.

Für den Zusammenhang zwischen dem Scheitelwert der Wechselspannung  $\hat{u}$  und dem Effektivwert  $U$  gilt demnach

$$U^2 = \frac{\hat{u}^2}{2} \quad (1.1)$$

Daraus wird

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad (1.2)$$

Da der Strom der Sinus-Form der Spannung folgt, gilt analog

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

Darin bedeuten:

$U$	Effektivwert der Wechselspannung	V
$\hat{u}$	Scheitelwert der Wechselspannung	V
$I$	Effektivwert des Wechselstroms	A
$\hat{i}$	Scheitelwert des Wechselstroms	A

So entstehen *Effektivwerte* für Strom und Spannung, die in ihrer Wirkung dem Wert der Gleichspannung bzw. des Gleichstroms entsprechen. Das bedeutet, dass die sinusförmige Wechselspannung und der sinusförmige Wechselstrom an einem Widerstand über eine bestimmte Zeitdauer gleich viel elektrische Arbeit verrichten, wie eine gleich hohe Gleichspannung bzw. ein gleich hoher Gleichstrom.

Bei den Angaben der Nennspannungen im Stromnetz der öffentlichen Versorgung wird stets der Effektivwert verwendet. Für die Bemessung der elektrischen Isolation ist jedoch der Scheitelwert der Spannung maßgebend.

Taucht man anstelle eines rotierenden Generators einen Eisenkern in eine Spule und legt eine Wechselspannung an, entwickelt sich der Eisenkern zu einem Magneten, der wie ein Permanentmagnet eiserne Gegenstände anzieht. 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  $U$  mit derselben Frequenz. Dies ist die Grundlage der *Transformation*. Entsprechend dem Verhältnis der Windungszahl  $N$  in der einen Spule zur Windungszahl in der zweiten, ergeben sich die jeweiligen Höhen der Wechselspannungen in den Spulen. Dabei gilt:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.4)$$

Da sich die übertragene Leistung  $P$  aus dem Produkt von Strom und Spannung  $U$  ergibt, verhalten sich die Ströme auf der Primär- und Sekundärseite umgekehrt proportional zu den Windungen bzw. Spannungen. Hier gilt:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.5)$$

Da Transformatoren, wie alle technischen Einrichtungen, nicht verlustfrei arbeiten, gilt:

$$\frac{P_2}{P_1} = \eta_T \quad (1.6)$$

Darin bedeuten:

$N_1$	Windungszahl der Primärspule	-
$N_2$	Windungszahl der Sekundärspule	-
$U_1$	An der Primärspule anliegende Spannung	V
$U_2$	An der Sekundärspule anliegende Spannung	V
$I_1$	Strom durch die Primärspule	A
$I_2$	Strom durch die Sekundärspule	A
$P_1$	Leistung auf der Primärseite	W
$P_2$	Leistung auf der Sekundärseite	W
$\eta_T$	Trafowirkungsgrad	-

Zur Optimierung des magnetischen Flusses innerhalb des Eisenkerns werden die Spulen wie in Abb. 1.1 gezeigt angeordnet. In dieser Anordnung erreichen die Wirkungsgrade  $\eta_T$  von Transformatoren 0,94-0,98 bzw. 94-98 %. 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 Wechsel- bzw. Drehstromnetzen, wie noch zu sehen sein wird, zwischen den Übertragungsspannungen und den Strömen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimiert werden.

### Beispiel

Ein Wechselstromtransformator zum Anschluss an  $U_1=230\text{ V}$  besitzt auf der Primärseite eine Spule mit  $N_1=300$  Windungen. Auf der Sekundärseite werden  $U_2=12\text{ V}$  erwartet.

- Welche Windungszahl  $N_2$  muss auf der Sekundärseite gewählt werden?
- Auf der Primärseite wird ein Strom von  $I_1=2\text{ A}$  gemessen. Wie hoch ist die Leistungsabgabe auf der Sekundärseite, wenn der Wirkungsgrad des Trafos  $\eta_T = 97\%$  beträgt?

Zu a)

Für die Windungszahl auf der Primärseite gilt:

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

$$N_2 = 300 \cdot \frac{12\text{ V}}{230\text{ V}}$$

$$N_2 = 16 \text{ Windungen}$$

Zu b)

Die primärseitige Leistungsaufnahme ergibt sich zu:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1$$

$$P_1 = 230\text{ V} \cdot 2\text{ A} = 460\text{ W},$$

und die sekundärseitige Leistungsabgabe zu:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_T = 460\text{ W} \cdot 0,97 = 446\text{ W}.$$

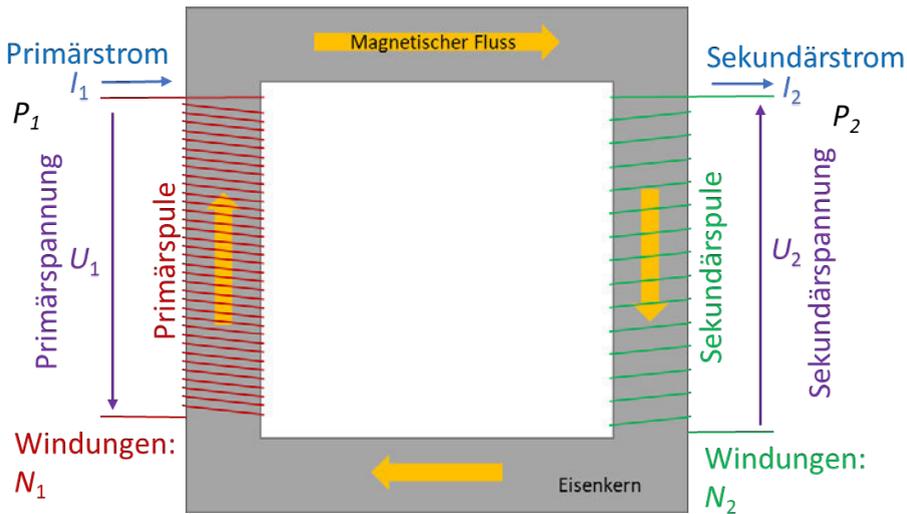


Abb. 1.1: Das Trafoprinzip

### 1.1.2 Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Mit der Erläuterung des „induktiven“ Trafoprinzips sind wir bereits auf den Spuren der induktiven Blindleistung. Bevor durch eine Spule ein Strom fließt, muss an beiden Enden bereits die volle Spannung anliegen. Erst dann beginnt ein Strom zu fließen. Im Fachjargon heißt das, der Strom eilt der Spannung nach. Bei einer Wechselspannung bedeutet das, dass der Strom, kaum dass er zu fließen begonnen hat, durch die Umpolung schon wieder in die andere Richtung fließen muss. Und das bei der Frequenz von 50 Hertz (Hz) 100-mal pro Sekunde. Damit ergibt sich ein geringerer Wirkanteil des Stromflusses, weil ein Teil träge zurückbleibt. Diesen ständig umkehrenden Anteil nennt man Blindstrom, da er zum tatsächlich wirksamen Stromtransport nicht beiträgt, den Leiterquerschnitt aber mit nutzt. Er wird als induktiver Blindstrom bezeichnet, der in Verbindung mit der anliegenden Wechselspannung die unerwünschte sogenannte Blindleistung erzeugt. Alle elektrotechnischen Bauelemente, die eine Spule besitzen, wie Transformatoren und Motoren sind potenzielle Verursacher von induktivem Blindstrom. Das ist die eine Seite der Medaille.

Die andere Seite wirkt entgegengesetzt. Dieses Phänomen lässt sich anhand eines mit Wechselspannung betriebenen Kabels sehr anschaulich erklären. Betrachten wir anstelle einer Spule einen sogenannten Kondensator. Dieser besteht aus zwei ausgehenden Platten, die durch ein isolierendes Material, das als Dielektrikum bezeichnet wird, getrennt sind. Legt man an die Platten eine Gleichspannung an, so verteilen sich die Ladungsträger auf den beiden Platten und es entsteht im Dielektrikum ein gleichmäßiges, elektrisches Feld.

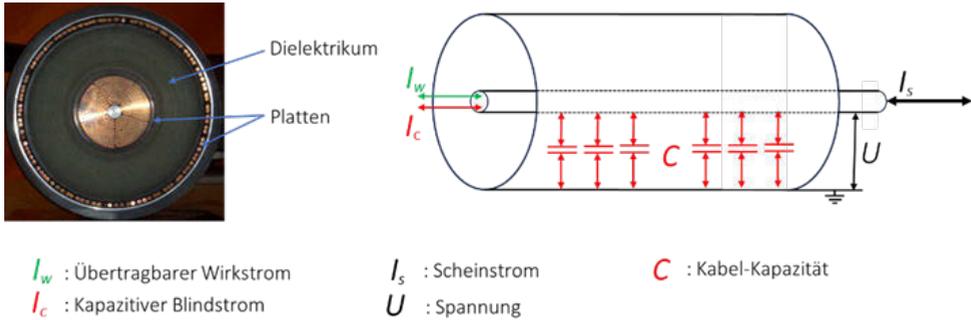


Abb. 1.2: Das Hochspannungskabel als langgestreckter Kondensator

Wird aber an die beiden Platten eines Kondensators eine Wechselspannung angelegt, müssen die Ladungsträger im Takt der Frequenz ständig von der Quelle und den beiden Platten hin und wieder zurückeilen. Eine weitere Besonderheit bei dieser Anordnung ist, dass sich die Ladungsträger erst auf den beiden Platten verteilen müssen, bevor eine Spannung dazwischen entstehen kann. D. h., der Strom muss erst fließen, bevor sich die Spannung aufbaut. Hier eilt also der Strom der Spannung voraus.

Hoch- und Höchstspannungskabel entsprechen in ihren Bauformen und ihren Wesenseigenschaften einem langgestreckten, konzentrischen Kondensator. Die Leiteroberfläche wirkt als eine Platte und die Außenhülle, der metallische Schirm, als die andere (Abb. 1.2, links). Stellen wir uns hierzu zwischen dem Leiter des Kabels und dessen Schirm eine Vielzahl kleiner Kondensatoren vor (Abb. 1.2, rechts). Wird nun eine Wechselspannung  $U$  zwischen dem Leiter und den in der Regel geerdeten Schirm angelegt, wandern die Ladungsträger, wie schon angedeutet, durch die ständige Umpolung von einer Platte zur anderen hin und her. Auf diese Weise erzeugen sie einen Strom, der nur dem Ladungsaustausch zwischen den Platten dient, das Kabel belastet, aber zu dem eigentlichen Stromtransport nichts beiträgt. Der Gesamtstrom durch den Leiter, der als Scheinstrom  $I_S$  bezeichnet wird, setzt sich also aus dem wirksam übertragenen Wirkstrom  $I_W$  und dem kapazitiven Blindstrom  $I_C$  zusammen. Allerdings nicht algebraisch, sondern in Form zweier Vektoren, die einen Winkel von  $90^\circ$  einschließen. Demzufolge gilt:

$$I_S = \sqrt{I_W^2 + I_C^2}$$

(1.7)

Es bedeuten:

$I_S$	Scheinstrom	A
$I_C$	Kapazitiver Blindstrom	A
$I_W$	Wirkstrom	A

Mit zunehmender Länge des Kabels steigt dessen sogenannte Kapazität und somit auch der kapazitiver Blindstrom. Bei Höchstspannungskabeln führt dieses Phänomen zu

Längenbeschränkungen. Wird nämlich für den Transport des Blindstroms der gesamte Leiterquerschnitt benötigt, kann kein Wirkstrom mehr übertragen werden. Dies ist der Grund dafür, dass in der Hoch- und Höchstspannungsebene die Integration von Kabeln in das mit Wechselstrom betriebene Leitungsnetz beschränkt ist.

Nun haben wir zwei Arten von Blindstrom kennengelernt, die trotz ihres unerwünschten Erscheinens segensreiche Eigenschaften besitzen. Sie lassen sich nämlich gegenseitig kompensieren. Da bei Kapazitäten der Strom der Spannung voraus- und bei Induktivitäten nacheilt, können sie sich gegenseitig mit Blindstrom versorgen und so den Blindstromanteil reduzieren oder gänzlich kompensieren. Damit kann über die Versorgungsleitungen ein hoher Anteil an Wirkstrom und damit verbunden an Wirkleistung übertragen werden. Im Hinblick auf die rechnerische Behandlung versteht man die beiden Blindleistungsarten mit einem Vorzeichen, und zwar die induktive mit einem positiven und die kapazitive mit einem negativen.

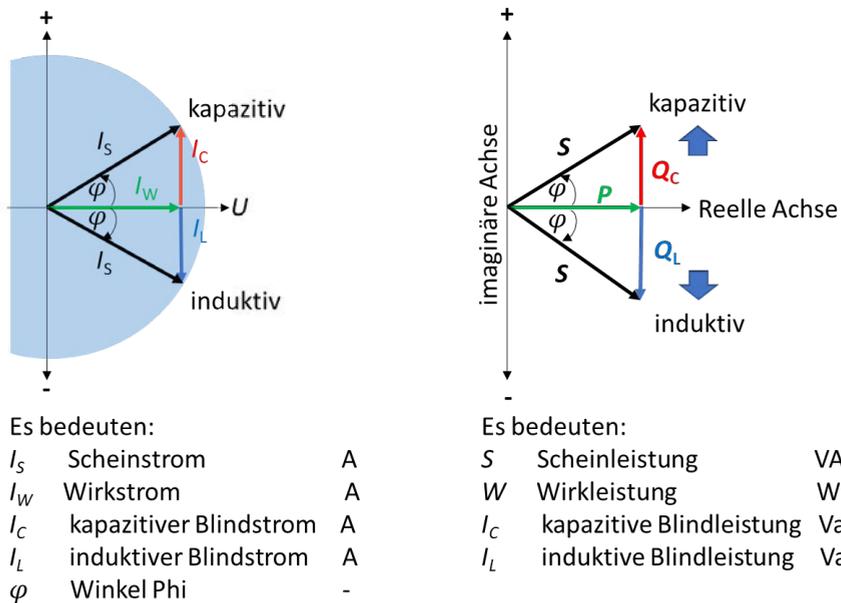


Abb. 1.3: Kapazitive und induktive Lasten im Wechselstromnetz (links: Ströme, rechts: Leistungen)

Zum besseren Verständnis dieser Verhältnisse bedient man sich in der Elektrotechnik sogenannter Zeigerdiagramme (Abb. 1.3), die die Zusammenhänge zwischen Strömen und Spannungen veranschaulichen. Dasselbe gilt auch für die vier Leistungsarten. Hierzu wird in der Regel ein Vier-Quadranten-System genutzt, in dem auf der Abszisse die reellen Anteile, also die Wirkanteile und auf der Ordinate die sogenannten imaginären, also die Blindleistungsanteile abgetragen werden. So lässt sich durch geometrische Addition jeder Zustand darstellen. Im linken Teil der Abb. 1.3 sehen wir,

wie Strom und Spannung zueinanderstehen. Die Schöpfer des Zeigerdiagramms in der Elektrotechnik entschieden sich für ein linksdrehendes (d. h. im Gegenuhrzeigersinn rotierendes) System. So sehen wir als Momentaufnahme die Spannung  $U$  parallel zur Abszisse. Der der Spannung vorausseilende kapazitive Blindstrom zeigt nach oben und spannt zwischen Schein- und Wirkstrom  $I_W$  den Winkel  $\varphi$  auf. Umgekehrt ist der Zeiger des induktiven Blindstroms nach unten gerichtet. In beiden Fällen bilden sich rechtwinklige Dreiecke, die die Größenverhältnisse der einzelnen Ströme zeigen. Der Scheinstrom teilt sich demnach geometrisch in den Wirkstrom und den kapazitiven bzw. induktiven Blindstrom auf.

Multipliziert man die jeweiligen Ströme mit der dazugehörigen Spannung, so ergibt sich das Zeigerdiagramm in der Abb. 1.3, rechter Bildteil. Dort, wo zuvor der Wirkstrom abgetragen war, steht nun die Wirkleistung  $P$ . Die jeweiligen Blindleistungsanteile spannen wie zuvor nach unten und nach oben den Winkel  $\varphi$  auf. Die Scheinleistung  $S$  ergibt sich aus dem Produkt der angelegten Spannung  $U$  und dem Scheinstrom  $I_S$ .

$$S = U \cdot I_S \quad (1.8)$$

Nach der Multiplikation der Scheinleistung  $S$  mit dem *Leistungsfaktor* Cosinus  $\varphi$  erhalten wir die übertragbare Wirkleistung  $P$ .

$$P = S \cdot \cos \varphi = U \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (1.9)$$

Bei symmetrischer Belastung der Einzelleiter ergibt sich für das dreiphasige Drehstromnetz die übertragbare Leistung entsprechend.

$$P = \sqrt{3} \cdot S \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (1.10)$$

Es bedeuten:

$S$	Scheinleistung	VA
$U$	Spannung	V
$I_S$	Scheinstrom	A
$P$	Wirkleistung	W
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor (Cosinus Phi)	-

In den Übertragungsnetzen wird stets ein Leistungsfaktor nahe eins angestrebt. In diesem Fall steht ein hoher Anteil des Leitungsquerschnitts der Kabel und der Freileitungen zum Transport der Wirkleistung zur Verfügung.

### Beispiel

In einem Drehstromnetz mit einer Betriebsspannung von  $U = 400$  V soll ein Drehstrom-Asynchronmotor betrieben werden. Auf dem Leistungsschild steht eine Wirkleistung von  $P = 3,8$  kW und ein Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,8$ . Wie hoch ist der Betriebsstrom  $I_S$ ?

$$I_s = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{3800 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot \cos \varphi} = 6,9 \text{ A}$$

Der Betriebsstrom beträgt 6,9 A.

## 1.2 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 bei der Fernübertragung elektrischer Energie. Die beiden Protagonisten Thomas Alva Edison und Nikola Tesla (Abb. 1.4) stritten im ausgehenden 19. Jahrhundert unerbittlich über diese Frage. 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 Wechsel- bzw. Drehstromübertragung (AC, aus dem Englischen: *alternating current*) forderte, die wir heute auf unterschiedlichen Spannungsebenen in der öffentlichen Elektrizitätsversorgung europaweit mit einer Frequenz von 50 Hz einsetzen. Dass wir uns heute erneut mit der Gleichstromübertragung in der Höchstspannungsebene befassen, hat mit dieser Entscheidung erst einmal nichts zu tun. Davon später.

Nicola Tesla war ein serbischer Ingenieur, der sein Studium an der technischen Hochschule im Österreichischen 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.“

Damit begann für den 28-jährigen Tesla die Arbeit im Unternehmen des neun Jahre älteren Genies, der zu dieser Zeit mit einer Vielzahl von Erfindungen rund um die Elektrizitätsanwendung bereits berühmt und ein erfolgreicher Geschäftsmann war.

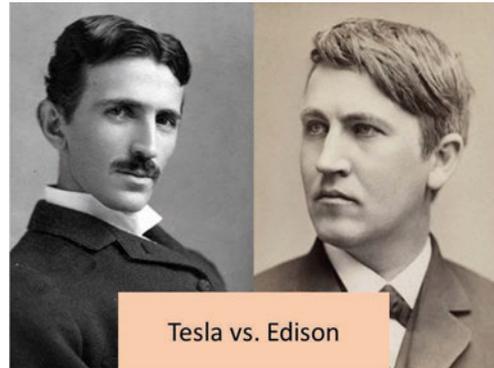


Abb. 1.4: Nikola Tesla (links) und Thomas Alva Edison (rechts) – zwei Protagonisten im Stromkrieg [1.1]

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 sollte. 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 Tesla gemeinsam mit dem Großindustriellen 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 seiner Gefährlichkeit behördlich verbieten zu lassen. Ohne Erfolg.

Da es damals weder Gleich- noch Wechselrichter gab, waren die Anwendungen immer dann von der Art der Transportspannung abhängig, wenn die Stromerzeugung und die Nutzung räumlich auseinanderfielen. Der Gleichstrommotor war ein eingeführtes und auch schon einigermaßen ausgereiftes Antriebsaggregat mit vielen Vorzügen. Er konnte mit Gleichstromgeneratoren und mit Batterien gleichermaßen betrieben werden. Seine Erfindung reichte in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts zurück. Für Beleuchtungszwecke, der damaligen Hauptanwendung der Elektrizität, war die Art der Spannung einerlei. Die Glühlampen leuchteten mit Gleichstrom ebenso gut wie mit Wechselstrom. Den Wechselstrom- bzw. Drehstrommotor hatte Tesla aber gerade erst erfunden. Dessen kommerzieller Einsatz ließ noch auf sich warten.

Für die Elektrizitätsübertragung über weite Strecken erwies sich Gleichstrom als weniger geeignet. Die erste Gleichstrom-Überland-Freileitung, die Oskar von Miller (Abb. 1.5), der spätere Gründer des Deutschen Museums, anlässlich der „Münchner 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 Telegraphenleitung hatte einen Leitungswiderstand von 3.000 Ohm ( $\Omega$ ) und brachte es gerade einmal auf einen Wirkungsgrad von rund 25 % [1.2]. Die Wahl eines größeren Querschnitts hätte das Ergebnis sicher verbessert, zufriedenstellend wäre es allerdings auch nicht gewesen. Höhere Leistungen über längere Strecken mit Gleichstrom zu übertragen, bedeutete damals, wegen der begrenzten Spannungshöhe, große Querschnitte aus teurem Kupfer. Obendrein führte das Schalten