

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Symbolverzeichnis</b>                                                 | <b>XXI</b> |
| <b>1 Windmühlen und Windräder</b>                                        | <b>1</b>   |
| 1.1 Über die Ursprünge der Windmühlen . . . . .                          | 1          |
| 1.2 Europäische Windmühlentypen . . . . .                                | 4          |
| 1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Windmühlen . . . . .                   | 12         |
| 1.4 Wissenschaft und technische Entwicklung im Windmühlenbau . . . . .   | 14         |
| 1.5 Die amerikanische Windturbine . . . . .                              | 18         |
| Literatur . . . . .                                                      | 22         |
| <b>2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche</b>                            | <b>23</b>  |
| 2.1 Poul La Cour – Ein Pionier in Dänemark . . . . .                     | 23         |
| 2.2 Windkraftwerke – Große Pläne in Deutschland . . . . .                | 29         |
| 2.3 1250 kW aus dem Wind – Die erste Großanlage in den USA . . . . .     | 33         |
| 2.4 Windkraftanlagen in den 50er Jahren – Vor der Energiekrise . . . . . | 36         |
| 2.5 Nach der Energiekrise – Aufbruch in die moderne Windenergienutzung . | 44         |
| 2.6 Die großen Versuchsanlagen der 80er Jahre . . . . .                  | 47         |
| 2.7 Der erste Erfolg der kleinen Windkraftanlagen in Dänemark . . . . .  | 57         |
| 2.8 Die amerikanischen Windfarmen . . . . .                              | 59         |
| Literatur . . . . .                                                      | 64         |
| <b>3 Bauformen von Windkraftanlagen</b>                                  | <b>67</b>  |
| 3.1 Rotoren mit vertikaler Drehachse . . . . .                           | 68         |
| 3.2 Horizontalachsen-Rotoren . . . . .                                   | 71         |
| 3.3 Alternative und Ideen und Konzeptionen . . . . .                     | 74         |
| 3.3.1 Windenergie-Konzentratoren . . . . .                               | 74         |
| 3.3.2 Windenergienutzung in großer Höhe und auf Gebäuden . . . . .       | 79         |
| 3.4 Begriffe und Bezeichnungen . . . . .                                 | 81         |
| Literatur . . . . .                                                      | 83         |
| <b>4 Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung</b>              | <b>85</b>  |
| 4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz . . . . .                     | 85         |
| 4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergieumwandler . . . . .    | 90         |
| Literatur . . . . .                                                      | 94         |

|          |                                                                      |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Aerodynamik des Rotors</b>                                        | <b>95</b>  |
| 5.1      | Physikalisch-mathematische Modelle und Verfahren . . . . .           | 96         |
| 5.1.1    | Blattelemttheorie . . . . .                                          | 97         |
| 5.1.2    | Wirbelmodell der Rotorströmung . . . . .                             | 102        |
| 5.1.3    | Numerische Strömungssimulation . . . . .                             | 104        |
| 5.1.4    | Rotornachlaufströmung . . . . .                                      | 106        |
| 5.2      | Leistungscharakteristik des Rotors . . . . .                         | 110        |
| 5.2.1    | Rotorleistungskennfeld und Drehmomentenkennfeld . . . . .            | 110        |
| 5.2.2    | Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten . . . . .      | 112        |
| 5.3      | Aerodynamische Leistungsregelung . . . . .                           | 114        |
| 5.3.1    | Blatteinstellwinkelregelung . . . . .                                | 115        |
| 5.3.2    | Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall) . . . . .        | 120        |
| 5.3.3    | Aktive Steuerung der Strömungsablösung . . . . .                     | 125        |
| 5.3.4    | Aus dem Wind drehen . . . . .                                        | 126        |
| 5.4      | Das aerodynamische Profil . . . . .                                  | 127        |
| 5.4.1    | Charakteristische Eigenschaften . . . . .                            | 128        |
| 5.4.2    | Profilgeometrie und Systematik . . . . .                             | 131        |
| 5.4.3    | Laminarprofile . . . . .                                             | 136        |
| 5.4.4    | Einflußauf den Rotorleistungsbeiwert . . . . .                       | 141        |
| 5.5      | Der reale Rotor in der freien Atmosphäre . . . . .                   | 142        |
| 5.5.1    | Instationäre und räumliche Strömungseffekte . . . . .                | 142        |
| 5.5.2    | Maßnahmen und Hilfsmittel zur Strömungsbeeinflussung . . . . .       | 145        |
| 5.6      | Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik . . . . .   | 149        |
| 5.6.1    | Anzahl der Rotorblätter . . . . .                                    | 149        |
| 5.6.2    | Optimale Form des Blattumrisses . . . . .                            | 151        |
| 5.6.3    | Verwindung der Rotorblätter . . . . .                                | 157        |
| 5.6.4    | Blattdicke . . . . .                                                 | 159        |
| 5.6.5    | Auslegungsschnellaufzahl . . . . .                                   | 160        |
| 5.7      | Ausgeführte Rotorblätter . . . . .                                   | 163        |
| 5.8      | Windrichtungsnachführung des Rotors . . . . .                        | 166        |
| 5.9      | Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren . . . . .                     | 170        |
| 5.10     | Experimentelle Rotor-aerodynamik . . . . .                           | 175        |
| 5.10.1   | Modellmessungen im Windkanal . . . . .                               | 175        |
| 5.10.2   | Messungen an Originalanlagen . . . . .                               | 178        |
|          | Literatur . . . . .                                                  | 180        |
| <b>6</b> | <b>Belastungen und Strukturbeanspruchungen</b>                       | <b>183</b> |
| 6.1      | Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage . . . . .   | 184        |
| 6.2      | Koordinatensysteme und Bezeichnungen . . . . .                       | 186        |
| 6.3      | Ursachen der Belastungen . . . . .                                   | 187        |
| 6.3.1    | Massenkräfte . . . . .                                               | 188        |
| 6.3.2    | Luftkräfte bei gleichförmiger, stationärer Rotoranströmung . . . . . | 190        |
| 6.3.3    | Periodisch wechselnde Luftkräfte . . . . .                           | 193        |
| 6.3.4    | Stochastische Luftkräfte durch die Windturbulenz . . . . .           | 200        |
| 6.3.5    | Extreme Windgeschwindigkeiten und Betriebsstörungen . . . . .        | 204        |

|          |                                                                                    |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4      | Lastannahmen . . . . .                                                             | 205        |
| 6.4.1    | Internationale und nationale Normen . . . . .                                      | 206        |
| 6.4.2    | Klassifizierung der Windkraftanlagen nach IEC und Windzonen<br>nach DIBt . . . . . | 209        |
| 6.4.3    | Normale Windbedingungen . . . . .                                                  | 211        |
| 6.4.4    | Extreme Windbedingungen . . . . .                                                  | 212        |
| 6.4.5    | Andere Umwelteinflüsse . . . . .                                                   | 213        |
| 6.4.6    | Sonstige externe Bedingungen . . . . .                                             | 214        |
| 6.4.7    | Sicherheitsfaktoren . . . . .                                                      | 215        |
| 6.5      | Maschinenstatus und Lastfälle . . . . .                                            | 216        |
| 6.5.1    | Normaler Betrieb . . . . .                                                         | 217        |
| 6.5.2    | Technische Störungen . . . . .                                                     | 219        |
| 6.6      | Strukturbeanspruchung und Dimensionierung . . . . .                                | 221        |
| 6.6.1    | Beanspruchungsarten . . . . .                                                      | 221        |
| 6.6.2    | Lastkollektive . . . . .                                                           | 223        |
| 6.7      | Strukturdynamik . . . . .                                                          | 226        |
| 6.7.1    | Mathematische Modellierung der Windkraftanlage . . . . .                           | 226        |
| 6.7.2    | Modellierung der Windturbulenz . . . . .                                           | 227        |
| 6.7.3    | Rechenverfahren . . . . .                                                          | 231        |
| 6.8      | Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen . . . . .                              | 234        |
| 6.8.1    | Anzahl der Rotorblätter . . . . .                                                  | 235        |
| 6.8.2    | Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor . . . . .                                    | 236        |
| 6.8.3    | Steifigkeit der Rotorblätter . . . . .                                             | 239        |
| 6.8.4    | Regelungssystem . . . . .                                                          | 240        |
| 6.8.5    | Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise . . . . .                   | 243        |
| 6.9      | Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen . . . . .                      | 246        |
| 6.9.1    | Gesamtsystem-Prüfstände . . . . .                                                  | 247        |
| 6.9.2    | Prüfstandversuche mit Rotorblättern . . . . .                                      | 248        |
| 6.9.3    | Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen . . . . .                  | 249        |
|          | Literatur . . . . .                                                                | 251        |
| <b>7</b> | <b>Schwingungsverhalten</b> . . . . .                                              | <b>253</b> |
| 7.1      | Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade . . . . .                          | 254        |
| 7.2      | Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter . . . . .                               | 256        |
| 7.2.1    | Statische Divergenz . . . . .                                                      | 257        |
| 7.2.2    | Eigenfrequenzen und Schwingungsformen . . . . .                                    | 258        |
| 7.2.3    | Typische Rotorblattschwingungen . . . . .                                          | 260        |
| 7.3      | Torsionsschwingungen des Triebstrangs . . . . .                                    | 262        |
| 7.3.1    | Mechanisches Ersatzmodell . . . . .                                                | 263        |
| 7.3.2    | Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung . . . . .                           | 266        |
| 7.3.3    | Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen . . . . .                               | 267        |
| 7.3.4    | Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .                                     | 270        |
| 7.4      | Dynamik der Windrichtungsnachführung . . . . .                                     | 272        |
| 7.4.1    | Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse . . . . .                         | 273        |
| 7.4.2    | Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .                                     | 275        |

|          |                                                              |            |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 7.5      | Schwingungen der Gesamtanlage . . . . .                      | 277        |
| 7.5.1    | Turmsteifigkeit . . . . .                                    | 277        |
| 7.5.2    | Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen . . . . .             | 279        |
| 7.6      | Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens . . . . .  | 285        |
|          | Literatur . . . . .                                          | 289        |
| <b>8</b> | <b>Rotorblätter</b>                                          | <b>291</b> |
| 8.1      | Materialfragen . . . . .                                     | 292        |
| 8.2      | Vorbild: Flugzeugtragflügel . . . . .                        | 294        |
| 8.3      | Frühere experimentelle Bauweisen . . . . .                   | 297        |
| 8.3.1    | Genietete Aluminiumkonstruktionen . . . . .                  | 297        |
| 8.3.2    | Stahlbauweisen . . . . .                                     | 299        |
| 8.3.3    | Traditionelle Holzbauweise . . . . .                         | 303        |
| 8.3.4    | Ältere Faserverbundbauweisen . . . . .                       | 304        |
| 8.3.5    | Holz-Epoxid-Verbundbauweise . . . . .                        | 309        |
| 8.4      | Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik . . . . .        | 310        |
| 8.4.1    | Faserverbund-Technologie . . . . .                           | 310        |
| 8.4.2    | Konstruktive Auslegung der Rotorblätter . . . . .            | 312        |
| 8.4.3    | Fertigungsverfahren . . . . .                                | 314        |
| 8.5      | Blattanschluß an die Rotornabe . . . . .                     | 318        |
| 8.6      | Rotorblattbauweisen im Vergleich . . . . .                   | 322        |
| 8.7      | Aerodynamische Bremsklappen . . . . .                        | 326        |
| 8.8      | Blitzschutz . . . . .                                        | 327        |
| 8.9      | Enteisung . . . . .                                          | 328        |
|          | Literatur . . . . .                                          | 330        |
| <b>9</b> | <b>Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus</b>            | <b>331</b> |
| 9.1      | Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung . . . . . | 332        |
| 9.2      | Triebstrang mit Übersetzungsgetriebe . . . . .               | 335        |
| 9.2.1    | Frühere experimentelle Konzeptionen . . . . .                | 335        |
| 9.2.2    | Bauweisen mit schnellaufendem Generator . . . . .            | 337        |
| 9.2.3    | Mittelschnellaufende Triebstrangauslegung . . . . .          | 341        |
| 9.3      | Getriebelose Bauart . . . . .                                | 343        |
| 9.3.1    | Ringgenerator mit elektrischer Erregung . . . . .            | 343        |
| 9.3.2    | Direkt angetriebener Permanentmagnet-Generator . . . . .     | 344        |
| 9.4      | Triebstrangkonzeptionen im Vergleich . . . . .               | 345        |
| 9.4.1    | Triebstrangkonzepktion und Baumasse . . . . .                | 345        |
| 9.4.2    | Perspektiven bei zunehmender Anlagengröße . . . . .          | 348        |
| 9.5      | Rotornabe . . . . .                                          | 352        |
| 9.5.1    | Ältere Nabenbauarten . . . . .                               | 352        |
| 9.5.2    | Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren . . . . .          | 354        |
| 9.5.3    | Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren . . . . .            | 355        |
| 9.6      | Blattverstellmechanismus . . . . .                           | 359        |
| 9.6.1    | Rotorblattlagerung . . . . .                                 | 361        |
| 9.6.2    | Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb . . . . .     | 363        |

|        |                                                                     |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.6.3  | Elektromotorische Blattverstellung . . . . .                        | 368 |
| 9.6.4  | Passive Blattverstellung . . . . .                                  | 370 |
| 9.6.5  | Redundanz- und Sicherheitsfragen . . . . .                          | 371 |
| 9.7    | Rotorlagerung . . . . .                                             | 373 |
| 9.7.1  | Lagerprobleme . . . . .                                             | 374 |
| 9.7.2  | Rotorlagerung bei Anlagen mit Getriebe . . . . .                    | 376 |
| 9.7.3  | Lagerung bei getriebelosen Anlagen . . . . .                        | 381 |
| 9.8    | Rotorbremse . . . . .                                               | 384 |
| 9.9    | Übersetzungsgetriebe . . . . .                                      | 387 |
| 9.9.1  | Getriebebauarten . . . . .                                          | 387 |
| 9.9.2  | Äußere Belastungsvorgaben für die Getriebeauslegung . . . . .       | 390 |
| 9.9.3  | Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung . . . . . | 394 |
| 9.9.4  | Wirkungsgrad und Geräuschentwicklung . . . . .                      | 395 |
| 9.10   | Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe . . . . .                    | 398 |
| 9.11   | Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang . . . . .           | 400 |
| 9.12   | Einbau des elektrischen Generators . . . . .                        | 402 |
| 9.13   | Maschinenhaus . . . . .                                             | 405 |
| 9.13.1 | Bauweise und statische Konzeption . . . . .                         | 405 |
| 9.13.2 | Hilfsaggregate und sonstige Einbauten . . . . .                     | 407 |
| 9.13.3 | Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte . . . . .                  | 411 |
| 9.14   | Windrichtungsnachführung . . . . .                                  | 414 |
| 9.15   | Funktionsprüfung und Serienfertigung . . . . .                      | 418 |
|        | Literatur . . . . .                                                 | 420 |

**10 Elektrisches System 423**

|        |                                                                                                 |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1   | Generatorbauarten . . . . .                                                                     | 424 |
| 10.1.1 | Synchrongenerator . . . . .                                                                     | 424 |
| 10.1.2 | Asynchrongenerator . . . . .                                                                    | 428 |
| 10.1.3 | Permanentmagnet-Generatoren . . . . .                                                           | 432 |
| 10.2   | Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren<br>in Windkraftanlagen . . . . . | 434 |
| 10.3   | Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung . . . . .                                   | 437 |
| 10.3.1 | Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .                                           | 438 |
| 10.3.2 | Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .                                          | 439 |
| 10.3.3 | Asynchrongenerator mit variablem Schlupf . . . . .                                              | 441 |
| 10.3.4 | Drehzahlgestufte Generatorsysteme . . . . .                                                     | 442 |
| 10.4   | Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter . . . . .                               | 444 |
| 10.4.1 | Frequenzumrichter . . . . .                                                                     | 445 |
| 10.4.2 | Generator mit Vollumrichter . . . . .                                                           | 448 |
| 10.4.3 | Asynchrongeneratoren mit Teilumrichter im Läuferkreis . . . . .                                 | 450 |
| 10.5   | Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatoren . . . . .                            | 454 |
| 10.5.1 | Synchrongenerator mit elektrischer Erregung . . . . .                                           | 454 |
| 10.5.2 | Generator mit Permanentmagnet-Erregung . . . . .                                                | 458 |
| 10.6   | Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage . . . . .                                      | 462 |
| 10.6.1 | Große Anlagen . . . . .                                                                         | 462 |

|           |                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.6.2    | Kleine Anlagen . . . . .                                                | 465        |
| 10.7      | Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich . . . . .                   | 466        |
|           | Literatur . . . . .                                                     | 469        |
| <b>11</b> | <b>Regelung und Betriebsführung</b>                                     | <b>471</b> |
| 11.1      | Steuerung des Betriebsablaufes und Sicherheitssystem . . . . .          | 473        |
| 11.1.1    | Betriebszyklus . . . . .                                                | 473        |
| 11.1.2    | Sicherheitssystem . . . . .                                             | 476        |
| 11.2      | Regelkreise und Technologie der Regler . . . . .                        | 476        |
| 11.2.1    | Regelkreise . . . . .                                                   | 477        |
| 11.2.2    | Technologie der Regler . . . . .                                        | 478        |
| 11.3      | Datenerfassung für die Regelung . . . . .                               | 479        |
| 11.3.1    | Betriebswindmeßsystem . . . . .                                         | 480        |
| 11.3.2    | Elektrische Leistungsmessung . . . . .                                  | 482        |
| 11.3.3    | Rotordrehzahl, Blatteinstellwinkel und sonstige Betriebsdaten . . . . . | 483        |
| 11.4      | Windrichtungsnachführung . . . . .                                      | 484        |
| 11.5      | Leistungs- und Drehzahlregelung . . . . .                               | 486        |
| 11.5.1    | Grundsätzliche Überlegungen . . . . .                                   | 486        |
| 11.5.2    | Betriebszustände und Regelung . . . . .                                 | 488        |
| 11.5.3    | Regelstrecken und mathematische Modellierung . . . . .                  | 490        |
| 11.5.4    | Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablen Generatorsystemen . . . . .   | 492        |
| 11.5.5    | Drehzahlfeste Generatoren im Netzparallelbetrieb . . . . .              | 495        |
| 11.5.6    | Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz . . . . .              | 500        |
| 11.6      | Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall . . . . .           | 501        |
| 11.6.1    | Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .            | 502        |
| 11.6.2    | Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .                   | 503        |
| 11.6.3    | Stall-Regelung mit verstellbarem Blatteinstellwinkel . . . . .          | 504        |
| 11.7      | Anordnung der Regelungssysteme in der Windkraftanlage . . . . .         | 506        |
| 11.8      | Zusammenwirken mit dem Stromnetz . . . . .                              | 508        |
|           | Literatur . . . . .                                                     | 513        |
| <b>12</b> | <b>Turm und Fundament</b>                                               | <b>515</b> |
| 12.1      | Turmbauarten und Varianten . . . . .                                    | 516        |
| 12.2      | Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen . . . . .                    | 519        |
| 12.3      | Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften . . . . .                  | 520        |
| 12.4      | Freitragende Stahlrohrtürme . . . . .                                   | 521        |
| 12.4.1    | Steifigkeit und Baumasse . . . . .                                      | 522        |
| 12.4.2    | Konstruktion und Fertigungstechnik . . . . .                            | 524        |
| 12.4.3    | Aufstiegshilfen und Einbauten . . . . .                                 | 528        |
| 12.5      | Gittertürme . . . . .                                                   | 531        |
| 12.6      | Betontürme . . . . .                                                    | 534        |
| 12.6.1    | Ortbeton-Bauweise . . . . .                                             | 535        |
| 12.6.2    | Beton-Fertigteiltbauweise . . . . .                                     | 536        |
| 12.7      | Beton/Stahl-Hybridtürme . . . . .                                       | 539        |
| 12.8      | Unkonventionelle Konzepte und Bauweisen . . . . .                       | 542        |

|           |                                                                                                     |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.9      | Turm-Konzeptionen im Vergleich . . . . .                                                            | 544        |
| 12.10     | Optimale Turmhöhe . . . . .                                                                         | 546        |
| 12.10.1   | Anstieg der Baukosten mit der Höhe . . . . .                                                        | 546        |
| 12.10.2   | Zunahme der Energielieferung mit der Höhe . . . . .                                                 | 548        |
| 12.11     | Fundament . . . . .                                                                                 | 549        |
| 12.11.1   | Dimensionierende Lasten und Bodenbeschaffenheit . . . . .                                           | 549        |
| 12.11.2   | Fundamentbauarten . . . . .                                                                         | 550        |
| 12.11.3   | Einbindung des Turmes im Fundament . . . . .                                                        | 552        |
| 12.11.4   | Typische Ausführungsbeispiele . . . . .                                                             | 553        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                 | 555        |
| <b>13</b> | <b>Windverhältnisse</b>                                                                             | <b>557</b> |
| 13.1      | Ursachen des Windes und Energieinhalt . . . . .                                                     | 557        |
| 13.2      | Globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten . . . . .                                    | 560        |
| 13.3      | Windverhältnisse in Europa und in Deutschland . . . . .                                             | 567        |
| 13.4      | Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten . . . . .                                            | 571        |
| 13.4.1    | Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung<br>der Windgeschwindigkeiten . . . . . | 571        |
| 13.4.2    | Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe . . . . .                                              | 574        |
| 13.4.3    | Stetigkeit des Windes . . . . .                                                                     | 577        |
| 13.4.4    | Windturbulenz und Böen . . . . .                                                                    | 584        |
| 13.5      | Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse . . . . .                                     | 587        |
| 13.6      | Ermittlung der Windgeschwindigkeit . . . . .                                                        | 589        |
| 13.6.1    | Messungen mit Anemometern und stationärem Windmeßmast . . . . .                                     | 591        |
| 13.6.2    | SODAR und LIDAR . . . . .                                                                           | 594        |
| 13.6.3    | Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung<br>nach dem Europäischen Windatlas . . . . .      | 596        |
| 13.6.4    | Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen<br>Windfeldern . . . . .                    | 599        |
| 13.6.5    | Über das Windenergiepotential . . . . .                                                             | 600        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                 | 604        |
| <b>14</b> | <b>Leistung und Energielieferung</b>                                                                | <b>607</b> |
| 14.1      | Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung . . . . .                                 | 608        |
| 14.1.1    | Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl . . . . .                                          | 608        |
| 14.1.2    | Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung . . . . .                                      | 613        |
| 14.1.3    | Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang . . . . .                                           | 614        |
| 14.1.4    | Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen . . . . .                                                    | 617        |
| 14.2      | Leistungskennlinie . . . . .                                                                        | 618        |
| 14.2.1    | Normierte Leistungskennlinie . . . . .                                                              | 619        |
| 14.2.2    | Vermessung der Leistungskennlinie . . . . .                                                         | 621        |
| 14.3      | Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie . . . . .                                  | 627        |
| 14.3.1    | Schwieriges Gelände . . . . .                                                                       | 627        |
| 14.3.2    | Luftdichte . . . . .                                                                                | 628        |
| 14.3.3    | Turbulenz . . . . .                                                                                 | 631        |

|           |                                                                                               |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 14.3.4    | Sonstige wetterbedingte Einflüsse . . . . .                                                   | 633        |
| 14.3.5    | Verschmutzung und Abnutzung der Rotorblätter . . . . .                                        | 633        |
| 14.3.6    | Schallreduzierter Betrieb . . . . .                                                           | 634        |
| 14.4      | Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe . . . . .                                                | 636        |
| 14.5      | Jahresenergielieferung . . . . .                                                              | 638        |
| 14.5.1    | Berechnungsverfahren . . . . .                                                                | 638        |
| 14.5.2    | Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung . . . . .                                      | 640        |
| 14.5.3    | Sensitivität bezüglich der Winddaten . . . . .                                                | 643        |
| 14.5.4    | Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor . . . . .                                       | 644        |
| 14.5.5    | Energielieferungsprognosen für Projektfinanzierungen . . . . .                                | 647        |
| 14.6      | Wichtige Entwurfsparameter und Energielieferung . . . . .                                     | 650        |
| 14.6.1    | Anlagen-Leistungsbeiwert . . . . .                                                            | 650        |
| 14.6.2    | Rotordurchmesser . . . . .                                                                    | 652        |
| 14.6.3    | Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität . . . . .                                     | 653        |
| 14.6.4    | Blatteinstellwinkelregelung im Vergleich zur Leistungsbegrenzung<br>durch den Stall . . . . . | 656        |
| 14.6.5    | Installierte Generatorleistung . . . . .                                                      | 657        |
| 14.6.6    | Nabenhöhe des Rotors . . . . .                                                                | 659        |
| 14.6.7    | Betriebswindgeschwindigkeitsbereich . . . . .                                                 | 660        |
| 14.6.8    | Die Windkraftanlage als Energiewandler —<br>eine grundsätzliche Betrachtung . . . . .         | 661        |
|           | Literatur . . . . .                                                                           | 663        |
| <b>15</b> | <b>Umweltverhalten</b>                                                                        | <b>665</b> |
| 15.1      | Gefahren für die Umgebung . . . . .                                                           | 666        |
| 15.1.1    | Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen? . . . . .                                               | 666        |
| 15.1.2    | Risikobetrachtungen . . . . .                                                                 | 669        |
| 15.2      | Schallemissionen . . . . .                                                                    | 670        |
| 15.2.1    | Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte . . . . .                                 | 670        |
| 15.2.2    | Geräuschquellen bei Windkraftanlagen . . . . .                                                | 671        |
| 15.2.3    | Schalleistungspegel . . . . .                                                                 | 675        |
| 15.2.4    | Schallausbreitung . . . . .                                                                   | 678        |
| 15.3      | Schattenwurf . . . . .                                                                        | 682        |
| 15.4      | Störungen von Funk und Fernsehen . . . . .                                                    | 685        |
| 15.5      | Gefahren für die Vogelwelt . . . . .                                                          | 687        |
| 15.6      | Landverbrauch . . . . .                                                                       | 689        |
| 15.7      | Optische Beeinträchtigung der Landschaft . . . . .                                            | 691        |
| 15.8      | Windenergienutzung und Klimaschutz . . . . .                                                  | 693        |
| 15.8.1    | Einflüßauf das Umgebungs-klima . . . . .                                                      | 693        |
| 15.8.2    | Nutzung der Windkraft und CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .                               | 694        |
|           | Literatur . . . . .                                                                           | 696        |



|           |                                                                              |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>16</b> | <b>Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche</b>                            | <b>699</b> |
| 16.1      | Windkraftanlagen im Inselbetrieb . . . . .                                   | 700        |
| 16.1.1    | Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherproblematik . . . . . | 701        |
| 16.1.2    | Heizen mit Windenergie . . . . .                                             | 707        |
| 16.1.3    | Wasserpumpen . . . . .                                                       | 710        |
| 16.1.4    | Entsalzen von Meerwasser . . . . .                                           | 713        |
| 16.2      | Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen . . . . .              | 716        |
| 16.3      | Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz . . . . .                      | 720        |
| 16.3.1    | Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb . . . . .                               | 721        |
| 16.3.2    | Windfarmen und Windparks . . . . .                                           | 722        |
| 16.4      | Windkraftanlagen im Kraftwerksverbund . . . . .                              | 726        |
| 16.4.1    | Die Regelungsproblematik . . . . .                                           | 727        |
| 16.4.2    | Das Verbundnetz . . . . .                                                    | 729        |
| 16.4.3    | Beitrag zur gesicherten Leistung . . . . .                                   | 731        |
| 16.5      | Windkraftanlagenindustrie und Absatzmärkte . . . . .                         | 732        |
| 16.5.1    | Historische Entwicklung der Absatzmärkte . . . . .                           | 733        |
| 16.5.2    | Die Windkraftanlagenhersteller . . . . .                                     | 735        |
| 16.5.3    | Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen . . . . .                 | 737        |
|           | Literatur . . . . .                                                          | 741        |
| <b>17</b> | <b>Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere</b>                         | <b>743</b> |
| 17.1      | Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen . . . . .  | 744        |
| 17.1.1    | Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen . . . . .                   | 744        |
| 17.1.2    | Gründung auf dem Meeresgrund . . . . .                                       | 747        |
| 17.1.3    | Elektrische Konzeption . . . . .                                             | 756        |
| 17.2      | Transport und Montage . . . . .                                              | 761        |
| 17.3      | Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen . . . . .                              | 764        |
| 17.3.1    | Wetterbedingte Zugänglichkeit . . . . .                                      | 764        |
| 17.3.2    | Wartung und Instandsetzung . . . . .                                         | 766        |
| 17.4      | Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee . . . . .        | 768        |
| 17.4.1    | Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse . . . . .                  | 768        |
| 17.4.2    | Völkerrechtliche Situation . . . . .                                         | 772        |
| 17.4.3    | Kriterien für das Genehmigungsverfahren . . . . .                            | 774        |
| 17.4.4    | Die ersten Offshore-Windparks . . . . .                                      | 776        |
| 17.5      | Offshore-Windenergie in Europa . . . . .                                     | 779        |
| 17.6      | Strom aus der Nordsee- und Ostsee für Deutschland . . . . .                  | 784        |
| 17.7      | Offshore-Projekte Weltweit . . . . .                                         | 787        |
|           | Literatur . . . . .                                                          | 789        |
| <b>18</b> | <b>Planung, Errichtung und Betrieb</b>                                       | <b>791</b> |
| 18.1      | Projektentwicklung . . . . .                                                 | 792        |
| 18.2      | Genehmigungsverfahren . . . . .                                              | 794        |
| 18.2.1    | Gesetze und Regelwerke . . . . .                                             | 794        |
| 18.2.2    | Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien . . . . .          | 797        |

|           |                                                                   |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.2.3    | Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG . . . . .         | 798        |
| 18.2.4    | Baugenehmigung für einzelne Anlagen . . . . .                     | 801        |
| 18.3      | Technische Auslegung von Windparks . . . . .                      | 802        |
| 18.3.1    | Aerodynamik der Feldaufstellung . . . . .                         | 802        |
| 18.3.2    | Interne elektrische Verkabelung und Stichleitung zum Netz . . . . | 806        |
| 18.3.3    | Netzanschluß . . . . .                                            | 812        |
| 18.4      | Tiefbauarbeiten am Aufstellort . . . . .                          | 817        |
| 18.5      | Transportprobleme . . . . .                                       | 824        |
| 18.6      | Errichtung am Aufstellort . . . . .                               | 827        |
| 18.6.1    | Standardverfahren für Anlagen der 2–3 MW Klasse . . . . .         | 827        |
| 18.6.2    | Spezielle Verfahren für schwierige Aufstellbedingungen . . . . .  | 831        |
| 18.6.3    | Große Anlagen über 3 MW . . . . .                                 | 835        |
| 18.6.4    | Motageverfahren für Anlagen mit Zweiblattrotor . . . . .          | 837        |
| 18.7      | Inbetriebnahme . . . . .                                          | 843        |
| 18.7.1    | Kommerzielle Anlagen . . . . .                                    | 843        |
| 18.7.2    | Versuchsanlagen und Prototypen . . . . .                          | 844        |
| 18.8      | Technische Betriebsführung . . . . .                              | 846        |
| 18.8.1    | Erfassung der Betriebsdaten . . . . .                             | 846        |
| 18.8.2    | Überwachung und Steuerung mit SCADA-Systemen . . . . .            | 849        |
| 18.8.3    | Technische Zustandsüberwachung – Condition Monitoring . . . .     | 851        |
| 18.9      | Betriebssicherheit . . . . .                                      | 853        |
| 18.9.1    | Arbeitssicherheit . . . . .                                       | 853        |
| 18.9.2    | Technische Sicherheitssysteme . . . . .                           | 854        |
| 18.9.3    | Gefahren durch extreme Wetterlagen . . . . .                      | 859        |
| 18.10     | Wartung und Instandsetzung . . . . .                              | 864        |
| 18.10.1   | Reguläre Wartung und Wiederkehrende Prüfungen . . . . .           | 865        |
| 18.10.2   | Schadensursachen und Reparaturrisiken . . . . .                   | 866        |
| 18.10.3   | Statistische Auswertungen . . . . .                               | 870        |
|           | Literatur . . . . .                                               | 872        |
| <b>19</b> | <b>Kosten von Windkraftanlagen</b>                                | <b>873</b> |
| 19.1      | Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen . . . . .  | 874        |
| 19.1.1    | Spezifische Kosten und Bezugsgrößen . . . . .                     | 875        |
| 19.1.2    | Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten . .  | 877        |
| 19.1.3    | Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen . . . . .                 | 882        |
| 19.1.4    | Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten    | 885        |
| 19.1.5    | Weitere kostenbestimmende Faktoren . . . . .                      | 888        |
| 19.1.6    | Herstellkosten und Kostenstruktur für zwei typische Beispiele . . | 890        |
| 19.1.7    | Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten . . . . .              | 894        |
| 19.1.8    | Kostendegression in der Serienfertigung . . . . .                 | 897        |
| 19.1.9    | Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung . . . . .        | 899        |
| 19.1.10   | Alternative technische Konzeptionen . . . . .                     | 900        |
| 19.1.11   | Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen . . . . .        | 901        |
| 19.1.12   | Verkaufspreise von Windkraftanlagen . . . . .                     | 903        |
| 19.2      | Investitionskosten von schlüsselfertigen Projekten . . . . .      | 905        |

|           |                                                                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 19.2.1    | Projektentwicklung . . . . .                                                                                   | 906        |
| 19.2.2    | Technische Infrastruktur . . . . .                                                                             | 907        |
| 19.2.3    | Sonstige Kosten . . . . .                                                                                      | 910        |
| 19.2.4    | Typische Kostenbeispiele . . . . .                                                                             | 912        |
| 19.3      | Betriebskosten . . . . .                                                                                       | 915        |
| 19.3.1    | Wartung und Instandsetzung . . . . .                                                                           | 916        |
| 19.3.2    | Versicherungen . . . . .                                                                                       | 918        |
| 19.3.3    | Sonstige Betriebskosten . . . . .                                                                              | 919        |
| 19.3.4    | Gesamte jährliche Betriebskosten . . . . .                                                                     | 920        |
| 19.4      | Offshore-Windparks . . . . .                                                                                   | 921        |
| 19.4.1    | Bestimmende Faktoren für die Investitionskosten . . . . .                                                      | 921        |
| 19.4.2    | Entwicklung der Investitionskosten seit 1990 . . . . .                                                         | 923        |
| 19.4.3    | Typische Kostenbeispiele . . . . .                                                                             | 923        |
| 19.4.4    | Betriebskosten . . . . .                                                                                       | 927        |
| 19.4.5    | Ausblick . . . . .                                                                                             | 928        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                            | 929        |
| <b>20</b> | <b>Wirtschaftlichkeit der Windenergie</b>                                                                      | <b>931</b> |
| 20.1      | Unternehmensformen und Finanzierung . . . . .                                                                  | 932        |
| 20.2      | Statische Berechnung der Stromerzeugungskosten . . . . .                                                       | 935        |
| 20.2.1    | Typische Beispiele . . . . .                                                                                   | 937        |
| 20.2.2    | Offshore-Windparks . . . . .                                                                                   | 941        |
| 20.3      | Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit . . . . .                                                         | 944        |
| 20.3.1    | Kapital- oder Barwertmethode . . . . .                                                                         | 944        |
| 20.3.2    | Kapitalflußprognose für einen Windpark . . . . .                                                               | 946        |
| 20.4      | Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich<br>zu anderen Energiesystemen . . . . .                     | 950        |
| 20.5      | Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung von Windkraftanlagen                                         | 953        |
| 20.6      | Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung . . . . .                                                            | 956        |
| 20.7      | Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen<br>für die Nutzung der erneuerbaren Energien . . . . . | 957        |
|           | Literatur . . . . .                                                                                            | 960        |
|           | <b>Glossar – englische Fachausdrücke</b>                                                                       | <b>963</b> |
|           | Deutsch – Englisch . . . . .                                                                                   | 963        |
|           | Englisch – Deutsch . . . . .                                                                                   | 974        |
|           | <b>Sachverzeichnis</b>                                                                                         | <b>985</b> |