

1	Der Strom kommt aus der Steckdose, oder?	1
	Literatur	6
2	Elektrische Energieversorgungssysteme	9
2.1	Definition und Aufgabe	9
2.2	Verbraucher und Erzeuger elektrischer Energie	10
2.2.1	Verbraucher	10
2.2.2	Erzeuger	15
2.3	Energieversorgungsnetze	19
2.3.1	Aufgabe und Struktur	19
2.3.2	Übertragungsnetze	20
2.3.2.1	Übertragungsnetze in Deutschland	20
2.3.2.2	Europäische Verbundnetze	28
2.3.3	Verteilnetze	34
2.3.3.1	Aufgabe der Verteilnetze	34
2.3.3.2	Hochspannungsnetze	34
2.3.3.3	Mittelspannungsnetze	35
2.3.3.4	Niederspannungsnetze	35
2.3.3.5	Vernetzte Systeme und Smart Grids	36
2.3.4	Netzkomponenten	36
2.3.4.1	Betriebsmittel	36
2.3.4.2	Leitungen und Transformatoren	36
2.3.4.2.1	Leitungen	37
2.3.4.2.2	Transformatoren	40
2.3.4.3	Schaltanlagen	42
2.3.4.4	Kompensationseinrichtungen	43
2.3.5	Sekundärtechnik	44
2.3.6	Netzausbau	45
2.4	Systemführung	49
2.4.1	Aufgabenstellung	49

2.4.2	Funktionsbereich Netzführung	51
2.4.3	Funktionsbereich Frequenzhaltung	51
2.4.4	Funktionsbereich Spannungshaltung	52
2.4.5	Funktionsbereich Wiederaufbau	53
2.5	Netzbetriebsführung	53
2.5.1	Überwachung und Steuerung des Netzes	53
2.5.2	Einhaltung von Spannungsgrenzen	53
2.5.3	Einhaltung von Stromgrenzen	55
2.5.4	Einhaltung der zulässigen Kurzschlussströme	56
2.6	Einhaltung der Systembilanz	57
2.6.1	Aufgabenstellung	57
2.6.2	Leistungs-Frequenz-Regelung und Regelenergieeinsatz	58
2.7	Definition des Systemzustands	63
2.8	Schaltleitung	68
2.8.1	Aufgaben	68
2.8.2	Aufbau	68
2.8.2.1	Gebäude	68
2.8.2.2	Netzwarte	69
2.8.2.3	Notwarte	71
2.8.2.4	Netzleitsystem	71
2.9	Großstörungen	72
2.9.1	Definition	72
2.9.1.1	Strommangellage	73
2.9.1.2	Netzwischer	74
2.9.1.3	Brownout	75
2.9.1.4	Blackout	76
2.9.2	Eintrittswahrscheinlichkeit	76
2.9.2.1	Einflussfaktoren	76
2.9.2.2	Dauer	79
2.9.2.3	Stresstests	80
Literatur		82
3	Ursachen von Blackouts	87
3.1	Technische Störungen	89
3.1.1	Technische Defekte	89
3.1.2	Spannungskollaps	90
3.1.3	Kaskadenauslösungen	90
3.2	Extreme Naturereignisse und Klimawandel	92
3.3	Fehlverhalten des Personals, Kommunikationsprobleme, Datenfehler	97
3.4	Marktmechanismen	99
3.4.1	Markt- und Organisationsversagen	99

3.4.2	Marktmanipulationen	99
3.4.3	Anwendung von Marktregeln	101
3.5	Sabotage	104
3.5.1	Terroranschläge	104
3.5.2	Cyberangriffe	106
3.5.2.1	Gefahrenpotential	106
3.5.2.2	Angriff auf die Energieinfrastruktur	109
3.5.2.3	Direkte Angriffe auf die IT-Infrastruktur	110
3.5.2.4	Indirekte Angriffe auf die IT-Infrastruktur	111
3.5.3	Attacken durch einen elektromagnetischen Puls	112
3.5.4	Kriegerische Auseinandersetzungen	114
3.5.5	Streiks, Massenproteste und Unruhen	115
3.6	Strukturelle Ursachen	115
3.6.1	47,5–50,2-Hz-Problematik	115
3.6.2	Regelleistungsdefizite	116
3.6.3	Unzureichender Netzausbau	118
3.6.4	Netzbelastung durch Elektroautos und Wärmepumpen	120
3.7	Pandemie	120
3.8	Besondere Betriebssituationen	121
3.8.1	Sonnenfinsternis	121
3.8.2	Sportliche Großereignisse	123
3.8.3	Earth Hour Aktion „Licht aus!“	124
	Literatur	124
4	Beispiele von Blackouts	129
4.1	Historische Großstörungen	129
4.2	Kanada/Quebec 1998	129
4.3	Italien 2003	135
4.4	USA/Kanada 2003	139
4.5	Münsterland 2005	144
4.6	Europa 2006	150
4.7	Brasilien 2009	156
4.8	Indien 2012	158
4.9	Türkei 2015	167
4.10	Ukraine 2015 und 2022	168
	Literatur	169
5	Folgen und Ablauf eines Blackouts	173
5.1	Folgen eines Blackouts	173
5.1.1	Auswirkungen auf die kritischen Bereiche der Daseinsvorsorge	173
5.1.2	Informations- und Kommunikationstechnologie	175

5.1.3	Transport und Verkehr	178
5.1.3.1	Straßenverkehr	179
5.1.3.2	Schienenverkehr	181
5.1.3.3	Luftverkehr	181
5.1.3.4	Wasserverkehr	182
5.1.4	Haustechnik	183
5.1.5	Energieversorgung	184
5.1.6	Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung	185
5.1.6.1	Wasserversorgung und Abwasserentsorgung	185
5.1.6.2	Wasserversorgung	185
5.1.6.3	Abwasserentsorgung	187
5.1.6.4	Abfallentsorgung	190
5.1.7	Lebensmittelversorgung	191
5.1.8	Landwirtschaft	193
5.1.9	Gesundheitswesen	194
5.1.9.1	Krankenhäuser	196
5.1.9.2	Apotheken und Arzneimittel	198
5.1.9.3	Stationäre Einrichtungen der Pflege, Einrichtungen für behinderte Menschen	199
5.1.9.4	Arztpraxen, Ambulanzen, häusliche Pflege	199
5.1.9.5	Rettungsdienste	201
5.1.10	Industrieanlagen und Forschungseinrichtungen	201
5.1.11	Finanzdienstleistungen	203
5.1.12	Öffentliche Ordnung und Sicherheit	205
5.1.13	Wirtschaftliche Folgen	208
5.1.14	Öffentliche Einrichtungen	211
5.2	Exemplarischer Ablauf der Ereignisse nach einem Blackout	212
5.2.1	Eskalationsstufen	212
5.2.2	Die ersten dreißig Minuten nach dem Blackout	212
5.2.3	Die ersten Stunden nach dem Blackout	213
5.2.4	Ein Tag nach dem Blackout	216
5.2.5	Zwei Tage nach dem Blackout	218
5.2.6	Drei Tage nach dem Blackout.	219
5.2.7	Eine Woche nach dem Blackout	220
5.3	Katastrophenhilfe	222
5.3.1	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben	222
5.3.1.1	Katastrophenschutz	222
5.3.1.2	Polizei	224
5.3.1.3	Bundesanstalt Technisches Hilfswerk	224
5.3.1.4	Bundeswehr	225
5.3.1.5	Feuerwehr	226

5.3.2	Selbstschutz und persönliche Vorsorgemaßnahmen	228
Literatur		232
6	Maßnahmen zur Vermeidung eines Blackouts	235
6.1	Systemsichernde Maßnahmen	235
6.2	Netzzustandskorrektur und -optimierung	236
6.2.1	Netzbezogene Maßnahmen	238
6.2.1.1	Schaltmaßnahmen	238
6.2.1.2	Arbeitspunkteinstellungen	238
6.2.1.3	Netzbasierendes Engpassmanagement	239
6.2.2	Marktbezogene Maßnahmen	240
6.2.3	Notfallmaßnahmen	241
6.2.3.1	Maßnahmen bei Unterfrequenz	242
6.2.3.2	Maßnahmen bei Überfrequenz	244
6.3	Systemsicherheit im europäischen Verbundsystem	245
6.3.1	Koordinierung des europäischen Energieaustauschs	245
6.3.2	Sicherheitszentren	246
6.3.3	Systemschutzplan	250
6.3.4	Reserveleistung	252
6.3.4.1	Vorhaltung von Reserveleistung	252
6.3.4.2	Netzreserve	253
6.3.4.3	Kapazitätsreserve	254
6.3.4.4	Sicherheitsbereitschaft	256
6.3.4.5	Besondere netztechnische Betriebsmittel	256
6.4	System- und Objektschutz	257
6.4.1	Schutz gegen Cyberattacken und Spionageangriffe	257
6.4.1.1	IKT-Sicherheit	257
6.4.1.2	Sustainable Cyber Resilience	258
6.4.1.3	IT-Sicherheitskatalog für Energieanlagen	263
6.4.2	Schutz der Infrastruktur	264
6.5	Training des Personals	265
Literatur		267
7	Systemwiederherstellung	271
7.1	Voraussetzungen für den Wiederaufbau	271
7.2	Ablauf des Wiederaufbaus	273
7.2.1	Deklaration der Großstörung	273
7.2.2	Telekommunikation	274
7.2.3	Ausgangsschaltzustand	274
7.2.4	Autonomiezeiten	275
7.2.5	Systemwiederaufbau	276
7.2.5.1	Top-down-Strategie	276

7.2.5.2	Bottom-up-Strategie	277
7.2.6	Abschluss des Wiederaufbaus	278
7.3	Technische Probleme beim Wiederaufbau	278
7.3.1	Problemereich Blindleistung	278
7.3.2	Problemereich Wirkleistung	279
7.3.3	Transiente Vorgänge und Schutzauslösungen	280
7.3.4	Einhaltung der Synchronisierungsbedingungen	280
7.3.5	Schwarzstart einer Schaltanlage	281
7.3.6	Schäden im Energieversorgungsnetz	282
7.4	Schwarzstart	282
7.5	Inselnetze und zellulare Netze	286
7.6	Unterstützung des Personals beim Netzwiederaufbau	288
7.6.1	Training	288
7.6.2	Handlungsempfehlungen	289
7.6.3	Expertensysteme	289
7.7	Wenn der Strom wieder aus der Steckdose kommt	289
Literatur		291
Stichwortverzeichnis		293