

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 Windenergianlagen – 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 Strombörsen 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	Energieleitungsausbaugegesetz 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 Strombörsen	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