

# 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	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
4.8.4	<b>Robotik für Freileitungen</b> .....	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	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