

Inhalt

Vorwort.....	9	
1	Einleitung	15
2	Nutzung der Windenergie	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	Rotor einer Windenergieanlage	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
4	Komponenten einer Windenergieanlage	97
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
5	Kraftwerkseigenschaften von Windenergieanlagen und Windparks	147
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
6	Netzanschlussbedingungen.....	161
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
7	Beurteilung der Netzzrückwirkungen von Windenergieanlagen... 175	
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
8	Ausführung des Netzanschlusses..... 189	
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
9	Umweltaspekte	203
9.1	Schallemission	203
9.2	Schattenwurf	208
9.3	Natur- und Artenschutz	209
9.4	Landschaftsbild	210
9.5	Beispiele	211
10	Zusammenfassung und Ausblick	213
	Literatur	217
	Stichwortverzeichnis	221