

Inhalt

Vorwort	5
1 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	27
1.4 Der erste Innovationszeitraum: 1930–1960	30
1.5 Der zweite Innovationszeitraum und die volle Kommerzialisierung: 1960 bis heute	37
Literatur	52
2 Die internationale Entwicklung der Windenergie (Klaus Rave)	54
2.1 Der Beginn der modernen Energiedebatte	54
2.2 Zur Erneuerung der Energiemärkte	57
2.3 Zur Bedeutung der Stromnetze	59
2.4 Die erneuerte Wertschöpfungskette	63
2.5 Internationale Perspektiven	65
2.6 Der Ausbau in ausgewählten Ländern	68
2.7 Zur Rolle der EU	70
2.8 Internationale Institutionen und Organisationen	71
2.9 <i>Global Wind Energy Outlook 2010</i> – Der globale Blick in die Zukunft	75
2.10 Aktualisierung auf der Basis von 2015	76
Literatur	81
3 Windressourcen, Standortbewertung, Ökologie (Hermann van Radecke)	83
3.1 Einleitung	83
3.2 Windressourcen	83
3.2.1 Globales Windsystem und Bodenrauigkeit	83
3.2.2 Höhenprofil und Rauigkeitslänge	84
3.2.3 Rauigkeitsklassen	87

3.2.4	Höhenlinien und Hindernisse	89
3.2.5	Windressource mit WASP, WindPRO, Windfarmer	92
3.2.6	Bestimmung Windpotenzial mit Mesoskala-Modellen und Reanalyse- daten	94
3.2.6.1	Reanalysedaten	94
3.2.6.2	Windmapping	95
3.2.6.3	Windatlas	98
3.2.6.4	Verifizierung und Zeitreihen	99
3.2.6.5	Anwendungsbereiche	100
3.2.7	Wind im Windpark	101
3.2.8	Häufigkeitsverteilung Wind	104
3.2.9	Standortbewertung und Jahresenergieertrag	106
3.2.10	Referenzertrag und Dauer der erhöhten Vergütung	109
3.3	Schall	111
3.3.1	Einheit dB(A)	111
3.3.2	Schallquelle	113
3.3.3	Ausbreitung durch die Luft	115
3.3.4	Immissionsort und Richtwerte	115
3.3.5	Frequenzanalyse, Tonzuschlag, Impulzzuschlag	116
3.3.6	Schallreduktionsmaßnahmen	116
3.3.7	Abstandsregeln	117
3.4	Schatten	118
3.5	Turbulenz	120
3.5.1	Natürliche Umgebungsturbulenz	120
3.5.2	Anlagenspezifische Turbulenz	121
3.6	Zwei Anwenderprogramme zur vollständigen Planung von Windparks	122
3.7	Technische Richtlinien, FGW-Richtlinien und IEC	123
3.8	Umwelteinflüsse, Bundes-Immissionsschutzgesetz und Genehmigungsver- fahren	124
3.8.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	125
3.8.2	Genehmigungsverfahren	125
3.8.3	Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	126
3.8.3.1	Screening	128
3.8.3.2	Standortbezogene Vorprüfung	128
3.8.3.3	Allgemeine Vorprüfung	128
3.8.3.4	UVP-Untersuchungsrahmen	129
3.8.4	Einzelaspekte im Verfahren	129
3.8.4.1	Antrag auf immissionsschutzrechtliche Genehmigung	129

3.8.4.2 Erteilung der Genehmigung 130

3.8.4.3 Schwierigkeiten des Genehmigungsverfahrens 130

3.8.4.4 Geräusche sind Immissionen im Sinne des § 3 (2) BImSchG 130

3.8.4.5 Optische Immissionen: Lichtblitze, periodischer Schattenwurf.. 131

3.8.4.6 Turbulenzen im Nachlauf von Windenergieanlagen 131

3.8.4.7 Kennzeichnung von WEA als Luftfahrthindernisse 132

3.8.5 Akzeptanz 132

3.8.6 Überwachung und Klärung anlagenspezifischer Daten 132

3.9 Übungsaufgaben 133

3.10 Lösungen zu den Übungsaufgaben 135

Literatur 136

4 Aerodynamik und Blattentwurf (Alois Schaffarczyk)138

4.1 Zusammenfassung 138

4.2 Einleitung..... 138

4.3 Horizontalanlagen..... 139

4.3.1 Allgemeines..... 139

4.3.2 Aerodynamische Grundbegriffe 139

4.4 Integrale Impulsverfahren..... 142

4.4.1 Impulstheorie der Windturbine: der Betz'sche Grenzwert..... 142

4.4.2 Änderung der Luftdichte durch Temperatur und Höhe 144

4.4.3 Einfluss der endlichen Blattzahl 144

4.4.4 Drallverluste und lokale Optimierung des Flügels nach Glauert..... 145

4.4.5 Verluste durch Profilwiderstand 148

4.5 Impulstheorie der Blattschnitte 148

4.5.1 Die Formulierung..... 148

4.5.2 Beispiel einer Implementierung: WT-Perf..... 150

4.5.3 Optimierung und Entwurfsregeln für Blätter 150

4.5.4 Erweiterung der Blattschnittverfahren: Die differenzielle Formulierung.. 151

4.5.5 Dreidimensionale Strömungssimulation – CFD 152

4.5.6 Zusammenfassung: Horizontalanlagen 153

4.6 Vertikalanlagen 153

4.6.1 Allgemeines..... 153

4.6.2 Aerodynamik der H-Rotoren 155

4.6.3 Aeroelastik der Vertikalrotoren 159

4.6.4 Ein 50-kW-Rotor als Beispiel 160

4.6.5 Entwurfsregeln für Kleinwindanlagen nach dem H-Darrieus-Typ 160

4.6.6 Zusammenfassung: Vertikalrotoren..... 161

4.7	Windangetriebene Fahrzeuge mit Rotor	162
4.7.1	Einleitung	162
4.7.2	Zur Theorie der windgetriebenen Fahrzeuge	163
4.7.3	Ein Zahlenbeispiel	163
4.7.4	Das Kieler Auslegungsverfahren	164
4.7.5	Auswertung	164
4.7.6	Realisierte Fahrzeuge	166
4.7.7	Zusammenfassung: Windautos	168
4.8	Übungsaufgaben	168
	Literatur	169

5	Rotorblätter (Lothar Dannenberg)	175
5.1	Einführung	175
5.2	Belastungen der Rotorblätter	176
5.2.1	Belastungsarten	176
5.2.2	Grundlagen der Festigkeitsberechnung	177
5.2.2.1	Koordinatensystem, Vorzeichenregeln	177
5.2.2.2	Schnittlasten (Schnittkräfte und Schnittmomente)	178
5.2.3	Querschnittswerte des Rotorblattes	179
5.2.4	Spannungen und Deformationen	184
5.2.5	Schnittlasten im Rotorblatt	188
5.2.6	Durchbiegung und Neigung	190
5.2.7	Ergebnisse nach der Balkentheorie	191
5.3	Schwingungen und Beulung	191
5.3.1	Schwingungen	191
5.3.2	Beul-/Stabilitätsberechnungen	195
5.4	Finite-Elemente-Berechnungen	196
5.4.1	Spannungsberechnungen	196
5.4.2	FEM-Beulberechnungen	197
5.4.3	FEM-Schwingungsberechnungen	198
5.5	Faserverbundwerkstoffe	199
5.5.1	Einleitung	199
5.5.2	Materialien (Fasern, Harze, Zusatzstoffe, Sandwichmaterialien)	200
5.5.2.1	Fasern	200
5.5.2.2	Harze	202
5.5.2.3	Zusatzstoffe	203
5.5.2.4	Sandwichmaterialien	203
5.5.3	Lamine, Lamineigenschaften	204

5.6	Fertigung von Rotorblättern	207
5.6.1	Strukturteile des Rotorblattes	207
5.6.2	Laminierverfahren für Rotorblätter	209
5.6.3	Zusammenbau des Rotorblattes.....	210
	Literatur	211

6	Der Triebstrang (Sönke Siegfriedsen, Peter Krämer)	212
6.1	Einleitung.....	212
6.2	Blattwinkelverstellungssysteme	212
6.3	Windrichtungsnachführung	219
6.3.1	Allgemein	219
6.3.2	Funktionsbeschreibung	220
6.3.3	Komponenten	221
6.3.4	Anordnungsvarianten von Windrichtungsnachführungen	224
6.4	Triebstrangkomponenten	226
6.4.1	Rotorarretierungen und Rotordrehvorrichtungen	226
6.4.2	Rotorwelle und Lagerung.....	227
6.4.3	Getriebe	231
6.4.4	Bremse und Kupplung	234
6.4.5	Generator	237
6.5	Triebstrangkonzeppte	239
6.5.1	Direktgetrieben – Doppelte Lagerung	240
6.5.2	Direktgetrieben – Momentenlager	243
6.5.3	1-2-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung.....	245
6.5.4	1-2-Stufengetriebe – Momentenlagerung	246
6.5.5	3-4-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung.....	248
6.5.6	3-4-Stufengetriebe – Dreipunktlagerung	250
6.5.7	3-4-Stufengetriebe – Momentenlagerung	251
6.6	Schäden und Schadensursachen	252
6.7	Auslegung von Triebstrangkomponenten.....	253
6.8	Schutzrechte in der Windenergie	257
	Literatur	263

7	Turm und Gründung (Torsten Faber).....	264
7.1	Einleitung.....	264
7.2	Richtlinien und Normen.....	266
7.3	Beanspruchung von Türmen	266

7.3.1	Ermüdungslasten	266
7.3.2	Extremlasten	268
7.4	Nachweise des Turms	269
7.4.1	Tragfähigkeitsnachweise	269
7.4.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	270
7.4.3	Schwingungsberechnungen (Eigenfrequenzen)	271
7.5	Konstruktionsdetails	273
7.5.1	Öffnungen in der Wand von Stahlrohrtürmen	274
7.5.2	Ringflanschverbindungen	274
7.5.3	Schweißverbindungen	275
7.6	Werkstoffe für Türme	275
7.6.1	Stahl	276
7.6.2	Beton	277
7.6.3	Holz	277
7.6.4	Glasfaserverstärkter Kunststoff	277
7.7	Ausführungsformen	278
7.7.1	Rohrtürme	278
7.7.2	Gittermasten	278
7.7.3	Abgespannte Türme	279
7.7.4	Verschiedene Turmkonzepte im Vergleich	279
7.8	Gründungen von Onshore-WEA	280
7.8.1	Gründungen und Fundamentbautypen	280
7.8.2	Übergang zwischen Turm und Fundament	282
7.8.3	Nachweise für die Gründung	282
	Literatur	287

8 Leistungselektronik-Generatorsysteme für Windenergieanlagen

(Friedrich Fuchs)	288
8.1 Einführung	288
8.2 Wechselspannungs- und Drehspannungssystem	290
8.3 Transformator	292
8.3.1 Prinzip, Gleichungen	292
8.3.2 Ersatzschaltbild, Zeigerdiagramm	294
8.3.3 Vereinfachtes Ersatzschaltbild	295
8.3.4 Drehstromtransformatoren	296
8.4 Generatoren für Windenergieanlagen	298
8.4.1 Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	298
8.4.1.1 Aufbau	299

8.4.1.2	Grundlegende Funktion	299
8.4.1.3	Spannungsgleichungen	300
8.4.1.4	Ersatzschaltbild	301
8.4.1.5	Zeigerdiagramm	301
8.4.1.6	Heylandkreis	302
8.4.1.7	Leistung	304
8.4.1.8	Moment	305
8.4.1.9	Drehzahlregelung der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	306
8.4.2	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	309
8.4.2.1	Aufbau	310
8.4.2.2	Grundlegende Funktion	310
8.4.2.3	Spannungsgleichungen	311
8.4.2.4	Ersatzschaltbild	311
8.4.2.5	Zeigerdiagramm und Stromortskurve	312
8.4.2.6	Drehzahlregelung	315
8.5	Synchronmaschinen	317
8.5.1	Generelle Funktion	317
8.5.2	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltbild	318
8.5.3	Leistung und Moment	319
8.5.4	Ausführungsformen fremderregter Synchronmaschinen	321
8.5.5	Permanenterregte Synchronmaschinen	321
8.5.6	Drehzahlvariabler Betrieb der Synchronmaschine	322
8.6	Umrichtersysteme für Windenergieanlagen	323
8.6.1	Generelle Funktion	324
8.6.2	Frequenzumrichter in Zweistufenschaltung	324
8.6.2.1	Schaltung	324
8.6.2.2	Pulsweitenmodulation	325
8.6.3	Frequenzumrichter in Mehrstufenschaltung	330
8.7	Regelung von drehzahlvariablen Umrichter-Generatorsystemen	332
8.7.1	Regelung des umrichtergespeisten Asynchrongenerators mit Kurzschlussläufer	333
8.7.2	Regelung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine	338
8.7.3	Regelung der Synchronmaschine	338
8.7.4	Regelung des netzseitigen Umrichters	339
8.7.5	Auslegung der Regelung	341
8.8	Einhaltung der Netzanschlussbedingungen	342
8.9	Weitere elektrotechnische Komponenten	344

8.10	Eigenschaften der Leistungselektronik-Generatorsysteme in der Übersicht	345
8.11	Übungsaufgaben	346
	Literatur	351

9	Steuerung und Regelung von Windenergiesystemen (Reiner Johannes Schütt)	353
9.1	Grundlegende Zusammenhänge	353
9.1.1	Einordnung der WES-Automation	354
9.1.2	Systemeigenschaften der Energiewandlung in WEA	357
9.1.3	Energiewandlung des Rotors	357
9.1.4	Energiewandlung des Antriebsstrangs	360
9.1.5	Energiewandlung des Generator-Umrichtersystems	361
9.1.6	Idealisierte Betriebskennlinien von WEA	364
9.2	Regelsysteme der WEA	365
9.2.1	Gierwinkelregelung	366
9.2.2	Blattwinkelregelung	367
9.2.3	Wirkleistungsregelung	368
9.2.4	Blindleistungsregelung	370
9.2.5	Zusammenfassung des Regelverhaltens und erweiterte Betriebsbereiche der WEA	371
9.3	Betriebsführungssysteme für WEA	373
9.3.1	Steuerung des Betriebsablaufs von WEA	373
9.3.2	Sicherheitssysteme	376
9.4	Windparksteuer- und -regelsysteme	377
9.5	Fernbedienung und -überwachung	379
9.6	Kommunikationssysteme für WES	380
	Literatur	382

10	Netzintegration (Sven Wanser, Nica Kähler)	384
10.1	Energieversorgungsnetze im Überblick	384
10.1.1	Allgemeines	384
10.1.2	Spannungsebenen der elektrischen Versorgungsnetze	385
10.1.3	Netzstrukturen	385
10.2	Netzregelung	388
10.2.1	Regelleistung	388
10.2.2	Ausgleichsenergie und Bilanzkreise	388
10.2.3	Grundlast, Mittellast und Spitzenlast	389
10.2.4	Frequenzhaltung	391

10.2.5 Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve	392
10.2.6 Spannungshaltung	393
10.2.7 Systemdienstleistungen durch Erzeugungsanlagen	394
10.3 Grundbegriffe zur Netzintegration von Erzeugungsanlagen	395
10.3.1 Elektrische Grundbegriffe	396
10.3.2 Netzqualität	400
10.4 Netzanschluss für WEA	403
10.4.1 Bemessung der Netzbetriebsmittel	404
10.4.2 Überprüfung der Spannungsänderung/Spannungsband.....	407
10.4.3 Überprüfung der Netzurückwirkung	410
10.4.4 Überprüfung der Kurzschlussfestigkeit.....	411
10.5 Netzanbindungen von WEA.....	412
10.5.1 Schaltanlagen	413
10.5.2 Schutzeinrichtungen	414
10.5.3 Einbindung in das Netzleitsystem.....	416
10.6 Weitere Entwicklungen in der Netzintegration und Ausblick	416
10.6.1 Netzausbau	416
10.6.2 Lastverschiebung	419
10.6.3 Energiespeicherung	419
Literatur.....	420

11 Offshore-Windenergie

(Lothar Dannenberg, Christian Keindorf)	422
11.1 Einführung	422
11.1.1 Historie und Entwicklungstrends	422
11.1.2 Unterschiede zwischen Onshore- und Offshore-WEA	423
11.1.3 Planungsgrundlagen für Offshore-Windparks.....	424
11.1.4 Umweltschutz und Arbeitssicherheit	425
11.2 Wesentliche Komponenten eines Offshore-Windparks	426
11.2.1 Turbinen für OWEA.....	426
11.2.2 Tragstrukturen für OWEA.....	427
11.2.2.1 Turm	427
11.2.2.2 Transition Piece	428
11.2.3 Fest verankerte Gründungsstrukturen für OWEA	428
11.2.3.1 Monopile-Gründung.....	429
11.2.3.2 Schwerkraftgründungen	430
11.2.3.3 Jacket-Gründung	430
11.2.3.4 Tripod-Gründung	431

11.2.3.5 Tripile-Gründung	431
11.2.3.6 Suction-Buckets	432
11.2.4 Schwimmende Gründungsstrukturen für OWEA.....	433
11.2.4.1 Spar Buoy.....	433
11.2.4.2 Tension Leg Plattform (TLP)	434
11.2.4.3 Halbtaucher (Semi-Submersible Plattform).....	435
11.2.5 Offshore-Stationen	435
11.2.6 Seekabel.....	435
11.2.7 Forschungsplattformen und Messmasten	436
11.3 Einwirkungen auf OWEA	437
11.3.1 Ständige Einwirkungen	438
11.3.2 Aerodynamische Lasten	439
11.3.3 Hydrostatische Lasten	439
11.3.4 Hydrodynamische Lasten	440
11.3.4.1 Strömungen.....	440
11.3.4.2 Belastungen durch Strömungen	440
11.3.4.3 Wellen.....	442
11.3.4.4 Lineare Wellentheorien.....	444
11.3.4.5 Nichtlineare Wellentheorien.....	449
11.3.4.6 Belastungen durch Wellen	451
11.3.4.7 Regelmäßiger Seegang.....	455
11.3.4.8 Unregelmäßiger oder natürlicher Seegang	455
11.3.4.9 Seegangsspektren	456
11.3.5 Einwirkungen infolge Temperatur	461
11.3.6 Einwirkungen infolge Eis	461
11.3.7 Funktionale Einwirkungen	462
11.3.8 Außergewöhnliche Einwirkungen	463
11.4 Bemessung von Offshore-Bauwerken für die Windenergie.....	463
11.4.1 Entwurfsgrundlagen	463
11.4.2 Standortbedingungen.....	464
11.4.2.1 Meteorologische und ozeanographische Bedingungen	464
11.4.2.2 Baugrunderkundung und Bodeneigenschaften	464
11.4.2.3 Kolkbildung	468
11.4.2.4 Eisbildung.....	470
11.4.2.5 Mariner Bewuchs.....	470
11.4.2.6 Korrosion	471
11.4.3 Sicherheitskonzept	473
11.4.3.1 Teilsicherheitsbeiwerte.....	473

11.4.3.2 Charakteristische Werte der Einwirkungen.....	473
11.4.3.3 Charakteristische Werte der Materialwiderstände	474
11.4.3.4 Bemessungskonzept	475
11.4.4 Lastfälle und Lastfallkombinationen	475
11.4.5 Berechnungsmethoden	476
11.4.6 Nachweismethoden und Grenzzustände.....	477
11.4.6.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	478
11.4.6.2 Grenzzustand der Ermüdung.....	478
11.4.6.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	479
11.4.6.4 Grenzzustand der außergewöhnlichen Beanspruchung	480
11.4.6.5 Weitere Nachweise	480
Literatur	480
Index	482