

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Die Geschichte der Windenergie (Jos Beurskens)</b> .....	<b>19</b>
1.1 Einleitung.....	19
1.2 Die ersten Windmühlen: 600–1890 .....	20
1.3 Stromerzeugung durch Windmühlen: Windkraftanlagen 1890–1930 .....	29
1.4 Der erste Innovationszeitraum: 1930–1960 .....	36
1.5 Der zweite Innovationszeitraum und die volle Kommerzialisierung: 1960 bis heute .....	45
Literatur .....	62
<b>2 Die internationale Entwicklung der Windenergie (Klaus Rave)</b> ....	<b>64</b>
2.1 Der Beginn der modernen Energiedebatte .....	64
2.2 Zur Erneuerung der Energiemärkte .....	67
2.3 Zur Bedeutung der Stromnetze .....	69
2.4 Die erneuerte Wertschöpfungskette .....	73
2.5 Internationale Perspektiven.....	75
2.6 Der Ausbau in ausgewählten Ländern.....	78
2.7 Zur Rolle der EU .....	80
2.8 Internationale Institutionen und Organisationen .....	83
2.9 <i>Global Wind Energy Outlook 2010</i> – Der globale Blick in die Zukunft.....	86
2.10 Aktualisierung auf der Basis von 2011 .....	87
2.10.1 Die Marktentwicklung in ausgewählten Ländern .....	87
Literatur .....	91
<b>2 Windressourcen, Standortbewertung, Ökologie (Hermann van Radecke)</b> .....	<b>94</b>
3.1 Einleitung.....	94
3.2 Windressourcen .....	94
3.2.1 Globales Windsystem und Bodenrauigkeit .....	94
3.2.2 Höhenprofil und Rauigkeitslänge .....	95

---

3.2.3	Rauigkeitsklassen .....	98
3.2.4	Höhenlinien und Hindernisse .....	100
3.2.5	Windressource mit WASP, WindPRO, Windfarmer .....	103
3.2.6	Bestimmung Windpotenzial mit Mesoskala-Modellen und Reanalyseda- ten .....	105
3.2.6.1	Reanalysedaten.....	105
3.2.6.2	Windmapping .....	106
3.2.6.3	Windatlas.....	109
3.2.6.4	Verifizierung und Zeitreihen.....	110
3.2.6.5	Anwendungsbereiche .....	111
3.2.7	Wind im Windpark .....	112
3.2.8	Häufigkeitsverteilung Wind .....	115
3.2.9	Standortbewertung und Jahresenergieertrag .....	117
3.2.10	Referenzertrag und Dauer der erhöhten Vergütung .....	120
3.3	Schall .....	122
3.3.1	Einheit dB(A) .....	122
3.3.2	Schallquelle.....	124
3.3.3	Ausbreitung durch die Luft .....	125
3.3.4	Immissionsort und Richtwerte .....	126
3.3.5	Frequenzanalyse, Tonzuschlag, Impulzzuschlag.....	127
3.3.6	Schallreduktionsmaßnahmen .....	127
3.3.7	Abstandsregeln.....	128
3.4	Schatten.....	128
3.5	Turbulenz.....	130
3.5.1	Natürliche Umgebungsturbulenz .....	131
3.5.2	Anlagenspezifische Turbulenz .....	132
3.6	Zwei Anwenderprogramme zur vollständigen Planung von Windparks.....	132
3.7	Technische Richtlinien, FGW-Richtlinien und IEC .....	133
3.8	Umwelteinflüsse, Bundes-Immissionsschutzgesetz und Genehmigungsver- fahren .....	134
3.8.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) .....	135
3.8.2	Genehmigungsverfahren .....	136
3.8.3	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) .....	137
3.8.3.1	Screening.....	137
3.8.3.2	Standortbezogene Vorprüfung .....	137
3.8.3.3	Allgemeine Vorprüfung.....	139
3.8.3.4	UVP-Untersuchungsrahmen .....	140
3.8.4	Einzelaspekte im Verfahren .....	140

3.8.4.1	Antrag auf immissionsschutzrechtliche Genehmigung .....	140
3.8.4.2	Erteilung der Genehmigung .....	140
3.8.4.3	Schwierigkeiten des Genehmigungsverfahrens .....	141
3.8.4.4	Geräusche sind Immissionen im Sinne des § 3 (2) BImSchG .....	141
3.8.4.5	Optische Immissionen: Lichtblitze, periodischer Schattenwurf ..	142
3.8.4.6	Turbulenzen im Nachlauf von Windenergieanlagen .....	142
3.8.4.7	Kennzeichnung von WEA als Luftfahrthindernisse .....	142
3.8.5	Akzeptanz .....	143
3.8.6	Überwachung und Klärung anlagenspezifischer Daten .....	143
3.9	Übungsaufgaben .....	143
3.10	Lösungen zu den Übungsaufgaben .....	146
	Literatur .....	146

<b>4</b>	<b>Aerodynamik und Blattentwurf (Alois Schaffarczyk) .....</b>	<b>149</b>
4.1	Zusammenfassung .....	149
4.2	Einleitung .....	149
4.3	Horizontalanlagen .....	150
4.3.1	Allgemeines .....	150
4.3.2	Aerodynamische Grundbegriffe .....	150
4.4	Integrale Impulsverfahren .....	153
4.4.1	Impulstheorie der Windturbine: der Betz'sche Grenzwert .....	153
4.4.2	Änderung der Luftdichte durch Temperatur und Höhe .....	155
4.4.3	Einfluss der endlichen Blattzahl .....	155
4.4.4	Drallverluste und lokale Optimierung des Flügels nach Glauert .....	156
4.4.5	Verluste durch Profilwiderstand .....	158
4.5	Impulstheorie der Blattschnitte .....	159
4.5.1	Die Formulierung .....	159
4.5.2	Beispiel einer Implementierung: WT-Perf .....	161
4.5.3	Optimierung und Entwurfsregeln für Blätter .....	161
4.5.4	Erweiterung der Blattschnittverfahren: Die differenzielle Formulierung ..	162
4.5.5	Dreidimensionale Strömungssimulation – CFD .....	163
4.5.6	Zusammenfassung: Horizontalanlagen .....	164
4.6	Vertikalanlagen .....	164
4.6.1	Allgemeines .....	164
4.6.2	Aerodynamik der H-Rotoren .....	166
4.6.3	Aeroelastik der Vertikalrotoren .....	170
4.6.4	Ein 50-kW-Rotor als Beispiel .....	171
4.6.5	Entwurfsregeln für Kleinwindanlagen nach dem H-Darrieus-Typ .....	171

4.6.6 Zusammenfassung: Vertikalrotoren .....	172
4.7 Windangetriebene Fahrzeuge mit Rotor .....	172
4.7.1 Einleitung .....	172
4.7.2 Zur Theorie der windgetriebenen Fahrzeuge .....	173
4.7.3 Ein Zahlenbeispiel .....	173
4.7.4 Das Kieler Auslegungsverfahren .....	174
4.7.5 Auswertung .....	174
4.7.6 Realisierte Fahrzeuge .....	176
4.7.7 Zusammenfassung: Windautos .....	177
4.8 Übungsaufgaben .....	178
Literatur .....	179

<b>5 Rotorblätter (Lothar Dannenberg) .....</b>	<b>185</b>
5.1 Einführung .....	185
5.2 Belastungen der Rotorblätter .....	186
5.2.1 Belastungsarten .....	186
5.2.2 Grundlagen der Festigkeitsberechnung .....	187
5.2.2.1 Koordinatensystem, Vorzeichenregeln .....	187
5.2.2.2 Schnittlasten (Schnittkräfte und Schnittmomente) .....	188
5.2.3 Querschnittswerte des Rotorblattes .....	190
5.2.4 Spannungen und Deformationen .....	194
5.2.5 Schnittlasten im Rotorblatt .....	198
5.2.6 Durchbiegung und Neigung .....	200
5.2.7 Ergebnisse nach der Balkentheorie .....	201
5.3 Schwingungen und Beulung .....	201
5.3.1 Schwingungen .....	201
5.3.2 Beul-/Stabilitätsberechnungen .....	205
5.4 Finite-Elemente-Berechnungen .....	206
5.4.1 Spannungsberechnungen .....	206
5.4.2 FEM-Beulberechnungen .....	207
5.4.3 FEM-Schwingungsberechnungen .....	208
5.5 Faserverbundwerkstoffe .....	209
5.5.1 Einleitung .....	209
5.5.2 Materialien (Fasern, Harze, Zusatzstoffe, Sandwichmaterialien) .....	210
5.5.2.1 Fasern .....	210
5.5.2.2 Harze .....	212
5.5.2.3 Zusatzstoffe .....	213
5.5.2.4 Sandwichmaterialien .....	214

5.5.3	Laminate, Lamineigenschaften .....	215
5.6	Fertigung von Rotorblättern .....	218
5.6.1	Strukturteile des Rotorblattes .....	218
5.6.2	Laminierverfahren für Rotorblätter .....	221
5.6.3	Zusammenbau des Rotorblattes .....	222
	Literatur .....	223

<b>6</b>	<b>Der Triebstrang (Sönke Siegfriedsen) .....</b>	<b>224</b>
6.1	Einleitung .....	224
6.2	Blattwinkelverstellungssysteme .....	225
6.3	Windrichtungsnachführung .....	231
6.3.1	Allgemein .....	231
6.3.2	Funktionsbeschreibung .....	231
6.3.3	Komponenten .....	232
6.3.4	Anordnungsvarianten von Windrichtungsnachführungen .....	235
6.4	Triebstrangkomponenten .....	237
6.4.1	Rotorarretierungen und Rotordrehvorrichtungen .....	238
6.4.2	Rotorwelle und Lagerung .....	239
6.4.3	Getriebe .....	242
6.4.4	Bremse und Kupplung .....	246
6.4.5	Generator .....	248
6.5	Triebstrangkonzeppte .....	251
6.5.1	Direktgetrieben – Doppelte Lagerung .....	251
6.5.2	Direktgetrieben – Momentenlager .....	254
6.5.3	1-2-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung .....	255
6.5.4	1-2-Stufengetriebe – Momentenlagerung .....	257
6.5.5	3-4-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung .....	259
6.5.6	3-4-Stufengetriebe – Dreipunktlagerung .....	262
6.5.7	3-4-Stufengetriebe – Momentenlagerung .....	263
6.6	Schäden und Schadensursachen .....	263
6.7	Auslegung von Triebstrangkomponenten .....	266
6.8	Schutzrechte in der Windenergie .....	270
6.8.1	Beispielpatente von Antriebssträngen .....	272
	Literatur .....	275

<b>7</b>	<b>Turm und Gründung (Torsten Faber) .....</b>	<b>277</b>
7.1	Einleitung .....	277
7.2	Richtlinien und Normen .....	279

7.3	Beanspruchung von Türmen .....	279
7.3.1	Ermüdungslasten .....	279
7.3.2	Extremlasten .....	282
7.4	Nachweis des Bauwerks .....	282
7.4.1	Tragfähigkeitsnachweise .....	282
7.4.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweise .....	284
7.4.3	Gründungsnachweise .....	284
7.4.4	Schwingungsberechnungen (Eigenfrequenzen) .....	285
7.5	Konstruktionsdetails .....	287
7.5.1	Öffnungen in der Wand von Stahlrohrtürmen .....	287
7.5.2	Ringflanschverbindungen .....	288
7.5.3	Schweißverbindungen .....	288
7.6	Werkstoffe für Türme .....	288
7.6.1	Stahl .....	289
7.6.2	Beton .....	290
7.6.3	Holz .....	290
7.6.4	Glasfaserverstärkter Kunststoff .....	291
7.7	Ausführungsformen .....	291
7.7.1	Rohrtürme .....	291
7.7.2	Gittermasten .....	292
7.7.3	Abgespannte Türme .....	292
7.8	Fundamente von Onshore-WEA .....	293
7.8.1	Schwerkraft .....	293
7.8.2	Pfähle .....	293
7.8.3	Seile .....	293
	Lösungen .....	294
	Literatur .....	297

<b>8</b>	<b>Leistungselektronik-Generatorsysteme für Windenergieanlagen</b>	
	<b>(Friedrich Fuchs) .....</b>	<b>298</b>
8.1	Einführung .....	298
8.2	Wechselspannungs- und Drehspannungssystem .....	300
8.3	Transformator .....	302
8.3.1	Prinzip, Gleichungen .....	302
8.3.2	Ersatzschaltbild, Zeigerdiagramm .....	304
8.3.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild .....	305
8.3.4	Drehstromtransformatoren .....	306
8.4	Generatoren für Windenergieanlagen .....	307

8.4.1	Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer .....	308
8.4.1.1	Aufbau .....	308
8.4.1.2	Grundlegende Funktion.....	309
8.4.1.3	Spannungsgleichungen .....	310
8.4.1.4	Ersatzschaltbild .....	311
8.4.1.5	Zeigerdiagramm.....	311
8.4.1.6	Heylandkreis .....	311
8.4.1.7	Leistung .....	314
8.4.1.8	Moment .....	315
8.4.1.9	Drehzahlregelung der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	316
8.4.2	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer .....	318
8.4.2.1	Aufbau .....	319
8.4.2.2	Grundlegende Funktion.....	319
8.4.2.3	Spannungsgleichungen .....	320
8.4.2.4	Ersatzschaltbild .....	321
8.4.2.5	Zeigerdiagramm und Stromortskurve.....	321
8.4.2.6	Drehzahlregelung .....	325
8.5	Synchronmaschinen .....	326
8.5.1	Generelle Funktion .....	326
8.5.2	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltbild .....	327
8.5.3	Leistung und Moment .....	328
8.5.4	Ausführungsformen fremderregter Synchronmaschinen.....	330
8.5.5	Permanenterregte Synchronmaschinen.....	331
8.5.6	Drehzahlvariabler Betrieb der Synchronmaschine .....	332
8.6	Umrichtersysteme für Windenergieanlagen .....	333
8.6.1	Generelle Funktion .....	333
8.6.2	Frequenzumrichter in Zweistufenschaltung.....	334
8.6.2.1	Schaltung.....	334
8.6.2.2	Pulsweitenmodulation .....	335
8.6.3	Frequenzumrichter in Mehrstufenschaltung .....	340
8.7	Regelung von drehzahlvariablen Umrichter-Generatorsystemen .....	341
8.7.1	Regelung des umrichtergespeisten Asynchrongenerators mit Kurzschlussläufer .....	342
8.7.2	Regelung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine .....	347
8.7.3	Regelung der Synchronmaschine .....	348
8.7.4	Regelung des netzseitigen Umrichters.....	349
8.7.5	Auslegung der Regelung .....	351
8.8	Einhaltung der Netzanschlussbedingungen .....	351

8.9 Weitere elektrotechnische Komponenten.....	353
8.10 Eigenschaften der Leistungselektronik-Generatorsysteme in der Übersicht .....	355
8.11 Übungsaufgaben .....	356
Literatur.....	361

## **9 Steuerung und Regelung von Windenergiesystemen**

<b>(Reiner Johannes Schütt).....</b>	<b>363</b>
9.1 Grundlegende Zusammenhänge.....	363
9.1.1 Einordnung der WES-Automation .....	364
9.1.2 Systemeigenschaften der Energiewandlung in WEA .....	367
9.1.3 Energiewandlung des Rotors.....	367
9.1.4 Energiewandlung des Antriebsstrangs.....	370
9.1.5 Energiewandlung des Generator-Umrichtersystems .....	371
9.1.6 Idealisierte Betriebskennlinien von WEA .....	374
9.2 Regelsysteme der WEA.....	375
9.2.1 Gierwinkelregelung.....	376
9.2.2 Blattwinkelregelung .....	377
9.2.3 Wirkleistungsregelung .....	378
9.2.4 Blindleistungsregelung .....	380
9.2.5 Zusammenfassung des Regelverhaltens und erweiterte Betriebsbereiche der WEA .....	381
9.3 Betriebsführungssysteme für WEA.....	383
9.3.1 Steuerung des Betriebsablaufs von WEA .....	383
9.3.2 Sicherheitssysteme .....	386
9.4 Windparksteuer- und -regelsysteme.....	387
9.5 Fernbedienung und -überwachung.....	389
9.6 Kommunikationssysteme für WES .....	390
Literatur.....	392

## **10 Netzintegration (Sven Wanser, Frank Ehlers).....394**

10.1 Energieversorgungsnetze im Überblick .....	394
10.1.1 Allgemeines.....	394
10.1.2 Spannungsebenen der elektrischen Versorgungsnetze .....	395
10.1.3 Netzstrukturen .....	395
10.2 Netzregelung .....	398
10.2.1 Regelleistung .....	398
10.2.2 Ausgleichsenergie und Bilanzkreise.....	398
10.2.3 Grundlast, Mittellast und Spitzenlast .....	399



10.2.4 Frequenzhaltung .....	401
10.2.5 Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve .....	402
10.2.6 Spannungshaltung .....	403
10.2.7 Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen .....	404
10.3 Grundbegriffe zur Netzintegration von WEA .....	405
10.3.1 Elektrische Grundbegriffe .....	406
10.3.2 Netzqualität .....	410
10.4 Netzanschluss für WEA .....	413
10.4.1 Bemessung der Netzbetriebsmittel .....	414
10.4.2 Überprüfung der Spannungsänderung/Spannungsband .....	416
10.4.3 Überprüfung der Netzurückwirkung „Schnelle Spannungsänderung“ .....	422
10.4.4 Überprüfung der Kurzschlussfestigkeit .....	422
10.5 Netzanbindungen von WEA .....	424
10.5.1 Schaltanlagen .....	425
10.5.2 Schutzeinrichtungen .....	425
10.5.3 Einbindung in das Netzleitsystem .....	427
10.6 Weitere Entwicklungen in der Netzintegration und Ausblick .....	428
10.6.1 Netzausbau .....	428
10.6.2 Lastverschiebung .....	430
10.6.3 Energiespeicherung .....	431
Literatur .....	432

<b>11 Offshore-Windenergie (Lothar Dannenberg) .....</b>	<b>434</b>
11.1 Offshore-Windenergieanlagen .....	434
11.1.1 Einführung .....	434
11.1.2 Unterschiede Offshore-/Onshore-WEA .....	434
11.1.3 Umweltbedingungen, Naturschutz .....	436
11.2 Strömungen, Belastungen .....	437
11.2.1 Strömungen .....	437
11.2.2 Strömungsbelastungen .....	438
11.2.3 Wirbelablösungen an umströmten Körpern .....	439
11.3 Wellen, Wellenlasten .....	441
11.3.1 Wellentheorien .....	441
11.3.1.1 Lineare oder Wellentheorie nach Airy .....	443
11.3.1.2 Nichtlineare Wellentheorien .....	448
11.3.2 Überlagerung von Wellen und Strömungen .....	450
11.3.3 Belastungen durch Wellen (Morison-Verfahren) .....	452
11.4 Seegang .....	456

11.4.1 Regelmäßiger Seegang .....	456
11.4.2 Unregelmäßiger oder natürlicher Seegang.....	457
11.4.3 Statistik.....	457
11.4.4 Seegangsspektren.....	459
11.4.5 Einfluss von Strömungen .....	462
11.4.6 Langzeitstatistik des Seegangs .....	462
11.4.7 Extremwellen.....	463
11.5 Kolkbildung, Bewuchs, Korrosion, Eis .....	463
11.5.1 Kolkbildung.....	463
11.5.2 Mariner Bewuchs .....	464
11.5.3 Eisbelastung .....	465
11.5.4 Korrosion .....	466
11.6 Fundamentierungen für OWEA .....	467
11.6.1 Einleitung.....	467
11.6.2 Feste Gründungen .....	468
11.6.2.1 Monopiles .....	469
11.6.2.2 Tripods.....	471
11.6.2.3 Jackets .....	472
11.6.2.4 Schwerkraftgründungen .....	473
11.6.2.5 Suction Buckets .....	474
11.6.3 Schwimmende Gründungen .....	475
11.6.3.1 Tension Legs .....	475
11.6.3.2 Spar Buoys .....	476
11.6.4 Betriebsfestigkeit .....	476
11.7 Bodenmechanik .....	477
11.7.1 Einführung .....	477
11.7.2 Bodeneigenschaften.....	478
11.7.3 Berechnungen des Bodentragverhaltens.....	479
Literatur.....	481

<b>Index.....</b>	<b>483</b>
-------------------	------------