

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I <u>Aufgabenstellung und Abgrenzung</u>	1
I.1 Abgrenzung	3
I.2 Allgemeine Problembeschreibung	5
II <u>Hochspannungskabel mit natürlicher Kühlung</u>	7
II.1 Ersatzschaltbilder und Gleichungssysteme zur Belastbarkeitsberechnung	13
II.2 Verluste	18
II.2.1 Verlustberechnung nach IEC 287	20
II.2.1.1 Leiterverluste	20
II.2.1.2 Dielektrische Verluste	23
II.2.1.3 Mantel- und Schirmverluste	23
II.2.1.4 Verluste in Bewehrungen und Stahlrohren	25
II.2.2 Analytische Berechnung stromabhängiger Verluste	43
II.2.2.1 Ausgangsgleichungen zur Berechnung von Wirbelstromverteilungen achsparalleler, kreiszylinderförmiger Mehrleitersysteme	44
II.2.2.2 Koaxiale Mehrleitersysteme	47
II.2.2.2.1 Leiter ohne Hohlkanal	48
II.2.2.2.2 Leiter mit Hohlkanal	49
II.2.2.3 Achsparallele Mehrleitersysteme	51
II.2.3 Teilleiterverfahren	56
II.2.3.1 Prinzip des Teilleiterverfahrens	56
II.2.3.2 Impedanzbeläge der Teilleiterschleifen	61
II.2.3.3 Rechenaufwand und Fehler beim Teilleiterverfahren	62
II.2.4 Rückwirkungsverfahren	65
II.2.4.1 Erregung von Wirbelstromverteilungen in räumlich ausgedehnten Leitern durch Linienleiter-Ströme	65
II.2.4.2 Entwicklung des Verfahrens	68
II.2.4.3 Überprüfung des Rückwirkungsverfahrens	75
II.2.4.4 Berechnung der Längsimpedanzbeläge	80
II.2.4.5 Einfluß des Erdreiches auf die Längsimpedanzbeläge von Hochspannungskabeln	81
II.2.4.6 Anwendungsbeispiel: Kabelverluste durch Mantel-Längsströme	82
II.2.4.7 Folgerungen zum Rückwirkungsverfahren	85
II.2.5 Dielektrische Verluste	86
II.3 Thermische Felder und thermische Widerstände	92
II.3.1 Thermische Widerstände in Kabeln	94
II.3.2 Thermische Felder und thermische Widerstände des Erdbodens	103
II.3.2.1 Problemstellung	105
II.3.2.2 Wärmeübertragungsbedingungen im thermisch belasteten Boden	105

II.3.2.2.1	Temperaturverteilung im thermisch unbeeinflussten Boden	106
II.3.2.2.2	Feuchteverteilung im thermisch unbeeinflussten Boden	107
II.3.2.2.3	Physikalisch-mathematisches Modell der Bodenaustrocknung	110
II.3.2.2.3.1	Wassertransport	110
II.3.2.2.3.2	Wasserdampf-Transport	113
II.3.2.2.3.3	Kombinierter Transport von flüssigem Wasser und von Wasserdampf	114
II.3.2.2.3.4	Wärmeübertragung	115
II.3.2.2.3.5	Feldgleichungen des gekoppelten Wärme- und Feuchte-Transportes	116
II.3.2.2.4	Kenntnisstand über die Bodeneigenschaften	118
II.3.2.2.4.1	Korngrößenverteilung und Verdichtbarkeit	118
II.3.2.2.4.2	pF-Kennlinie	120
II.3.2.2.4.3	Hydraulische Permeabilität	121
II.3.2.2.4.4	Thermische Leitfähigkeit	122
II.3.2.2.4.5	Spezifische Wärmekapazität des Bodens	125
II.3.2.2.4.6	Diffusionskoeffizienten	125
II.3.2.2.4.7	Vereinfachungen für die Beschreibung des Transientvorganges	129
II.3.2.2.5	Bodenaustrocknung bei Dauerlast	130
II.3.2.2.5.1	Wärmeleitpotential-Verfahren	136
II.3.2.2.5.1.1	Beliebige Bodeneigenschaften	137
II.3.2.2.5.1.2	Vereinfachte Darstellung der Bodeneigenschaften	138
II.3.2.2.5.1.3	Zweischichtenmodell	148
II.3.2.3	Berechnung der thermischen Widerstände und Felder	153
II.3.2.3.1	Berechnung nach IEC-Publikation 287	155
II.3.2.3.2	Berechnung nach dem Zweischichtenmodell	158
II.3.2.3.3	Feldberechnungen	159
II.3.2.3.4	Fehlergrößen beim Spiegelungsverfahren	165
II.3.2.3.4.1	Annahme koaxialer Linienquellen	166
II.3.2.3.4.2	Ersatzdarstellung der Kabel durch nur eine Linienquelle	167
II.4	Bestimmung der Belastbarkeit	171
II.4.1	Ein einzelnes Kabel	171
II.4.2	Ein mehradriges Kabel	173
II.4.3	Einleiter-Drehstromkabel	173
II.4.4	Belastbarkeiten gehäuft verlegter Energiekabel	176
II.4.5	Natürlicher Temperaturgradient im Boden	184
II.4.6	Belastbarkeitsberechnung für Kreuzungen von Kabeltrassen	195
II.4.6.1	Differentialgleichung	195
II.4.6.2	Lösungsverfahren	200
II.4.6.3	Rückwirkungsfreie Beeinflussung durch ein kreuzendes Kabel	207
II.4.6.4	Allgemeiner Fall von Häufung und Rückwirkung im Kreuzungsbereich	208

II.4.6.5	Kreuzende Fernheizleitung	211
II.4.6.6	Anwendungsbeispiel	212
II.4.7	Kabelbelastbarkeits-Reduktionen durch thermisch ungünstige Trassenbereiche	217
II.4.7.1	Berechnungsmethode	217
II.4.7.2	Auswertung	223
II.4.7.3	Verlegung unterhalb wärmedämmender Schichten	228
II.4.7.3.1	Einfluß der Straßenbreite	229
II.4.7.3.2	Einfluß der Lage des Kabels	231
II.4.7.4	Thermisch ungünstige Grabenfüllungen	233
II.4.7.5	Durchquerung eines thermisch ungünstigen Bodenbereiches	233
II.4.7.6	Folgerungen	237
II.4.8	Belastbarkeitsberechnung für rohrverlegte Energiekabel	238
II.4.8.1	Thermisches Ersatzbild	238
II.4.8.2	Thermischer Übergangswiderstand im Rohr	239
II.4.8.3	Belastbarkeitsgleichung	240
II.4.8.4	Anwendungsbeispiel	242
II.4.8.5	Grafische Lösungsmethode	244
II.4.9	Parameteranalyse zur Belastbarkeit natürlich gekühlter Energiekabel	248
II.4.9.1	110 kV-Kabel	249
II.4.9.1.1	Einfluß des Achsabstandes	250
II.4.9.1.2	Einfluß der Verlegeart	252
II.4.9.1.3	Thermische Stabilisierung	252
II.4.9.1.4	Unterdrückung der Mantel-Längsströme	252
II.4.9.1.5	Einfluß der Verlegetiefe	253
II.4.9.1.6	Einfluß des Leiterquerschnittes	255
II.4.9.1.7	110 kV-VPE-Kabel	257
II.4.9.1.8	Folgerungen	257
II.4.9.2	400 kV-Kabel	260
II.4.9.2.1	Einfluß des Achsabstandes	260
II.4.9.2.2	Verlegeart	263
II.4.9.2.3	Einfluß des dielektrischen Verlustfaktors	263
II.4.9.2.4	Thermische Stabilisierung	264
II.4.9.2.5	Belastbarkeitssteigerungen durch Cross-Bonding und durch thermische Stabilisierung	265
II.4.9.2.6	Einfluß der Isolierungsdicke	265
II.4.9.2.7	Einfluß des Leiterquerschnittes	271
II.4.9.2.8	Belastbarkeitsgrenzen von 400kV-Kabeln	273
II.4.9.3	Natürlich gekühlte Ölkabel für 550 kV und für 765 kV	275
II.4.9.4	Folgerungen	278
II.5	Erwärmung zyklisch belasteter Energiekabel	279
II.5.1	Grundlagen der "VDE-Methode"	280
II.5.2	Erweiterte Berechnungsmethode	282
II.5.2.1	Fourieranalyse	285
II.5.2.2	Anwendung	285
II.5.2.2.1	Charakteristischer Durchmesser und thermischer Wechselstrom-Widerstand	288

II.5.2.2.2	Temperaturfeld im Erdboden	291
II.5.3	Berücksichtigung der Bodenaustrocknung	297
II.5.4	Mögliche Erweiterungen des Verfahrens	300
II.5.5	Belastbarkeitsberechnung	301
II.5.6	Folgerungen	302
III	<u>Zwangsgekühlte Hochleistungskabel</u>	303
III.1	Strömungstechnische Fragestellungen	304
III.1.1	Reibungsbeiwert, Strömungsgeschwindigkeit und thermischer Übergangswiderstand	305
III.1.2	Reibungsverluste	309
III.1.3	Temperaturerhöhungen durch Reibungsverluste	312
III.2	Oberflächenkühlung	313
III.3	Lateralkühlung	316
III.3.1	Berechnungsverfahren	318
III.3.2	Ergebnisse	324
III.3.2.1	Kabelaufbau	325
III.3.2.2	Parameter der Kabelanlage	325
III.3.2.3	Thermische Stabilisierung des Kabelgrabens	326
III.3.2.4	Belastbarkeiten	328
III.3.2.4.1	Kühlung mit Kunststoffrohren	328
III.3.2.4.2	Kühlung mit Edelstahlrohren	332
III.3.2.5	Thermische Stabilisierung	334
III.4	Leiterkühlung	339
III.4.1	Verfahren zur Berechnung der Dauerbelastbarkeit	340
III.4.2	Kabel- und Anlagenparameter	345
III.4.3	Dauerbelastbarkeiten bei nur einem, nicht unterteilten Kühlabschnitt	348
III.4.3.1	Vergleich der Anlagenarten	350
III.4.3.2	Vergleich der Kühlsysteme	351
III.4.3.3	Dauerbelastbarkeiten	353
III.4.3.3.1	Kühlsystem b	353
III.4.3.3.2	Kühlsystem d (Thermische Kaskade)	354
III.4.4	Dauerbelastbarkeiten bei Hydraulischer Kaskadenschaltung	359
III.4.4.1	Trennmuffe	362
III.4.4.2	Analyse der Kabelanlage	364
III.4.4.3	Ergebnisse	367
III.4.4.4	Folgerungen	372
IV	<u>Zusammenfassung</u>	374
V	<u>Schrifttum</u>	376