Vorwort

Das Fachbuch **Kurzschlussschutz in Niederspannungsinstallationen** richtet sich an alle aus der Elektrobranche, vom Lernenden über den Handwerker und Planer bis hin zum Techniker und Meister.

Das Buch wurde in sieben Kapitel gegliedert.

1. Kapitel Verbundnetze
Die Idee sowie der hierarchische Aufbau eines Verbundnetzes werden in kompakter Form dargestellt. Zusätzlich wird auf die Struktur der Netzsysteme eingegangen. Beispiele zur Objekterschliessung, sowohl mit als auch ohne zentralen Erdungspunkt (ZEP), runden die Darstellung ab.

2. Kapitel Kurzschlussströme in Drehstromnetzen
Im Fokus stehen die Auswirkungen von Kurzschlüssen in den verschiedenen Netzsystemen. Darüber hinaus wird das Kapitel Schutz gegen elektrischen Schlag der Niederspannungs – Installationsnorm ausführlich behandelt. Anhand praxisnaher Berechnungsbeispiele wird der Zusammenhang zwischen Theorie und Anwendung nachvollziehbar erläutert.

3. Kapitel Ermittlung von Kurzschlussströmen in Niederspannungs – Drehstromnetzen
Gestützt auf die Norm SN EN 60909-0 werden die Methoden zur Berechnung von Kurzschlussströmen detailliert erläutert. Ergänzend dazu wird das Messen der Schleifenimpedanz mit einem Installationstester und mit einem Hochstrom – Impedanztester beschrieben.

4. Kapitel Schutzeinrichtungen in Niederspannungs – Drehstromnetzen
Einleitend werden mögliche Störfälle in Niederspannungsinstallationen beschrieben. Anschliessend folgt eine detaillierte Darstellung der Funktionsweise verschiedener Schutz- und Überwachungseinrichtungen.

5. Kapitel Nachweis der Kurzschlussfestigkeit
Kurzschlussströme können in elektrischen Installationen sowohl mechanische als auch thermische Schäden verursachen. Dieses Kapitel zeigt auf, welche Aspekte zu beachten sind, um im Kurzschlussfall Schäden an der elektrischen Installation möglichst zu vermeiden.

6. Kapitel Elektroinstallationen in Gewerbe und Industrie
Durch zahlreiche Berechnungsbeispiele aus Gewerbe- und Industrieinstallationen wird die gesamte Thematik praxisnah vertieft. Die Beispiele fördern das Verständnis und dienen zugleich als Leitfaden zur Lösung ähnlicher Aufgabenstellungen im Berufsalltag.

7. Kapitel PV – Anlagen und Batteriespeicher
Abschliessend werden Kurzschlusssituationen in PV – Anlagen und Batteriespeichersystemen analysiert und praxisgerechte Lösungsvorschläge aufgezeigt und dokumentiert.

Anhang
Im Anhang finden sich ergänzende Informationen und vertiefende Erläuterungen zu den Kapiteln.

Danksagung

Für die Erstellung dieses Fachbuches war ich auf zahlreiche Herstellerinformationen angewiesen. Allen, die mich dabei unterstützt haben, gilt mein herzlicher Dank. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Marc Erismann von der Firma Rockwell Automation. Sein fundiertes Fachwissen und seine engagierte Unterstützung waren für mich von grosser Bedeutung und haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Mein besonderer Dank gilt zudem der Firma Sonepar Suisse AG für ihre wertvolle Unterstützung.

Ich wünsche Ihnen viel Erfolg bei Ihrer Tätigkeit und hoffe, dass Ihnen dieses Buch dabei eine wertvolle Hilfe sein wird.

Pascal Canova
Chur, August 2025

Inhaltsverzeichnis

1 Verbundnetze 18
1.1 Europäische Verbundsysteme (EV) 18
1.2 Schweizerisches Verbundnetz (220kV und 380kV) 19
1.3 Lokales Verteilnetz 20
1.3.1 Grundsätzliches zur Erschliessung 20
1.3.1.1 Erschliessung aus dem lokalen Verteilnetz 20
1.4 Dreiphasenwechselstrom ⇨ Drehstrom 21
1.4.1 Stern- und Dreieckverkettung 22
1.4.2 Vierleiternetz 23
1.5 TN – System ⇨ Allgemeines 24
1.5.1 TN – C System 24
1.5.2 TN – S System 25
1.5.3 TN – C – S System 25
1.5.4 Beispiel einer Gebäudeerschliessung für Kleinanlagen 26
1.5.5 Beispiel einer Gebäudeerschliessung für Grossanlagen 27
1.5.6 Beispiel einer Gebäudeerschliessung für Mittelspannungsbezüger 28
1.5.7 ZEP mit zwei Transformatoren für den Parallelbetrieb 29
1.5.8 ZEP mit einem Transformator und einem Generator für Parallel- oder Inselbetrieb 30
1.6 TT – System ⇨ Allgemeines 31
1.6.1 TT – System 31
1.7 IT – System ⇨ Allgemeines 32
1.7.1 IT – System (Stromquelle in Sternschaltung ohne Erdverbindung) 32
1.7.2 IT – System (Stromquelle in Sternschaltung mit Erdverbindung) 32
1.7.3 IT – System (Stromquelle in Dreieckschaltung ohne Erdverbindung) 33
1.7.4 IT – System (Stromquelle in Dreieckschaltung mit Erdverbindung) 33
1.8 Zusammenfassung 35

2 Kurzschlussströme in Drehstromnetzen 38
2.1 Kurzschlüsse 38
2.1.1 Begriffserläuterung zur Thematik 39
2.1.2 Stromquellen im Kurzschlussfall 41
2.1.3 Kurzschlussarten 43
2.1.3.1 Dreipoliger Kurzschluss im TN – System (idealisierte Darstellung) 43
2.1.3.2 Zweipoliger Kurzschluss im TN – System (idealisierte Darstellung) 44
2.1.3.3 Einpoliger Kurzschluss im TN – System (idealisierte Darstellung) 45
2.1.3.3.1 Erdschluss im TN – System (leitfähiges Teil ohne Schutzleiterverbindung) 47
2.1.3.4 Einpoliger Kurzschluss im TT – System (idealisierte Darstellung) 50
2.1.3.4.1 Einpoliger Kurzschluss im TT – System: automatische Abschaltung mit Überstrom – Schutzeinrichtungen 52

2.1.3.4.2 Einpoliger Kurzschluss im TT – System: automatische Abschaltung mit Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 53
2.1.3.5 Erdschluss im IT – System 54
2.1.3.6 Übersicht der Systeme nach Art der Erdverbindung im Fehlerfall 58
2.1.3.7 Niederspannungskurzschlüsse und ihre Auswirkungen auf das vorgelagerte Mittelspannungsnetz 60
2.1.3.7.1 Übertragung eines dreipoligen Kurzschlusses 60
2.1.3.7.2 Übertragung eines zweipoligen Kurzschlusses 61
2.1.3.7.3 Übertragung eines einpoligen Kurzschlusses 62
2.1.4 Stromverlauf im Kurzschlussfall 63
2.2 Zusammenfassung 65

3 Ermittlung von Kurzschlussströmen in Niederspannungs – Drehstromnetzen ..68

3.1 Allgemeines aus der NIN (SN 411000) 68
3.2 Berechnungsmethoden 69
3.2.1 Methode der Ersatzspannungsquelle 70
3.2.2 Voraussetzungen für die Berechnungsmethoden 71
3.2.2.1 Symmetrische und unsymmetrische Kurzschlüsse 72
3.2.2.1.1 Dreipoliger Kurzschluss → Mitsystem 73
3.2.2.1.2 Zweipoliger Kurzschluss → Mit- und Gegensystem 73
3.2.2.1.3 Einpoliger Kurzschluss → Mit-, Gegen- und Nullsystem 74
3.2.2.1.4 Zusammenfassung Mit-, Gegen- und Nullsystem 74
3.2.3 Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel 75
3.2.3.1 Netzeinspeisung 76
3.2.3.2 Synchrongeneratoren 79
3.2.3.2.1 Synchrongeneratoren nach Abklingen der Ausgleichsvorgänge 83
3.2.3.3 Transformatoren 85
3.2.3.3.1 Resistanzen, Reaktanzen und Impedanzen von Transformatoren 86
3.2.3.3.1.1 Korrekturfaktor für Transformatoren 89
3.2.3.3.1.2 Parallelschaltung von Transformatoren 90
3.2.3.3.1.3 Nullimpedanz von Transformatoren 91
3.2.3.4 Leitungsnetz 94
3.2.3.4.1 Kurzschlussimpedanz im Mit- und Gegensystem 95
3.2.3.4.2 Kurzschlussimpedanz im Nullsystem 97
3.2.3.4.3 Formelübersicht zum Thema Leitungsnetz 99
3.2.3.4.4 Technische Kabeldaten 100
3.2.3.4.4.1 GKN Energiekabel 100
3.2.3.4.4.2 Niederspannungs – Energiekabel 102
3.2.3.4.4.3 Gebäudekabel 104
3.2.3.4.4.4 Sicherheitskabel 106
3.2.3.5 Stromschienen ⇨ Sammelschienen 108
3.2.3.5.1 Stromschienen in Elektroverteilungen 108

3.2.3.5.2 Stromschienen als Verteilsystem 110
3.2.3.6 Asynchronmotoren 112
3.2.4 Netzschaltplan mit Kurzschlussstellen 114
3.2.4.1 Berechnungsmethode Anwendungsbereich 1 115
3.2.4.2 Berechnungsmethode Anwendungsbereich 2 122
3.2.4.3 Berechnungsmethode Anwendungsbereich 3 127
3.2.4.4 Kurzschlussstrombestimmung mittels Nomogramm 128
3.2.4.5 Datenvergleich Kurzschlussstrombestimmungen 130
3.3 Messen der Schleifenimpedanz 131
3.3.1 Messung mit Installationstester 131
3.3.1.1 Messungenauigkeit mit Installationstester 133
3.3.2 Messung mit Hochstrom – Impedanztester 135
3.4 Zusammenfassung 136

4 Schutzeinrichtungen in Niederspannungs – Drehstromnetzen 138

4.1 Mögliche Störfälle in Niederspannungsinstallationen 138
4.1.1 Spannungsstörungen 139
4.1.1.1 Störungen infolge transienter Überspannung 139
4.1.1.2 Störungen infolge Überspannung 140
4.1.1.3 Störungen infolge Unterspannung 140
4.1.1.3.1 Beispiel einer transienten Überspannung 141
4.1.1.3.2 Beispiel einer «konstanten» Überspannung 142
4.1.1.3.3 Grobübersicht Unterspannung 143
4.1.2 Stromstörungen 144
4.1.2.1 Überlast 144
4.1.2.2 Kriech- und Erdfehlerströme 145
4.1.2.2.1 Beispiel 1 ⇨ Überstrom durch Überlast 146
4.1.2.2.2 Beispiel 2 ⇨ Überlast von Bauteilen 147
4.1.2.2.3 Beispiel Überstrom durch Kurzschluss → vollkommen 148
4.1.2.2.4 Beispiel Überstrom durch Kurzschluss ⇨ unvollkommen 149
4.1.2.2.5 Beispiel Kriechfehlerströme 151
4.1.3 Lichtbogen 152
4.1.3.1 Gewollter Lichtbogen ⇨ Unterbrechen aktiver Stromkreise 152
4.1.3.2 Störlichtbogen 154
4.1.3.3 Fehlerlichtbogen 154
4.1.3.3.1 Grobübersicht gewollter Lichtbogen 155
4.1.3.3.2 Grobübersicht Störlichtbogen 155
4.1.3.3.3 Grobübersicht Fehlerlichtbogen 156
4.1.4 Übersicht der Schutz- und Überwachungseinrichtungen 157
4.2 Schutzeinrichtungen für Niederspannungsinstallationen 158
4.2.1 Schutzeinrichtungen gegen Spannungsstörungen 159

4.2.1.1 Blitz- und Überspannungsschutz für transiente Überspannungen 159
4.2.1.1.1 Kenngrössen von Blitz- und Überspannungsschutzgeräten 160
4.2.1.1.2 Anschlussschema von Blitz- und Überspannungsschutzgeräten 161
4.2.1.1.3 Vorsicherung für Blitz- und Überspannungsschutzgeräten 162
4.2.1.1.4 Anschlussquerschnitte für Überspannungsableiter 163
4.2.1.1.5 Montagehinweise für Überspannungsableiter (1. Teil) 164
4.2.1.1.5.1 Montagehinweise für Überspannungsableiter (2. Teil) 165
4.2.1.2 Überspannungsauslöser 166
4.2.1.3 Unterspannungsauslöser 166
4.2.1.4 Vektorsprungrelais 167
4.2.2 Schutzeinrichtungen gegen Stromstörungen 168
4.2.2.1 Überlast- und Kurzschlussschutz 168
4.2.2.1.1 Ablaufschema zur Ermittlung von Überstrom – Schutzeinrichtungen 169
4.2.2.1.2 Anforderungen an Kurzschlussschutzeinrichtungen 170
4.2.2.2 Überstrom – Schutzeinrichtungen ⇨ Schmelzsicherungen 171
4.2.2.2.1 Typische Merkmale von Schmelzsicherungen 172
4.2.2.2.1.1 Prinzip der Abschaltung von Schmelzsicherungen im Detail 173
4.2.2.2.1.2 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie) 174
4.2.2.2.2 Miniatursicherungssysteme (GSS und KLS) 175
4.2.2.2.3 Aufbau der Normalleistungsschmelzsicherungen (NLS) 176
4.2.2.2.3.1 Auswahl Normalleistungsschmelzsicherungen (NLS) 177
4.2.2.2.3.2 Bezeichnungen der Normalleistungsschmelzsicherungen (NLS) 178
4.2.2.2.3.3 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NLS) 179
4.2.2.2.3.3.1 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NLS → DIAZED) 180
4.2.2.2.3.3.2 Strom – Begrenzungs – Diagramm NLS → DIAZED (gG/gL 500V~) 181
4.2.2.2.3.3.3 Stromwärmewert von Schmelzsicherungen NLS → DIAZED gG/gL 182
4.2.2.2.3.4 Schmelzsicherungen gPV 183
4.2.2.2.4 Beschriftung einer NHS (DIN) 184
4.2.2.2.4.1 Aufbau einer NHS (DIN) 185
4.2.2.2.4.2 Betriebsklassen und Leistungsabgabe von NHS (DIN) 186
4.2.2.2.4.3 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) 187
4.2.2.2.4.3.1 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 000 & 00 188
4.2.2.2.4.4 Strom – Begrenzungs – Diagramm NHS (gG/gL 500V~) 189
4.2.2.2.4.5 Durchlassenergie bzw. Stromwärmewert für NHS ⇨ gG/gL 190
4.2.2.2.4.5.1 Stromwärmewert von Schmelzsicherungen NHS ⇨ gG/gL 191
4.2.2.2.4.6 Durchlassenergie bzw. Stromwärmewert für NHS ⇨ aR 192
4.2.2.2.4.7 Besondere Umgebungstemperaturen 193
4.2.2.3 Überstrom – Schutzschalter ⇨ Leitungsschutzschalter (LS) 194
4.2.2.3.1 Prinzip der Abschaltung von Leitungsschutzschalter im Detail 195
4.2.2.3.2 Aufbau eines Leitungsschutzschalters (LS) 196
4.2.2.3.2.1 Thermischer und elektromagnetischer Auslöser eines LS 197

4.2.2.3.2.2 Beschriftung eines Leitungsschutzschalters 198
4.2.2.3.2.3 Auswahl von Leitungsschutzschalter 199
4.2.2.3.2.4 Auslösecharakteristik und I^2t – Durchlasswert 200
4.2.2.3.2.4.1 Auslösecharakteristik von Leitungsschutzschalter B + C 201
4.2.2.3.2.4.2 Auslösecharakteristik von Leitungsschutzschalter D + K 202
4.2.2.3.2.4.3 Auslösecharakteristik von Leitungsschutzschalter UC Z + C 203
4.2.2.3.2.4.4 Zusammenfassung LS Auslöseverhalten (bis I_N 63A) 204
4.2.2.3.2.4.5 Strom – Begrenzungs – Diagramm Leitungsschutzschalter (B und C) 205
4.2.2.3.2.4.6 Stromwärmewert Leitungsschutzschalter (B und C) 206
4.2.2.3.2.5 Beeinflussung des Auslöseverhaltens (Frequenz und Temperatur) 207
4.2.2.3.2.6 Korrekturfaktoren und Innenwiderstände der LS – Kontakte 208
4.2.2.3.2.7 Gleichspannungsanwendung von Leitungsschutzschalter 209
4.2.2.3.2.8 Selektiver Leitungsschutzschalter ⇨ SLS – Schalter 210
4.2.2.3.2.8.1 Strom – Begrenzungs – Diagramm SLS Auslösecharakteristik $E_{selektiv}$ 211
4.2.2.3.2.8.2 Stromwärmewert SLS Auslösecharakteristik $E_{selektiv}$ 212
4.2.2.3.2.9 Elektronisches Schutzschaltgerät 213
4.2.2.3.2.9.1 Auslösecharakteristik elektronisches Schutzschaltgerät 214
4.2.2.3.2.10 Back – up – Schutz 215
4.2.2.3.2.10.1 Technische Daten zu Back – up – Schutz für LS Typ B | C | D | K 216
4.2.2.4 Überstrom – Schutzschalter ⇨ Leistungsschalter 217
4.2.2.4.1 Leistungsschalter – Typen 218
4.2.2.4.2 Leistungsschalter ⇨ Allgemeines 219
4.2.2.4.2.1 Prinzipieller Aufbau eines Leistungsschalters 220
4.2.2.4.2.2 Einstellmöglichkeiten und Kennlinienerläuterung 221
4.2.2.4.2.2.1 Thermischer und elektromagnetischer Auslöser 222
4.2.2.4.2.2.2 Elektronischer Auslöser ⇨ Überlastschutz 223
4.2.2.4.2.2.3 Elektronischer Auslöser ⇨ Kurzschlussschutz mit stromabhängiger Kurzzeitverzögerung 224
4.2.2.4.2.2.4 Elektronischer Auslöser ⇨ Kurzschlussschutz mit unverzögerter Auslösung 225
4.2.2.4.2.2.5 Elektronischer Auslöser ⇨ Beispiel 226
4.2.2.4.2.3 Kennlinie der Durchlassenergie und Kurzschlussstrom (Variante 1) 227
4.2.2.4.2.4 Kennlinie der Durchlassenergie und Kurzschlussstrom (Variante 2) 228
4.2.2.4.2.5 Leistungsschalter im IT – System (Vergleich TN – und IT – System) 229
4.2.2.4.2.6 Mögliche Ausführungsformen und Zubehör 231
4.2.2.4.3 Übersicht Durchlassenergie der Kurzschlussschutzeinrichtungen 232
4.2.2.4.4 Motorschutzschalter (MS) ⇨ Leistungs – Motorschutzschalter 233
4.2.2.4.4.1 Beschriftung eines Motorschutzschalters 234
4.2.2.4.4.2 Ausführungsvarianten mit Motorschutzschalter 235
4.2.2.4.4.3 Kennlinie der Durchlassenergie und Kurzschlussstrom 236
4.2.2.5 Motorschutz ⇨ Schutz vor Überlast 237
4.2.2.5.1 Mögliche Motorschutzeinrichtungen 238
4.2.2.5.1.1 Thermisches Motorschutzrelais 239

4.2.2.5.1.1.1 Allgemeines zu thermischen Motorschutzrelais 240
4.2.2.5.1.1.2 Auslösekennlinie eines thermischen Motorschutzrelais 241
4.2.2.5.1.2 Elektronisches Motorschutzrelais 242
4.2.2.5.1.2.1 Auslösekennlinien eines elektronischen Motorschutzrelais 243
4.2.2.5.1.3 Thermistor – Schutzrelais 244
4.2.2.5.1.3.1 Stromlaufschema mit Thermistor – Schutzrelais 245
4.2.2.6 Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 246
4.2.2.6.1 Anwendung der Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 247
4.2.2.6.1.1 Schutz gegen zu hohen Berührungsstrom ⇨ Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 248
4.2.2.6.2 Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen ⇨ Übersicht 249
4.2.2.6.3 Funktionsprinzip einer Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 250
4.2.2.6.4 Unterschiedliche Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 251
4.2.2.6.5 Aufbau Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen Typ B und B+ 252
4.2.2.6.6 Bemessungsfehlerstrom und Abschaltzeiten 253
4.2.2.6.7 Kurzzeitverzögerte Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 254
4.2.2.6.8 Selektive Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 255
4.2.2.6.8.1 Anwendung von selektiven Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 256
4.2.2.6.9 Zusammenbau einer Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 257
4.2.2.6.10 Fehlerstrom – Schutzschalter mit Überstromauslöser (RCBO) 258
4.2.2.6.11 Dimensionierung von Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 259
4.2.2.6.11.1 Back – up – Schutz für Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 260
4.2.2.6.12 Einbau von Überspannungsschutzeinrichtungen in Stromkreisen mit Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 261
4.2.2.6.13 Auswahlhilfe für Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 262
4.2.2.6.14 Steckdose mit Fehlerstrom – Schutzeinrichtung 263
4.2.2.6.15 Fehlerstrom – Schutzeinrichtung mit unterbrechungsfreier Prüffunktion 264
4.2.2.6.16 Prüfen von Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 265
4.2.2.6.17 Anwendung von Fehlerstrom – Schutzeinrichtungen 266
4.2.2.7 Lichtbogen – Schutzeinrichtungen 267
4.2.2.7.1 Störlichtbogen – Schutzeinrichtungen 267
4.2.2.7.2 Fehlerlichtbogen – Schutzeinrichtung AFDD ⇨ Brandschutzschalter 268
4.2.2.8 Überwachungseinrichtungen 270
4.2.2.8.1 Differenzstrom – Überwachungseinrichtung 270
4.2.2.8.2 Isolations – Überwachungseinrichtungen 272
4.2.2.8.2.1 Isolations – Überwachungseinrichtung → Funktionsprinzip 273
4.2.2.8.2.1.1 Isolationsfehlersucheinrichtung → Funktionsprinzip 274
4.2.3 Selektivität 275
4.2.3.1 Selektivität im Kurzschlussfall ⇨ Stromselektivität 276
4.2.3.1.1 Selektivität ⇨ Schmelzsicherung – Schmelzsicherung (≥ 0.1s) 277
4.2.3.1.2 Selektivität ⇨ Schmelzsicherung – Schmelzsicherung (< 0.1s) 278
4.2.3.1.3 Selektivität ⇨ Leitungsschutzschalter – Leitungsschutzschalter 279
4.2.3.1.4 Selektivität ⇨ Schmelzsicherung – Leitungsschutzschalter 280

4.2.3.1.5 Selektivität ⇨ Schmelzsicherung – Leistungsschalter 281
4.2.3.1.6 Selektivität ⇨ Leistungsschalter – Schmelzsicherung 282
4.2.3.1.7 Selektivität ⇨ Leistungsschalter – Leistungsschalter 283
4.2.3.1.8 Versorgungsausfall trotz Einhaltung der Selektivität 284
4.3 Zusammenfassung 285

5 Nachweis der Kurschlussfestigkeit 288

5.1 Allgemeines zur Kurzschlussfestigkeit 288
5.1.1 Kurzschlussfestigkeit von Betriebsmitteln 289
5.1.1.1 Kurzschlussfestigkeit von Transformatoren 289
5.1.1.1.1 Transformatoren ⇨ Dauerkurzschlussstrom 289
5.1.1.1.2 Transformatoren ⇨ Stosskurzschlussstrom 292
5.1.1.1.2.1 Kraftwirkung auf der Sekundärseite von Transformatoren 294
5.1.1.2 Niederspannungs – Schaltgeräte 295
5.1.1.3 Niederspannungs – Schaltgerätekombinationen 298
5.1.1.3.1 Nachweis Kurzschlussfestigkeit einer Schaltgerätekombination 298
5.1.2 Thermische Wirkung auf die elektrischen Betriebsmittel 302
5.1.2.1 Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom 302
5.1.2.1.1 Bemessungs – Kurzzeitstrom und thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom 304
5.1.2.1.1.1 Stromwandler 305
5.1.2.1.1.2 Reihenklemmen 306
5.1.3 Übersicht Kurzschlussbemessungsgrössen 307
5.1.4 Thermische Kurzschlussfestigkeit für Leiter, Kabel und Leitungen 308
5.1.4.1 Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit 311
5.1.4.1.1 Kurzschlussdauer t kleiner als 0.1s ⇨ schnelle Abschaltung 311
5.1.4.1.1.1 Praxisbeispiel Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit 315
5.1.4.1.2 Kurzschlussdauer t ab 0.1s bis 5s 317
5.1.4.1.2.1 Kurzschlussstrom $I_{kmin.}$ für PVC und VPE / EPR – isolierte Kabel und Leitungen 320
5.1.4.1.2.2 Bemessungs – Kurzzeitstrom I_{thr} und Kurzschlussbelastbarkeit I_{th} von Kabel und Leitungen 321
5.1.4.1.3 Schutz parallel geschalteter Kabel und Leitungen 322
5.1.4.1.3.1 Allgemeines 322
5.1.4.1.3.1.1 Kurzschlussschutz von parallel geschalteten Kabel- und Leitungen 324
5.1.4.1.4 Schutz von Erdungsleiter und Schutzleiter 327
5.1.4.1.4.1 Schutz von Erdungsleiter 328
5.1.4.1.4.2 Schutz von Schutzleiter 329
5.1.4.1.5 Stromschienen 331
5.1.4.1.6 Schutz vor Kurzschluss durch andere Massnahmen 334
5.2 Zusammenfassung 335

6 Elektroinstallationen in Gewerbe und Industrie 338

6.1 Erschliessungen 340

6.1.1 Erschliessung mit Anschlussleitung VNB 340
6.1.1.1 Berechnung Erschliessung mit Anschlussleitung VNB 340
6.1.2 Erschliessung mit einem Transformator 342
6.1.2.1 Berechnung Erschliessung mit einem Transformator 342
6.1.2.1.1 Ausführungsvariante 347
6.1.3 Erschliessung mit zwei Transformatoren 348
6.1.3.1 Berechnung Erschliessung mit zwei Transformatoren 348
6.1.3.1.1 Ausführungsvariante 353
6.2 Stromerzeugungsaggregate / Ersatzstromaggregate 354
6.2.1 Stromerzeugungsaggregat im Netzparallelbetrieb 356
6.2.1.1 Berechnung Stromerzeugungsaggregat im Netzparallelbetrieb 357
6.2.2 Stromerzeugungsaggregat im Notstrombetrieb 363
6.3 Kurzzusammenfassung Selektivität 366
6.3.1 Fallbeispiele zum Thema Selektivität mit Leistungsschalter 367
6.3.1.1 Fallbeispiel 1 ⇨ Lösung mit Stromselektivität 368
6.3.1.2 Fallbeispiel 2 ⇨ Lösung mit Strom – Teilselektivität 369
6.3.1.2.1 Fallbeispiel 2 ⇨ Lösung mit Zeitselektivität 370
6.4 Statische USV – Anlagen 371
6.4.1 Statische USV – Anlage im Bypass – Betrieb 374
6.4.1.1 Statische USV – Anlage im Bypass – Betrieb mit einem Fehler 375
6.4.2 Statische USV – Anlage im Online – und Batteriebetrieb 376
6.4.2.1 Statische USV – Anlage im Batteriebetrieb mit einem Fehler 379
6.5 Stromversorgung für Sicherheitszwecke 380
6.5.1 zusätzliche Einspeisung als Stromquelle für Sicherheitszwecke 382
6.5.2 Bestimmen des Leiterquerschnittes für Elektroinstallationen mit Funktionserhalt 384
6.6 Antriebstechnik 392
6.6.1 Schützensteuerung 393
6.6.1.1 Konventionelle Schützen 393
6.6.1.2 Kontaktmaterial und Kontaktausführungen 395
6.6.1.3 Gebrauchskategorien 397
6.6.1.4 Serie- und Parallelschalten von Kontakten (gilt für alle Schaltgeräte) 398
6.6.1.5 Technische Daten eines Schütz der Firma Rockwell Automation 399
6.6.1.6 Kurzschlusskoordination mit Schmelzsicherungen 400
6.6.1.6.1 Direktanlauf mit Schmelzsicherung und Motorschutzrelais 401
6.6.1.6.2 Stern – Dreieck mit Schmelzsicherung und Motorschutzrelais 403
6.6.1.7 Kurzschlusskoordination mit Leistungsschalter (Zuordnungsart 1) 404
6.6.1.7.1 Kurzschlusskoordination mit Leistungsschalter (Zuordnungsart 2) 405
6.6.1.7.2 Direktanlauf mit Leistungsschalter 406
6.6.1.7.3 Direktanlauf mit Leistungsschalter und Drehrichtungswechsel 407
6.6.1.8 Kurzschlusskoordination mit Motorschutzschalter (Zuordnungsart 2) 408
6.6.1.8.1 Mehrfachabgänge mit Schmelzsicherung und Motorschutzschalter 409

6.6.1.9 Elektronisches Schütz → Halbleiterschütz 411
6.6.1.9.1 Kurzschlusskoordination für Halbleiterschütz 413
6.6.2 Softstarter 414
6.6.2.1 Ausführungsvariante Netzanschluss mit Überbrückungsschütz 418
6.6.2.2 Ausführungsvariante Deltaanschluss mit Überbrückungsschütz 419
6.6.3 Frequenzumrichter (FU) 420
6.6.3.1 Elektroschema Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis 421
6.6.3.2 Frequenzumrichter und Ableitströme 423
6.6.3.3 Frequenzumrichter mit Dimensionierungsbeispiel 424
6.6.3.4 Frequenzumrichter mit Rückspeisung 426
6.6.4 Steuerstromkreise 427
6.6.4.1 Beispiel einer Motorensteuerung mit Wechselspannung 428
6.6.4.2 Speisung über Schaltnetzteil 431
6.6.4.2.1 Beispiel einer Steuerung mit Schaltnetzteil 432
6.7 Zusammenfassung 434

7 PV – Anlagen und Batteriespeicher 436

7.1 Systeme nach Art der Erdverbindung bei Gleichstrom 437
7.1.1 TN – System (DC) 437
7.1.1.1 TN – C System (DC) 437
7.1.1.2 TN – C – S System (DC) 438
7.1.1.3 TN – S System (DC) 439
7.1.1.4 TT – System (DC) 441
7.1.1.5 IT – System (DC) 442
7.2 Ausschalten von Stromkreisen mit Gleichstrom 443
7.2.1 Lichtbogen, Lichtbogenspannung und Lichtbogenlöschung 443
7.3 Wechselrichter (WR) 446
7.3.1 Niederspannungsanschluss AC – seitig am Wechselrichter 447
7.3.1.1 Installationsbeispiele 448
7.3.2 Wechselrichter mit Transformator (mit galvanischer Trennung) 450
7.3.3 Wechselrichter ohne Transformator (ohne galvanische Trennung) 451
7.3.4 Kurzschlussverhalten der Wechselrichter bei Netzkoppelung 452
7.3.4.1 Kurzschlussverhalten der Wechselrichter bei Notstrombetrieb 453
7.4 Gleichspannungs- bzw. Gleichstromseite 454
7.4.1 Solarkabel 455
7.4.2 Spannungs- und Stromverlauf auf der DC – Seite 456
7.4.3 Solarmodule und Stecksystem 458
7.4.4 Generatoranschlusskasten (GAK) 461
7.5 Batterieanschlüsse und Notstrombetrieb 463
7.5.1 AC – gekoppeltes elektrisches Energiespeichersystem 463
7.5.2 DC – gekoppeltes elektrisches Energiespeichersystem 466

7.6 PV – Grossanlagen 469
7.6.1 Berechnung des Kurzschlussstroms an der NSHV 471
7.7 BESS → Batterie – Energiespeichersystem 479
7.7.1 Prinzipschema DC gekoppeltes Batterie – Energiespeichersystem 480
7.7.2 Prinzipschema AC gekoppeltes Batterie – Energiespeichersystem 481
7.7.3 Relevante Punkte bei der Planung und Installation von Batterie – 483
7.8 Zusammenfassung 490
8 Anhang 492
8.1 Verbundnetze 492
8.1.1 Sternschaltung: Vektorenaddition 492
8.1.2 Dreieckschaltung: Vektorenaddition 493
8.1.3 Liniendiagramm Strang- und Aussenleiterspannungen 494
8.2 Kurzschlussströme in Drehstromnetzen 495
8.2.1 Elektrische Isolierstoffe 495
8.2.1.1 Prüfen elektrischer Eigenschaften an Isolierstoffen 496
8.2.1.1.1 Messen des Durchgangswiderstandes 496
8.2.1.1.2 Messen des Oberflächenwiderstandes 496
8.2.1.1.3 Messen der Durchschlagsfestigkeit 497
8.2.1.1.4 Prüfen der Lichtbogenfestigkeit 497
8.2.1.1.5 Prüfen der Kriechstromfestigkeit 497
8.2.1.2 Arrhenius – Diagramm 498
8.2.2 Kabelaufbau bzw. Aderisolierung 499
8.2.2.1 Spannungsangaben bei Niederspannungskabel 501
8.2.2.1.1 Spannungsschwankungen aufgrund von Fehlerbedingungen 502
8.2.2.2 Isolationsschaden an einer Leitung 503
8.2.2.2.1 Mechanische Einwirkungen auf die Leitungsisolation 504
8.2.2.2.2 Umwelteinwirkungen auf die Leitungsisolation (generell Isolierstoffe) 505
8.2.2.3 Isolationsprüfung 506
8.2.2.3.1 Isolationsmessung und seine Grenzen 507
8.3 Ermittlung von Kurzschlussströmen in Niederspannungs – Drehstromnetzen 508
8.3.1 Technische Daten Synchrongenerator Baureihe DSG 508
8.3.2 Nullimpedanz von Kabel und Leitungen 509
8.4 Schutzeinrichtungen für Niederspannungs – Drehstromnetzen 511
8.4.1 Abkürzungen und Fachbegriffe 511
8.4.2 Spannungsangaben für Blitz- und Überspannungsschutzgeräte 512
8.4.3 Schmelzsicherungen NHS 513
8.4.3.1 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 0 513
8.4.3.2 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 1 514
8.4.3.3 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 2 515
8.4.3.4 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 3 516

8.4.3.5 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 4 517
8.4.3.6 Abschmelzcharakteristik (Zeit – Strom – Kennlinie von NHS) Gr. 4a 518
8.4.4 Einrichtungen zum Trennen und Schalten 519
8.5 Nachweis der Kurzschlussfestigkeit 520
8.5.1 Kurzschlussstromverlauf und Abschätzen der Durchlassenergie 520
8.6 PV – Anlagen und Batteriespeicher 522
8.6.1 Abkürzungen und Fachbegriffe 522
8.6.2 Übersicht Systeme zur Erzeugung und Speicherung von Elektrizität 523
8.6.2.1 Übersicht Wechselrichter, Einsatzgebiete und Richtwerte für Kurzschlussströme 524
8.6.3 Gängige Batterietechnologien als Energiespeicher 525
8.6.3.1 Übersicht BESS; Richtwerte für Kurzschlussströme 527
9 Stichwortverzeichnis 528

3.2.4 Netzschaltplan mit Kurzschlussstellen

Wie eingangs erwähnt, lassen sich drei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung von Kurzschlussstromgrössen unterscheiden. Zur besseren Erläuterung der Vorgehensweise werden die drei Methoden, basierend auf nachfolgenden Netzschaltplan beschrieben. Am Ende werden die verschiedenen Methoden miteinander vergleichen. Es geht darum aufzuzeigen, wo die Vereinfachungen zu gravierenden Fehlinterpretationen führen und deshalb nur eingeschränkt anwendbar sind.

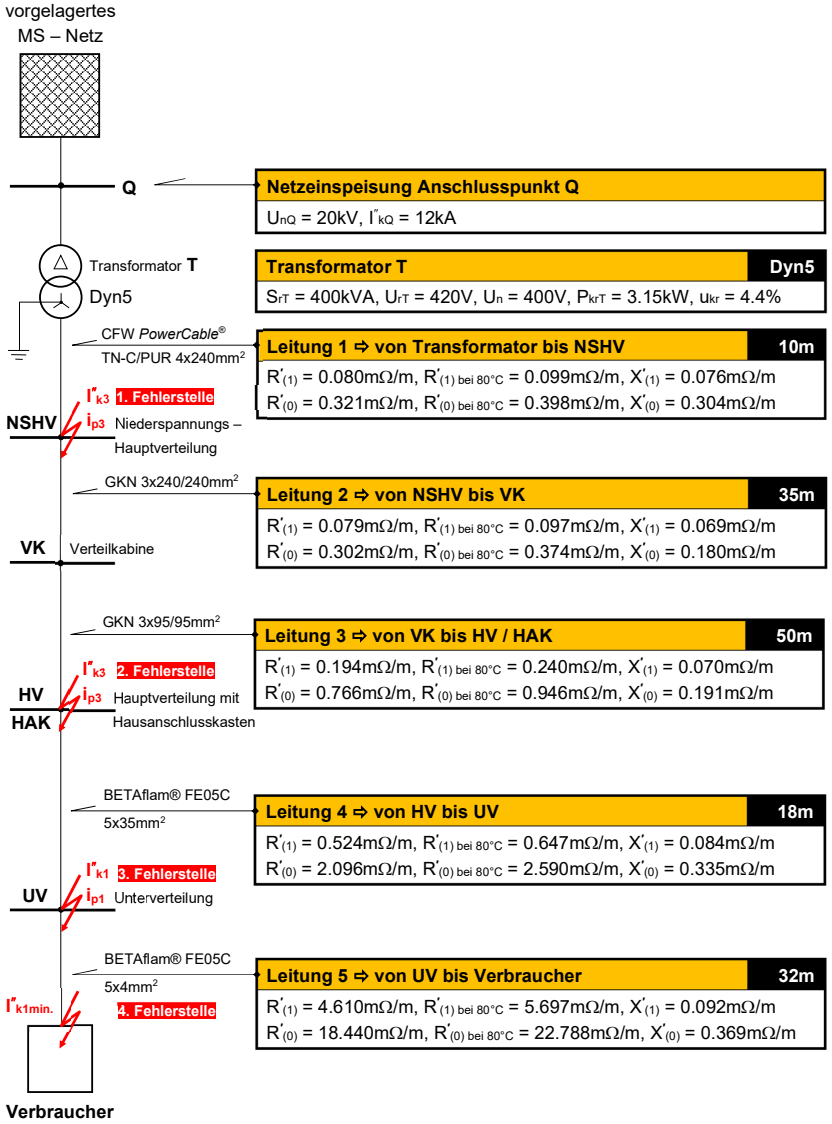

Bild 3.26 Netzschaltplan mit Kurzschlussstellen: Daten für Anwendungsbereich 1

5.1.1.3 Niederspannungs – Schaltgerätekombinationen

Im Kurzschlussfall müssen natürlich auch Schaltgerätekombinationen die mechanischen und thermischen Wirkungen des Kurzschlussstromes bis zu dessen Abschaltung schadlos ertragen können. Je nach Grösse der Verteilung bzw. des zu erwartenden Kurzschlussstromes ist dafür ein Nachweis betreffend Kurzschlussfestigkeit der Schaltgerätekombination erforderlich. Es gibt diesbezüglich aber auch Ausnahmen. Nachfolgend deren zwei:

♦ Schaltgerätekombinationen mit einer Bemessungs – Kurzzeitstromfestigkeit I_{cw} oder einem bedingten Bemessungs – Kurzschlussstrom I_{cc} von höchstens 10kA (Effektivwert).

♦ Schaltgerätekombinationen oder Stromkreise von Schaltgerätekombinationen die durch strombegrenzende Schutzeinrichtungen, deren Durchlassstrom beim höchstzulässigen unbeeinflussten Kurzschlussstrom I_{cp} an den Einspeiseanschlüssen der Schaltgerätekombination 17kA nicht überschreitet.

5.1.1.3.1 Nachweis Kurzschlussfestigkeit einer Schaltgerätekombination

Hersteller von Schaltgerätekombinationen geben in Bezug auf die Kurzschlussfestigkeit Bemessungswerte an, bis zu welcher Kurzschlussstromgrösse die entsprechende Verteilung die mechanischen und thermischen Wirkungen, hervorgerufen durch den Kurzschlussstrom, standhaltet. Damit die Schaltgerätekombination eine ausreichende Kurzschlussfestigkeit aufweisen kann, ist der Hersteller auf die erforderlichen Netzdaten am Anschlusspunkt der Verteilung angewiesen.

Kurzschlussdaten des Netzes am Anschlusspunkt (generatorferne Kurzschlüsse)

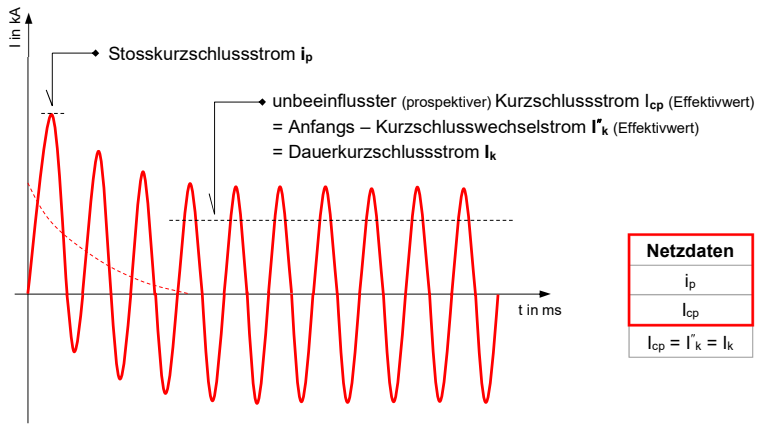

Bild 5.6 Kurzschlussdaten Netz → generatorferne Kurzschlüsse

Diese Kurzschlussdaten können, wie im Kapitel 3 erwähnt, erfragt, berechnet oder mittels Softwareprogramm ermittelt werden. Selbstverständlich ist auch eine Messung möglich. Dies setzt jedoch bereits eine Installation voraus. Es könnte sich dann z.B. um einen Ersatz einer Schaltgerätekombination handeln, wo durch eine Netzverstärkung die Kurzschlussfestigkeit der bestehenden Verteilung nicht mehr gewährleistet ist.

Übersicht Praxisbeispiele

6.1 Erschliessungen
6.1.1 Erschliessung mit Anschlussleitung VNB
6.1.2 Erschliessung mit einem Transformator
6.1.3 Erschliessung mit zwei Transformatoren

6.2 Stromerzeugungsaggregate / Ersatzstromaggregate
6.2.1 Stromerzeugungsaggregat im Netzparallelbetrieb
6.2.2 Stromerzeugungsaggregat im Notstrombetrieb

6.3 Kurzzusammenfassung Selektivität
6.3.1 Fallbeispiele zum Thema Selektivität mit Leistungsschalter
6.3.1.1 Fallbeispiel 1 ⇨ Lösung mit Stromselektivität
6.3.1.2 Fallbeispiel 2 ⇨ Lösung mit Strom – Teilselektivität
6.3.1.2.1 Fallbeispiel 2 ⇨ Lösung mit Zeitselektivität

6.4 statische USV – Anlagen
6.4.1 statische USV – Anlage im Bypass – Betrieb
6.4.2 statische USV – Anlage im Online – und Batteriebetrieb

6.5 Stromversorgung für Sicherheitszwecke
6.5.1 zusätzliche Einspeisung als Stromquelle für Sicherheitszwecke
6.5.2 Bestimmen des Leiterquerschnittes für Elektroinstallationen mit Funktionserhalt

6.6 Antriebstechnik
6.6.1 Schützensteuerung
6.6.1.6.1 Direktanlauf mit Schmelzsicherung und Motorschutzrelais
6.6.1.6.2 Stern – Dreieck mit Schmelzsicherung und Motorschutzrelais
6.6.1.7.2 Direktanlauf mit Leistungsschalter
6.6.1.7.3 Direktanlauf mit Leistungsschalter und Drehrichtungswechsel
6.6.1.8.1 Mehrfachabgänge mit Schmelzsicherung und Motorschutzschalter
6.6.1.9.1 Kurzschlusskoordination für Halbleiterschütz
6.6.2 Softstarter
6.6.2.1 Ausführungsvariante Netzanschluss mit Überbrückungsschütz
6.6.2.2 Ausführungsvariante Deltaanschluss mit Überbrückungsschütz
6.6.3 Frequenzumrichter (FU)
6.6.3.3 Frequenzumrichter mit Dimensionierungsbeispiel
6.6.3.4 Frequenzumrichter mit Rückspeisung
6.6.4 Steuerstromkreise
6.6.4.1 Beispiel einer Motorensteuerung mit Wechselspannung
6.6.4.2.1 Beispiel einer Steuerung mit Schaltnetzteil

7.3.1.1 Installationsbeispiele

Beispiel 1

3 – phasiger String – Wechselrichter mit einer AC – Nennwirkleistung von 15kW wird **a)** unmittelbar in der Nähe der Elektroverteilung und **b)** auf dem Dach beim Solargenerator montiert.

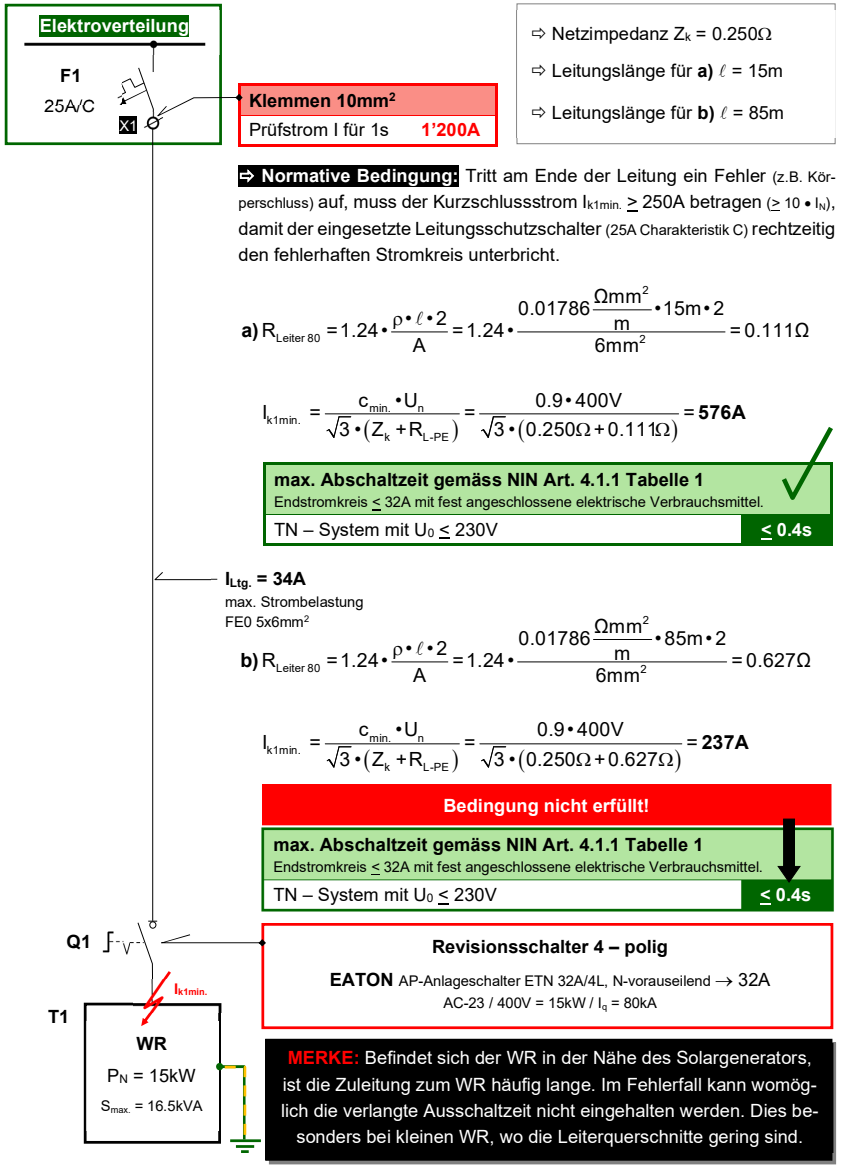

Bild 7.18 Installationsbeispiel 1 für AC – seitige WR – Speisung