

## **Inhalt**

### **0 Fragebogen von Max Frisch**

<b>1 Einleitung</b> .....	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
<b>2 Aus der Geschichte der Windräder</b> .....	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
<b>3 Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Der Wind .....</b>	<b>122</b>
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 Leistungskennlinie .....	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
<b>5</b>	<b>Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz .....</b>	<b>180</b>
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

<b>6</b>	<b>Kennfeldberechnung und Teillastverhalten</b> .....	217
6.1	Berechnungsverfahren (Blattemelementmethode).....	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 Blattemelementmethode 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
<b>7</b>	<b>Modellgesetze und Ähnlichkeitsregeln</b> .....	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
<b>8</b>	<b>Strukturdynamik .....</b>	<b>283</b>
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
<b>9</b>	<b>Richtlinien und Nachweisverfahren.....</b>	<b>317</b>
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
<b>10</b>	<b>Windpumpsysteme .....</b>	<b>340</b>
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 Windpumpsystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe .....	356
10.4 Auslegung von Windpumpsystemen .....	363
10.4.1 Ziel der Auslegung .....	363
10.4.2 Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung.....	364
10.4.3 Auslegung von Windpumpsystemen mit Kolbenpumpe .....	366
10.4.4 Auslegung von Windpumpsystemen mit Kreiselpumpe .....	370
<b>11 Windkraftanlagen zur Stromerzeugung – Grundlagen .....</b>	<b>375</b>
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
<b>12 Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen .....</b>	<b>416</b>
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

<b>13</b>	<b>Anlagenkonzepte</b>	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	Windpumpsystem 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 (Kleinnetz)	479
13.3.4	Schlussbemerkung	479
<b>14</b>	<b>Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz</b>	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	Netzrückwirkungen	495
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz	497

14.2.4 Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb .....	500
<b>15 Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen.....</b>	<b>504</b>
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
<b>16 Offshore-Windparks.....</b>	<b>544</b>
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
<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>568</b>