

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Windmühlen und Windräder</b>	<b>1</b>
1.1	Über die Ursprünge der Windmühlen	1
1.2	Europäische Windmühlentypen	4
1.3	Wirtschaftliche Bedeutung der Windmühlen	12
1.4	Wissenschaft und technische Entwicklung im Windmühlenbau	14
1.5	Die amerikanische Windturbine	18
	Literatur	22
<b>2</b>	<b>Strom aus Wind - Die ersten Versuche</b>	<b>23</b>
2.1	Poul La Cour - Ein Pionier in Dänemark	23
2.2	Windkraftwerke - Große Pläne in Deutschland	29
2.3	1 250 kW aus dem Wind - Die erste Großanlage in den USA	33
2.4	Windkraftanlagen in den 50er Jahren - Vor der Energiekrise	37
	Literatur	45
<b>3</b>	<b>Bauformen von Windkraftanlagen</b>	<b>46</b>
3.1	Rotoren mit vertikaler Drehachse	47
3.2	Horizontalachsen-Rotoren	50
3.3	Windenergie-Konzentratoren	53
3.4	Begriffe und Bezeichnungen	58
	Literatur	60
<b>4</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Windenergiewandlung</b>	<b>61</b>
4.1	Die elementare Impulstheorie nach Betz	61
4.2	Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergiewandler	67
	Literatur	70

<b>5</b>	<b>Aerodynamik des Rotors</b>	<b>71</b>
5.1	Modellvorstellungen und Berechnungsverfahren der Rotor-aerodynamik	72
5.2	Die Leistungscharakteristik des Rotors	78
5.3	Aerodynamische Verfahren der Leistungsregelung	82
5.3.1	Blatteinstellwinkelregelung	83
5.3.2	Strömungsablösung bei festem Blatteinstellwinkel	88
5.3.3	Aus dem Wind drehen	93
5.4	Die wichtigsten Merkmale des Rotors aus aerodynamischer Sicht	94
5.4.1	Anzahl der Rotorblätter	95
5.4.2	Optimale Form des Blattumrisses	97
5.4.3	Verwindung der Rotorblätter	102
5.4.4	Aerodynamisches Profil	104
5.4.5	Relative Blattdicke	113
5.4.6	Auslegungsschnellaufzahl	114
5.5	Ausgeführte Rotorblattformen	117
5.6	Windrichtungsnachführung des Rotors	122
5.7	Aerodynamik des Darrieusrotors	127
5.8	Experimentelle Rotor-aerodynamik	130
5.8.1	Modellmessungen im Windkanal	130
5.8.2	Messungen an Originalanlagen	133
	Literatur	135
<b>6</b>	<b>Belastungen und Strukturbeanspruchung</b>	<b>137</b>
6.1	Luft- und Massenkräfte und ihre Wirkung auf die Windkraft- anlage	138
6.2	Die wichtigsten Entwurfslasten	141
6.2.1	Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung	141
6.2.2	Höhengradient der Windgeschwindigkeit und Rotorschräganströmung	144
6.2.3	Turmmumströmung	146
6.2.4	Windturbulenz und Böen	151
6.2.5	Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte	156
6.3	Lastfälle und Lastannahmen	158
6.3.1	Normaler Lastbetrieb	159
6.3.2	An- und Abfahrvorgänge, Rotorstillstand	160
6.3.3	Extreme Wind- und Umweltbedingungen	161
6.3.4	Technische Störungen	163

6.4	Lastkollektive	165
6.5	Theoretische Modelle und Verfahren zur Berechnung der Belastungen und der Strukturbeanspruchungen	168
6.5.1	Erforderliche Rechenmodelle und Vorgehensweise	169
6.5.2	Dynamische Antwortreaktion der Struktur und Ermüdungsfestigkeit	174
6.6	Wichtige Systemmerkmale und Belastungen	177
6.6.1	Anzahl der Rotorblätter	177
6.6.2	Rotornabengelenke oder gewollte Biegeelastizität der Rotorblätter	179
6.6.3	Blatteinstellwinkelregelung	183
6.6.4	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise	184
6.7	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchung	187
6.7.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern	187
6.7.2	Datenerfassungssysteme und Messungen bei Versuchsanlagen	188
	Literatur	191
7	Rotorblätter	193
7.1	Materialfragen	194
7.2	Entwicklung der Tragflügelbauweisen im Flugzeugbau	196
7.3	Aluminiumbauweise	199
7.4	Stahlbauweisen	201
7.5	Faserverbundbauweisen	206
7.6	Holzbauweise	214
7.7	Rotorblattbauweisen im Vergleich	216
	Literatur	219
8	Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus	221
8.1	Grundsätzliche Möglichkeiten der Leistungsübertragung	222
8.2	Räumliche Anordnung der mechanischen und elektrischen Komponenten	223
8.3	Rotornabe	229
8.3.1	Materialauswahl und Festigkeitseigenschaften	229
8.3.2	Nabenbauarten	233

8.4	Blattverstellmechanismus	239
8.4.1	Rotorblattlagerung	240
8.4.2	Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb	243
8.4.3	Blattverstellsysteme mit elektrischem Antrieb	247
8.4.4	Redundanz- und Sicherheitsfragen	248
8.5	Rotorlagerung	249
8.5.1	Lagerung mit langer Welle	250
8.5.2	Integration in das Getriebe	253
8.6	Rotorbremse	254
8.7	Übersetzungsgetriebe	257
8.7.1	Getriebebauarten	258
8.7.2	Dimensionierung des Getriebes	262
8.7.3	Wirkungsgrad und Geräusch	266
8.8	Einbau des elektrischen Generators	268
8.9	Torsionselastizität und Drehzahlvariabilität im mechanischen Triebstrang	270
8.10	Maschinenhaus	274
8.10.1	Bauweise und statische Konzeption	274
8.10.2	Äußere Form - Ästhetische Gesichtspunkte	277
8.11	Windrichtungsnachführung	279
8.12	Zusammenbau und Funktionsprüfung	281
	Literatur	286
9	Elektrisches System	287
9.1	Synchron- und Asynchrongenerator	288
9.2	Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen	296
9.3	Drehzahlfeste und drehzahlnachgiebige Generatoren	300
9.3.1	Synchrongenerator mit direkter Netzankopplung	300
9.3.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzankopplung	302
9.4	Drehzahlgestufte Generatorsysteme	305
9.5	Drehzahlvariable Generatorsysteme	306
9.5.1	Synchrongenerator mit statischem Frequenzum- former	307
9.5.2	Asynchrongenerator mit übersynchroner Strom- richter-kaskade	310
9.5.3	Doppeltgespeister Asynchrongenerator	311

9.6	Elektrische Gesamtausrüstung einer Windkraftanlage . . . . .	312
9.6.1	Große Anlagen . . . . .	313
9.6.2	Kleine und mittlere Anlagen . . . . .	316
9.7	Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich . . . . .	318
	Literatur . . . . .	321
<b>10</b>	<b>Regelung und Betriebsführung . . . . .</b>	<b>323</b>
10.1	Betriebswindmeßsystem . . . . .	324
10.1.1	Ort der Messung . . . . .	325
10.1.2	Meßgeber und Meßwertverarbeitung . . . . .	327
10.2	Windrichtungsnachführung . . . . .	328
10.3	Leistungs- und Drehzahlregelung mit Blatteinstellwinkel- verstellung . . . . .	330
10.3.1	Systemeigenschaften und Regelstrecken . . . . .	331
10.3.2	Betrieb mit netzgekoppeltem Generator . . . . .	334
10.3.3	Betrieb mit Frequenzumrichter . . . . .	340
10.3.4	Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz . . . . .	342
10.4	Windkraftanlagen ohne Blatteinstellwinkelregelung . . . . .	344
10.4.1	Netzparallelbetrieb . . . . .	344
10.4.2	Inselbetrieb . . . . .	346
10.5	Betriebsführung und Betriebszyklus . . . . .	347
10.6	Rechnerische Simulation der Regelung und Betriebsführung . . . . .	350
10.7	Bauliche Realisierung der elektronischen Regelungs- und Betriebsführungssysteme . . . . .	351
	Literatur . . . . .	353
<b>11</b>	<b>Schwingungsprobleme . . . . .</b>	<b>354</b>
11.1	Aeroelastisches Stabilitätsverhalten der Rotorblätter . . . . .	355
11.2	Torsionsschwingungen des Triebstranges . . . . .	358
11.2.1	Mechanisches Ersatzmodell . . . . .	358
11.2.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung . . . . .	362
11.2.3	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen . . . . .	362
11.2.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	365
11.3	Dynamik der Windrichtungsnachführung . . . . .	367
11.3.1	Mechanisches Ersatzmodell und Momente um die Gierachse . . . . .	368
11.3.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen . . . . .	370

11.4 Schwingungen der Gesamtanlage	371
11.4.1 Turmsteifigkeit	373
11.4.2 Schwingungscharakteristik ausgeführter Anlagen	376
11.4.3 Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens	381
Literatur	385
12 Der Turm	386
12.1 Turmbauarten	387
12.2 Besteigbarkeit und Einbauten	391
12.3 Steifigkeitsauslegung	394
12.4 Unterschiedliche Konzeptionen im Vergleich	398
12.5 Fundament	402
Literatur	405
13 Leistungsabgabe und Energielieferung	406
13.1 Leistungscharakteristik der Windkraftanlage	407
13.1.1 Aerodynamische Betriebsweise des Rotors	407
13.1.2 Wirkungsgrade der mechanisch-elektrischen Energiewandlung	408
13.1.3 Leistungskennlinie der Windkraftanlage	411
13.1.4 Meßtechnische Ermittlung der Leistungskennlinie	413
13.1.5 Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe	415
13.2 Energielieferung und optimale Rotordrehzahl	417
13.2.1 Optimierung der Rotordrehzahl	419
13.2.2 Berechnung der Jahresenergielieferung	422
13.3 Haupteinflußgrößen auf die Energielieferung	423
13.3.1 Winddaten des Aufstellortes	424
13.3.2 Rotordurchmesser	426
13.3.3 Aerodynamische Eigenschaften des Rotors	428
13.3.4 Rotordrehzahl	428
13.3.5 Regelungsverfahren	430
13.3.6 Installierte Generatorleistung	431
13.3.7 Nabenhöhe des Rotors	434
13.3.8 Betriebswindgeschwindigkeitsbereich	436
13.4 Die Windkraftanlage als Energiewandler	437
13.5 Näherungsweise Ermittlung der Nennwindgeschwindigkeit und der Jahresenergielieferung	438
Literatur	441

<b>14</b>	<b>Aufstellung und Betrieb</b>	<b>442</b>
14.1	Genehmigungsverfahren	443
14.2	Transportprobleme	445
14.3	Errichtung am Aufstellort	448
14.3.1	Kleine und mittlere Anlagen	448
14.3.2	Großanlagen	452
14.4	Inbetriebnahme	458
14.5	Bedienung und Überwachung	460
14.5.1	Anlagen für kommerziellen Einsatz	460
14.5.2	Große Versuchsanlagen	463
14.6	Wartung und Instandsetzung	467
14.7	Betriebssicherheit	468
	Literatur	474
<b>15</b>	<b>Anwendungskonzeption und Einsatzbereiche</b>	<b>475</b>
15.1	Windverhältnisse	476
15.1.1	Geographische Verteilung der Windgeschwindigkeiten	476
15.1.2	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten	480
15.1.3	Topographie und lokale Windverhältnisse	485
15.1.4	Messung der Windgeschwindigkeit	487
15.2	Windkraftanlagen im Inselbetrieb	491
15.2.1	Autonome Stromversorgung mit Windenergie - die Speicherproblematik	492
15.2.2	Heizen mit Windenergie	496
15.2.3	Wasserpumpen	499
15.2.4	Entsalzen von Meerwasser	502
15.3	Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen	505
15.4	Verbrauchernaher Einsatz im Verbund mit dem öffentlichen Stromnetz	509
15.5	Windfarmen und Windparks	512
15.5.1	Die amerikanischen Windfarmen	514
15.5.2	Europäische Windparks	523
15.5.3	Technische Probleme der Feldaufstellung	526
15.6	Windkraftanlagen im Kraftwerkverbund der Energieversorgungsunternehmen	532
15.6.1	Zusammenwirken mit konventionellen Kraftwerken	532
15.6.2	Können Windkraftanlagen andere Kraftwerke ersetzen?	534

15.7	Seeaufstellung von Windkraftanlagen	536
15.7.1	Technische Probleme der Offshore-Aufstellung	538
15.7.2	Küstenvorfeld der Bundesrepublik Deutschland	541
	Literatur	546
<b>16</b>	<b>Umweltverhalten</b>	<b>548</b>
16.1	Gefahren für die Umgebung	549
16.1.1	Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen?	549
16.1.2	Risikobetrachtungen	552
16.2	Geräuschentwicklung	553
16.2.1	Beurteilungskriterien und zulässige Grenzwerte	554
16.2.2	Aerodynamische Geräusche	556
16.2.3	Maschinengeräusche	559
16.2.4	Geräuschentwicklung gegenwärtiger Anlagen	560
16.3	Störungen von Funk und Fernsehen	564
16.4	Landverbrauch	567
16.5	Optische Beeinträchtigung der Landschaft	569
16.6	Beeinflussung des Umgebungsklimas	572
	Literatur	573
<b>17</b>	<b>Herstellkosten von Windkraftanlagen</b>	<b>575</b>
17.1	Spezifische Herstellkosten und Bezugsgrößen	576
17.2	Herstellkosten der heutigen Anlagen	578
17.2.1	Anlagen aus serienmäßiger Produktion	578
17.2.2	Große Versuchsanlagen	581
17.3	Kostenstruktur von Windkraftanlagen	583
17.3.1	Kostenaufgliederung nach Komponenten und Teilsystemen	583
17.3.2	Spezifische Kosten der Teilsysteme	588
17.3	Spezifische Baumassen von Windkraftanlagen	593
17.4	Kostendegression in der Serienfertigung	598
17.5	Erreichbare Herstellkosten bei Einzel- und Serienfertigung	600
17.6	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung	607
17.7	Alternative technische Konzeptionen und Herstellkosten	608
17.8	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen	610
	Literatur	612



<b>18 Wirtschaftlichkeit</b>	<b>613</b>
18.1 Investitionskosten für schlüsselfertige Anlagen	614
18.2 Betriebskosten	618
18.2.1 Wartung und Instandsetzung	618
18.2.2 Gesamte Betriebskosten	622
18.3 Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor	623
18.3.1 Technische Verfügbarkeit	624
18.3.2 Kapazitätsfaktor	627
18.4 Stromerzeugungskosten	629
18.4.1 Kleine und mittlere Anlagen	631
18.4.2 Prognosen für Großanlagen	633
18.5 Betriebswirtschaftliche Amortisation	635
18.5.1 Einsatz beim Stromverbraucher	638
18.5.2 Betrieb im Verbund mit Dieselkraftstationen	640
18.5.3 Windkraftanlagen im Kraftwerkverbund	641
18.6 Energetische Amortisation von Windkraftanlagen	644
18.7 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung	645
18.8 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der regenerativen Energiequellen	646
Literatur	649
 <b>Anhang: Windkraftanlagen in Bildern</b>	 <b>651</b>
 <b>Sachverzeichnis</b>	 <b>681</b>