

Inhalt

1	Einleitung	19
2	Kabel	25
2.1	Netzsituation und Entwicklung der Stromkreislängen	26
2.2	Vergleichende Betrachtung einiger Eigenschaften von Kabeln und Freileitungen	28
2.2.1	Elektrische Kennwerte von Kabeln und Freileitungen	29
2.2.2	Übertragbare Leistungen und Blindleistungsverhalten	30
2.3	Verwendung der Kabel und Zuordnung zu den Netzen	31
2.4	Beanspruchung der Starkstromkabel im Betrieb	33
2.4.1	Spannungsbeanspruchung der Isolierung	33
2.4.2	Beanspruchung der Isolierung durch Teilentladungen	36
2.4.3	Thermische Beanspruchung der Isolierung durch Ströme und Strombelastbarkeit	36
2.4.3.1	Normative Festlegung der Bemessungswerte für die zulässige Kabelbelastung	36
2.4.3.2	Beanspruchung im ungestörten Betrieb	38
2.4.3.3	Beanspruchung im Kurzschlussfall	39
2.4.3.4	Reduzierung der Belastbarkeit	41
2.4.3.5	Ausnutzung der Belastbarkeitsreserven	42
2.4.3.6	Belastung im Kurzzeitbereich	45
2.4.3.7	Gezielte Überlastung im Notbetrieb	45
2.5	Aufbauelemente von Starkstromkabeln	46
2.5.1	Leiter	50
2.5.1.1	Leiterwerkstoffe	50
2.5.1.2	Leiterformen	51
2.5.1.3	Leiterbezeichnungen	53
2.5.2	Isolierung	53
2.5.2.1	Anforderungen an Kabelisolierungen	54
2.5.2.2	Imprägnierte Papierisolierungen	56
2.5.2.3	Kunststoffisolierung	58
2.5.2.4	Vergleich der Isolierstoffe	63
2.5.3	Innere und äußere Leitschicht	64
2.5.4	Schirm und konzentrischer Leiter	66
2.5.4.1	Schirm	66

2.5.4.2	Konzentrischer Leiter	66
2.5.5	Mantel	66
2.5.5.1	Kunststoffmantel	67
2.5.5.2	Metallmantel	67
2.5.6	Bewehrung	68
2.5.7	Schutzhülle	69
2.5.8	Weitere Kabelbauelemente	69
2.5.8.1	Zwickelfüllung	69
2.5.8.2	Aufpolsterelemente	70
2.5.8.3	Elemente zur Herstellung der Längs- und Querwasserdichtheit	70
2.6	Alterung von Starkstromkabeln	70
2.6.1	Alterungsprozesse in Papierisolierungen	71
2.6.2	Alterungsprozesse in Kunststoffisolierungen	72
2.6.2.1	Electrical tree	73
2.6.2.2	Water tree	74
2.6.2.3	Electrochemical tree	76
2.6.3	Teilentladungen	79
2.7	Kabelbauarten	81
2.7.1	Übersicht der Bauarten	81
2.7.2	Niederspannungskabel	83
2.7.3	Mittelspannungskabel	85
2.7.4	Hochspannungskabel	88
2.7.4.1	Niederdruck-Ölkabel	89
2.7.4.2	Gasinnendruckkabel	90
2.7.4.3	Gasaußendruckkabel	91
2.7.4.4	Kunststoffisoliertes Kabel	92
2.7.5	Höchstspannungskabel	94
2.7.5.1	Standardausführungen	94
2.7.5.2	ausgeführte Höchstspannungskabelanlagen	96
2.7.6	Kabel für spezielle Anwendungen	102
2.7.6.1	Seekabel	102
2.7.6.2	Kabel mit Lichtwellenleitern im Schirmbereich	103
2.7.6.3	Kabel mit verbessertem Verhalten im Brandfall	104
2.7.6.4	Kabel für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)	104

2.7.7	Möglichkeiten zur Erhöhung der Belastbarkeit bei Hochleistungskabeln	105
2.7.7.1	Thermisch stabilisiertes Bettungsmaterial	107
2.7.7.2	Zwangskühlung	109
2.7.7.3	Gasisolierung	111
2.7.7.4	Supraleitung	111
2.7.8	Kurzzeichen	113
2.8	Kabeldaten	115
3	Kabelgarnituren	117
3.1	Begriffsdefinitionen	118
3.2	Grundelemente der Kabelgarnituren	119
3.2.1	Leiterverbindungen	119
3.2.2	Isolierungen, Feldsteuerelemente und Schutzhüllen	125
3.3	Montagetechniken bei Kabelgarnituren	127
3.3.1	Wickeltechnik	127
3.3.2	Vergusstechnik	128
3.3.3	Gießharztechnik	129
3.3.4	Schrumpftechnik	131
3.3.5	Aufschiebtechnik	132
3.4	Ausführungen von Kabelgarnituren	133
3.4.1	Muffen	133
3.4.1.1	Verbindungsmuffen	133
3.4.1.2	Übergangsmuffen	134
3.4.1.3	Abzweigmuffen	136
3.4.2	Endverschlüsse	137
3.4.2.1	Endverschlüsse für Massekabel	138
3.4.2.2	Endverschlüsse für Kunststoffkabel	140
3.4.3	Garnituren in Stecktechnik	142
3.4.3.1	Stecktechnik im Niederspannungsnetz	142
3.4.3.2	Stecktechnik im Mittelspannungsnetz	143
3.4.3.3	Stecktechnik im Hochspannungsnetz	146
4	Errichten der Kabelanlage	150
4.1	Projektierung und Genehmigungsverfahren	150

4.1.1	Festlegen der Trasse	151
4.1.2	Anordnung der Kabel	153
4.1.3	Näherungen und Kreuzungen mit anderen Anlagen	157
4.1.4	Behördliche Genehmigung, Wegenutzung	159
4.1.5	Projektplan	161
4.1.6	Bodenuntersuchung	162
4.1.7	Information Dritter	163
4.1.8	Koordinierung mit anderen Baumaßnahmen	164
4.1.9	Abstimmung mit Behörden bei Arbeiten im Verkehrsraum	164
4.1.10	Ausschreibung und Vergabe der Kabellegungsarbeiten	165
4.2	Vorarbeiten und Baustelleneinrichtung	167
4.2.1	Erkundigungspflicht	168
4.2.2	Verkehrssicherung	168
4.3	Kabelgraben	169
4.3.1	Feststellen des Zustands vorhandener Oberflächen	169
4.3.2	Legetiefe, Mindestüberdeckung und Grabenbreite	170
4.3.3	Herstellen des Kabelgrabens	174
4.3.3.1	Entfernen des Oberbaus	174
4.3.3.2	Aushub	174
4.3.3.3	Entsorgung	178
4.3.4	Verfüllen des Kabelgrabens	178
4.3.5	Wiederherstellung von Oberflächen	179
4.3.6	Einbau der Durchzüge	179
4.3.7	Kabel in der Nähe von Bäumen	181
4.3.8	Prüfung der Verdichtung bei Kabelgräben	183
4.4	Behandlung der Kabel bei der Legung	183
4.4.1	Biegeradius und Kabeltemperatur	184
4.4.2	Kabellagerung und -transport	186
4.4.3	Kabelkontrolle	188
4.4.4	Auslegen und Ziehen der Kabel	188
4.4.5	Übertragung der Zugkräfte	195
4.4.6	Zulässige Zugkräfte	196
4.4.7	Schutz der Kabel gegen Beschädigung	197
4.4.8	Wanddurchführungen	198
4.4.9	Ausbau von Kabeln	200

4.5	Sonderbauweisen und mechanisierte Kabellegung	201
4.5.1	Fräsen von Kabelgräben	202
4.5.2	Einflügen von Kabeln	203
4.5.3	Saugbagger	207
4.5.4	Grabenlose Kabellegung	207
4.5.4.1	Verfahren mit ungesteuertem Vortrieb	208
4.5.4.2	Verfahren mit gesteuertem Vortrieb	209
4.5.4.3	Überbohrverfahren	214
4.6	Sonderfälle der Kabellegung	215
4.6.1	Legen durch Gewässer	215
4.6.2	Legen in Brücken	216
4.6.3	Legen in Gebäuden	218
4.6.3.1	Befestigung	218
4.6.3.2	Vorbeugende Brandschutzmaßnahmen	220
4.6.4	Isolierte Freileitung	221
4.6.5	Legen in Gefällstrecken	224
4.7	Legen von Hoch- und Höchstspannungskabeln	225
4.7.1	Kabel mit Papierisolierung	227
4.7.2	Kabel mit VPE-Isolierung	228
4.8	Montage der Abschluss- und Verbindungstechnik	228
4.9	Dokumentation	230
4.9.1	Grundlagen	230
4.9.2	Digitale Netzdokumentation	232
5	Qualitätssicherung	235
5.1	Qualität der Kabel und Garnituren	236
5.1.1	Prüfbestimmungen für Kabel und Garnituren in der Normung .	239
5.1.1.1	Prüfbestimmungen für Kabel	239
5.1.1.2	Prüfbestimmungen für Garnituren	241
5.1.1.3	Prüfbestimmungen für Verbinder in Garnituren	242
5.2	Qualitätsanforderungen an die Beschaffenheit der Kabel und Garnituren	242
5.2.1	Auswahl geeigneter Hersteller	243
5.2.2	Ausschreibung und Auftragsvergabe	244

5.2.3	Abnahme von Lieferungen beim Hersteller und Waren-eingangsprüfung	246
5.3	Behandlung der Kabel und Garnituren bei Transport und Lagerung, Legung und Montage sowie im Betrieb	248
5.3.1	Transport und Lagerung	248
5.3.2	Legung und Montage	249
5.3.3	Betrieb	251
5.4	Prüfung und Diagnose von Kabelanlagen	252
5.4.1	Inbetriebnahmeprüfung	252
5.4.1.1	Inbetriebnahmeprüfung an Niederspannungskabel	252
5.4.1.2	Inbetriebnahmeprüfung an Mittelspannungskabel	253
5.4.1.3	Inbetriebnahmeprüfung an Hoch- und Höchstspannungskabel	255
5.4.2	Diagnose	256
5.5	Sanierung water-tree-geschädigter Mittelspannungskabel	256
6	Arbeitssicherheit und Umweltschutz	259
6.1	Arbeitssicherheit	259
6.1.1	Unfallverhütung bei Bauarbeiten	260
6.1.2	Die fünf Sicherheitsregeln	260
6.1.3	Sicherheitsmaßnahmen an der Arbeitsstelle	261
6.1.4	Arbeiten unter Spannung	263
6.1.4.1	Gesetzliche Grundlagen	263
6.1.4.2	TOP-Prinzip	267
6.1.5	Nichtstationäre Prüfanlagen	269
6.2	Umweltschutz	270
6.2.1	Trassierung, Eingriff in die Natur	270
6.2.2	Boden- und Gewässerschutz	271
6.2.3	Energiebilanz	273
6.2.4	Recycling	273
6.2.5	Elektrische und elektromagnetische Felder	275
7	Ortung von Kabeln und Fehlerstellen	277
7.1	Kabelortung	277
7.1.1	Kabeltrassensuche	278

7.1.2	Kabelauslese	281
7.1.2.1	Kabelauslese mit Tonfrequenz	282
7.1.2.2	Kabelauslese mit Gleichstromimpulsen	283
7.1.2.3	Phasenbestimmung an Mittelspannungskabeln	284
7.2	Fehlerortung	284
7.2.1	Vorortung von Kabelfehlern	287
7.2.1.1	Reflexionsverfahren	287
7.2.1.2	Messverfahren für hochohmige Fehler	291
7.2.1.3	Messverfahren mit automatischer Wiederzuschaltung	296
7.2.2	Nachortung von Kabelfehlern	298
7.2.2.1	Tonfrequenzverfahren	298
7.2.2.2	Stoßspannungsverfahren	301
7.2.3	Ortung von Mantelfehlern mit dem Schrittspannungsverfahren	302
7.2.4	Vorgehensweise bei der Fehlerortung	305
7.3	Einzelgeräte zur Fehlerortung	306
7.4	Kabelmesswagen	307
7.4.1	Fahrzeug	307
7.4.2	Einrichtung	309
7.4.3	Anschluss des Kabelmesswagens	311
8	Diagnoseverfahren zur Zustandsbewertung von Mittelspannungskabelnetzen	313
8.1	Dielektrische Diagnoseverfahren	313
8.1.1	Diagnose auf Basis der Verlustfaktormessung ($\tan\delta$ -Messung)	314
8.1.2	Diagnose im Zeitbereich	317
8.1.2.1	Diagnose auf Basis Wiederkehrspannungsmessung (RVM) . .	318
8.1.2.2	Diagnose auf Basis Relaxationsstrommessung (IRC-Analyse) .	320
8.2	Teilentladungsdiagnose	323
8.2.1	Prämissen der TE-Diagnose vor Ort	326
8.2.2	Erzeugung der Prüfspannung für die TE-Diagnose vor Ort . .	327
8.2.3	Auswertung von TE-Messungen	339
9	Statistische Auswertung des Störungs- und Schadensgeschehens	333
9.1	FNN-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik	334

9.2	VDEW-Umfrage zur Schäden an VPE-isolierten Mittelspannungskabeln	335
9.3	FNN-Erfassungsschema C (Schäden)	339
9.4	Betriebsmittelstatistik	340
10	Instandhaltung der Kabelanlage	343
10.1	Hintergrund	343
10.2	Neue Norm für die Instandhaltung	343
11	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen – Investitionsrechnung	347
11.1	Berechnungsmethoden	347
11.1.1	Jahreskostenmethode (Annuitätenmethode)	348
11.1.2	Kapitalwertmethode (Barwertmethode)	349
11.1.3	Bewertung der Jahreskosten- und der Barwertmethode	350
11.1.4	Kumulationsmethode	351
11.2	Anwendungsfälle	354
11.2.1	Freileitung oder Kabel	354
11.2.2	Vorinvestitionen	354
11.2.3	Wirtschaftlicher Kabelquerschnitt	355
11.3	Berechnungsbeispiele	357
11.3.1	Kabel oder Freileitung im Mittelspannungsnetz	357
11.3.2	Mitlegung eines Niederspannungskabels, Verrohrung und nachträgliches Einziehen oder spätere getrennte Legung	359
12	Neue Kabeltechnologien	361
12.1	Gasisolierte Leitungen (GIL)	361
12.2	Anwendung von Hochtemperatur-Supraleitern in Stromnetzen	363
12.2.1	Allgemeines	363
12.2.2	Eigenschaften der Supraleiter	364
12.2.3	Anwendungsmöglichkeiten der Supraleiter	365
12.2.4	Wirtschaftlichkeit der Supraleiter	368
12.2.5	Pilotprojekt „AmpaCity“ in Essen	371

13	Vorschriften und Normung	379
13.1	Nationale Normung	381
13.1.1	DKE K411	382
13.1.2	DKE UK411.1 Starkstromkabel	382
13.1.3	DKE UK411.3 Starkstromkabelgarnituren	383
13.2	Zusammenhang zwischen nationaler, europäischer und internationaler Normung	384
13.3	Harmonisierung der Normung in Europa	387
13.4	Normenkonformität	392
13.5	Materialcharakteristik der Isolierwerkstoffe	395
13.6	Verbindertechnologien in Garnituren	396
13.7	Meilensteine in der Kabelnormung	397
14	Anhang	407
14.1	Beispiele für Kabeldaten	407
14.2	Beispiele zur Beurteilung der Kurzzeitbelastbarkeit von Kabeln	413
14.2.1	Randbedingungen für die Berechnung	414
14.2.2	Vorlaststrom und Tageslastspiel	414
14.2.3	Belastbarkeit und Kurzzeitlastfaktoren	416
14.2.4	Beispiel für die Anwendung der Diagramme	416
14.3	Faktoren für Wirtschaftlichkeitsberechnungen	423
14.4	Normen und Richtlinien	427
14.4.1	DIN VDE-, DIN EN-, DIN IEC-Normen (als VDE-Bestimmungen klassifiziert)	429
14.4.2	DIN-Normen	438
14.4.3	IEC-Normen	441
14.4.4	Sonstige Normen	447
14.4.5	Sonstige Richtlinien	447
15	Schrifttum	453
16	Bilder und Tabellenverzeichnis	465
16.1	Bilder	465
16.2	Tabellen	472

17	Abkürzungsverzeichnis	475
18	Stichwortverzeichnis	479
19	Autorenverzeichnis	493