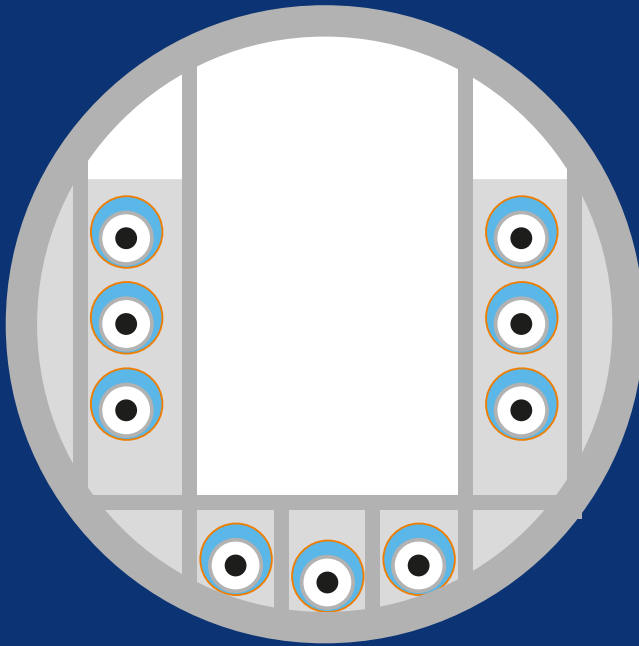
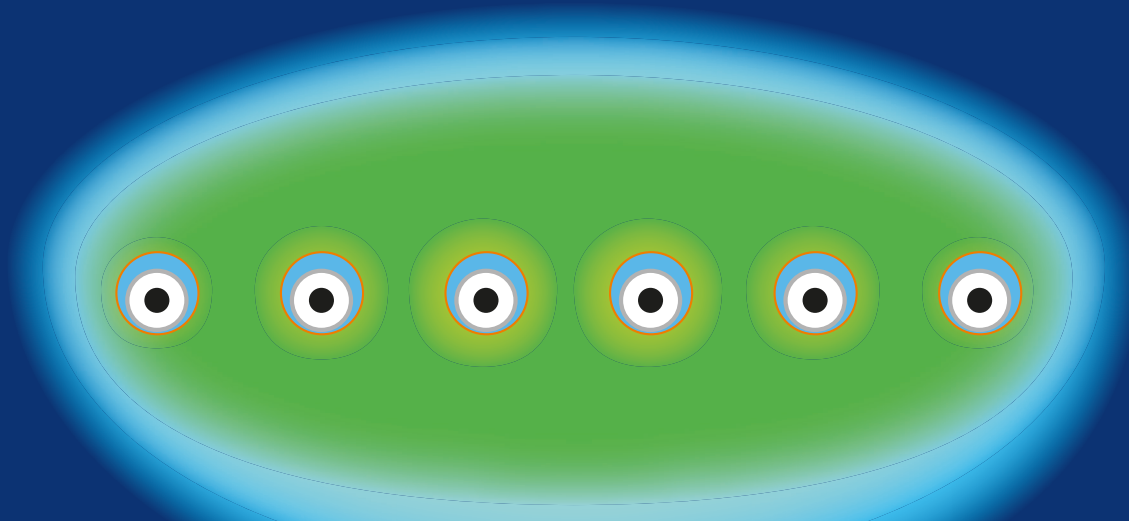


**H. BRAKELMANN
L.J. JARASS**



Erdkabel für den Netzausbau

**Höchstspannungskabel
Drehstrom und Gleichstrom
Minimaltrassen
Zuverlässigkeit
Kosten**



Inhaltsverzeichnis

Das könnte Sie besonders interessieren	4
Inhaltsverzeichnis.....	7
Liste der Abbildungen.....	15
Liste der Tabellen.....	19
Teil I : Netzausbau für die Energiewende	22
1 Energiewende – erneuerbare statt konventionelle Stromproduktion	23
1.1 Grundlegender Umbau der Energieversorgung.....	23
1.1.1 Geplanter Ausbau der EE-Stromproduktion	24
(1) Installierte Leistungen der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke.....	24
(2) Installierte Leistung und benötigte Leistung.....	26
1.1.2 Stromproduktion	27
(1) Stromproduktion der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke.....	27
(2) Auslastung der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke	29
(3) Stromexport und Stromimport.....	30
1.2 Starke Fluktuationen der EE-Stromproduktion.....	31
1.2.1 Stündliche und tägliche Fluktuationen.....	31
1.2.2 Wöchentliche und monatliche Fluktuationen.....	34
1.3 Ausgleich von benötigter und verfügbarer Leistung.....	37
1.3.1 Benötigte und verfügbare Leistung.....	37
(1) Täglicher Stromverbrauch im Vergleich zur Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken.....	37
(2) Installierte Leistung bezogen auf die benötigte Leistung.....	37
(3) Sofortiger Ausgleich von benötigter und verfügbarer Leistung erforderlich.....	39
1.3.2 Maßnahmen zum Ausgleich von benötigter und verfügbarer Leistung	40
(1) Stromspeicher.....	41
(2) Reservekraftwerke	42
(3) Wärme- oder Gaserzeugung durch erneuerbaren Strom	42
(4) Abregelung von Kraftwerken.....	42
(5) Nachfragemanagement und Sektorkopplung.....	43
(6) Internationaler Stromhandel	43
2 Grundlagen des Netzausbaus	45
2.1 Stromnetz	45
2.1.1 Deutsches Höchstspannungsnetz.....	45
(1) Regelzone.....	45
(2) Spannungsebenen.....	45
(3) Länge von Freileitungen und Kabel.....	47
2.1.2 Technische Randbedingungen	48
(1) Thermische Grenzleistung.....	48
(2) Dynamische Netzstabilität	50

2.2	Bestimmung des optimalen Netzausbaus: nicht zu viel und nicht zu wenig	50
2.2.1	Nutzen und Kosten des Netzausbaus	51
2.2.2	(n-1)-Kriterium für Netzstörungen	54
2.3	Geplanter Netzausbau laut Netzentwicklungsplan	56
2.3.1	Produzierte und verbrauchte elektrische Energie je Bundesland	56
2.3.2	Geplanter Netzausbau	58
	(1) Bestand und geplanter Zubau	58
	(2) Kabelanteil	60
3	Reduzierung des Netzausbaus durch Abregelung von Einspeisespitzen	61
3.1	Abregelung von Einspeisespitzen	61
3.1.1	Abregelung von Einspeisespitzen gesetzlich geboten	61
3.1.2	Wirkungsweise der Abregelung von Einspeisespitzen	62
3.2	Generelle versus störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen	65
3.2.1	Generelle Abregelung von Einspeisespitzen	65
	(1) Seltene simultane Einspeisespitzen	65
	(2) Häufige simultane Einspeisespitzen	67
3.2.2	Störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen	68
	(1) Seltene simultane Einspeisespitzen	68
	(2) Häufige simultane Einspeisespitzen	69
3.3	Anwendung des Abregelungsmodells auf ein größeres Stromnetz	71
3.3.1	Modellannahmen	71
3.3.2	Reduzierung des erforderlichen Netzausbaus durch Abregelung	72
	(1) Kabelanteil 0%	72
	(2) Kabelanteil 5%	74
	(3) Kabelanteil 10%	75
3.3.3	Aufwandsverringerung hängt auch von den Lastverhältnissen im Normalbetrieb ab	76
3.3.4	Folgerungen	77
4	Maßnahmen für den Netzausbau	79
4.1	Bessere Nutzung bestehender Leitungen	79
4.1.1	Netzoptimierung	79
4.1.2	Freileitungsmonitoring	80
	(1) Witterungsabhängiger Freileitungsbetrieb	80
	(2) Leiterseittemperaturmonitoring	81
	(3) Für sinnvolles Leiterseittemperaturmonitoring Reservekraftwerke in Süddeutschland erforderlich	82
4.1.3	Hochtemperaturleiterseile	82
	(1) Gesicherte Erhöhung des zulässigen Stromtransports durch Hochtemperaturleiterseile	82
	(2) Kombination von Leiterseittemperaturmonitoring und Hochtemperaturleiterseilen besonders interessant	83
4.2	Neubau von Leitungen	84
4.2.1	Neubau von Freileitungen	85
	(1) Aufbau von Freileitungen	85
	(2) Freileitungen sind durch extreme Wetterbedingungen besonders betroffen	87
	(3) Waldbrände durch Freileitungen ruinieren den größten US-Stromversorger	89

4.2.2	Neubau von Kabelanlagen	90
(1)	380-kV-Kabel sind Stand der Technik	90
(2)	Zusatzkühlung von 380-kV-Kabeln langjährig erprobt	91
4.2.3	Vergleich von Abregelung, besserer Nutzung bestehender Leitungen und Leitungsneubau	92
Teil II : Netzausbau mit Drehstrom-Höchstspannungskabeln		94
5	Technische Grundlagen von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	95
5.1	Technik von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	95
5.1.1	Kunststoffisolierte 380-kV-Drehstromkabel	95
(1)	Aufbau von 380-kV-Drehstromkabeln	95
(2)	Elektrische Kenngrößen von 380-kV-Drehstromkabeln im Vergleich zu 380-kV-Drehstromfreileitungen	99
5.1.2	Weitere technische Aspekte von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	102
(1)	Prüfungen von Höchstspannungskabelsystemen	102
(2)	Muffenbereiche	103
(3)	Schirmbehandlung	105
(4)	Überspannungsschutz bei Teilverkabelungen	107
(5)	Monitoringsystem zur Überwachung der Leitertemperatur	108
5.1.3	Übergangsfelder	109
5.2	Legeverfahren und Legeanordnungen von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	111
5.2.1	Verlegung im offenen Graben	114
(1)	Kabelbelastbarkeiten bei möglicher Bodenaustrocknung	114
(2)	Standard-Einebenenordnung	117
5.2.2	Pflugverlegung	118
5.2.3	Blockverlegung im Mantelrohr	119
5.2.4	Verlegung im begehbaren Leitungsgang	123
(1)	Infrastrukturkanal	124
(2)	Leitungsgang in geschlossener Bauweise	126
(3)	Leitungsgang in halboffener Bauweise	128
6	Kabelanlagen mit Reservekabeln oder Reservesystem – PowerTubes	130
6.1	Kabelanlagen mit Reservekabeln	132
6.1.1	Legeverfahren und Legeanordnungen mit Reservekabeln	132
(1)	Einebenenordnung mit Reservekabel im offenen Graben	132
(2)	Kabelanordnungen mit Reservekabel im Mantelrohr	132
(3)	Kabelanordnungen mit Reservekabel im begehbaren Leitungsgang	133
6.1.2	Übergangsfelder	135
6.2	Kabelanlagen mit Reservesystem	139
6.2.1	Legeverfahren und Legeanordnungen mit Reservesystem	139
(1)	Einebenenordnung mit Reservesystem im offenen Graben	139
(2)	Anordnung mit Reservesystem im Mantelrohr	139
(3)	Anordnung mit Reservesystem im begehbaren Leitungsgang	140
6.2.2	Übergangsfelder	141
7	Übertragungsleistungen von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	142
7.1	Übertragungsanforderungen an 380-kV-Drehstromkabel	142
7.1.1	Übertragungsanforderungen der Übertragungsnetzbetreiber	142

7.1.2	Für Kabelauslegung relevante Lastfälle	144
7.2	Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln	146
7.2.1	Übertragungsleistungen bei offener Bauweise	146
	(1) Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabelsystemen mit 2.500 mm ² -Kupferleitern	147
	(2) Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabelsystemen mit 3.500 mm ² -Aluminiumleitern	150
	(3) Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabelsystemen mit 3.500 mm ² -Kupferleitern	151
7.2.2	Übertragungsleistungen im begehbaren Leitungsgang	154
7.2.3	Bei Kabeln Überschreitung der Übertragungsnennleistung vorübergehend zulässig	156
	(1) Bestimmung der vorübergehend zulässigen Überschreitung der Übertragungsnennleistung von Kabeln	156
	(2) Höhe und Dauer der vorübergehend zulässigen Überschreitung der Übertragungsnennleistung von Kabeln	157
	(3) Übertragungsleistungen bei Berücksichtigung der Leitungsauslastung	158
7.3	Blindleistungskompensation	159
7.3.1	Ohne Blindleistungskompensation	159
7.3.2	Mit Blindleistungskompensation	162
7.3.3	Verluste	164
8	Zuverlässigkeit von Drehstrom-Höchstspannungskabeln – PowerTubes	165
8.1	Zuverlässigkeit von konventionellen 380-kV-Drehstromkabelsystemen	165
8.1.1	Nichtverfügbarkeit eines einzelnen Kabelsystems	165
	(1) Bestimmung der Nichtverfügbarkeit eines einzelnen Kabelsystems	165
	(2) Reparaturdauer und resultierende Nichtverfügbarkeit eines einzelnen Kabelsystems	167
8.1.2	Nichtverfügbarkeit eines Kabeldoppelsystems	168
	(1) Nichtverfügbarkeit eines Systems eines Kabeldoppelsystems	168
	(2) Zum Vergleich: Nichtverfügbarkeit eines Systems eines Freileitungsdoppelsystems	169
8.1.3	Nichtverfügbarkeit beider Systeme eines Kabeldoppelsystems	169
8.2	Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Reservekabel – PowerTubes	170
8.2.1	Nichtverfügbarkeit eines 380-kV-PowerTubes-Drehstromkabelsystems	170
8.2.2	Nichtverfügbarkeit eines Systems eines PowerTubes- Drehstromkabeldoppelsystems	173
8.2.3	Nichtverfügbarkeit beider Systeme eines PowerTubes- Drehstromkabeldoppelsystems	175
9	Minimaltrassen mit störungsorientierter Zusatzkühlung der Kabel	177
9.1	Technische Grundlagen der Zusatzkühlung	178
9.1.1	Aufbau einer Standard-Kühlanlage	179
9.1.2	Kühlverfahren	181
	(1) Direkte Zusatzkühlung	181
	(2) Indirekte Zusatzkühlung	182
9.2	Zusatzkühlung von heute verfügbaren 380-kV-Kabeln	184
9.2.1	Minimaltrassen in offener Bauweise	184

(1) Auslegung mit Reservekabel	184
(2) Redundanzverhalten zweier 380-kV-Kabelsysteme mit Reservekabel	185
(3) Auslegung mit Reservesystem.....	187
9.2.2 Alternative Ausführungen in Mantelrohren oder im Leitungsgang	188
(1) Auslegung mit Reservekabel	188
(2) Redundanzverhalten von zwei 380-kV-Kabelsystemen mit Reservekabel	188
(3) Auslegung mit Reservesystem.....	190
9.2.3 Übertragungsleistungen bei Zusatzkühlung	192
(1) Übertragungsleistungen bei Erdverlegung oder im Mantelrohr.....	192
(2) Übertragungsleistungen bei Verlegung im Leitungsgang	194
9.3 Zusatzkühlung von leistungsoptimierten 380-kV-Kabeln.....	197
9.3.1 Strombelastbarkeiten von leistungsoptimierten Kabeln.....	197
(1) Stationäre Strombelastbarkeiten ohne Zusatzkühlung der Kabel.....	197
(2) Transientes Erwärmungsverhalten ohne Zusatzkühlung der Kabel	199
(3) Stationäre Strombelastbarkeiten mit Zusatzkühlung der Kabel	201
(4) Indirekt gekühlte 380-kV-Kabel.....	203
9.4 Minimaltrassenlösungen im Leitungsgang mit forcierter Luftkühlung	204
9.5 Folgerungen	207
10 Minimaltrassen mit störungsorientierter Abregelung von Einspeisespitzen	211
10.1 Störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen	211
10.1.1 Vorgehensweise zur Bestimmung der wegen störungsorientierter Abregelung nicht übertragbaren Energie.....	211
10.1.2 Kabelbemessung, falls die zulässige Abregelung überschritten wird	213
10.2 Nicht übertragbare Energie durch Abregelung bei Übertragungsanforderungen der Übertragungsnetzbetreiber	214
10.2.1 Modellannahmen.....	214
(1) Übertragungsanforderungen der Übertragungsnetzbetreiber	214
(2) Zeitliche Verteilung der Übertragungsanforderungen	215
(3) 3%-Abregelungsgrenze	215
(4) Stationäre Übertragungsleistungen der betrachteten Kabelsysteme	216
(5) Vorübergehende Überlastbarkeiten bleiben unberücksichtigt.....	216
10.2.2 Nicht übertragbare Energie durch Abregelung bei Normalbetrieb.....	217
(1) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO A bei Normalbetrieb 3.318 MVA dauerhaft.....	217
(2) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO B bei Normalbetrieb 2.160 MVA dauerhaft.....	218
(3) Obergrenze der nicht übertragbaren Energie wegen Abregelung bei Normalbetrieb.....	218
10.2.3 Nicht übertragbare Energie durch Abregelung bei Störung in der betrachteten Kabeltrasse	219
(1) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO A bei Störung in der betrachteten Kabeltrasse.....	219
(2) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO B bei Störung in der betrachteten Kabeltrasse.....	220
(3) Obergrenze der nicht übertragbaren Energie wegen Abregelung bei Störung in der betrachteten Kabeltrasse	222
(4) Tatsächlich nicht übertragbare Energie ist deutlich kleiner	222

10.2.4 Nicht übertragbare Energie durch Abregelung bei Netzstörung in einer anderen Trasse	223
(1) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO A bei Netzstörung in einer anderen Trasse	223
(2) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO B bei Netzstörung in einer anderen Trasse	224
(3) Obergrenze der nicht übertragbaren Energie wegen Abregelung bei Netzstörung in einer anderen Trasse	224
10.3 Anwendung des Abregelungsmodells auf ein größeres Stromnetz	225
10.3.1 Modellannahmen	225
(1) Trassenlänge und zu übertragende Energie	225
(2) Korrekturfaktoren für die nicht übertragbare Energie	225
10.3.2 Zulässige Verkabelung durch Minimaltrassen mit störungsorientierter Abregelung	226
(1) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO A	226
(2) Übertragungsanforderungen von Übertragungsnetzbetreiber TSO B	227
10.3.3 Einsparbarer Netzausbau durch Minimaltrassen mit störungsorientierter Abregelung von Einspeisespitzen	228
(1) Schritt 1: Nur 2 statt 4 Kabelsysteme	228
(2) Schritt 2: Verringerung der installierten Leistung der Kabelsysteme	229
10.3.4 Folgerungen	229
(1) Bei störungsorientierter Abregelung hohe Versorgungssicherheit	229
(2) Durch störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen nur zwei statt vier 380-kV-Drehstromkabelsysteme erforderlich	230
11 Umweltaspekte von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	231
11.1 Bodenveränderungen durch Drehstrom-Höchstspannungskabel	231
11.1.1 Bodenbeeinträchtigungen durch die Bauphase	231
(1) Bodenbeeinträchtigungen bei offener Bauweise	231
(2) Bodenbeeinträchtigungen bei Minimaltrassen	233
11.1.2 Bodenerwärmung	234
(1) Abschätzung der Bodenerwärmung	234
(2) Bodenerwärmung bei Standardtrassen	235
(3) Bodenerwärmung bei Minimaltrassen	237
11.2 Magnetfelder von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	238
11.2.1 Gesetzliche Grenzwerte	238
11.2.2 Verringerung der Magnetfelder	239
(1) Verringerung der Magnetfelder durch Cable Management	239
(2) Verringerung der Magnetfelder durch Kompensationsleiter	240
(3) Verringerung der Magnetfelder durch hochpermeable Kapselung	243
11.2.3 Magnetfelder bei Minimaltrassen	246
(1) Installation im offenen Graben	246
(2) Installation im Leitungsgang	247
12 Kosten von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	250
12.1 Investitionskosten von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	250
12.1.1 Investitionskosten von Drehstromteilverkabelungen	250
(1) Investitionskosten für Kabel und Trasse bei offener Bauweise	250
(2) Investitionskosten für Übergangsbauwerke und Kompensation	253
(3) Zum Vergleich: Investitionskosten einer Drehstrom-Höchstspannungsfreileitung	254

12.1.2 Vergleich der Investitionskosten von Drehstromteilverkabelungen	255
(1) Übertragungsleistungen der einzelnen Kabelauslegungen sind sehr unterschiedlich	255
(2) Längenbezogene Investitionskosten	256
12.1.3 Vermeidung einer Überdimensionierung von Drehstromteilverkabelungen....	259
(1) Teilverkabelungen standardmäßig überdimensioniert.....	259
(2) Investitionskosten bei angemessener Dimensionierung.....	260
12.2 Verlustkosten von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	262
12.2.1 Übertragungsverluste	262
12.2.2 Verlustkosten	264
12.3 Gesamtkosten von Drehstrom-Höchstspannungskabeln	265
12.3.1 Gesamtkosten unterschiedlich langer Drehstromteilverkabelungen	265
(1) Gesamtkosten in Abhängigkeit von Teilverkabelungslänge und Kabelauslegung	265
(2) Struktur der Gesamtkosten	267
12.3.2 Mehrkosten einer Übertragungsanlage mit Drehstromteilverkabelung	269
(1) Mehrkosten bei unterschiedlichen Kabelanteilen an der Trassenlänge	269
(2) Mehrkosten einer Teilverkabelung von 2 km bzw. 20 km bezogen auf unterschiedliche Trassenlängen.....	271
Teil III : Netzausbau mit Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	273
13 Technische Grundlagen von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	274
13.1 Technik von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	274
13.1.1 Aufbau von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	274
13.1.2 Grenzfeldstärken bei Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	276
13.2 Auslegung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	280
13.2.1 Auslegung nach der höchstzulässigen Temperaturdifferenz über dem Kabel.....	280
(1) Gleichstrom-Höchstspannungskabel mit vorgegebener Oberflächentemperatur ..	281
(2) Gleichstrom-Höchstspannungskabel mit natürlicher Kühlung	282
13.2.2 Berücksichtigung partieller Bodenaustrocknung	282
13.3 Legeanordnungen für Gleichstrom-Höchstspannungskabel.....	283
14 Übertragungsleistungen von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	287
14.1 Übertragungsleistungen von 525-kV-Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	287
14.1.1 Übertragungsleistungen von 525-kV-Gleichstromkabelsystemen bei offener Bauweise	287
14.1.2 Übertragungsleistungen von 525-kV-Gleichstromkabelsystemen bei halboffener oder geschlossener Bauweise	289
(1) Schutzrohrverlegung im Pflugverfahren	289
(2) Installation im Mantelrohr	289
(3) Installation im Leitungsgang	290
14.1.3 525-kV-Gleichstromkabel mit höchstzulässiger Leitertemperatur von 90°C statt 70°C.....	291
14.2 Thermische Engpässe von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	291
14.2.1 Thermische Engpässe durch große Legetiefen	291
14.2.2 Thermische Engpässe durch Fremdwärmequellen.....	293

14.3	Zusatzkühlung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	296
14.3.1	Bedeutung der höchstzulässigen Kabelerwärmung	296
14.3.2	Zusatzkühlung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln bei thermischen Engpässen sinnvoll	297
15	Zuverlässigkeit von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln – PowerTubes.....	299
15.1	Nichtverfügbarkeit von konventionellen Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	299
15.1.1	Berechnungsverfahren für Nichtverfügbarkeiten	299
15.1.2	Nichtverfügbarkeit eines herkömmlichen Gleichstromkabelsystems.....	300
	(1) Ausfallhäufigkeiten eines herkömmlichen 525-kV-Gleichstromkabels	301
	(2) Mittlere Reparaturdauer	303
	(3) Durchschnittliche Nichtverfügbarkeit	303
15.2	Erhöhung der Verfügbarkeit durch Reservekabel – PowerTubes.....	304
15.2.1	Legeverfahren und Legeanordnungen mit Reservekabel – PowerTubes	304
	(1) Verlegung im offenen Kabelgraben	304
	(2) Verlegung in Mantelrohren	305
	(3) Verlegung im Leitungsgang	307
	(4) Vorteile bei Verlegung im Mantelrohr oder im Leitungsgang	308
	(5) Durchgängiges Schutzkonzept in den Muffenbereichen erforderlich.....	308
15.2.2	Verfügbarkeit von einem 525-kV-Gleichstromkabelsystem mit Reservekabel	308
	(1) Kabelsystem mit Reservekabel – PowerTubes.....	309
	(2) Verringerung der internen Fehlerraten, Erhöhung der Lieferlänge der Kabel.....	310
15.2.3	Verfügbarkeit von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen mit Reservekabeln	311
15.3	Nicht übertragbare Energie und ihre Bewertung	313
15.3.1	Ein Kabelsystem.....	313
15.3.2	Zwei Kabelsysteme.....	315
15.3.3	Folgerungen	317
16	Umweltaspekte von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	319
16.1	Bodenveränderungen durch Gleichstrom-Höchstspannungskabel	319
16.1.1	Bodenbeeinträchtigungen durch die Bauphase	319
16.1.2	Bodenerwärmung.....	319
16.2	Magnetfelder von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln.....	320
17	Kosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	323
17.1	Investitionskosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	323
17.1.1	Investitionskosten von 525-kV-Gleichstromkabelsystemen	323
	(1) Investitionskosten für Kabel, Garnituren und Kabelverlegung	323
	(2) Trassenkosten	325
	(3) Planungskosten und Kosten für Unvorhergesehenes	326
	(4) Vergleich der Trassenkosten eines Leitungsgangs mit einem Kabelgraben.....	326
17.1.2	Vergleich der Investitionskosten von 525-kV-Gleichstromsystemen ohne Berücksichtigung von Konverterkosten	327
	(1) Investitionskosten von 525-kV-Gleichstromsystemen	327
	(2) Vergleich mit den Kostenschätzungen der Übertragungsnetzbetreiber	328
	(3) Vergleich mit den Investitionskosten einer 525-kV-Gleichstromfreileitung	329

17.1.3 Vergleich der Investitionskosten von 525-kV-Gleichstromsystemen mit Berücksichtigung von Konverterkosten	330
(1) Investitionskosten von Convertern	330
(2) Vergleich der Investitionskosten bei unterschiedlichen Konverterkosten	330
(3) Hoher Kostenanteil der Konverterkosten	334
17.2 Verlustkosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	334
17.2.1 Verluste und Verlustkosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	334
(1) Übertragungsverluste von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen	334
(2) Verlustkosten von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen	335
17.2.2 Verluste und Verlustkosten von Convertern	336
(1) Konversionsverluste von Convertern	336
(2) Verlustkosten von Convertern	337
17.3 Gesamtkosten von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln	338
17.3.1 Vergleich der Gesamtkosten von 525-kV-Gleichstromsystemen	338
(1) Investitionskosten	338
(2) Verlustkosten	341
(3) Gesamtkosten	341
(4) Kostenstruktur	342
17.3.2 Kostenvergleich von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für Trassenlängen bis 1.000 km	343
(1) Konverterkosten 250 €/kW	343
(2) Konverterkosten 100 €/kW	344
17.3.3 Folgerungen	345
Quellen	347

Liste der Abbildungen

Abb. 1.1: Anteil der EE-Stromproduktion am Stromverbrauch in Deutschland 2017 und Ausbauziele bis 2050	24
Abb. 1.2: Installierte Kraftwerksleistung in Deutschland 2017 und Ausbauziele bis 2035	25
Abb. 1.3: Installierte Leistungen von konventionellen und von EE-Kraftwerken in Deutschland 2017 und Ausbauziele bis 2035	26
Abb. 1.4: Installierte EE-Kraftwerksleistung und benötigte Leistung in Deutschland 2017 und Prognosen bis 2035	27
Abb. 1.5: Stromproduktion der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke in Deutschland 2017 und Prognosen bis 2035	28
Abb. 1.6: Stromexport und Stromimport in Deutschland 2030	30
Abb. 1.7: Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland vom 22.01.2018 bis 28.01.2018 mit extremen Fluktuationen	32
Abb. 1.8: Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland vom 05.02.2018 bis 11.02.2018 mit Windflaute	32
Abb. 1.9: Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland vom 09.07.2018 bis 15.07.2018 mit Windflaute, aber sehr viel Sonne	33
Abb. 1.10: Wöchentliche Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland 2016 bis 2018	35
Abb. 1.11: Monatliche Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland 2016 bis 2018	36
Abb. 1.12: Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraftwerken und Stromverbrauch in Deutschland 2016 bis 2018	38

Abb. 1.13: Deutscher Stromexport bei Starkwind, Prognosen für Winter 2020/2021	44
Abb. 2.1: Deutsches Höchstspannungsnetz 2018	46
Abb. 2.2: Produzierte und verbrauchte elektrische Energie je Bundesland, Prognosen für 2030 laut Netzentwicklungsplan	57
Abb. 2.3: Geplanter Netzausbau bis 2030 laut Netzentwicklungsplan	59
Abb. 3.1: Abregelung von Einspeisespitzen – Schema	62
Abb. 3.2: EE-Einspeisung vor und nach Abregelung von Einspeisespitzen, Prognose für 2035	63
Abb. 3.2a: Abregelung von Windenergie-Einspeisespitzen in den einzelnen Bundesländern, Prognose für 2030	64
Abb. 3.2b: Abregelung von Photovoltaik-Einspeisespitzen in den einzelnen Bundesländern, Prognose für 2030	64
Abb. 3.3: Verringerung der erforderlichen Übertragungsleistung durch eine generelle Abregelung von Einspeisespitzen bei seltenen simultanen Einspeisespitzen	66
Abb. 3.4: Verringerung der erforderlichen Übertragungsleistung durch eine generelle Abregelung von Einspeisespitzen bei häufigen simultanen Einspeisespitzen	67
Abb. 3.5: Verringerung der erforderlichen Übertragungsleistung durch eine störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen bei seltenen simultanen Einspeisespitzen	69
Abb. 3.6: Verringerung der erforderlichen Übertragungsleistung durch eine störungsorientierte Abregelung von Einspeisespitzen bei häufigen simultanen Einspeisespitzen	70
Abb. 4.1: Leiterseittemperaturmonitoring – Schema	81
Abb. 4.2: Herkömmliche Freileitungsmasten für Höchstspannungsübertragung	85
Abb. 4.3: Innovative Freileitungsmasten für Höchstspannungsübertragung	86
Abb. 4.4: Aufbau von 2er-Bündelleitern und 4er-Bündelleitern	86
Abb. 4.5: Aufbau eines Stahl-Aluminium-Freileitungsverbundseiles	87
Abb. 4.6: Witterungsbedingte Umbrüche von Strommasten	88
Abb. 4.7: 380-kV-Kabeldiagonale Berlin	91
Abb. 5.1: Kunststoffisoliertes 380-kV-Drehstromkabel mit Kupferleiter	96
Abb. 5.2: Fertigung kunststoffisolierter Kabeladern	96
Abb. 5.3: Muffenverbindung	97
Abb. 5.4: Spule mit 1.200 m Höchstspannungskabel im Hochspannungsprüffeld	98
Abb. 5.5: Gedrehte Spule für extreme Transportlängen – Modell	99
Abb. 5.6: Längsschnitt einer Muffenkammer für 1 Kabelsystem	104
Abb. 5.7: Querschnitt einer Muffenkammer für 2 Kabelsysteme	104
Abb. 5.8: Muffenbereich eines Kabeldoppelsystems	105
Abb. 5.9: Zyklisches Schirm-Auskreuzen (Cross-Bonding) – Schema	106
Abb. 5.10: Einseitige Schirmerdung bei mitgeführtem Erdungsleiter – Schema	107
Abb. 5.11: FEM-simulierte und prognostizierte Temperaturen von Kabelleiter und Kabelschirm	109
Abb. 5.12: Freiluft-Kabelendverschlüsse	110
Abb. 5.13: 380-kV-Teilverkabelung von 2 Freileitungssystemen durch 4 Kabelsysteme	111
Abb. 5.14: Kabelbelastbarkeiten bei unterschiedlicher Berücksichtigung von Bodenaustrocknung	115
Abb. 5.15: Einbringen von Rückfüllmaterial bei der Kabelverlegung	116
Abb. 5.16: Standardverlegung von 4 Drehstrom-Höchstspannungskabelsystemen im offenen Graben	117
Abb. 5.17: Einpfügen von Kabeln – Beispiele	118
Abb. 5.18: Kabelsystem im Stahl-Mantelrohr	120
Abb. 5.19: Einbringen eines Mantelrohres im halboffenen PipeExpress-Verfahren	121
Abb. 5.20: Einbringen von Mantelrohren durch das geschlossene DirectPipe-Verfahren	122
Abb. 5.21: Zweizügiger Infrastrukturkanal mit 2 Kabeldoppelsystemen	124
Abb. 5.22: Infrastrukturkanal System Dupré	125
Abb. 5.23: Gesteuerter Rohrvortrieb – Prinzipdarstellung	126
Abb. 5.24: Leitungsgang mit 4 Kabelsystemen	127
Abb. 5.25: Bau eines Leitungsganges in halboffener Bauweise mit halboffenem Rohrvortrieb	128

Abb. 6.1: Einebenenordnung von 4 Kabelsystemen mit 2 Reservekabeln	132
Abb. 6.2: Blockverlegung von 4 Drehstromkabelsystemen mit je 1 Reservekabel im Mantelrohr	133
Abb. 6.3: Zweizügiger Infrastrukturkanal mit 4 Drehstromkabelsystemen und 2 Reservekabeln	133
Abb. 6.4: Leitungsgang mit 4 Drehstromkabelsystemen und 2 Reservekabeln	134
Abb. 6.5: Kabel im Leitungsgang mit Kompensationsleitern	134
Abb. 6.6: Schnelle Umschaltung mit Trennern im Übergangsfeld	135
Abb. 6.7: Übergangsfeld für 2 Freileitungs- und 4 Kabelsysteme	136
Abb. 6.8: Übergangsfeld für 4 Kabelsysteme mit 2 Reservekabeln	137
Abb. 6.9: Unterirdische Übergangsanlage – Schema	138
Abb. 6.10: Einebenenordnung von 2 Drehstromkabelsystemen mit 1 Reservesystem im offenen Graben	139
Abb. 6.11: Blockverlegung von 2 Drehstromkabelsystemen mit 1 Reservesystem im Mantelrohr	140
Abb. 6.12: 2 Kabelsysteme mit 1 Reservesystem im Leitungsgang	140
Abb. 6.13: Übergangsfeld für 1 Freileitungsdoppelsystem auf 1 Kabeldoppelsystem mit 1 Reservesystem	141
Abb. 7.1: Stromaufteilungen (maximale Ströme) bei 2 Freileitungssystemen und 2 Kabeldoppelsystemen im Normalbetrieb und bei Netzstörung	145
Abb. 7.2: Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit 2.500 mm ² -Kupferleitern für unterschiedlich dichte Kabellegung	148
Abb. 7.3: Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit 3.500 mm ² -Aluminiumleitern für unterschiedlich dichte Kabellegung	150
Abb. 7.4: Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit verlustoptimierten 3.500 mm ² -Kupferleitern für unterschiedlich dichte Kabellegung	151
Abb. 7.5: Übertragungsleistung eines der beiden 380-kV-Drehstromkabeldoppelsysteme im Leitungsgang als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit der Luft	155
Abb. 7.6: Zulässige Dauer der Überschreitung der Übertragungsnennleistung von 380-kV-Drehstromkabelsystemen – Beispiel	157
Abb. 7.7: Übertragbare Wirkströme I_w , maximaler kapazitiver Strom I_c und induktiver Blindstrom I_B für unterschiedliche Leistungsfaktoren bei unkompenziertem Kabel	160
Abb. 7.8: Drosselspule zur Blindleistungskompensation von 150 MVA	162
Abb. 9.1: Kabelsystem mit direkter Zusatzkühlung – Schema	178
Abb. 9.2: Aufbau einer Standard-Kühlanlage – Schema	179
Abb. 9.3: Abmessungen einer Kühlanlage für eine Kühlleistung von 1,4 MW	180
Abb. 9.4: Minimaltrasse mit direkter Zusatzkühlung von 2 Kabelsystemen und 1 Reservekabel in Einebenenordnung	182
Abb. 9.5: Minimaltrasse in 2 Kabelgräben mit indirekter Zusatzkühlung der Kabel	183
Abb. 9.6: Einebenenordnung von zwei 380-kV-Kabelsystemen mit Reservekabel	184
Abb. 9.7: Redundanzverhalten zweier 380-kV-Kabelsysteme mit Reservekabel und störungsorientierter Zusatzkühlung der Kabel bei Verlegung in Einebenenordnung	185
Abb. 9.8: Leitertemperaturen des verbleibenden 380-kV-Kabelsystems nach Ausfall eines Systems	187
Abb. 9.9: Einebenenordnung von zwei 380-kV-Kabelsystemen mit Reservesystem	188
Abb. 9.10: Mantelrohrverlegung von zwei 380-kV-Kabelsystemen mit Reservekabel	188
Abb. 9.11: Redundanzverhalten zweier Kabelsysteme mit Reservekabeln und störungsorientierter Zusatzkühlung bei Verlegung in Mantelrohren	189
Abb. 9.12: PowerTubes-Kabelanlage mit 2 Kabelsystemen und 1 Reservesystem	190
Abb. 9.13: PowerTubes-Kabelanlage mit 2 Kabelsystemen und 1 Reservesystem im Leitungsgang	191
Abb. 9.14: Erhöhung der Übertragungsleistung von zwei 380-kV-Kabelsystemen durch Zusatzkühlung der Kabel	193
Abb. 9.15: Übertragungsleistung von zwei 380-kV-Kabelsystemen im Leitungsgang ohne Zusatz-Wasserkühlung als Funktion der höchsten Lufttemperatur	194
Abb. 9.16: Übertragungsleistung eines 380-kV-Kabelsystems im Leitungsgang mit Zusatzkühlung als Funktion der höchsten Kühlwassertemperatur	195
Abb. 9.17: Erhöhung der Strombelastbarkeit von zwei 380-kV-Kabelsystemen durch Zusatzkühlung	196
Abb. 9.18: Stationäre Strombelastbarkeiten von zwei 380-kV-Kabelsystemen, ohne Zusatzkühlung der Kabel	198
Abb. 9.19: Erwärmungsverhalten ohne Zusatzkühlung der Kabel nach einem Lastsprung	199

Abb. 9.20: Zeitlicher Verlauf der höchsten Leitertemperatur nach lang andauernder TSO B-Normalbetriebslast von 2*1.641 MVA und Lastsprung auf 2*2.369 MVA.....	200
Abb. 9.21: Stationäre Strombelastbarkeit eines 380-kV-Kabels als Funktion der höchsten Kühlwassertemperatur	201
Abb. 9.22: Differenz der Wassertemperatur als Funktion des Laststroms für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten des Kühlwassers	202
Abb. 9.23: Stationäre Strombelastbarkeiten von zwei 380-kV-Kabelsystemen mit indirekter Zusatzkühlung der Kabel als Funktion der höchsten Kühlwassertemperatur.....	203
Abb. 9.24: Leitungsgang mit 2 Kabelsystemen mit jeweils 1 Reservekabel.....	205
Abb. 9.25: Strombelastbarkeit jedes der beiden Kabelsysteme im Leitungsgang wie in Abb. 9.24 als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit der Luft	206
Abb. 11.1: Bau der Kabeltrasse in Raesfeld.....	232
Abb. 11.2: Zeitverlauf der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen bei einer ungestörten Bodentemperatur von 15°C.....	236
Abb. 11.3: Jahreszeitlicher Verlauf der Bodentemperaturen in unterschiedlichen Tiefen.....	237
Abb. 11.4: Horizontale Verteilungen der magnetischen Induktion in 1,0 m Höhe über dem Erdboden für einen Gesamtstrom von 3.849 A (2.533 MVA)	240
Abb. 11.5: Drei Einleiterkabel mit an den Enden kurzgeschlossenen Kompensationsleitern.....	241
Abb. 11.6: Kompensationsleiter im Muffenbereich einer Kabelanlage	242
Abb. 11.7: Muffenbereich mit Kompensationsleitern	242
Abb. 11.8: Stahlrohrkapselung eines Kabelsystems zur Magnetfeldschirmung	243
Abb. 11.9: Verteilung der relativen Permeabilität im Stahlrohr.....	244
Abb. 11.10: Höchste Leitertemperatur als Funktion des Achsabstandes mit und ohne Stahlrohr	245
Abb. 11.11: Canaletta-Verlegung von Erdkabeln	245
Abb. 11.12: Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion in 0,2 m Höhe über dem Erdboden	246
Abb. 11.13: Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion an der Erdoberfläche oberhalb zweier begehbare Leitungsgänge.....	248
Abb. 12.1: Investitionskosten für unterschiedlich lange Teilverkabelungen von zwei 380-kV-Drehstromfreileitungssystemen bei unterschiedlichen Kabelausführungen.....	258
Abb. 12.2: Investitionskosten einer 55 km bzw. 65 km langen 380-kV-Leitung für unterschiedliche Kabelausführungen und Kabelanteile.....	260
Abb. 12.3: Vergleich der Gesamtkosten für unterschiedlich lange Teilverkabelungen von zwei 380-kV-Freileitungssystemen	267
Abb. 12.4: Kostenstruktur für unterschiedlich lange Teilverkabelungen von zwei 380-kV-Freileitungssystemen....	268
Abb. 12.5: Mehrkosten bei unterschiedlichen Kabelanteilen an der Trassenlänge.....	270
Abb. 12.6: Mehrkosten einer Teilverkabelung von 2 km bzw. 20 km bezogen auf unterschiedliche Trassenlängen	272
Abb. 13.1: Aufbau eines 525-kV-VPE-Gleichstromkabels	275
Abb. 13.2: Prüfaufbau für ein 525-kV-Gleichstromkabel	275
Abb. 13.3: Thermischer Grenzstrom und Temperaturdifferenz über der elektrischen Isolierung als Funktion der Kabeloberflächentemperatur	278
Abb. 13.4: Innen- und Außenfeldstärken, Leitertemperatur und Temperaturdifferenz über der elektrischen Isolierung als Funktionen der Kabeloberflächentemperatur.....	279
Abb. 13.5: Thermischer Grenzstrom und Feldstärke-Grenzstrom als Funktion der Kabeloberflächentemperatur ...	281
Abb. 13.6: Zwei 525-kV-Gleichstromkabelsysteme mit Rückleitern in zwei getrennten Gräben.....	283
Abb. 13.7: Zwei 525-kV-Gleichstromkabelsysteme mit Rückleitern im gemeinsamen Graben.....	284
Abb. 14.1: Strombelastbarkeiten von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen unterschiedlicher Legeanordnungen.....	288
Abb. 14.2: Strombelastbarkeit eines 525-kV-Gleichstromkabelsystems im Leitungsgang als Funktion der höchsten Luftauslassttemperatur $\theta_{L,out}$	290
Abb. 14.3: Thermischer Grenzstrom und Feldstärke-Grenzstrom für unterschiedliche höchstzulässige Temperaturdifferenzen als Funktion der Legetiefe.....	292
Abb. 14.4: Erwärmung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln durch 110-kV-Kabel – Schema.....	293

Abb. 14.5: Erwärmung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln durch eine Fernwärmeleitung – Schema294

Abb. 14.6: Erwärmung von Gleichstrom-Höchstspannungskabeln durch eine Fremdwärmequelle
in Abhängigkeit vom Abstand294

Abb. 14.7: Thermischer Grenzstrom und Feldstärke-Grenzstrom als Funktion der Legetiefe295

Abb. 14.8: Thermischer Grenzstrom und Feldstärke-Grenzstrom für unterschiedliche höchstzulässige
Kabelerwärmungen als Funktion der Kabeloberflächentemperatur296

Abb. 14.9: Mögliche Belastbarkeitssteigerungen von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen
durch Zusatzkühlung297

Abb. 15.1: Leistungsgestufte Nichtverfügbarkeiten von einem 750 km langen
525-kV-Gleichstromkabelsystem in Abhängigkeit der Auslegung303

Abb. 15.2: Legeanordnungen von 2 Gleichstromkabelsystemen mit Reservekabel305

Abb. 15.3: 2 Gleichstromkabelsysteme mit je 1 Reservekabel in 2 Mantelrohren306

Abb. 15.4: 2 Gleichstromkabelsysteme mit 2 Rückleitern und 1 Reservekabel im Mantelrohr306

Abb. 15.5: Leitungsgang mit 2 Gleichstromkabelsystemen, 1 Reservekabel und 2 Rückleiterkabel307

Abb. 15.6: Verringerung der Nichtverfügbarkeit eines 525-kV-Gleichstromkabelsystems durch Reservekabel309

Abb. 15.7: Nichtverfügbarkeit eines 525-kV-Gleichstromkabelsystems für unterschiedliche interne Fehler
und Kabellieferlängen311

Abb. 15.8: Verringerung der Nichtverfügbarkeiten von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen durch
Reservekabel (PowerTubes)312

Abb. 15.9: Nicht übertragbare Energie und Energieverlustkosten von einem 525-kV-Gleichstromkabelsystem
für unterschiedliche Auslegungen314

Abb. 15.10: Nicht übertragbare Energie und Energieverlustkosten von
zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen für unterschiedliche Auslegungen316

Abb. 16.1: Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion an der Erdoberfläche für
zwei 525-kV-Gleichstromkabelsysteme im gemeinsamen Graben321

Abb. 16.2: Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion an der Erdoberfläche für
zwei 525-kV-Gleichstromkabelsysteme in Mantelrohren322

Abb. 17.1: Investitionskosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für unterschiedliche Trassenlängen,
Konverterkosten 250 €/kW332

Abb. 17.2: Investitionskosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für unterschiedliche Trassenlängen,
Konverterkosten 100 €/kW333

Abb. 17.3: Kostenstruktur von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für unterschiedliche Konverterkosten342

Abb. 17.4: Kostenvergleich von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für Trassenlängen bis 1.000 km,
Konverterkosten 250 €/kW343

Abb. 17.5: Kostenvergleich von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für Trassenlängen bis 1.000 km,
Konverterkosten 100 €/kW345

Liste der Tabellen

Tab. 1.1: Installierte Kraftwerksleistung in Deutschland 2017 und Ausbauziele bis 2035 25

Tab. 1.2: Benötigte elektrische Leistung in Deutschland 2017 und Prognosen bis 2035 26

Tab. 1.3: Stromproduktion der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke in Deutschland
2017 und Prognosen bis 2035 28

Tab. 1.4: Auslastung der EE-Kraftwerke und der konventionellen Kraftwerke in Deutschland
2017 und Prognosen bis 2035 29

Tab. 1.5: Installierte Leistung von Photovoltaik- und Windkraftwerken in Deutschland 2015 bis 2018 31

Tab. 1.6: Installierte Leistung bezogen auf die benötigte Leistung 2017 und Prognosen bis 2035 39

Tab. 1.7: Maßnahmen zum Ausgleich von benötigter und verfügbarer Leistung 41

Tab. 2.1: Stromkreislänge von Freileitungen und Kabeln in Deutschland 2016 47

Tab. 2.2: Übertragungsleistungen von Freileitungen und Kabeln 49

Tab. 2.3: Trassenlänge von Höchstspannungsleitungen 2018 und geplanter Netzausbau bis 2030
laut Netzentwicklungsplan 58

Tab. 3.1:	Reduzierung des Netzausbaus durch Abregelung von Einspeisespitzen für unterschiedliche Kabelanteile.....	73
Tab. 3.2:	Aufwandsverringerungen und abzuregelnde Energien für unterschiedliche Normalbetriebshöchstlasten von zwei 380-kV-Kabelsystemen	77
Tab. 4.1:	Vergleich der Maßnahmen zum Ausgleich von benötigter und zulässiger Übertragungsleistung.....	93
Tab. 5.1:	Kenngrößen von 380-kV-Kabeln im Vergleich zu 380-kV-Freileitungen.....	100
Tab. 5.2:	Vor- und Nachteile der Legung der Kabel in Schutzrohren	112
Tab. 5.3:	Legeanordnungen und Bauverfahren für Drehstromkabelanlagen.....	113
Tab. 5.4:	Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Materialien.....	116
Tab. 6.1:	Aspekte von PowerTubes-Kabelsystemen hinsichtlich Akzeptanz und technischer Umsetzung	131
Tab. 7.1:	Übertragungsanforderungen zweier Übertragungsnetzbetreiber.....	143
Tab. 7.2:	Übertragungsleistungen eines 380-kV-Drehstromkabelsystems im Vergleich zu einem 380-kV-Drehstromfreileitungssystem	147
Tab. 7.3:	Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit 2.500 mm ² -Kupferleitern für unterschiedlich dichte Kabellegung	149
Tab. 7.4:	Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit verlustoptimierten 3.500 mm ² -Kupferleitern	152
Tab. 7.5:	Übertragungsleistungen von 380-kV-Drehstromkabeln mit verlustoptimierten 3.500 mm ² -Kupferleitern, Rohre wassergefüllt	153
Tab. 7.6:	Übertragungsleistungen von zwei 380-kV-Kabelsystemen bei Berücksichtigung der Leitungsauslastung	158
Tab. 7.7:	Längenabhängige Blindströme und übertragbarer Wirkstrom bei unkompensiertem 380-kV-Kabel	161
Tab. 7.8:	Längenabhängige Blindströme und übertragbarer Wirkstrom bei beidseitig kompensiertem 380-kV-Kabel.....	163
Tab. 8.1:	Ausfallraten von Drehstromkabeln (66 kV bis 500 kV) nach CIGRE.....	166
Tab. 8.2:	Nichtverfügbarkeit eines 10 km langen 380-kV-Drehstromkabelsystems für unterschiedliche Auslegungsvarianten	173
Tab. 8.3:	Nichtverfügbarkeit mindestens eines Systems eines 10 km langen 380-kV-Drehstromkabelsystemes für unterschiedliche Auslegungsvarianten	174
Tab. 10.1:	Stationäre Übertragungsleistung von 380-kV-Drehstromkabelsystemen.....	216
Tab. 10.2:	Obergrenzen für die wegen Abregelung bei Normalbetrieb nicht übertragbare Energie eines 10 km langen 380-kV-Drehstromkabelsystemes	218
Tab. 10.3:	Obergrenzen für die wegen Abregelung bei Störung in der betrachteten Kabeltrasse nicht übertragbare Energie eines 10 km langen 380-kV-Drehstromkabelsystemes.....	223
Tab. 10.4:	Mindestens zulässige Verkabelung durch Minimaltrassen mit Abregelung von Einspeisespitzen bei 6.000 km Netzausbau	227
Tab. 12.1:	Investitionskosten für Kabelmaterial und Kabelverlegung von 380-kV-VPE-Drehstromkabeln (Schätzung).....	251
Tab. 12.2:	Trassenkosten für unterschiedliche Kabelsysteme	253
Tab. 12.3:	Kosten für Übergangsbauwerke für unterschiedliche Kabelsysteme	254
Tab. 12.4:	Investitionskosten für unterschiedlich lange Teilverkabelungen von zwei 380-kV-Drehstromfreileitungssystemen bei unterschiedlichen Kabelausführungen.....	257
Tab. 12.5:	Verluste und Verlustkosten einer Teilverkabelung von zwei 380-kV-Freileitungssystemen für unterschiedliche Auslegungen.....	264
Tab. 12.6:	Gesamtkosten für unterschiedlich lange Teilverkabelungen von zwei 380-kV-Freileitungssystemen	266
Tab. 13.1:	Legeanordnungen und Bauverfahren für Gleichstromkabelanlagen.....	285
Tab. 14.1:	Übertragungsleistungen von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen, Kabel verlegt in offener Bauweise	287
Tab. 15.1:	Eckdaten eines 750 km langen 525-kV-Gleichstromkabelsystems	301
Tab. 15.2:	Ausfallhäufigkeiten eines 525-kV-Gleichstromkabels bei einer Trassenlänge von 750 km	302
Tab. 17.1:	Investitionskosten für Kabel, Garnituren und Verlegung von 525-kV-Gleichstromkabeln (Schätzung).....	324
Tab. 17.2:	Trassenkosten von zwei 525-kV-Gleichstromkabelsystemen.....	325

Tab. 17.3: Investitionskosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen ohne Berücksichtigung von Konverterkosten	328
Tab. 17.4: Investitionskosten von Konvertern	330
Tab. 17.5: Investitionskosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen mit Berücksichtigung von Konverterkosten	331
Tab. 17.6: Verluste und Verlustkosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen für unterschiedliche Belastungsgrade	336
Tab. 17.7: Verluste und Verlustkosten von Konvertern für unterschiedliche Belastungsgrade.....	337
Tab. 17.8: Gesamtkosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen, Konverterkosten 250 €/kW	339
Tab. 17.9: Gesamtkosten von zwei 525-kV-Gleichstromsystemen, Konverterkosten 100 €/kW	340