

Inhalt

0 Fragebogen von Max Frisch

1	Einleitung	1
1.1	Windenergie im Jahr 2010	1
1.2	Energie- und Strombedarf	4
1.3	Energiepolitische Instrumente der Regierungen	9
1.4	Technologische Entwicklung	13
2	Aus der Geschichte der Windräder	17
2.1	Windräder mit vertikaler Achse	17
2.2	Windräder mit horizontaler Achse	20
2.2.1	Von der Bockwindmühle zur Westernmill	20
2.2.2	Technische Neuerungen	28
2.2.3	Beginn und Ende des Zeitalters der Windkraftnutzung im Abendland	31
2.2.4	Die Zeit nach dem ersten Weltkrieg bis Ende der 60er Jahre	32
2.2.5	Die Renaissance der Windenergie nach 1980	34
2.3	Die Physik der Windenergienutzung	35
2.3.1	Windleistung	35
2.3.2	Widerstandsläufer	38
2.3.3	Auftriebsnutzende Windräder	42
2.3.4	Vergleich von Widerstands- und Auftriebsläufer	45
3	Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen	50
3.1	Rotor	52
3.1.1	Rotorblatt	58
3.1.2	Nabe	63
3.1.3	Blattwinkelverstellung	70
3.2	Triebstrang	74
3.2.1	Aufbau	74

3.2.2	Getriebe	83
3.2.3	Kupplungen und Bremsen	90
3.2.4	Generatoren	92
3.3	Hilfsaggregate und sonstige Einrichtungen	93
3.3.1	Windrichtungsnachführung	93
3.3.2	Kühlung und Heizung	96
3.3.3	Blitzschutz	97
3.3.4	Hebezeuge	99
3.3.5	Sensorik	100
3.4	Turm und Fundament	101
3.4.1	Turm	101
3.4.2	Fundament	109
3.5	Fertigung	110
3.6	Daten von Windkraftanlagen	113
4	Der Wind	122
4.1	Entstehung des Windes	122
4.1.1	Globale Windsysteme	122
4.1.2	Geostrophischer Wind	123
4.1.3	Lokale Winde	124
4.2	Atmosphärische Grenzschicht	126
4.2.1	Bodennahe Grenzschicht	127
4.2.2	Höhenprofil des Windes	128
4.2.3	Turbulenzintensität	135
4.2.4	Darstellung der gemessenen Windgeschwindigkeiten im Zeitbereich durch Häufigkeitsverteilung und Verteilungs- funktionen	139
4.2.5	Spektrale Darstellung des Windes	146
4.3	Ermittlung von Leistung, Ertrag und Belastungsgrößen	149
4.3.1	Ertragsabschätzung mit Hilfe der Histogramme von Windgeschwindigkeit und Turbinenleistung	150

4.3.2	Ertragsermittlung aus Verteilungsfunktion und Leistungs-kennlinie.....	151
4.3.3	Vermessung der Leistungskurve	151
4.3.4	Ertragsabschätzung eines Windparks	153
4.3.5	Wind- und Standorteinfluss auf Anlagenbelastung	155
4.4	Windmessung und Auswertung.....	165
4.4.1	Schalenkreuzanemometer.....	166
4.4.2	Ultraschallanemometer.....	167
4.4.3	SODAR	168
4.5	Prognose der Windverhältnisse	171
4.5.1	Wind Atlas Analysis and Application Programme	171
4.5.2	Meso-Scale Modelle.....	174
4.5.3	Measure-Correlate-Predict-Methode.....	175
5	Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz.....	180
5.1	Was lässt sich aus dem Wind an Leistung entnehmen?	180
5.1.1	Froude-Rankinesches Theorem.....	184
5.2	Die Tragflügeltheorie	185
5.3	Anströmverhältnisse und Luftkräfte am rotierenden Flügel.....	190
5.3.1	Winddreiecke	190
5.3.2	Luftkräfte am rotierenden Flügel	191
5.4	Die Betzsche Optimalauslegung	193
5.5	Verluste.....	195
5.5.1	Profilverluste	196
5.5.2	Tip-Verluste	198
5.5.3	Drallverluste.....	200
5.6	Die Schmitzsche Auslegung unter Berücksichtigung der Drallverluste	202
5.6.1	Drallverluste.....	207
5.7	Praktisches Vorgehen bei der Dimensionierung von Windturbinen	208
5.8	Schlussbemerkung.....	212

6	Kennfeldberechnung und Teillastverhalten	217
6.1	Berechnungsverfahren (Blattementmethode)	217
6.2	Dimensionslose Darstellung der Kennlinien	220
6.3	Dimensionslose Kennlinien eines Schnellläufers	221
6.4	Dimensionslose Kennlinien eines Langsamläufers	223
6.5	Turbinkennfelder	226
6.6	Anströmverhältnisse	228
6.6.1	Schnellläufer - Langsamläufer: Zusammenfassung	228
6.6.2	Anströmung eines Langsamläufers	230
6.6.3	Anströmung eines Schnellläufers	232
6.7	Verhalten von Schnellläufern bei Pitchverstellung	235
6.8	Erweiterung des Berechnungsverfahrens	239
6.8.1	Anlaufbereich $\lambda < \lambda_A$ (hohe Auftriebsbeiwerte)	240
6.8.2	Leerlaufbereich $\lambda > \lambda_A$ (Glauerts empirische Formel)	242
6.8.3	Profilwiderstand	244
6.8.4	Erweiterte Iteration	245
6.9	Grenzen der Blattementmethode und dreidimensionale Berechnungsverfahren	247
6.9.1	Auftriebsverteilung und dreidimensionale Effekte	248
6.9.2	Dynamische Strömungsablösung (Dynamic Stall)	251
6.9.3	Singularitätenverfahren	252
6.9.4	Numerische Strömungssimulation bei Windkraftanlagen	253
6.9.5	Beispiele für CFD bei Windkraftanlagen	255
7	Modellgesetze und Ähnlichkeitsregeln	264
7.1	Anwendungen der Ähnlichkeitstheorie	264
7.1.1	Biegespannungen der Blätter aus Luftkräften	268
7.1.2	Zugspannungen in der Flügelwurzel aus den Fliehkräften	269
7.1.3	Biegespannungen in der Flügelwurzel aufgrund des Gewichts	271
7.1.4	Veränderung der Eigenfrequenzen des Flügels und der Frequenzverhältnisse	272
7.1.5	Luftkraftdämpfungen des Rotors	274

7.2	Skalierungsregeln bei elektrischen Maschinen	276
7.3	Anwendung der Skalierungsregeln auf eine Windturbine mit direkt getriebenem Generator	277
7.4	Torsionsschwingungen im skalierten Triebstrang	279
7.5	Grenzen des Skalierens - Wie groß können Windturbinen werden?	280
8	Strukturdynamik	283
8.1	Dynamische Anregungen	284
8.1.1	Massen-, Trägheits- und Gewichtskräfte.....	285
8.1.2	Aerodynamische und hydrodynamische Lasten.....	287
8.1.3	Transiente Anregungen aus Manövern und durch Störungen	293
8.2	Freie und erzwungene Schwingungen von Windturbinen – Beispiele, Phänomenologie	294
8.2.1	Turm-Gondel-Dynamik.....	294
8.2.2	Blattschwingungen.....	300
8.2.3	Triebstrangschwingungen	303
8.2.4	Teilmodelle – Gesamtsystem.....	304
8.2.5	Instabilitäten und weitere aeroelastische Probleme.....	307
8.3	Simulation der Gesamtdynamik	309
8.3.1	Modellbildung in Simulationsprogrammen	310
8.3.2	Einsatz von Simulationsprogrammen.....	313
8.4	Validierung durch Messungen	314
9	Richtlinien und Nachweisverfahren.....	317
9.1	Zertifizierung.....	317
9.1.1	Richtlinien zur Zertifizierung: IEC 61400	318
9.1.2	Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen des Germanischen Lloyd.....	319
9.1.3	Die “Guidelines for Design of Wind Turbines“ des DNV	319
9.1.4	Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsi- cherheitsnachweise für Turm und Gründung (DIBt-Richtlinie)..	319
9.1.5	Sonstige Normen und Richtlinien	319

9.1.6	Windklassen und Standortkategorien	320
9.1.7	Lastfalldefinitionen	321
9.2	Nachweiskonzepte	321
9.2.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit und das Konzept der partiellen Sicherheitsfaktoren.....	322
9.2.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis.....	323
9.2.3	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises.....	324
9.3	Beispielnachweis Stahlrohrturm – einachsiger Spannungszustand und isotropes Material	328
9.3.1	Tragfähigkeitsnachweis, Nachweis Extremlasten	328
9.3.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit.....	330
9.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis, Nachweis der Eigenfrequenz.	330
9.4	Nachweis der Rotornabe für mehrachsigen Spannungszustand und isotropes Material	332
9.4.1	Geometrische Auslegung.....	332
9.4.2	Tragfähigkeitsnachweis – Verfahren der kritischen Schnittebenen	332
9.4.3	Betriebsfestigkeitsnachweis – verfahrensabhängige Wöhlerlinien.....	334
9.5	Nachweis der Rotorblätter für einachsigen Spannungszustand und orthotropes Material	335
9.5.1	Konzept der zulässigen Dehnung zum Nachweis der Gurte	336
9.5.2	Lokales Bauteilversagen	337
9.5.3	Materialauswahl und Fertigungsverfahren.....	338
10	Windpumpsysteme.....	341
10.1	Charakteristische Anwendungen	341
10.2	Bauarten windgetriebener Pumpen.....	345
10.3	Zusammenwirken von Windturbine und Pumpe	354
10.3.1	Sinnvolle Kombinationen von Windturbinen und Pumpen.....	354

10.3.2 Qualitativer Vergleich von Windpumpsystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe	357
10.4 Auslegung von Windpumpsystemen	364
10.4.1 Ziel der Auslegung	364
10.4.2 Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung	365
10.4.3 Auslegung von Windpumpsystemen mit Kolbenpumpe	367
10.4.4 Auslegung von Windpumpsystemen mit Kreiselpumpe	371
11 Windkraftanlagen zur Stromerzeugung - Grundlagen	376
11.1 Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine)	377
11.1.1 Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Inselbetrieb	377
11.1.2 Erregungsarten, Innen- und Außenpolmaschine	387
11.1.3 Die synchrone Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Netzparallelbetrieb	389
11.2 Drehstrommaschinen	395
11.2.1 Die dreiphasige Synchronmaschine	395
11.2.2 Die Drehstrom-Asynchronmaschine	399
11.3 Leistungselektronische Komponenten von Windkraftanlagen - Umrichter	409
12 Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen	417
12.1 Möglichkeiten auf den Triebstrang einzuwirken	422
12.1.1 Aerodynamische Beeinflussungsmöglichkeiten	422
12.1.2 Beeinflussung des Triebstrangs durch die Last	430
12.2 Sensoren und Aktoren	430
12.3 Regler und Regelsysteme	431
12.4 Regelungsstrategie einer drehzahlvariablen Anlage mit Blattwinkelverstellung	433
12.5 Zum Reglerentwurf	435
Anhang I	436
Anhang II	443

13	Anlagenkonzepte	448
13.1	Netzeinspeisende Anlagen	449
13.1.1	Das Dänische Konzept: Asynchrongenerator zur direkten Netzeinspeisung	450
13.1.2	Direkt einspeisender Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung	456
13.1.3	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit Synchrongenerator und Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis	458
13.1.4	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und Umrichter im Läuferkreis	460
13.1.5	Leistungskurven und Gesamtwirkungsgrade dreier Anlagenkonzepte – kleiner Vergleich	462
13.2	Einzel- und Inselanlagen	464
13.2.1	Batterielader	464
13.2.2	Widerstandsheizung mit Synchrongeneratoren	467
13.2.3	Windpumpsystem mit elektrischer Leistungsübertragung	468
13.2.4	Kleines Inselnetz	472
13.2.5	Asynchrongenerator im Inselnetzbetrieb	472
13.3	Verbundanlagen	475
13.3.1	Wind-Dieselsystem mit Schwungradspeicher	479
13.3.2	Wind-Dieselsystem mit gemeinsamer Gleichstromschiene	479
13.3.3	Wind-Diesel-Photovoltaik Verbund (Kleinnetz)	480
13.3.4	Schlussbemerkung	480
14	Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz	483
14.1	Das elektrische Verbundnetz	483
14.1.1	Struktur des elektrischen Verbundnetzes	483
14.1.2	Netzbetrieb	487
14.2	Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz	495
14.2.1	Technische Anforderungen an den Netzanschluss	495
14.2.2	Netzrückwirkungen	497
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz	499

14.2.4 Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb.....	501
15 Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen	505
15.1 Planung und Projektierung von Windparks.....	506
15.1.1 Technische Planungsaspekte	506
15.1.2 Genehmigungsrechtliche Aspekte	508
15.1.3 Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	516
15.2 Bau und Betrieb von Windkraftanlagen	523
15.2.1 Technische Aspekte von Aufbau und Betrieb von Windkraft- anlagen	524
15.2.2 Rechtliche Aspekte	533
15.2.3 Wirtschaftlichkeit im Betrieb	534
15.2.4 Einfluss von Nabenhöhe und Anlagenkonzept auf den Ertrag ...	537
15.2.5 Allgemeine Abschätzung des Jahresertrags mit idealisierte Anlage.....	543
16 Offshore-Windparks.....	547
16.1 Umweltbedingungen auf See.....	548
16.2 Entwurfsanforderungen für Offshore-Anlagen	554
16.3 Windenergieanlage	555
16.4 Tragstruktur und Installation auf See	557
16.5 Netzintegration und Layout von Windparks	561
16.6 Betrieb und Wartung	563
16.7 Wirtschaftlichkeit	567
Stichwortverzeichnis	572