

Windkraftanlagen

Grundlagen und Entwurf

2., überarbeitete Auflage

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Robert Gasch
Technische Universität Berlin

Verfasser: Dr.-Ing. P. Bade
Dipl.-Ing. W. Conrad
Prof. Dr.-Ing. R. Gasch
Dipl.-Ing. E. Holstein
Dipl.-Ing. K. Kaiser
Dipl.-Ing. R. Kortenkamp
Dr.-Ing. J. Maurer
Dr.-Ing. M. Person
Dipl.-Ing. A. Reuter
Dipl.-Ing. M. Schubert
Dr. rer. nat. A. Stoffel
Dipl.-Ing. B. Sundermann
Dr.-Ing. J. Twele
Dipl.-Ing. V. Zimmer



B. G. Teubner Stuttgart 1993

Inhaltsverzeichnis

0 Fragebogen von Max Frisch

1	Regenerative Energien, Windenergie.....	1
1.1	Energieerzeugung und Klimakatastrophe.....	1
1.2	Kernenergie: Ein Ausweg?.....	2
1.3	Sparen ohne Engerschnallen des Gürtels?.....	3
1.4	Rückkehr zu den regenerativen Energien und die Rolle der Politik.....	4
1.5	Rückblick auf mehr als ein Jahrzehnt der Entwicklung von Windkraftanlagen.....	5
2	Aus der Geschichte der Windräder.....	9
2.1	Windräder mit vertikaler Achse.....	9
2.2	Windräder mit horizontaler Achse.....	12
2.2.1	Von der Bockwindmühle zur Westernmill.....	12
2.2.2	Technische Neuerungen.....	17
2.2.3	Beginn und Ende des Zeitalters der Windkraftnutzung im Abendland.....	20
2.3	Die Physik der Windenergienutzung.....	21
2.3.1	Windleistung.....	21
2.3.2	Widerstandsläufer.....	23
2.3.3	Auftriebsnutzende Windräder.....	27
2.3.4	Vergleich von Widerstands- und Auftriebsläufer.....	29
3	Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen.....	34
3.1	Kurze Beschreibung verschiedener Windkraftanlagen.....	35
3.1.1	Megawatt-Anlagen (Rotordurchmesser $D > 50\text{m}$).....	39
3.1.2	Das dänische Konzept ($D= 10 - 35\text{m}$).....	41
3.1.3	Die mittlere Leistungsklasse auf dem deutschen Markt.....	45
3.1.4	Anlagen für den Inselbetrieb ($D < 10\text{m}$).....	47
3.2	Charakteristische Vorgaben für die Konstruktion von Windkraftanlagen.....	51
3.2.1	Einsatz und Betriebsführung.....	52
3.2.2	Auslegungswindgeschwindigkeit.....	54
3.2.3	Hauptdaten.....	55
3.3	Rotor.....	56
3.4	Rotorblattbauweise und Materialien.....	58
3.5	Nabe und Blattverankerung.....	61
3.6	Aufbau von Triebstrang und Maschinenträger.....	65
3.7	Windnachführung.....	70
3.8	Sturmabschaltung und zweites Sicherheitssystem.....	72

3.9	Leistungsbegrenzung	74
3.10	Turm und Gründung	79
	Anhang	85
4	Der Wind	93
4.1	Die Entstehung des Windes	94
4.1.1	Die globalen Zirkulationen	95
4.1.2	Lokale Ausgleichswinde	98
4.2	Der Wind in Bodennähe	99
4.2.1	Die Entstehung des bodennahen Windes	100
4.2.2	Die vertikale Verteilung der Windgeschwindigkeiten und die Bodenrauigkeit	100
4.2.3	Hindernisse am Boden	101
4.3	Windmessung und Auswertung	103
4.3.1	Das Messen des Windes	103
4.3.2	Auswertung, Windhistogramm, Ertragsaussage	108
4.4	Idealisierte Windhistogramme - Rayleigh- und Weibull-Verteilung	113
4.5	Standortbeurteilung und Bewertung	115
5	Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz	120
5.1	Was läßt sich aus dem Wind an Leistung entnehmen?	120
5.1.1	Froude-Rankinesches Theorem	124
5.2	Die Tragflügeltheorie	126
5.3	Anströmverhältnisse und Luftkräfte am rotierenden Flügel	129
5.3.1	Winddreiecke	129
5.3.2	Luftkräfte am rotierenden Flügel	131
5.4	Die Betzsche Optimalauslegung	132
5.5	Verluste	136
5.5.1	Profilverluste	136
5.5.2	Tip-Verluste	137
5.5.3	Drallverluste	140
5.6	Die Schmitzsche Auslegung unter Berücksichtigung der Drallverluste	141
5.6.1	Drallverluste	146
5.7	Praktisches Vorgehen bei der Dimensionierung von Windturbinen	147
6	Kennfeldberechnung und Teillastverhalten	152
6.1	Berechnungsverfahren	152
6.2	Dimensionslose Darstellung der Kennlinien	156
6.3	Dimensionslose Kennlinien eines Schnellläufers	157
6.4	Dimensionslose Kennlinien eines Langsamläufers	159
6.5	Turbinenkennfelder	161
6.6	Anströmverhältnisse	163

6.6.1	Schnellläufer - Langsamläufer: Zusammenfassung	163
6.6.2	Anströmung eines Langsamläufers	165
6.6.3	Anströmung eines Schnellläufers	166
6.7	Verhalten von Schnellläufern bei Pitchverstellung	169
6.8	Erweiterung des Berechnungsverfahrens	172
6.8.1	Der Bereich $X < X\backslash$ (Randumströmung)	173
6.8.2	Der Bereich $X > XA$ (Glauerts empirische Formel).....	175
6.8.3	Der Profilwiderstand.....	176
6.8.4	Die erweiterte Iteration.....	178
6.9	Grenzen der Blattelementtheorie und dreidimensionale Berechnungsverfahren	179
6.9.1	Panelverfahren	179
6.9.2	Stall-Delay.....	180
7	Strukturbelastungen, Festigkeitsüberlegungen	182
7.1	Lastfallkombinationen	183
7.2	Belastungen der Blätter von Windturbinen.....	184
7.2.1	Konstante, quasi-statische Belastungen	184
7.2.2	Kurzzeitige Belastung aus Böen.....	185
7.2.3	Kurzzeitige Belastung durch Flieh-, Kreisel- und Corioliskräfte bei Windnachführung des Rotors	188
7.2.4	Bremsmanöver	189
7.2.5	Periodische Lasten aus Flügeleigengewicht.....	189
7.2.6	Periodische Kräfte aus Turmvorstau oder Turmschatten	190
7.2.7	Schräganblasung, Windprofil in Bodennähe	190
7.3	Lasten auf Gondel und Turm.....	191
7.4	Dauerfestigkeit	192
7.5	Festigkeit von Materialien	193
7.6	Normen, Richtlinien, Regelwerke.....	196
8	Modellgesetze und Ähnlichkeitsregeln	198
8.1	Anwendungen und Einschränkungen der Ähnlichkeitstheorie.....	198
8.2	Biegespannungen	201
8.3	Zugspannungen in der Flügelwurzel aus den Fliehkräften	203
8.4	Biegespannungen in der Flügelwurzel aufgrund des Gewichts	204
8.5	Veränderung der Eigenfrequenzen des Flügels und der Frequenzverhältnisse	205
9	Windpumpsysteme	207
9.1	Charakteristische Anwendungen	207
9.2	Bauarten windgetriebener Pumpen.....	211
9.3	Zusammenwirken von Windturbine und Pumpe	217

9.3.1	Sinnvolle Kombinationen von Windturbinen und Pumpen	217
9.3.2	Qualitativer Vergleich von Windpumpsystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe	220
9.4	Auslegung von Windpumpsystemen	226
9.4.1	Ziel der Auslegung	226
9.4.2	Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung	227
9.4.3	Auslegung von Windpumpsystemen mit Kolbenpumpe	228
9.4.4	Auslegung von Windpumpsystemen mit Kreiselpumpe	232
10	Windkraftanlagen zur Stromerzeugung	240
10.1	Grundlagen	241
10.1.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Inselbetrieb	241
10.1.2	Erregungsarten und Bauformen	248
10.1.3	Die synchrone Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Netzparallelbetrieb	250
10.1.4	Drehstrommaschinen und ihr Aufbau	256
10.2	Die Synchron - Drehstrommaschine und ihre Anwendung	260
10.2.1	Batterie-Ladung	260
10.2.2	Widerstandsheizung mit Synchrongeneratoren	262
10.2.3	Windpumpensystem mit elektrischer Leistungsübertragung	264
10.2.4	Inselnetzspeisung	267
10.2.5	Netzspeisung	270
10.3	Die Asynchronmaschine und ihre Anwendung in Windkraftanlagen	274
10.3.1	Arbeitsweise	274
10.3.2	Das Dänische Konzept Asynchrongenerator zur direkten Netzspeisung	282
10.3.3	Drehzahlvariable Netzspeisung	284
10.3.4	Asynchrongenerator im Inselnetzbetrieb	288
10.4	Windkraftwerke im Verbund mit Dieselstromerzeugern	290
10.4.1	Realisierte Konzepte für Wind-Diesel-Systeme	292
10.4.2	Beispiele für ausgeführte Wind-Diesel-Systeme	293
	Anhang: Formelzeichen zu Kapitel 10	298
11	Steuerung und Regelung von Windkraftanlagen	302
11.1	Ziele der Regelungsmaßnahmen	302
11.2	Typen von Steuerungen und Regelungen	303
11.3	Einwirkungsmöglichkeiten auf den Rotor	304
11.3.1	Aus-dem-Wind-Drehen des Rotors	305
11.3.2	Blattwinkelverstellung zu kleineren Winkeln	306
11.3.3	Blattwinkelverstellung zu größeren Winkeln (Stall-Effekt)	307
11.4	Beispiele einfacher Regelungen	307
11.4.1	Regelung von Langsamläufern durch den Winddruck	307

X

11.4.2	Regelung von Schnellläufern durch Winddruck	309
11.4.3	Regelung von Schnellläufern durch Zentrifugalmechanismen	311
11.4.4	Regelung von Schnellläufern mit Spoiler und Bremsklappe.....	313
11.5	Beispiele schneller Regelungen.....	314
11.5.1	Windkraftanlagen ohne Pitchverstellung	315
11.5.1.1	Netzbetrieb mit Nabe ohne Pitchverstellung- dänisches Konzept	315
11.5.1.2	Inselbetrieb mit Nabe ohne Pitchverstellung	318
11.5.2	Windkraftanlagen mit Pitch-Regelung	320
11.5.2.1	Inselbetrieb mit Pitchregelung	321
11.5.2.2	Netzparallelbetrieb mit Pitchregelung	322
11.6	Betriebsführung	325
	Anhang: Differentialgleichungen des Regelverhaltens von Windturbinen.....	327
12	Probleme der Dynamik von Windturbinen.....	331
12.1	Unwuchterregte Gondel- und Turmschwingungen	334
12.2	Vom Turmschatten verursachte Gondel- und Turmschwingungen.....	337
12.3	Blattschwingungen	341
12.4	Schwingungen im Antriebsstrang	342
12.5	Zur Modellierung	344
13	Windkraftanlagen mit vertikaler Achse.....	346
13.1	Grundlagen	346
13.1.1	Geometrie	348
13.1.2	Anströmverhältnisse	349
13.1.3	Bestimmung der Luftkräfte an einem Blattelement	352
13.2	Übertragung der Betz-Theorie auf den Darrieus-Rotor	354
13.3	Auslegung von Darrieus-Windturbinen	356
13.4	Dynamik von Vertikalachsrotoren.....	357
13.5	DerH-Darrieus.....	358
14	Betriebswirtschaftliche Aspekte von Windkraftwerken	360
14.1	Produktkalkulation - die Herstellerseite	360
14.2	Anlegbare Investitionssumme und Amortisationsrechnung - die Betreiberseite.....	362
14.2.1	Überschlagsrechnung - die Rechnung des ersten Jahres	362
14.2.2	Der zu erwartende Energieertrag	364