

Inhalt

Vorwort	5
2 Die Geschichte der Windenergie (Jos Beurskens)	19
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
2 Die internationale Entwicklung der Windenergie (Klaus Rave)	64
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 – Der globale Blick in die Zukunft</i>	86
2.10 Aktualisierung auf der Basis von 2011	87
2.10.1 Die Marktentwicklung in ausgewählten Ländern	87
Literatur.....	91
2 Windressourcen, Standortbewertung, Ökologie (Hermann van Radecke)	94
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 Reanalysedaten	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, Impulszuschlag	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 Genehmigungsverfahren	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

4 Aerodynamik und Blattentwurf (Alois Schaffarczyk) 149

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	Vertikal anlagen	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

5 Rotorblätter (Lothar Dannenberg) 185

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, Laminateigenschaften	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
6 Der Triebstrang (Sönke Siegfriedsen)	224
6.1 Einleitung	224
6.2 Blattwinkelverstellsysteme	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 Triebstrangkonzepte	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
7 Turm und Gründung (Torsten Faber)	277
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

8 Leistungselektronik-Generatorsysteme für Windenergieanlagen	298
(Friedrich Fuchs)	298
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

(Reiner Johannes Schütt)	363
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 Waner, 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 Netzrückwirkung „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
11 Offshore-Windenergie (Lothar Dannenberg)	434
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
Index	483