

Inhoudsopgave

|                                                              |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1 Elektrische Energieversorgung</b>                       | <b>1</b> |
| Literatur                                                    | 5        |
| <b>2 Elektrische Energieversorgungsnetze</b>                 | <b>7</b> |
| 2.1 Elektrische Energieversorgung in Deutschland             | 7        |
| 2.2 Öffentliche Energieversorgungsnetze                      | 9        |
| 2.2.1 Übertragungsnetze                                      | 11       |
| 2.2.1.1 Höchstspannungsnetze                                 | 11       |
| 2.2.1.1.1 Übertragungsnetze in Deutschland                   | 11       |
| 2.2.1.1.2 Übertragungsnetze in der Schweiz und in Österreich | 17       |
| 2.2.1.2 Verbundnetze                                         | 18       |
| 2.2.1.2.1 Europäische Verbundnetze                           | 19       |
| 2.2.1.2.2 Außereuropäische Verbundnetze                      | 25       |
| 2.2.1.3 Interkonnektivität                                   | 28       |
| 2.2.1.4 Overlaynetze                                         | 30       |
| 2.2.2 Verteilnetze                                           | 34       |
| 2.2.2.1 Aufgabe der Verteilnetze                             | 34       |
| 2.2.2.2 Hochspannungsnetze                                   | 35       |
| 2.2.2.3 Mittelspannungsnetze                                 | 35       |
| 2.2.2.4 Niederspannungsnetze                                 | 36       |
| 2.2.3 Betriebsmittel                                         | 36       |
| 2.2.3.1 Schaltanlagen                                        | 36       |
| 2.2.3.2 Leitungen und Transformatoren                        | 42       |
| 2.2.3.2.1 Leitungen                                          | 42       |
| 2.2.3.2.2 Transformatoren                                    | 51       |
| 2.2.3.3 Kompensationseinrichtungen                           | 57       |
| 2.2.4 Beobachtungsbereich, Netzmodell, Ersatznetz            | 58       |
| 2.2.4.1 Beobachtungsbereich                                  | 58       |
| 2.2.4.2 Modell des elektrischen Energieversorgungsnetzes     | 61       |

|           |                                                                     |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.4.3   | Ersatzdarstellung nicht unmittelbar modellierter<br>Netzteile ..... | 61        |
| 2.2.5     | Regulatorische Vorgaben .....                                       | 62        |
| 2.3       | Entwicklung des Verbundnetzes in Deutschland .....                  | 65        |
| 2.3.1     | Anfänge der elektrischen Energieversorgung .....                    | 65        |
| 2.3.2     | Erste Ansätze eines Verbundbetriebs .....                           | 66        |
| 2.3.3     | Nach dem Zweiten Weltkrieg .....                                    | 68        |
| 2.3.4     | Nach der Wiedervereinigung .....                                    | 71        |
| 2.3.5     | Liberalisierung und Unbundling .....                                | 74        |
|           | Literatur .....                                                     | 76        |
| <b>3</b>  | <b>Betrieb elektrischer Übertragungssysteme .....</b>               | <b>81</b> |
| 3.1       | Systemführung .....                                                 | 81        |
| 3.1.1     | Aufgabenstellung .....                                              | 81        |
| 3.1.1.1   | Funktionsbereich Netzführung .....                                  | 82        |
| 3.1.1.2   | Funktionsbereich Frequenzhaltung .....                              | 83        |
| 3.1.1.3   | Instrumentenkasten der Systemführung .....                          | 83        |
| 3.1.1.4   | Neue Herausforderungen durch die Energiewende .....                 | 85        |
| 3.1.1.5   | Zeitbereiche .....                                                  | 86        |
| 3.1.2     | Definition des Systemzustands .....                                 | 87        |
| 3.1.3     | Organisationsstruktur .....                                         | 91        |
| 3.1.3.1   | Zentral oder dezentral .....                                        | 91        |
| 3.1.3.2   | Flächenorganisation .....                                           | 92        |
| 3.1.3.3   | Zentrale Netzleitstelle .....                                       | 93        |
| 3.1.3.4   | Back Office .....                                                   | 94        |
| 3.1.3.5   | Krisenzentrum .....                                                 | 95        |
| 3.2       | Netzführung .....                                                   | 96        |
| 3.2.1     | Aufgabenstellung .....                                              | 96        |
| 3.2.1.1   | SCADA-System .....                                                  | 96        |
| 3.2.1.2   | Wetter- und Blitzinformationssysteme .....                          | 98        |
| 3.2.1.3   | Höhere Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen ...                | 100       |
| 3.2.1.4   | Einspeisemanagement .....                                           | 102       |
| 3.2.1.5   | Redispatch .....                                                    | 104       |
| 3.2.1.6   | Offline-Funktionen .....                                            | 106       |
| 3.2.2     | Netzsicherheitsüberwachung .....                                    | 107       |
| 3.2.2.1   | Netzsicherheitsanalyse .....                                        | 107       |
| 3.2.2.2   | Bewertungskriterien .....                                           | 110       |
| 3.2.2.2.1 | Einhaltung der Wirkleistungsbilanz .....                            | 110       |
| 3.2.2.2.2 | Einhaltung von Spannungsgrenzen .....                               | 110       |
| 3.2.2.2.3 | Einhaltung von Stromgrenzen .....                                   | 111       |
| 3.2.2.2.4 | Einhaltung von Grenzwerten der<br>Parallelschaltgeräte .....        | 113       |

|           |                                                                                |     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.2.2.5 | Einhaltung der maximalen Einspeiseleistung<br>an einer Sammelschiene . . . . . | 114 |
| 3.2.2.2.6 | Einhaltung der transienten Stabilität . . . . .                                | 114 |
| 3.2.2.2.7 | Einhaltung der minimal und maximal<br>zulässigen Kurzschlussströme . . . . .   | 115 |
| 3.2.2.3   | Simulation von Systemänderungen . . . . .                                      | 116 |
| 3.2.2.3.1 | Betriebsmittelausfälle . . . . .                                               | 117 |
| 3.2.2.3.2 | Geplante Systemänderungen . . . . .                                            | 121 |
| 3.2.3     | Korrektur des Netzzustands . . . . .                                           | 122 |
| 3.2.3.1   | Maßnahmen zur Netzzustandskorrektur . . . . .                                  | 122 |
| 3.2.3.2   | Netzbezogene Maßnahmen . . . . .                                               | 124 |
| 3.2.3.2.1 | Schaltmaßnahmen . . . . .                                                      | 124 |
| 3.2.3.2.2 | Arbeitspunkteinstellungen . . . . .                                            | 125 |
| 3.2.3.2.3 | Koordinierung bzw. Durchführung von<br>Schaltmaßnahmen . . . . .               | 126 |
| 3.2.3.2.4 | Schaltberechtigung . . . . .                                                   | 127 |
| 3.2.3.2.5 | Netzbasiertes Engpassmanagement . . . . .                                      | 128 |
| 3.2.3.3   | Marktbezogene Maßnahmen . . . . .                                              | 128 |
| 3.2.3.4   | Notfallmaßnahmen . . . . .                                                     | 130 |
| 3.2.3.4.1 | Maßnahmen bei Unterfrequenz . . . . .                                          | 130 |
| 3.2.3.4.2 | Maßnahmen bei Überfrequenz . . . . .                                           | 132 |
| 3.3       | Spannungshaltung und Spannungsstabilität . . . . .                             | 133 |
| 3.3.1     | Aufgabenstellung . . . . .                                                     | 133 |
| 3.3.2     | Statische Spannungshaltung . . . . .                                           | 134 |
| 3.3.3     | Dynamische Spannungshaltung . . . . .                                          | 135 |
| 3.3.4     | Spannungsstabilität . . . . .                                                  | 135 |
| 3.3.5     | Spannungs-Blindleistungs-Optimierung . . . . .                                 | 138 |
| 3.4       | Entstörungsmanagement und Netzwiederaufbau . . . . .                           | 138 |
| 3.4.1     | Aufgabenstellung . . . . .                                                     | 138 |
| 3.4.2     | Großstörungen . . . . .                                                        | 138 |
| 3.4.2.1   | Definition . . . . .                                                           | 138 |
| 3.4.2.1.1 | Netzwischer . . . . .                                                          | 139 |
| 3.4.2.1.2 | Brownout . . . . .                                                             | 140 |
| 3.4.2.1.3 | Blackout . . . . .                                                             | 141 |
| 3.4.2.2   | Ursachen . . . . .                                                             | 144 |
| 3.4.2.2.1 | Technische Störungen . . . . .                                                 | 145 |
| 3.4.2.2.2 | Einflüsse von außen, Naturereignisse . . . . .                                 | 146 |
| 3.4.2.2.3 | Fehlverhalten des Personals,<br>Kommunikationsprobleme, Datenfehler . . . . .  | 147 |
| 3.4.2.2.4 | Marktmechanismen . . . . .                                                     | 150 |
| 3.4.2.2.5 | Sabotage . . . . .                                                             | 152 |
| 3.4.2.3   | Maßnahmen zur Vermeidung eines Blackouts . . . . .                             | 153 |

|         |                                                                        |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.3   | Wiederaufbau, Schwarzstart, Inselbetrieb .....                         | 154 |
| 3.4.3.1 | Wiederaufbau .....                                                     | 154 |
| 3.4.3.2 | Schwarzstart .....                                                     | 156 |
| 3.4.3.3 | Inselbetrieb .....                                                     | 157 |
| 3.4.4   | Unterstützung des Personals beim Netzwiederaufbau .....                | 159 |
| 3.4.4.1 | Training .....                                                         | 159 |
| 3.4.4.2 | Handlungsempfehlungen .....                                            | 159 |
| 3.4.4.3 | Expertensystem .....                                                   | 159 |
| 3.5     | Einhaltung der Systembilanz .....                                      | 160 |
| 3.5.1   | Aufgabenstellung .....                                                 | 160 |
| 3.5.2   | Leistungs-Frequenz-Regelung und Regelenergieeinsatz .....              | 160 |
| 3.5.3   | Netzregelverbund .....                                                 | 169 |
| 3.5.3.1 | Motivation Netzregelverbund .....                                      | 169 |
| 3.5.3.2 | Prinzip des Netzregelverbunds .....                                    | 171 |
| 3.5.3.3 | Technische Funktionsweise .....                                        | 173 |
| 3.5.3.4 | Systemsicherheit und Wirtschaftlichkeit des<br>Netzregelverbunds ..... | 175 |
| 3.5.3.5 | Entwicklung des Netzregelverbunds .....                                | 176 |
| 3.5.4   | Beschaffung von Regelenergie .....                                     | 177 |
| 3.5.5   | Fahrplanmanagement .....                                               | 180 |
| 3.5.5.1 | Austauschprogramme .....                                               | 180 |
| 3.5.5.2 | Bilanzkreise .....                                                     | 182 |
| 3.5.5.3 | Ausgleichsenergie .....                                                | 184 |
| 3.5.5.4 | Bilanzkreismanagement .....                                            | 185 |
| 3.5.5.5 | Bilanzierungsgebiete .....                                             | 186 |
| 3.5.6   | EEG-Bewirtschaftung .....                                              | 187 |
| 3.5.6.1 | Integration erneuerbarer Energien .....                                | 187 |
| 3.5.6.2 | EEG-Anlagen .....                                                      | 188 |
| 3.5.6.3 | Ausgleichsmechanismus .....                                            | 189 |
| 3.5.6.4 | EEG-Umlage .....                                                       | 191 |
| 3.5.7   | Besondere Betriebssituationen .....                                    | 193 |
| 3.5.7.1 | Herausforderung Sonnenfinsternis .....                                 | 193 |
| 3.5.7.2 | Der Ball muss ins Netz .....                                           | 194 |
| 3.5.7.3 | Earth Hour Aktion „Licht aus!“ .....                                   | 195 |
| 3.5.7.4 | Das Stundenphänomen .....                                              | 196 |
| 3.6     | Erweiterte und innovative Systemführung .....                          | 198 |
| 3.6.1   | Kuratives (N-1)-Prinzip .....                                          | 198 |
| 3.6.1.1 | Aufgabenstellung .....                                                 | 198 |
| 3.6.1.2 | Betriebsmittelgrenzen .....                                            | 198 |
| 3.6.1.3 | Wirkungsweise kurativer Maßnahmen .....                                | 199 |
| 3.6.1.4 | Konzept des kurativen (N-1)-Prinzips .....                             | 200 |
| 3.6.1.5 | Bewertung der kurativen (N-1)-Maßnahmen .....                          | 202 |

|           |                                                                                                   |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6.2     | Special Protection Schemes . . . . .                                                              | 203        |
| 3.6.2.1   | Konzept SPS . . . . .                                                                             | 203        |
| 3.6.2.2   | Phasenschiebertransformator . . . . .                                                             | 205        |
| 3.6.2.3   | Leistungselektronische Leistungsflussregler. . . . .                                              | 205        |
| 3.6.2.4   | Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung . . . . .                                                   | 208        |
| 3.6.2.5   | Netzbooster . . . . .                                                                             | 209        |
| 3.6.2.6   | Automatische Entlastungskontrolle . . . . .                                                       | 213        |
| 3.6.2.7   | Emergency Power Control . . . . .                                                                 | 214        |
| 3.6.3     | Erhöhung der Übertragungsfähigkeit. . . . .                                                       | 216        |
| 3.6.3.1   | Freileitungsmonitoring . . . . .                                                                  | 216        |
| 3.6.3.2   | Hochtemperaturbeseilung . . . . .                                                                 | 218        |
| 3.6.3.3   | Spannungsumstellung . . . . .                                                                     | 220        |
| 3.6.3.4   | Anlagen mit Verwendung von<br>Supraleitertechnologie . . . . .                                    | 220        |
| 3.6.4     | Wide Area Monitoring Systems . . . . .                                                            | 221        |
| 3.6.5     | Innovationen für die Systemführung . . . . .                                                      | 223        |
| 3.6.5.1   | Digitalisierung und Automatisierung der<br>Energieversorgung. . . . .                             | 223        |
| 3.6.5.2   | Genetische Algorithmen . . . . .                                                                  | 225        |
| 3.6.5.3   | Expertensysteme . . . . .                                                                         | 225        |
| 3.6.5.3.1 | Merkmale, Aufgaben und Aufbau . . . . .                                                           | 225        |
| 3.6.5.3.2 | Anwendungsbeispiele für<br>Expertensysteme in elektrischen<br>Energieversorgungssystemen. . . . . | 227        |
| 3.6.5.4   | Blockchain . . . . .                                                                              | 230        |
| 3.6.5.5   | Multiagentensysteme . . . . .                                                                     | 232        |
| 3.6.5.6   | Künstliche Neuronale Netze . . . . .                                                              | 233        |
| 3.6.6     | Neue Aufgaben der Systemführung. . . . .                                                          | 236        |
| 3.7       | IKT Systemsicherheit. . . . .                                                                     | 237        |
| 3.7.1     | IKT Struktur. . . . .                                                                             | 237        |
| 3.7.2     | IKT Sicherheit . . . . .                                                                          | 238        |
| 3.7.3     | IT-Sicherheitskatalog für Energieanlagen . . . . .                                                | 243        |
|           | Literatur. . . . .                                                                                | 245        |
| <b>4</b>  | <b>Systemsicherheit im europäischen Verbundsystem . . . . .</b>                                   | <b>257</b> |
| 4.1       | Koordinierung des europäischen Energieaustauschs . . . . .                                        | 257        |
| 4.2       | Sicherheitszentren . . . . .                                                                      | 259        |
| 4.3       | Systemschutzplan. . . . .                                                                         | 263        |
| 4.4       | Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheitsbereitschaft . . . . .                              | 264        |
| 4.4.1     | Reserveleistungsvorhaltung . . . . .                                                              | 264        |
| 4.4.2     | Netzreserve. . . . .                                                                              | 265        |

|          |                                                                          |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.3    | Kapazitätsreserve .....                                                  | 267 |
| 4.4.4    | Sicherheitsbereitschaft .....                                            | 269 |
|          | Literatur .....                                                          | 269 |
| <b>5</b> | <b>Schaltleitung</b> .....                                               | 271 |
| 5.1      | Aufgaben .....                                                           | 271 |
| 5.2      | Aufbau .....                                                             | 272 |
| 5.2.1    | Gebäude .....                                                            | 272 |
| 5.2.2    | Netzwarte .....                                                          | 272 |
| 5.2.3    | Notwarte .....                                                           | 274 |
| 5.2.4    | Netzleitsystem .....                                                     | 275 |
| 5.3      | Prozessvisualisierung für die Systemführung .....                        | 276 |
| 5.3.1    | Visualisierung des Systemzustands .....                                  | 276 |
| 5.3.2    | Innovative Visualisierung .....                                          | 282 |
| 5.4      | Trainingssysteme .....                                                   | 286 |
|          | Literatur .....                                                          | 289 |
| <b>6</b> | <b>Strommarkt</b> .....                                                  | 291 |
| 6.1      | Aufgabenstellung .....                                                   | 291 |
| 6.2      | Rahmenbedingungen .....                                                  | 293 |
| 6.2.1    | Neuordnung des europäischen Elektrizitätsbinnenmarktes .....             | 293 |
| 6.2.2    | Staatliche Überwachung .....                                             | 294 |
| 6.3      | Märkte .....                                                             | 295 |
| 6.3.1    | Terminmarkt .....                                                        | 295 |
| 6.3.2    | Spotmarkt .....                                                          | 295 |
| 6.3.3    | Marktintegration der erneuerbaren Energien .....                         | 296 |
| 6.3.4    | Negative Strompreise .....                                               | 297 |
| 6.3.5    | Market Coupling .....                                                    | 297 |
| 6.3.6    | Regelleistungsmarkt .....                                                | 299 |
| 6.3.7    | Merit-Order-Verfahren .....                                              | 300 |
| 6.4      | Aufgaben des Übertragungsnetzes im Stromhandel .....                     | 302 |
| 6.4.1    | Bilanzieller Leistungsausgleich bei Stromhandelsdifferenzen ....         | 302 |
| 6.4.2    | Begrenzungen des Stromhandels durch die<br>Übertragungskapazitäten ..... | 302 |
|          | Literatur .....                                                          | 303 |
|          | <b>Stichwortverzeichnis</b> .....                                        | 305 |