

Windkraftanlagen

4. Auflage

Erich Hau

Windkraftanlagen

Grundlagen, Technik, Einsatz,
Wirtschaftlichkeit

4., vollständig neu bearbeitete Auflage

Dipl.-Ing. Erich Hau
Frühlingstraße 21
82152 Krailling

ISBN 978-3-540-72150-5

e-ISBN 978-3-540-72151-2

DOI 10.1007/978-3-540-72151-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2008, 2003, 1996 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz und Herstellung: le-tex publishing services oHG, Leipzig

Einbandgestaltung: WMXDesign, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort zur vierten Auflage

Heute ist es fast nicht mehr nötig für die Nutzung der Windenergie zu werben. Die Stromerzeugung aus Windenergie hat bereits in einigen Ländern ihren festen Platz in der Energieversorgung und ist im Begriff in fast alle Regionen der Welt vorzudringen. Die dort entstehenden Kapazitäten werden in wenigen Jahren die Windkraftnutzung in den europäischen Ländern übertreffen. Damit wird auch Deutschland, das über mehr als ein Jahrzehnt eine führende Stellung eingenommen hat, von diesem Platz verdrängt werden, wenngleich auch hierzulande mit der Erschließung des Offshore-Windenergiepotentials noch ein neues Kapitel der Windenergienutzung aufgeschlagen wird.

Welche Motive treiben diese Entwicklung an? Es sind nicht mehr allein die Anstrengungen den Klimawandel zu begrenzen und die zu Ende gehenden fossilen Brennstoffe zu schonen. Zunehmend rücken auch nüchterne wirtschaftliche Überlegungen in den Vordergrund. Steigende Kosten für Energie und immer schärfere Umweltauflagen für die Verbrennung von fossilen Brennstoffen führen unweigerlich zu stetig steigenden Stromerzeugungskosten. Die brennstoffunabhängigen und damit langfristig kalkulierbaren Kosten der Stromerzeugung aus Windenergie werden auch für die grossen Stromerzeuger attraktiv – auch ohne staatlich garantierte Einspeisevergütungen.

Die Energieversorgungsunternehmen investieren deshalb zunehmend in die Windenergie. Komplementär dazu versuchen die großen Industrieunternehmen, die traditionell im Kraftwerkbau tätig sind, in das Geschäft mit der Windenergie einzusteigen. Aber auch die Pioniere unter den Windkraftanlagenherstellern haben sich von bescheidenen Anfängen zu großen Unternehmen mit tausenden von Beschäftigten entwickelt. Die Windenergienutzung steht damit vor einem Strukturwandel der auch dazu führt, dass sie immer kommerzieller – aber auch professioneller wird.

Die technische Entwicklung der heutigen Windkraftanlagen ist durch die Evolution der bewährten technischen Konzeption gekennzeichnet. Alternativen zum Horizontalachsenrotor mit drei Rotorblättern haben sich bis heute nicht durchsetzen können. Neben dem beeindruckenden Grössenwachstum der Anlagen in den letzten Jahren wurden in einigen technologischen Bereichen bedeutsame Fortschritte erzielt. Mit einer konsequenten Optimierung der Rotor aerodynamik konnte die Effizienz einiger neuerer Anlagentypen deutlich verbessert werden. In dem Bestreben nach mechanischer Vereinfachung und Verringerung der Reparaturanfälligkeit treten getriebelose Konzeptionen noch stärker in den Vordergrund.

Auf der anderen Seite sind aber noch lange nicht alle Zuverlässigkeits- und Standfestigkeitsprobleme der heutigen Anlagen gelöst. Die Forderung, dass alle wesentlichen Kompo-

zenten einer Windkraftanlage eine wirtschaftlich kalkulierte Lebensdauer von mindestens zwanzig Jahren erreichen müssen, ist unverzichtbar. Das betrifft in erster Linie die Verbesserung der technischen Auslegungsgrundlagen für einige kritische Komponenten, aber auch die Wartungs- und Instandsetzungsstrategien. Dieser Aufgabe kommt, unterstützt durch eine moderne Fehlerdiagnose, bei der rasant wachsenden Zahl der Windkraftanlagen und ihrer weltweiten Verbreitung eine zentrale Bedeutung zu. Ohne einen deutlich verbesserten Standard auf diesem Gebiet, ist die Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen in großem Stil wirtschaftlich nicht zu vertreten.

Die skizzierten Entwicklungen und Perspektiven vor Augen, habe ich den Inhalt der vierten Auflage dieses Buches aktualisiert und erweitert. Dazu erschien es mir dieses Mal auch erforderlich die Darstellung der technischen Grundlagen zu überarbeiten und durch neue Aspekte zu ergänzen. Darüberhinaus wurden einige neue Themen mit aufgenommen und andere ausführlicher behandelt. Auch wenn der Grundaufbau des Buches beibehalten wurde, sind die Kapitel teilweise neu strukturiert, und andere Schwerpunkte gesetzt worden. Die heute aktuellen technischen Lösungen wurden stärker herausgearbeitet und von den historischen Entwicklungen abgesetzt. Insgesamt gesehen habe ich versucht die neueren Entwicklungen und Problemstellungen, soweit es mir möglich war, aufzugreifen um das Thema Windkraftanlage und ihr Umfeld auf dem aktuellen Stand der Windenergie-technik zu behandeln.

Bei der Arbeit an dieser Auflage haben mich wieder einige Personen besonders unterstützt, denen ich zu Dank verpflichtet bin. Frau Tanja Rüth hat, wie für alle vorangegangenen Auflagen, die Skizzen und Diagramme erstellt. Herr Diplom-Ingenieur Felix Nelles hat mit mir mehr als anderthalb Jahre an der Gestaltung der geänderten und neuen Texte gearbeitet, und auch inhaltliche Beiträge, unter anderem zum Thema Windkraftnutzung und CO₂-Emissionen geliefert. Nicht zuletzt gilt mein Dank dem Springer-Verlag für seine Bereitschaft das erweiterte Buch mit beträchtlichem Aufwand neu zu verlegen.

München, im April 2008

Erich Hau

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage

Einen Kommentar zur Energie- und Umweltkrise möchte ich den Lesern und mir ersparen. Zu diesem Thema ist schon so viel aus berufeneren Federn geflossen, daß mir dazu keine neuen oder gar bessere Argumente einfallen. Statt dessen stelle ich einige dem Leser dienliche Hinweise zum Gebrauch dieses Buches voran.

Das Buch trägt den Titel „Windkraftanlagen“. Dieser mit Bedacht gewählte Titel soll ausdrücken, daß die technischen Anlagen, besser sollte man vielleicht sagen: die Maschinen, zur Wandlung der Windenergie in elektrische Energie den Gegenstand dieses Buches bilden.

Unter dem Begriff „Windkraftanlage“ sind in diesem Zusammenhang industriell entwickelte und gefertigte Maschinen zu verstehen, die dazu bestimmt sind, elektrische Energie von allgemeiner Verwendbarkeit zu liefern. Wer in diesem Buch Bastelanleitungen zum Selbstbau von Windrädern sucht – so interessant dieses Hobby auch ist –, wird enttäuscht werden. An wen also richtet sich dieses Buch? Es wendet sich in erster Linie an Personen, die sich mit der Forschung, der Entwicklung, dem Bau und dem Betrieb von Windkraftanlagen beruflich zu befassen haben. Sei es, weil sie Entscheidungen auf diesem Gebiet treffen müssen, sei es, weil sie ihre eigene fachbezogene Tätigkeit in einem übergreifenden Zusammenhang einordnen wollen.

Meine Absicht ist es, mit diesem Buch einen Überblick über die Technik moderner Windkraftanlagen zu schaffen und die Orientierung in den damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Problemen zu erleichtern. Nach fast zwanzigjähriger, weltweiter Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet und einer bereits beachtlichen Anwendungsbreite von Windkraftanlagen in einigen Ländern scheinen mir die Voraussetzungen für diesen Versuch gegeben zu sein.

Diesem erklärten Ziel dienen die inhaltliche Gliederung und die Art der Darstellung. Ich habe versucht, die Probleme und technischen Lösungswege phänomenologisch zu analysieren und zu beschreiben. Formeln habe ich soweit wie möglich vermieden. Nur an den Stellen, wo mir die mathematischen Lösungsansätze für das Verständnis nützlich erschienen, sind sie angedeutet.

Detaillierte Rechenanleitungen sind deshalb in diesem Buch nicht enthalten. Statt dessen habe ich am Schluß eines jeden Kapitels ausgewählte Literaturstellen angegeben, die den Einstieg in die rechnerische Behandlung der beschriebenen Problemkreise ermöglichen. Mir erschien diese Darstellungsform angesichts des angestrebten Zieles am be-

sten geeignet zu sein. Wer Entscheidungen zu treffen oder die Zielrichtung technisch-wissenschaftlicher Arbeiten zu verantworten hat, kann sich im allgemeinen nicht selbst an den Computer setzen. Aber er muß den Stand der Technik überblicken, die Probleme verstehen und Entwicklungslinien einschätzen können.

Die Kapitel lassen sich – sofern man an der behandelten Problemstellung nicht im Detail interessiert ist – bis zu einem gewissen Grade „querlesen“ oder überschlagen, ohne daß der Gesamtzusammenhang oder das Verständnis für das nächste Kapitel verloren geht. Wer das Buch jedoch als Arbeitsunterlage benutzt und ein Kapitel durcharbeitet, wird schnell feststellen, daß sich hinter den Diagrammen eine Menge Theorie verbirgt, die im Text nicht unmittelbar sichtbar wird.

Wichtig erschien mir angesichts des angestrebten Zieles auch die Vollständigkeit und Gleichgewichtigkeit des Inhaltes. Bücher, die in aller Ausführlichkeit auf die aerodynamische Berechnung des Rotors eingehen, aber das elektrische System oder die Auslegung des Turmes einer Windkraftanlage mit wenigen Sätzen abhandeln, mögen für den Aerodynamiker von Nutzen sein, für jemand, der das System „Windkraftanlage“ ganzheitlich beurteilen muß, ist der Wert jedoch sehr eingeschränkt. Ich bin mir allerdings darüber im Klaren, daß der Versuch einer umfassenden Darstellung der Technik moderner Windkraftanlagen nur im Ansatz gelungen sein kann.

Ein Buch, das eine Reihe verschiedener Fachdisziplinen berührt, schreibt man nicht ohne fremde Hilfe. Ich habe deshalb einer Reihe von Personen zu danken, die mir dabei geholfen haben. Ohne ihre bereitwillige und sachkundige Mithilfe wäre das Buch nicht entstanden.

In erster Linie bin ich meinen ehemaligen Arbeitskollegen von der Firma MAN zu großem Dank verpflichtet. Vor allem mein langjähriger Freund und Arbeitskollege Gerald Huß, der in unserer Abteilung für das Gebiet „Aerodynamik“ verantwortlich war, hat nicht nur zahlreiche fachliche Beiträge geliefert, sondern hat mit mir die mit dem Buch zusammenhängenden Fragen diskutiert und mich dabei oft auf den richtigen Weg gebracht. In diesem Zusammenhang möchte ich auch erwähnen, daß der Inhalt dieses Buches sich weitgehend auf Ergebnisse aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten stützt, die vom Bundesministerium für Forschung und Technologie sowie von der Kommission der Europäischen Gemeinschaft gefördert wurden.

Auch dem Springer-Verlag sei an dieser Stelle für seine Bereitschaft gedankt, das Buch zu verlegen und es in dieser ansprechenden Form zu gestalten.

München, im Juli 1988

Erich Hau

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XXI
1 Windmühlen und Windräder	1
1.1 Über die Ursprünge der Windmühlen	1
1.2 Europäische Windmühlentypen	4
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Windmühlen	12
1.4 Wissenschaft und technische Entwicklung im Windmühlenbau	14
1.5 Die amerikanische Windturbine	18
Literatur	22
2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche	23
2.1 Poul La Cour – Ein Pionier in Dänemark	23
2.2 Windkraftwerke – Große Pläne in Deutschland	29
2.3 1 250 kW aus dem Wind – Die erste Großanlage in den USA	33
2.4 Windkraftanlagen in den 50er Jahren – Vor der Energiekrise	36
2.5 Nach der Energiekrise – Aufbruch in die moderne Windenergienutzung .	44
2.6 Die großen Versuchsanlagen der 80er Jahre	47
2.7 Der erste Erfolg der kleinen Windkraftanlagen in Dänemark	56
2.8 Die amerikanischen Windfarmen	58
Literatur	63
3 Bauformen von Windkraftanlagen	65
3.1 Rotoren mit vertikaler Drehachse	66
3.2 Horizontalachsen-Rotoren	69
3.3 Windenergie-Konzentratoren	72
3.4 Begriffe und Bezeichnungen	77
Literatur	78
4 Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung	79
4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz	79
4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergieumwandler	84
Literatur	87

5	Aerodynamik des Rotors	89
5.1	Physikalisch-mathematische Modelle und Berechnungsverfahren	90
5.1.1	Blattelementtheorie	91
5.1.2	Wirbelmodell der Rotorströmung	96
5.1.3	Numerische Strömungssimulation	98
5.1.4	Rotornachlaufströmung	99
5.2	Leistungscharakteristik des Rotors	103
5.2.1	Rotorleistungskennfeld	103
5.2.2	Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten	105
5.3	Aerodynamische Leistungsregelung	107
5.3.1	Blatteinstellwinkelregelung	108
5.3.2	Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall)	113
5.3.3	Aktive Steuerung der Strömungsablösung	118
5.3.4	Instationäre Effekte und Grenzschichtbeeinflussung	119
5.3.5	Aus dem Wind drehen	122
5.4	Das aerodynamische Profil	123
5.4.1	Charakteristische Eigenschaften	123
5.4.2	Profilgeometrie und Systematik	126
5.4.3	Laminarprofile	131
5.4.4	Einfluß auf den Rotorleistungsbeiwert	135
5.5	Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik	137
5.5.1	Anzahl der Rotorblätter	137
5.5.2	Optimale Form des Blattumrisses	139
5.5.3	Verwindung der Rotorblätter	145
5.5.4	Blattdicke	147
5.5.5	Auslegungsschnellaufzahl	148
5.6	Ausgeführte Rotorblätter	151
5.7	Windrichtungsnachführung des Rotors	154
5.8	Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren	158
5.9	Experimentelle Rotor-aerodynamik	163
5.9.1	Modellmessungen im Windkanal	163
5.9.2	Messungen an Originalanlagen	166
	Literatur	168
6	Belastungen und Strukturbeanspruchungen	171
6.1	Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage	172
6.2	Koordinatensysteme und Bezeichnungen	174
6.3	Ursachen der Belastungen	175
6.3.1	Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte	176
6.3.2	Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung	177
6.3.3	Höhenprofil der Windgeschwindigkeit	181
6.3.4	Schräganströmung des Rotors	182
6.3.5	Turmumströmung	183
6.3.6	Windturbulenz und Böen	188
6.4	Lastannahmen	192

6.4.1	Internationale und nationale Normen	193
6.4.2	Klassifizierung der Windkraftanlagen und Windzonen	196
6.4.3	Normale Windbedingungen	198
6.4.4	Extreme Windbedingungen	199
6.4.5	Andere Umwelteinflüsse	200
6.4.6	Sonstige externe Bedingungen	201
6.4.7	Sicherheitsfaktoren	202
6.5	Maschinenstatus und Lastfälle	203
6.5.1	Normaler Betrieb	204
6.5.2	Technische Störungen	206
6.6	Beanspruchungsarten und Strukturdimensionierung	208
6.7	Ermüdungsfestigkeit	209
6.7.1	Lastkollektive	210
6.7.2	Mathematische Modelle und Berechnungsverfahren	213
6.8	Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen	220
6.8.1	Anzahl der Rotorblätter	220
6.8.2	Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor	222
6.8.3	Steifigkeit der Rotorblätter	225
6.8.4	Regelungssystem	226
6.8.5	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise	229
6.9	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen	232
6.9.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern	233
6.9.2	Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen	234
Literatur		237
7	Rotorblätter	239
7.1	Materialfragen	240
7.2	Vorbild: Flugzeugtragflügel	242
7.3	Frühere experimentelle Bauweisen von Rotorblättern	245
7.3.1	Genietete Aluminiumkonstruktionen	245
7.3.2	Stahlbauweisen	247
7.3.3	Traditionelle Holzbauweise	251
7.3.4	Ältere Faserverbundbauweisen	252
7.3.5	Holz-Epoxid-Verbundbauweise	257
7.4	Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik	258
7.4.1	Faserverbund-Technologie	258
7.4.2	Konstruktive Auslegung der Rotorblätter	260
7.4.3	Fertigungsverfahren	261
7.5	Blattanschluß zur Rotornabe	264
7.6	Rotorblattbauweisen im Vergleich	268
7.7	Aerodynamische Bremsklappen	272
7.8	Blitzschutz	274
7.9	Enteisung	275
Literatur		276

8	Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus	277
8.1	Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung	278
8.2	Experimentelle Konzeptionen	281
8.2.1	Generator im Turmfuß	281
8.2.2	Generator senkrecht im Turmkopf	283
8.3	Heutige Standardbauweisen	284
8.3.1	Generatorantrieb mit Übersetzungsgetriebe	284
8.3.2	Getriebeloser Triebstrang	285
8.4	Rotornabe	287
8.4.1	Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren	289
8.4.2	Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren	290
8.5	Blattverstellmechanismus	294
8.5.1	Rotorblattlagerung	296
8.5.2	Blattverstellsysteme mit hydraulischem Antrieb	299
8.5.3	Blattverstellsysteme mit elektrischem Antrieb	301
8.5.4	Passive Blattverstellung	304
8.5.5	Redundanz- und Sicherheitsfragen	305
8.6	Rotorlagerung	307
8.6.1	Lagerprobleme	307
8.6.2	Rotorwelle mit separaten Lagern	310
8.6.3	Dreipunkt-Lagerung von Rotorwelle und Getriebe	311
8.6.4	Rotorlagerung im Getriebe	313
8.6.5	„Einlager“-Konzeption	314
8.6.6	Rotorlagerung auf einer feststehenden Achse	315
8.7	Rotorbremse	316
8.8	Übersetzungsgetriebe	319
8.8.1	Getriebebauarten	319
8.8.2	Äußere Belastungsvorgaben für das Getriebe	323
8.8.3	Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung	326
8.8.4	Wirkungsgrad und Geräuschentwicklung	327
8.9	Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe	330
8.10	Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang	332
8.11	Einbau des elektrischen Generators	335
8.12	Maschinenhaus	338
8.12.1	Hilfsaggregate und sonstige Einbauten	338
8.12.2	Bauweise und statische Konzeption	340
8.12.3	Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte	343
8.13	Windrichtungsnachführung	346
8.14	Zusammenbau und Funktionsprüfung	350
	Literatur	352

9	Elektrisches System	353
9.1	Generatorbauarten	354
9.1.1	Synchrongenerator	354
9.1.2	Asynchrongenerator	358
9.1.3	Generatoren mit Permanentmagneterregung	362
9.2	Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen	364
9.3	Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung	367
9.3.1	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	368
9.3.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	369
9.3.3	Asynchrongenerator mit variablem Schlupf	371
9.3.4	Drehzahlgestufte Generatorsysteme	372
9.4	Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter	374
9.4.1	Frequenzumrichter	375
9.4.2	Synchrongenerator mit Frequenzumformer	378
9.4.3	Asynchrongenerator mit übersynchroner Stromrichtererkaskade . .	380
9.4.4	Doppeltgespeister Asynchrongenerator	381
9.5	Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatorsysteme	384
9.5.1	Synchrongenerator mit elektrischer Erregung	384
9.5.2	Generatorsysteme mit Permanentmagnet-Generatoren	386
9.6	Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage	388
9.6.1	Große Anlagen	389
9.6.2	Kleine und mittlere Anlagen	391
9.7	Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich	393
Literatur	396
 10	 Regelung und Betriebsführung	 397
10.1	Betriebsdatenerfassung	398
10.1.1	Betriebswindmeßsystem	399
10.1.2	Elektrische Leistungsmessung	401
10.2	Sicherheitssystem	403
10.3	Prinzipielle Funktionsweise der Regelungssysteme	403
10.4	Windrichtungsnachführung	405
10.5	Leistungsregelung und Drehzahlführung durch Verstellen des Rotorblatteinstellwinkels	407
10.5.1	Regelstrecken und rechnerische Simulation	409
10.5.2	Betrieb mit direkt netzgekoppeltem Generator	413
10.5.3	Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablem Generator und Frequenzumrichter	418
10.5.4	Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz	420
10.6	Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall	422
10.6.1	Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	422
10.6.2	Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	423
10.6.3	Aktive Stall-Regelung	425
10.7	Betriebsführung und Betriebszyklus	427

10.7.1	Betriebszustände	428
10.7.2	Zusammenwirken mit dem Stromnetz	430
	Literatur	433
11	Schwingungsverhalten	435
11.1	Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade	436
11.2	Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter	438
11.2.1	Statische Divergenz	439
11.2.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen	440
11.2.3	Typische Rotorblattschwingungen	442
11.3	Torsionsschwingungen des Triebstrangs	444
11.3.1	Mechanisches Ersatzmodell	445
11.3.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung	448
11.3.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	449
11.3.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen	452
11.4	Dynamik der Windrichtungsnachführung	454
11.4.1	Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse	455
11.4.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen	457
11.5	Schwingungen der Gesamtanlage	459
11.5.1	Turmsteifigkeit	459
11.5.2	Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen	461
11.6	Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens	467
	Literatur	471
12	Der Turm	473
12.1	Bauarten und Varianten	474
12.2	Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen	477
12.3	Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften	479
12.4	Freitragende Stahlrohtürme	480
12.4.1	Steifigkeit und Baumasse	480
12.4.2	Konstruktion und Fertigungstechnik	482
12.4.3	Aufstiegshilfen und Einbauten	485
12.5	Betontürme	488
12.5.1	Ortbeton-Bauweise	489
12.5.2	Beton-Fertigteilbauweise	491
12.6	Gittertürme	495
12.7	Turm-Konzeptionen im Vergleich	498
12.8	Fundament	500
	Literatur	503
13	Windverhältnisse	505
13.1	Ursachen des Windes und globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten	505
13.2	Windverhältnisse in Europa und in Deutschland	508
13.3	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten	512

13.3.1	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten	512
13.3.2	Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe	515
13.3.3	Stetigkeit des Windes	517
13.3.4	Windturbulenz und Böen	523
13.4	Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse	526
13.5	Ermittlung der Windgeschwindigkeit	528
13.5.1	Windmessungen	528
13.5.2	Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung nach dem Europäischen Windatlas	533
13.5.3	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern	536
Literatur		538
14	Leistungsabgabe und Energielieferung	539
14.1	Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung	540
14.1.1	Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl	540
14.1.2	Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung	545
14.1.3	Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang	547
14.1.4	Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen	550
14.2	Normierte Leistungskennlinie	551
14.2.1	Definitionen, Eigenschaften und Gewährleistung	551
14.2.2	Vermessung der Leistungskennlinie	553
14.3	Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie	559
14.3.1	Schwieriges Gelände	559
14.3.2	Luftdichte	560
14.3.3	Turbulenz	563
14.3.4	Sonstige wetterbedingte Einflüsse	565
14.3.5	Verschmutzung der Rotorblätter	565
14.4	Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe	567
14.5	Jahresenergielieferung	569
14.5.1	Berechnungsverfahren	569
14.5.2	Winddaten am Aufstellort	572
14.5.3	Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung	574
14.5.4	Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor	577
14.5.5	Sicherheitsabschläge	580
14.6	Wichtige Entwurfsparameter und Energielieferung	582
14.6.1	Anlagen-Leistungsbeiwert	583
14.6.2	Rotordurchmesser	584
14.6.3	Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität	585
14.6.4	Leistungsregelung	588
14.6.5	Installierte Generatorleistung	589
14.6.6	Nabenhöhe des Rotors	592
14.6.7	Betriebswindgeschwindigkeitsbereich	593

14.6.8	Die Windkraftanlage als Energiewandler – eine grundsätzliche Betrachtung	594
Literatur	595
15	Umweltverhalten	597
15.1	Gefahren für die Umgebung	598
15.1.1	Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen?	598
15.1.2	Risikobetrachtungen	601
15.2	Geräuscentwicklung	602
15.2.1	Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte	602
15.2.2	Geräuschquellen bei Windkraftanlagen	605
15.2.3	Geräuscentwicklung gegenwärtiger Anlagen	609
15.3	Schattenwurf	613
15.4	Störungen von Funk und Fernsehen	617
15.5	Störungen der Vogelwelt	620
15.6	Landverbrauch	621
15.7	Optische Beeinträchtigung der Landschaft	623
15.8	Windenergienutzung und Klimaschutz	625
15.8.1	Einfluß auf das Umgebungs-klima	626
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO ₂ -Emissionen	626
Literatur	628
16	Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche	631
16.1	Windkraftanlagen im Inselbetrieb	632
16.1.1	Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherproblematik	633
16.1.2	Heizen mit Windenergie	638
16.1.3	Wasserpumpen	641
16.1.4	Entsalzen von Meerwasser	644
16.2	Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen	647
16.3	Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz	652
16.3.1	Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb	652
16.3.2	Windfarmen und Windparks	653
16.4	Windkraftanlagen im Kraftwerkverbund der Energieversorgungsunternehmen	657
16.4.1	Die Regelungsproblematik	658
16.4.2	Das Verbundnetz	661
16.4.3	Beitrag zur gesicherten Leistung	663
16.5	Windkraftanlagenindustrie, Absatzmärkte, Windenergiepotential	664
16.5.1	Entwicklung der Absatzmärkte	665
16.5.2	Die Windkraftanlagenhersteller	667
16.5.3	Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen	670
16.5.4	Über das Windenergiepotential	673
Literatur	677

17	Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere	679
17.1	Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen . . .	680
17.1.1	Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen	680
17.1.2	Gründung auf dem Meeresgrund	683
17.1.3	Elektrische Konzeption	688
17.2	Transport und Montage	694
17.3	Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen	697
17.3.1	Wetterbedingte Zugänglichkeit	697
17.3.2	Wartung und Instandhaltung	699
17.4	Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee	700
17.4.1	Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse	700
17.4.2	Völkerrechtliche Situation	704
17.4.3	Genehmigungsverfahren	706
17.4.4	Die ersten Offshore-Windparks	709
17.4.5	Kommerzielle Offshore-Windparks	710
	Literatur	719
18	Planung, Errichtung und Betrieb	721
18.1	Projektentwicklung	722
18.2	Genehmigungsverfahren	724
18.2.1	Gesetze und Regelwerke	725
18.2.2	Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien . . .	727
18.2.3	Baugenehmigung für kleine Anlagen	729
18.2.4	Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG	730
18.3	Technische Auslegung von Windparks	732
18.3.1	Aerodynamik der Feldaufstellung	732
18.3.2	Bauliche Infrastruktur	736
18.3.3	Interne elektrische Verkabelung	738
18.3.4	Netzanschluß	742
18.4	Transportprobleme	748
18.5	Errichtung am Aufstellort	752
18.5.1	Standardverfahren	752
18.5.2	Errichtung ohne schwere Hebezeuge	756
18.5.3	Extrem große Anlagen	759
18.5.4	Große Experimentalanlagen mit Zweiblattrotor	762
18.6	Inbetriebnahme	766
18.6.1	Kommerzielle Anlagen und Windparks	767
18.6.2	Versuchsanlagen und Prototypen	768
18.7	Technische Betriebsführung	769
18.7.1	Erfassung der Betriebsdaten	770
18.7.2	Übergeordnete Betriebsführung von großen Windparks	774
18.7.3	Technische Zustandsüberwachung	775
18.8	Betriebssicherheit	777
18.8.1	Technische Sicherheitssysteme	777
18.8.2	Gefahren durch extreme Wetterlagen	782

18.9	Wartung und Instandsetzung	787
18.9.1	Reguläre Wartung	788
18.9.2	Schadensursachen und Reparaturrisiken	789
18.9.3	Statistische Auswertungen	793
	Literatur	795
19	Kosten von Windkraftanlagen und Anwendungsprojekten	797
19.1	Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen	798
19.1.1	Spezifische Kosten und Bezugsgrößen	799
19.1.2	Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten	801
19.1.3	Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen	805
19.1.4	Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten	808
19.1.5	Herstellkosten der heutigen Windkraftanlagen	810
19.1.6	Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten	815
19.1.7	Kostendegression in der Serienfertigung	818
19.1.8	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung	820
19.1.9	Alternative technische Konzeptionen	820
19.1.10	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen	822
19.1.11	Preiskalkulation in der Serienfertigung und Verkaufspreise von Windkraftanlagen	824
19.2	Investitionskosten von schlüsselfertigen Anwendungsprojekten	827
19.2.1	Projektentwicklung	827
19.2.2	Fundamente und Geländeerschließung	828
19.2.3	Netzanschluß und Verkabelung	829
19.2.4	Sonstige Kosten	832
19.2.5	Typische Kostenbeispiele	833
19.3	Betriebskosten	837
19.3.1	Wartung und Instandsetzung	837
19.3.2	Versicherungen	839
19.3.3	Sonstige Betriebskosten	840
19.3.4	Gesamte jährliche Betriebskosten	841
19.4	Offshore-Projekte	842
19.4.1	Investitionskosten	842
19.4.2	Betriebskosten	847
	Literatur	849
20	Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Windenergie	851
20.1	Finanzierung und gesellschaftsrechtliche Organisation	852
20.2	Stromerzeugungskosten und Amortisationszeiten	855
20.2.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung	855
20.2.2	Statische Betrachtungsweise	856
20.2.3	Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit	863
20.3	Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich zu anderen Energiesystemen	870
20.4	Energetische Amortisation von Windkraftanlagen	873

20.5 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung	874
20.6 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der erneuerbaren Energien	875
Literatur	877
Glossar – englische Fachausdrücke	879
Deutsch – Englisch	879
Englisch – Deutsch	890
 Sachverzeichnis	 901

Häufig verwendete Symbole

v_w	Windgeschwindigkeit (m/s)
\bar{v}_w	mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)
v_{wN}	Nennwindgeschwindigkeit (m/s)
v_r	resultierende Anströmgeschwindigkeit (m/s)
D	Rotordurchmesser (m)
R	Rotorradius (m)
A	Rotorkreisfläche (m ²)
H	Höhe (m)
n	Rotordrehzahl (U/min)
ω	Winkelgeschwindigkeit (rad/s)
r	örtlicher Rotorradius (m)
u	örtliche Umfangsgeschwindigkeit (m/s)
ψ	Rotorumlaufwinkel bei Rotordrehung (grad)
α	aerodynamischer Anstellwinkel (grad), (auch Hellmann-Exponent)
ϑ	Blatteinstellwinkel (grad) (auch: Polradwinkel)
λ	Schnellaufzahl
c	Rotorblatttiefe/Profil-Sehnen-Länge (m)
F_A	aerodynamischer Auftrieb (N)
F_W	aerodynamischer Widerstand (N)
M_T	aerodynamisches Torsionsmoment (Nm)
F_S	(Rotor-)Schub (N)
M	(Rotor-)Drehmoment (Nm)
P	Leistung (W)
c_{PR}	Rotor-Leistungsbeiwert
c_P	Anlagen-Leistungsbeiwert
c_A	aerodynamischer Auftriebskoeffizient
c_{AA}	aerodynamischer Auslegungs-Auftriebskoeffizient
c_W	Widerstandskoeffizient
c_{MT}	Torsionsmomenten-Koeffizient
c_{SR}	Rotor-Schubkoeffizient
c_M	Rotor-Drehmomentenkoeffizient
f	Netzfrequenz (Hz)
U	Spannung (V)
R	elektrischer Widerstand (Ω)

I	Stromstärke (A)
φ	elektrischer Phasenwinkel
n_{syn}	synchrone Drehzahl (U/min)
n_{mech}	mechanische Drehzahl (U/min)
s	Schlupf
η	Wirkungsgrad
Φ	Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitsverteilung
A	Skalierungsparameter der Windgeschwindigkeitsverteilung
k	Formparameter der Windgeschwindigkeit
σ_0	Turbulenzintensität (%)
α	Hellmann-Exponent, (auch aerodyn. Anstellwinkel)
p	Luftdruck (mbar)
t	Temperatur (C)
ρ	Luftdichte (kg/m^3)
ν	kinematische Zähigkeit der Luft (m^2/s)

Kapitel 1

Windmühlen und Windräder

Die Nutzung der Windenergie ist keine neue Technologie, sie ist die Wiederentdeckung einer traditionsreichen Technik. Wie bedeutend die Windkrafttechnik in der Vergangenheit war, lassen die übriggebliebenen Reste der historischen „Windkraftanlagen“ heute nicht mehr erkennen. So vollständig war der Siegeszug der billigen Energieträger Kohle und Öl und der bequemen Energieverteilung durch die Elektrizität, daß sich die Verlierer, die Windmühlen und Windräder, nur in unbedeutenden ökonomischen Nischen halten konnten. Nachdem die Energieerzeugung durch Verbrennung von Kohle und Öl oder Spaltung von Uranatomen auf zunehmende Widerstände stößt – was auch immer die unterschiedlichen Gründe dafür sein mögen –, war die Wiederentdeckung der Windkraft eine nahezu zwangsläufige Folge.

Nun könnte man dagegen einwenden, daß Nostalgie alleine noch kein brauchbares Rezept sei, um die zukünftigen Energieprobleme zu lösen. Letzten Endes geht es nicht mehr um Getreidemahlen und Wasserschöpfen, sondern um den Energiebedarf moderner Industriegesellschaften. Der Blick zurück zeigt jedoch, daß die Windenergie-technik zu Beginn unseres Jahrhunderts den Anschluß an die Energieform „Elektrizität“, zu der es heute keine Alternative mehr gibt, keineswegs verpaßt hatte oder dazu ungeeignet gewesen wäre. Gemessen an den bescheidenen Mitteln einiger Pioniere waren die Erfolge, mit Windkraft Strom zu erzeugen, beachtlich. In einigen Fällen ging die Stromerzeugung aus Windenergie bereits über das Experimentieren hinaus.

Eine Erinnerung an die historischen Wurzeln der Windkrafttechnik ist deshalb auch im Rahmen der Beschäftigung mit modernen Windkraftanlagen mehr als nur eine Feierabendlektüre. Die technischen Lösungen und die wirtschaftlichen Bedingungen, die in der Vergangenheit zu Erfolgen und Mißerfolgen führten, geben durchaus noch Hinweise für die heutige und zukünftige Entwicklung. Dieses Buch beginnt deshalb mit einem Rückblick in die Vergangenheit.

1.1 Über die Ursprünge der Windmühlen

Über die historischen Ursprünge der Windmühlen gibt es widersprüchliche Spekulationen. Manche Autoren wollen in Ägypten bei Alexandria die steinernen Überreste von

Windmühlen entdeckt haben, die 3 000 Jahre alt sein sollen [1]. Wirklich beweiskräftige Belege, daß die Ägypter, Phönizier, Griechen oder Römer Windmühlen gekannt haben, gibt es nicht.

Die erste zuverlässige Kunde aus historischen Quellen von der Existenz einer Windmühle stammt aus dem Jahr 644 nach Christus [2]. Es wird von einer Windmühle aus dem persisch-afghanischen Grenzgebiet Seistan berichtet. Eine spätere Beschreibung mit einer Skizze datiert aus dem Jahr 945 und zeigt eine Windmühle mit vertikaler Drehachse. Sie wurde offensichtlich zum Getreidemahlen benutzt. Ähnliche, außerordentlich primitive Windmühlen sind bis in unsere Tage in Afghanistan erhalten geblieben (Bild 1.1).



Bild 1.1: Vertikalachsen-Windmühle zum Getreidemahlen aus Afghanistan (Foto Deutsches Museum)

Einige Jahrhunderte später kommen die ersten Hinweise nach Europa, daß auch in China Windräder zum Entwässern der Reisfelder benutzt werden. Ob die Chinesen die Windmühlen bereits vor den Persern gekannt haben und die europäischen Mühlen vielleicht nur ein Ableger einer chinesischen Erfindung waren, scheint heute nicht mehr feststellbar zu sein. Bemerkenswert ist, daß auch die chinesischen Windräder, einfache Konstruktion aus Bambusrohren und Stoffsegel, wie die Windmühle aus Afghanistan über eine vertikale Drehachse verfügen (Bild 1.2).



Bild 1.2: Chinesisches Windrad zum Wasserschöpfen (Foto Deutsches Museum)

Die Windmühle mit horizontaler Drehachse, also die klassische Windmühle, wurde wahrscheinlich unabhängig von den Vertikalachsen-Windrädern des Orients in Europa erfunden. Der erste belegbare Hinweis stammt aus dem Jahre 1180 aus dem damaligen Herzogtum Normandie. Danach soll dort eine sogenannte *Bockwindmühle* gestanden haben. Ähnliche Hinweise deuten auch auf die Provinz Brabant, wo 1119 bereits eine Bockwindmühle erbaut worden sein soll. Aus diesem nordwestlichen Gebiet von Europa verbreiteten sich die Windmühlen sehr schnell über ganz Nord- und Osteuropa bis nach Finnland und Rußland [3]. In Deutschland findet man die Bockwindmühlen im 13. Jahrhundert bereits in großer Zahl (Bild 1.3).

Ein oder zwei Jahrhunderte später treten neben den ganz aus Holz gebauten Bockwindmühlen sogenannte *Turmwindmühlen* auf. Das Windrad befindet sich bei dieser Bauart auf einem steinernen, runden Turm. Diese Mühlenart verbreitete sich vor allem von Südwest-Frankreich in den Mittelmeerraum und wird deshalb auch als mittelmeerischer Typus angesprochen.

Ob die ersten Bock- und Turmwindmühlen bereits nach der Windrichtung drehbar waren, ist nicht zuverlässig überliefert. Die Windrichtungsnachführung wurde jedoch bei der Bockwindmühle schnell üblich. Die Bockwindmühle hielt sich in ihrer einfachen und zweckmäßigen Form bis ins zwanzigste Jahrhundert.

In Holland setzten sich im sechzehnten Jahrhundert dann einige entscheidende Verbesserungen bei den Windmühlen durch, die zu einem neuen Mühlentyp, der „*Holländer-Mühle*“, führten. Ob hierfür die Bockwindmühle oder die in einigen Exemplaren auch im Norden verbreitete Turmwindmühle Pate gestanden hat, ist nicht bekannt. Mit dem feststehenden Mühlenbau der Holländer-Windmühlen, bei dem nur noch die Turmkappe mit

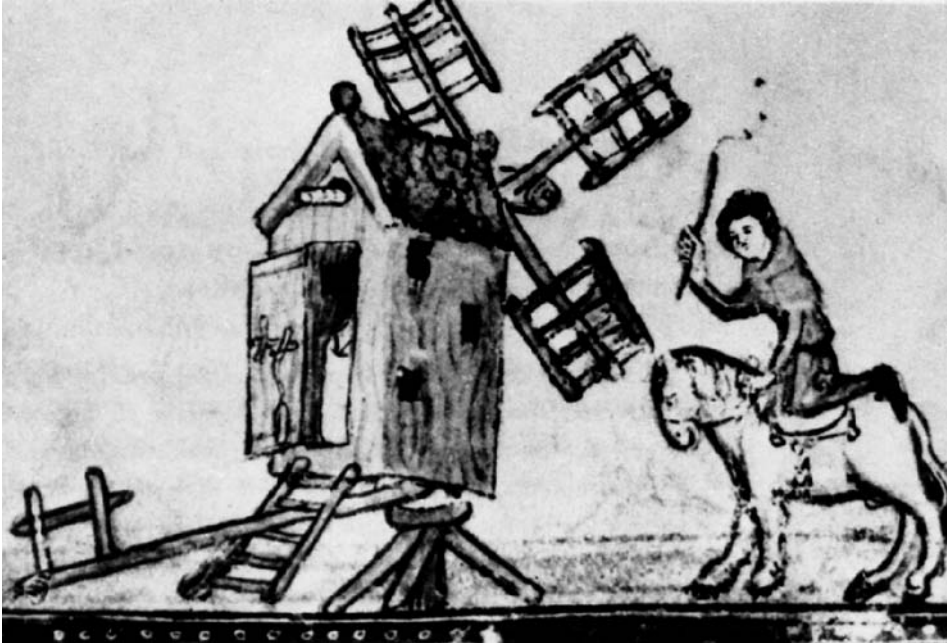


Bild 1.3: Deutsche Bockwindmühle im fünfzehnten Jahrhundert
(Foto Deutsches Museum)

dem Windrad gedreht wurde, ließen sich sowohl die Dimensionen als auch die Anwendungsbreite der Windmühlen steigern. Die historische Windmühle fand damit gegen Mitte des neunzehnten Jahrhunderts ihre Vollendung.

1.2 Europäische Windmühlentypen

Die im Verlauf der geschichtlichen Entwicklung entstandenen Windmühlentypen haben sich interessanterweise in ihren ursprünglichen Formen bis in die Gegenwart nebeneinander behaupten können. Selbst die archaischen Vertikalachsen-Windräder des Orients sind nicht vollständig verschwunden. In Europa hat die leistungsfähigere Holländer-Mühle die einfachere Bockwindmühle nicht verdrängen können. Offensichtlich war die erheblich billigere Bockwindmühle, solange es nur um das Mahlen von Getreide in kleineren Mengen ging, die wirtschaftlichere Lösung. Vor diesem Hintergrund ist ein Blick in die Technik der verschiedenen Windmühlentypen durchaus lohnend.

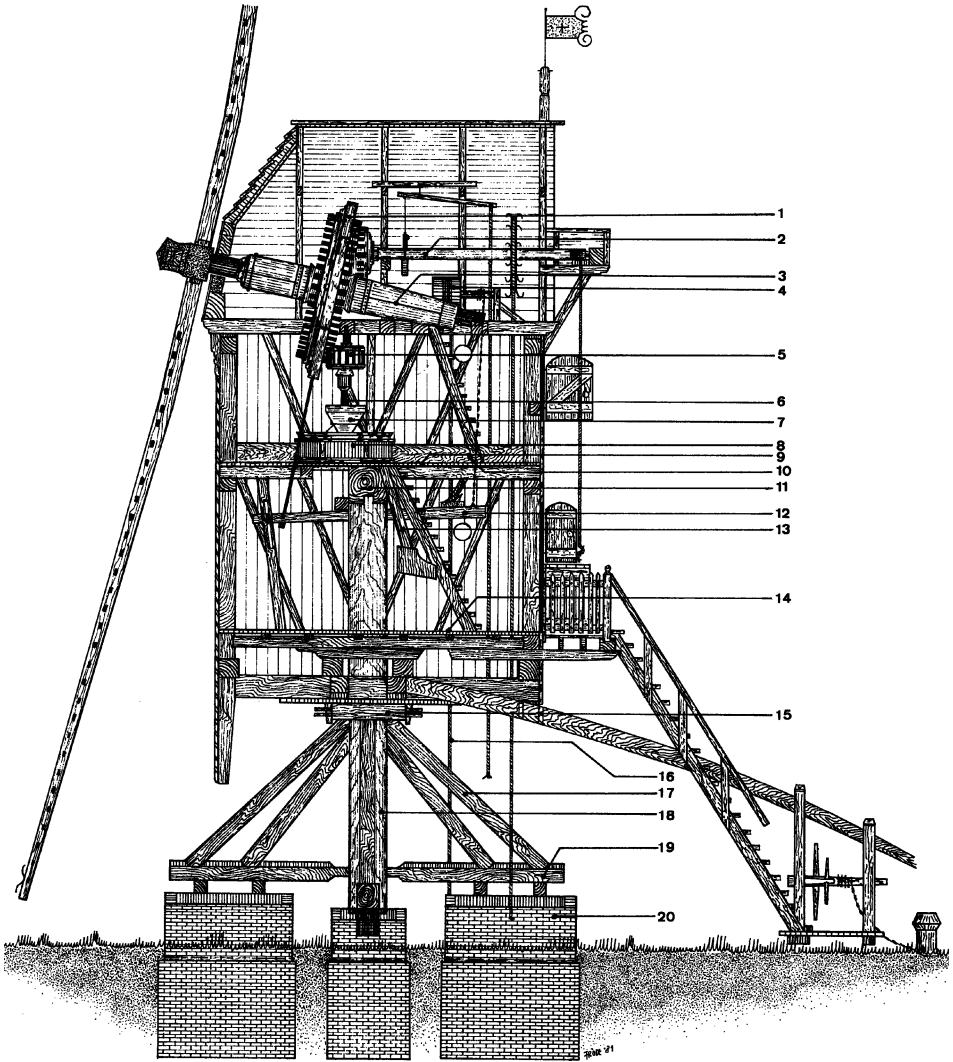
Bockwindmühle

Das Charakteristikum der Bockwindmühle ist der Bock auf dem das ganze Mühlenhaus drehbar gelagert ist (Bild 1.4). Der Bock besteht aus einem zentralen Hausbaum oder Ständer, der mit vier diagonalen Kreuzstreben versteift ist. Er ragt bis etwa zur halben Höhe



Bild 1.4: Deutsche Bockwindmühle (Foto Fröde)

in das Mühlenhaus und ist dort mit dem sogenannten Mehlbalken, der das Mahlwerk trägt, verbunden (Bild 1.5). Der Mehlbalken teilt das Mühlenhaus in eine obere Etage, den Steinspeicher, und in ein unteres Stockwerk, den Mehlspeicher.



Bockwindmühle, Aufriß

- 1 Kammrad mit Backenbremse
- 2 Aufzug
- 3 Flügelwelle
- 4 Trommelbremse
- 5 Spindelrad
- 6 Spindel

- 7 Mahltrichter
- 8 Mahlwerk
- 9 Steinboden
- 10 Mehlleiste
- 11 Hammer oder Mehlbalken
- 12 Bremsbalken
- 13 Mehlrutsche

- 14 Mehlboden
- 15 Sattel
- 16 Bremsseil
- 17 Kreuzstrebe
- 18 Hausbaum oder Ständer
- 19 Kreuzschwelle
- 20 Steinsockel

Bild 1.5: Aufbau einer Bockwindmühle [2]

Das in der Regel vierflügelige Windrad ist im oberen Mühlenhaus gelagert. Die leicht geneigte Flügelwelle trägt das sogenannte Kammrad mit großem Durchmesser. Das Kammrad treibt über das waagrecht liegende kleinere Kronrad oder den Bunkler die vertikale Königswelle an. Die Königswelle ist mit dem Mahlstein verbunden. Die Flügel der Bockwindmühle sind in Mitteleuropa fast immer mit Tuch bespannt. Im Norden und Osten Europas waren auch holzbeschlagene Flügel üblich. Die Drehung des Mühlenhauses erfolgt mit Hilfe des sogenannten Sterz, der an der Rückwand befestigt ist und bis nahezu auf den Erdboden auskragt. Die Drehung wird mit einer Seilhaspel erleichtert, deren Seil um konzentrisch um die Mühle angeordnete Pflöcke geschlungen wird. Die Bockwindmühlen waren nahezu vollständig aus Holz gebaut und wurden ausschließlich zum Getreidemahlen verwendet. Die äußere Form weist zahlreiche regionale Unterschiede auf.

Wippmühle

In den Anfängen des 15. Jahrhunderts stellte man Versuche an, die Bockwindmühle zum Antrieb von Wasserschöpfwerken einzusetzen. Das drehbare Mühlenhaus bot jedoch keine geeigneten Voraussetzungen. So kam es in Holland zu einer Weiterentwicklung der Bockwindmühle, zur sogenannten *Wippmühle* (Bild 1.6). Bei dieser wurde ein feststehender, meist pyramidenförmiger Unterbau eingeführt, der den Antrieb des Schöpfwerkes oder später auch des Mahlwerkes aufnahm. Das drehbare Mühlenhäuschen enthielt nur noch die Lagerung des Windrades mit Kammrad und Bunkler. Eine Art Köcher, durch den die verlängerte Königswelle geführt wurde, bildete die Verbindung vom Mühlenhäuschen zum feststehenden Unterbau. Dieser Köcher gab der Wippmühle auch den Namen Köcher- oder Kokermühle. Wippmühlen wurden in Holland vorwiegend zur Entwässerung eingesetzt und später auch zum Getreidemahlen und Holzsägen.

Turmwindmühle

Die *Turmwindmühle*, deren Mühlenhaus aus einem steinernen Rundbau besteht, verbreitete sich hauptsächlich im Mittelmeerraum. Ursprünglich konnte das Windrad nicht nach der Windrichtung ausgerichtet werden. Später lagerte man die Flügelradwelle so, daß sie – ziemlich mühsam – in mehrere Lagerpositionen umgesteckt werden konnte und somit zumindest eine grobe Ausrichtung nach dem Wind möglich wurde. Die mittelalterlichen Turmwindmühlen wurden im östlichen Mittelmeerraum mit den charakteristischen Dreiecksegel-Windrädern gebaut (Bild 1.7). In anderen Regionen waren auch Segelgatterflügel üblich. Große Turmwindmühlen wurden viel später gebaut. Sie dürften eher als Varianten der Holländer-Mühlen anzusprechen sein und haben sich vermutlich unabhängig vom Mittelmeertypus entwickelt.

Holländer-Windmühle

Der Grundgedanke, der zur Konstruktion der Holländer-Windmühle führte, war der gleiche, der bereits die Weiterentwicklung der Bockwindmühle zur Wippmühle auslöste. Man war bestrebt, der Mühle einen festen Stand zu geben, um damit bessere Voraussetzungen



Bild 1.6: Wipp- oder Köchermühle



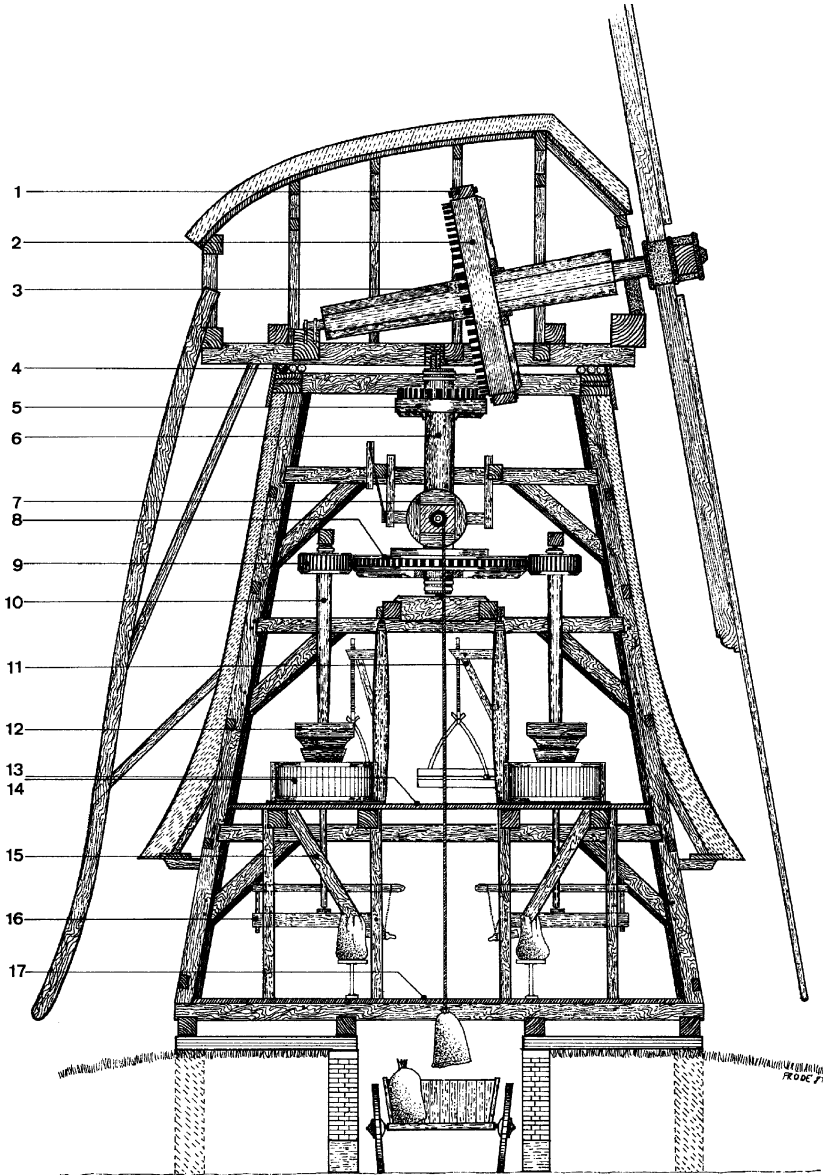
Bild 1.7: Griechische Turmwindmühle



Bild 1.8: Holländer-Windmühle (Galerietyp) (Foto Fröde)

zum Antrieb der Arbeitsmaschinen zu schaffen. Der Gedanke lag nahe, das gesamte Mühlenhaus feststehend zu bauen und nur noch die Dachhaube mit dem Windrad drehbar zu lagern (Bild 1.8).

Mit dieser Bauweise konnte man erheblich größere und leistungsfähigere Mühlen bauen. Das voluminöse, feststehende Mühlenhaus besaß nun die Voraussetzungen, unter-



- | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--|
| Holländer-Windmühle, Aufriß | 6 Königswelle oder König | 12 Mahltrichter |
| 1 Backenbremse | 7 Sackaufzug | 13 Steinboden |
| 2 Kammerad | 8 Stirnrad | 14 Mahlgang |
| 3 Flügelwelle | 9 Spindelrad | 15 Mehrtrutsche |
| 4 Rollenlager der Dachhaube | 10 Spindel | 16 Hebevorrichtung für den Läuferstein |
| 5 Bunkler oder Kronrad | 11 Steinkran | 17 Mehlboden |

Bild 1.9: Holländer-Windmühle, schematisch [2]