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	51
3.1.1	Rotorblatt	58
3.1.2	Nabe	63
3.1.3	Blattwinkelverstellung	71
3.2	Triebstrang	74
3.2.1	Aufbau	74

3.2.2	Getriebe.....	84
3.2.3	Kupplungen und Bremsen.....	90
3.2.4	Generatoren.....	92
3.3	Hilfsaggregate und sonstige Einrichtungen.....	94
3.3.1	Windrichtungsnachführung.....	94
3.3.2	Kühlung und Heizung.....	96
3.3.3	Blitzschutz.....	98
3.3.4	Hebezeuge.....	100
3.3.5	Sensorik.....	100
3.4	Turm und Fundament.....	102
3.4.1	Turm.....	102
3.4.2	Fundament.....	110
3.5	Fertigung.....	111
3.6	Daten von Windkraftanlagen.....	113
4	Der Wind	123
4.1	Entstehung des Windes.....	123
4.1.1	Globale Windsysteme.....	123
4.1.2	Geostrophischer Wind.....	124
4.1.3	Lokale Winde.....	125
4.2	Atmosphärische Grenzschicht.....	127
4.2.1	Bodennahe Grenzschicht.....	128
4.2.2	Höhenprofil des Windes.....	129
4.2.3	Turbulenzintensität.....	136
4.2.4	Darstellung der gemessenen Windgeschwindigkeiten im Zeitbereich durch Häufigkeitsverteilung und Verteilungs- funktionen.....	140
4.2.5	Spektrale Darstellung des Windes.....	147
4.3	Ermittlung von Leistung, Ertrag und Belastungsgrößen.....	150
4.3.1	Ertragsabschätzung mit Hilfe der Histogramme von Windgeschwindigkeit und Turbinenleistung.....	151

4.3.2	Ertragsermittlung aus Verteilungsfunktion und Leistungskennlinie.....	152
4.3.3	Vermessung der Leistungskurve	152
4.3.4	Ertragsabschätzung eines Windparks.....	154
4.3.5	Wind- und Standorteinfluss auf Anlagenbelastung.....	156
4.4	Windmessung und Auswertung.....	166
4.4.1	Schalenkreuzanemometer	167
4.4.2	Ultraschallanemometer	168
4.4.3	SODAR.....	169
4.4.4	LIDAR	171
4.5	Prognose der Windverhältnisse.....	172
4.5.1	Wind Atlas Analysis and Application Programme.....	172
4.5.2	Meso-Scale Modelle	175
4.5.3	Measure-Correlate-Predict-Methode	176
4.5.4	Einspeiseprognose von Windparks	177
5	Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz	181
5.1	Was lässt sich aus dem Wind an Leistung entnehmen?	181
5.1.1	Froude-Rankinesches Theorem.....	185
5.2	Die Tragflügeltheorie	186
5.3	Anströmverhältnisse und Luftkräfte am rotierenden Flügel	191
5.3.1	Winddreiecke	191
5.3.2	Luftkräfte am rotierenden Flügel.....	192
5.4	Die Betzsche Optimalauslegung	194
5.5	Verluste.....	196
5.5.1	Profilverluste.....	197
5.5.2	Tip-Verluste.....	199
5.5.3	Drallverluste.....	201
5.6	Die Schmitzsche Auslegung unter Berücksichtigung der Drallverluste	203
5.6.1	Drallverluste nach Schmitz.....	2089
5.7	Praktisches Vorgehen bei der Dimensionierung von Windturbinen.....	209
5.8	Schlussbemerkung.....	213

6	Kennfeldberechnung und Teillastverhalten	218
6.1	Berechnungsverfahren (Blattelementmethode).....	218
6.2	Dimensionslose Darstellung der Kennlinien.....	221
6.3	Dimensionslose Kennlinien eines Schnellläufers	222
6.4	Dimensionslose Kennlinien eines Langsamläufers.....	224
6.5	Turbinenkennfelder	227
6.6	Anströmverhältnisse.....	229
6.6.1	Schnellläufer - Langsamläufer: Zusammenfassung.....	229
6.6.2	Anströmung eines Langsamläufers	231
6.6.3	Anströmung eines Schnellläufers.....	233
6.7	Verhalten von Schnellläufern bei Pitchverstellung	236
6.8	Erweiterung des Berechnungsverfahrens	240
6.8.1	Anlaufbereich $\lambda < \lambda_A$ (hohe Auftriebsbeiwerte).....	241
6.8.2	Leerlaufbereich $\lambda > \lambda_A$ (Glauerts empirische Formel)	243
6.8.3	Profilwiderstand.....	245
6.8.4	Erweiterte Iteration	246
6.9	Grenzen der Blattelementmethode und dreidimensionale	
	Berechnungsverfahren.....	248
6.9.1	Auftriebsverteilung und dreidimensionale Effekte	259
6.9.2	Dynamische Strömungsablösung (Dynamic Stall).....	252
6.9.3	Singularitätenverfahren.....	253
6.9.4	Numerische Strömungssimulation bei Windkraftanlagen.....	254
6.9.5	Beispiele für CFD bei Windkraftanlagen.....	256
7	Modellgesetze und Ähnlichkeitsregeln	265
7.1	Anwendungen der Ähnlichkeitstheorie.....	265
7.1.1	Biegespannungen der Blätter aus Luftkräften.....	269
7.1.2	Zugspannungen in der Flügelwurzel aus den Fliehkräften	270
7.1.3	Biegespannungen in der Flügelwurzel aufgrund des Gewichts ..	272

7.1.4	Veränderung der Eigenfrequenzen des Flügels und der Frequenzverhältnisse.....	273
7.1.5	Luftkraftdämpfungen des Rotors	275
7.2	Skalierungsregeln bei elektrischen Maschinen	277
7.3	Anwendung der Skalierungsregeln auf eine Windturbine mit direkt getriebenem Generator	278
7.4	Torsionsschwingungen im skalierten Triebstrang.....	280
7.5	Grenzen des Skalierens - Wie groß können Windturbinen werden?.....	281
8	Strukturdynamik	284
8.1	Dynamische Anregungen	285
8.1.1	Massen-, Trägheits- und Gewichtskräfte	286
8.1.2	Aerodynamische und hydrodynamische Lasten.....	288
8.1.3	Transiente Anregungen aus Manövern und durch Störungen	294
8.2	Freie und erzwungene Schwingungen von Windturbinen – Beispiele, Phänomenologie	295
8.2.1	Turm-Gondel-Dynamik.....	295
8.2.2	Blattschwingungen.....	301
8.2.3	Triebstrangschwingungen	304
8.2.4	Teilmodelle – Gesamtsystem	305
8.2.5	Instabilitäten und weitere aeroelastische Probleme	308
8.3	Simulation der Gesamtdynamik	310
8.3.1	Modellbildung in Simulationsprogrammen	311
8.3.2	Einsatz von Simulationsprogrammen	314
8.4	Validierung durch Messungen.....	315
9	Richtlinien und Nachweisverfahren	318
9.1	Zertifizierung.....	318
9.1.1	Richtlinien zur Zertifizierung: IEC 61400	319
9.1.2	Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen des Germanischen Lloyd.....	320
9.1.3	Die “Guidelines for Design of Wind Turbines“ des DNV	320

9.1.4	Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung (DIBt-Richtlinie) .	320
9.1.5	Sonstige Normen und Richtlinien	320
9.1.6	Windklassen und Standortkategorien	321
9.1.7	Lastfalldefinitionen	322
9.2	Nachweiskonzepte	322
9.2.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit und das Konzept der partiellen Sicherheitsfaktoren	323
9.2.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	324
9.2.3	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises	325
9.3	Beispielnachweis Stahlrohrturm – einachsiger Spannungszustand und isotropes Material	329
9.3.1	Tragfähigkeitsnachweis, Nachweis Extremlasten	329
9.3.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit	331
9.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis, Nachweis der Eigenfrequenz	331
9.4	Nachweis der Rotorabe für mehrachsigen Spannungszustand und isotropes Material	333
9.4.1	Geometrische Auslegung	333
9.4.2	Tragfähigkeitsnachweis – Verfahren der kritischen Schnittebenen	333
9.4.3	Betriebsfestigkeitsnachweis – verfahrensabhängige Wöhlerlinien	335
9.5	Nachweis der Rotorblätter für einachsigen Spannungszustand und orthotropes Material	336
9.5.1	Konzept der zulässigen Dehnung zum Nachweis der Gurte	337
9.5.2	Lokales Bauteilversagen	338
9.5.3	Materialauswahl und Fertigungsverfahren	339
10	Windpumpensysteme	342
10.1	Charakteristische Anwendungen	342
10.2	Bauarten windgetriebener Pumpen	346

10.3	Zusammenwirken von Windturbine und Pumpe	355
10.3.1	Sinnvolle Kombinationen von Windturbinen und Pumpen	355
10.3.2	Qualitativer Vergleich von Windpumpensystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe	358
10.4	Auslegung von Windpumpensystemen	365
10.4.1	Ziel der Auslegung	365
10.4.2	Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung.....	366
10.4.3	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kolbenpumpe	368
10.4.4	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kreiselpumpe	372
11	Stromerzeugung durch Windkraftanlagen - Grundlagen	377
11.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine).....	378
11.1.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Inselbetrieb.....	378
11.1.2	Erregungsarten, Innen- und Außenpolmaschine	388
11.1.3	Die synchrone Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Netzparallelbetrieb.....	390
11.2	Drehstrommaschinen.....	396
11.2.1	Der Aufbau von Drehstrommaschinen.....	396
11.2.2	Die Drehstrom-Synchronmaschine	399
11.2.3	Die Drehstrom-Asynchronmaschine	400
11.3	Leistungselektronische Komponenten von Windkraftanlagen – Umrichter	410
12	Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen	418
12.1	Möglichkeiten auf den Triebstrang einzuwirken.....	423
12.1.1	Aerodynamische Beeinflussungsmöglichkeiten	423
12.1.2	Beeinflussung des Triebstrangs durch die Last	431
12.2	Sensoren und Aktoren	431
12.3	Regler und Regelsysteme	432
12.4	Regelungsstrategie einer drehzahlvariablen Anlage mit Blattwinkelverstellung.....	434

12.5	Zum Reglerentwurf	436
	Anhang I	437
	Anhang II	444
13	Anlagenkonzepte	449
13.1	Netzeinspeisende Anlagen.....	450
13.1.1	Das Dänische Konzept: Asynchrongenerator zur direkten Netzeinspeisung	451
13.1.2	Direkt einspeisender Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung	457
13.1.3	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit Synchrongenerator und Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis.....	459
13.1.4	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und Umrichter im Läuferkreis	461
13.1.5	Leistungskurven und Gesamtwirkungsgrade dreier Anlagenkonzepte – kleiner Vergleich	463
13.2	Einzel- und Inselanlagen	465
13.2.1	Batterielader	465
13.2.2	Widerstandsheizung mit Synchrongeneratoren.....	468
13.2.3	Windpumpensystem mit elektrischer Leistungsübertragung	469
13.2.4	Kleines Inselnetz.....	473
13.2.5	Asynchrongenerator im Inselnetzbetrieb	473
13.3	Verbundanlagen	476
13.3.1	Wind-Dieselsystem mit Schwungradspeicher.....	480
13.3.2	Wind-Dieselsystem mit gemeinsamer Gleichstromschiene	480
13.3.3	Wind-Diesel-Photovoltaik Verbund (Kleinstnetz)	481
13.3.4	Schlussbemerkung.....	481
14	Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz	484
14.1	Das elektrische Verbundnetz	484
14.1.1	Struktur des elektrischen Verbundnetzes	484
14.1.2	Netzbetrieb	488
14.2	Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz.....	496

14.2.1	Technische Anforderungen an den Netzanschluss	496
14.2.2	Netzurückwirkungen	498
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz.....	500
14.2.4	Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb	502
15	Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen.....	506
15.1	Planung und Projektierung von Windparks.....	507
15.1.1	Technische Planungsaspekte	507
15.1.2	Genehmigungsrechtliche Aspekte.....	510
15.1.3	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit	518
15.2	Bau und Betrieb von Windkraftanlagen	526
15.2.1	Technische Aspekte von Aufbau und Betrieb von Windkraft- anlagen	526
15.2.2	Rechtliche Aspekte.....	535
15.2.3	Wirtschaftlichkeit im Betrieb	535
15.2.4	Einfluss von Nabenhöhe und Anlagenkonzept auf den Ertrag...	539
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	Windenergieanlagen im Offshore-Einsatz.....	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