

# Inhalt

## 0 Fragebogen von Max Frisch

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Aus der Geschichte der Windräder .....</b>	<b>17</b>
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</b>	<b>Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen.....</b>	<b>50</b>
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 (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
<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 .....	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	<b>Windpumpsysteme</b> .....	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 Windpumpensystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe .....	357
10.4	Auslegung von Windpumpensystemen .....	364
10.4.1	Ziel der Auslegung .....	364
10.4.2	Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung .....	365
10.4.3	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kolbenpumpe .....	367
10.4.4	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kreiselpumpe .....	371
<b>11</b>	<b>Windkraftanlagen zur Stromerzeugung - Grundlagen .....</b>	<b>376</b>
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
<b>12</b>	<b>Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen .....</b>	<b>417</b>
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

<b>13</b>	<b>Anlagenkonzepte.....</b>	<b>448</b>
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 (Kleinstnetz).....	480
13.3.4	Schlussbemerkung.....	480
<b>14</b>	<b>Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz .....</b>	<b>483</b>
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	Netzurückwirkungen .....	497
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz .....	499

14.2.4	Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb.....	501
<b>15</b>	<b>Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen .....</b>	<b>505</b>
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
<b>16</b>	<b>Offshore-Windparks.....</b>	<b>547</b>
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
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>572</b>