

Inhalt

0 Fragebogen von Max Frisch

1	Einleitung	1
1.1	Windenergie im Jahr 2008	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 (Blattelementmethode).....	217
6.2	Dimensionslose Darstellung der Kennlinien.....	220
6.3	Dimensionslose Kennlinien eines Schnellläufers	221
6.4	Dimensionslose Kennlinien eines Langsamläufers.....	223
6.5	Turbinenkennfelder	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 Blattelementmethode 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.....	327
9.3.1	Tragfähigkeitsnachweis, Nachweis Extremlasten.....	327
9.3.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit	329
9.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis, Nachweis der Eigenfrequenz	329
9.4	Nachweis der Rotornabe für mehrachsigen Spannungszustand und isotropes Material.....	331
9.4.1	Geometrische Auslegung	331
9.4.2	Tragfähigkeitsnachweis – Verfahren der kritischen Schnittebenen.....	331
9.4.3	Betriebsfestigkeitsnachweis – verfahrensabhängige Wöhlerlinien	333
9.5	Nachweis der Rotorblätter für einachsigen Spannungszustand und orthotropes Material.....	334
9.5.1	Konzept der zulässigen Dehnung zum Nachweis der Gurte.....	335
9.5.2	Lokales Bauteilversagen	336
9.5.3	Materialauswahl und Fertigungsverfahren	337
10	Windpumpensysteme	340
10.1	Charakteristische Anwendungen.....	340
10.2	Bauarten windgetriebener Pumpen	344
10.3	Zusammenwirken von Windturbine und Pumpe	353
10.3.1	Sinnvolle Kombinationen von Windturbinen und Pumpen	353

10.3.2	Qualitativer Vergleich von Windpumpensystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe	356
10.4	Auslegung von Windpumpensystemen	363
10.4.1	Ziel der Auslegung	363
10.4.2	Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung.....	364
10.4.3	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kolbenpumpe	366
10.4.4	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kreiselpumpe	370
11	Windkraftanlagen zur Stromerzeugung – Grundlagen	375
11.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine)	376
11.1.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Inselbetrieb	376
11.1.2	Erregungsarten, Innen- und Außenpolmaschine	386
11.1.3	Die synchrone Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Netzparallelbetrieb	388
11.2	Drehstrommaschinen.....	394
11.2.1	Die dreiphasige Synchronmaschine	394
11.2.2	Die Drehstrom-Asynchronmaschine	398
11.3	Leistungselektronische Komponenten von Windkraftanlagen - Umrichter	408
12	Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen	416
12.1	Möglichkeiten auf den Triebstrang einzuwirken.....	421
12.1.1	Aerodynamische Beeinflussungsmöglichkeiten	421
12.1.2	Beeinflussung des Triebstrangs durch die Last.....	429
12.2	Sensoren und Aktoren	429
12.3	Regler und Regelsysteme	430
12.4	Regelungsstrategie einer drehzahlvariablen Anlage mit Blattwinkelverstellung	432
12.5	Zum Reglerentwurf	434
Anhang I	435
Anhang II	442

13	Anlagenkonzepte.....	447
13.1	Netzeinspeisende Anlagen	448
13.1.1	Das Dänische Konzept: Asynchrongenerator zur direkten Netzeinspeisung	449
13.1.2	Direkt einspeisender Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung	455
13.1.3	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit Synchrongenerator und Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis.....	457
13.1.4	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und Umrichter im Läuferkreis	459
13.1.5	Leistungskurven und Gesamtwirkungsgrade dreier Anlagenkonzepte – kleiner Vergleich	461
13.2	Einzel- und Inselanlagen	463
13.2.1	Batterielader.....	463
13.2.2	Widerstandsheizung mit Synchrongeneratoren.....	466
13.2.3	Windpumpensystem mit elektrischer Leistungsübertragung.....	467
13.2.4	Kleines Inselnetz.....	471
13.2.5	Asynchrongenerator im Inselnetzbetrieb	471
13.3	Verbundanlagen	474
13.3.1	Wind-Dieselsystem mit Schwungradspeicher.....	478
13.3.2	Wind-Dieselsystem mit gemeinsamer Gleichstromschiene	478
13.3.3	Wind-Diesel-Photovoltaik Verbund (Kleinstnetz)	479
13.3.4	Schlussbemerkung	479
14	Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz.....	482
14.1	Das elektrische Verbundnetz	482
14.1.1	Struktur des elektrischen Verbundnetzes	482
14.1.2	Netzbetrieb.....	486
14.2	Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz	494
14.2.1	Technische Anforderungen an den Netzanschluss	494
14.2.2	Netzurückwirkungen	495
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz.....	497

14.2.4	Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb	500
15	Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen.....	504
15.1	Planung und Projektierung von Windparks.....	505
15.1.1	Technische Planungsaspekte	505
15.1.2	Genehmigungsrechtliche Aspekte.....	508
15.1.3	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	515
15.2	Bau und Betrieb von Windkraftanlagen	522
15.2.1	Technische Aspekte von Aufbau und Betrieb von Windkraft- anlagen	523
15.2.2	Rechtliche Aspekte	531
15.2.3	Wirtschaftlichkeit im Betrieb	532
15.2.4	Einfluss von Nabenhöhe und Anlagenkonzept auf den Ertrag...	535
15.2.5	Allgemeine Abschätzung des Jahresertrags mit idealisierte Anlage	541
16	Offshore-Windparks.....	544
16.1	Umweltbedingungen auf See.....	545
16.2	Entwurfsanforderungen für Offshore-Anlagen	551
16.3	Windenergieanlage	552
16.4	Tragstruktur und Installation auf See	554
16.5	Netzintegration und Layout von Windparks	558
16.6	Betrieb und Wartung	560
16.7	Wirtschaftlichkeit	563
	Stichwortverzeichnis.....	568