

Inhalt

| | |
|--|----|
| Überblick und Einführung | xv |
| 1 Abkehr von fossilen Brennstoffen: Probleme, Ziele und Lösungsansätze | 1 |
| 1.1 Probleme fossiler Energieträger: abnehmende Ressourcen, zunehmende politische Abhängigkeit, Klimawandel | 1 |
| 1.1.1 Energiepreisentwicklung | 3 |
| 1.1.2 Abhängigkeit und Erpressbarkeit Europas | 5 |
| 1.2 Ziele und Maßnahmen zur Lösung des Klimaproblems | 6 |
| 1.2.1 Effizienzsteigerungen und Einsparungen | 7 |
| 1.2.2 Erneuerbare und nachwachsende Energie | 8 |
| 1.2.3 Nukleare Optionen | 9 |
| 1.2.4 Kohlendioxid-Rückhaltung | 11 |
| 1.3 Leitszenarien für zukünftige Energiestrukturen | 12 |
| 1.3.1 Wie sind die Aussichten, die Energie- und Klimaziele zu erreichen? | 12 |
| 1.3.2 Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 | 14 |
| 1.3.3 Regenerative Stromerzeugung in Deutschland bis 2050 | 16 |

Teil I Grundlagen der Erzeugung und Übertragung von Windenergie

| | |
|--|----|
| 2 Physikalisch-technische Grundlagen der Windenergienutzung | 23 |
| 2.1 Globale und lokale Luftzirkulation in der Atmosphäre – Klima und Wetter | 23 |
| 2.1.1 Reguläre und chaotische Strömung | 24 |
| 2.1.2 Wind und Windenergie | 27 |
| 2.2 Von der Bewegungsenergie des Windes zur elektrischen Energie | 28 |
| 2.2.1 Umwandlung Stufe 1: Von der Luftströmung zur Drehung der Turbinenwelle | 28 |
| 2.2.2 Umwandlung Stufe 2: Von der Turbine bis zum Drehstromausgang einer Windenergieanlage: die Leistungskennlinie | 31 |
| 2.3 Regelung und Netzeinspeisung | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Wind als stochastische Energiequelle | 39 |
| 3.1 | Statistische Beschreibung von Windgeschwindigkeiten | 39 |
| 3.2 | Windenergieproduktion an einem gegebenen Standort | 44 |
| 3.2.1 | Leistung-Dauer-Kurve | 44 |
| 3.2.2 | Jahresenergieproduktion und Volllaststunden | 49 |
| 3.2.3 | Theoretisch versus tatsächlich zu erwartende Volllaststunden | 50 |
| 3.3 | Extreme zeitliche Schwankungen der Windgeschwindigkeit | 52 |
| 3.3.1 | Einzelanlage versus Windpark | 53 |
| 3.3.2 | Energieproduktion aller deutschen Windkraftwerke | 54 |
| 4 | Versorgungssicherheit im Stromnetz bei hoher Windenergieeinspeisung | 57 |
| 4.1 | Stromnetze und Windenergie | 57 |
| 4.1.1 | Trennung von Stromerzeugung, Übertragungsnetzbetrieb und Stromverkauf | 58 |
| 4.1.2 | Ausbau der Stromnetze erforderlich | 59 |
| 4.2 | Übertragungsleistung und Versorgungssicherheit | 61 |
| 4.2.1 | Zuverlässige Versorgung von Stromverbrauchern: das (n-1)-Kriterium | 61 |
| 4.2.2 | Übertragung von Windenergie durch ein vermaschtes System: modifiziertes (n-1)-Kriterium | 64 |
| 4.2.3 | Anschluss von Windparks an das Höchstspannungsnetz | 65 |
| 4.3 | Windbedingte Erhöhung der Übertragungsfähigkeit des Stromnetzes | 67 |
| 4.3.1 | Erhöhung von Versorgungssicherheit und Übertragungsleistung <i>ohne</i> Netzneubau: Leitungsmonitoring und Hochtemperaturseile | 68 |
| 4.3.2 | Netzneubau: Freileitung versus Erdkabel | 75 |
| 4.4 | Netzanbindung der Offshore-Windparks | 81 |
| 4.4.1 | Übernahme der Netzanbindung durch die Übertragungsnetzbetreiber | 81 |
| 4.4.2 | Umsetzung der Offshore-Netzanbindung in der Nordsee | 82 |
| 4.4.3 | Netzintegration der Windenergie in Europa – Europäisches Offshore-Supergrid | 84 |

Teil II Windenergieausbau

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Systematische Berücksichtigung von externen Kosten: Erneuerbare-Energien-Gesetz | 93 |
| 5.1 | Berücksichtigung der externen Kosten der konventionellen Stromerzeugung | 93 |
| 5.1.1 | Förderung der erneuerbaren Energien | 95 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.1.2 | Zum Charakter des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und der Rolle der Förderinstrumente | 96 |
| 5.2 | Vom Stromeinspeisungsgesetz 1991 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz 2000/2004 | 98 |
| 5.2.1 | Das Stromeinspeisungsgesetz 1991 | 98 |
| 5.2.2 | Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2000 | 99 |
| 5.2.3 | Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2004 | 100 |
| 5.3 | Das Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2008 | 101 |
| 5.3.1 | Der EEG-Erfahrungsbericht von November 2007 | 101 |
| 5.3.2 | Erneuerbare Energien verringern die Börsen-Strompreise | 103 |
| 5.3.3 | Änderungen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2008 | 104 |
| 5.4 | Zukünftige Weiterentwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes | 105 |
| 5.4.1 | Reine Börsenvergütung verhindert Zubau von Windenergieanlagen – Beispiel Dänemark | 105 |
| 5.4.2 | Eigenvermarktung der Windenergie durch die Windmüller | 106 |
| 5.4.3 | Vermarktung des EEG-Stroms durch den Übertragungsnetzbetreiber | 107 |
| 5.4.4 | Übergang von der EEG-Mindestvergütung zur Strombörse risikoreich | 108 |
| 6 | Windenergieausbau und Verwaltungsverfahren | 113 |
| 6.1 | Windenergieausbau onshore | 113 |
| 6.1.1 | Eignungsflächen und Genehmigungsverfahren | 114 |
| 6.1.2 | Planungserlasse und Flächenoptimierung | 115 |
| 6.2 | Windenergieausbau offshore | 119 |
| 6.2.1 | Genehmigungsverfahren des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie | 119 |
| 6.2.2 | Eignungsgebiete und Raumordnung in der ausschließlichen Wirtschaftszone | 122 |
| 6.3 | Stromnetzausbau und Verwaltungsverfahren | 124 |
| 6.3.1 | Gesetzliche Vorgaben zur Verkabelung von Höchstspannungsleitungen | 124 |
| 6.3.2 | Leitlinien für transeuropäische Energienetze 2007 | 126 |
| 6.3.3 | Energieleitungsausbaugesetz 2008 | 126 |
| 6.4 | Fallbeispiel Schleswig-Holstein | 127 |
| 6.4.1 | Praxiserfahrungen im Windland Schleswig-Holstein | 127 |
| 6.4.2 | Handlungsfeld Repowering oder aus weniger wird mehr | 130 |
| 6.4.3 | Handlungsfeld Offshore-Windenergie oder der Weg aufs Meer | 131 |
| 6.4.4 | Handlungsfeld Stromnetze oder die Ertüchtigung der Infrastruktur | 132 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | Windenergie in Deutschland, Europa und weltweit | 135 |
| 7.1 | Windenergie in Deutschland | 135 |
| 7.1.1 | Ausbauplanung der deutschen Bundesregierung bis 2030 | 135 |
| 7.1.2 | Windenergieproduktion und Stromverbrauch | 139 |
| 7.2 | Zukünftige Offshore-Windenergie in Deutschland | 139 |
| 7.2.1 | Die Entwicklung der Offshore-Windenergie | 140 |
| 7.2.2 | Genehmigte Offshore-Windkraftwerke | 144 |
| 7.2.3 | Probleme beim Offshore-Windenergieausbau | 146 |
| 7.3 | Windenergie in Europa und weltweit | 149 |
| 7.3.1 | Windenergie in Europa | 149 |
| 7.3.2 | Windenergie weltweit | 151 |

Teil III Optimierung des Windenergieausbaus

| | | |
|----------|--|------------|
| 8 | Grundlagen der Optimierung: Nutzen versus Kosten | 157 |
| 8.1 | Nutzen und Kosten der Windenergie | 157 |
| 8.1.1 | Nutzen der Windenergie | 157 |
| 8.1.2 | Kosten der Windenergie | 160 |
| 8.1.3 | Monetäre Bewertung von Nutzen und Kosten der Windenergie | 161 |
| 8.1.4 | Abgeltung des volkswirtschaftlichen Nutzens durch die EEG-Mindesteinspeisevergütung | 162 |
| 8.2 | Grenznutzen und Grenzkosten | 162 |
| 8.3 | Grenznutzenkurve einer zeitlich fluktuierenden Quelle wie der Windenergie | 167 |
| 8.3.1 | Monetarisierung des Nutzens | 167 |
| 8.3.2 | Prinzip der Erstellung einer Dauer-Leistung-Kurve | 168 |
| 8.3.3 | Dauer-Leistung-Kurve und Grenznutzen- Leistung-Kurve | 170 |
| 8.3.4 | Anwendung der Grenznutzenfunktion | 173 |
| 9 | Optimierung von Windenergieanlagen | 175 |
| 9.1 | Entwicklung von Rotordurchmesser und installierter Leistung | 175 |
| 9.2 | Kosten der Onshore-Windkraftwerke | 179 |
| 9.2.1 | Kostenstruktur | 179 |
| 9.2.2 | Sinkende Stromerzeugungskosten der Windenergie bis 2006 | 181 |
| 9.2.3 | Steigende Stromerzeugungskosten der Windenergie seit 2006 | 182 |
| 9.3 | Kosten der Offshore-Windkraftwerke | 183 |
| 9.4 | Optimierung statt Maximierung des Windenergieausbaus | 187 |
| 9.4.1 | Optimierung der installierten Leistung pro Rotorfläche | 188 |
| 9.4.2 | Verringerung der Windleistungsspitzen | 191 |

| | |
|--|-----|
| 10 Optimierung der Übertragung von Windenergie | 195 |
| 10.1 Wirtschaftliche Zumutbarkeit als Begrenzung für Netzausbau | 195 |
| 10.1.1 Drei verschiedene Standardfälle | 195 |
| 10.1.2 Optimierung der Erhöhung der Übertragungsleistung | 197 |
| 10.1.3 Wirtschaftliche Zumutbarkeit als Verhältnismäßigkeit von volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten | 198 |
| 10.1.4 Richtgrößen für Netzausbau und für dynamische Begrenzung von kurzzeitigen Erzeugungsspitzen | 199 |
| 10.1.5 Faustregeln für wirtschaftliche Zumutbarkeit | 200 |
| 10.2 Objektive Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus | 202 |
| 10.2.1 Bestimmung des Grenznutzens einer Erhöhung der Übertragungsleistung | 203 |
| 10.2.2 Bestimmung der Grenzkosten einer Erhöhung der Übertragungsleistung | 203 |
| 10.2.3 Optimierung der Erhöhung der Übertragungsleistung | 204 |
| 10.3 Fallbeispiele | 208 |
| 10.3.1 Fallbeispiel 1: 110-kV-Anbindung von Windparks | 209 |
| 10.3.2 Fallbeispiel 2: Netzanbindung von Offshore-Windenergieanlagen | 211 |
| 10.3.3 Fallbeispiel 3: 380-kV-Fernleitungen | 219 |
| 10.3.4 Exkurs: dena-Netzstudien | 223 |

Teil IV Optimierung des gesamten Kraftwerkssystems bei hohen Windenergieanteilen

| | |
|---|-----|
| 11 Struktur und Entwicklung des Kraftwerksparks: | |
| Zielvorgaben und Szenarien | 231 |
| 11.1 Bisheriges System von Stromnachfrage, Stromerzeugung und Stromübertragung | 231 |
| 11.1.1 Gesetzliches Grundprinzip: Jederzeitige Deckung der Stromnachfrage | 231 |
| 11.1.2 Ausgangssituation: Installierte Leistung und Stromerzeugung 1997, 2002 und 2007 | 234 |
| 11.1.3 Stromübertragung | 235 |
| 11.2 Kraftwerkseinsatzplanung | 236 |
| 11.2.1 Grundlast, Mittellast, Spitzenlast | 236 |
| 11.2.2 Änderungen durch die Windenergie | 238 |
| 11.2.3 Exkurs: Kraftwerkseinsatzplanung und Preisbildung an der Strombörse | 239 |
| 11.3 Zielvorgaben der Bundesregierung für die deutsche Kraftwerksstruktur | 241 |
| 11.3.1 Zukünftiges Kraftwerkssystem in der Diskussion | 241 |
| 11.3.2 Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaschutzprogramm der Bundesregierung | 242 |

- 11.3.3 Monitoring-Bericht des Bundeswirtschaftsministeriums
2008 244
 - 11.4 Ausgewählte Szenarien der zukünftigen Kraftwerksstruktur 244
 - 11.4.1 dena-Kurzanalyse 2008 und ihre Bewertung 245
 - 11.4.2 Arrhenius-Institut und Öko-Institut:
Klimaschutz und Stromwirtschaft 2020/2030 247
 - 11.4.3 Greenpeace: Nationales Energiekonzept bis 2020 247
 - 11.4.4 Schlussfolgerungen aus den Studien zur zukünftigen
Kraftwerksentwicklung 251
- 12 Entwicklung des Kraftwerkssystems bei über
50 GW Windleistung 255**
 - 12.1 Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage bei hohen
Windenergieanteilen 255
 - 12.1.1 Schwankungen von Stromangebot und
von Stromnachfrage 256
 - 12.1.2 Ausgleich von Stromangebot und von Stromnachfrage ... 256
 - 12.1.3 Speicher für elektrische Energie 257
 - 12.2 Ausgleich von Windenergieschwankungen 259
 - 12.2.1 Ausgleich von Windenergieschwankungen bis zu
einigen Stunden 259
 - 12.2.2 Ausgleich längerer Windflauten 262
 - 12.3 Nachfragedeckung bei hohem Windenergieanteil 265
 - 12.3.1 Anteil der Windenergieeinspeisung an
der Stromnachfrage 266
 - 12.3.2 Restnachfrage, die für konventionelle Kraftwerke
verbleibt 269
 - 12.4 Windenergieanlagen versus Grundlastkraftwerke:
ein Entweder-Oder 272
 - 12.4.1 Mit wachsender Windenergieeinspeisung deutlich
abnehmende Benutzungsdauer der Grundlastkraftwerke ... 272
 - 12.4.2 Bei hoher Windenergieeinspeisung neue
Grundlastkraftwerke nicht mehr wirtschaftlich
betreibbar 274
- Liste der Tabellen 279**
- Liste der Abbildungen 281**
- Liste der Kästen 287**
- Sachverzeichnis 289**