

Lorenz Jarass
Gustav M. Obermair
Wilfried Voigt

Windenergie

Zuverlässige Integration
in die Energieversorgung

2., vollständig neu bearbeitete Auflage

 Springer

Prof. Dr. Lorenz Jarass
Rhein-Main-University Wiesbaden
Dudenstr. 33
65193 Wiesbaden
www.JARASS.com

Prof. Dr. Gustav M. Obermair
Riverside Plot 124
P.O. Box 8141
Swakopmund, Namibia

Wilfried Voigt
Brückenstr. 29
24148 Kiel

ISBN 978-3-540-85252-0

e-ISBN 978-3-540-85253-7

DOI 10.1007/978-3-540-85253-7

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980, 2009

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandgestaltung: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.de

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

Liste der Tabellen

Tab. 3.1	Windgeschwindigkeiten an der Küste und im Binnenland – Weibull-Parameter für 2004/2005	42
Tab. 4.1	Investitions- und Vollkosten von Erdkabeln als Vielfaches der Kosten von Freileitungen	81
Tab. 5.1	Entwicklung der durchschnittlichen EEG-Vergütung 2000–2006	102
Tab. 5.2	Entwicklung des EEG-Vergütungsvolumens 2000–2006	102
Tab. 5.3	Entwicklung der EEG-Differenzkosten 2000–2006	103
Tab. 7.1	Ausbauplanung der Bundesregierung für Windenergieanlagen bis 2030	136
Tab. 7.2	Windenergieproduktion und Anteil am Stromverbrauch in den einzelnen Bundesländern 2006	139
Tab. 7.3	Genehmigte Offshore-Windparks – Nordsee	145
Tab. 7.4	Genehmigte Offshore-Windparks – Ostsee	146
Tab. 7.5	Installierte Windkraftwerksleistung in Europa 2005 und 2007	149
Tab. 7.6	Weltweit installierte Windkraftwerksleistung nach Regionen 2005 und 2007	151
Tab. 8.1	Bewertung von Nutzen und Kosten der Windenergie	161
Tab. 9.1	Die größten Windenergieanlagen der Welt 2008	177
Tab. 9.2	Investitionskosten eines Offshore-Windparks	184

Tab. 9.3	Stromerzeugungskosten von Offshore-Windparks – Prognose . .	184
Tab. 9.4	Jahresenergieertrag für unterschiedlich installierte Flächenleistungen	190
Tab. 10.1	Kosten der Netzanbindung von Windkraftwerken	205
Tab. 10.2	Zeitliche Verteilung und Gleichzeitigkeitsfaktor der Windenergieeinspeisung	220
Tab. 10.3	Wirtschaftlich zumutbare windbedingte Netzverstärkung in der Vattenfall-Regelzone	222
Tab. 11.1	Installierte Leistung nach Kraftwerksarten 1997, 2002, 2007 . . .	234
Tab. 11.2	Stromerzeugung nach Kraftwerksarten 1997, 2002, 2007	235
Tab. 11.3	Anteile einzelner Energieträger an der installierten Leistung und an der Stromerzeugung 2007	235
Tab. 11.4	Außerbetriebnahme von Kernkraftwerken in Deutschland bis zum Jahr 2020	244
Tab. 11.5	Deckungslücke für unterschiedliche dena-Szenarien	245
Tab. 11.6	Referenz-Szenario von arrhenius-Institut und Öko-Institut bis 2030	248
Tab. 11.7	Alternativ-Szenario von arrhenius-Institut und Öko-Institut bis 2030	249
Tab. 11.8	Greenpeace-Studie Klimaschutz: Bedarfsdeckung in 2015 und 2020	249
Tab. 11.9	Greenpeace-Studie Klimaschutz: Entwicklung des Kraftwerksparks bis 2015	250
Tab. 11.10	Greenpeace-Studie Klimaschutz: Entwicklung des Kraftwerksparks bis 2020	250
Tab. 12.1	Extremwerte der Windenergieeinspeisung in der E.ON-Netz-Regelzone in 2006, gemittelt über eine Viertelstunde	267
Tab. 12.2	Last, EEG-Erzeugung und konventionelle Erzeugung in 3 Netzregionen bei Starklast/Schwachwind und bei Schwachlast/Starkwind, Prognose für 2012	273

Liste der Abbildungen

Abb. 1.1	Rohölpreise 1973–2008	3
Abb. 1.2	Energiepreisentwicklung für Haushalte und für Industrie, OECD, preisbereinigt, 1978–2008	4
Abb. 1.3	Energiepreisentwicklung für Haushalte und für Industrie, Deutschland, preisbereinigt, 1983–2008	5
Abb. 1.4	Installierte Leistungen zur Stromerzeugung in Deutschland bis 2050	15
Abb. 1.5	Mögliche Entwicklung der gesamten Stromerzeugung in Deutschland bis 2050	15
Abb. 1.6	Installierte Leistungen zur regenerativen Stromerzeugung in Deutschland bis 2050	16
Abb. 1.7	Entwicklung der regenerativen Stromerzeugung in Deutschland bis 2050	18
Abb. 2.1	Betz'scher Leistungsbeiwert einer Windenergieanlage	30
Abb. 2.2	Leistungsbeiwert von Enercon-70m/2,3MW und Enercon-82m/2MW	31
Abb. 2.3	Regelung des Leistungsbeiwerts durch Blattanstellwinkelverstellung	33
Abb. 2.4	Leistung-Geschwindigkeit-Kurven von Enercon-70m/2,3MW, Enercon-82m/2MW und Repower-126m/5MW	35
Abb. 2.5	Flächenleistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit .	36

Abb. 3.1	Windgeschwindigkeiten in der Nordsee – FINO1-Forschungsplattform 2004–2005	41
Abb. 3.2	Geschwindigkeit-Dauer-Kurve der FINO1-Forschungsplattform 2004–2007	43
Abb. 3.3	Normierte Leistung-Dauer-Kurven von Einzelanlage, Windparkgruppe und deutschlandweiter Einspeisung	47
Abb. 3.4	Flächenleistung-Dauer-Kurven, berechnet für drei Regionen mit je einer anderen Windenergieanlage	48
Abb. 3.5	Leistung-Dauer-Kurven der Windenergieeinspeisung – Beispiel: Vattenfall-Regelzone 2005–2007	48
Abb. 3.6	Flächenleistung-Dauer-Kurve – schematisch	49
Abb. 3.7	Leistung-Dauer-Kurven der Windenergieeinspeisung – Beispiel: simulierte Einspeisung einer Repower-126m/5MW am FINO1-Standort 2004–2007	51
Abb. 3.8	Zeitlicher Verlauf der Leistung einer Einzelanlage und einer Windparkgruppe an der Küste an 10 Starkwindtagen	53
Abb. 3.9	Stündliche Mittelwerte aller deutschen Windenergieanlagen – Beispiel: Mai 2008	54
Abb. 3.10	Tagesmittelwerte aller deutschen Windenergieanlagen – Beispiel: Januar–Juni 2008	55
Abb. 3.11	Windenergieproduktion pro Monat in Deutschland 2006–2008 ..	55
Abb. 4.1	Stromnetz in Thüringen	63
Abb. 4.2	Leitertemperatur in Abhängigkeit der Strombelastung für vier verschiedene Varianten der Umgebungsbedingungen	69
Abb. 4.3	Reduzierung der Einspeisebeschränkung für Windenergie durch Freileitungsmonitoring – Schema	71
Abb. 4.4	Lage und Trassenverlauf des Offshore-Clusters Borkum 2	83
Abb. 4.5	Netzanbindung für den Offshore-Cluster Borkum 2	84
Abb. 4.6	Europäisches Offshore-Supergrid – voller Ausbau	85
Abb. 5.1	Wirkungsweise des Börsenpreis-Senkungseffekts	104

Liste der Abbildungen	283
Abb. 6.1	Ablauf des Genehmigungsverfahrens für Windenergieanlagen gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz 116
Abb. 6.2	Eignungsgebiete in der Nordsee 123
Abb. 6.3	Eignungsgebiete in der Ostsee 123
Abb. 6.4	Bestandsentwicklung der Windenergieanlagen in Schleswig-Holstein 128
Abb. 7.1	Prognose der insgesamt installierten Windleistung in Deutschland bis 2030 136
Abb. 7.2	Windenergie in den deutschen Bundesländern 2007 138
Abb. 7.3	Anteil der Windenergie am Nettostromverbrauch in den deutschen Bundesländern 2007 140
Abb. 7.4	Genehmigte Offshore-Windparks – Nordsee 144
Abb. 7.5	Genehmigte Offshore-Projekte – Ostsee 146
Abb. 7.6	Insgesamt in EU-27-Ländern installierte Windleistung 2007–2030 150
Abb. 7.7	Jährlich netto in EU-27-Ländern installierte Windleistung 2007–2030 150
Abb. 7.8	Windenergieproduktion in EU-27-Ländern 2007–2030 150
Abb. 7.9	Weltweit installierte Windleistung und jährlicher Zubau 2000–2010 152
Abb. 8.1	Externe Kosten der Stromerzeugung für verschiedene Stromerzeugungsoptionen 158
Abb. 8.2	Vermiedene Kosten konventioneller Stromerzeugung 159
Abb. 8.3	Nutzen und Kosten als Funktion des Kapitaleinsatzes 166
Abb. 8.4	Erstellung einer Dauer-Leistung-Kurve 169
Abb. 8.5	Herleitung der Grenznutzen-Leistung-Kurve aus einer Dauer-Leistung-Kurve – schematisch 171
Abb. 9.1	Entwicklung von Rotordurchmesser und installierter Leistung seit 1980 176

Abb. 9.2	Durchschnittlich pro Windenergieanlage installierte Leistung 1987–2007	177
Abb. 9.3	Installierte Rotordurchmesser 1987–2007	178
Abb. 9.4	Kostenstruktur für Herstellung und Montage einer 1,2-MW-Windenergieanlage	180
Abb. 9.5	Struktur der Investitionsnebenkosten einer Windenergieanlage ..	180
Abb. 9.6	Struktur der Betriebskosten einer Windenergieanlage	181
Abb. 9.7	Spezifische Nennleistungen von Windenergieanlagen	189
Abb. 9.8	Dauer-Leistung-Kurven für einen Küstenstandort mit unterschiedlichen Windenergieanlagen	189
Abb. 10.1	Bestimmung des wirtschaftlich zumutbaren Netzausbaus	207
Abb. 10.2	Wirtschaftlich zumutbarer Netzausbau von küstennahen Windparks	209
Abb. 10.3	Grenznutzen-Leistung-Kurve einer einzelnen Windenergieanlage am Offshore-Standort FINO1 bei 100% technischer Verfügbarkeit	215
Abb. 10.4	Grenznutzen-Leistung-Kurve eines Windparks am Offshore-Standort FINO1 bei 100% technischer Verfügbarkeit	217
Abb. 10.5	Wirtschaftlich zumutbare Netzanbindung für einen Windpark am Offshore-Standort FINO1	218
Abb. 10.6	Wirtschaftlich zumutbarer windbedingter Netzausbau	221
Abb. 11.1	Tagesgang der Stromnachfrage – Beispiel E.ON-Netz-Regelzone 2007	232
Abb. 11.2	Jahresgang der Stromnachfrage – Beispiel E.ON-Netz-Regelzone 2007	233
Abb. 11.3	Preisbildungsmechanismus an der Strombörse	240
Abb. 11.4	Installierte Leistungen zur Stromerzeugung in Deutschland bis 2050	243

Liste der Abbildungen	285
Abb. 11.5 Außerbetriebnahmen von fossilen Kraftwerken in Deutschland bis zum Jahr 2020	246
Abb. 12.1 Windenergieeinspeisung pro Netzhöchstlast in der E.ON-Netz-Regelzone in 2006, gemittelt über 1 Stunde	266
Abb. 12.2 Windenergieeinspeisung und Stromnachfrage in der E.ON-Netz-Regelzone am Extremtag 14. Januar 2007, viertelstündliche Werte	267
Abb. 12.3 Tagesgang der Stromnachfrage und ihre Deckung ohne und mit Windenergie – schematisch	268
Abb. 12.4 Jahresgang der Stromnachfrage und der Windenergieproduktion .	269
Abb. 12.5 Tagesgang der Stromnachfrage und ihre Deckung ohne und mit Windenergie in der E.ON-Netz-Regelzone, durchschnittliche Tagesleistung, Januar–Juni 2008	270

Liste der Kästen

Kasten 2.1	Mathematische Beschreibung der Strömungen in einem rotierenden Bezugssystem	25
Kasten 2.2	Klimamodelle und Chaostheorie	26
Kasten 3.1	Ermittlung der Leistung-Dauer-Kurve bestehender Windenergieanlagen	45
Kasten 3.2	Numerische Berechnung der Flächenleistung-Dauer-Kurve ...	45
Kasten 4.1	Beispiel zur Übertragung von Windenergie bei Starkwind	65
Kasten 5.1	Stürme wirbeln Strommärkte durcheinander	108
Kasten 8.1	Definitionen und Rechenschritte für die Optimierung	163
Kasten 8.2	Mathematische Herleitung der Grenznutzenfunktion	172
Kasten 9.1	Vergütungssummen und Windenergieanlagen-Investitionskosten	186
Kasten 12.1	Schwankungen des natürlichen Windenergieangebots und Maßnahmen zum Ausgleich	259