

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Drehstromtechnik	5
2.1	Arten der Drehstromsysteme, Bezeichnungen	5
2.2	Schaltungen der Drehstromsysteme	6
2.3	Schaltungen des Generators	7
2.4	Schaltungen des Verbrauchers	9
2.5	Unsymmetrische Drehstromsysteme	11
2.6	Verkettungsfaktor	13
2.7	Einführung in die komplexe Rechnung	14
2.7.1	Begriffe und Rechenregeln	14
2.7.2	Rechenregeln für komplexe Zahlen	15
2.7.3	Komplexe Größen der Wechselstromtechnik	16
2.8	Leistungen im Drehstromsystem	17
2.9	Beispiele zur Wechselstromtechnik	19
2.9.1	Sinusspannung	19
2.9.2	Sinusstrom	19
2.9.3	Komplexe Größe	19
2.9.4	Belastung der Drehstromnetze	20
2.9.5	Symmetrisches System	20

2.9.6	Komplexe Zahl in Polar- und Exponentialform	20
2.9.7	Spannung in Polar-, Exponential- und Komponentenform	21
2.9.8	Stern-Dreieck-Schaltung	21
2.9.9	Stern-Stern-Schaltung	21
2.9.10	Verbraucher	22
2.9.11	Zählpeilsystem	24
2.10	Methode der Symmetrischen Komponenten	24
2.10.1	Symmetrische Komponenten	26
2.10.2	Impedanzen der Symmetrischen Komponenten	28
2.11	Beispiele zu Symmetrischen Komponenten	30
2.11.1	Einpoliger Kurzschlussstrom	30
2.11.2	Zweipoliger Kurzschlussstrom	30
2.11.3	Symmetrische Last	31
2.11.4	Unsymmetrische Fehler	31
2.11.5	Spannungen eines Generators	32
2.11.6	Zusammenfassung	33
3	Vorschriften und Normen	35
3.1	Bestandteile des VDE-Vorschriftenwerks	35
3.2	Die rechtliche Bedeutung des VDE-Werks	36
4	Darstellung der Schaltungsunterlagen	39
4.1	Begriffe	39
4.2	Planarten	39
4.3	Inhalt der Elektroinstallation	40
4.4	Bestimmung der Anschlussleistung	40
4.5	Elektrische Leistung	40
4.6	Anschlusswerte von Elektrogeräten	41
4.7	Richtwerte für die Anlagenberechnung	43
4.8	Berechnung der Leistung mit Speicherheizung und elektrischer Warmwasserversorgung	44

Inhaltsverzeichnis	IX
4.9 Elektrische Anlagen	45
4.10 Beispiel: Installation einer Küche	48
4.11 Beispiel: Industrieanlage	51
4.12 Beispiel: Energieversorgung einer Fabrik	52
5 Technische Anschlussbedingungen	55
6 Gesetzliche Regelungen	57
6.1 HOAI und VOB	57
6.2 Richtlinien für die Projektierung elektrischer Anlagen	58
6.3 Zusammenfassung	60
7 Kurzschlussstromberechnung	61
7.1 Begriffe und Definitionen	61
7.2 Verfahren der Ersatzspannungsquelle	64
7.3 Kurzschlussimpedanzen der Betriebsmittel	65
7.3.1 Netzeinspeisung	66
7.3.2 Beispiel: Berechnung der Netzeinspeisung	67
7.3.3 Transformatoren	68
7.3.4 Beispiel: Berechnung eines Transformators	69
7.3.5 Beispiel: Impedanz eines Transformators	70
7.3.6 Leitungen und Kabel	71
7.3.7 Beispiel: Berechnung eines Kabels	76
7.3.8 Synchrongeneratoren	76
7.3.9 Beispiel: Berechnung eines Generators	78
7.3.10 Asynchronmotoren	78
7.3.11 Beispiel: Impedanzberechnung	80
7.3.12 Beispiel: Hochspannungsmotor	80
7.3.13 Impedanzkorrekturen	81
7.4 Berechnung der Kurzschlussströme	84
7.4.1 Dreipoliger Kurzschluss	84

7.4.2	Beispiel für den dreipoligen Kurzschluss	85
7.4.3	Zweipoliger Kurzschluss	87
7.4.4	Beispiel für den zweipoligen Kurzschluss	87
7.4.5	Einpoliger Kurzschluss	88
7.4.6	Beispiel für den einpoligen Kurzschluss	90
7.4.7	Stoßkurzschlussstrom	91
7.4.8	Beispiel für den Stoßkurzschlussstrom	92
7.4.9	Ausschaltwechselstrom	92
7.4.10	Dauerkurzschlussstrom	93
7.4.11	Mehrfach einseitig gespeiste Kurzschlüsse	94
7.4.12	Thermische und dynamische Kurzschlussfestigkeit	94
7.4.13	Berechnung von Mehrfachfehlern	96
7.5	Beispiele zur Kurzschlussberechnung	98
7.5.1	Berechnung der Kurzschlussarten	98
7.5.2	Generatornaher Kurzschluss	102
7.5.3	Anschluss eines Transformators über ein Fremdnetz	103
7.5.4	Parallelschaltung von Generatoren und Transformatoren	105
7.5.5	Beitrag eines Hochspannungsmotors zum Kurzschlussstrom	106
7.5.6	Berechnung eines Industrienetzes mit verschiedenen Netzennspan- nungen	108
7.5.7	Kurzschlussfestigkeit eines Kabels	110
7.5.8	Thermische Kurzschlussfestigkeit eines Kabels	111
7.5.9	Berechnung eines Motoranschlusses	112
7.5.10	Berechnung eines Niederspannungsstrahlennetzes	113
7.6	Berechnung mit bezogenen Größen	124
7.6.1	Berechnung der Daten von HS-Motoren	124
7.6.2	Beispiele mit bezogenen Größen	126
7.6.3	Ermittlung der Kurzschlussströme bei einem 380-kV-Hochspannungsnetz	127
7.7	Zusammenfassung	133

8 Schutz gegen elektrischen Schlag	135
8.1 Schutz nach Art der Erdverbindungen im NS-Netz	136
8.1.1 Das TN-System	137
8.1.2 Das TT-System	142
8.1.3 Das IT-System	145
8.1.4 Zentraler Erdungspunkt	148
8.1.5 Arbeiten an elektrischen Anlagen	148
8.2 Zusammenfassung	149
9 Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen	151
9.1 Schutz bei Überlast	151
9.2 Schutz bei Kurzschluss	153
9.3 Strombelastbarkeit	154
9.3.1 Belastbarkeit im ungestörten Betrieb	154
9.3.2 Beispiel: Zuleitung einer Verteilung	162
9.3.3 Beispiel: Kabelbemessung eines Motors	162
9.3.4 Beispiel: Überprüfung der Stromwärmewerte	162
9.3.5 Thermische Kurzschlussfestigkeit	163
9.4 Querschnittsdimensionierung	164
9.4.1 Beispiel: Kabeldimensionierung eines Motors mit Aussetzbetrieb	165
9.5 Wahl der ÜSE	166
9.5.1 Beispiel: Leitungsberechnung	167
9.5.2 Bemessung einer Sicherung	168
9.5.3 Beispiel: Übertragung elektrischer Energie	170
9.6 Zusammenfassung	170
10 Bemessung des Schutzleiters	173
10.1 Bemessung des Hauptschutzleiters	173
10.2 Bemessung des Schutzleiters	174
10.3 Bemessung des Potentialausgleichsleiters	174

10.4	Zusätzlicher Schutz-Potentialausgleichsleiter	174
10.5	Zusammenfassung	175
11	Spannungsfallberechnung	177
11.1	Berechnungsgleichungen	177
11.1.1	Gleichstrom	178
11.1.2	Einphasen-Wechselstrom	179
11.1.3	Drehstrom	179
11.1.4	Spannungsfall an einer Ringleitung	181
11.1.5	Spannungsfall an einem Strahlennetz	182
11.2	Beispiel: Spannungsfall an einem Strang	183
11.3	Beispiel: Spannungsfall an einem Ringnetz	184
11.4	Beispiel: Bestimmung der Übertragungslänge	185
11.5	Spannungsfall in HS-Anlagen	186
11.6	Beispiele zu Spannungsfallberechnungen	188
11.6.1	Beispiel: Spannungsfall bei Wechselstrom	188
11.6.2	Beispiel: Spannungsfall an einer Freileitung	188
11.6.3	Beispiel: Schule	188
11.6.4	Beispiel: Gebäude	189
11.6.5	Beispiel: Versorgung einer Leitung	189
11.6.6	Beispiel: Straßenbeleuchtung	190
11.6.7	Beispiel: Beliebige Last	190
11.6.8	Beispiel: Spannungsfall an einem Ringnetz	190
11.6.9	Beispiel: Berechnung der Verluste	192
11.6.10	Beispiel: DS-Pumpenmotor	192
11.7	Zulässiger Spannungsfall nach TAB	193
11.8	Zulässiger Spannungsfall nach VDE	193
11.9	Zulässiger Spannungsfall nach NAV	194
11.10	Berechnung des zulässigen Spannungsfalls	194
11.11	Grenzlänge zur Einhaltung von Schutzmaßnahmen	195

11.12	Grenzlänge in Abhängigkeit von der Berührungsspannung	196
11.13	Berechnung der maximal zulässigen Leitungslängen	196
11.14	Beispiel: Ermittlung der zulässigen Kabellänge	197
11.15	Beispiel: Spannungsfallberechnung einer Motorzuleitung	197
11.16	Zusammenfassung	198
12	Selektivität und Back-up-Schutz	199
12.1	Selektivität zwischen zwei Leistungsschaltern	200
12.2	Der Leistungsschalter ist der Sicherung vorgeschaltet	200
12.3	Die Sicherung ist dem Leistungsschalter vorgeschaltet	201
12.4	Selektivität zwischen zwei Sicherungen	201
12.5	Die Sicherung ist dem Leitungsschutzschalter vorgeschaltet	202
12.6	Selektivität zwischen den Leitungsschutzschaltern	203
12.7	Back-up-Schutz	205
12.8	Zusammenfassung	205
13	Sicherungslose Schaltanlagen	207
13.1	Auswahl der Sicherungen	208
13.2	Auswahl der Leistungsschalter	209
13.3	Kennlinienvergleich mit Sicherungen und Leistungsschalter	209
13.4	Vergleich der Bauweise mit und ohne Sicherung	211
13.4.1	Projektionierung	211
13.4.2	Schutzfunktion	212
13.4.3	Bedienung und Wartung	212
13.4.4	Kostenvergleich	212
13.4.5	Beispiel: Einstellung der Kennlinien	213
13.5	Zusammenfassung	213
14	Blindstromkompensation	215

14.1 Berechnung der Blindleistung	217
14.2 Kompensationsplanung	220
14.3 Praktische Beispiele	221
14.3.1 Beispiel: Kompensation einer Anlage	221
14.3.2 Beispiel: Einzelkompensation von Transformatoren	221
14.3.3 Beispiel: Resonanzerscheinungen von Transformatoren	222
14.3.4 Beispiel: Kompensation einer Anlage	222
14.4 Zusammenfassung	223
15 Blitzschutzanlagen	225
15.1 Begriffe	225
15.2 Äußerer Blitzschutz	226
15.2.1 Fangeinrichtung	226
15.2.2 Ermittlung der Blitzschutzklasse	227
15.2.3 Ableitung	230
15.2.4 Erdungsanlage	231
15.2.5 Trennungsabstand	233
15.3 Innerer Blitzschutz	235
15.3.1 EMV-Blitzschutzzonen-Konzept	236
15.3.2 Überspannungsschutz	236
15.4 Zusammenfassung	238
16 Erdungen in Schaltanlagen	239
16.1 Begriffe	239
16.2 Erdung eines Umspannwerkes	241
16.3 Berechnung der zulässigen Berührungsspannung	243
16.4 Auslegungsverfahren der Erdungsanlage	246
16.5 Art der Sternpunktterdung	247
16.5.1 Isolierte Sternpunktterdung	247
16.5.2 Kompensierte Sternpunktterdung	248

16.5.3	Niederohmige Sternpunktterdung	249
16.6	Erderarten	250
16.7	Bemessung von Erdungsanlagen	255
16.8	Berechnung der Erdungswiderstände	256
16.8.1	TN-System auf der NS-Seite	256
16.8.2	TT-System auf der NS-Seite	257
16.9	Berechnung des Gesamterdungswiderstandes in NS-Netzen	257
16.10	Berechnung des Erdungswiderstandes von Erdschlusslöschspulen	257
16.11	Zusammenschluss oder Trennung von Erdungsanlagen	258
16.12	Hochspannungsschutzerder	259
16.12.1	Holzmasten mit Schalter	259
16.12.2	Masten mit Schalter	259
16.12.3	Schalt- und Umspannpunkte	259
16.13	Niederspannungsbetriebserder	260
16.14	Ausführung von Erdungsanlagen	260
16.15	Ersatzmaßnahmen	261
16.16	Elimination von Messfehlern	261
16.17	Messung von Erdungsanlagen	261
16.18	Erdungswiderstände in anderen Ländern	262
16.19	Erdungsberechnung nach IEEE Std 80	263
16.19.1	Tolerierbarer Körperstrom	263
16.19.2	Zulässige Berührungsspannungen	263
16.19.3	Berechnung des Querschnitts	264
16.19.4	Berechnung des maximalen Maschen-Fehlerstromes	264
16.20	Beispiel: Berechnung einer Erdungsanlage	266
16.21	Beispiel: Berechnung des Erdungswiderstandes einer Transformatorstation	267
16.22	Beispiel: Erdungswiderstand nach IEEE Std 80	268
16.23	Beispiel: Querschnittsermittlung	271

16.24	Beispiel: Querschnittsermittlung der Sternpunktleitung	272
16.25	Zusammenfassung	273
17	Niederspannungsanlagen	275
17.1	Verteileraufbau von NS-Anlagen	276
17.2	Zusammenfassung	281
18	Mittelspannungsanlagen	283
18.1	Normen zur Planung von Mittelspannungsanlagen	283
18.2	Betriebsverfügbarkeit	285
18.2.1	Arten von Schottungen	286
18.2.2	Störlichtbogenqualifikation	287
18.3	Projektierung	287
18.4	Mittelspannungs-Schaltgeräte	291
18.5	Aufstellung von Schaltanlagen	293
18.6	Auswahlgrößen	293
18.7	Isolierung	294
18.8	Raumplanung	294
18.9	Transformatoren	294
18.10	Erdung	295
18.11	Innenraum-Schaltfelder	296
18.12	Grundlagen der Netzplanung	296
18.13	Kriterien für die Anlagenauslegung	296
18.14	Bauformen von Schaltanlagen	298
18.15	Lasttrennschalteranlagen	298
18.16	Leistungsschalteranlagen	298
18.17	Leistungsschalter-Festeinbauanlagen	299
18.18	Schaltanlagen-Konstruktionen	299
18.19	Isolationskoordination	300
18.20	Schaltüberspannungen	301
18.21	Begrenzung von Überspannungen	301

18.22	Erdfehlerfaktor	302
18.23	Ableiterauswahl	302
18.24	Dimensionierung von MS-Anlagen	304
18.25	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	304
18.26	Bemessung des Einspeisekabels	307
18.27	Wirtschaftlicher Kabelquerschnitt	307
18.28	Zusammenfassung	313
19	Hochspannungsanlagen	315
19.1	Luftisolierte Schaltanlagen	316
19.2	Gasisolierte Schaltanlagen	317
19.3	Zusammenfassung	318
20	Sammelschienensystem	319
20.1	Einfachsammelschiene	319
20.2	Doppelsammelschiene	320
20.3	Hochstromschaltanlagen	321
20.4	Zusammenfassung	321
21	Schalt- und Schutzgeräte	323
21.1	Hochspannungs-Schutzgeräte	324
21.1.1	HH-Sicherungen	324
21.1.2	Trennschalter, Erdungsschalter und Überspannungsschutzgeräte . .	324
21.1.3	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ)	325
21.1.4	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ)	325
21.1.5	UMZ mit Richtungskriterium	325
21.1.6	Distanzschutz	326
21.1.7	Differentialschutz	326
21.1.8	Leistungsschalter	326
21.1.9	Strom- und Spannungswandler	327
21.1.10	Lastschalter	327

21.2 Niederspannungs-Schutzgeräte	327
21.2.1 Leitungsschutzschalter (MCB)	328
21.2.2 Belastbarkeit von Leitungsschutzschaltern	328
21.2.3 Nebeneinander montierte LS-Schalter	328
21.2.4 Schmelzsicherungen	332
21.2.5 RCD (Fehlerstromschutzschalter)	334
21.2.6 Hauptleitungs-Schutzschalter	335
21.2.7 Motorstarter	336
21.2.8 Leistungsschalter (MCCB)	338
21.2.9 Auslöser/Schutzfunktion	338
21.3 Zusammenfassung	339
22 Selektivschutztechnik in Verteilungsnetzen	341
22.1 Umfang der Selektivität	342
22.2 Auslegung des Netzschutzes	342
22.3 Leitungsschutz	344
22.3.1 UMZ-Schutz	344
22.3.2 Beispiele zu UMZ	346
22.3.3 AMZ-Schutz	347
22.4 Thermischer Überlastschutz	348
22.5 Differentialschutz	349
22.6 Beispiel zum Differentialschutz	349
22.7 Distanzschutz	350
22.8 Berechnung der Impedanz	353
22.9 Beispiele zum Distanzschutz	354
22.10 Erdschlussschutz	357
22.11 HH-Sicherungen	359
22.12 Transformatorschutz	361
22.13 Stationsschutz	363
22.14 Hochspannungs-Motorschutz	363

22.15 Generatorschutz	364
22.16 Strom- und Spannungswandler	365
22.17 Beispiel: Wandlerauslegung für Differentialschutz	368
22.18 Beispiel: Projektierung eines Mittelspannungsnetzes	370
22.19 Erstellung eines Staffelpans	373
22.20 Zusammenfassung	373
23 Lastflussrechnung	375
23.1 Notation der mathematischen Größen	376
23.2 Newton-Raphson-Verfahren	377
23.2.1 Beispiel: Lastflussberechnung	378
23.2.2 Beispiel: Anwendung des Newton-Raphson-Verfahrens	379
23.3 Zusammenfassung	379
24 Grundlagen elektrischer Maschinen	381
24.1 Einführung	381
24.2 Physikalische Gesetze	381
24.3 Transformator	384
24.3.1 Grundgleichungen von Transformatoren	386
24.3.2 Verluste im Transformator	388
24.3.3 Belastung von Transformatoren	391
24.3.4 Schaltgruppen von Transformatoren	393
24.3.5 Parallelschaltung von Transformatoren	393
24.3.6 Wirkungsgrad von Transformatoren	395
24.3.7 Wirtschaftlichkeit von Transformatoren	395
24.3.8 Schutz von Transformatoren	397
24.3.9 Auswahl von Transformatoren	397
24.3.10 Beispiel: Spannungsänderung von Transformatoren	399
24.3.11 Beispiel: Wirkungsgrad eines Transformators	399
24.3.12 Beispiel: Lastverteilung bei Transformatoren	399

24.3.13 Beispiel: Berechnung von Verlustleistungen	400
24.4 Asynchronmaschinen	401
24.4.1 Vorteile des Asynchronmotors	402
24.4.2 Entstehung des Drehfeldes	404
24.4.3 Typischer Drehmomentverlauf	405
24.4.4 Schlupf	405
24.4.5 Anlaufverfahren von Asynchronmaschinen	406
24.4.6 Steuerung von Asynchronmaschinen	406
24.4.7 Wahl des Motors	406
24.4.8 Frequenzumrichter	407
24.4.9 Beispiel: Leistungsabgabe eines Asynchronmotors	409
24.4.10 Beispiel: Leistungsaufnahme eines Asynchronmotors	409
24.4.11 Beispiel: Leistungsschild eines Asynchronmotors	409
24.4.12 Beispiel: Stern-Dreieck-Anlauf	410
24.4.13 Beispiel: Einspeisung mit drei Motoren	410
24.5 Einphasenwechselstrom-ASM	411
24.6 Synchrongenerator	413
24.6.1 Vollpol- und Schenkelpolläufer	413
24.6.2 Leistungsdiagramm des Turbogenerators	417
24.6.3 Beispiel: Berechnung des Polradwinkels	417
24.6.4 Beispiel: Berechnung des Leistungsdiagramms	418
24.6.5 Kenngrößen des Synchrongenerators	418
24.7 Gleichstrommaschinen	420
24.7.1 Wicklungsarten	422
24.7.2 Nebenschlussmotor	423
24.7.3 Beispiel: Berechnung eines GS-Nebenschlussmotors	423
24.7.4 Reihenschlussmotor	424
24.7.5 Beispiel: Berechnung der Daten eines Reihenschlussmotors	425
24.7.6 Doppelschlussmotor	426
24.7.7 Beispiel: Berechnung eines Doppelschlussmotors	426

24.7.8 Fremderregter Motor	427
24.7.9 Beispiel: Berechnung einer Arbeitsmaschine	428
24.8 EC-Motoren	428
24.9 Elektrische Antriebe	430
24.9.1 Last- und Motorkennlinien	430
24.9.2 Drehmomentkennlinie von Arbeitsmaschinen	431
24.10 Zusammenfassung	431
25 Regenerative Energiesysteme	433
25.1 Wasserkraftwerke	435
25.1.1 Berechnung der Leistung	436
25.1.2 Pumpspeicherkraftwerke	438
25.1.3 Beispiel: Pumpspeicherkraftwerk	439
25.2 Windkraft	440
25.2.1 Grundlagen zur Windenergienutzung	440
25.2.2 Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen	442
25.2.3 Anlagenbeispiele	442
25.2.4 Generatorsysteme	443
25.2.5 Beispiel: Auswahl von Windkraftanlagen	446
25.2.6 Beispiel: Parkverkabelung	447
25.2.7 Netzanbindung	448
25.2.8 Schaltpläne von WKA	449
25.2.9 Beispiel: Berechnung der Windleistung	450
25.2.10 Beispiel: Generator-Transformator	450
25.2.11 Beispiel: Berechnung der Kurzschlussleistung	451
25.2.12 Beispiel: Anschlussgesuch einer Windkraftanlage	452
25.3 Photovoltaik	454
25.3.1 pn-Übergang	456
25.3.2 Füllfaktor	459
25.3.3 Wirkungsgrad	460

25.3.4	Erzeugte Energie einer Dachfläche	460
25.3.5	Reihenschaltung	461
25.3.6	Parallelschaltung	461
25.3.7	Kenndaten von Photovoltaik-Anlagen	462
25.3.8	Wechselrichter	465
25.3.9	Beispiel: Planung eines Einfamilienhauses	466
25.3.10	Beispiel: Dimensionierung eines Wechselrichters	470
25.3.11	Planung von Photovoltaikanlagen	473
25.3.12	Anschlussbeurteilung von Photovoltaikanlagen	475
25.3.13	Prüfungen von Photovoltaik-Anlagen	477
25.4	Zusammenfassung	477
26	Netzanschlussregeln	479
26.1	Allgemeines zum Netzanschluss	479
26.2	Netzebene 7 (Niederspannungsnetz - 400 V)	481
26.3	Netzebene 6 (Umspannung von 10 kV/30 kV auf 400 V)	481
26.4	Netzebene 5 (Mittelspannungsnetz, 10 kV bis 30 kV)	482
26.5	Kriterien für den Anschluss in einer höheren Netzebene	482
27	Projektierung einer Industrieanlage	485
27.1	Beschreibung der Anlage	485
27.2	Anzuwendende Vorschriften	487
27.3	Verbrauchertabelle	490
27.4	Berechnungen	494
27.4.1	Leistungsermittlungsverbrauchertabelle	494
27.4.2	Berechnung des Querschnitts nach Spannungsfall	495
27.4.3	Schutz bei Überlast	495
27.4.4	Tatsächlicher Spannungsfall	495
27.4.5	Schutz durch Abschaltung	495
27.5	Berechnung der Innenraumbeleuchtung	496

27.6 Berechnung der Blitzschutzanlage	497
27.7 Berechnung der Kompensationsanlage	497
27.8 Planung der Transformatorstation	498
27.9 Planung der Notstromanlage	504
Formelzeichen	515
Abkürzungen	521
Indizes	523
Formelzeichen für die Elektrotechnik (ICE60027-7)	525
Schreibweisen in der Elektrotechnik	527
Literaturverzeichnis	529
Stichwortverzeichnis	539