

Windkraftanlagen

Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit

Bearbeitet von
Erich Hau

6. Auflage 2017. Buch. XXII, 997 S. Hardcover
ISBN 978 3 662 53153 2
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XXI
1 Windmühlen und Windräder	1
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
2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche	23
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
3 Bauformen von Windkraftanlagen	67
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
4 Physikalische Grundlagen der Windenergie wandlung	85
4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz	85
4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergie wandler	90
Literatur	94

5	Aerodynamik des Rotors	95
5.1	Physikalisch-mathematische Modelle und Verfahren	96
5.1.1	Blattelementtheorie	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	Einfluß auf 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
6	Belastungen und Strukturbeanspruchungen	183
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 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
7	Schwingungsverhalten	253
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
8	Rotorblätter	291
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
9	Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus	331
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 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
11	Regelung und Betriebsführung	471
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
12	Turm und Fundament	515
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-Fertigteilbauweise	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
13	Windverhältnisse	557
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 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 nach dem Europäischen Windatlas	596
13.6.4	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern	599
13.6.5	Über das Windenergiepotential	600
	Literatur	604
14	Leistung und Energielieferung	607
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 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 — eine grundsätzliche Betrachtung	661
	Literatur	663
15	Umweltverhalten	665
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	Einflußauf das Umgebungsklima	693
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO ₂ -Emissionen	694
	Literatur	696

16 Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche	699
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
17 Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere	743
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
18 Planung, Errichtung und Betrieb	791
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

19 Kosten von Windkraftanlagen **873**

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
 20 Wirtschaftlichkeit der Windenergie		931
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 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 für die Nutzung der erneuerbaren Energien	957
Literatur	960
 Glossar – englische Fachausdrücke		963
Deutsch – Englisch	963
Englisch – Deutsch	974
 Sachverzeichnis		985



<http://www.springer.com/978-3-662-53153-2>

Windkraftanlagen

Grundlagen. Technik. Einsatz. Wirtschaftlichkeit

Hau, E.

2016, XXII, 997 S. 696 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-53153-2