

# 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	Leiterseile	110
4.2.1	Typen und grundlegende Eigenschaften von Leiterseilen	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-Leiterseile	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