

Inhaltsverzeichnis

1 Gesamtplanung	1
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
2 Elektrische Anforderungen und Auslegung	25
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 Isolatorenlage 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 Verkehrsstrassen, 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
3	Elektrische Parameter von Freileitungen	73
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 II-Gliedern	88
3.8	Literatur	90
4	Schutz gegen Auswirkungen von Blitzeinschlägen	91
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	Blitzschutzerdung	102
4.5.1	Bedeutung der Blitzschutzerdung	102
4.5.2	Stoßimpedanz der Erdung	102
4.6	Literatur	103

5 Erdung	105
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 Bänderder	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

6 Mechanische Anforderungen und Belastungen **131**

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 Europannorm 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
7	Leiterauswahl	179
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
8	Wahl der Erdseile	223
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
9	Isolatoren	235
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 Isolatortypen	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
10	Armaturen	281
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
11 Leiterschwingungen	295
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 Seiltanzen	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
12 Tragwerke	319
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
13 Gründungen	423
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
14 Leitungstechnische Berechnungen	475
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 Tragsmasten	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
15 Trassenplanung	509
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	Leistungsplanung und Planbearbeitung	527
15.4.1	Grundlagen der Leistungsplanung	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
16	Montage	541
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