

# 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

  
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

<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	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
<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 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
<b>10</b>	<b>Elektrisches System</b>	<b>423</b>
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
<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-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
<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 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
<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 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
<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	Einflußauf das Umgebungsklima . . . . .	693
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	694
	Literatur . . . . .	696

<b>16 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 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 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

## **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
 <b>20 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 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
 <b>Glossar – englische Fachausdrücke</b>		<b>963</b>
Deutsch – Englisch	. . . . .	963
Englisch – Deutsch	. . . . .	974
 <b>Sachverzeichnis</b>		<b>985</b>



<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