

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Gesamtplanung</b>	<b>1</b>
1.0 Formelzeichen	1
1.1 Entwicklungsstadien eines Übertragungsprojektes	1
1.2 Planung der Übertragung	2
1.2.1 Ziele	2
1.2.2 Planungsstadien	2
1.2.3 Planungsgesichtspunkte bei Freileitungen	3
1.3 Planungsmethoden	3
1.3.1 Datenerfassung und -aufbereitung	3
1.3.2 Formulierung und Vorauswahl von Alternativen	4
1.3.3 Elektrische Studien	4
1.3.4 Wirtschaftliche Studien und abschließende Beurteilung	4
1.4 Planungsmaßstäbe	5
1.4.1 Allgemeines	5
1.4.2 Kriterien für stabile Bedingungen	5
1.4.3 Kriterien für vorübergehende und transiente Bedingungen	5
1.5 Wahl der elektrischen Spannung	5
1.5.1 Entwicklung der Übertragungsspannungen	5
1.5.2 Einsatz der Übertragungsspannung	6
1.6 Wahl der Leiterbelegung	9
1.7 Wahl des Mastbildes	11
1.8 Übertragung mit Drehstrom oder mit Gleichstrom	14
1.9 Übertragungen mit mehr als drei Außenleitern	17
1.9.1 Optionen	17
1.9.2 Eigenschaften von Mehrleitersystemen	18
1.9.3 Erfahrungen	18
1.10 Baukosten	18
1.11 Trassensicherung und Genehmigung	20
1.12 Planungsergebnisse	21
1.13 Literatur	22
 <b>2 Elektrische Anforderungen und Auslegung</b>	 <b>25</b>
2.0 Formelzeichen	25
2.1 Die Freileitung als elektrisches System	28
2.1.1 Wellenwiderstand und natürliche Leistung	28
2.1.2 Stabilität	29
2.1.3 Spannungsänderung und höchste zulässige Verluste	29
2.1.4 Übertragungsfähigkeit einer Leitung	30
2.1.5 Gütekriterien	30
2.1.6 Blindleistungskompensation	31
2.1.7 Übertragene Leistung in Bezug zur Trassenbreite	31
2.2 Mit dem Strom verbundene Betriebsaspekte	32
2.2.1 Normal- und Ausnahmebedingung	32
2.2.2 Berechnung der Ohmschen Verluste	32
2.2.3 Kurzschluss	32
2.3 Auswirkungen von Strom und Spannung auf Personen und Anlagen	33
2.3.1 Einführung	33

2.3.2	Elektrische und magnetische Felder . . . . .	33
2.3.2.1	Einfluss auf Menschen und Tiere . . . . .	33
2.3.2.2	Einfluss auf Geräte der Informationstechnik . . . . .	35
2.3.3	Koronaerscheinungen und -auswirkungen . . . . .	35
2.3.3.1	Allgemeines . . . . .	35
2.3.3.2	Berechnung der Randfeldstärke . . . . .	35
2.3.3.3	Funkstörungen (Radio Interference, RI) . . . . .	36
2.3.4	Akustische Geräusche (Audible Noise, AN) . . . . .	38
2.3.5	Einfluss der Leitungsgestaltung auf spannungs- und stromabhängige Emissionen . . . . .	39
2.4	Anforderungen an die Isolation . . . . .	40
2.4.1	Einführung . . . . .	40
2.4.2	Betriebsfrequente Überspannungen und kurzzeitige Überspannungen . . . . .	41
2.4.3	Langsam ansteigende Überspannungen . . . . .	41
2.4.4	Schnell ansteigende Überspannungen . . . . .	44
2.4.5	Prinzipien der Isolationskoordination . . . . .	44
2.4.5.1	Allgemeine Prinzipien . . . . .	44
2.4.5.2	Isolationsauslegung für dauernde Betriebsspannungen . . . . .	44
2.4.5.3	Isolationsauslegung für langsam ansteigende Überspannungen . . . . .	45
2.4.5.4	Isolation für schnell ansteigende Überspannungen . . . . .	47
2.4.6	Arbeiten unter Spannung . . . . .	48
2.5	Abstände in Luft zum Vermeiden von Überschlägen . . . . .	48
2.5.1	Anforderungen und Ermittlung von Abständen . . . . .	48
2.5.1.1	Arten elektrischer Abstände in Luft . . . . .	48
2.5.1.2	Berechnung elektrischer Abstände . . . . .	49
2.5.1.2.1	Erforderliche Stehspannungen der Luftstrecke . . . . .	49
2.5.1.2.2	Zu berücksichtigende Spannungsbeanspruchungen . . . . .	52
2.5.1.2.3	Zusammenfassende Formeln für die Schlagweiten . . . . .	53
2.5.1.3	Empirische Werte für Abstände . . . . .	55
2.5.2	Innere und äußere Abstände . . . . .	55
2.5.2.1	Einführung . . . . .	55
2.5.2.2	Auslegungsprinzipien . . . . .	56
2.5.2.3	Lastfälle für die Berechnung von Abständen . . . . .	56
2.5.2.3.1	Höchste Auslegungstemperatur der Leiter, kein Wind . . . . .	56
2.5.2.3.2	Eislast für die Festlegung elektrischer Abstände, kein Wind . . . . .	57
2.5.2.3.3	Windlastannahmen . . . . .	57
2.5.2.4	Leiterposition unter Windeinwirkung . . . . .	58
2.5.2.4.1	Festlegung der Windeinwirkung . . . . .	58
2.5.2.4.2	Berechnung des Ausschwingwinkels . . . . .	59
2.5.2.4.3	Zeitliche Verteilung der Ausschwingwinkel . . . . .	60
2.5.2.4.4	Ermittlung der Ausschwingwinkel aus Messungen . . . . .	61
2.5.2.4.5	Leiter- und Isolatoranlage nach deutscher Norm . . . . .	61
2.5.2.5	Leiterabstände in Feldmitte . . . . .	62
2.5.2.6	Kleinste Abstände im Feld oder am Mast . . . . .	63
2.5.2.7	Abstände zum Boden, zu Gebäuden, zu Verkehrstrassen, zu anderen Freileitungen sowie zu Sport- und Erholungsflächen . . . . .	63
2.5.2.8	Beispiele . . . . .	65
2.5.2.8.1	Berechnung der elektrischen Abstände für eine 110-kV-Leitung mit einem Langstabisolator . . . . .	65
2.5.2.8.2	Berechnung der elektrischen Abstände für eine 380-kV-Freileitung mit drei Langstabisolatoren . . . . .	66

2.5.2.8.3	Abstände zu Hindernissen bei Bemessung mit empirischen Abstandswerten . . . . .	67
2.5.2.8.4	Zeitliche Verteilung der Ausschwingwinkel . . . . .	67
2.5.2.8.5	Mastkopfgeometrie nach statistischen Überlegungen . . . . .	68
2.5.2.8.6	Mastkopfgeometrie nach europäischen Normen . . . . .	69
2.6	Literatur . . . . .	70
<b>3</b>	<b>Elektrische Parameter von Freileitungen</b>	<b>73</b>
3.0	Formelzeichen . . . . .	73
3.1	Einführung . . . . .	74
3.2	Ohmscher Widerstand . . . . .	74
3.3	Impedanzen im Mitsystem . . . . .	75
3.3.1	Einführung . . . . .	75
3.3.2	Induktiver Blindwiderstand und Reaktanz im Mitsystem . . . . .	75
3.4	Impedanz im Nullsystem . . . . .	78
3.4.1	Einführung . . . . .	78
3.4.2	Näherungsformeln für die Impedanzen im Nullsystem . . . . .	78
3.5	Leitungskapazitäten und kapazitive Reaktanzen . . . . .	81
3.5.1	Einführende Überlegungen . . . . .	81
3.5.2	Leitungen mit einem Stromkreis . . . . .	82
3.5.3	Leitungen mit zwei Stromkreisen . . . . .	83
3.6	Admittanz . . . . .	84
3.7	Elektrisches Modell einer Freileitung . . . . .	85
3.7.1	Einführung . . . . .	85
3.7.2	Leitungen kurzer und mittlerer Länge . . . . .	85
3.7.3	Leitungen großer Länge . . . . .	86
3.7.3.1	Grundlagen . . . . .	86
3.7.3.2	Darstellung mit hyperbolischen Funktionen . . . . .	87
3.7.3.3	Ersatzschaltung einer langen Leitung mit $\Pi$ -Gliedern . . . . .	88
3.8	Literatur . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Schutz gegen Auswirkungen von Blitzeinschlägen</b>	<b>91</b>
4.0	Formelzeichen . . . . .	91
4.1	Bedeutung von Blitzeinwirkungen . . . . .	91
4.2	Entstehung von Blitzeinschlägen . . . . .	92
4.2.1	Ablauf einer Blitzentladung . . . . .	92
4.2.2	Stoßverhalten der Blitzschläge . . . . .	93
4.2.3	Elektrische Eigenschaften der Entladungen . . . . .	93
4.3	Häufigkeit und Stärke von Blitzeinwirkungen . . . . .	94
4.3.1	Auftretenshäufigkeit . . . . .	94
4.3.2	Stromstärke von Blitzen . . . . .	96
4.3.3	Direkte und indirekte Blitzeinwirkungen . . . . .	97
4.4	Anordnung und Wirksamkeit von Erdseilen . . . . .	98
4.4.1	Theoretische Überlegungen . . . . .	98
4.4.2	Schutzwirkung von Erdseilen . . . . .	99
4.4.3	Ableiter . . . . .	101
4.4.4	Ermittlung des Verhaltens unter Blitzeinwirkung . . . . .	101
4.5	Blitzschutzterdung . . . . .	102
4.5.1	Bedeutung der Blitzschutzterdung . . . . .	102
4.5.2	Stoßimpedanz der Erdung . . . . .	102
4.6	Literatur . . . . .	103

<b>5 Erdung</b>	<b>105</b>
5.0 Formelzeichen	105
5.1 Zweck der Erdung	106
5.2 Begriffe und Grundlagen	106
5.3 Anforderungen	107
5.3.1 Normen	107
5.3.2 Personensicherheit	107
5.3.3 Thermische Kurzschlussfestigkeit	109
5.3.4 Mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit	109
5.3.5 Zu berücksichtigende Ströme	109
5.4 Schutzerdung	110
5.5 Betriebserdung	114
5.6 Blitzschutzerdung	114
5.7 Bemessung für Kurzzeitströme	115
5.8 Bodenwiderstand und Bodenleitfähigkeit	115
5.9 Berechnung des Ausbreitungswiderstandes	116
5.9.1 Kugelförmiger Erder	116
5.9.2 Tiefenerder	117
5.9.3 Bänderer	119
5.10 Messung des spezifischen Erdwiderstands	119
5.10.1 Grundlagen	119
5.10.2 Messverfahren	120
5.11 Messung des Erdausbreitungswiderstandes	121
5.12 Erdausbreitungswiderstand in nicht homogenen Böden	124
5.12.1 Spezifische Bodenwiderstände im Zweischichtenmodell	124
5.12.2 Berechnung des Ausbreitungswiderstands im Zweischichtenmodell	125
5.12.3 Berechnung des Ausbreitungswiderstandes aus dem spezifischen Scheinwiderstand	127
5.12.4 Berechnung des Ausbreitungswiderstandes von komplizierten räumlichen Modellen	127
5.12.5 Beispiel für die Berechnung des Erdausbreitungswiderstandes	128
5.13 Regeln aus der Praxis für das Einbringen von Erdungsanlagen	129
5.13.1 Band- und Ringerder	129
5.13.2 Lotrecht oder schräg eingeschlagene Erder	129
5.13.3 Verbindungen zwischen den Erdern	129
5.13.4 Erdverbindungen	130
5.14 Literatur	130
<b>6 Mechanische Anforderungen und Belastungen</b>	<b>131</b>
6.0 Formelzeichen	131
6.1 Mechanische Auslegung einer Freileitung als System	132
6.1.1 Komponenten und Elemente einer Freileitung	132
6.1.2 Zuverlässigkeiten	133
6.1.3 Berechnung der Zuverlässigkeit	134
6.1.4 Abstimmung der Tragfähigkeiten und Wahl der Zuverlässigkeit	138
6.1.5 Einwirkung der höchsten Belastung auf mehrere Komponenten oder Bauteile	140
6.1.6 Ausnutzungsgrad und sein Einfluss auf die Auslegung	142
6.2 Tragfähigkeiten von Komponenten und Bauteilen	144
6.2.1 Grenzen für die Tragfähigkeit	144
6.2.2 Bemessung einzelner Komponenten und Bauteile	145
6.2.3 Schadens- und Versagensgrenzen	146

6.3	Windlasten	146
6.3.1	Windmessungen	146
6.3.2	Ableitung von Bemessungswindlasten	147
6.3.2.1	Auswertung von Windmessungen	147
6.3.2.2	Einfluss der Geländerauigkeit	150
6.3.2.3	Änderung der Referenzgeschwindigkeit mit der Höhe	151
6.3.3	Windwirkung auf Komponenten	152
6.4	Eislasten	153
6.4.1	Eisbildung	153
6.4.2	Eisbeobachtungen und Messungen	155
6.4.3	Ableitung von Bemessungseislasten	156
6.4.3.1	Grundlagen	156
6.4.3.2	Auswertung von Informationen über Eislasten	156
6.4.3.3	Referenzeislast	156
6.4.3.4	Belastung der Tragwerke und Lastfälle	157
6.5	Gleichzeitige Wirkung von Wind- und Eislasten	157
6.5.1	Auftretenswahrscheinlichkeit und Kombination der Parameter	157
6.5.2	Bestimmung der Parameter	158
6.5.2.1	Eislast	158
6.5.2.2	Windlast	158
6.5.2.3	Windwiderstandsbeiwerte und Eisdichten	159
6.5.3	Windlasten auf Leiter mit Eisansatz	159
6.6	Klimatische Lasten nach einschlägigen Normen	160
6.6.1	Normen für Freileitungen	160
6.6.2	Windlasten	161
6.6.2.1	Windlastmodell nach IEC 60 826	161
6.6.2.2	Windmodell nach der Europeanorm EN 50 341-1	162
6.6.2.3	Windmodell nach EN 50 341-3-4, Nationale Normative Festlegungen für Deutschland	164
6.6.2.4	Vergleich der Windlastmodelle	166
6.6.3	Eislasten	168
6.6.3.1	Eislastmodell nach IEC 60 826	168
6.6.3.2	Eislastmodell nach EN 50 341-1	169
6.6.3.3	Eislastmodell nach EN 50 341-3-4	169
6.6.4	Gleichzeitige Wind- und Eiswirkung	170
6.6.4.1	Modell nach IEC 60 826	170
6.6.4.2	Modell nach EN 50 341-1	170
6.6.4.3	Modell nach EN 50 341-3-4	170
6.7	Lasten aus Errichtung, Betrieb und Instandhaltung	171
6.7.1	Einführung	171
6.7.2	Vorgaben nach IEC 60 826	171
6.7.3	Vorgaben nach EN 50 341-1	171
6.7.4	Vorgaben nach EN 50 341-3-4	172
6.8	Lasten im Hinblick auf die Betriebssicherheit, Sonderlasten	172
6.8.1	Einführung	172
6.8.2	Vorgaben nach IEC 60 826	172
6.8.3	Vorgaben nach EN 50 341-1	173
6.8.4	Vorgaben nach EN 50 341-3-4	173
6.9	Statistische Verteilungen	174
6.9.1	Einführung	174
6.9.2	Gauß'sche Normalverteilung	174
6.9.3	Logarithmische Normalverteilung	175

6.9.4 Gumbel-Verteilung . . . . .	176
6.10 Literatur . . . . .	177
<b>7 Leiterauswahl</b> . . . . .	<b>179</b>
7.0 Formelzeichen . . . . .	179
7.1 Ausführung der Leiter . . . . .	180
7.1.1 Einführung . . . . .	180
7.1.2 Bezeichnungen . . . . .	182
7.1.3 Anmerkungen zur technischen Entwicklung . . . . .	182
7.1.4 Werkstoffe . . . . .	183
7.1.4.1 Aluminium . . . . .	183
7.1.4.2 Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung . . . . .	184
7.1.4.3 Stahl . . . . .	185
7.1.4.4 Aluminium-ummantelter Stahl . . . . .	185
7.1.4.5 Kupfer und Kupferlegierungen . . . . .	186
7.1.4.6 Thermisch belastbare Aluminiumlegierungen . . . . .	186
7.1.5 Prüfung von Drähten . . . . .	187
7.1.5.1 Einführung . . . . .	187
7.1.5.2 Maße und Oberfläche . . . . .	187
7.1.5.3 Schweißstellen . . . . .	187
7.1.5.4 Zugfestigkeitsprüfung . . . . .	187
7.1.5.5 Wickelprüfung . . . . .	187
7.1.5.6 Schichtdickenmessung . . . . .	188
7.1.5.7 Prüfung des spezifischen Widerstandes . . . . .	188
7.1.6 Leiter aus Drähten mit gleichem Werkstoff und Durchmesser . . . . .	188
7.1.6.1 Leiter aus Aluminium . . . . .	188
7.1.6.2 Leiter aus AlMgSi . . . . .	189
7.1.6.3 Leiter aus aluminium-ummanteltem Stahl . . . . .	190
7.1.6.4 Leiter aus Kupfer, Kupferlegierungen und Stahl . . . . .	190
7.1.7 Verbundleiter . . . . .	190
7.1.7.1 Aufbau . . . . .	190
7.1.7.2 Kenndaten . . . . .	191
7.1.7.3 Fertigung . . . . .	195
7.1.7.4 Versand . . . . .	196
7.1.8 Prüfung von Leitern . . . . .	196
7.1.8.1 Einteilung der Prüfungen . . . . .	196
7.1.8.2 Stichprobenprüfung . . . . .	196
7.1.8.3 Oberflächenbeschaffenheit, Maße, Formbeständigkeit, Masse . . . . .	196
7.1.8.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm . . . . .	196
7.1.8.5 Zugbruchkraft . . . . .	198
7.1.8.6 Prüfung des Kriechverhaltens . . . . .	198
7.1.8.7 Nachweis der Verlegbarkeit . . . . .	199
7.1.9 Bündelleiter . . . . .	200
7.1.10 Sonderausführungen von Leitern . . . . .	201
7.1.10.1 Sonderseile aus Runddrähten . . . . .	201
7.1.10.2 Leiter für höhere Betriebstemperaturen . . . . .	201
7.1.10.3 Leiter mit vergrößertem Durchmesser . . . . .	202
7.1.10.4 Leiter mit glatten Oberflächen . . . . .	202
7.1.10.5 Verdichtete Leiter . . . . .	203
7.1.10.6 Selbstdämpfende Leiter . . . . .	203
7.1.10.7 Schwingungsresistente Leiter . . . . .	203
7.1.10.8 Lärmreduzierende Leiter . . . . .	204

7.1.10.9	Leiter mit nachbehandelten Oberflächen . . . . .	204
7.2	Bemessung von Leitern für die Strombelastung . . . . .	204
7.2.1	Einführung und Anforderungen . . . . .	204
7.2.2	Grundlagen für die Ermittlung der Leitertemperatur . . . . .	205
7.2.3	Bemessung im Hinblick auf den höchsten Dauerstrom . . . . .	206
7.2.4	Bemessung für den Kurzschlussstrom . . . . .	208
7.2.5	Bemessung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten . . . . .	209
7.2.6	Leitungsbelastbarkeit in Abhängigkeit von den Wetterbedingungen . . . . .	212
7.3	Bemessung für die Spannungsbeanspruchung . . . . .	213
7.3.1	Einführung und Anforderungen . . . . .	213
7.3.2	Bemessung im Hinblick auf die elektrischen Parameter . . . . .	213
7.3.3	Bemessung im Hinblick auf Randfeldstärke und Koronaerscheinungen . . . . .	215
7.3.4	Koronaverluste . . . . .	215
7.4	Mechanische Bemessung von Leitern . . . . .	215
7.4.1	Einführung und Anforderungen . . . . .	215
7.4.2	Beanspruchungen bei extremen Belastungen . . . . .	216
7.4.3	Beanspruchungen unter Alltagsbedingungen . . . . .	217
7.4.4	Einfluss der Leiterzugspannung auf die Baukosten . . . . .	218
7.4.5	Leiterkriechen . . . . .	219
7.4.6	Empfehlungen für die Wahl der Leiterzugspannung . . . . .	219
7.5	Literatur . . . . .	219
<b>8</b>	<b>Wahl der Erdseile</b> . . . . .	<b>223</b>
8.0	Formelzeichen . . . . .	223
8.1	Erdseilarten . . . . .	223
8.2	Elektrische und thermische Bemessung . . . . .	224
8.2.1	Anforderungen . . . . .	224
8.2.2	Bemessung nach dem Kurzschlussstrom . . . . .	224
8.2.3	Grenztemperatur für Erdseile im Kurzschlussfall . . . . .	226
8.2.4	Abschalt- und Wiedereinschaltzeiten . . . . .	226
8.2.5	Beispiele für die Belastbarkeit von Erdseilen im Kurzschlussfall . . . . .	226
8.3	Mechanische Bemessung . . . . .	228
8.3.1	Abnahme der mechanischen Festigkeit durch Erwärmung . . . . .	228
8.3.2	Festlegung der Zugkräfte und Zugspannung . . . . .	229
8.4	Schritte bei der Auswahl konventioneller Erdseile . . . . .	230
8.5	Lichtwellenleiter-Erdseile . . . . .	230
8.5.1	Allgemeines und Aufbau . . . . .	230
8.5.2	Verlegebedingungen . . . . .	232
8.5.3	Zubehörteile . . . . .	232
8.5.4	Prüfungen . . . . .	233
8.6	Literatur . . . . .	234
<b>9</b>	<b>Isolatoren</b> . . . . .	<b>235</b>
9.0	Formelzeichen . . . . .	235
9.1	Einführung . . . . .	235
9.2	Isolatoren aus Keramik . . . . .	236
9.2.1	Werkstoffe . . . . .	236
9.2.2	Fertigung . . . . .	237
9.2.3	Isolatorformen und Anwendungen . . . . .	239
9.3	Isolatoren aus Glas . . . . .	241
9.3.1	Werkstoffe und Fertigung . . . . .	241
9.3.2	Isolatorformen und Anwendungen . . . . .	243

9.4	Verbundisolatoren	244
9.4.1	Werkstoffe, Aufbau und Fertigung	244
9.4.2	Isolatorformen und Anwendungen	246
9.5	Vergleich der Isolatorarten	247
9.6	Prüfungen an Einzelisolatoren	248
9.6.1	Grundlagen	248
9.6.2	Prüfungen an Keramik- und Glasisolatoren	249
9.6.2.1	Typprüfungen	249
9.6.2.2	Stichprobenprüfungen	250
9.6.2.3	Stückprüfungen	252
9.6.3	Prüfungen an Verbundisolatoren	254
9.6.3.1	Grundlagen	254
9.6.3.2	Bauartprüfung	254
9.6.3.3	Stichproben- und Stückprüfung	255
9.7	Isolatorketten	255
9.7.1	Gestaltung von Tragketten	255
9.7.2	Gestaltung von Abspannketten	257
9.8	Anforderungen an und Bemessung von Isolatorketten	258
9.8.1	Elektrische Auslegung	258
9.8.2	Mechanische Auslegung	263
9.9	Betriebsmäßiges Verhalten von Isolatorketten	264
9.9.1	Einführung	264
9.9.2	Spannungsbeanspruchung	264
9.9.3	Verhalten der Isolortypen	267
9.9.4	Verhalten unter Fremdschichteinfluss	268
9.9.4.1	Entstehung von Fremdschichten	268
9.9.4.2	Nachbildung von Fremdschichten	269
9.9.4.3	Fremdschichtklassen	270
9.9.4.4	Ermittlung der Fremdschichtklassen durch Messungen vor Ort	270
9.9.4.5	Isolationserhaltende Maßnahmen	271
9.10	Prüfungen an Isolatorketten	272
9.10.1	Grundlagen und Voraussetzungen	272
9.10.2	Atmosphärische Normbedingungen	272
9.10.3	Künstlicher Regen	273
9.10.4	Aufbauanordnungen	273
9.10.5	Wechselspannungsprüfung	273
9.10.6	Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung	273
9.10.7	Leistungslichtbogenverhalten	274
9.10.8	Funktörfestigkeitsprüfung	274
9.10.9	Prüfung der Koronaaussetzspannung	274
9.11	Beispiel für Auswahl von Isolatoren	274
9.12	Literatur	277
<b>10</b>	<b>Armaturen</b>	<b>281</b>
10.1	Definitionen	281
10.2	Armaturen für Leiter	281
10.2.1	Leiterbefestigungen an Tragpunkten	281
10.2.2	Leiterbefestigungen an Abspannpunkten	284
10.2.3	Spannschlösser	285
10.2.4	Verbinder	285
10.2.5	Feldabstandhalter	286
10.2.6	Schwingungsdämpfer für Einfachleiter	287



10.2.7 Schwingungsdämpfer für Bündelleiter . . . . .	288
10.3 Armaturen für Isolatorketten . . . . .	289
10.4 Bemessung und Prüfungen . . . . .	289
10.4.1 Allgemeines . . . . .	289
10.4.2 Elektrische Anforderungen . . . . .	289
10.4.3 Mechanische Anforderungen . . . . .	290
10.4.4 Korrosionsschutz . . . . .	291
10.4.5 Werkstoffauswahl . . . . .	291
10.4.6 Prüfungen . . . . .	292
10.5 Literatur . . . . .	293
<b>11 Leiterschwingungen</b> . . . . .	<b>295</b>
11.0 Formelzeichen . . . . .	295
11.1 Übersicht und Schwingungsarten . . . . .	295
11.2 Kármán-Schwingungen . . . . .	297
11.2.1 Physikalische Grundlagen, das mathematisch-mechanische Modell der Leitung [0.4] . . . . .	297
11.2.2 Die Freifeldamplitude des Leiters . . . . .	299
11.2.3 Die Beanspruchung des Leiters . . . . .	300
11.2.4 Die Biegesteifigkeit eines Seiles . . . . .	301
11.2.5 Entstehen der Schwingungen . . . . .	302
11.2.6 Auswirkungen . . . . .	302
11.2.7 Auswirkungen auf die Leitungsplanung . . . . .	305
11.2.8 Nachweis der Schwingungsintensität und der Wirksamkeit von Dämp- fungsmaßnahmen . . . . .	310
11.3 Teilfeldschwingungen . . . . .	311
11.3.1 Entstehen und Auswirkungen . . . . .	311
11.3.2 Abhilfemaßnahmen . . . . .	312
11.4 Seiltänzen . . . . .	312
11.4.1 Entstehung und Auswirkungen . . . . .	312
11.4.2 Abhilfemaßnahmen . . . . .	313
11.5 Kurzschlusschwingungen . . . . .	315
11.5.1 Entstehen und Auswirkungen . . . . .	315
11.5.2 Abhilfemaßnahmen . . . . .	315
11.6 Literatur . . . . .	315
<b>12 Tragwerke</b> . . . . .	<b>319</b>
12.0 Formelzeichen . . . . .	319
12.1 Definitionen und Anforderungen . . . . .	323
12.2 Mastarten und ihre Anwendung . . . . .	324
12.2.1 Tragmasten . . . . .	324
12.2.2 Winkeltragmasten . . . . .	324
12.2.3 Winkelmasten . . . . .	324
12.2.4 Abspann- und Winkelabspannmasten . . . . .	325
12.2.5 Endmasten . . . . .	325
12.2.6 Sondermasten . . . . .	325
12.3 Mastkopfgeometrie . . . . .	326
12.3.1 Anforderungen . . . . .	326
12.3.2 Elektrische Abstände nach EN 50 341-1 und EN 50 341-3-4 . . . . .	326
12.3.3 Abstand zwischen den Leitern . . . . .	326
12.3.3.1 Gleiche Querschnitte, Werkstoffe oder Durchhänge der Leiter . . . . .	326
12.3.3.2 Verschiedene Leiterquerschnitte, Werkstoffe oder Durchhänge . . . . .	328

12.3.4 Abstände an Masten . . . . .	329
12.4 Bemessung und Konstruktion der Tragwerke . . . . .	331
12.4.1 Grundlegende Anforderungen . . . . .	331
12.4.2 Statische Bemessung . . . . .	332
12.4.3 Bemessungswerte und Nachweismethode . . . . .	333
12.5 Lastfälle . . . . .	334
12.5.1 Belastungskombinationen . . . . .	334
12.5.2 Lastfälle nach EN 50 341-3-4 für Masten und Gründungen . . . . .	336
12.6 Teilsicherheitsbeiwerte nach EN 50 341-3-4 . . . . .	339
12.6.1 Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen auf Masten . . . . .	339
12.6.2 Teilsicherheitsbeiwerte für Werkstoffe . . . . .	339
12.7 Stahlgittermasten . . . . .	340
12.7.1 Allgemeines . . . . .	340
12.7.2 Konstruktion und Ausführung . . . . .	341
12.7.2.1 Ausführung der Stäbe . . . . .	341
12.7.2.2 Anschlüsse . . . . .	342
12.7.2.3 Verkehrswege . . . . .	343
12.7.2.4 Fertigung . . . . .	343
12.7.2.5 Korrosionsschutz . . . . .	343
12.7.3 Werkstoffe . . . . .	344
12.7.3.1 Werkstoffe für Winkelstähle und Bleche . . . . .	344
12.7.3.2 Werkstoffe für Schrauben und Niete . . . . .	345
12.7.4 Ermittlung der Stabkräfte . . . . .	346
12.7.5 Bestimmung der Stabkräfte am ebenen System . . . . .	346
12.7.5.1 Ritterschnitt-Verfahren . . . . .	346
12.7.5.2 Kräfte in den Eckstielen . . . . .	347
12.7.5.3 Kräfte in den Diagonalen, Belastung durch horizontale Kräfte . . . . .	348
12.7.5.4 Kräfte in den Diagonalen, Belastung durch unsymmetrische Vertikallasten . . . . .	348
12.7.5.5 Kräfte in den Diagonalen, Belastung durch Torsionsmomente . . . . .	349
12.7.5.6 Kräfte in den Horizontalstäben am Mastknick . . . . .	350
12.7.5.7 Kräfte in den Querverbänden im Mastschaft . . . . .	350
12.7.5.8 Kräfte in Schrägfüßen . . . . .	351
12.7.5.9 Kräfte in den Querträgern . . . . .	351
12.7.6 Berechnung der Stabkräfte am räumlichen System . . . . .	353
12.7.6.1 Grundkonzept der Finite-Elemente-Methode . . . . .	353
12.7.6.2 Anwendung auf räumliche Fachwerksysteme . . . . .	361
12.7.7 Vergleich der Berechnung am ebenen und am räumlichen System . . . . .	362
12.7.8 Bemessung der Stäbe und Anschlüsse . . . . .	364
12.7.8.1 Allgemeine Nachweisform . . . . .	364
12.7.9 Bemessung druckbeanspruchter Stäbe . . . . .	364
12.7.9.1 Effektive Querschnittsflächen für gedrückte Profile . . . . .	364
12.7.9.2 Biegeknicken bei mittig-gedrückten Stäben . . . . .	365
12.7.9.3 Biegedrillknicken bei mittig-gedrückten Stäben . . . . .	371
12.7.9.4 Druck und Biegung . . . . .	374
12.7.10 Bemessung mehrteiliger Druckstäbe . . . . .	374
12.7.10.1 Rahmenstäbe . . . . .	374
12.7.10.2 Gitterstäbe . . . . .	376
12.7.11 Bemessung zugbeanspruchter Stäbe . . . . .	377
12.7.11.1 Zugkraft . . . . .	377
12.7.11.2 Biegung und axiale Zugkraft . . . . .	379
12.7.12 Bemessung der Anschlüsse . . . . .	379

12.7.13 Bemessung für Biegung infolge vertikaler Lasten . . . . .	380
12.7.14 Bemessung des Sekundärfachwerks . . . . .	381
12.7.15 Verformungen . . . . .	381
12.7.16 Ermittlung der Fundamentbelastungen . . . . .	384
12.7.17 Einsatz der EDV bei der Berechnung von Stahlgittermasten . . . . .	385
12.7.18 Maßnahmen zur Erhöhung der Tragfähigkeit . . . . .	387
12.7.19 Beispiel: Statische Berechnung eines 110-kV-Tragmastes . . . . .	389
12.8 Stahlvollwandmasten . . . . .	401
12.8.1 Konstruktion und Ausführung . . . . .	401
12.8.2 Ermittlung der Beanspruchung . . . . .	404
12.8.3 Bemessung . . . . .	404
12.8.4 Beispiel für einen konischen Stahlvollwandmast . . . . .	407
12.9 Stahlbetonmasten . . . . .	409
12.9.1 Verwendung von Stahlbetonmasten . . . . .	409
12.9.2 Schleuderbetonmasten . . . . .	409
12.9.3 Rüttelbetonmasten . . . . .	410
12.9.4 Bauliche Durchbildung . . . . .	410
12.9.5 Herstellung . . . . .	411
12.9.6 Bemessung . . . . .	412
12.10 Holzmasten . . . . .	415
12.10.1 Verwendung und Ausführung . . . . .	415
12.10.2 Bemessung . . . . .	416
12.11 Traglast- und Umbruchprüfungen . . . . .	417
12.12 Literatur . . . . .	418
<b>13 Gründungen</b> . . . . .	<b>423</b>
13.0 Formelzeichen . . . . .	423
13.1 Anforderungen und Vorgaben . . . . .	424
13.2 Arten des Baugrundes . . . . .	424
13.2.1 Einteilung der Bodenarten . . . . .	424
13.2.2 Gewachsener Boden . . . . .	426
13.2.3 Fels . . . . .	427
13.2.4 Geschütteter Boden . . . . .	427
13.3 Baugrunderkundung . . . . .	427
13.3.1 Zweck der Bodenerkundung . . . . .	427
13.3.2 Verfahren zur Gewinnung von Bodenproben . . . . .	428
13.3.2.1 Arten der Proben . . . . .	428
13.3.2.2 Schürfgruben . . . . .	428
13.3.2.3 Probebohrungen . . . . .	429
13.3.2.4 Sondierbohrungen . . . . .	429
13.3.3 Sonden . . . . .	430
13.3.3.1 Sondenarten . . . . .	430
13.3.3.2 Rammsonden . . . . .	430
13.3.3.3 Standard Penetration Test . . . . .	431
13.3.3.4 Flügelsonden . . . . .	431
13.3.3.5 Drucksonden . . . . .	431
13.3.4 Auswertung der Baugrunduntersuchung . . . . .	432
13.3.4.1 Benennen und Beschreiben der Bodenarten . . . . .	432
13.3.4.2 Klassifizierung von Fels . . . . .	436
13.3.4.3 Betonangreifende Wässer und Böden . . . . .	436
13.3.4.4 Schichtenverzeichnis . . . . .	437
13.3.4.5 Zeichnerische Darstellung . . . . .	439

13.4 Entwurf und Bemessung der Gründungen	439
13.4.1 Gründungsart und Belastung	439
13.4.2 Bodenkennwerte	441
13.4.3 Kompaktgründungen	443
13.4.3.1 Definition	443
13.4.3.2 Einblockgründungen	443
13.4.3.3 Einblockgründungen ohne Stufe	443
13.4.3.4 Einblockgründungen mit Stufe	444
13.4.3.5 Plattengründungen	445
13.4.3.6 Schwellen-Plattengründungen	449
13.4.3.7 Einpfahlgründungen	449
13.4.3.8 Gründung von Holzmasten	452
13.4.4 Aufgeteilte Gründungen	452
13.4.4.1 Definition	452
13.4.4.2 Stufenfundamente	453
13.4.4.3 Bohr- und Schachtfundamente	456
13.4.4.4 Schwelleneinzelfundamente	459
13.4.4.5 Pfahlfundamente	460
13.4.4.6 Bewehrtes Einzelfundament	467
13.4.4.7 Felsfundamente	468
13.4.4.8 Eckstielverankerung	470
13.5 Literatur	471
<b>14 Leitungstechnische Berechnungen</b>	<b>475</b>
14.0 Formelzeichen	475
14.1 Grundlagen	476
14.2 Kettenlinie der Durchhangskurve	476
14.3 Parabel als Durchhangskurve	479
14.4 Feld mit unterschiedlichen Aufhängehöhen	481
14.5 Zustandsgleichung	482
14.6 Feld mit Einzellasten	485
14.7 Feld mit Abspannisolatorketten an den Enden	487
14.8 Zugkräfte und Durchhänge im Abspannabschnitt	488
14.8.1 Einführung	488
14.8.2 Änderung des Zustandes in Feldern mit längsbeweglichen Endpunkten	489
14.8.3 Seilzugspannungen und Durchhänge bei Isolatorketten mit Halbverankerung an Tragmasten	491
14.8.4 Zustandsgleichung für den Abspannabschnitt	493
14.8.5 Rechenprogramm für den Zustand im Abspannabschnitt	495
14.8.6 Ermittlung der Durchhänge bei Eislast nur in einem Feld mit Näherungsformeln	498
14.9 Abstände zum Gelände oder zu Objekten	499
14.9.1 Anforderungen	499
14.9.2 Berechnung des Abstandes zum Boden	499
14.9.3 Berechnung des Abstandes zu einer gekreuzten Straße	501
14.9.4 Berechnung des Abstandes zu einer gekreuzten Leitung	503
14.10 Literatur	506
<b>15 Trassenplanung</b>	<b>509</b>
15.0 Formelzeichen	509
15.1 Grundlagen	509
15.2 Trassenauswahl	511

15.2.1 Technische Gesichtspunkte . . . . .	511
15.2.2 Umweltfragen und Umweltbeeinflussungen, Gutachten . . . . .	512
15.2.2.1 Allgemeines . . . . .	512
15.2.2.2 Darstellung des Ist-Zustandes und Nullvariante der Umwelt . . . . .	513
15.2.2.3 Auswirkungen des geplanten Vorhabens auf die Umwelt . . . . .	515
15.2.3 Einordnung in das Gelände; technische, wirtschaftliche und Umweltge- sichtspunkte . . . . .	517
15.2.4 Alternative Lösungen . . . . .	519
15.3 Vermessung im Gelände . . . . .	520
15.3.1 Arbeitsschritte . . . . .	520
15.3.2 Vermessungsverfahren und eingesetzte Instrumente . . . . .	521
15.3.2.1 Direkte Vermessung im Gelände . . . . .	521
15.3.2.2 Indirekte Geländeaufnahme . . . . .	523
15.3.2.3 Geländedatenbanken . . . . .	524
15.3.3 Einmessen der Winkelpunkte und Fluchten . . . . .	524
15.3.4 Geländeaufnahme . . . . .	525
15.3.5 Abpflocken der Maststandorte . . . . .	525
15.3.6 Nachtrassierung . . . . .	525
15.4 Leitungsplanung und Planbearbeitung . . . . .	527
15.4.1 Grundlagen der Leitungsplanung . . . . .	527
15.4.2 Darstellen einer Leitung . . . . .	529
15.4.3 Auswertung der Profilaufnahme . . . . .	533
15.4.4 Bestimmen der Maststandorte, Masttypen und Masthöhen . . . . .	533
15.4.4.1 Grundlagen und Einflussfaktoren . . . . .	533
15.4.4.2 Mastausteilung von Hand . . . . .	534
15.4.4.3 Mastausteilung mit Hilfe der Datenverarbeitung . . . . .	535
15.5 Einsatz der Datenverarbeitung bei Projektierung und Planverwaltung . . . . .	536
15.5.1 Programmsystem für die Freileitungsprojektierung . . . . .	536
15.5.2 Höhenprofilerstellung . . . . .	537
15.5.3 Lageplanerstellung . . . . .	538
15.5.4 Geografisches Informations System mit integrierter Datenbank . . . . .	538
15.5.5 Planverwaltung . . . . .	539
15.6 Literatur . . . . .	539
<b>16 Montage</b> . . . . .	<b>541</b>
16.0 Formelzeichen . . . . .	541
16.1 Montageplanung . . . . .	542
16.2 Transporte . . . . .	543
16.3 Herstellen von Gründungen . . . . .	544
16.3.1 Einführung . . . . .	544
16.3.2 Stufenfundamente, Plattengründungen und bewehrte Einzelfundamente . . . . .	544
16.3.3 Bohrfundamente . . . . .	544
16.3.4 Rammfundamente . . . . .	545
16.3.4.1 Gemeinsame Regeln . . . . .	545
16.3.4.2 Stahlpfähle . . . . .	546
16.3.4.3 Mit Mörtel ummantelte Stahlpfähle . . . . .	546
16.3.4.4 Probebelastung . . . . .	547
16.3.5 Schwellenfundamente . . . . .	547
16.3.6 Ankergründungen . . . . .	548
16.3.7 Herstellen und Verarbeiten von Beton . . . . .	548
16.3.7.1 Transport- und Baustellenbeton . . . . .	548
16.3.7.2 Ausgangsstoffe . . . . .	549

16.3.7.3	Anforderungen an Beton und Betoneigenschaften	551
16.3.7.4	Transportbeton	553
16.3.7.5	Baustellenbeton	554
16.3.7.6	Verarbeitung	555
16.3.7.7	Nachbehandlung	556
16.3.7.8	Nachweisverfahren für Betoneigenschaften	556
16.3.7.9	Güteüberwachung und Qualitätssicherung	557
16.4	Erdungen	558
16.5	Einrichten der Mastfüße	558
16.5.1	Verfahren und Hilfsmittel	558
16.5.2	Überloten von Winkel- und Endmasten	559
16.6	Mastmontage	562
16.6.1	Einführung	562
16.6.2	Mastmontage mit Kran	562
16.6.3	Mastmontage mit Stockbaum	562
16.6.3.1	Verfahren	562
16.6.3.2	Stocken mit Außenbaum	563
16.6.3.3	Stocken mit Innenbaum in Mastmitte	564
16.6.3.4	Stocken mit Innenbaum am Eckstiel	565
16.6.3.5	Hochziehen der Querträger mit Stockbaum	566
16.6.4	Mastmontage mit Hubschrauber	566
16.7	Verlegen von Seilen	567
16.7.1	Verlegeverfahren	567
16.7.2	Seilzuggeräte	568
16.7.2.1	Anforderungen	568
16.7.2.2	Zugseile	568
16.7.2.3	Seilverbindungen	569
16.7.2.4	Seilräder	570
16.7.2.5	Seilzugwinden	570
16.7.2.6	Seilbremsmaschinen	571
16.7.2.7	Trommelböcke	572
16.7.3	Leiterverlegearbeiten	573
16.7.3.1	Vorbereitungen	573
16.7.3.2	Ziehen der Seile	574
16.7.3.3	Regulieren der Leiter	574
16.7.3.4	Abspannen der Leiter	576
16.7.3.5	Einklemmen der Leiter in Tragklemmen	576
16.7.3.6	Stromschlaufenmontage	577
16.7.3.7	Einbau von Feldbündelabstandhaltern	577
16.7.3.8	Leiterauswechselungen	577
16.7.3.9	Verlegen von Lichtwellenleitern	577
16.7.4	Bestimmung der Montagedurchhänge	578
16.7.4.1	Anforderungen	578
16.7.4.2	Lage der Leiter in Rollen und in Klemmen	578
16.7.4.3	Einfluss des Seilkriechens	582
16.7.4.4	Beispiel einer Freileitung im Gebirge	584
16.8	Bauüberwachung und Abnahmen	586
16.8.1	Baubegleitende Kontrollen	586
16.8.2	Endinspektion	588
16.9	Literatur	589

Freileitungen

Planung, Berechnung, Ausführung

Kießling, F.; Nefzger, P.; Kaintzyk, U.

2001, XXIV, 611 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-42255-6