

Vorwort	XVII
Vorwort zur zweiten Auflage	XVIII
Vorwort zur dritten Auflage	XVIII
Die Autoren	XVIII
Danksagung	XX
1 Die Geschichte der Windenergie	1
<i>Jos Beurskens</i>	
1.1 Einleitung	1
1.2 Die ersten Windmühlen: 600 - 1890	2
1.3 Stromerzeugung durch Windmühlen: Windkraftanlagen 1890 - 1930	9
1.4 Der erste Innovationszeitraum: 1930 - 1960	13
1.5 Der zweite Innovationszeitraum und die volle Kommerzialisierung: ab 1960 bis heute	20
2 Die internationale Entwicklung der Windenergie	41
<i>Klaus Rave</i>	
2.1 Der Beginn der modernen Energiedebatte	41
2.2 Zur Erneuerung der Energiemärkte	45
2.3 Zur Bedeutung der Stromnetze	47
2.4 Die erneuerte Wertschöpfungskette	51
2.5 Internationale Perspektiven	54
2.6 Der Ausbau in ausgewählten Ländern	57
2.7 Zur Rolle der EU	59
2.8 Internationale Institutionen und Organisationen	60
2.9 Global Wind Energy Outlook 2010 - Der globale Blick in die Zukunft	64
2.10 Aktualisierung auf der Basis von 2015	65

3	Der Wind – von der Theorie zur Praxis	73
	<i>Wiebke Langreder</i>	
3.1	Atmosphärische Skalen in Zeit und Raum	73
3.1.1	Einleitung	73
3.1.2	Globale Skalen – Entstehung Globaler Windsysteme	74
3.1.3	Mesoskalare Phänomene – Entstehung lokaler Windsysteme	75
3.1.4	Mikroskalare Phänomene – Die Turbulenz	76
3.2	Die atmosphärische Grenzschicht	78
3.2.1	Das vertikale Windprofil	80
3.2.2	Einfluss der Rauigkeit auf das Windprofil	82
3.2.3	Einfluss der atmosphärischen Stabilität auf das Windprofil	83
3.2.4	Einfluss der Orographie auf das Windprofil	85
3.2.5	Einfluss von Hindernissen auf das Windprofil	85
3.3	Statistische Darstellung des Windes	86
3.3.1	Das Leistungsspektrum	86
3.3.2	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit	88
3.3.3	Windrichtungsverteilung	90
3.4	Strömungsmodelle	90
3.4.1	Reanalysemodelle	91
3.4.2	Mesoskalige Modelle	91
3.4.3	Mikroskalige Modelle	92
	3.4.3.1 Linearisierte Modelle – WASP	92
	3.4.3.2 Nicht-linearisierte Modelle	95
3.5	Der erste Schritt: Standortidentifikation	95
3.6	Der zweite Schritt: Erfassung des Windklimas	96
3.6.1	Einleitung	96
3.6.2	Anemometer	97
	3.6.2.1 Schalenkreuzanemometer (engl. cup anemometer)	97
	3.6.2.2 Ultraschallanemometer (engl. sonic anemometer)	98
	3.6.2.3 Messmastgeometrie	99
3.6.3	Fernerkundungssysteme (engl. remote sensing)	101
	3.6.3.1 LiDAR	102
	3.6.3.2 SoDAR	105
3.6.4	Produktionsdaten	106
3.6.5	Messperiode und Mittelungszeit	107

3.7	Der dritte Schritt: Datenanalyse	108
3.7.1	Qualitätskontrolle	108
3.7.2	Datenkorrekturen	108
3.7.3	Langzeitkorrektur	108
3.8	Der vierte Schritt: Räumliche Extrapolation	110
3.9	Der fünfte Schritt: Wahl der Windenergieanlage	111
3.9.1	Turbulenz	112
3.9.2	Vertikaler Gradient (Scherung)	113
3.9.3	Schräganströmung	115
3.9.4	Extremwinde	117
3.10	Der sechste Schritt: Energieertrag	118
3.10.1	Energieertrag der Einzelanlage	118
3.10.2	Energieertrag des Windparks	119
3.10.3	Weitere Produktionsverluste	121
3.10.4	Unsicherheitsanalyse	123
4	Aerodynamik und Blattentwurf	127
	<i>Alois P. Schaffarczyk</i>	
4.1	Zusammenfassung	127
4.2	Einleitung	128
4.3	Horizontalanlagen	128
4.3.1	Allgemeines	128
4.3.2	Aerodynamische Grundbegriffe	129
4.4	Integrale Impulsverfahren	132
4.4.1	Impulstheorie der Windturbine: der Betz'sche Grenzwert	132
4.4.2	Änderung der Luftdichte durch Temperatur und Höhe	134
4.4.3	Einfluss der endlichen Blattzahl	134
4.4.4	Drallverluste und lokale Optimierung des Flügels nach Glauert	136
4.4.5	Verluste durch Profilwiderstand	138
4.5	Impulstheorie der Blattschnitte	138
4.5.1	Die Formulierung	138
4.5.2	Beispiel einer Implementierung: WT-Perf	140
4.5.3	Optimierung und Entwurfsregeln für Blätter	140
4.5.4	Erweiterung der Blattschnittverfahren: Die differenzielle Formulierung, Actuator Line Verfahren	141
4.5.5	Dreidimensionale Strömungssimulation - CFD	144

4.5.6	Zusammenfassung: Horizontalanlagen	144
4.6	Vertikalanlagen	144
4.6.1	Allgemeines	144
4.6.2	Aerodynamik der H-Rotoren	146
4.6.3	Aeroelastik der Vertikalrotoren	151
4.6.4	Ein 50-kW-Rotor als Beispiel	152
4.6.5	Entwurfsregeln für Kleinwindanlagen nach dem H-Darrieus-Typ	153
4.6.6	Zusammenfassung: Vertikalrotoren	153
4.7	Windangetriebene Fahrzeuge mit Rotor	154
4.7.1	Einleitung	154
4.7.2	Zur Theorie der windgetriebenen Fahrzeuge	155
4.7.3	Ein Zahlenbeispiel	155
4.7.4	Das Kieler Auslegungsverfahren	156
4.7.5	Auswertung	156
4.7.6	Realisierte Fahrzeuge	158
4.7.7	Zusammenfassung: Windautos	159
4.8	Übungsaufgaben	160
5	Rotorblattstruktur	169
	<i>Malo Rosemeier, Alexander Krimmer</i>	
5.1	Einführung	169
5.2	Normative Anforderungen	170
5.2.1	Zertifizierung	170
5.2.2	Sicherheitskonzept	172
5.2.3	Entwicklungszyklus des Rotorblattes	174
5.3	Belastungen	174
5.3.1	Belastungsarten	174
5.3.2	Lastrechnung	177
5.3.3	Auslegungslastfälle	178
5.3.4	Skalierungseffekte	179
5.4	Materialien	180
5.4.1	Faser-Kunststoff-Verbunde	181
5.4.2	Textile Halbzeuge	182
5.4.3	Materialprüfung	184
5.4.4	Elastizitäten der unidirektionalen Einzelschicht (ES)	185
5.4.5	Kernmaterialien	186

5.4.6	Klebstoffe	187
5.4.7	Beschichtung	188
5.4.8	Metalle	189
5.5	Strukturmodelle	190
5.5.1	Geometrie und Struktur	190
5.5.2	Querschnitseigenschaften	191
5.5.3	Balkenmodelle	193
5.5.4	Modelle für dünnwandige Strukturen	194
5.5.5	Ganzblatt- und Detailmodelle	194
5.6	Blattanschlusskonzepte	195
5.7	Strukturnachweise	196
5.7.1	Festigkeitsnachweise für Faser-Kunststoff-Verbunde	196
5.7.2	Stabilitätsnachweise	199
5.7.3	Nachweise der Klebverbindung	200
5.7.4	Nachweise des Sandwichkerns	200
5.7.5	Nachweise der Dehnschraube	200
5.7.6	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	201
5.8	Fertigung	201
5.8.1	Verfahren	202
5.8.2	Abweichungen	203
5.9	Topologieoptimierung	204
5.9.1	Optimierungsziele	205
5.9.2	Aeroelastische Eigenschaften	206
5.9.3	Fertigungsbezogene Entwicklung	207
5.9.4	Blattanschluss	208
5.9.5	Blattsegmentierung	208
5.10	Nachhaltigkeit	209
6	Der Triebstrang	221
	<i>Hans Kyling</i>	
6.1	Einleitung	221
6.2	Blattwinkelverstellungssysteme	222
6.3	Rotornabe	228
6.4	Triebstrangkomponenten	229
6.4.1	Rotorarretierungen und Rotordrehvorrichtungen	229
6.4.2	Rotorwelle	230

6.4.3	Rotorlagerung	232
6.4.4	Getriebe	236
6.4.5	Bremse und Kupplung	239
6.4.6	Generator	242
6.4.7	Windrichtungsnachführung	244
6.5	Triebstrangkonzepete	251
6.5.1	Direktgetrieben - Doppelte Lagerung	251
6.5.2	Direktgetrieben - Momentenlager	255
6.5.3	1-2-Stufengetriebe - Doppelte Lagerung	257
6.5.4	1-2-Stufengetriebe - Momentenlagerung	258
6.5.5	3-4-Stufengetriebe - Doppelte Lagerung	260
6.5.6	3-4-Stufengetriebe - Dreipunktlagerung	262
6.5.7	3-4-Stufengetriebe - Momentenlagerung	263
6.6	Schäden und Schadensursachen	264
6.7	Auslegung von Triebstrangkomponenten	266
6.8	Validierung	270
6.9	Schutzrechte in der Windenergie	271
7	Turm und Gründung	279
	<i>Torsten Faber</i>	
7.1	Einleitung	279
7.2	Richtlinien und Normen	281
7.3	Beanspruchung von Türmen	282
7.3.1	Ermüdungslasten	282
7.3.2	Extremlasten	284
7.4	Nachweise des Turms	284
7.4.1	Tragfähigkeitsnachweise	285
7.4.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweise	286
7.4.3	Schwingungsberechnungen (Eigenfrequenzen)	286
7.5	Konstruktionsdetails	289
7.5.1	Öffnungen in der Wand von Stahlrohrtürmen	289
7.5.2	Ringflanschverbindungen	290
7.5.3	Schweißverbindungen	290
7.6	Werkstoffe für Türme	291
7.6.1	Stahl	291
7.6.2	Beton	292

7.6.3	Holz	293
7.6.4	Glasfaserverstärkter Kunststoff	293
7.7	Ausführungsformen	293
7.7.1	Rohrtürme	294
7.7.2	Gittermasten	294
7.7.3	Abgespannte Türme	294
7.7.4	Verschiedene Turmkonzepte im Vergleich	294
7.8	Gründungen von Onshore-WEA	296
7.8.1	Gründungen und Fundamentbautypen	296
7.8.2	Übergang zwischen Turm und Fundament	298
7.8.3	Nachweise für die Gründung	298
8	Leistungselektronik-Generatorsysteme für Windenergieanlagen	305
	<i>Friedrich Fuchs</i>	
8.1	Einführung	305
8.2	Wechselspannungs- und Drehspannungssystem	308
8.3	Transformator	310
8.3.1	Prinzip, Gleichungen	310
8.3.2	Ersatzschaltbild, Zeigerdiagramm	312
8.3.3	Vereinfachtes Ersatzschaltbild	313
8.3.4	Drehstromtransformatoren	314
8.4	Generatoren für Windenergieanlagen	316
8.4.1	Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	317
8.4.1.1	Aufbau	317
8.4.1.2	Grundlegende Funktion	318
8.4.1.3	Spannungsgleichungen	319
8.4.1.4	Ersatzschaltbild	319
8.4.1.5	Zeigerdiagramm	320
8.4.1.6	Heylandkreis	321
8.4.1.7	Leistung	323
8.4.1.8	Moment	324
8.4.1.9	Drehzahlregelung der Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	325
8.4.2	Asynchronmaschine mit Schleifringläufer	327
8.4.2.1	Aufbau	328
8.4.2.2	Grundlegende Funktion	329

8.4.2.3	Spannungsgleichungen	330
8.4.2.4	Ersatzschaltbild	330
8.4.2.5	Zeigerdiagramm und Stromortskurve	331
8.4.2.6	Drehzahlregelung	334
8.5	Synchronmaschinen	336
8.5.1	Generelle Funktion	336
8.5.2	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltbild	337
8.5.3	Leistung und Moment	339
8.5.4	Ausführungsformen fremderregter Synchronmaschinen	340
8.5.5	Permanenterregte Synchronmaschinen	341
8.5.6	Drehzahlvariabler Betrieb der Synchronmaschine	341
8.6	Umrichtersysteme für Windenergieanlagen	343
8.6.1	Generelle Funktion	343
8.6.2	Frequenzumrichter in Zweistufenschaltung	344
8.6.2.1	Schaltung	344
8.6.2.2	Pulsweitenmodulation	345
8.6.3	Frequenzumrichter in Mehrstufenschaltung	350
8.7	Regelung von drehzahlvariablen Umrichter-Generatorsystemen	351
8.7.1	Regelung des umrichtergespeisten Asynchrongenerators mit Kurzschlussläufer	353
8.7.2	Regelung der doppeltgespeisten Asynchronmaschine	358
8.7.3	Regelung der Synchronmaschine	359
8.7.4	Regelung des netzseitigen Umrichters	359
8.7.5	Auslegung der Regelung	362
8.8	Netzintegration	362
8.9	Weitere elektrotechnische Komponenten	365
8.10	Eigenschaften der Leistungselektronik-Generatorsysteme in der Übersicht ...	366
8.11	Übungsaufgaben	367
9	Steuerung und Regelung von Windenergiesystemen	375
	<i>Reiner Schütt</i>	
9.1	Grundlegende Zusammenhänge	376
9.1.1	Einordnung der WES-Automation	376
9.1.2	Systemeigenschaften der Energiewandlung in WEA	379
9.1.3	Energiewandlung des Rotors	379
9.1.4	Energiewandlung des Antriebsstrangs	382

9.1.5	Energiewandlung des Generator-Umrichtersystems	383
9.1.6	Idealisierte Betriebskennlinien von WEA	387
9.2	Regelsysteme der WEA	388
9.2.1	Gierwinkelregelung	388
9.2.2	Blattwinkelregelung	389
9.2.3	Wirkleistungsregelung	391
9.2.4	Blindleistungsregelung	393
9.2.5	Zusammenfassung des Regelverhaltens und erweiterte Betriebsbereiche der WEA	394
9.3	Betriebsführungssysteme für WEA	396
9.3.1	Steuerung des Betriebsablaufs von WEA	396
9.3.2	Sicherheitssysteme	399
9.4	Windparksteuer- und -regelsysteme	400
9.5	Fernbedienung und -überwachung	402
9.6	Kommunikationssysteme für WES	403
10	Netzintegration von Windenergieanlagen	407
	<i>Clemens Jauch</i>	
10.1	Einführung in Netzintegration von WEA	408
10.1.1	Einführung in elektrische Netze	408
10.1.1.1	Netztopologie	409
10.1.1.2	Dreiphasensysteme und einphasige Äquivalenzen	412
10.1.1.3	Per-Unit-System	413
10.1.1.4	Grundlegende Größen elektrischer Netze	415
10.1.1.5	Wechselspannungsleistung	419
10.1.1.6	Netzstabilität	422
10.1.2	Standard WEA-Typen nach Netzverhalten	423
10.1.2.1	Typ I - Drehzahlstarre WEA mit Asynchrongenerator mit Kurzschlussläufer	424
10.1.2.2	Typ II - Semi-drehzahlvariable WEA mit Schleifringläufer- Asynchrongenerator	425
10.1.2.3	Typ III - Semi-drehzahlvariable WEA mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator	425
10.1.2.4	Typ IV - Drehzahlvariable WEA mit Vollumrichter	426
10.1.2.5	Typ V - WEA mit netzgekoppeltem Synchrongenerator	427
10.1.3	Traditionelle Aspekte der Netzintegration von WEA	428

10.1.4	Überblick über aktuelle Herausforderungen in der Netzintegration von WEA	429
10.1.4.1	Netztopologie und Auslastung von Leitungen	430
10.1.4.2	Netzstabilität mit WEA	430
10.1.4.3	Trägheitsbereitstellung und Kurzschlussstrombeitrag	431
10.1.4.4	Netzanschlussregeln	431
10.1.4.5	Mechanische WEA-Belastungen aus Netzdienstleistungen ...	432
10.2	Netzspannung	432
10.2.1	Ersatzschaltbilder von Netzkomponenten	432
10.2.1.1	Generatoren	433
10.2.1.2	Leitungen	434
10.2.1.3	Transformatoren	435
10.2.2	Spannungssteifigkeit und Kurzschlussleistung	436
10.2.3	Spannungsstabilität	439
10.2.4	Transiente Netzspannungseinbrüche	441
10.3	Spannungsstabilität mit WEA	443
10.3.1	Spannungsstützung mit WEA	443
10.3.2	Durchfahren transienter Netzspannungseinbrüche	445
10.3.2.1	Triebstrangbeschleunigung und Wirkleistungswiederkehr ..	445
10.3.2.2	Blindstrombereitstellung	449
10.3.2.3	Kurzschlussstrombeitrag	450
10.4	Netzfrequenz	451
10.4.1	Frequenzregelung	452
10.4.2	Netzträgheit	453
10.4.2.1	Trägheitskonstante, H	454
10.4.2.2	Leistung aus Trägheitsbereitstellung	456
10.4.3	Dämpfung untersynchroner Netzfrequenzschwingungen	457
10.4.4	Netzfrequenzstabilität	460
10.5	Netzfrequenzstabilität mit WEA	461
10.5.1	Trägheitsbereitstellung durch WEA	462
10.5.2	Schnelle Regelleistungsbereitstellung durch WEA	464
10.5.3	Pendeldämpfung mit WEA	467

11	Offshore-Windenergie	473
	<i>Christian Keindorf</i>	
11.1	Einführung	473
11.1.1	Historie und Entwicklungstrends	473
11.1.2	Unterschiede zwischen Onshore- und Offshore-WEA	476
11.1.3	Planungsgrundlagen für Offshore-Windparks	477
11.1.4	Umweltschutz und Arbeitssicherheit	478
11.2	Wesentliche Komponenten eines Offshore-Windparks	479
11.2.1	Turbinen für OWEA	480
11.2.2	Tragstrukturen für OWEA	480
11.2.2.1	Turm	481
11.2.2.2	Transition Piece	482
11.2.3	Fest verankerte Gründungsstrukturen für OWEA	482
11.2.3.1	Monopile	483
11.2.3.2	Schwerkraft	484
11.2.3.3	Jacket	485
11.2.3.4	Tripod	485
11.2.3.5	Tripile	486
11.2.3.6	Suction-Bucket	486
11.2.4	Schwimmende Gründungsstrukturen für OWEA	488
11.2.4.1	Spar Buoy	488
11.2.4.2	Tension Leg Plattform (TLP)	489
11.2.4.3	Halbtaucher (Semi-Submersible Plattform)	490
11.2.5	Offshore-Stationen	492
11.2.6	Seekabel	493
11.2.7	Forschungsplattformen und Messmasten	494
11.3	Einwirkungen auf OWEA	495
11.3.1	Ständige Einwirkungen	497
11.3.2	Aerodynamische Lasten	498
11.3.3	Hydrostatische Lasten	498
11.3.4	Hydrodynamische Lasten	499
11.3.4.1	Strömungen	499
11.3.4.2	Belastungen durch Strömungen	500
11.3.4.3	Wellen	502
11.3.4.4	Lineare Wellentheorien	504

11.3.4.5	Nichtlineare Wellentheorien	509
11.3.4.6	Belastungen durch Wellen	511
11.3.4.7	Regelmäßiger Seegang	515
11.3.4.8	Unregelmäßiger oder natürlicher Seegang	516
11.3.4.9	Seegangsspektren	516
11.3.5	Einwirkungen infolge Temperatur	521
11.3.6	Einwirkungen infolge Eis	522
11.3.7	Funktionale Einwirkungen	523
11.3.8	Außergewöhnliche Einwirkungen	523
11.4	Bemessung von Offshore-Bauwerken für die Windenergie	524
11.4.1	Entwurfsgrundlagen	524
11.4.2	Standortbedingungen	525
11.4.2.1	Meteorologische und ozeanographische Bedingungen	525
11.4.2.2	Baugrunderkundung und Bodeneigenschaften	525
11.4.2.3	Kolkbildung	529
11.4.2.4	Eisbildung	530
11.4.2.5	Mariner Bewuchs	531
11.4.2.6	Korrosion	532
11.4.3	Sicherheitskonzept	534
11.4.3.1	Teilsicherheitsbeiwerte	534
11.4.3.2	Charakteristische Werte der Einwirkungen	535
11.4.3.3	Charakteristische Werte der Materialwiderstände	536
11.4.3.4	Bemessungskonzept	536
11.4.4	Lastfälle und Lastfallkombinationen	537
11.4.5	Berechnungsmethoden	538
11.4.6	Nachweismethoden und Grenzzustände	539
11.4.6.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	539
11.4.6.2	Grenzzustand der Ermüdung	539
11.4.6.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	540
11.4.6.4	Grenzzustand der außergewöhnlichen Beanspruchung	541
11.4.6.5	Zusätzliche Nachweise	541
Index	543