

# Inhaltsverzeichnis

## Symbolverzeichnis

XXI

<b>1</b>	<b>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</b>	<b>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 . . . . .	56
2.8	Die amerikanischen Windfarmen . . . . .	58
	Literatur . . . . .	63
<b>3</b>	<b>Bauformen von Windkraftanlagen</b>	<b>65</b>
3.1	Rotoren mit vertikaler Drehachse . . . . .	66
3.2	Horizontalachsen-Rotoren . . . . .	69
3.3	Windenergie-Konzentratoren . . . . .	72
3.4	Begriffe und Bezeichnungen . . . . .	77
	Literatur . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung</b>	<b>79</b>
4.1	Die elementare Impulstheorie nach Betz . . . . .	79
4.2	Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergieumwandler . . . . .	84
	Literatur . . . . .	87

<b>5</b>	<b>Aerodynamik des Rotors</b>	<b>89</b>
5.1	Physikalisch-mathematische Modelle und Berechnungsverfahren . . . . .	90
5.1.1	Blattelementtheorie . . . . .	91
5.1.2	Wirbelmodell der Rotorströmung . . . . .	96
5.1.3	Numerische Strömungssimulation . . . . .	98
5.1.4	Rotornachlaufströmung . . . . .	99
5.2	Leistungscharakteristik des Rotors . . . . .	103
5.2.1	Rotorleistungskennfeld . . . . .	103
5.2.2	Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten . . . . .	105
5.3	Aerodynamische Leistungsregelung . . . . .	107
5.3.1	Blatteinstellwinkelregelung . . . . .	108
5.3.2	Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall) . . . . .	113
5.3.3	Aktive Steuerung der Strömungsablösung . . . . .	118
5.3.4	Instationäre Effekte und Grenzschichtbeeinflussung . . . . .	119
5.3.5	Aus dem Wind drehen . . . . .	122
5.4	Das aerodynamische Profil . . . . .	123
5.4.1	Charakteristische Eigenschaften . . . . .	123
5.4.2	Profilgeometrie und Systematik . . . . .	126
5.4.3	Laminarprofile . . . . .	131
5.4.4	Einfluß auf den Rotorleistungsbeiwert . . . . .	135
5.5	Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik . . . . .	137
5.5.1	Anzahl der Rotorblätter . . . . .	137
5.5.2	Optimale Form des Blattumrisses . . . . .	139
5.5.3	Verwindung der Rotorblätter . . . . .	145
5.5.4	Blattdicke . . . . .	147
5.5.5	Auslegungsschnellaufzahl . . . . .	148
5.6	Ausgeführte Rotorblätter . . . . .	151
5.7	Windrichtungsnachführung des Rotors . . . . .	154
5.8	Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren . . . . .	158
5.9	Experimentelle Rotor-aerodynamik . . . . .	163
5.9.1	Modellmessungen im Windkanal . . . . .	163
5.9.2	Messungen an Originalanlagen . . . . .	166
	Literatur . . . . .	168
<b>6</b>	<b>Belastungen und Strukturbeanspruchungen</b>	<b>171</b>
6.1	Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage . . . . .	172
6.2	Koordinatensysteme und Bezeichnungen . . . . .	174
6.3	Ursachen der Belastungen . . . . .	175
6.3.1	Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte . . . . .	176
6.3.2	Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung . . . . .	177
6.3.3	Höhenprofil der Windgeschwindigkeit . . . . .	181
6.3.4	Schräganströmung des Rotors . . . . .	182
6.3.5	Turmumströmung . . . . .	183
6.3.6	Windturbulenz und Böen . . . . .	188
6.4	Lastannahmen . . . . .	192

6.4.1	Internationale und nationale Normen . . . . .	193
6.4.2	Klassifizierung der Windkraftanlagen und Windzonen . . . . .	196
6.4.3	Normale Windbedingungen . . . . .	198
6.4.4	Extreme Windbedingungen . . . . .	199
6.4.5	Andere Umwelteinflüsse . . . . .	200
6.4.6	Sonstige externe Bedingungen . . . . .	201
6.4.7	Sicherheitsfaktoren . . . . .	202
6.5	Maschinenstatus und Lastfälle . . . . .	203
6.5.1	Normaler Betrieb . . . . .	204
6.5.2	Technische Störungen . . . . .	206
6.6	Beanspruchungsarten und Strukturdimensionierung . . . . .	208
6.7	Ermüdungsfestigkeit . . . . .	209
6.7.1	Lastkollektive . . . . .	210
6.7.2	Mathematische Modelle und Berechnungsverfahren . . . . .	213
6.8	Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen . . . . .	220
6.8.1	Anzahl der Rotorblätter . . . . .	220
6.8.2	Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor . . . . .	222
6.8.3	Steifigkeit der Rotorblätter . . . . .	225
6.8.4	Regelungssystem . . . . .	226
6.8.5	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise . . . . .	229
6.9	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen . . . . .	232
6.9.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern . . . . .	233
6.9.2	Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen . . . . .	234
	Literatur . . . . .	237

**7 Rotorblätter 239**

7.1	Materialfragen . . . . .	240
7.2	Vorbild: Flugzeugtragflügel . . . . .	242
7.3	Frühere experimentelle Bauweisen von Rotorblättern . . . . .	245
7.3.1	Genietete Aluminiumkonstruktionen . . . . .	245
7.3.2	Stahlbauweisen . . . . .	247
7.3.3	Traditionelle Holzbauweise . . . . .	251
7.3.4	Ältere Faserverbundbauweisen . . . . .	252
7.3.5	Holz-Epoxid-Verbundbauweise . . . . .	257
7.4	Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik . . . . .	258
7.4.1	Faserverbund-Technologie . . . . .	258
7.4.2	Konstruktive Auslegung der Rotorblätter . . . . .	260
7.4.3	Fertigungsverfahren . . . . .	261
7.5	Blattanschluß zur Rotornabe . . . . .	264
7.6	Rotorblattbauweisen im Vergleich . . . . .	268
7.7	Aerodynamische Bremsklappen . . . . .	272
7.8	Blitzschutz . . . . .	274
7.9	Enteisung . . . . .	275
	Literatur . . . . .	276

<b>8 Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus</b>	<b>277</b>
8.1 Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung . . . . .	278
8.2 Experimentelle Konzeptionen . . . . .	281
8.2.1 Generator im Turmfuß . . . . .	281
8.2.2 Generator senkrecht im Turmkopf . . . . .	283
8.3 Heutige Standardbauweisen . . . . .	284
8.3.1 Generatorantrieb mit Übersetzungsgetriebe . . . . .	284
8.3.2 Getriebeloser Triebstrang . . . . .	285
8.4 Rotornabe . . . . .	287
8.4.1 Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren . . . . .	289
8.4.2 Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren . . . . .	290
8.5 Blattverstellmechanismus . . . . .	294
8.5.1 Rotorblattlagerung . . . . .	296
8.5.2 Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb . . . . .	299
8.5.3 Blattverstellsysteme mit elektrischem Antrieb . . . . .	301
8.5.4 Passive Blattverstellung . . . . .	304
8.5.5 Redundanz- und Sicherheitsfragen . . . . .	305
8.6 Rotorlagerung . . . . .	307
8.6.1 Lagerprobleme . . . . .	307
8.6.2 Rotorwelle mit separaten Lagern . . . . .	310
8.6.3 Dreipunkt-Lagerung von Rotorwelle und Getriebe . . . . .	311
8.6.4 Rotorlagerung im Getriebe . . . . .	313
8.6.5 „Einlager“-Konzeption . . . . .	314
8.6.6 Rotorlagerung auf einer feststehenden Achse . . . . .	315
8.7 Rotorbremse . . . . .	316
8.8 Übersetzungsgetriebe . . . . .	319
8.8.1 Getriebebauarten . . . . .	319
8.8.2 Äußere Belastungsvorgaben für das Getriebe . . . . .	323
8.8.3 Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung . . . . .	326
8.8.4 Wirkungsgrad und Geräuschentwicklung . . . . .	327
8.9 Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe . . . . .	330
8.10 Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang . . . . .	332
8.11 Einbau des elektrischen Generators . . . . .	335
8.12 Maschinenhaus . . . . .	338
8.12.1 Hilfsaggregate und sonstige Einbauten . . . . .	338
8.12.2 Bauweise und statische Konzeption . . . . .	340
8.12.3 Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte . . . . .	343
8.13 Windrichtungsnachführung . . . . .	346
8.14 Zusammenbau und Funktionsprüfung . . . . .	350
Literatur . . . . .	352

<b>9</b>	<b>Elektrisches System</b>	<b>353</b>
9.1	Generatorbauarten . . . . .	354
9.1.1	Synchrongenerator . . . . .	354
9.1.2	Asynchrongenerator . . . . .	358
9.1.3	Generatoren mit Permanentmagneterregung . . . . .	362
9.2	Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen . . . . .	364
9.3	Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung . . . . .	367
9.3.1	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .	368
9.3.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung . . . . .	369
9.3.3	Asynchrongenerator mit variablem Schlupf . . . . .	371
9.3.4	Drehzahlgestufte Generatorsysteme . . . . .	372
9.4	Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter . . . . .	374
9.4.1	Frequenzumrichter . . . . .	375
9.4.2	Synchrongenerator mit Frequenzumformer . . . . .	378
9.4.3	Asynchrongenerator mit übersynchroner Stromrichter-kaskade . .	380
9.4.4	Doppeltgespeister Asynchrongenerator . . . . .	381
9.5	Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatorsysteme . . .	384
9.5.1	Synchrongenerator mit elektrischer Erregung . . . . .	384
9.5.2	Generatorsysteme mit Permanentmagnet-Generatoren . . . . .	386
9.6	Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage . . . . .	388
9.6.1	Große Anlagen . . . . .	389
9.6.2	Kleine und mittlere Anlagen . . . . .	391
9.7	Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich . . . . .	393
	Literatur . . . . .	396
<b>10</b>	<b>Regelung und Betriebsführung</b>	<b>397</b>
10.1	Betriebsdatenerfassung . . . . .	398
10.1.1	Betriebswindmeßsystem . . . . .	399
10.1.2	Elektrische Leistungsmessung . . . . .	401
10.2	Sicherheitssystem . . . . .	403
10.3	Prinzipielle Funktionsweise der Regelungssysteme . . . . .	403
10.4	Windrichtungsnachführung . . . . .	405
10.5	Leistungsregelung und Drehzahlführung durch Verstellen des Rotorblatteinstellwinkels . . . . .	407
10.5.1	Regelstrecken und rechnerische Simulation . . . . .	409
10.5.2	Betrieb mit direkt netzgekoppeltem Generator . . . . .	413
10.5.3	Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablem Generator und Frequenzumrichter . . . . .	418
10.5.4	Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz . . . . .	420
10.6	Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall . . . . .	422
10.6.1	Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .	422
10.6.2	Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel . . . . .	423
10.6.3	Aktive Stall-Regelung . . . . .	425
10.7	Betriebsführung und Betriebszyklus . . . . .	427

10.7.1	Betriebszustände . . . . .	428
10.7.2	Zusammenwirken mit dem Stromnetz . . . . .	430
	Literatur . . . . .	433
<b>11</b>	<b>Schwingungsverhalten</b>	<b>435</b>
11.1	Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade . . . . .	436
11.2	Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter . . . . .	438
11.2.1	Statische Divergenz . . . . .	439
11.2.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen . . . . .	440
11.2.3	Typische Rotorblattschwingungen . . . . .	442
11.3	Torsionsschwingungen des Triebstrangs . . . . .	444
11.3.1	Mechanisches Ersatzmodell . . . . .	445
11.3.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung . . . . .	448
11.3.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen . . . . .	449
11.3.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	452
11.4	Dynamik der Windrichtungsnachführung . . . . .	454
11.4.1	Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse . . . . .	455
11.4.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	457
11.5	Schwingungen der Gesamtanlage . . . . .	459
11.5.1	Turmsteifigkeit . . . . .	459
11.5.2	Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen . . . . .	461
11.6	Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens . . . . .	467
	Literatur . . . . .	471
<b>12</b>	<b>Der Turm</b>	<b>473</b>
12.1	Bauarten und Varianten . . . . .	474
12.2	Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen . . . . .	477
12.3	Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften . . . . .	479
12.4	Freitragende Stahlrohrtürme . . . . .	480
12.4.1	Steifigkeit und Baumassee . . . . .	480
12.4.2	Konstruktion und Fertigungstechnik . . . . .	482
12.4.3	Aufstiegshilfen und Einbauten . . . . .	485
12.5	Betontürme . . . . .	488
12.5.1	Ortbeton-Bauweise . . . . .	489
12.5.2	Beton-Fertigteilbauweise . . . . .	491
12.6	Gittertürme . . . . .	495
12.7	Turm-Konzeptionen im Vergleich . . . . .	498
12.8	Fundament . . . . .	500
	Literatur . . . . .	503
<b>13</b>	<b>Windverhältnisse</b>	<b>505</b>
13.1	Ursachen des Windes und globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten . . . . .	505
13.2	Windverhältnisse in Europa und in Deutschland . . . . .	508
13.3	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten . . . . .	512

13.3.1	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten . . . . .	512
13.3.2	Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe . . . . .	515
13.3.3	Stetigkeit des Windes . . . . .	517
13.3.4	Windturbulenz und Böen . . . . .	523
13.4	Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse . . . . .	526
13.5	Ermittlung der Windgeschwindigkeit . . . . .	528
13.5.1	Windmessungen . . . . .	528
13.5.2	Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung nach dem Europäischen Windatlas . . . . .	533
13.5.3	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern . . . . .	536
	Literatur . . . . .	538

**14 Leistungsabgabe und Energielieferung 539**

14.1	Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung . . . . .	540
14.1.1	Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl . . . . .	540
14.1.2	Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung . . . . .	545
14.1.3	Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang . . . . .	547
14.1.4	Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen . . . . .	550
14.2	Normierte Leistungskennlinie . . . . .	551
14.2.1	Definitionen, Eigenschaften und Gewährleistung . . . . .	551
14.2.2	Vermessung der Leistungskennlinie . . . . .	553
14.3	Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie . . . . .	559
14.3.1	Schwieriges Gelände . . . . .	559
14.3.2	Luftdichte . . . . .	560
14.3.3	Turbulenz . . . . .	563
14.3.4	Sonstige wetterbedingte Einflüsse . . . . .	565
14.3.5	Verschmutzung der Rotorblätter . . . . .	565
14.4	Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe . . . . .	567
14.5	Jahresenergielieferung . . . . .	569
14.5.1	Berechnungsverfahren . . . . .	569
14.5.2	Winddaten am Aufstellort . . . . .	572
14.5.3	Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung . . . . .	574
14.5.4	Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor . . . . .	577
14.5.5	Sicherheitsabschlüsse . . . . .	580
14.6	Wichtige Entwurfparameter und Energielieferung . . . . .	582
14.6.1	Anlagen-Leistungsbeiwert . . . . .	583
14.6.2	Rotordurchmesser . . . . .	584
14.6.3	Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität . . . . .	585
14.6.4	Leistungsregelung . . . . .	588
14.6.5	Installierte Generatorleistung . . . . .	589
14.6.6	Nabenhöhe des Rotors . . . . .	592
14.6.7	Betriebswindgeschwindigkeitsbereich . . . . .	593

14.6.8	Die Windkraftanlage als Energiewandler – eine grundsätzliche Betrachtung . . . . .	594
	Literatur . . . . .	595
<b>15</b>	<b>Umweltverhalten</b>	<b>597</b>
15.1	Gefahren für die Umgebung . . . . .	598
15.1.1	Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen? . . . . .	598
15.1.2	Risikobetrachtungen . . . . .	601
15.2	Geräuscentwicklung . . . . .	602
15.2.1	Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte . . . . .	602
15.2.2	Geräuschquellen bei Windkraftanlagen . . . . .	605
15.2.3	Geräuscentwicklung gegenwärtiger Anlagen . . . . .	609
15.3	Schattenwurf . . . . .	613
15.4	Störungen von Funk und Fernsehen . . . . .	617
15.5	Störungen der Vogelwelt . . . . .	620
15.6	Landverbrauch . . . . .	621
15.7	Optische Beeinträchtigung der Landschaft . . . . .	623
15.8	Windenergienutzung und Klimaschutz . . . . .	625
15.8.1	Einfluß auf das Umgebungsklima . . . . .	626
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO <sub>2</sub> -Emissionen . . . . .	626
	Literatur . . . . .	628
<b>16</b>	<b>Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche</b>	<b>631</b>
16.1	Windkraftanlagen im Inselbetrieb . . . . .	632
16.1.1	Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherproblematik . . . . .	633
16.1.2	Heizen mit Windenergie . . . . .	638
16.1.3	Wasserpumpen . . . . .	641
16.1.4	Entsalzen von Meerwasser . . . . .	644
16.2	Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen . . . . .	647
16.3	Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz . . . . .	652
16.3.1	Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb . . . . .	652
16.3.2	Windfarmen und Windparks . . . . .	653
16.4	Windkraftanlagen im Kraftwerkverbund der Energieversorgungsunternehmen . . . . .	657
16.4.1	Die Regelungsproblematik . . . . .	658
16.4.2	Das Verbundnetz . . . . .	661
16.4.3	Beitrag zur gesicherten Leistung . . . . .	663
16.5	Windkraftanlagenindustrie, Absatzmärkte, Windenergiepotential . . . . .	664
16.5.1	Entwicklung der Absatzmärkte . . . . .	665
16.5.2	Die Windkraftanlagenhersteller . . . . .	667
16.5.3	Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen . . . . .	670
16.5.4	Über das Windenergiepotential . . . . .	673
	Literatur . . . . .	677



<b>17</b>	<b>Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere</b>	<b>679</b>
17.1	Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen . .	680
17.1.1	Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen . . . . .	680
17.1.2	Gründung auf dem Meeresgrund . . . . .	683
17.1.3	Elektrische Konzeption . . . . .	688
17.2	Transport und Montage . . . . .	694
17.3	Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen . . . . .	697
17.3.1	Wetterbedingte Zugänglichkeit . . . . .	697
17.3.2	Wartung und Instandhaltung . . . . .	699
17.4	Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee . . . . .	700
17.4.1	Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse . . . . .	700
17.4.2	Völkerrechtliche Situation . . . . .	704
17.4.3	Genehmigungsverfahren . . . . .	706
17.4.4	Die ersten Offshore-Windparks . . . . .	709
17.4.5	Kommerzielle Offshore-Windparks . . . . .	710
	Literatur . . . . .	719
<b>18</b>	<b>Planung, Errichtung und Betrieb</b>	<b>721</b>
18.1	Projektentwicklung . . . . .	722
18.2	Genehmigungsverfahren . . . . .	724
18.2.1	Gesetze und Regelwerke . . . . .	725
18.2.2	Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien . .	727
18.2.3	Baugenehmigung für kleine Anlagen . . . . .	729
18.2.4	Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG . . . . .	730
18.3	Technische Auslegung von Windparks . . . . .	732
18.3.1	Aerodynamik der Feldaufstellung . . . . .	732
18.3.2	Bauliche Infrastruktur . . . . .	736
18.3.3	Interne elektrische Verkabelung . . . . .	738
18.3.4	Netzanschluß . . . . .	742
18.4	Transportprobleme . . . . .	748
18.5	Errichtung am Aufstellort . . . . .	752
18.5.1	Standardverfahren . . . . .	752
18.5.2	Errichtung ohne schwere Hebezeuge . . . . .	756
18.5.3	Extrem große Anlagen . . . . .	759
18.5.4	Große Experimentalanlagen mit Zweiblattrotor . . . . .	762
18.6	Inbetriebnahme . . . . .	766
18.6.1	Kommerzielle Anlagen und Windparks . . . . .	767
18.6.2	Versuchsanlagen und Prototypen . . . . .	768
18.7	Technische Betriebsführung . . . . .	769
18.7.1	Erfassung der Betriebsdaten . . . . .	770
18.7.2	Übergeordnete Betriebsführung von großen Windparks . . . . .	774
18.7.3	Technische Zustandsüberwachung . . . . .	775
18.8	Betriebssicherheit . . . . .	777
18.8.1	Technische Sicherheitssysteme . . . . .	777
18.8.2	Gefahren durch extreme Wetterlagen . . . . .	782

18.9	Wartung und Instandsetzung . . . . .	787
18.9.1	Reguläre Wartung . . . . .	788
18.9.2	Schadensursachen und Reparaturrisiken . . . . .	789
18.9.3	Statistische Auswertungen . . . . .	793
	Literatur . . . . .	795
<b>19</b>	<b>Kosten von Windkraftanlagen und Anwendungsprojekten</b>	<b>797</b>
19.1	Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen . . . . .	798
19.1.1	Spezifische Kosten und Bezugsgrößen . . . . .	799
19.1.2	Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten . .	801
19.1.3	Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen . . . . .	805
19.1.4	Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten	808
19.1.5	Herstellkosten der heutigen Windkraftanlagen . . . . .	810
19.1.6	Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten . . . . .	815
19.1.7	Kostendegression in der Serienfertigung . . . . .	818
19.1.8	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung . . . . .	820
19.1.9	Alternative technische Konzeptionen . . . . .	820
19.1.10	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen . . . . .	822
19.1.11	Preiskalkulation in der Serienfertigung und Verkaufspreise von Windkraftanlagen . . . . .	824
19.2	Investitionskosten von schlüsselfertigen Anwendungsprojekten . . . . .	827
19.2.1	Projektentwicklung . . . . .	827
19.2.2	Fundamente und Geländeerschließung . . . . .	828
19.2.3	Netzanschluß und Verkabelung . . . . .	829
19.2.4	Sonstige Kosten . . . . .	832
19.2.5	Typische Kostenbeispiele . . . . .	833
19.3	Betriebskosten . . . . .	837
19.3.1	Wartung und Instandsetzung . . . . .	837
19.3.2	Versicherungen . . . . .	839
19.3.3	Sonstige Betriebskosten . . . . .	840
19.3.4	Gesamte jährliche Betriebskosten . . . . .	841
19.4	Offshore-Projekte . . . . .	842
19.4.1	Investitionskosten . . . . .	842
19.4.2	Betriebskosten . . . . .	847
	Literatur . . . . .	849
<b>20</b>	<b>Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Windenergie</b>	<b>851</b>
20.1	Finanzierung und gesellschaftsrechtliche Organisation . . . . .	852
20.2	Stromerzeugungskosten und Amortisationszeiten . . . . .	855
20.2.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung . . . . .	855
20.2.2	Statische Betrachtungsweise . . . . .	856
20.2.3	Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit . . . . .	863
20.3	Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich zu anderen Energiesystemen . . . . .	870
20.4	Energetische Amortisation von Windkraftanlagen . . . . .	873

20.5 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung . . . . .	874
20.6 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der erneuerbaren Energien . . . . .	875
Literatur . . . . .	877
<b>Glossar – englische Fachausdrücke</b>	<b>879</b>
Deutsch – Englisch . . . . .	879
Englisch – Deutsch . . . . .	890
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>901</b>