# Inhalt

**Vorwort** ..... **5**

**1 Elektrische Anlagen in der Energieverteilung** ..... **15**

1.1 Netzaufbau ..... 15
1.1.1 Netzfrequenz ..... 16
1.1.2 Spannungsebene ..... 16
1.1.3 Netzstruktur ..... 17
1.1.4 Erdverbindung in elektrischen Systemen ..... 20
1.1.4.1 Mittelspannungsebene ..... 20
1.1.4.2 Niederspannungsebene ..... 22

**2 Betriebsmittel und ihre Ersatzschaltbilder** ..... **25**

2.1 Netzeinspeisung ..... 25

2.2 Generator ..... 28
2.2.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 28
2.2.2 Betriebsverhalten im Normalbetrieb ..... 30
2.2.2.1 Einspeisung in ein starres Netz ..... 30
2.2.2.2 Einspeisung in ein passives Netz ..... 33
2.2.3 Betriebsverhalten im Kurzschlussfall ..... 34

2.3 Transformatoren ..... 36
2.3.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 36
2.3.2 Betriebsverhalten ..... 38

2.4 Kabel und Leitungen ..... 41
2.4.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 41
2.4.2 Betriebsverhalten ..... 45

2.5 Sammelschienen ..... 47
2.5.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 47
2.5.2 Betriebsverhalten ..... 48

2.6 Schienenverteiler ..... 50
2.6.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 50
2.6.2 Betriebsverhalten ..... 51

2.7 Schaltgeräte ..... 51
2.7.1 Aufbau und Ersatzschaltbild ..... 52
2.7.2 Betriebsverhalten ..... 54
2.7.2.1 Ausschaltvorgang ..... 54
2.7.2.2 Auslöseverhalten von Leistungsschaltern ..... 60
2.7.2.3 Auslöseverhalten von Leitungsschutzschaltern ..... 64
2.7.2.4 Auslöseverhalten von Sicherungen ..... 65

2.8 Lasten ..... 66
2.8.1 Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten ruhender Lasten ..... 66
2.8.1.1 Lastmodellierung durch eine Impedanz ..... 67
2.8.1.2 Lastmodellierung durch einen konstanten Strom ..... 67
2.8.1.3 Lastmodellierung durch eine konstante Abnahmeleistung ..... 67
2.8.1.4 Spannungsabhängigkeiten von Lastgruppen ..... 68
2.8.2 Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten motorischer Lasten ..... 68

2.9 Kompensationsanlagen ..... 74
2.9.1 Aufbau und Wirkungsweise ..... 74
2.9.2 Betriebsverhalten ..... 77

2.10 Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen ..... 81
2.10.1 Aufbau und Wirkungsweise ..... 81
2.10.2 Betriebsverhalten ..... 82

2.11 Beispiele ..... 83
2.11.1 Spannungsfaktor ..... 83
2.11.2 Stabilität des Generators ..... 84
2.11.3 Generatorkurzschluss ..... 85
2.11.4 Transformatoren im Parallelbetrieb ..... 88
2.11.5 Kabel und ihre Parameter ..... 90
2.11.6 Motoranlauf unter Last ..... 91

**3 Projektierung elektrischer Anlagen ..... 95**

3.1 Richtlinien, Gesetze, Vorschriften und Regeln ..... 95
3.1.1 EU-Richtlinien ..... 95
3.1.1.1 Niederspannungsrichtlinie ..... 98
3.1.1.2 EMV-Richtlinie ..... 100
3.1.1.3 Maschinenrichtlinie ..... 100
3.1.2 Gesetze ..... 101
3.1.3 Vorschriften und Richtlinien ..... 102
3.1.4 Technische Regelwerke ..... 103

3.2 Lastermittlung ..... 107
3.2.1 Leistungsbedarf ..... 107
3.2.2 Lastcharakter ..... 109
3.2.2.1 Beschreibung der Last durch eine Impedanz ..... 109
3.2.2.2 Beschreibung der Last durch eine konstante Stromaufnahme ..... 112

3.2.2.3 Beschreibung der Last durch eine konstante Leistungsaufnahme ..... 114
3.2.2.4 Auswirkungen der unterschiedlichen Lastnachbildungen ..... 115

3.3 Dimensionierung der Transformatoren ..... 116

3.4 Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen ..... 122
3.4.1 Dimensionierung nach VDE 0298 ..... 123
3.4.2 Dimensionierung nach VDE 0276 ..... 126
3.4.3 Dimensionierung des Neutralleiters ..... 129

3.5 Strombelastbarkeit von Stromschienenverteilern ..... 130

3.6 Lastflussberechnung ..... 132
3.6.1 Lastflussberechnung bei Lasten mit konstantem Strom ..... 132
3.6.2 Lastflussberechnung bei Lasten mit konstanter Leistung ..... 137
3.6.3 Diskussion der Berechnungsverfahren ..... 139

3.7 Überprüfung des Spannungsfalls ..... 141

3.8 Kurzschlussstromberechnung ..... 142
3.8.1 Symmetrischer Kurzschluss ..... 143
3.8.1.1 Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Kurzschlussstroms ..... 144
3.8.1.2 Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms nach VDE 0102 ..... 146
3.8.1.3 Generatorferner und generatornaher Kurzschluss ..... 148
3.8.2 Unsymmetrischer Kurzschluss ..... 150
3.8.2.1 Verfahren der symmetrischen Komponenten ..... 151
3.8.2.2 Berechnung des einpoligen Erdschlussstroms ..... 155
3.8.2.3 Berechnungsbeispiel
für den einpoligen und dreipoligen Kurzschlussstrom ..... 157
3.8.2.4 Berechnung unsymmetrischer Kurzschlussströme nach VDE 0102 ..... 158
3.8.3 Dynamische und thermische Beanspruchung beim Kurzschluss ..... 159

3.9 Schaltgerätedimensionierung ..... 163
3.9.1 Auswahl von Leistungsschaltern ..... 163
3.9.1.1 Auswahl der Bemessungsgrößen ..... 165
3.9.1.2 Auswahl der Gebrauchskategorie ..... 167
3.9.1.3 Berücksichtigung von Höhe und Umgebungstemperatur ..... 167
3.9.1.4 Auswahl des Auslösers ..... 168
3.9.1.5 Polzahl und Montageart ..... 171
3.9.2 Auswahl von Sicherungen ..... 171
3.9.2.1 Niederspannungs-Hochleistungssicherungen (NH) ..... 173
3.9.2.2 Schmelzsicherungen des Typs D und D0 ..... 173
3.9.3 Schütze ..... 174
3.9.4 Motorstarter ..... 175
3.9.5 Leitungsschutzschalter ..... 178
3.9.6 Fehlerstromschutzschalter ..... 178

3.10 Schutzdimensionierung ..... 180
3.10.1 Schutz von Kabeln und Leitungen ..... 180
3.10.1.1 Schutz gegen Überlast ..... 180
3.10.1.2 Schutz gegen Kurzschluss ..... 182

3.10.1.3 Einstellung der zugeordneten Überstromschutzeinrichtung ..... 184
3.10.1.4 Schutz des Neutralleiters ..... 188
3.10.2 Schutz von Lichtkreisen ..... 189
3.10.3 Schutz von Motoren ..... 190
3.10.4 Schutz von Transformatoren ..... 191
3.10.5 Schutz von Generatoren ..... 192
3.10.6 Schutz von Blindleistungskompensationseinrichtungen ..... 193

3.11 Blindleistungskompensation ..... 193

3.12 Selektivität ..... 196
3.12.1 Nachweis ..... 196
3.12.2 Realisierung ..... 199
3.12.3 Koordination von Überstromschutzeinrichtungen ..... 200
3.12.4 Doppeleinspeisungen ..... 201
3.12.5 Unterspannungsauslöser und Selektivität ..... 201
3.12.6 Back-up-Schutz ..... 202

3.13 Schutz bei indirektem Berühren / Fehlerschutz ..... 204
3.13.1 Schutz bei Verwendung von Kleinspannungen ..... 205
3.13.2 Spannungsbereiche ..... 206
3.13.3 Schutzmaßnahmen ..... 207
3.13.3.1 Schutzeinrichtungen im TN-Netz ..... 208
3.13.3.2 Schutzeinrichtungen im TT-Netz ..... 209
3.13.3.3 Schutzeinrichtungen im IT-Netz ..... 210
3.13.3.4 Überprüfung der Abschaltbedingung ..... 212

**4 CAE mit Elaplan ..... 213**

4.1 Allgemeines ..... 214

4.2 Erste Schritte ..... 215
4.2.1 Elaplan ModulCenter ..... 215
4.2.2 Projekt anlegen und verwalten ..... 215

4.3 Netzgrafik erfassen ..... 216
4.3.1 Netztopologie ..... 218
4.3.2 Unterschiedliche Netzeinspeisungen ..... 219
4.3.3 Betriebsmittel ..... 219
4.3.4 Herstellerunabhängige Stammdaten ..... 221
4.3.5 Projektkataloge ..... 222
4.3.6 Ansichten der Netzgrafik ..... 223
4.3.7 Schaltzustände ..... 224

4.4 Projekt berechnen ..... 225
4.4.1 Kurzschlussströme ..... 226
4.4.1.1 Anfangskurzschlusswechselstrom $I''_k$ ..... 228
4.4.1.2 Ausschaltwechselstrom $I_a$ ..... 228

4.4.1.3 Dauerkurzschlussstrom $I_k$ ... 228
4.4.1.4 Stoßkurzschlussstrom $I_p$ ... 229
4.4.2 Lastfluss ... 229
4.4.3 Netzschutz, Selektivität ... 232
4.4.4 Stromkreise, Kabeldimensionierung ... 239
4.4.5 Berechnung Oberschwingungen ... 242
4.5 Projekt Ergebnisse ... 243
4.5.1 Ergebnisdarstellung in der Netzgrafik ... 244
4.5.2 Staffeldiagramme – Ergebnis Selektivität ... 244
4.5.3 Ansichten und Druckausgaben ... 245
4.6 Systemvoraussetzungen von Elaplan ... 248
4.7 Vorteile der digitalen Arbeitsweise ... 248

**Literatur ... 249**

**Stichwortverzeichnis ... 259**