

# Vorwort

Mit dem Probetrieb der Großwindanlage (GROWIAN) 1983 im Kaiser-Wilhelm-Koog nahe dem Eingang in den Nord-Ostsee-Kanal begann in Deutschland die Ära der modernen Windenergie. Waren Ende des neunzehnten Jahrhunderts knapp zwanzigtausend Windmühlen in Betrieb, so erzeugten Ende 2011 mehr als dreiundzwanzigtausend Windturbinen fast 10 Prozent des Nettostromverbrauchs in Deutschland. Knapp dreißig Jahre nach diesem ambitionierten Neubeginn überschreiten heutzutage Standardanlagen fast vom Fließband die Größe und Leistung des einst so geschmähten GROWIAN.

Auf Anregung des Carl Hanser Verlags und unter dem Dach der CEwind eG, der Forschungsgemeinschaft Windenergie der schleswig-holsteinischen Hochschulen, legen zehn Autoren aus dem Umfeld der schleswig-holsteinischen Windcommunity und den Niederlanden eine einführende Darstellung der Windenergietechnik vor. In elf Kapiteln sollen interessierte Leserinnen und Leser in die Lage versetzt werden, den modernen Stand dieser nunmehr als eigenständig zu bezeichnenden Technik kennenzulernen.

Wir beginnen mit einem Abriss der Geschichte, der ergänzt wird durch eine energiepolitische Diskussion der internationalen Bedeutung der Windenergie. Weitere Kapitel legen den aerodynamischen und strukturellen Blattentwurf dar. Dem Energiefluss in der Anlage folgend, stellen wir danach moderne Triebstrangkonzeppte sowie Turm und Gründung vor. Im weitesten Sinne elektrische Komponenten wie Generator, Umrichter, Regelungs- und Betriebsführungskonzepte schließen sich an. Einer Beschreibung, wie sehr große Anteile dieser fluktuierenden Energieform erfolgreich in das bestehende elektrische Versorgungsnetz integriert werden, kommt im Zuge der in Deutschland beschlossenen „Energiewende“ eine besondere Beachtung zu. Wir schließen mit einem Kapitel über den jüngsten, aber hoffnungsvollsten und mit hohen Erwartungen versehenen Zweig der Windenergie, der Offshore-Technik.

Kiel, im Februar 2012

Für die CEwind eG: A. P. Schaffarczyk

## Vorwort zur zweiten Auflage

Auch seit dem Erscheinen der ersten Auflage hat die Nutzung der Windenergie in Deutschland und der Welt weiter sehr stark zugenommen. So stieg die weltweite installierte Nennleistung von 238 GW (Ende 2011) auf 432 GW (Ende 2015). Der Carl Hanser Verlag hat sich deswegen zu einer zweiten Auflage entschlossen, in der die Autoren dieser Entwicklung Rechnung tragen. So wurden alle Kapitel in diesem Buch gründlich überarbeitet und den aktuellen Standards angepasst. Der Herausgeber dankt dafür allen Autoren und insbesondere unserer Lektorin, Frau Franziska Jacob, für ihre stetige Förderung.

Kiel, im Juli 2016

## Die Autoren

Dr. h. c. Jos Beurskens leitete die Abteilung für Erneuerbare Energien und Windenergie des Niederländischen Forschungszentrums für Energie (ECN) mehr als 15 Jahre. Für sein Lebenswerk wurde er von der Europäischen Windenergievereinigung (EWEA) 2008 mit dem Poul-la-Cour-Preis ausgezeichnet. Er ist nun unabhängiger Berater für Technologieentwicklung und Forschungsstrategien.

Prof. Dipl.-Ing. Lothar Dannenberg beschäftigte sich mehr als 10 Jahre mit Rotorblättern und Offshore-Gründungen. Er lehrte an der FH Kiel neben diesen Gebieten in den Bereichen Konstruktion und Festigkeit von Schiffen, Faserverbundwerkstoffe und Unterwasserfahrzeuge.

Seit dem 1. November 2010 leitet Prof. Dr.-Ing. Torsten Faber das Wind Energy Technology Institute (WETI) an der Fachhochschule Flensburg. Zuvor sammelte er über 10 Jahre Berufserfahrung bei DNV GL (früher: Germanische Lloyd Industrial Services GmbH) in der Abteilung Rotorblätter und Bautechnik von Windenergieanlagen.

Prof. Dr.-Ing. Friedrich W. Fuchs leitete den Lehrstuhl für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und ist dort weiterhin in der Forschung tätig. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt ist die Wandlung regenerativer Energie. Davor war er 14 Jahre in der Industrie, zuletzt als Entwicklungsleiter bei CONVERTEAM (damals AEG, heute General Electrical Power Conversion).

Frau M. Eng. Nica Kähler arbeitet für die HanseWerk AG in der Netztechnik. In der Abteilung Richtlinien und Anlagentechnik ist sie für die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) und für die Bearbeitung der Anlagenzertifikate zuständig.

Prof. Dr.-Ing. Christian Keindorf studierte Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig und promovierte 2009 über Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2009 ist er Gründungsgesellschafter der SKI Ingenieures. mbH, die sich u. a. mit Tragstrukturen für erneuerbare Energiesysteme beschäftigt. Anfang 2015 nahm er den Ruf zur Professur für Offshore-Anlagentechnik der Fachhochschule Kiel an und arbeitet dort am Institut für Schiffbau und maritime Technik. Außerdem ist er 2015 von der Ingenieurkammer Niedersachsen zum Sachverständigen für Tragkonstruktionen von On- und Offshore-Windenergieanlagen öffentlich bestellt und vereidigt worden.

Dipl.-Ing. Peter Krämer ist Konstruktionsleiter und Produktmanager bei der Firma aerodyn Energiesysteme GmbH in Rendsburg. aerodyn ist ein unabhängiges Ingenieurbüro, welches sich ausschließlich mit der Entwicklung von Windenergieanlagen beschäftigt. Seit der Gründung 1983 hat aerodyn mehr als 27 erfolgreiche Gesamtentwicklungen von WEA's durchgeführt. Bis Ende 2015 wurden dabei weltweit ca. 36 600 Anlagen mit insgesamt 50 000 MW errichtet.

Dr. Hermann van Radecke arbeitet seit über 20 Jahren an der FH Flensburg im Bereich Technologietransfer Hochschule und Windenergie. Er ist Gründungsmitglied von CEwind. Er ist an der Fachhochschule und der Universität Flensburg in der Lehre für Physik, für Grundlagen der Windenergie und im internationalen Master-Studiengang Wind Engineering vertreten.

Prof. Dr. jur. Klaus Rave leitete die Abteilung Energiewirtschaft in Schleswig-Holstein und war langjähriger Vorstand der Investitionsbank des Landes. Seit vielen Jahren ist er in internationalen Verbänden für die Windenergie tätig, u. a. als Präsident der EWEA (European Wind Energy Association) und derzeitiger Vorsitzender des GWEC (Global Wind Energy Council).

Prof. Dr. A. P. Schaffarczyk beschäftigt sich seit 1997 mit der Aerodynamik von Windturbinen. Er ist Gründungsmitglied und ehrenamtlicher Vorstand der CEwind eG und lehrt im internationalen Master of Science Studiengang Wind Engineering.

Prof. Dr. Reiner Johannes Schütt war lange Jahre Entwicklungsleiter und Technischer Leiter der ENERCON NORD Electronic GmbH in Aurich. Heute lehrt und forscht er im Fachgebiet Steuerungen/Elektrische Antriebe und Windenergietechnik an der FH Westküste in Heide.

Prof. Dr. Sven Wanser leitet den Geschäftsbereich Netzdienste bei der Schleswig-Holstein-Netz AG und lehrt das Fachgebiet Elektrische Energietechnik an der FH Westküste in Heide.

## Danksagung

Der Herausgeber dankt Susanne Coulibaly für ihre unermüdliche Hilfe bei der Technischen Unterstützung zur Erstellung der Manuskripte und dem studentischen Team um Prof. von Schilling für die Erstellung der deutschen Übersetzung des Textes von Herrn Beurskens.

Peter Krämer dankt Oliver Mathieu, Felix Mund, Arved Hildebrand und Sönke Siegfriedsen für die Ausarbeitung von Kapitel 6 in der ersten Auflage. Herr Siegfriedsen hatte die Gesamtverantwortung für Kapitel 6 der ersten Auflage, welches bei dieser Überarbeitung nur geringfügig verändert wurde.

Prof. Faber dankt Marcel Schedat für die konstruktiven Verbesserungsvorschläge, die Ergänzung von neuen Inhalten sowie die Fehlersuche und -beseitigung innerhalb des Kapitels „Turm und Gründung“ in der neuen Auflage des vorliegenden Buches. Ein weiterer Dank gilt den Sponsoren und der Fachhochschule Flensburg, durch dessen Unterstützung die Arbeit am Wind Energy Technology Institute ermöglicht wird.

Prof. Fuchs dankt dem Team des Lehrstuhls für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe der Christian-Albrechts-Universität für die Unterstützung bei der Ausarbeitung des Kapitels 9.

Dr. van Radecke dankt den Koautoren Dr. Mengelkamp und Andreas Kunte für ihre Beiträge in Kapitel 3. Dr. Theo Mengelkamp (Abschnitt 3.2.6) ist Umweltmeteorologe und leitet seit über 20 Jahren die für Windenergieprognosen bekannte Firma anemos. Andreas Kunte (Abschnitt 3.8) war über 20 Jahre in mehreren Umweltämtern in Schleswig-Holstein zuständig für Genehmigungen von Windenergieanlagen. Außerdem dankt Dr. van Radecke für die freundliche fachliche Unterstützung durch Herrn Robin Funk von der Firma EMD und Dr. Wolfgang Schlez von der Firma GL Garrad Hassan.

Prof. Dr. Sven Wanser und Nica Kähler danken allen Fachkollegen und Lesern, die mit vielen wertvollen Anregungen zur Gestaltung des Kapitels beigetragen haben. Besonderer Dank gilt dabei den Kollegen Dipl.-Ing. Kai Dohse (Schleswig-Holstein Netz AG) und Dipl.-Ing. Carina Dorothea Carl (HanseWerk AG).

Dem Verlag danken die Autoren für die Veröffentlichung des Buches und für die gute Betreuung während der Erstellungsphase.

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>1 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 .....	27
1.4 Der erste Innovationszeitraum: 1930–1960 .....	30
1.5 Der zweite Innovationszeitraum und die volle Kommerzialisierung: 1960 bis heute .....	37
Literatur.....	52
<b>2 Die internationale Entwicklung der Windenergie (Klaus Rave) ....</b>	<b>54</b>
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
<b>3 Windressourcen, Standortbewertung, Ökologie (Hermann van Radecke) .....</b>	<b>83</b>
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
<b>6</b>	<b>Der Triebstrang (Sönke Siegfriedsen, Peter Krämer) .....</b>	<b>212</b>
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 – Dreipunkt Lagerung .....	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
<b>7</b>	<b>Turm und Gründung (Torsten Faber) .....</b>	<b>264</b>
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 Stahlrohtürmen .....	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**

	<b>(Friedrich Fuchs) .....</b>	<b>288</b>
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**

<b>(Lothar Dannenberg, Christian Keindorf) .....</b>	<b>422</b>
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 Platform).....	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

# 2

## Die internationale Entwicklung der Windenergie

Windenergie ist eine universelle Ressource. Sie kann als Lösung für eine Vielzahl der globalen Energieprobleme nicht nur theoretisch, sondern auch tatsächlich dienen. Mit ihrer Hilfe kann Strom erzeugt werden, die Leitenergie des 21. Jahrhunderts. Die Endlichkeit der fossilen Ressourcen sowie deren geografisch ungleichgewichtige Verteilung, die Folgen der Klimaveränderung aufgrund deren Verbrennung, die Gefahren des nuklearen Sektors, zuletzt dramatisch in Japan bzw. Fukushima erlebbar, finden zunehmend Antworten und Alternativen in der Stromerzeugung durch regenerative Quellen, allen voran durch die Nutzung der Windenergie.

### ■ 2.1 Der Beginn der modernen Energiedebatte

Die internationale Energiedebatte erreichte eine neue Dimension mit der Veröffentlichung von Meadows *Limits to Growth*, dem Bericht des Club of Rome. Der Schock der ersten Ölpreiskrise 1973 traf die industrialisierte Welt hart: In Deutschland gab es sogar Sonntagsfahrverbote. Knappheit, Verteilungskämpfe: Szenarien, die zum Umsteuern aufforderten.

Die nuklearen Unfälle von Harrisburg, aber insbesondere von Tschernobyl (1986) markierten eine weitere Dimension der Gefährdung der und durch die Energieversorgung. Die sogenannte „friedliche Nutzung der Kernenergie“ wurde zunehmend hinsichtlich ihrer Risiken hinterfragt (siehe [1, 2, 33]) Bürgerbewegungen bildeten sich, die Parteiströmung „Die Grünen“ entstand in etlichen Ländern aus diesem Protest heraus.

Als dritte große Herausforderung der internationalen Energieversorgung trat seit den 1980er-Jahren die Klimadebatte auf den Plan, genauer gesagt wuchs die Erkenntnis, dass es bestimmte anthropogene Effekte einer Veränderung des Erdklimas gäbe (siehe als frühe populärwissenschaftliche Publikation: [15]; auch [5]; aktuell [32]). Sicherheitsfragen – militärischer wie ziviler Natur und bezogen auf die Bedarfsdeckung und durch den Klimawandel ausgelöst – dominieren die aktuelle Debatte (siehe aktuell wie umfassend [34]).

Wenn auch diese drei Debatten zeitlich versetzt verliefen, zum Teil argumentativ versucht wurde, z. B. die Klimadebatte zur schnelleren Verbreitung der Atomenergie als angeblich CO<sub>2</sub>-freier Stromerzeugung zu nutzen, so war doch kontinuierlich die Entwicklung erneuerbarer Energieträger, allen voran die Windenergie, ein wesentlicher und wachsender Teil der Argumentationskette (siehe Tabelle 2.1 zum globalen Wachstum). Diesen Zusammenhang stellt auch der UN Generalsekretär Ban Ki-moon her, wenn er die Forderung nach „Sustainable Energy for All“ aufstellt, Zieljahr 2030 (siehe *New York Times* vom 11.01.2012 in der Vorbe-

richterstattung zum Future World Energy Forum und der Generalversammlung der IRENA – s. u. – in Abu Dhabi). Ansonsten gilt für die Gefahren aus der Erderwärmung wie für die nuklearen Risiken die Formel: „Avoid the unmanageable and manage the unavoidable.“

Zwei Sachverhalte unterstützten und verstärkten diesen Trend. Zum einen die historischen Erfahrungen mit der Nutzbarmachung des Windes für die zivilisatorische Entwicklung der Menschheit. Zum anderen eine auch schon über Jahrzehnte existierende Tradition von Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet, sei es in den USA, sei es in Deutschland, Dänemark, Holland oder Großbritannien (siehe die ausführliche Darstellung in Kapitel 1).

1993 wurde anlässlich der in Schleswig-Holstein stattfindenden European Wind Energy Conference das Durchbrechen einer Schallmauer gefeiert: 1 000 MW waren installiert. Das Jahr 2015 sah eine neue Dimension: Weltweit waren 430 000 MW in über 90 Staaten errichtet, davon 24 Staaten mit mehr als 1000 MW und 11 Staaten mit mehr als 5000 MW (siehe Tabelle 2.2).

Jahr	Leistung	Zuwachs
2000	17 400	3 760
2001	23 900	6 500
2002	31 100	7 270
2003	39 431	8 133
2004	47 620	8 207
2005	59 091	11 531
2006	73 957	14 703
2007	93 924	20 310
2008	120 690	26 874
2009	159 016	38 445
2010	197 946	39 058
2011	238 089	40 628
2012	282 842	45 034
2013	318 458	35 796
2014	369 695	51 746
2015	432 419	63 013

**Tabelle 2.1** Kapazität der weltweit installierten WEA (in MW)

Nicht nur die Zahl der Anlagen und deren Größenordnung ist kontinuierlich gewachsen, sondern auch die Anzahl der Länder, in denen die Windkraft zur Stromerzeugung genutzt wird. Die USA, Dänemark, Deutschland und Spanien sind als Pionierländer zu nennen, in denen diese Entwicklung ihren Anfang nahm. Lange Zeit wurde befürchtet, dass diese vier unter sich blieben. Die Gefahr wuchs, dass politische Veränderungen in nur einem Land negative Folgen für die gesamte Entwicklung auslösen könnten. Heute ist die Nutzung der Windenergie in über 75 Staaten verbreitet. Das Wachstum geht einher mit technologischer und geografischer Diversifizierung: Erstmals lösten 2010 Nicht-OECD-Staaten angeführt von China die OECD-Staaten als Wachstumstreiber ab. Das quantitative Element wird ergänzt und auf ein neues Niveau gehoben. Zudem sinken die Gestehungskosten und es wächst die Verfügbarkeit.

Tabelle 2.2 Die Windländer weltweit

Afrika & Naher Osten		Ende 2014	neu 2015	Ende 2015
	Südafrika	570	483	1 053
	Marokko	787	-	787
	Ägypten	610	-	610
	Tunesien	245	-	245
	Äthiopien	171	153	324
	Jordanien	2	117	119
	Andere <sup>(1)</sup>	151	-	151
	<b>Insgesamt</b>	<b>2 536</b>	<b>753</b>	<b>3 289</b>
Asien				
	China	114 604	30 500	145 104
	Indien	22 465	2 623	25 088
	Japan	2 794	245	3 038
	Südkorea	610	225	835
	Taiwan	633	14	647
	Pakistan	256	-	256
	Thailand	223	-	223
	Philippinen	216	-	216
	Andere <sup>(2)</sup>	167	-	167
	<b>Insgesamt</b>	<b>141 968</b>	<b>33 606</b>	<b>175 573</b>
Europa				
	Deutschland	39 128	6 013	44 947
	Spanien	23 025	-	23 025
	Großbritannien	12 633	975	13 608
	Frankreich	9 285	1 073	10 358
	Italien	8 663	295	8 958
	Schweden	5 425	615	6 025
	Polen	3 834	1 266	5 100
	Portugal	4 947	132	5 079
	Dänemark	4 881	217	5 063
	Türkei	3 738	956	4 694
	Niederlande	2 865	586	3 431
	Rumänien	2 953	23	2 976
	Irland	2 262	224	2 486
	Österreich	2 089	323	2 411
	Belgien	1 959	274	2 229
	Andere <sup>(3)</sup>	6 546	833	7 387
	<b>Insgesamt</b>	<b>134 251</b>	<b>13 805</b>	<b>147 771</b>
	davon EU-28	129 060	12 800	141 578

(1) Algerien, Kap Verde, Iran, Israel, Kenia, Libyen, Nigeria; (2) Bangladesch, Mongolei, Sri Lanka, Vietnam; (3) Bulgarien, Zypern, Tschechien, Estland, Finnland, Färöer Inseln, FYROM; Ungarn, Island, Lettland, Liechtenstein, Litauen, Luxemburg, Malta, Norwegen, Rumänien, Russland, Schweiz, Slowenien, Ukraine

**Tabelle 2.2** Die Windländer weltweit (*Fortsetzung*)

<b>Lateinamerika &amp; Karibik</b>				
	Brasilien	5 962	2 754	8 715
	Chile	764	169	933
	Uruguay	529	316	845
	Argentinien	271	8	279
	Panama	35	235	270
	Costa Rica	198	70	268
	Honduras	126	50	176
	Peru	148	-	148
	Guatemala	-	50	50
	Karibik <sup>(4)</sup>	250	-	250
	Anderere <sup>(5)</sup>	285	-	285
	<b>Insgesamt</b>	<b>8 568</b>	<b>3 652</b>	<b>12 220</b>
<b>Nordamerika</b>				
	USA	65 877	8 598	74 471
	Kanada	9 694	1 506	11 200
	Mexiko	2 359	714	3 073
	<b>Insgesamt</b>	<b>77 930</b>	<b>10 818</b>	<b>88 744</b>
<b>Pazifik</b>				
	Australien	3 807	380	4 187
	Neuseeland	623	-	623
	Pazifische Inseln	12	-	12
	<b>Insgesamt</b>	<b>4 442</b>	<b>380</b>	<b>4 822</b>
	<b>Weltweit</b>	<b>369 695</b>	<b>63 013</b>	<b>432 419</b>

(4) Karibik: Aruba, Bonaire, Curacao, Kuba, Dominica, Guadalupe, Jamaika, Martinica, Granada, St. Kitts und Nevis; (5) Bolivien, Kolumbien, Ecuador, Nicaragua, Venezuela

## ■ 2.2 Zur Erneuerung der Energiemärkte

Die äußerst ungleichgewichtige regionale und damit politische Verteilung der konventionellen Brennstoffe war und ist eine prägende Krisenursache. Ob Öl, Gas, Kohle oder Uran, das Vorhandensein auf nationalem Territorium und das Exportpotenzial oder die Importabhängigkeit entschieden und entscheiden über Wohlstand, Entwicklung und wirtschaftliches Wachstum. Das Preiskartell der OPEC, die „billige“ Kohle bzw. der hochsubventionierte Kohleabbau, der hochgefährliche Brennstoffkreislauf des Uran, die spezifischen Abhängigkeiten von der leistungsgebundenen Gasversorgung führen jeweils auf unterschiedliche Art und Weise zu außenpolitischen Spannungen bis hin zu Kriegen wie auch innenpolitischen Verteilungsdisparitäten mit folgenreichen internen Konflikten (siehe [34], S. 227 ff.).

In der neueren Menschheitsgeschichte – der Geschichte der Industrialisierung – waren die Energiemärkte immer politisch gestaltet bzw. beeinflusst. Staatliche Energieversorger, monopolistische oder oligopolistische Rohstoffförderer prägen die globale Energiewirtschaft. Die 10

größten (gemessen an ihren Reserven) Öl- und Gasfirmen der Welt befinden sich in Staatsbesitz (The Economist, 21. Januar 2012). Derzeit erleben wir einen dramatischen Ölpreisverfall, auch durch das Fracking und die Politik Saudi-Arabiens. Seit der Klima-Konferenz in Paris veränderte sich das Investitionsverhalten durch einen Rückzug bei fossilen Brennstoffen.

Die Regulierungsintensität der Energiemärkte ist extrem differenziert ausgeprägt: Eine Skala von 0 bis 100 würde voll ausgeschöpft. Die Korrelation mit dem globalen Korruptionsindex von Transparency International ist augenfällig. Das Spektrum der politischen Einflussnahme reicht von „Atoms for Peace“ über den „Kohlepfennig“ bis zu den Oligarchen von Gazprom, von forschungspolitischen Programmen bis zum EEG. Die regulatorische Ausgestaltung des EU-Binnenmarktes gilt als einer der wichtigsten und komplexesten politischen Prozesse der Gegenwart.

Dieser ist allerdings weit übertroffen von den langwierigen Verhandlungen über ein internationales Klimaschutzabkommen: das 2%-Ziel von Kopenhagen hat eben – noch – keine bindende völkerrechtliche Wirkung. Das Klimaschutzabkommen von Paris mit dem 1,5-Grad-Ziel bis 2050 stellt einen Durchbruch dar.

Eine globale Problemstellung – die sichere, umwelt- und sozialverträgliche Energiebedarfsdeckung – bleibt ohne völkerrechtlichen Rahmen. Die Analogie zur Situation der Finanzmärkte drängt sich auf. Nicht nur durch den Hinweis, „wenn das Klima eine Bank wäre, wäre es schon gerettet“, der auf dem Post-Lehmann-Brothers-Höhepunkt der Krise gelegentlich zu hören war. Auf beiden Feldern sind verbindliche Abkommen und regulatorische Standards dringend erforderlich und gleichermaßen in zu weiter Ferne. Auf beiden Feldern wächst das Gefährdungspotenzial für Staat, Wirtschaft und Gesellschaft stetig. Für beide Bereiche gilt, dass nur durchsetzbare international verbindliche Regeln dauerhafte Wirkung entfalten können. Klimaschutz und Finanzmarktregulierung stellen die internationale Völkergemeinschaft nicht nur vor neue Dimensionen der Kooperation, sondern sind für die globale Ökologie (zur Begrifflichkeit siehe [18]) wie Ökonomie überlebensnotwendig.

Der Wandel auf den Energiemärkten findet derzeit auf verschiedenen Ebenen statt:

- Auf der Ebene der Akteure treten neue Spieler auf das Feld bzw. wandeln sich traditionelle Anbieter. Zum einen werden alte Monopole aufgebrochen zur Schaffung echter Märkte durch die Trennung von Netzbetrieb und Erzeugung, wie in der EU, zum anderen nimmt die Zahl und das Gewicht unabhängiger Investoren in die Energieerzeugung stetig zu.

Des Weiteren entwickeln sich neue Dienstleistungen wie der Handel mit Strom über die Börse oder das Angebot von Speicherkapazitäten unterschiedlichster Art (Pump- und Druckluftspeicher, Elektromobilität, hervorzuheben ist die besondere Rolle Norwegens mit den Unternehmen Statoil und Statkraft und deren Strategie der Rolle einer „Battery of Europe“).

- Auf der Ebene der Rohstoffbeschaffung konventioneller Energieträger gewinnt der Offshore-Bereich fortlaufend an Bedeutung bzw. werden sogenannte unkonventionelle Quellen wie Shale-Gas erschlossen und in neuartigen Verfahren unter umweltpolitisch fragwürdigen Bedingungen gewonnen.

### **1. Exkurs: Die Neugestaltung der Meeresnutzung**

Große Chancen, aber auch Risiken sind mit der Nutzung des Offshore-Bereichs verbunden. Aktuell wurden die Gefährdungen durch Ölleckagen, wie sie zuletzt im Golf von Mexiko und

vor der Küste Brasiliens sichtbar wurden, diskutiert. In noch bedrohlicherem Ausmaß gilt dies auch für alle Entwicklungen im arktischen bzw. antarktischen Bereich, die noch durch „frozen claims“ sowie im Rahmen internationaler Verträge geschützt sind. Hier besteht eine Verantwortung der Völkergemeinschaft.

Dies gilt auch für die Weltmeere außerhalb der 200 Meilen exklusiven Wirtschaftszone gem. United Nations Convention on the Law of the Sea. Es stimmt daher optimistisch, dass nach den USA auch die EU-Kommission ein Grünbuch – besser: Blaubuch – vorgelegt hat, aus dem eine eigenständige Meerespolitik entwickelt werden soll. Die Genehmigungsverfahren für Offshore-Windparks in der Nord- aber auch Ostsee, wie sie in anspruchsvollster Weise das BSH durchführt, haben dabei planungsrechtlich Maßstäbe gesetzt in Bezug auf Umweltfolgenabschätzungen u. a. und führen so zu einer „Terranisierung“ des Meeres (siehe [16]). So könnte die Meeresnutzung verantwortlich gestaltet werden. Die Menschheit wäre dann hinsichtlich ihres Umgangs mit diesem einzigartigen Ökosystem unseres blauen (!) Planeten endlich aus dem Stand der Jäger und Sammler heraus und in einem Quantensprung im maritimen Industriezeitalter angekommen (siehe [30, 35]).

- Auf der Ebene der Endenergieversorgung gewinnt Strom systematisch Marktanteile und wird zur Schlüsselenergie des 21. Jahrhunderts (siehe [34], S. 714), nicht zuletzt durch seine Bedeutung für den Sektor der Informationstechnologie sowohl als Energieträger als auch hinsichtlich des technologischen Zusammenwirkens von ITC und Energieversorgung, Stichwort „Smart Grid“, „Smart Metering“, „Smart Home“.
- Auf der Ebene des Energietransports, speziell des Stromtransports erschließen sich neue Dimensionen hinsichtlich der Entfernung und der dadurch entstehenden Transportverluste durch die HGÜ-Technologie.
- Auf der Ebene der Preisbildung kann von einem hohen Sockel mit mittel- bis langfristig ansteigenden Preisen sowohl auf der Rohstoffseite als auch bezogen auf die Endenergie ausgegangen werden.

Der Bedeutungszuwachs der Edelenergie Strom wird dabei noch dadurch unterstrichen, dass diese Endenergie aus diversifizierten Quellen erzeugt werden kann.

## ■ 2.3 Zur Bedeutung der Stromnetze

Da die Strombereitstellung in sicheren Netzen auch für das Wachstum der internationalen Kommunikationswege unverzichtbar ist, wird ihre spezielle strategische Bedeutung noch deutlicher (siehe [27]). Das Internet und das Stromnetz sind jeweils für sich und auch durch die entstehende innovative Symbiose beider die strategischen Infrastrukturinvestitionen, der Schlüssel zur Modernisierung und nachhaltigen Entwicklung der Volkswirtschaften von der lokalen über die regionale und nationale bis hin zur globalen Ebene (siehe auch [22]).

Vom „Super Grid“ (siehe Bild 2.1) wie Eddy O’Connor, Gründer von Airtricity, jetzt Mainstream Renewable Power, es erdachte bis zum „Smart Grid“ und dem „Smart Metering“, wie es derzeit in Europa (Italien, Schweden, auch Deutschland) konzipiert wird: Innovative Technologien und Cross-Over-Anwendungen führen in neue Dimensionen (siehe [7]).



**Bild 2.1** Europäisches Windenergie-Stromverbundnetz (Supergrid)

Die reine Angebotsorientierung des Erzeugers gegenüber dem Verbraucher wird abgelöst durch bedarfsgerechte Steuerung bei Optimierung der eingesetzten Ressourcen. So können die erneuerbaren Energieträger voll zur Entfaltung kommen. Weniger bedeutsam ist dabei, auf wie vielen Ebenen der Strom und von wem transportiert, verteilt und an die Endkunden geliefert wird. Dies ist letztlich eine Frage der Kosten, schließlich muss ja auf jeder Stufe eine Marge verdient werden, in Deutschland also z. B. auf dreien, in Frankreich oder Italien nur auf einer.

Ein „Global Link“ ist keine Utopie mehr. Zu Recht hat die (US-amerikanische) National Academy of Engineering die groß angelegte Elektrifizierung mittels Stromnetzbetrieb als größte Ingenieurleistung des 20. Jahrhunderts gewürdigt. Die Möglichkeiten der Informationstechnologie in Verbindung mit dem Stromnetz und einer Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen fordern Ingenieurleistungen, die für das 21. Jahrhundert Maßstäbe setzen können. UN Generalsekretär Ban Ki-moon verweist in seinem Namensartikel in der New York Times darauf, dass noch vor 20 Jahren die weltweite Verbreitung von Mobiltelefonen unvorstellbar war (11.01.2012). Aus der Verbindung von Energietechnologie mit der Informationstechnologie wird – dem Prinzip der Emergenz folgend – Neues entstehen. Meine These: analog zur Entwicklung des „Cloud Computing“ eine Art von „Cloud Generating“. Getragen von einem weltweiten Verbund, dem „Global Link“. Meine Formel: „No communication without electrification.“ Der Vorsitzende der State Grid Corporation of China, Liu Zhenya, hat in einer bemerkenswerten Rede in Houston nicht nur ein klares Bekenntnis zu Wind- und Sonnenstrom abgelegt, sondern auch seinen Plan für eine „global energy interconnection“ (GEI) erläutert, die China mit Russland, Zentralasien und Europa verbinden soll und dabei auch von den Lastverschiebungen durch die Zeitzonen profitiert. Die soll mit bereits bestehender Technologie erreicht werden, denn nach seinen Aussagen ist dies keine technische Herausforderung: „The only hurdle to overcome is mindset“ [6].

So werden die drei Megatrends miteinander verbunden: Globalisierung, Dezentralisierung und Dekarbonisierung. Und auch dem zweiten Dreiklang wird Rechnung getragen: Knappheit, Sicherheit, Qualität. Ebenso wie dem dritten, schon erwähnten: Endlichkeit der Ressourcen, Risiken der Atomkraftnutzung, Gefahren des Klimawandels. Bei aller Ungleichzeitigkeit der internationalen Entwicklung, speziell der weit auseinanderklaffenden Entwicklungsstände und Pro-Kopf-Einkommen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen, stellen Wind- und Solarenergie zusätzlich

zur Wasserkraft und dem Potenzial der Biomasse die übergreifende Antwort im Rahmen eines intelligenten Stromnetzes dar.

Der Zugang zu einem Stromnetz, die Ablösung instabiler Inselnetze durch Verbünde ist dabei für die sich entwickelnden Volkswirtschaften eine große Herausforderung. Nicht einmal ein Viertel der derzeit auf der Erde lebenden 7 Mrd. Menschen verfügt über einen derartigen Zugang. Doch in China, Indien, im gesamten südostasiatischen Raum, in den ehemaligen, jetzt unabhängigen asiatischen Sowjetrepubliken, auf dem afrikanischen Kontinent, in Lateinamerika ist die Nutzung von Informationstechnologien der Schlüssel zur wirtschaftlichen und individuellen Entwicklung: Eine gesicherte Stromversorgung ist damit ebenfalls unverzichtbar. Oft genug ist vor dem „Digital Divide“ gewarnt worden, oft genug wurde dabei missachtet, dass der Zugang zu Strom, die Sicherheit eines Stromnetzes dabei einen wesentlichen Entwicklungsschritt darstellen (siehe [23], S. 3 f.).

Während in Europa „top-down“ neue Kooperationsformen erprobt werden müssen, die USA bzw. der nordamerikanische Kontinent neben der Verstärkung der Nord-Süd-Achse sich der Herausforderung der Ost-West-Verbindung stellen muss, gilt es in den sich entwickelnden Volkswirtschaften aus dezentralen Ansätzen heraus „bottom-up“ zu einer Systemintegration und Vernetzung zu kommen. Gemeinsam ist beiden Entwicklungen, dass nur ein technisch anspruchsvoller Netzbetrieb die Versorgungssicherheit herstellt. Europa, speziell Deutschland hat dabei besondere und positive Erfahrungen einzubringen bzw. Beiträge zu leisten. Das deutsche Stromnetz ist vor dem Hintergrund des Charakters als Transit- und Industrieland das mit Abstand weltweit am besten konfigurierte und betriebene. Die Ausfallzeiten betragen ca. 20 Minuten pro Jahr, während die nächsten Länder bereits bei über 4 Stunden liegen und der volkswirtschaftliche Schaden in den USA nach Schätzungen ca. 150 Mrd. \$ beträgt, die durch Blackouts verursacht werden (siehe auch [27]). Die umfassendste Darstellung der Stromnetzgestaltung findet sich in dem Band „Renewable Energy Integration“, herausgegeben von Lawrence E. Johns (siehe [12]).

Die Stromerzeugung wird auch zukünftig einem Wandel unterliegen. Der Strom, der aus der Steckdose kommt, soll hingegen immer die gleiche Qualität haben und jederzeit zur Verfügung stehen. Darin liegt die Modernisierungsaufgabe für die Stromnetzkonfiguration und den Betrieb von Stromnetzen begründet.

Das Zeitalter des Verbrennens fossiler Stoffe zur Energiegewinnung ist abgelaufen. Die Vision eines ewigen nuklearen Brennstoffkreislaufs gibt es nicht mehr. Investoren geht es nach wie vor um die Verhinderung von „stranded investments“, speziell in Bezug auf die hohen Kapitalkosten von Atomkraftwerken, deren Prozesse durch die Nichtinbetriebnahme von Schnellen Brütern in Deutschland und Frankreich sowie durch die ungelöste Endlagerfrage gefährdet sind. Wenn der Übergang zu neuen Energieträgern und neuen Wegen der Stromerzeugung erfolgreich sein soll, ist die Modernisierung der Stromnetze ein wesentlicher Schlüssel.

Daher meine Formel: „No transition without transmission.“ Es gilt:

- natürliche Potenziale mit angepassten Technologien bedarfsgerecht zu verbinden,
- grenzüberschreitende Versorgungssicherung zu erreichen,
- sozial verträgliche Preise zu gestalten,
- Preissicherheit und damit wirtschaftliche Stabilität zu erreichen und zwar durch die
- Kalkulierbarkeit der Up-Front-Kosten, wie sie die Windenergie ermöglicht, bei
- Vermeidung der volatilen Kosten der endlichen fossilen Brennstoffe.

Der Ausbau der Netze ist dabei vergleichbar in seiner strategischen Bedeutung für das 21. Jahrhundert mit dem Ausbau der Schienen- und Straßennetze und auch der Telefonnetze im späten 19. und 20. Jahrhundert. In Bezug auf Letztere wurde bekanntlich auch für lange Zeit ein transatlantisches Kabel als illusionär angesehen.

Ohne die Vision von Verbindungen und Netzen wäre die Menschheitsgeschichte anders verlaufen. Aber warum sollte der Handel mit Strom nicht globalisiert und dieser auf internationalen Trassen physikalisch transportiert werden? Die Seidenstraße oder die transsibirische Eisenbahn mögen als zivilisatorische Referenz dienen.

Fragen der Finanzierung stellen sich ebenso wie die der Organisationsform – staatlich, privat, gemischtwirtschaftlich. Durch den langfristig gesicherten, weil regulierten (s. u.) „return on investment“ liegt hier allerdings ein attraktives Anlageobjekt vor, das gerade in Zeiten finanzpolitischer Instabilität z. B. für Pensionsfonds große Bedeutung erlangen kann. Auch für privates Investment wird neuer Raum geschaffen: Sicherheit und Langfristigkeit mit besserer Verzinsung als Spareinlagen.

Dabei darf in diesem Zusammenhang auch ein Hinweis auf die Chancen einer nicht nur politisch sondern ebenso materiell wie finanziell partizipatorischen Energiepolitik gegeben werden: Bürgerwindparks waren die Vorreiter, inzwischen gibt es vielfältige Beteiligungsformen, Bürgernetze sind im Entstehen und die Öffnung für diese neuartigen Beteiligungsmöglichkeiten kann auch eine aktive Antwort auf das weit verbreitete St.-Florians-Prinzip oder den NIMBY-Effekt (not in my backyard) sein. Während immer wieder in Deutschland darauf hingewiesen wird, dass Planungen bis zur Realisierung über 10 Jahre brauchen, haben die Windbauern auf der Ostseeinsel Fehmarn es der Welt gezeigt: In 11 Monaten wurde die Insel anlässlich des Repowering völlig verkabelt und mit dem Festland neu verbunden, ausschließlich privat finanziert. Die Arge Netz in Nordfriesland entwickelt und betreibt nicht nur das Stromnetz auf der Erzeugungsebene für über 1 000 MW Windparkleistung, sondern bietet in diesem ländlichen Raum auch den Zugang über eine Breitbandversorgung zu einem schnellen Internet (siehe [27]). Warum nicht Volksaktien an Netzbetreibern ausgeben und so Akzeptanz schaffen für Investitionen in ein gemeinwirtschaftliches Gut?

Die dänische Regierung und das Parlament haben in Hinblick auf die Pläne zum Ausbau der Windenergie als der Leitenergie den Netzbetrieb des gesamten Landes zusammengefasst und damit die Integration der beiden Systeme Nordel und UCTE besorgt sowie dann in eine staatliche Gesellschaft überführt (die jetzt weltweit im Auftrag der Regierung beratend eingesetzt wird, wenn es um Fragen der Integration von Windstrom ins Netz geht, sicher auch mit dem Ziel der Absatzförderung dänischer Anlagenbauer wie VESTAS, so zuletzt in 2011 in China mit Übergabe eines Gutachtens an die dortige Regierung anlässlich der China Wind Power Conference and Exhibition).

Der Netzbetrieb wird technologisch anspruchsvoller und die Windkraftnutzung ist in diesem Rahmen ein entscheidender Treiber. Initiiert von der Fördergesellschaft Windenergie und wissenschaftlich vom Kasseler ISET unterstützt, fand im Jahr 2000 der erste Fachkongress zum Thema „Large Scale Integration“ statt und markierte den Beginn einer qualifizierten und intensiven Auseinandersetzung der Branche mit diesem Thema. Veranstalter war die EWEA, der älteste und größte Branchenverband, der daraufhin kontinuierlich an dieser Thematik weiterarbeitete, dabei eng mit der inzwischen auf europäischer Ebene organisierten Vereinigung der Stromnetzbetreiber (ENTSO-E) kooperierte und wesentlich Impulse zuletzt auf einem internationalen Kongress im Jahr 2010 in Berlin setzte (siehe auch [7] S. 173 ff., umfassend ebenfalls von EWEA, Powering Europe. Wind Energy and the Electricity Grid). Diese Kooperation ist

dringend erforderlich. Es gilt, die Rechtsinstrumente zu schaffen, die europaweite und globale Planungen und Investitionen ermöglichen.

Der leitungsgebundene Energieträger Strom bedarf dabei als natürliches Monopol stringenter Regulierung, damit einerseits die richtigen Impulse für Investitionen gesetzt werden – durch eine auskömmliche Rendite bei höchstem technischen Standard, andererseits keine diskriminierende Marktmacht ausgeübt wird, z. B. unabhängigen Stromerzeugern gegenüber: Der Durchbruch der Windenergie in Deutschland wurde bekanntlich durch das Einspeisegesetz von 1989 erreicht, das aus der Mitte des Bundetages kam und erstmalig den Netzzugang wie auch eine definierte Vergütung sicherte.

## ■ 2.4 Die erneuerte Wertschöpfungskette

Als Leitenergie des 21. Jahrhunderts – so meine These – wird Strom daher die Marktcharakteristika wesentlich verändern. Eine neue globale Wertschöpfungskette wird entstehen:

- die Produktion aus diversifizierten regenerativen Quellen
- der Transport als eine eigenständige Dienstleistung mit originärem Geschäftsmodell
- die Speicherung als strategischer Bestandteil der Wertschöpfungskette
- der Handel zur Erreichung des Optimums von Angebot und Nachfrage
- angemessene Preisbildung

Diese neue Konstellation der Marktakteure wird dabei auf allen drei derzeit definierten Marktplätzen greifen, zwar nicht gleichzeitig und gleichförmig, durchaus aber in übergreifender Weise. Sowohl der reife Onshore-Markt wie die sich entwickelnden Onshore-Märkte z. B. Chinas, Indiens und Brasiliens, aber auch der neue Offshore-Markt sehen bereits heute bzw. für die Zukunft angekündigt den Auftritt neuer Akteure. Die traditionelle Unterscheidung, wie sie z. B. von BTM Consult vorgenommen wurde, in Märkte, die umweltpolitisch getrieben wurden und solche, die aus energiewirtschaftlichen Gründen sich entwickelten, kann nicht länger aufrechterhalten werden. Auch dies ist ein Symptom für die globale Entwicklung und Markterschließung. Knappe Rohstoffressourcen, Klimaschutz und nukleare Risiken werden zwar nicht international einheitlich in ihrem Gefährdungspotenzial bewertet, sind aber gemeinsame Treiber des weltweiten Wachstums der Windenergienutzung. Der Ersatz ineffizienter Kraftwerke bzw. der erstmalige Aufbau einer Stromversorgung geben gleichzeitig Anlass für eine Prüfung der Sinnhaftigkeit einer Investition in die Windenergie.

Für jedes Investment ist eine sorgfältige Risikoabschätzung unabdingbar. Dies gilt in besonderem Maße für den Energiesektor, wo die Langfristigkeit der Investition und Amortisation auf hohe politische Risiken trifft. Auch für den Kapitaleinsatz gilt wie für die konkrete Planung bzw. Umsetzung von Planungen: Effizienz = Potenzial mal Akzeptanz. Die globale Zustimmung für einen verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung ist dabei ausweislich diverser, über lange Zeiträume durchgeführter Studien und Befragungen überragend. Auf die Solarenergie wie auf die Windkraft werden große Hoffnungen gesetzt. Diese Akzeptanz wie auch die Dezentralität der Stromgewinnung erlauben es daher, von einem Beitrag der Erneuerbaren zur demokratischen Legitimation von Energiepolitik zu sprechen (siehe ausführlich [7], S. 399 ff.).

# Index

- 100-MW-Programm, 69
- 25-m-HAT, 42, 46
- 2D-Tragflügel, 139
- 5 x MOD-0, 42
  
- $\alpha$ -Komponente, 335
- Ablaufsteuerung, 374, 375
- Abminderungsfaktor, 145
- Abstandsregeln, 117
- aerodynamische Dämpfung, 191, 194
- aerodynamische Optimierung, 151
- aerodynamisches Moment, 189
- aerodynamisches Profil, 139
- Aeroelastik, 159
- Aeroman, 68
- Ägypten, 79
- Aktiv-Stall-Blatt, 152
- aktive Raumzeiger, 328
- akustische Wichtung, 111
- Akzeptanz, 66
- Allgaier, Erwin, 32
- Amin, Adnan, 73
- Amortisation, 63
- Amplituden- und Frequenzumformung, 324
- Andreau, 34
- Anfangskurzschlusswechselstrom, 399, 412
- Ankerkorb, 282
- anlagenspezifische Turbulenz, 121
- Anlagentransformator, 345
- Anlaufstrom, 304
- Anpralllast, 437
- Anstellwinkel, 140
- Antriebsstrang, 289, 360
- Anwenderprogramme, 122
- Aramidfasern, 201
- Arbeitsplätze, 66
- Argentinien, 78
- astronomischer Schattenwurf, 118
- Asynchronkurzschlussläufer, 237
- Asynchronmaschine
  - mit Kurzschlussläufer, 298
  - mit Schleifringläufer, 309
- Atomenergie, 54
- Auftrieb, 140
- Auftriebskräfte, 141, 188
- Ausbauziele, 68
- Auslegung der Regler, 342
- Ausstieg aus der Atomenergie, 67
- Australien, 80
- Automatikbetrieb, 373
- Automationsebene, 354
- Automatisierungspyramide, 354
- AWEA, 73
- Azimutantrieb, 219
- Azimutlager, 224
  
- $\beta$ -Komponente, 335
- Balkentheorie, 191
- Balsaholz, 203
- Baltic Thunder, 168
- Basisraumzeiger, 328
- Bathymetrie, 464
- Bauer, R., 34
- Baugrundsetzung, 437
- von Baumhauer, 29
- Belastungsarten, 176
- Belastungskonzentrationen, 274
- Belastungsseite, 269
- Belastungszeitreihen, 267
- Beschleunigungsgleichung, 361
- Best-Romani, 34
- Betragsoptimum, 342
- Betreibergemeinschaften, 67
- Betreiber Vielfalt, 69
- Betriebsbedingung, 311
- Betriebsbereiche, 365, 371, 372
- Betriebsergebnisse, 67
- Betriebsfestigkeit, 206
- Betriebsfestigkeitsnachweis, 254
- Betriebsführung, 379

- Betriebsführungssystem, 373  
Betriebskennlinien, 364, 365, 372  
Betriebslasten, 254  
Betriebsmittel, 397  
Betriebsstruktur, 426  
Betriebszustandsüberwachungssysteme, 377  
Betz'scher Grenzwert, 142  
Betz, Albert, 29  
Beulfelder, 195  
Beulsteifigkeit, 208  
Biegelinien, 190  
Biegemoment, 189, 268  
Biegemomentenanteil, 266  
Biegenormalspannungen, 186  
Biegesteifigkeit, 183  
Bilanzkreise, 388, 392  
Bilau, Kurt, 29  
BImSchG, 125  
Bins, 104  
Biomasse, 65  
Birol, Fatih, 71  
Blatteinstellwinkel, 365  
Blattelektromethode, 148  
Blattlager, 213  
Blattspitzenbremsen, 36  
Blattspitzengeschwindigkeit, 358  
Blatttiefe, 144  
Blattwurzel, 254  
Blind Comparison, 153  
Blindanteil, 312  
Blindleistung, 292, 320, 393, 395  
Blindleistungsberechnung, 338  
Blindleistungsregelung, 340, 370  
Blindstromregelung, 338  
BLT, 64  
Blyth, James, 27  
BMFT, 68  
BNSDE, 66  
Bockwindmühle, 22  
Bodenrauigkeit, 85  
Bonität, 66  
Boom, 68  
BOOT, 64  
BOT, 64  
Brandt-Report, 73  
Brasilien, 70, 78  
Breitbandversorgung, 62  
Breitentest, 69  
Bruchdehnung, 200  
Brush, Charles, 27  
Bundes-Immissionsschutzgesetz, 125  
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 424  
Bürgernetze, 62  
Bürgerwindparks, 62  
Bust, 68  
BWE, 74  
BZEE, 68  
Cambel, Ali B., 38  
Campbell-Diagramm, 160, 271  
Carbonfasern, 208  
Carter, Jay, 46  
CCS-Technologie, 71  
CFD, 152  
CFK-Laminat, 199  
Change Management, 70  
charakteristischer Wert, 474  
Chile, 78  
China, 20, 68  
China Development Bank, 76  
Cloud Generating, 60  
CO<sub>2</sub>-Emissionen, 60  
CO<sub>2</sub>-Gehalt, 64  
la Cour, Poul, 28  
CREIA, 74  
Cubitt, William, 28  
Dämpfungen, 191  
Dämpfungskonstante, 360  
Dänemark, 67  
dänische Regierung, 62  
dänisches Konzept, 288  
Darrieus-Rotor, 154  
Dauer der erhöhten Vergütung, 109  
Deckschichtbeulung, 196  
Deckschichtknittern, 196  
Deformationen, 184  
Deformationsvektor, 185  
Dehnsteifigkeit, 182  
Dekarbonisierung, 60  
demografischer Wandel, 65  
Detailkategorien, 275  
Deutschland, 69

- Deviationsmoment, 183
- Dezentralisierung, 60
- Dezentralität, 63
- Diffraktion, 450
- Diffusor, 152
- Dioden, 326
- Direct-Drive, 245
- direktgetriebene Windkraftanlage, 241
- Diversität, 70
- DLR, 69, 75
- doppelt gespeiste Asynchronmaschine, 237
- doppelte Lagerung, 228
- dq-Koordinaten, 340
- dq-Koordinatensystem, 334
- Drag, 140
- Drallverlust, 145
- Drehfeld, 310, 317
- Drehfeldleistung, 304, 313, 319
- Drehmoment, 300, 314
- Drehmoment-Drehzahl-Diagramm, 306
- Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien, 316
- Drehoperator, 335
- Drehschwingungssimulationsprogramm, 257
- Drehspannung, 290
- Drehspannungssystem, 310, 317
- Drehstrom/Gleichstrom-Umrichter, 324
- Drehstromsystem, 324
- Drehstromwicklung, 310, 317, 318
- Drehzahl, 333, 337
- Drehzahl-Moment-Kennlinien, 307
- Drehzahlregelung, 338
  - doppeltgespeiste Asynchronmaschine, 315
- Drehzahlsteuerung, 323
  - Strukturbild, 309
- drehzahlvariable Generatoren, 323, 332
- dreidimensionale Strömungssimulation, 152
- Dreieckschaltung, 297
- Dreipunktlagerung, 228, 230
- Dreistufenumrichter, 324, 331
- DRESP, 257
- Drosselspule, 326
- due diligence, 66
- Durchbiegungen, 190
- Durchfahren einer Netzunterspannung, 343
- DWIA, 74
- Dynamic Stall, 158
- dynamische Netzstützung, 395
- dynamischer Betrieb, 334
- dynamisches Ersatzschaltbild, 337
- Eigenform, 195
- Eigenfrequenz, 193, 271
- Eigengewicht, 188
- Eigenkapital, 66
- Eigenkapitalgeber, 64
- Eigenlast, 437
- Eigenspannungen, 277
- Einblattrotor, 36
- Einflügler, 69
- einpoliges Ersatzschaltbild, 397
- Einspeisegesetz, 63, 69
- Einzelschichten, 205
- Eisbildung, 470
- Eisenkern, 292
- Eisenverluste, 301
- Eisenwiderstand, 301, 312
- Eisgleiter, 140
- El Dorado, 69
- El-Ashry, Mohamed, 73
- elastisches Zentrum, 181
- Elastizitätsgesetz, 184
- Elektrifizierung, 60
- elektrische Netze, 384
- Emergenz, 60
- Endenergieversorgung, 59
- endliche Blattzahl, 144
- Enercon, 66
- energieäquivalenter Mittelwert, 113
- Energiedebatte, 54
- Energieeffizienz, 67
- Energiemärkte, 57
- Energiesektor, 63
- Energiesparen, 67
- Energiespeicherung, 419
- Energietransport, 59
- Energieversorger, 57, 64
- Energieversorgungsnetze, 384
- Energiewirtschaft, 57
- Entkopplungsschutz, 414
- ENTSO-E, 62
- Entwicklungsbanken, 64
- Entwicklungshilfe, 68
- Entwurfsregeln für Blätter, 150
- ÉOLE, 42, 43, 154

- EP-Harze, 202  
 Erdbebenlast, 437  
 Erdgas, 57  
 EREC, 70  
 Ermüdung, 478  
 Ermüdungsbeanspruchung, 265  
 Ermüdungsverhalten, 279  
 erneuerbare Energien, 67  
 Erneuerbare-Energien-Gesetz, 69, 389  
 Erregerfrequenzen, 271  
 Ersatzschaltbild  
 – Asynchronmaschine, 301  
 – mit Schleifringläufer, 311  
 – einpoliges, 397  
 – Synchronmaschine, 318  
 – Transformator, 294  
 Erzeugerzählpeilsystem, 396  
 Erzeugung, 58  
 EU-Binnenmarkt, 58  
 EU-Kommission, 59, 70  
 EUGH, 64  
 europäische Konferenzen, 70  
 Europäische Union, 70  
 europäische WEA, 43  
 Europäische Wirtschaftsgemeinschaft, 70  
 Europäischer Windatlas, 87  
 Europäisches Parlament, 71  
 EWEA, 51, 62, 73  
 Explosionslast, 437  
 exponentielles Windprofil, 85  
 Extremlasten, 254  
  
 Fahnenstellung, 226  
 Fasern, 200  
 Faserschichten, 206  
 Faserverbundwerkstoffe, 199  
 Faservolumengehalt, 205  
 FCKW, 65  
 Fehlerquelle, 253  
 feldorientierte Regelung, 333  
 Feldschwächbereich, 337  
 Feldstrom, 317  
 FEM-Beulberechnungen, 197  
 FEM-Schwingungsberechnungen, 198  
 Fernbedienung und -überwachung, 379  
 Ferritslev, 29  
 Fertigungstoleranz, 210  
  
 Festpreissystem, 64  
 Festsattelbremse, 235  
 Finanzkrise, 70  
 Finanzmarkt, 64  
 Finite-Elemente-Berechnungen, 196  
 Finite-Elemente-Methode, 254, 274  
 Fixpreissysteme, 67  
 Flächenschwerpunkt, 180  
 Flächenträgheitsmoment, 183  
 Flüssigkeitsdruck, 437  
 Flachgründung, 280  
 Flexpin-Lagerung, 233  
 Flügel, 66  
 flussbildender Strom, 333  
 Flussregelung, 338  
 Fonds, 64  
 Fördergesellschaft Windenergie, 62, 74  
 Förderinstitute, 64  
 Fördertatbestände, 64  
 Forschungsplattformen, 436  
 Forschungsprogramme, 70  
 Fremdkapitalgeber, 64  
 Frequenzhaltung, 391  
 Frequenzumrichter, 323  
 frequenzvariable Drehspannungen, 324  
 Fukushima, 74  
 Füllstoffe, 203  
 Fundamente, 426  
 Fundamenteinbauteil (FET), 282  
  
 Gain-Scheduling, 367  
 GE, 66  
 Gebietsausweisungen, 115  
 Gebrauchstauglichkeit, 479  
 Gedser, 30, 39  
 Gelege, 201  
 gemeinwirtschaftliches Gut, 62  
 Genehmigungsverfahren, 125  
 Generationenvertrag, 65  
 Generator, 66, 237  
 Generator-Umrichtersystem, 361, 363, 369  
 Generatorbetrieb, 315  
 Generatorkupplung, 361  
 generatorseitiger Teilumrichter, 324, 332  
 geostrategische Umweltgefährdung, 65  
 geostrophischer Wind, 84  
 Germanischer Lloyd, 68

- Getriebe, 66
- Getriebeübersetzung, 360
- Gewebe, 201
- Gewichtsanteil, 205
- Gewichtsschwerpunkt, 181
- GFK-Laminat, 199
- Gieren, 25
- Giermechanismus, 22
- Gierwinkelregelung, 366
- GL GarradHassan, 68
- Glasfasern, 200
- Gleichrichter, 369
- Gleichspannung, 324
- Gleichstrom/Drehstrom-Umrichter, 324
- Global Link, 60
- Global Wind Day, 73
- Global Wind Energy Outlook, 75
- globales Windsystem, 83
- Globalisierung, 60
- Goldwind, 66
- Good Governance, 65
- Grandpa's Knob, 33
- Greenpeace, 75
- Großbritannien, 68
- GROWIAN, 42, 69
- Grundlast, 389
- GWEC, 70, 73
  
- H-Darrieus-Rotor, 154
- Halbtaucher, 433
- Handel mit Strom, 58
- Handlaminieren, 209
- Harze, 202
- häufiger Wert, 474
- Häufigkeitsverteilung, 104
- Hauptbelastungsrichtung, 205
- Hauptinduktivität, 294
- Hauptkoordinatensystem, 183
- Hauptträgheitsmoment, 183
- Hauptwindrichtung, 83
- Havinga, 29
- Heidelberg-Motor, 154
- Heidelberg-WEA, 41
- Heylandkreis, 302
- HGÜ, 59, 418
- Hindernisse, 89
- Hintergrundgeräusche, 113
  
- Hochspannungsgleichstromübertragung, 418
- Höhenexponent, 85
- Höhenlinien, 89
- Höhenprofil, 84
- Holme, 207
- Honnef, Hermann, 31
- horizontale Windmühlen, 21
- Horns Rev, 49
- Husum, 68
- Hütter, Ulrich, 31
- Hybridantriebe, 232
- Hybridbauweise, 245
- Hybridtriebstrang, 246
- hydrodynamische Masse, 453
- hydrodynamischer Wandler, 233
  
- IAEO, 71
- Iberdrola, 69
- ideeller Kurzschlussstrom, 304
- IEA, 39, 51, 64, 71
- IGBT, 324, 330
- IGCT, 324
- Implementierung, 150
- Impulstheorie, 142
- Independent Power Producers, 69
- Indien, 78
- industrielle Fertigung, 66
- Informationsmodell, 382
- Informationstechnologie, 59
- Infrastrukturinvestitionen, 59
- Ingenieurskonstanten, 185
- Injektionsverfahren, 209
- Inselnetze, 61
- International Energy Agency, 71
- International Renewable Energy Agency, 71
- Internationale Energieagentur, 39
- Investition, 63
- Investitionsstandort, 66
- IPCC, 64
- IRENA, 55, 71
- ISET, 62
- Istwert, 333
- IWTA, 74
  
- Jacket, 430
- Jacobs, Marcellus und Joseph, 32
- Jahresenergieertrag, 106

- Jährlichkeitsprinzip, 64  
 Joch, 296  
 John Brown Company, 34
- Kaiser-Wilhelm-Koog, 69  
 Kanada, 77  
 Kapazitätsfaktor, 108  
 Kapitaleinsatz, 63  
 Kenia, 79  
 Keramiklager, 238  
 Kerbfallklassen, 275  
 Kern (Transformator), 296  
 Kernenergie, 54  
 Kieler Auslegungsverfahren, 164  
 Kippmoment, 305, 320  
 Kippschlupf, 305  
 klassische Laminattheorie, 206  
 Klebenähte, 210  
 Klimadebatte, 54  
 Klimaschutzabkommen, 58  
 Kloss'sche Formel, 305, 307  
 Koaxialgetriebe, 232  
 Koerzitivfeldstärke, 321  
 Kohle, 57  
 Kokerwindmühle, 22  
 Kolkbildung, 468  
 Kombinationswert, 474  
 Kommunikationsmodell, 382  
 Kommunikationsprofile, 381  
 Kommunikationsstruktur, 380  
 komplette Blattwinkeleinstellung, 36  
 komplexe Wechselstromrechnung, 291  
 Kondensator, 324  
 Konsolidierungsprozess, 66  
 Konstruktionsfehler, 253  
 Kontrollvolumen, 143  
 konventionelle Brennstoffe, 57  
 Koordinatensystem, 177, 254  
 – rotierendes, 335  
 – rotorflussorientiertes, 335  
 Korrosion, 471  
 Kräfteentlastung, 279  
 Kraftfluss, 274  
 Kraftwerke, 63  
 Kragträger, 190  
 Kruse, Henning, 70  
 Kühlung, 238
- Kulturen, 70  
 Kupplung, 234  
 Kurzschlussersatzschaltbild, 295  
 Kurzschlussfestigkeit, 411, 413  
 Kurzschlussleistung, 399  
 Kurzschlussspannung, 295  
 Kurzschlussstrom, 304, 399, 411  
 Kurzschlusswicklung, 299
- L-Filter, 341, 342  
 Lagerweij, Henk, 46  
 Lamineigenschaften, 204  
 Laminierharze, 202  
 Laminierverfahren, 209  
 Lanchester, 29  
 Lanchester-Betz-Koeffizient, 29  
 Länderausschuss für Immissionsschutz, 118  
 Landkarte der Windturbinen, 138  
 ländliche Elektrifizierung, 68  
 Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein,  
 67  
 Lastenrechnung, 254  
 Lastergebnis, 267  
 Lastkollektiv, 206, 255  
 Lastrechnung, 269  
 Lastspielwechsel, 264  
 Laststufe, 255  
 Lastverschiebung, 419  
 Lastverweildauer, 255  
 Läuferwiderstand, 301, 311  
 LCL-Filter, 341, 342  
 Leeläufer, 44  
 Leeläuferanlage, 220  
 Leerlaufstrom, 304  
 Lehr'sches Dämpfungsmaß, 191  
 Leistung  
 – gesamte aus dem Netz aufgenommene, 315  
 – mechanische, 313, 319  
 – über den Stromrichter eingespeiste, 313  
 – von Umrichter in Rotor eingespeiste, 313  
 Leistungs-Drehzahl-Diagramm, 288  
 Leistungsbeiwert, 104, 138, 358  
 Leistungsfaktor, 370  
 Leistungsflussdiagramm, 315  
 Leistungsfrequenzregelung, 391  
 Leistungshalbleiter, 324, 326, 330  
 Leistungsoptimum, 368

- Leistungsreduzierung, 376
- Leistungsverzweigung, 231
- Leitebene, 356
- Leitenergie, 63
- Lift, 140
- Linz, Christine, 73
- Lobbygruppen, 71
- local content, 65
- logarithmisches Dekrement, 191
- logarithmisches Windprofil, 85
- lokale Optimierung, 145
- Luft-Luft-Wärmetauscher, 238
- Luft-Wasser-Wärmetauscher, 238
- Luftfahrthindernisse, 132
- Luftspalt, 299
- Luftspaltstabilität, 238
- Lykkegaard, 29
  
- magnetische Erregung, 321
- magnetische Schenkligkeit, 321
- Management- oder Planungsebene, 356
- mariner Bewuchs, 470
- Markov-Matrizen, 256, 268
- Marokko, 79
- Maschennetze, 387
- Maschinenmodell, 334
- Massenträgheit, 254
- Massenträgheitsmoment, 360
- Materialdämpfung, 191
- Matrix, 202
- Matten, 201
- Mead, Thomas, 26
- mechanische Leistung, 305
- Meikle, Andrew, 26
- Mengenregulierung, 64
- Mensch-Maschine-Schnittstelle, 380
- Mesoskala-Modelle, 94
- Mexiko, 78
- Middelgrunden, 49
- Mikrocontroller, 327
- Milborrow, David, 49
- Minutenreserve, 392
- Mittellast, 389
- Mittelspannungseinfluss, 256
- MKS-Software, 257
- MOD, 42
- Modulationsgrad, 327
  
- Moment, 305, 317, 320, 333
- Moment der Maschine, 337
- momentenbildender Strom, 333
- Momentenlager, 230
- Mongolei, 68
- Monopile, 428
- Monopole, 58
- Motorbetrieb, 315
- multinationale Konzerne, 66
- Multiple Streamtube, 156
  
- (n-1)-Kriterium, 398
- Nabe, 208
- Nachgiebigkeitsmatrix, 185
- Nachlauf, 101
- NASA, 39
- natürliche Umgebungsturbulenz, 120
- National Renewable Energy Action Plan, 71
- NCEP/NCAR-Daten, 94
- Negativform, 208
- Neobdym-Eisen-Bor, 321
- Netzanschlussbedingungen, 342
- Netzanschlussrichtlinien, 403
- Netzausbau, 416
- Netzbetrieb, 58
- Netzfilter, 341, 344
- Netzflicker, 401
- Netzfrequenz, 323
- Netzimpedanzen, 384
- Netzleitsystem, 416
- Netzqualität, 400
- Netzurückwirkung, 410
- Netzurückwirkungen, 399
- netzseitiger Teilumrichter, 324, 332
- netzseitiger Umrichter, 339
- Netzstützung, 342, 403
- Netzstromregelung, 340
- Netztheorie, 206
- Neuseeland, 80
- Nibe, 40, 42
- Nick- und Giermomente, 230
- Nieuhoff, Jan, 20
- NIMBY-Effekt, 62
- Normalkräfte, 188
- Normalspannungen, 185
- Normdichte, 144
- Notifizierung, 69

- NPC-Schaltung, 331  
NREL, Phase II, III, IV Turbinen, 46  
nukleare Risiken, 63  
Null-Raumzeiger, 328  
Nuten, 299, 310  
Nutz- und Verkehrslast, 437
- O'Connor, Eddy, 59  
Oberschale, 208  
Oberschwingungen, 400  
Oettinger, Günther, 71  
Offshore-Konverterstation, 426  
Offshore-Markt, 63  
Offshore-Windenergieanlagen, 58  
Ökologie, 58  
Ökonomie, 58  
Ökosystem, 59  
Öl, 57  
Ölpreiskrise, 54  
Onshore-Markt, 63  
OPEC, 57  
Optimalpunkt, 304  
Orografie, 90  
Ortbeton, 277  
Ozonloch, 65
- Palmgren-Miner-Regel, 206  
Parameteranpassung, 366, 367  
partizipatorische Energiepolitik, 62  
Patentamt, 258  
Patentansprüche, 258  
Patente, 257  
peak oil, 74  
Pendelnabe, 44  
periodischer Schattenwurf, 118  
permanenterregte Synchronmaschine, 321  
permanenterregter Synchrongenerator, 237  
Permeabilität, 465  
Phasenregelschleife, 363  
Phasenverschiebung, 292  
Phasorenrechnung, 291  
PI-Flussregler, 333  
PI-Regler, 333, 334  
Pitch-Antrieb, 345, 367  
Pitch-System, 212  
Pitch-Winkel, 213, 289  
planerische Sicherheit, 67
- Planetenstufe, 231  
Planungsgrundlagen, 424  
Pol, 310  
Polare, 140  
Politikberatung, 73  
politische Risiken, 63  
Polpaar, 299  
Polpaarzahlen, 299  
Polradspannung, 318  
Polradwinkel, 319  
Portfolio, 64  
Positivform, 208  
Prepregs, 201  
Primärregelung, 392  
Primärwicklung, 292  
Profil, Standardbedingungen, 86  
Profilwiderstand, 148  
programmierbarer Schaltkreis, 327  
Proinfa, 70  
Projektfinanzierung, 64  
PTC, 68  
Puck, 204  
Pulsationen des Drehstroms, 326  
Pulsfrequenz, 330  
Pulsperiodendauer, 330  
Pulsrichter, 324  
Pulsweitenmodulation, 326, 333  
Pumpspeicherkraftwerk, 419  
Punktschallquelle, 114  
Putnam, Palmer C., 33
- Qualitätsmängel, 253  
quasi-ständiger Wert, 474  
Quelllautstärke, 113  
Querkräfte, 189  
Querschnittswerte, 179
- Racing Aeolus, 162, 166  
Rating-Instrumente, 66  
Rauigkeitsklassen, 87  
Rauigkeitslänge, 84  
– Standardwert, 86  
Raumzeiger, 327, 334, 361, 362  
Rayleigh-Quotient, 194  
Rayleigh-Verteilung, 105  
realer Schattenwurf, 118  
Reanalysedaten, 94

- Rechte-Hand-Regel, 178
- Rechtsinstrument, 66
- Referenzertrag, 109
- Referenzgeschwindigkeit, 114
- Reflektion, 451
- Refraktion, 450
- Regelebene, 356
- Regelrichtungen, 365
- Regelenergie, 389, 392
- Regelleistung, 388
- Regelsysteme, 365
- Regelung, 323, 332
  - der Zwischenkreisspannung, 340
  - zweikanalige, 333
- Regelungsstruktur
  - doppeltgespeiste Asynchronmaschine, 338
  - Synchronmaschine, 338
- Regelungssystem, 343
- regulatorische Rahmenbedingungen, 66
- Reichsarbeitsgemeinschaft Windkraft, 31
- Remanenzinduktionen, 321
- REN 21, 73
- Reparaturkosten, 252
- Repowering, 62
- Resonanz, 271
- Ringnetze, 387
- Risikoabschätzung, 63
- RIX-Index, 90
- Roadmap 2050, 71
- Rohstoffressourcen, 63
- Romani, L., 34
- rotatorischer Anteil, 336
- Rotorarretierung, 226
- Rotorblatt, 175
- Rotordrehvorrichtung, 227
- Rotorflussverkettung, 333
- Rotorlager, 228
- Rotorleistungsbeiwert, 359
- Rotormoment, 360
- Rotorspannung, 311
- Rotorstrom, 311, 312, 318
- Rotorwelle, 227
- Rovings, 201
  
- Samarium-Kobalt, 321
- Sandwichbauteil, 187
- Sandwichmaterialien, 203
  
- Sättigung, 292
- Satz von Kutta-Joukowski, 144
- Sauberkeitsschicht, 281
- Saugkreise, 342
- Savonius-Rotor, 154
- SCADA, 379
- Schäden, 252
- Schallausbreitung, 115
- Schalleistungspegel, 111
- Schallreduktion, 116
- Schaltanlagen, 413
- Schaltzustände, 327, 328
- Schaumstoffe, 203
- Scheer, Hermann, 73
- Scheinleistung, 292
- Schenkelpolmaschine, 321
- Schleifring, 238, 309, 317
- Schleswig-Holstein, 67
- Schlupf, 300
- Schlupfgerade, 304
- Schlüsselernergie, 59
- Schmetterlingsform, 119
- Schnee- und Eislast, 437
- Schnellhalt, 376, 377
- Schnellläufer, 36
- Schnelllaufzahl, 138, 358
- Schnittgröße, 267
- Schnittkräfte, 178
- Schnittlasten, 188
- Schnittmomente, 179
- Schräganströmung, 220
- Schrumpfung, 202
- Schubbeiwert, 102
- Schubkraft, 143
- Schubmittelpunkt, 181
- Schubspannungen, 186
- Schuhmacher, E. F., 38
- Schütze, 345
- Schutzeinrichtungen, 414
- Schutzrechte, 257
- Schwerkraftgründung, 430
- Schwerpunkte, 179
- Schwimmsattelbremse, 236
- Schwingungen, 191
- Schwingungsamplitude, 193
- Schwingungsperiode, 193
- Schwingungsresonanzen, 193

- Seegangsspektren, 456  
 Seekabel, 435  
 Segelboot, 140  
 Sekundärregelung, 392  
 Sekundärwicklung, 292  
 seltene Erden, 321  
 Sensor-Aktor-Ebene, 355  
 Sherwin, Bob, 47  
 Shoaling, 450  
 Sicherheitssysteme, 376  
 Sicherung, 345  
 Siemens, 66  
 Simulationen, 267  
 Single Streamtube, 155  
 Sintermetallbeläge, 236  
 Sinus-Dreieck-Modulation, 326  
 Slamming, 455  
 Smart Grid, 59, 416  
 Smart Home, 59  
 Smart Metering, 59  
 Smeaton, John, 24  
 Smidth, F. L., 30  
 Solarenergie, 63  
 solidity, 156  
 sozialer Saldo, 65  
 Spanien, 69  
 Spannung im Zwischenkreis, 332  
 Spannungen, 184  
 Spannungs-Blindleistungsregelung, 394  
 Spannungsänderung, 402, 407  
 Spannungsband, 407  
 Spannungsberechnungen, 196  
 Spannungsebene, 385  
 Spannungsgleichungen, 300, 311, 336  
 Spannungshaltung, 393, 395  
 Spannungsqualität, 400  
 Spannungsregelung, 370  
 Spannungsstützung, 370  
 Spannungssteuerungskennlinie, Rotor, 316  
 Spannungsübersetzung, 293  
 Spannungsvektor, 185  
 Spar Buoy, 433  
 Speicherkapazität, 58  
 Spezifikation, 254  
 Spitzenlast, 389  
 SRU, 75  
 St.-Florians-Prinzip, 62  
 Staatsschuldenkrise, 70  
 Stabilitätsnachweis, 270  
 Stabilitätsverlust, 195  
 Stahlplatten, 276  
 Stall-Effekt, 212  
 Stallregelung, 36  
 Ständer, 318  
 Ständer- und Rotorstreuinduktivität, 301, 311  
 ständerbezogene Hauptinduktivität, 301, 311  
 Ständerflussverkettung, 306, 322  
 Ständerkreisfrequenz, 311  
 Ständerleistung, 304  
 Ständerspannung, 311, 333  
 Ständerspannungsgleichung, 318  
 Ständerstrom, 311, 333  
 Ständerwiderstand, 301, 311  
 Ständerwirkleistung, 319  
 Standortvielfalt, 69  
 statisch instabil, 306  
 statische Stabilität, 320  
 statorbezogenes System, 336  
 Steifigkeit, 254, 360  
 Steifigkeitsmatrix, 185  
 Stellaktivität, 368  
 Stellebene, 356  
 Sternschaltung, 297  
 steuerbare Leistungshalbleiter, 326  
 Steuerebene, 356  
 Steuergesetz, drehzahlvariabler Betrieb, 307  
 Steuerung, 373  
 Stirnradstufe, 232  
 Stoßkurzschlussstrom, 399, 412  
 Strömungen, 440  
 Strömungskraft, 452  
 Strahlennetze, 386  
 Streamtube, 155  
 Streuinduktivität, 293, 294  
 Stringer, 208  
 Strombedarfsdeckung, 65  
 Stromgestehungskosten, 252  
 Stromnetz, 59  
 Stromnetzbetrieb, 60  
 Stromnetzkonfiguration, 61  
 Stromrichtertransformatoren, 297  
 Stromtransport, 59  
 Strukturantwort, 193  
 Strukturbild der Drehzahlsteuerung, 309

- Strukturbild der Regelung, 333  
Styrol, 202  
Suction-Bucket, 432  
Südafrika, 79  
Südkorea, 79  
Super Grid, 59, 417  
Super-GAU, 74  
Superpositonsprinzip, 186  
Symmetrisches Optimum, 337, 341, 342  
Synchrondrehzahl, 299, 311  
Synchronmaschinen, 317  
Systemdienstleistungen, 394  
Szenarien, 65
- TA Lärm, 115  
TAB, 403  
Tandem-Windturbine, 152  
Tapes, 201  
Technische Richtlinien, 123  
Technischen Anschlussbedingungen, 403  
Technologieplattform Wind, 70  
Teillast, 364  
Teilleistungsumrichter, 289, 309  
Teilsicherheitsbeiwerte, 269  
TELLUS, 46  
Temperatur, 437  
Temperung, 210  
Tension Leg Plattform, 433  
Terna, 69  
Terranisierung, 59  
The Limits to Growth, 34  
THERMIE, 44  
Tiefgründung, 280  
Tip Speed Ratio, 358  
Topfzeiten, 203  
Torsionsmoment, 189, 278  
Trägheitskraft, 452  
Tragfähigkeit, 478  
Tragfähigkeitseigenschaften, 277  
Trägheitsmoment, 179  
Tragstruktur, 426  
Tränkungsverhalten, 210  
Transformator, 344  
transformatorischer Anteil, 337  
Transition Piece, 428  
Triebstrang, 247  
Triebstrangdynamik, 257  
Triebstrangkonzeppte, 239  
Triebstrangmatrix, 251  
Tripile, 431  
Tripods, 431  
Trommelläufer, 321  
Tunesien, 79  
Tuno Knob, 49  
Turbomaschine, 321  
Turbulenz, 120  
Turbulenzintensität, 120  
Türkei, 79  
Türme, 66  
Turmsektionen, 276  
Turn-Antrieb, 227  
Typenvielfalt, 69
- Überkapazitäten, 66  
Überlagerungsgetriebe, 233  
Überlast, 365  
Übermodulation, 327  
UD Open Air Facility, 46  
UD-Schicht, 204  
Umrichter in Mehrstufenschaltung, 330  
Umweltverträglichkeitsprüfung, 126  
United Nations Convention on the Law of the  
Sea, 59  
Uniwecs, 46  
unterbrechungsfreier Betrieb, 342  
unterlagerte Stromregelung, 338  
Unterlast, 364  
Unterschale, 208  
Up-Front-Kosten, 65  
UP-Harze, 202  
Up-Scaling, 69  
Uran, 57  
UVP, 126
- Vadot, Louis, 34  
Vakuum-Injektionsverfahren, 209  
Van der Hoeven, Maria, 71  
variable Frequenz des Generators, 323  
variabler Drehmomentwandler, 251  
VDMA, 74  
VE-Harze, 202  
Ventile, 327  
Verbraucherzählpeilsystem, 291, 396  
Verdopplung der Lautstärke, 111

- vereinfachtes Ersatzschaltbild, 295  
 vereinfachtes Steuergesetz, 322  
 Verfügbarkeit, 397  
 Verlustleistung, 305, 313  
 Versorgungsqualität, 394, 398  
 Versorgungszuverlässigkeit, 386  
 Vertikalachsenrotor, 69  
 Vertikalanlagen, 153  
 Verträglichkeitspegel, 399  
 Verwaltungskultur, 66  
 Verwindung (Twist), 149  
 Vestas, 66  
 Vindeby, 49  
 Viskosität, 210  
 Vitruvius, 20  
 Volksaktien, 62  
 Volkswirtschaft, 65  
 Völligkeit, 156  
 Volllast, 365  
 Volllaststunden, 108  
 Vollleistungsumrichter, 309  
 Vollpolläufer, 321  
 Vollpolläufer-SM, 361  
 Vollpolmaschine, 321  
 Vollumrichter, 289  
 Vorfabrikation, 278  
 vorgespannte Bolzen, 274  
 Vorrangflächen, 67  
 Vorspannung, 437  
  
 WAsP, 92  
 Wasserkraft, 65  
 Wassermantelkühlung, 238  
 Wasserwechselzone, 432  
 Wechselrichter, 369  
 WEGA, 43  
 Weibull-Verteilung, 105  
 Wellen, 442  
 Wellenenergie, 448  
 Wellenfrequenz, 446  
 Wellengeschwindigkeit, 446  
 Wellengruppengeschwindigkeit, 447  
 Wellenlänge, 446  
 Wellensteilheit, 450  
 Weltmarktführer, 69  
 Wertschöpfungskette, 66  
 Wicklung, 292, 310  
  
 Widerstand, 140  
 Widerstandskräfte, 140, 188  
 Widerstandsseite, 269  
 Wind Directions, 74  
 windangetriebene Fahrzeuge, 162  
 Windatlas, 98  
 Windenergienutzung, 63  
 Windfahne, 220  
 Windfarmer, 92  
 Windforce 10, 75  
 Windgeschwindigkeitsmessung, 345  
 Windkraftanlagen, 20  
 Windlast, 437  
 Windmapping, 95  
 Windmesse, 68  
 Windmühlen, 20  
 Windpark, 101  
 – Planung, 122  
 Windparksteuer- und -regelsysteme, 377, 378  
 Windpioniere, 68  
 Windpotenzialbestimmung, 67  
 WindPRO, 92  
 Windprofil, 85  
 Windressourcen, 83  
 Windrichtungsmessung, 345  
 Windrichtungsnachführung, 25, 219  
 Windrose, 23  
 Windungszahlverhältnis, 293  
 Windverhältnisse, 66  
 Windwirtschaft, 67  
 Wippmühle, 23  
 Wirbelmodelle, 157  
 Wirkanteil, 312  
 Wirkanteil des Stroms, 304  
 Wirkleistung, 292  
 Wirkleistungsfluss, 393  
 Wirkleistungsreduzierung, 369  
 Wirkleistungsregelung, 368, 369  
 Wirtschaftskrise, 70  
 Wissensmanagement, 73  
 Wobben, Alois, 46  
 Wölbkrafttorsion, 181  
 Wölbmomente, 190  
 Wölbung (Camber), 159  
 WTO, 66  
 WTS-3, 42  
 WTS-4, 42

- WTS-75, 42
- Yaw-Antriebe, 221
- Yaw-Bremsen, 220
- Yaw-System, 219
- Zählpeilsystem, 396
- Zeigerdiagramm
  - Asynchronmaschine, 301, 313
  - Synchronmaschine, 318
  - Transformator, 294
- Zeitreihe, 256
- Zeitreihen, Windgeschwindigkeit, 100
- Zentrifugalkräfte, 188, 189
- Zertifizierung, 254
- Zervos, Arthouros, 70
- Zhukowsky, 29
- Zickzackschaltung, 297
- Zirkulation, 144
- Zusatzstoffe, 202, 203
- Zuschlagstoffe, 203
- Zweistufenumrichter, 324
- Zwischenkreis, 324, 339
- Zwischenkreisspannung, 369