

1

Heißt es Windmühle, Windrad, Windkraftanlage oder Windenergieanlage?

Moderne Anlagen, die die Energie des Windes in elektrische Energie wandeln, heißen korrekt **Windenergieanlagen** (abgekürzt WEA). Parallel dazu werden auch die englischen Begriffe WEC (Wind Energy Converter) oder WTG (Wind Turbine Generator) verwendet.

Windmühlen sind vom Wind angetriebene Anlagen zum Mahlen von Mahlgut, wie beispielsweise von Getreide. Die ersten Windmühlen wurden wahrscheinlich in Mesopotamien ab 1700 v. Chr. eingesetzt (Bild 1.1). Ausgeführt waren diese in Form eines Widerstandsläufers, der über eine vertikale Drehachse einen Mühlstein antreibt. An der Drehachse waren geflochtene Matten befestigt, die dem Wind einen Widerstand entgegensetzten und somit vom Wind „mitgenommen“ wurden. Durch Abschottung einer Rotorhälfte mittels einer Mauer wurde die notwendige Asymmetrie erzeugt, um die Windmühle zur Rotation zu bringen.



Bild 1.1 Nachbau einer persischen Windmühle (© Wikipedia, User: Saupreiß)

In Europa wurden viel später die ersten Windmühlen mit horizontaler Drehachse entwickelt, deren Rotor sich wie bei einem Propeller eines Flugzeugs senkrecht zum Wind dreht. Die älteste Bauform dieser Anlagen ist die Bockwindmühle (Bild 1.2), die im 12. Jahrhundert das erste Mal erwähnt wurde. Von Frankreich und England aus verbreitete sich dieser Anlagentyp über Holland und Deutschland in Nord- und Mitteleuropa. In Südeuropa hingegen setzte sich der Typ der Turmwindmühle durch (Bild 1.3).



Bild 1.2 Bockwindmühle (© Wikipedia, User: indeedous)

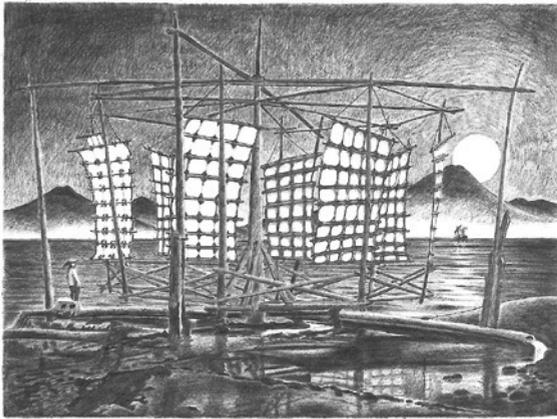
Windräder sind Anlagen zur Wandlung von Windenergie in nichtelektrische Energieformen. Als Wasserpumpen wurden solche Windräder erstmals in China ab etwa 1000 n. Chr. zur Bewässerung von Reisfeldern und zur Salzgewinnung in Meerwassersalinen eingesetzt (Bild 1.4).

Auch diese Windräder waren als Widerstandsläufer ausgeführt, konnten den Wind aber unabhängig von der herrschenden Windrichtung nutzen, da die Segel, die dem Wind den Widerstand entgegensetzten, auf ihrem Rückweg (dem Wind entgegen) wegklappten.

**Bild 1.3**

Turmwindmühle

(© Wikipedia, User: Harald Weber)

**Bild 1.4** Chinesisches Windrad (Zeichnung) (© Wikipedia, User: Carl von Canstein)

In Holland wurden im 15. Jahrhundert die Bockwindmühlen so modifiziert, dass diese Anlagen zum Antrieb von Pumpen verwendet werden konnten, um Landgewinnung durch Entwässerung der Polder zu ermöglichen. Ergebnis war die Wippmühle, die eigentlich Wipprad heißen müsste und die auch in Ost- und Nordfriesland zur Trockenlegung der Moorflächen Anwendung fand (Bild 1.5). Mit der weiterentwickelten Holländerwindmühle im 17. und 18. Jahrhundert erlebte die Windenergienutzung eine Blütezeit. Diese Anlagen wurden zu Zehntausenden

sowohl als Windrad (vornehmlich in Holland und Friesland) als auch als Windmühle genutzt.



Bild 1.5
Wippmühle (Kokerwindrad) mit Schöpfrad
(© Wikipedia, User: Rasbak)

Ein weiterer wichtiger historischer Anlagentyp des Windrades ist das amerikanische Windrad, das Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde und hauptsächlich für die Trink- und Tränkwasserversorgung sowie für die Wasserversorgung der frühen Dampflokomotiven eingesetzt wurde (Bild 1.6). Charakteristisch für diesen Anlagentyp ist die Flügelrosette aus vielen Blehschaufeln mit einem Durchmesser von 3 – 5 Metern.

Im 19. Jahrhundert begannen erst Dampfmaschinen und dann Verbrennungsmotoren Windmühlen und Windräder abzulösen. Parallel dazu wurden nach dem Ersten Weltkrieg wesentliche technisch-wissenschaftliche Arbeiten zu den theoretischen Grundlagen durchgeführt, wie z.B. von Physikern wie Albert Betz, Poul laCour, Johannes Juul und Ulrich W. Hütter. Diese Erkenntnisse flossen kurz vor und insbesondere nach dem Zweiten Weltkrieg in den Bau der ersten **Windkraftanlagen** ein. Eine besonders wegweisende Anlage war die 1957 von Johannes Juul errichtete Gedser-Anlage in Dänemark, die einen Asynchrongenerator verwendete und erstmals eine Stallregelung beinhaltete (Bild 1.7).



Bild 1.6
Amerikanisches Windrad
(© Wikipedia, User: Vysotsky)



Bild 1.7
Gedser-Windkraftanlage (© Heiner H. Dörner)

Ähnlich wegweisend war die 1958 von Ulrich W. Hütter errichtete Windkraftanlage W34, die einen Synchrongenerator verwendete und einen zweiflügligen Rotor hatte (Bild 1.8). Besonders innovativ waren die aus Glasfaser gefertigten Rotorblätter und die Rotorblattwinkelregulierung über eine hydraulische Verstelleinrichtung.



Bild 1.8 W34 Windkraftanlage (© Heiner H. Dörner)

1978 beschloss das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) in Deutschland den Bau der weltweit größten Windkraftanlage Growian mit 100 Metern Turmhöhe und 100 Metern Rotordurchmesser (Bild 1.9). Nicht zuletzt die Auslegung als Zweiblattrotor, der als Leeläufer auf der windabgewandten Seite des Turms angebracht war, führte zu nicht beherrschbaren Lasten und Materialproblemen. Die Anlage wurde weitestgehend ein Misserfolg. Allerdings wurden etliche Lehren aus den begangenen konzeptionellen Fehlern gezogen.

Gute Übersichten über die historische Entwicklung der Windausnutzung finden Sie beispielsweise in [1.1, 1.2, 1.3] sowie [3.2] und [3.3].

Moderne **Windenergieanlagen** (Beispiele: Bild 1.10 , Bild 1.11 und Bild 1.12) haben die Versuchsanlage Growian in ihren Parametern weit übertroffen, werden in großer Stückzahl produziert und ausschließlich zur elektrischen Stromerzeugung eingesetzt.



Bild 1.9
Versuchsanlage Growian
(© Wikipedia, User: Thyge Weller)



Bild 1.10
Enercon E-160 EP5 (© ENERCON GmbH)

**Bild 1.11**

Vestas V-150 (© Wikipedia, User: Vinaceus)

**Bild 1.12**

Nordex N-149 (© Nordex/Acciona SE)

Heute sind Windenergieanlagen fester Bestandteil der elektrischen Energieversorgung. Ein wesentlicher Treiber hierfür waren in Deutschland das am 29. März 2000 in Kraft getretene Gesetz zum Ausbau der erneuerbaren Energien (EEG) [2.8] und dessen beschlossene Neuregelungen (z. B. [2.9]). Seitdem hat sich die installierte Windenergieanlagenleistung nahezu verzehnfacht [2.1] (Bild 1.13).

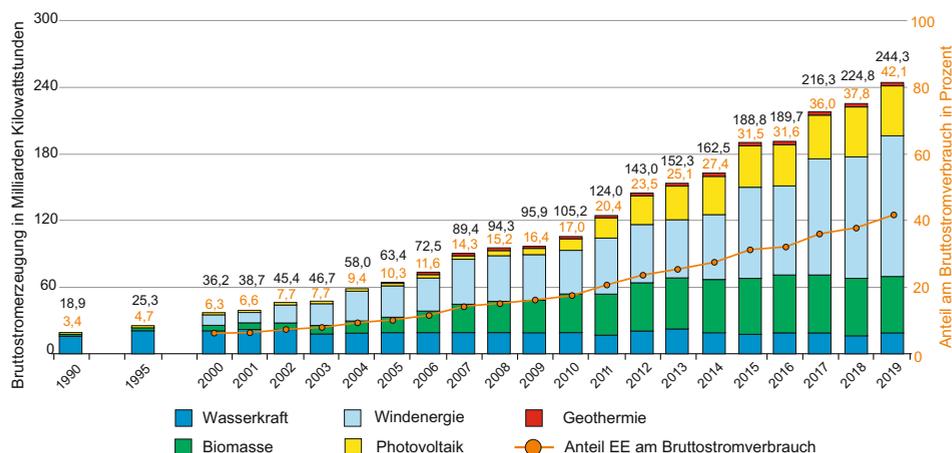


Bild 1.13 Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (in Anlehnung an <https://www.umweltbundesamt.de/bild/entwicklung-der-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-0>)

Für 2019 weist das deutsche Umweltamt den Anteil der Stromerzeugung in Deutschland aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch mit 42,1 % aus. Darüber hinaus löste die Windenergie erstmals die Braunkohle als wichtigsten Energieträger im deutschen Strommix ab: Mit 126 Milliarden Kilowattstunden (kWh) wurde durch Windenergie so viel Strom erzeugt wie durch keinen anderen Energieträger in Deutschland. Parallel dazu stieg die Anzahl der Windenergieanlagen stetig an. So waren Ende 2020 fast 30 000 Windenergieanlagen an Land aufgestellt [2.2] (Bild 1.14). Dazu kommen 1269 Offshore-Windenergieanlagen in der Nordsee und 232 Anlagen in der Ostsee (Stand: Juni 2020).

Die durchschnittliche Anlagenkonfiguration für das Jahr 2020 liegt bei etwa 3,3 MW Nennleistung, einem Rotordurchmesser von 121 Metern und einer durchschnittlichen Nabenhöhe von 137 Metern [2.2].

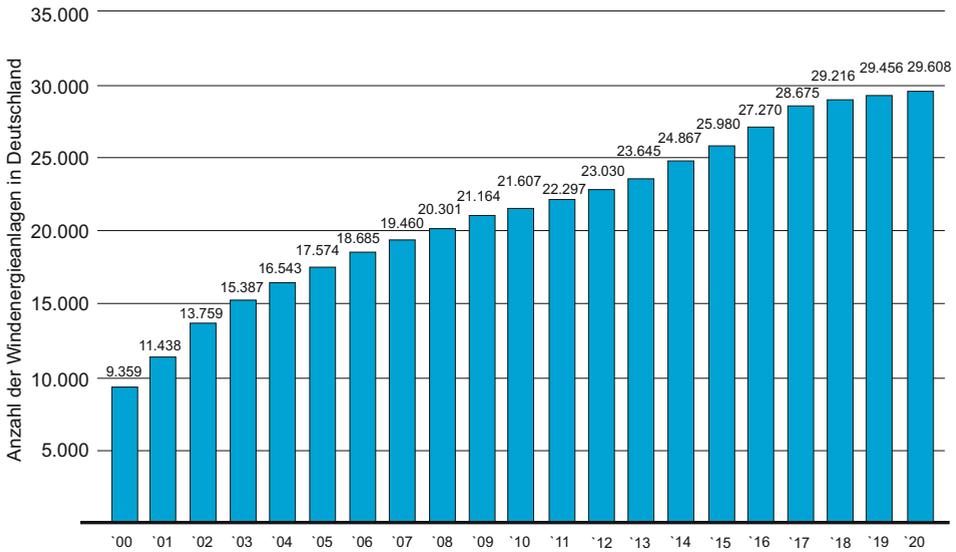


Bild 1.14 Anzahl der Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland (in Anlehnung an <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland>)

Obwohl der Zubau von erneuerbaren Erzeugereinheiten nach dem Systemwechsel innerhalb des EEG vom Modell der Einspeisevergütungen hin zum Ausschreibungsverfahren im Jahr 2017 für Neuanlagen nicht mehr so hoch ausfällt wie in den vergangenen Jahren, ist dennoch mit einem weiterem Ausbau der Windenergie auszugehen. Aufgrund der Elektrifizierung des Mobilitätssektors wird weitere elektrische Energie beispielsweise für Elektroautos benötigt. Auch die Verwendung von synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff, die insbesondere mit Offshore-Windenergieanlagen erzeugt werden könnten, ist eine vielversprechende Option für die Zukunft.

2

Was sind die wesentlichen Bestandteile einer Windenergieanlage?

Bei Windenergieanlagen hat sich der sogenannte Auftriebsläufer mit horizontaler Drehachse (Luv-Läufer, die Rotorblätter stehen im Wind) und drei Rotorblättern durchgesetzt. Bild 2.1 zeigt die wesentlichen Komponenten einer Windenergieanlage.

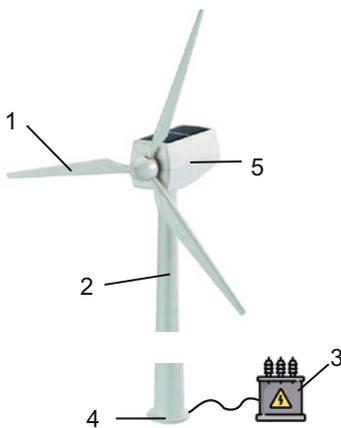


Bild 2.1

Wesentliche Bestandteile einer WEA: **(1)** Rotor, **(2)** Turm, **(3)** Transformator, **(4)** Fundament und **(5)** Maschinenhaus bzw. Gondel

Der Transformator befindet sich bei vielen Windenergieanlagen zusammen mit der Schaltanlage im Turmfuß. Einige Hersteller platzieren den Transformator direkt im Maschinenhaus. Vorteile dieses Konzepts sind geringere Stromwärmeverluste in den durch den Turm geführten Energieleitungen und eine verbesserte Abfuhr der Stromwärmeverluste des Transformators. Von Nachteil sind das höhere Gewicht des Maschinenhauses sowie eine erhöhte Schwierigkeit des Löschens im Fall eines Brandes des Transformators.

Die heutigen Windenergieanlagen zeichnen sich in der Regel durch folgende Eigenschaften aus (Bild 2.2):

- drei Rotorblätter (Dreiblattanlagen) mit dem Rotorradius R_{Rot} und der Rotorfläche A_{Rot}
- rechtsdrehender Rotor
- Luvläufer (Rotor ist in den Wind gedreht)
- variabler Gier- oder Azimutwinkel γ , um die Anlage entsprechend den Vorgaben relativ zur Windrichtung zu positionieren
- variabler Blattverstell- oder Pitchwinkel α zur Drehung der Rotorblätter um die eigene Achse
- Leistungseinspeisung in der Multi-Megawatt-Leistungsklasse

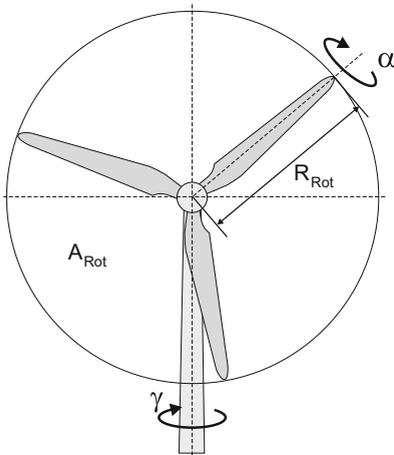


Bild 2.2
Rotor einer Windenergieanlage

Die weiteren Ausführungen in diesem Buch beziehen sich auf moderne Windenergieanlagen, die am Versorgungsnetz angeschlossen sind und elektrische Energie erzeugen. Die Entwicklung dieser Anlagen erfordert umfangreiches Wissen aus unterschiedlichen technischen Disziplinen. Als Beispiel seien die Aerodynamik, die Strukturmechanik, die Mechanik, die Leistungselektronik und auch die Regelungstechnik genannt. Alle diese Disziplinen müssen reibungslos ineinandergreifen, um die gewünschten Resultate zu erreichen.

Bezüglich der funktionalen Sicht kann eine Windenergieanlage mittels Bild 2.3 beschrieben werden, wobei nur die wesentlichen Funktionseinheiten eingezeichnet sind.

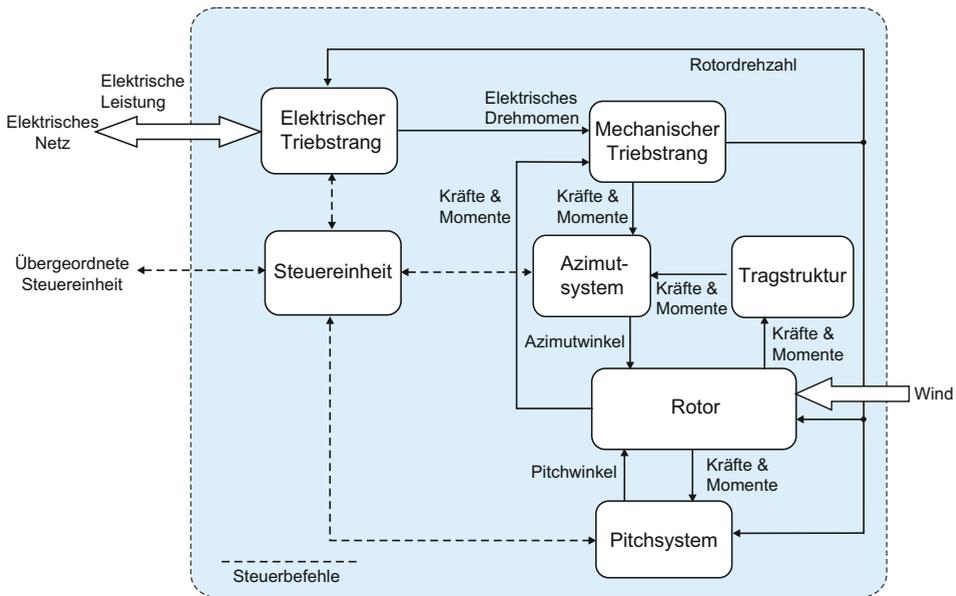


Bild 2.3 Funktionale Struktur einer Windenergieanlage

Der Wind trifft auf den **Rotor**, der Kräfte und Momente generiert, die auf das **Pitchsystem**, die **Tragstruktur** und den **mechanischen Triebstrang** wirken. Mittels des Pitchsystems (siehe Kapitel 26) können über den Pitchwinkel (Verstellung des Anstellwinkels der Rotorblätter) diese Kräfte und Momente beeinflusst werden. Die auf die Tragstruktur wirkenden Kräfte und Momente sind unerwünschte Lasten, die durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren sind. Über die Tragstruktur wirken die Kräfte und Momente auch auf das **Azimutsystem**, mit dem die Windenergieanlage über den Azimutwinkel relativ zur Windrichtung positioniert wird (siehe Kapitel 24) und somit wiederum Einfluss auf die vom Rotor erzeugten Kräfte und Momente nimmt.

Der mechanische Triebstrang erzeugt aus dem (erwünschten) Rotormoment und dem elektrischen Drehmoment des elektrischen Triebstranges eine Rotordrehzahl, wodurch der Rotor in Drehung versetzt wird. Aus dieser mechanischen Bewegung wird im **elektrischen Triebstrang** eine elektrische Leistung erzeugt, die mit dem elektrischen Netz ausgetauscht wird.

Mittels der **Steuereinheit** werden im Wesentlichen der Pitchwinkel α des Pitchsystems, der Azimutwinkel γ des Azimutsystems und das elektrische Drehmoment M_D des elektrischen Triebstranges so eingestellt, dass die Anforderungen der übergeordneten Steuereinheit erfüllt werden.

Index

A

Abschaltdrehzahl 57
Amerikanisches Windrad 4
Anlagenzertifikat 23
Anstellwinkel 71
Asynchrongeneratoren 312
– Regelung von doppelt gespeisten 339
– Verhalten von 316
– Verhalten von doppeltgespeisten 332
Asynchrongeneratoren in Käfigläuferausführung
– Regelung von 328
– Verhalten von 320
Auftrieb 71
Auftriebsbeiwert 72
Auftriebskraft 72
Azimutantriebe 119
Azimutdrehverbindung 119
Azimutsystem 118

B

Beanspruchung 108
Bedienoberfläche 243
Betontürme 35
Betriebsbereiche 63
Betriebsführung 190
Betz'sche Optimalauslegung 80
Blattachse 90
Blattgeber 132
Blattspitze 97
Blei-Gel-/Blei-Säure-Batterien 143
Blindleistung 207
Bockwindmühle 2
Bremsvorgang 60
Bundesimmissionsschutzgesetz 21

C

Campbell-Diagramm 115
Chopper 280
Clark-Transformation 254
Cost of Energy 15
Crowbar 281

D

Dauerfestigkeit 108
Differenzialbauweise 97
Direct Drive 24
Direkte Drehzahlregelung 167
Drehstromwicklungssystem 286
Dreiphasensystem 253
DSOGI-Methode 259
Durchschnittliche Anlagenkonfiguration 9

E

EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) 9
Eigenfrequenzen 115
Einbauwinkel 77
Eisansatz 18
Ekman-Schicht 51
Elektrischer Triebstrang 248
Elektrisches Drehmoment 147
Endkantengurte 98
Endkantenstege 98
Endlagenschalter 133
Energiespeicher 142
Entdrillung 39
Ertragsverteilung 48
Extrembelastung 108

F

FACTS-Eigenschaft 215
FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 214
Fahnenstellung 63
Farmserver 239
Fehlerdetektion 61
Frequenzhaltung 202
FRT-Container 245
FRT (Fault Ride Through) 230
Funktionale Sicherheit 192

G

Gedser-Anlage 4
Generatorwelle 28
Geräuschentwicklung 18
Gesamthöhe 38
Gieren 112
Gittertürme 33
Gleichrichter 267
Gleitzahl 73
Grenzschichtströmung 103f.
Grenzschichtversatz 45
Grenzschichtzäune 107

H

Haltebremse 28, 133
Hauptgurte 98
Hauptlager 29
Hauptstege 98
Hinterkantensegment 102
Holländerwindmühle 3
Hydraulische Drehdurchführung 128

I

Individuelle Blattverstellung 185
Integralbauweise 97
IPC (Individual Pitch Control) 185

K

Konuswinkel 40
Koordinatentransformation 254
Korrekturfaktor 46
Kosten von Windparkprojekten 15
Kupplungen 28

L

Lastfälle 109
Lastkollektiv 109
Leeläufer 39
Leistungsbeiwertkennfeld 67
Leistungskurve 42
Leistungsreduzierter Modus 165
LiDAR-System 188
Lithium-Ionen-Batterien 144
Luftmassenstrom 53
Luvläufer 39

M

Maschinenrichtlinie 192
Mechanische Kreisfrequenz 255
Methode nach Schmitz 86
Meto-Station 240
Mindestpitchwinkelregelkreis 150
Mittlere Windgeschwindigkeit 44
Modalanalyse 117
Momentenbeiwert 69
Momentenbeiwertkennfeld 70
Motorverspannkonzept 119

N

Nabenhöhe 38
NELEV-Verordnung 206
Netzanknüpfungspunkt 205
Netzanschluss 197
Netzanschlusskriterien 204
Netzbetreiber 199
Netzfehler 218
Netzfehlerdetektion 259

Nicken 112
Notverstellung 139

O

Optimale Steuerkurve 154

P

Park-Transformation 254
Phasenregelschleife 257
Pitchlager 132
Pitchmoment 91
Pitchmomentenbeiwert 136
Pitchregelkreis 149
Pitchsystem 122
Pitchwinkel 147
Pitting 131
Polradwinkel 294
Power Management Unit 240
Prandtl-Schicht 50
Pulsweitenmodulation 273

R

Rauigkeitslänge 45
Rayleigh-Verteilungsdichte 48
Recycling 20
Rollen 112
Rotorarretierung 61
Rotorblätter 97
Rotordrehzahl 56
Rotordrehzahlregelkreis 151
Rotorkreisfrequenz 255
Rotornennndrehzahl 57
Rotorwelle 25

S

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 239
Schadensakkumulation 109
Schalenkreuzanemometer 120
Schallreduzierter Modus 164
Schaltfrequenz 275

Schattenwurf 19
Scheinleistung 208
Schlagachse 90
Schlagmoment 91
Schmierstoffversorgung 27
Schmitz
– Methode nach 86
Schnelllaufzahl 65
Schubkraftverteilung 93
Schwenkachse 90
Schwenkmoment 91
Schwingungen 112
Serrations 105
Sollwertverteilung 238
Spannungsebenen 198
Spannungshaltung 203
Stahlrohrtürme 34
Stall-Effekt 183
Standicherheit 17
Startbedingungen 58
STATCOM (Static Synchronous Compensator) 215
Statische Frequenzstützung 223
Statorkreisfrequenz 255
Steuerungssystem 190
Stoppkategorien 59
Stoppvorgang 59
Störung von Radaranlagen 20
Stromrichter 262
Strömungswiderstandskraft 73
Sturmregelung 64
Synchrongeneratoren 286
– Regelung von 302
– Regelung von fremderregten 309
– Verhalten von 293
Systemgrenze 14

T

Teillastbetrieb 64
Tiltwinkel 40
Tipsegment 99
Triebstrangdämpfung 170
Trudelbetrieb 64
Turbulenzintensität 50

Turmdynamik 175
Turmhöhe 38
Turmwindmühle 2
Typenzertifizierung 21

U

Überfrequenz 223
Übertragungsnetzbetreiber 199
Ultracaps 143
Ultraschallanemometer 120
Umfangskraftverteilung 93
Umrichtersystem 276
Umweltauswirkungen 17
Unterfrequenz 223

V

Vakuum-Infusionsverfahren 99
Verschiebungsfaktor 208
Virtual Inertia 226
Vogel- und Fledermaus-
schutz 19
Volllastbereich 64
Vollpolgenerator 289
Vortex-Generatoren 106

W

Wechselrichter 267
Weibull-Formfaktor 47
Weibull-Skalierungsfaktor 47
Weibull-Verteilung 46
Widerstandsbeiwert 73
Windenergieanlage 6
– Komponenten einer 11
Windfahne 120
Windgeschwindigkeit 43
Windklassen 50
Windkraftanlage 4
Windkraftanlage Growian 6
Windkraftanlage W34 5
Windleistungsverhältnis nach Betz 55
Windmühle 1
Windparkregler 234
Windrad 2
Windschätzer 168
Winglets 101
Wurzelsegment 99

Z

Zwischenkreis 271