

# Inhalt

Vorwort.....	9
1 <b>Einleitung</b> .....	15
2 <b>Nutzung der Windenergie</b> .....	19
2.1    Mechanische Energie und mechanische Leistung des Windes .....	19
2.2    Entnahme kinetischer Energie des Windes durch den Rotor einer Windenergieanlage .....	20
2.3    Höhenprofil des Windes (Windscherung) .....	23
2.4    Zeitabhängigkeit der Windgeschwindigkeit.....	26
2.5    Leistungskennlinien von Windenergieanlagen .....	31
2.6    Kriterien zur Festlegung der Nennleistung einer Windenergieanlage	36
2.7    Abhängigkeit der Windleistung von Luftdruck und Lufttemperatur .	41
2.8    Abschätzung des Jahresenergieertrags einer Windenergieanlage ....	43
2.9    Richtungsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit .....	46
2.10   Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	50
3 <b>Rotor einer Windenergieanlage</b> .....	53
3.1    Einleitung – Historie und Grundbegriffe.....	53
3.1.1   Windmühlen .....	53
3.1.2   Erste Windenergieanlagen.....	57
3.1.3   Moderne Windenergieanlagen.....	59
3.1.4   Drehrichtung.....	62
3.1.5   Windrichtungsnachführung .....	62
3.1.6   Sturmabschaltung .....	63
3.1.7   Luv- und Leeläuferkonzept.....	64
3.1.8   Anzahl der Rotorblätter .....	66
3.2    Auftriebsläuferprinzip.....	68
3.3    Auslegung eines Rotors nach Betz .....	78
3.4    Auslegung eines Rotors unter Berücksichtigung der Drall-, Profil- und Blattspitzenverluste.....	84
3.4.1   Berücksichtigung der Drallverluste nach Schmitz .....	84
3.4.2   Berücksichtigung der Profil- und Blattspitzenverluste.....	89

3.5	Begrenzung der durch den Rotor aufgenommenen mechanischen Leistung .....	91
3.5.1	Leistungsbegrenzung durch den auf Strömungsabriss beruhenden Stalleffekt.....	91
3.5.2	Leistungsbegrenzung durch Einzelblattverstellung (Pitchsystem)....	93
3.6	Rotorachswinkel und Konuswinkel.....	95
<b>4</b>	<b>Komponenten einer Windenergieanlage .....</b>	<b>97</b>
4.1	Übersicht.....	97
4.2	Rotorblätter .....	100
4.3	Rotornabe, Pitchlager und Pitchsystem zur Einzelblattverstellung..	102
4.4	Maschinenträger und Gondelverkleidung.....	105
4.5	Rotorlager, langsamlaufende Welle und Rotorarretierung.....	106
4.6	Getriebe, schnelllaufende Welle und Haltebremse .....	108
4.7	Generator .....	109
4.7.1	Allgemeines .....	109
4.7.2	Synchrongenerator .....	110
4.7.3	Asynchrongenerator .....	114
4.8	Leistungselektronik .....	117
4.9	Anlagenkonzepte .....	121
4.9.1	Klassisches dänisches Konzept.....	121
4.9.2	Teilumrichterkonzept .....	122
4.9.3	Vollumrichterkonzept .....	125
4.9.4	Konzept mit hydrodynamischem Getriebe .....	129
4.9.5	Vergleich der Wirkungsgrade unterschiedlicher Anlagenkonzepte..	130
4.10	Azimuthsystem zur Windrichtungsnachführung des Rotors.....	130
4.11	Turm .....	132
4.12	Fundament.....	135
4.13	Energie- und Kommunikationsleitungen im Turm.....	136
4.14	Transformator und Schaltanlage.....	137
4.15	Anlagensteuerung und SCADA .....	138
4.16	Sensorik .....	141
4.16.1	Windmessung .....	141
4.16.2	Faseroptische Sensoren in Rotorblättern.....	143
<b>5</b>	<b>Kraftwerkseigenschaften von Windenergieanlagen und Windparks .....</b>	<b>147</b>
5.1	Einleitung.....	147
5.2	Betriebsführung einer drehzahlvariablen Windenergieanlage .....	148
5.3	Leistungsreduzierung bei Überfrequenz .....	152

---

5.4	Durchfahren eines Spannungseinbruchs.....	153
5.5	Begrenzung der Wirkleistung am Netzanschlusspunkt.....	155
5.6	Regelung der Spannung am Netzanschlusspunkt.....	156
5.7	Momentanreserve.....	159
<b>6</b>	<b>Netzanschlussbedingungen.....</b>	<b>161</b>
6.1	Allgemeines.....	161
6.2	Spannungshaltung im stationären Betrieb.....	161
6.2.1	Spannung und Blindleistung.....	161
6.2.2	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz.....	162
6.2.3	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz.....	164
6.2.4	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz.....	166
6.3	Frequenzhaltung und Wirkleistungsreduzierung.....	167
6.3.1	Allgemeines.....	167
6.3.2	Anforderungen an Erzeugungsanlagen.....	168
6.4	Verhalten bei Netzstörungen, dynamische Netzstützung.....	169
6.4.1	Allgemeines.....	169
6.4.2	Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz.....	170
6.4.3	Erzeugungsanlagen am Hochspannungsnetz.....	171
6.4.4	Erzeugungsanlagen am Höchstspannungsnetz.....	172
6.5	Beitrag zum Kurzschlussstrom.....	173
<b>7</b>	<b>Beurteilung der Netzurückwirkungen von Windenergieanlagen... 175</b>	
7.1	Allgemeines.....	175
7.2	Erzeugungsanlage am Netz.....	175
7.2.1	Spannungsanhebung.....	175
7.2.2	Schaltbedingte relative Spannungsänderung.....	176
7.3	Kurzzeit- und Langzeitflickerstärke.....	177
7.3.1	Flicker durch schaltbedingte Spannungsänderungen.....	177
7.3.2	Flicker im Betrieb.....	178
7.3.3	Verteilung des Flickers in Netzen.....	180
7.4	Oberschwingungen und Zwischenharmonische.....	181
7.4.1	Allgemeines.....	181
7.4.2	Anschluss an das Mittelspannungsnetz.....	181
7.4.3	Anschluss an das Hochspannungsnetz.....	183
7.4.4	Anschluss an das Höchstspannungsnetz.....	185
<b>8</b>	<b>Ausführung des Netzanschlusses.....</b>	<b>189</b>
8.1	Anschluss an das Mittelspannungsnetz.....	189
8.1.1	Allgemeines.....	189

8.1.2	Anschlussausführungen .....	190
8.1.3	Schutzeinrichtungen .....	191
8.1.4	Schalteinrichtungen .....	193
8.1.5	Zähler für Lieferung und Bezug .....	193
8.1.6	Zuschaltbedingungen .....	193
8.1.7	Sonstiges .....	194
8.2	Anschluss an das Hochspannungsnetz .....	194
8.2.1	Allgemeines .....	194
8.2.2	Anschlussausführungen .....	195
8.2.3	Schutzeinrichtungen .....	195
8.2.4	Schalteinrichtungen .....	198
8.2.5	Zähler .....	198
8.2.6	Zuschaltbedingungen .....	199
8.3	Anschluss an das Höchstspannungsnetz .....	199
8.3.1	Allgemeines .....	199
8.3.2	Anschlussausführungen .....	200
8.3.3	Schutzeinrichtungen .....	200
8.3.4	Schaltgeräte .....	201
8.3.5	Zuschaltbedingungen .....	201
<b>9</b>	<b>Umweltaspekte .....</b>	<b>203</b>
9.1	Schallemission .....	203
9.2	Schattenwurf .....	208
9.3	Natur- und Artenschutz .....	209
9.4	Landschaftsbild .....	210
9.5	Beispiele .....	211
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>213</b>
<b>Literatur .....</b>		<b>217</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>		<b>221</b>