

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 Netzverbünde	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	Energieleitungsausbauigesetz (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	Schutzwerte 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
4.8.4	Robotik für Freileitungen	311
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-Leiterseile	453
7.4.2	Kompakteitungen 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