

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

xxi

1 Windmühlen und Windräder	1
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
2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche	23
2.1 Poul La Cour – Ein Pionier in Dänemark	23
2.2 Windkraftwerke – Große Pläne in Deutschland	29
2.3 1250 kW aus dem Wind – Die erste Großanlage in den USA	33
2.4 Windkraftanlagen in den 50er Jahren – Vor der Energiekrise	36
2.5 Nach der Energiekrise – Aufbruch in die moderne Windenergienutzung .	44
2.6 Die großen Versuchsanlagen der 80er Jahre	47
2.7 Der erste Erfolg der kleinen Windkraftanlagen in Dänemark	56
2.8 Die amerikanischen Windfarmen	58
Literatur	63
3 Bauformen von Windkraftanlagen	65
3.1 Rotoren mit vertikaler Drehachse	66
3.2 Horizontalachsen-Rotoren	69
3.3 Windenergie-Konzentratoren	72
3.4 Begriffe und Bezeichnungen	77
Literatur	78
4 Physikalische Grundlagen der Windenergiewandlung	79
4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz	79
4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergiewandler	84
Literatur	87

5 Aerodynamik des Rotors	89
5.1 Physikalisch-mathematische Modelle und Berechnungsverfahren	90
5.1.1 Blattelementtheorie	91
5.1.2 Wirbelmodell der Rotorströmung	96
5.1.3 Numerische Strömungssimulation	98
5.1.4 Rotornachlaufströmung	99
5.2 Leistungscharakteristik des Rotors	103
5.2.1 Rotorleistungskennfeld	103
5.2.2 Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten	105
5.3 Aerodynamische Leistungsregelung	107
5.3.1 Blatteinstellwinkelregelung	108
5.3.2 Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall)	113
5.3.3 Aktive Steuerung der Strömungsablösung	118
5.3.4 Instationäre Effekte und Grenzschichtbeeinflussung	119
5.3.5 Aus dem Wind drehen	122
5.4 Das aerodynamische Profil	123
5.4.1 Charakteristische Eigenschaften	123
5.4.2 Profilgeometrie und Systematik	126
5.4.3 Laminarprofile	131
5.4.4 Einfluß auf den Rotorleistungsbeiwert	135
5.5 Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik	137
5.5.1 Anzahl der Rotorblätter	137
5.5.2 Optimale Form des Blattumrisses	139
5.5.3 Verwindung der Rotorblätter	145
5.5.4 Blattdicke	147
5.5.5 Auslegungsschnellaufzahl	148
5.6 Ausgeföhrte Rotorblätter	151
5.7 Windrichtungsnachführung des Rotors	154
5.8 Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren	158
5.9 Experimentelle Rotoraerodynamik	163
5.9.1 Modellmessungen im Windkanal	163
5.9.2 Messungen an Originalanlagen	166
Literatur	168
6 Belastungen und Strukturbbeanspruchungen	171
6.1 Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage	172
6.2 Koordinatensysteme und Bezeichnungen	174
6.3 Ursachen der Belastungen	175
6.3.1 Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte	176
6.3.2 Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung	177
6.3.3 Höhenprofil der Windgeschwindigkeit	181
6.3.4 Schräganströmung des Rotors	182
6.3.5 Turmumströmung	183
6.3.6 Windturbulenz und Böen	188
6.4 Lastannahmen	192

6.4.1	Internationale und nationale Normen	193
6.4.2	Klassifizierung der Windkraftanlagen und Windzonen	196
6.4.3	Normale Windbedingungen	198
6.4.4	Extreme Windbedingungen	199
6.4.5	Andere Umwelteinflüsse	200
6.4.6	Sonstige externe Bedingungen	201
6.4.7	Sicherheitsfaktoren	202
6.5	Maschinenstatus und Lastfälle	203
6.5.1	Normaler Betrieb	204
6.5.2	Technische Störungen	206
6.6	Beanspruchsarten und Strukturdimensionierung	208
6.7	Ermüdungsfestigkeit	209
6.7.1	Lastkollektive	210
6.7.2	Mathematische Modelle und Berechnungsverfahren	213
6.8	Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen	220
6.8.1	Anzahl der Rotorblätter	220
6.8.2	Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor	222
6.8.3	Steifigkeit der Rotorblätter	225
6.8.4	Regelungssystem	226
6.8.5	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise	229
6.9	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen	232
6.9.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern	233
6.9.2	Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen	234
Literatur		237
7	Rotorblätter	239
7.1	Materialfragen	240
7.2	Vorbild: Flugzeugtragflügel	242
7.3	Frühere experimentelle Bauweisen von Rotorblättern	245
7.3.1	Genietete Aluminiumkonstruktionen	245
7.3.2	Stahlbauweisen	247
7.3.3	Traditionelle Holzbauweise	251
7.3.4	Ältere Faserverbundbauweisen	252
7.3.5	Holz-Epoxid-Verbundbauweise	257
7.4	Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik	258
7.4.1	Faserverbund-Technologie	258
7.4.2	Konstruktive Auslegung der Rotorblätter	260
7.4.3	Fertigungsverfahren	261
7.5	Blattanschluß zur Rotornabe	264
7.6	Rotorblattbauweisen im Vergleich	268
7.7	Aerodynamische Bremsklappen	272
7.8	Blitzschutz	274
7.9	Enteisung	275
Literatur		276

8 Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus	277
8.1 Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung	278
8.2 Experimentelle Konzeptionen	281
8.2.1 Generator im Turmfuß	281
8.2.2 Generator senkrecht im Turmkopf	283
8.3 Heutige Standardbauweisen	284
8.3.1 Generatorantrieb mit Übersetzungsgetriebe	284
8.3.2 Getriebeloser Triebstrang	285
8.4 Rotornabe	287
8.4.1 Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren	289
8.4.2 Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren	290
8.5 Blattverstellmechanismus	294
8.5.1 Rotorblattlagerung	296
8.5.2 Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb	299
8.5.3 Blattverstellsysteme mit elektrischem Antrieb	301
8.5.4 Passive Blattverstellung	304
8.5.5 Redundanz- und Sicherheitsfragen	305
8.6 Rotorlagerung	307
8.6.1 Lagerprobleme	307
8.6.2 Rotorwelle mit separaten Lagern	310
8.6.3 Dreipunkt-Lagerung von Rotorwelle und Getriebe	311
8.6.4 Rotorlagerung im Getriebe	313
8.6.5 „Einlager“-Konzeption	314
8.6.6 Rotorlagerung auf einer feststehenden Achse	315
8.7 Rotorbremse	316
8.8 Übersetzungsgetriebe	319
8.8.1 Getriebebauarten	319
8.8.2 Äußere Belastungsvorgaben für das Getriebe	323
8.8.3 Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung . .	326
8.8.4 Wirkungsgrad und Geräuschentwicklung	327
8.9 Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe	330
8.10 Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang	332
8.11 Einbau des elektrischen Generators	335
8.12 Maschinenhaus	338
8.12.1 Hilfsaggregate und sonstige Einbauten	338
8.12.2 Bauweise und statische Konzeption	340
8.12.3 Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte	343
8.13 Windrichtungsnachführung	346
8.14 Zusammenbau und Funktionsprüfung	350
Literatur	352

9 Elektrisches System	353
9.1 Generatorbauarten	354
9.1.1 Synchrongenerator	354
9.1.2 Asynchrongenerator	358
9.1.3 Generatoren mit Permanentmagneterregung	362
9.2 Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen	364
9.3 Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung	367
9.3.1 Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	368
9.3.2 Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	369
9.3.3 Asynchrongenerator mit variablem Schlupf	371
9.3.4 Drehzahlgestufte Generatorsysteme	372
9.4 Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter	374
9.4.1 Frequenzumrichter	375
9.4.2 Synchrongenerator mit Frequenzumformer	378
9.4.3 Asynchrongenerator mit übersynchroner Stromrichterkaskade	380
9.4.4 Doppelgespeister Asynchrongenerator	381
9.5 Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatorsysteme	384
9.5.1 Synchrongenerator mit elektrischer Erregung	384
9.5.2 Generatorsysteme mit Permanentmagnet-Generatoren	386
9.6 Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage	388
9.6.1 Große Anlagen	389
9.6.2 Kleine und mittlere Anlagen	391
9.7 Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich	393
Literatur	396
10 Regelung und Betriebsführung	397
10.1 Betriebsdatenerfassung	398
10.1.1 Betriebswindmeßsystem	399
10.1.2 Elektrische Leistungsmessung	401
10.2 Sicherheitssystem	403
10.3 Prinzipielle Funktionsweise der Regelungssysteme	403
10.4 Windrichtungsnachführung	405
10.5 Leistungsregelung und Drehzahlführung durch Verstellen des Rotorblatteinstellwinkels	407
10.5.1 Regelstrecken und rechnerische Simulation	409
10.5.2 Betrieb mit direkt netzgekoppeltem Generator	413
10.5.3 Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablen Generator und Frequenzumrichter	418
10.5.4 Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz	420
10.6 Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall	422
10.6.1 Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	422
10.6.2 Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	423
10.6.3 Aktive Stall-Regelung	425
10.7 Betriebsführung und Betriebszyklus	427

10.7.1	Betriebszustände	428
10.7.2	Zusammenwirken mit dem Stromnetz	430
Literatur		433
11	Schwingungsverhalten	435
11.1	Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade	436
11.2	Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter	438
11.2.1	Statische Divergenz	439
11.2.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen	440
11.2.3	Typische Rotorblattschwingungen	442
11.3	Torsionsschwingungen des Triebstrangs	444
11.3.1	Mechanisches Ersatzmodell	445
11.3.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung	448
11.3.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	449
11.3.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen	452
11.4	Dynamik der Windrichtungsnachführung	454
11.4.1	Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse	455
11.4.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen	457
11.5	Schwingungen der Gesamtanlage	459
11.5.1	Turmsteifigkeit	459
11.5.2	Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen	461
11.6	Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens	467
Literatur		471
12	Der Turm	473
12.1	Bauarten und Varianten	474
12.2	Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen	477
12.3	Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften	479
12.4	Freitragende Stahlrohrtürme	480
12.4.1	Steifigkeit und Baumasse	480
12.4.2	Konstruktion und Fertigungstechnik	482
12.4.3	Aufstiegshilfen und Einbauten	485
12.5	Betontürme	488
12.5.1	Ortbeton-Bauweise	489
12.5.2	Beton-Fertigteilbauweise	491
12.6	Gittertürme	495
12.7	Turm-Konzeptionen im Vergleich	498
12.8	Fundament	500
Literatur		503
13	Windverhältnisse	505
13.1	Ursachen des Windes und globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten	505
13.2	Windverhältnisse in Europa und in Deutschland	508
13.3	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten	512

13.3.1	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten	512
13.3.2	Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe	515
13.3.3	Stetigkeit des Windes	517
13.3.4	Windturbulenz und Böen	523
13.4	Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse	526
13.5	Ermittlung der Windgeschwindigkeit	528
13.5.1	Windmessungen	528
13.5.2	Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung nach dem Europäischen Windatlas	533
13.5.3	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern	536
Literatur	538
14	Leistungsabgabe und Energielieferung	539
14.1	Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung	540
14.1.1	Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl	540
14.1.2	Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung	545
14.1.3	Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang	547
14.1.4	Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen	550
14.2	Normierte Leistungskennlinie	551
14.2.1	Definitionen, Eigenschaften und Gewährleistung	551
14.2.2	Vermessung der Leistungskennlinie	553
14.3	Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie	559
14.3.1	Schwieriges Gelände	559
14.3.2	Luftdichte	560
14.3.3	Turbulenz	563
14.3.4	Sonstige wetterbedingte Einflüsse	565
14.3.5	Verschmutzung der Rotorblätter	565
14.4	Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe	567
14.5	Jahresenergielieferung	569
14.5.1	Berechnungsverfahren	569
14.5.2	Winddaten am Aufstellort	572
14.5.3	Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung	574
14.5.4	Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor	577
14.5.5	Sicherheitsabschläge	580
14.6	Wichtige Entwurfsparameter und Energielieferung	582
14.6.1	Anlagen-Leistungsbeiwert	583
14.6.2	Rotordurchmesser	584
14.6.3	Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität	585
14.6.4	Leistungsregelung	588
14.6.5	Installierte Generatorleistung	589
14.6.6	Nabenhöhe des Rotors	592
14.6.7	Betriebswindgeschwindigungsbereich	593

14.6.8 Die Windkraftanlage als Energiewandler – eine grundsätzliche Betrachtung	594
Literatur	595
15 Umweltverhalten	597
15.1 Gefahren für die Umgebung	598
15.1.1 Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen?	598
15.1.2 Risikobetrachtungen	601
15.2 Geräuschentwicklung	602
15.2.1 Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte	602
15.2.2 Geräuschquellen bei Windkraftanlagen	605
15.2.3 Geräuschentwicklung gegenwärtiger Anlagen	609
15.3 Schattenwurf	613
15.4 Störungen von Funk und Fernsehen	617
15.5 Störungen der Vogelwelt	620
15.6 Landverbrauch	621
15.7 Optische Beeinträchtigung der Landschaft	623
15.8 Windenergienutzung und Klimaschutz	625
15.8.1 Einfluß auf das Umgebungsklima	626
15.8.2 Nutzung der Windkraft und CO ₂ -Emissionen	626
Literatur	628
16 Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche	631
16.1 Windkraftanlagen im Inselbetrieb	632
16.1.1 Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherproblematik	633
16.1.2 Heizen mit Windenergie	638
16.1.3 Wasserpumpen	641
16.1.4 Entsalzen von Meerwasser	644
16.2 Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen	647
16.3 Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz	652
16.3.1 Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb	652
16.3.2 Windfarmen und Windparks	653
16.4 Windkraftanlagen im Kraftwerkverbund der Energieversorgungsunternehmen	657
16.4.1 Die Regelungsproblematik	658
16.4.2 Das Verbundnetz	661
16.4.3 Beitrag zur gesicherten Leistung	663
16.5 Windkraftanlagenindustrie, Absatzmärkte, Windenergiapotential	664
16.5.1 Entwicklung der Absatzmärkte	665
16.5.2 Die Windkraftanlagenhersteller	667
16.5.3 Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen	670
16.5.4 Über das Windenergiopotential	673
Literatur	677

17 Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere	679
17.1 Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen	680
17.1.1 Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen	680
17.1.2 Gründung auf dem Meeresgrund	683
17.1.3 Elektrische Konzeption	688
17.2 Transport und Montage	694
17.3 Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen	697
17.3.1 Wetterbedingte Zugänglichkeit	697
17.3.2 Wartung und Instandhaltung	699
17.4 Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee	700
17.4.1 Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse	700
17.4.2 Völkerrechtliche Situation	704
17.4.3 Genehmigungsverfahren	706
17.4.4 Die ersten Offshore-Windparks	709
17.4.5 Kommerzielle Offshore-Windparks	710
Literatur	719
18 Planung, Errichtung und Betrieb	721
18.1 Projektentwicklung	722
18.2 Genehmigungsverfahren	724
18.2.1 Gesetze und Regelwerke	725
18.2.2 Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien .	727
18.2.3 Baugenehmigung für kleine Anlagen	729
18.2.4 Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG	730
18.3 Technische Auslegung von Windparks	732
18.3.1 Aerodynamik der Feldaufstellung	732
18.3.2 Bauliche Infrastruktur	736
18.3.3 Interne elektrische Verkabelung	738
18.3.4 Netzanschluß	742
18.4 Transportprobleme	748
18.5 Errichtung am Aufstellort	752
18.5.1 Standardverfahren	752
18.5.2 Errichtung ohne schwere Hebezeuge	756
18.5.3 Extrem große Anlagen	759
18.5.4 Große Experimentalanlagen mit Zweiblattrotor	762
18.6 Inbetriebnahme	766
18.6.1 Kommerzielle Anlagen und Windparks	767
18.6.2 Versuchsanlagen und Prototypen	768
18.7 Technische Betriebsführung	769
18.7.1 Erfassung der Betriebsdaten	770
18.7.2 Übergeordnete Betriebsführung von großen Windparks	774
18.7.3 Technische Zustandsüberwachung	775
18.8 Betriebssicherheit	777
18.8.1 Technische Sicherheitssysteme	777
18.8.2 Gefahren durch extreme Wetterlagen	782

18.9	Wartung und Instandsetzung	787
18.9.1	Reguläre Wartung	788
18.9.2	Schadensursachen und Reparaturrisiken	789
18.9.3	Statistische Auswertungen	793
Literatur		795
19	Kosten von Windkraftanlagen und Anwendungsprojekten	797
19.1	Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen	798
19.1.1	Spezifische Kosten und Bezugsgrößen	799
19.1.2	Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten . .	801
19.1.3	Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen	805
19.1.4	Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten	808
19.1.5	Herstellkosten der heutigen Windkraftanlagen	810
19.1.6	Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten	815
19.1.7	Kostendegression in der Serienfertigung	818
19.1.8	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung	820
19.1.9	Alternative technische Konzeptionen	820
19.1.10	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen	822
19.1.11	Preiskalkulation in der Serienfertigung und Verkaufspreise von Windkraftanlagen	824
19.2	Investitionskosten von schlüsselfertigen Anwendungsprojekten	827
19.2.1	Projektentwicklung	827
19.2.2	Fundamente und Geländeerschließung	828
19.2.3	Netzanschluß und Verkabelung	829
19.2.4	Sonstige Kosten	832
19.2.5	Typische Kostenbeispiele	833
19.3	Betriebskosten	837
19.3.1	Wartung und Instandsetzung	837
19.3.2	Versicherungen	839
19.3.3	Sonstige Betriebskosten	840
19.3.4	Gesamte jährliche Betriebskosten	841
19.4	Offshore-Projekte	842
19.4.1	Investitionskosten	842
19.4.2	Betriebskosten	847
Literatur		849
20	Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Windenergie	851
20.1	Finanzierung und gesellschaftsrechtliche Organisation	852
20.2	Stromerzeugungskosten und Amortisationszeiten	855
20.2.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung	855
20.2.2	Statische Betrachtungsweise	856
20.2.3	Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit	863
20.3	Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich zu anderen Energiesystemen	870
20.4	Energetische Amortisation von Windkraftanlagen	873

20.5 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung	874
20.6 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der erneuerbaren Energien	875
Literatur	877
Glossar – englische Fachausdrücke	879
Deutsch – Englisch	879
Englisch – Deutsch	890
Sachverzeichnis	901