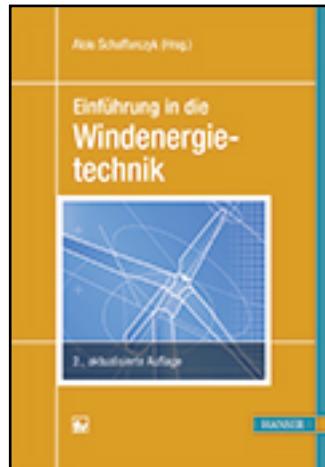


HANSER



Leseprobe

Einführung in die Windenergietechnik

Herausgegeben von Alois P. Schaffarczyk

ISBN (Buch): 978-3-446-44790-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-44982-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44790-5>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Mit dem Probebetrieb 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 Windenergi 技术 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 Triebstrangkonzepte sowie Turm und Gründung vor. Im weitesten Sinne elektrische Komponenten wie Generator, Umrichter, Regelungs- und Betriebsführungs-konzepte schließen sich an. Einer Beschreibung, wie sehr große Anteile dieser fluktuieren-den Energieform erfolgreich in das bestehende elektrische Versorgungsnetz integriert werden, kommt im Zuge der in Deutschland beschlossenen „Energiewende“ eine besondere Beach-tung 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 Ingenieurs. 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 Windenergi 技术 at 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 Beurkens.

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

Vorwort	5
1 Die Geschichte der Windenergie (Jos Beurskens)	19
1.1 Einleitung	19
1.2 Die ersten Windmühlen: 600–1890	20
1.3 Stromerzeugung durch Windmühlen: Windkraftanlagen 1890–1930	27
1.4 Der erste Innovationszeitraum: 1930–1960	30
1.5 Der zweite Innovationszeitraum und die volle Kommerzialisierung: 1960 bis heute	37
Literatur	52
2 Die internationale Entwicklung der Windenergie (Klaus Rave)	54
2.1 Der Beginn der modernen Energiedebatte	54
2.2 Zur Erneuerung der Energiemärkte	57
2.3 Zur Bedeutung der Stromnetze	59
2.4 Die erneuerte Wertschöpfungskette	63
2.5 Internationale Perspektiven	65
2.6 Der Ausbau in ausgewählten Ländern	68
2.7 Zur Rolle der EU	70
2.8 Internationale Institutionen und Organisationen	71
2.9 <i>Global Wind Energy Outlook 2010 – Der globale Blick in die Zukunft</i>	75
2.10 Aktualisierung auf der Basis von 2015	76
Literatur	81
3 Windressourcen, Standortbewertung, Ökologie (Hermann van Radecke)	83
3.1 Einleitung	83
3.2 Windressourcen	83
3.2.1 Globales Windsystem und Bodenrauigkeit	83
3.2.2 Höhenprofil und Rauigkeitslänge	84
3.2.3 Rauigkeitsklassen	87

3.2.4	Höhenlinien und Hindernisse	89
3.2.5	Windressource mit WAsP, WindPRO, Windfarmer	92
3.2.6	Bestimmung Windpotenzial mit Mesoskala-Modellen und Reanalyse-daten	94
3.2.6.1	Reanalysedaten	94
3.2.6.2	Windmapping	95
3.2.6.3	Windatlas	98
3.2.6.4	Verifizierung und Zeitreihen	99
3.2.6.5	Anwendungsbereiche	100
3.2.7	Wind im Windpark	101
3.2.8	Häufigkeitsverteilung Wind	104
3.2.9	Standortbewertung und Jahresenergieertrag	106
3.2.10	Referenz ertrag 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, Impulszuschlag	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 Genehmigungsverfahren	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	Vertikal anlagen	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	Laminate, Laminateigenschaften	204

5.6 Fertigung von Rotorblättern	207
5.6.1 Strukturteile des Rotorblattes	207
5.6.2 Laminierverfahren für Rotorblätter	209
5.6.3 Zusammenbau des Rotorblattes	210
Literatur	211
6 Der Triebstrang (Sönke Siegfriedsen, Peter Krämer)	212
6.1 Einleitung	212
6.2 Blattwinkelverstellsysteme	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 Triebstrangkonzepte	239
6.5.1 Direktgetrieben – Doppelte Lagerung	240
6.5.2 Direktgetrieben – Momentenlager	243
6.5.3 1-2-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung	245
6.5.4 1-2-Stufengetriebe – Momentenlagerung	246
6.5.5 3-4-Stufengetriebe – Doppelte Lagerung	248
6.5.6 3-4-Stufengetriebe – Dreipunktlagerung	250
6.5.7 3-4-Stufengetriebe – Momentenlagerung	251
6.6 Schäden und Schadensursachen	252
6.7 Auslegung von Triebstrangkomponenten	253
6.8 Schutzrechte in der Windenergie	257
Literatur	263
7 Turm und Gründung (Torsten Faber)	264
7.1 Einleitung	264
7.2 Richtlinien und Normen	266
7.3 Beanspruchung von Türmen	266

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

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

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

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

9 Steuerung und Regelung von Windenergiesystemen

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

10 Netzintegration (Sven Wanser, Nica Kähler).....

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 Netzrückwirkung	410
10.4.4 Überprüfung der Kurzschlussfestigkeit	411
10.5 Netzanbindungen von WEA	412
10.5.1 Schaltanlagen	413
10.5.2 Schutzeinrichtungen	414
10.5.3 Einbindung in das Netzleitsystem	416
10.6 Weitere Entwicklungen in der Netzintegration und Ausblick	416
10.6.1 Netzausbau	416
10.6.2 Lastverschiebung	419
10.6.3 Energiespeicherung	419
Literatur	420

11 Offshore-Windenergie

(Lothar Dannenberg, Christian Keindorf)	422
11.1 Einführung	422
11.1.1 Historie und Entwicklungstrends	422
11.1.2 Unterschiede zwischen Onshore- und Offshore-WEA	423
11.1.3 Planungsgrundlagen für Offshore-Windparks	424
11.1.4 Umweltschutz und Arbeitssicherheit	425
11.2 Wesentliche Komponenten eines Offshore-Windparks	426
11.2.1 Turbinen für OWEA	426
11.2.2 Tragstrukturen für OWEA	427
11.2.2.1 Turm	427
11.2.2.2 Transition Piece	428
11.2.3 Fest verankerte Gründungstrukturen 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 Gründungstrukturen 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 Meterologische 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. Knaptheit, 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 bestimmende 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 CO₂-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 Vorber-

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 ⁽¹⁾	151	-	151	
Insgesamt	2 536	753	3 289	
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 ⁽²⁾	167	-	167	
Insgesamt	141 968	33 606	175 573	
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 ⁽³⁾	6 546	833	7 387	
Insgesamt	134 251	13 805	147 771	
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*)

Lateinamerika & Karibik				
	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 ⁽⁴⁾	250	-	250
	Andere ⁽⁵⁾	285	-	285
	Insgesamt	8 568	3 652	12 220
Nordamerika				
	USA	65 877	8 598	74 471
	Kanada	9 694	1 506	11 200
	Mexiko	2 359	714	3 073
	Insgesamt	77 930	10 818	88 744
Pazifik				
	Australien	3 807	380	4 187
	Neuseeland	623	-	623
	Pazifische Inseln	12	-	12
	Insgesamt	4 442	380	4 822
	Weltweit	369 695	63 013	432 419

(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 Energiemarkte 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 „Kohlepennig“ 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 Energiemarkten 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. CO₂-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 Bundestages 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 ausweillich diverser, über lange Zeiträume durchgeföhrter 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

- α -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

- β -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
- Betreibervielfalt, 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
Blattelementmethode, 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
CO₂-Emissionen, 60
CO₂-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
Diffraction, 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
Entkupplungsschutz, 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
Erzeugerzählpfeilsystem, 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, 88
Hintergrundgeräusche, 113
- Hochspannungsgleichstromübertragung, 418
Höhenexponent, 85
Höhenlinien, 89
Höhenprofil, 84
Holme, 207
Honnenf, 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
 komplett Blattwinkeleinstellung, 36
 komplexe Wechselstromrechnung, 291
 Kondensator, 324
 Konsolidierungsprozess, 66
 Konstruktionsfehler, 253
 Kontrollvolumen, 143
 konventionelle Brennstoffe, 57
 Koordinatenystem, 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
 Laminateigenschaften, 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
Mittelgrundsen, 49
Mikrocontroller, 327
Milborrow, David, 49
Minutenreserve, 392
Mittellast, 389
Mittelpunkteinfluss, 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
Neobdy-Eisen-Bor, 321
Netzanschlussbedingungen, 342
Netzanschlussrichtlinien, 403
Netzausbau, 416
Netzbetrieb, 58
Netzfilter, 341, 344
Netzflicker, 401
Netzfrequenz, 323
Netzimpedanzen, 384
Netzleitsystem, 416
Netzqualität, 400
Netzrückwirkung, 410
Netzrückwirkungen, 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
 Orografia, 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
 Pulsumrichter, 324
 Pulsweitenmodulation, 326, 333
 Pumpspeicherwerk, 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
Regeleinrichtungen, 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
Romaní, 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-Joukovski, 144
Sauberkeitsschicht, 281
Saugkreise, 342
Savonius-Rotor, 154
SCADA, 379
Schäden, 252
Schallausbreitung, 115
Schallleistungspegel, 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
Schlüsselenergie, 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
Smidt, 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
ständerebezogene 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
Strahlnetze, 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
Synchrongedrehzahl, 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
- Triebstrangkonzepte, 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
Verbraucherzählfeilsystem, 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
Vollaststunden, 108
Volleistungsumrichter, 309
Vollpolläufer, 321
Vollpolläufer-SM, 361
Vollpolmaschine, 321
Volumrichter, 289
Vorfabrikation, 278
vorgespannte Bolzen, 274
Vorrangflächen, 67
Vorspannung, 437
- WAsP, 92
Wasserkraft, 65
Wassermantelkühlung, 238
Wasserwechselzone, 432
Wechselrichter, 369
WEKA, 43
Weibull-Verteilung, 105
Wellen, 442
Wellenenergie, 448
Wellenfrequenz, 446
Wellengeschwindigkeit, 446
Wellengruppengeschwindigkeit, 447
Wellenlänge, 446
Wellensteinheit, 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
Zählpfeilsystem, 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