

Inhalt

0 Fragebogen von Max Frisch

1	Einleitung	1
1.1	Windenergie im Jahr 2015.....	1
1.2	Stromverbrauch, Umweltaspekte, Stromkosten	4
1.2.1	Energie- und Stromverbrauch	4
1.2.2	Umweltaspekte.....	7
1.2.3	Stromkosten.....	10
1.3	Energiepolitische Aspekte	12
1.4	Technologische Entwicklung	14
2	Aus der Geschichte der Windräder	18
2.1	Windräder mit vertikaler Achse.....	18
2.2	Windräder mit horizontaler Achse.....	21
2.2.1	Von der Bockwindmühle zur Westernmill	21
2.2.2	Technische Neuerungen	29
2.2.3	Beginn und Ende des Zeitalters der Windkraftnutzung im Abendland	32
2.2.4	Die Zeit nach dem ersten Weltkrieg bis Ende der 60er Jahre	33
2.2.5	Die Renaissance der Windenergie nach 1980	35
2.3	Die Physik der Windenergienutzung	36
2.3.1	Windleistung	36
2.3.2	Widerstandsläufer	39
2.3.3	Auftriebsnutzende Windräder	43
2.3.4	Vergleich von Widerstands- und Auftriebsläufer	46
3	Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen	51
3.1	Rotor.....	52
3.1.1	Rotorblatt	59
3.1.2	Nabe	64

3.1.3	Blattwinkelverstellung	72
3.2	Triebstrang	75
3.2.1	Aufbau.....	75
3.2.2	Getriebe.....	85
3.2.3	Kupplungen, Bremsen, Rotorarretierung und Schleifringe	90
3.2.4	Generatoren.....	93
3.3	Hilfsaggregate und sonstige Einrichtungen.....	93
3.3.1	Windrichtungsnachführung.....	93
3.3.2	Kühlung und Heizung	96
3.3.3	Wetter- und Blitzschutz.....	97
3.3.4	Hebezeuge.....	100
3.3.5	Sensorik und Anlagenüberwachung.....	101
3.4	Turm und Fundament	102
3.4.1	Turm.....	102
3.4.2	Fundament.....	111
3.5	Fertigung	111
3.6	Daten von Windkraftanlagen.....	114
4	Der Wind.....	125
4.1	Entstehung des Windes.....	125
4.1.1	Globale Windsysteme	125
4.1.2	Geostrophischer Wind.....	125
4.1.3	Lokale thermische Winde	127
4.1.4	Katabatische Winde	129
4.2	Atmosphärische Grenzschicht.....	129
4.2.1	Bodennahe Grenzschicht	130
4.2.2	Temperaturschichtung der Atmosphäre	130
4.2.3	Höhenprofil des Windes.....	131
4.2.4	Einflüsse von Oberflächenrauigkeit und Orographie	135
4.2.5	Turbulenzintensität	137
4.2.6	Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit – Histogramme und Verteilungsfunktionen	142

4.2.7	Windleistungsspektrum.....	148
4.3	Ermittlung von Leistung, Ertrag und Belastungsgrößen aus Messungen.	149
4.3.1	Ertragsabschätzung mit Hilfe der Histogramme von Windgeschwindigkeit und Leistung	150
4.3.2	Ertragsermittlung aus Verteilungsfunktion und Leistungskennlinie.....	150
4.3.3	Abschätzung des Jahresertrags mit idealisierter Anlage.....	151
4.3.4	Extreme Windgeschwindigkeiten.....	153
4.3.5	Auswirkungen der Turbulenz auf die Leistungskurven und die Blattbeanspruchungen.....	156
4.3.6	Schräganströmung, vertikaler und horizontaler Windgradient ..	157
4.3.7	Turbulenz- und Abschattungseffekte in Windparks	160
4.4	Windmessung und Windpotentialprognosen	164
4.4.1	Schalenkreuzanemometer	164
4.4.2	Ultraschallanemometer	165
4.4.3	SODAR	166
4.4.4	LIDAR.....	169
4.4.5	Messmasten und Datenlogger	169
4.5	Vermessung der Leistungskennlinie.....	171
4.6	Methoden zur Prognose der Windverhältnisse.....	172
4.6.1	Inhalte von Windpotentialprognosen	172
4.6.2	Prinzipien der Windpotentialermittlung.....	173
4.6.3	Wind Atlas Analysis and Application Program WAsP.....	174
4.6.4	Meso-skalige Modelle.....	178
4.6.5	Langzeitdaten und Windindizes	179
4.6.6	Measure-Correlate-Predict-Methode	181
4.6.7	Zeitliche Windleistungsvorhersage: Windwettervorhersage.....	182
5	Auslegung von Windturbinen nach Betz und Schmitz.....	188
5.1	Was lässt sich aus dem Wind an Leistung entnehmen?.....	188
5.1.1	Froude-Rankinesches Theorem.....	193
5.2	Die Tragflügeltheorie	194
5.3	Anströmverhältnisse und Luftkräfte am rotierenden Flügel	199

5.3.1	Winddreiecke	199
5.3.2	Luftkräfte am rotierenden Flügel	201
5.4	Die Betzsche Optimalauslegung	201
5.4.1	Aerodynamik	201
5.4.2	Blattbiegemomente aus Luftkräften	205
5.5	Verluste	206
5.5.1	Profilverluste	206
5.5.2	Tip-Verluste	208
5.5.3	Drallverluste	211
5.6	Die Schmitzsche Auslegung unter Berücksichtigung der Drallverluste ..	212
5.6.1	Drallverluste nach Schmitz	218
5.7	Zum Blattentwurf	219
5.7.1	Betz-Schmitz-Auslegung	219
5.7.2	Modifizierter Blattentwurf	223
5.8	Schlussbemerkung	224
6	Kennfeldberechnung und Teillastverhalten – Berechnung aus vorgegebener Blattgeometrie	230
6.1	Berechnungsverfahren (Blattelementmethode)	230
6.2	Dimensionslose Darstellung der Kennlinien	233
6.3	Dimensionslose Kennlinien eines Schnellläufers	234
6.4	Dimensionslose Kennlinien eines Langsamläufers	237
6.5	Turbinenkennfelder	239
6.6	Anströmverhältnisse	241
6.6.1	Schnellläufer - Langsamläufer: Zusammenfassung	241
6.6.2	Anströmung eines Langsamläufers	244
6.6.3	Anströmung eines Schnellläufers	245
6.7	Verhalten von Schnellläufern bei Pitchverstellung	248
6.8	Erweiterung des Berechnungsverfahrens	253
6.8.1	Anlaufbereich $\lambda < \lambda_A$ (hohe Auftriebsbeiwerte)	254
6.8.2	Leerlaufbereich $\lambda > \lambda_A$ (Glauerts empirische Formel)	256
6.8.3	Profilwiderstand	258

6.8.4	Erweiterte Iteration	260
6.9	Grenzen der Blattelementmethode und dreidimensionale Berechnungsverfahren	261
6.9.1	Auftriebsverteilung und dreidimensionale Effekte	262
6.9.2	Dynamische Strömungsablösung (Dynamic Stall).....	265
6.9.3	Singularitätenverfahren.....	266
6.9.4	Numerische Strömungssimulation bei Windkraftanlagen.....	267
6.9.5	Beispiele für CFD bei Windkraftanlagen.....	270
7	Modellgesetze und Ähnlichkeitsregeln	278
7.1	Anwendungen der Ähnlichkeitstheorie	278
7.1.1	Biegespannungen der Blätter aus Luftkräften.....	282
7.1.2	Zugspannungen in der Flügelwurzel aus den Fliehkräften	283
7.1.3	Biegespannungen in der Flügelwurzel aufgrund des Gewichts	285
7.1.4	Veränderung der Eigenfrequenzen des Flügels und der Frequenzverhältnisse	286
7.1.5	Luftkraftdämpfungen des Rotors	288
7.2	Skalierungsregeln bei elektrischen Maschinen	290
7.3	Anwendung der Skalierungsregeln auf eine Windturbine mit direkt getriebenem Generator	291
7.4	Torsionsschwingungen im skalierten Triebstrang	293
7.5	Grenzen des Skalierens – Wie groß können Windturbinen werden?	294
8	Strukturdynamik	299
8.1	Dynamische Anregungen.....	300
8.1.1	Massen-, Trägheits- und Gewichtskräfte	301
8.1.2	Aerodynamische und hydrodynamische Lasten.....	303
8.1.3	Transiente Anregungen aus Manövern und durch Störungen	311
8.2	Freie und erzwungene Schwingungen von Windturbinen – Beispiele, Phänomenologie	312
8.2.1	Turm-Gondel-Dynamik.....	312
8.2.2	Blattschwingungen.....	318
8.2.3	Triebstrangschwingungen	321

8.2.4	Teilmodelle – Gesamtsystem	323
8.2.5	Instabilitäten und weitere aeroelastische Probleme	326
8.3	Simulation der Gesamtdynamik	328
8.3.1	Modellbildung in Simulationsprogrammen	329
8.3.2	Einsatz von Simulationsprogrammen	332
8.4	Validierung durch Messungen	333
9	Richtlinien und Nachweisverfahren	336
9.1	Zertifizierung	336
9.1.1	Richtlinien zur Zertifizierung: IEC 61400	337
9.1.2	Richtlinie des DNV / Germanischen Lloyd für die Zertifizierung von Windenergieanlagen	337
9.1.3	Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung (DIBt-Richtlinie) ..	339
9.1.4	Sonstige Normen und Richtlinien	339
9.1.5	Windklassen und Standortkategorien	339
9.1.6	Lastfalldefinitionen	340
9.2	Nachweiskonzepte	341
9.2.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit und das Konzept der partiellen Sicherheitsfaktoren	341
9.2.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	343
9.2.3	Grundlagen des Betriebsfestigkeitsnachweises	343
9.3	Beispielnachweis Stahlrohrturm – einachsiger Spannungszustand und isotropes Material	347
9.3.1	Tragfähigkeitsnachweis, Nachweis Extremlasten	347
9.3.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit	349
9.3.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis, Nachweis der Eigenfrequenz	349
9.4	Nachweis der Rotornabe für mehrachsigen Spannungszustand und isotropes Material	349
9.4.1	Geometrische Auslegung	351
9.4.2	Tragfähigkeitsnachweis – Verfahren der kritischen Schnittebenen	351

9.4.3	Betriebsfestigkeitsnachweis – verfahrensabhängige Wöhlerlinien.....	353
9.5	Nachweis der Rotorblätter für einachsigen Spannungszustand und orthotropes Material	353
9.5.1	Konzept der zulässigen Dehnung zum Nachweis der Gurte	355
9.5.2	Lokales Bauteilversagen	356
9.5.3	Materialauswahl und Fertigungsverfahren	356
10	Windpumpensysteme	359
10.1	Charakteristische Anwendungen	359
10.2	Bauarten windgetriebener Pumpen	362
10.3	Zusammenwirken von Windturbine und Pumpe	366
10.3.1	Kombinationsgrundsätze für Windturbine und Pumpe.....	366
10.3.2	Qualitativer Vergleich von Windpumpensystemen mit Kolben- und Kreiselpumpe	366
10.4	Auslegung von Windpumpensystemen	374
10.4.1	Ziel der Auslegung	374
10.4.2	Wahl der Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung.....	375
10.4.3	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kolbenpumpe	376
10.4.4	Auslegung von Windpumpensystemen mit Kreiselpumpe	380
11	Drehstromgeneratoren, Komponenten der Leistungselektronik	385
11.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine)	386
11.1.1	Die Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Inselbetrieb	386
11.1.2	Erregungsarten, Innen- und Außenpolmaschine	395
11.1.3	Die synchrone Wechselstrommaschine (Dynamomaschine) im Netzparallelbetrieb.....	399
11.2	Drehstrommaschinen.....	404
11.2.1	Der Aufbau von Drehstrommaschinen.....	404
11.2.2	Die Drehstrom-Synchronmaschine	407
11.2.3	Die Drehstrom-Asynchronmaschine	408

11.3	Leistungselektronische Komponenten von Windkraftanlagen – Umrichter...	418
11.3.1	Diode, Thyristor, Transistor, IGBTs.....	418
11.3.2	Gleichrichter und Gleichstromsteller.....	420
11.3.3	Wechselrichter	423
11.3.4	Stellmöglichkeiten im Triebstrang.....	426
12	Steuerung, Regelung und Betriebsführung von Windkraftanlagen zur Netzeinspeisung.....	429
12.1	Ziele von Steuerung und Regelung netzeinspeisender Anlagen	433
12.1.1	Drehzahlvariabler Bereich, Zone 1, $v < 12$ m/s	433
12.1.2	Starkwindbereich, Zone 2, $v \approx 12 \dots 25$ m/s	436
12.2	Regler und Reglerstrukturen	439
12.3	Regelung der Blattwinkelverstellung.....	445
12.4	Azimutregelung.....	451
12.5	Triebstrangregelung über Generator und Umrichter – die Vektorregelung.....	453
12.6	Praktisches Vorgehen beim Reglerentwurf	458
12.7	Anhang.....	459
13	Anlagenkonzepte.....	464
13.1	Netzeinspeisende Anlagen.....	464
13.1.1	Das Dänische Konzept: Asynchrongenerator zur direkten Netzeinspeisung.....	466
13.1.2	Direkt einspeisender Asynchrongenerator mit dynamischer Schlupfregelung.....	472
13.1.3	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit Synchrongenerator und Umrichter mit Gleichspannungs-Zwischenkreis.....	474
13.1.4	Drehzahlvariable Windkraftanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und Umrichter im Läuferkreis.....	476
13.1.5	Leistungskurven und Gesamtwirkungsgrade von sechs Anlagen – kleiner Vergleich	478
13.2	Einzel- und Inselanlagen	481
13.2.1	Batterielader.....	482

13.2.2	Wind-Diesel-Systeme.....	489
13.2.3	Hybridsysteme.....	492
14	Betrieb von Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz.....	496
14.1	Das elektrische Verbundnetz.....	496
14.1.1	Struktur des elektrischen Verbundnetzes.....	496
14.1.2	Netzbetrieb.....	500
14.2	Windkraftanlagen im elektrischen Verbundnetz.....	509
14.2.1	Technische Anforderungen an den Netzanschluss.....	509
14.2.2	Netzurückwirkungen.....	511
14.2.3	Verhalten der Erzeugungsanlage am Netz.....	513
14.2.4	Eigenschaften von Anlagen-Konzepten im Netzbetrieb.....	516
15	Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen.....	519
15.1	Planung und Projektierung von Windparks.....	520
15.1.1	Technische und standortspezifische Planungsaspekte.....	520
15.1.2	Genehmigungsrechtliche Aspekte.....	523
15.1.3	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit.....	532
15.2	Bau und Betrieb von Windkraftanlagen.....	541
15.2.1	Technische Aspekte von Aufbau und Betrieb von Windkraftanlagen.....	542
15.2.2	Rechtliche Aspekte.....	552
15.2.3	Wirtschaftlichkeit im Betrieb.....	553
16	Offshore-Windparks.....	558
16.1	Ressourcen und technisch-wirtschaftliches Potential.....	558
16.2	Umgebungs- und Entwurfsbedingungen auf See.....	561
16.2.1	Umweltbedingungen.....	561
16.2.2	Entwurfsanforderungen für Offshore-Anlagen.....	563
16.3	Tragstruktur und Installation.....	564
16.3.1	Bauformen.....	564
16.3.2	Hydrodynamische Belastungen.....	567

16.3.3	Installation	573
16.4	Rotor-Gondel-Einheit.....	575
16.5	Netzanschluss.....	577
16.6	Betrieb und Wartung	579
Stichwortverzeichnis.....		584