

Wechselwirkungen Jahrbuch 1992 UNI - Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

Karsten Baumann und Günter Baumbach	Ozon und neuartige Waldschäden – besteht ein Zusammenhang?	3
Karl Brederick	Restaurierung und Konservierung von geschädigtem und vom Zerfall bedrohten Schriftgut in Archiven und Bibliotheken	19
Heiner Dörner	Windenergie – Praktische Nutzung contra akademische Theorie	30
Gerhard Drees und Thomas Bohn	Wirtschaftlichkeit und Kostenplanung von Kommunalen Abwasserreinigungsanlagen	44
Siegfried F. Franke	Bipolare Mehr-Parteien-Systeme und das Aufkommen neuer Parteien: Das Beispiel der Republikaner	57
E. D. Gilles, M. Faul, U. Kabatek, M. Sandler	Automatisierung des Schiffsverkehrs auf Wasserstraßen	68
Klaus Höllig	B-Splines in der geometrischen Datenverarbeitung	77
Peter Hübner	Kreativität, eine Voraussetzung für das Entwerfen – entwerfen bedeutet immer auch verwerfen	85
Fritz Pfisterer, Markus Schubert und Thomas Walter	Dünnschichtsolarzellen – die Option für die Zukunft der Photovoltaik	101
Hartmut Seyfried und Reinhold Leinfelder	Meeresspiegelschwankungen – Ursachen, Folgen, Wechselwirkungen	112
Peter F. Schlottke	Kinder mit Aufmerksamkeitsstörungen – Woran sind sie zu erkennen, was ist zu tun?	128
Hermann Schnabl	Die Universität Stuttgart am <i>Jahrtausend</i> Ende	139

Windenergie – Praktische Nutzung contra akademische Theorie

von Heiner Dörner

Die Menschheit nutzt die Windenergie schon länger als 5000 Jahre. So alt sind ägyptische Tempelreliefs, die die Ausnutzung der Windenergie durch Segel zur Fortbewegung eines Bootes auf dem Nil zeigen. Um 2140 vor unserer Zeitrechnung betreiben die Ägypter Hochseeschiffahrt. Der Ägypter Isefi fährt mit einem Schiff durch das Rote Meer, die Meerenge Bab Al Mandab und den Golf von Aden nach Punt an der Somaliküste. Es handelt sich dabei eindeutig um eine Handelsreise, denn er bringt Harze und Edelhölzer mit.

In Persien und China benutzte man um 900 Segelwindmühlen zum Wasserpumpen. Der arabische Forscher Istachri berichtet 934 darüber und Dismaschi beschreibt 1271 diese Windmühlen ausführlich. Der Gedanke, solche Segel-Windmühlen zu bauen, geht sehr wahrscheinlich auf die buddhistischen Gebetsmühlen zurück, die zunächst als kleine Handtrommeln durch Schleudern oder durch Drehen von Hand in Rotation versetzt wurden, um Gebetstexte in ihrem Inneren gen Himmel zu schicken. Aus Bequemlichkeit und für den Dauerbetrieb stattet man diese Gebetsmühlen mit kleinen Windrädern aus. Diese chinesischen Segelwindmühlen bestehen aus einer senkrechten Achse, an deren oberen Ende zwölf verstellbare Segel befestigt sind. Das Gerät entspricht einem Segelkarussell, dessen Segel sich je nach Stellung am Umfang, aber auch je nach Windstärke einstellen. Beim Wasserpumpen benutzten die Chinesen die Archimedische Schraube, die Archimedes schon ca. 250 vor Christus erfunden hatte.

Kenntnisse aus dem Orient

- Kreuzfahrer bringen die Kenntnis der Windmühlen aus dem Orient nach Europa.
- 1332 rät Bartholomeo Verde den Venetianern, Windmühlen zu bauen.
- Die Chronik der Stadt Speyer weist 1393 die Bestellung eines holländischen Technikers zum Bau einer Windmühle auf.

- Aus den Jahren um 1430 existieren Zeichnungen von deutschen Bockwindmühlen, die sogar einen Sackaufzug eingebaut haben.
- Deutsche Ordensritter entwässern das Weichseldelta mit Windmühlen.
- Leonardo da Vinci schlägt 1550 vor, das Mühlenhaus fest zu bauen und die Windflügel in dem drehbaren Dach zu lagern.
- Die Deutsche Bockwindmühle drehte noch das Windrad mitsamt dem Mühlenhaus in die richtige Windrichtung.
- Erst die Holländermühle nimmt da Vinci's Idee auf: nur noch der Windmühlen-Kopf dreht zusammen mit den Flügeln dem Wind nach. Die Leistung dieser Turm-

windmühlen mit bis zu 15 Meter langen Flügeln erreicht etwa 30 Kilowatt. Um die Haube der Holländermühle nicht von Hand in den Wind drehen zu müssen, erfand 1745 der Engländer Edmund Lee ein Hilfswindrad, das bis heute auch bei modernen Anlagen noch gebräuchliche Seitenrad. Verändert der Wind seine Richtung, so setzt er dieses Hilfswindrad in Bewegung. Über ein Untersetzungsgetriebe bewegt das Rad dann die Mühlenhaube so lange, bis der Hauptrotor wieder richtig im Wind steht. Das Seitenrad stellt damit eine immer aktive, mechanische und automatische Windrichtungsnachführung dar.

Der praktische Nutzen schlägt sich nieder: Mit Hilfe von 51 großen Windmühlen legt der holländische

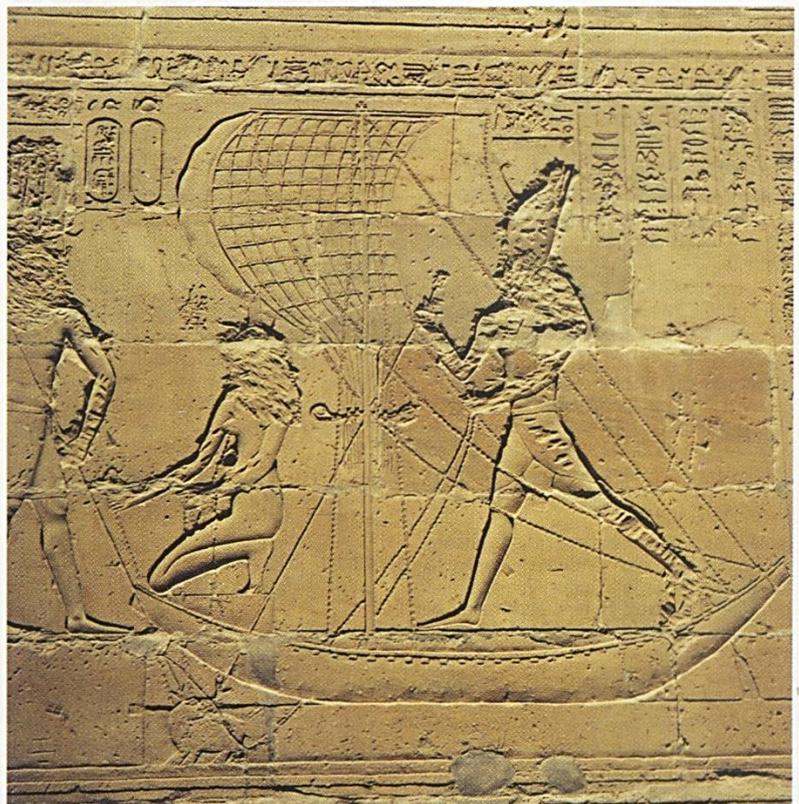


Abb. 1: Nutzung der Windenergie durch Segelboote im alten Ägypten.

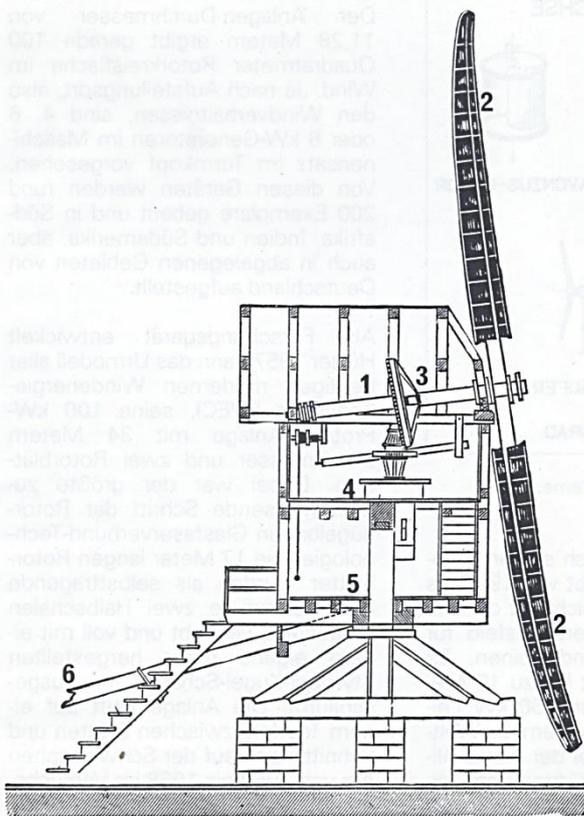


Abb. 2: Deutsche Bockwindmühle. Ziffern: 1 = Hauptwelle, 2 = Flügel, 3 = Kegelradgetriebe, 4 = Läufer, 5 = Königswelle, 6 = Verstellsturz zur manuellen Windnachführung.

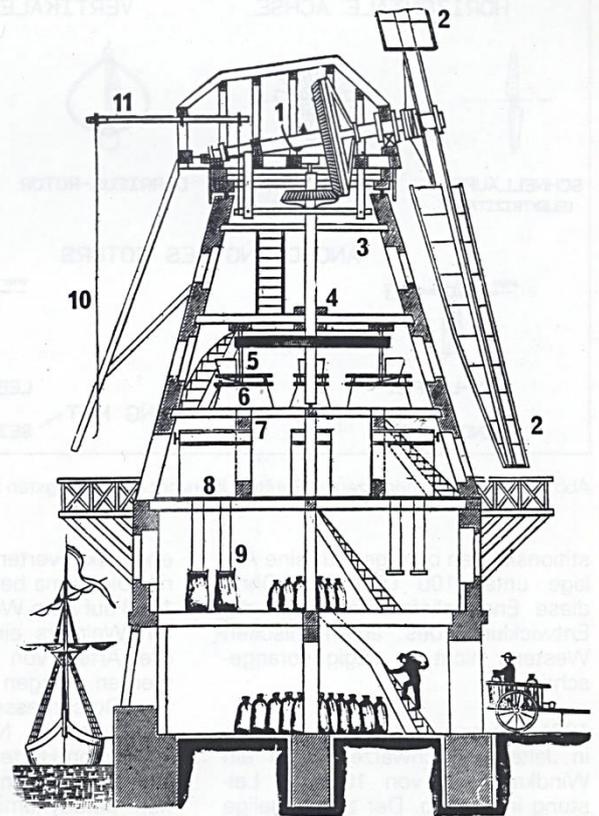


Abb. 3: Holländer Windmühle. Ziffern: 1 = Hauptwelle, 2 = Flügel, 3 = Kegelradgetriebe, 4 = Königswelle, 5 = Kammräder, 6 = Mahlgänge mit Mühlsteinen, 7 = Mehlschnecken, 8 = Sortiereinrichtung, 9 = Absackröhren, 10 = Zugseil mit Verstellsturz (manuell), 11 = Bremsbalken.

Ingenieur Leegwather von 1631 bis 1635 den Schermerpolder zur Landgewinnung trocken. Zwischen 1600 und 1700 beherrscht holländisches, in Windmühlen gesägtes Schnittholz den Markt, von Rußland bis zum Mittelmeer. Um 1800 stehen in Deutschland ca. 22 000 Windmühlen, in Dänemark über 3 000, in Holland über 8 000 und in Großbritannien nahezu 10 000 Anlagen. Doch ab 1840 setzt das große Mühlensterben ein, die „Naturanlagen“ können mit den Dampfmaschinen nicht konkurrieren.

Um die Jahrhundertwende wird in den USA die Amerikanische Windturbine zum Wasserpumpen entwickelt. Man nennt sie auch „western mill“, da sie den Westen optisch eindrucksvoll bestimmt. Einfach gebogene Bleche, bis zu 48 Stück, bilden den Rotor, der von ein oder zwei Kreisringen gehalten wird. Dabei werden Durchmesser bis zu 12 Metern verwirklicht, wobei die Leistung auch bei starkem Wind bescheiden bei ca. 1 Kilowatt bleibt.

Doch jede auftretende Krisenzeit ließ das Interesse an der Windenergienutzung wieder aufleben, sei es nach dem 1. und auch nach dem 2. Weltkrieg oder nach der ersten Weltenergiekrise 1972. Ob diese erste Energiekrise politisch provoziert wurde, als die Tanker zur Aufrechterhaltung eines hohen Ölpreises den langen Weg um Afrika herum, also am Kap der Guten Hoffnung vorbei, nehmen mußten, braucht heute nicht mehr untersucht oder gewertet zu werden.

1925 läßt sich der Franzose G. J. M. Darrieus seinen „Darrieus-Rotor“ patentieren, der auf das rund 1000 Jahre alte Prinzip der persischen Windmühle mit senkrechter Achse zurückgeht. Bei einem ersten Modell setzt er an das Ende der Achse eine rotierende Querstange an, die an jedem Ende einen schlanken senkrechten Flügel trägt. Das ist die Geburt des H-Darrieus-Rotors, der von der Form her dem Buchstaben H entspricht. Später bildet Darrieus seine Rotoren so aus, daß die beiden gegenständigen Flügel als schmale biegsame Streifen bauchig

vom oberen zum unteren Ende der Drehachse verlaufen. Mathematisch beschreiben damit die Rotorblätter eine Seilkurve, das heißt sie folgen einer Cosinus-hyperbolicus-Funktion.

In der nordamerikanischen Landwirtschaft arbeiten um 1930 mehrere Millionen Windturbinen. Die von ihnen abgegebene Kraft wird mechanisch genutzt, etwa zum Antrieb von Brunnenpumpen oder Bewässerungsanlagen. Die Rundfunkindustrie propagiert in dieser Zeit in den USA die „Verwendung der freien Windkraft für Batteriewindlader“. Das ist die Stunde des US-Amerikaners Marcellus Jacobs. Er bringt mit seinem 32-Volt-„Windcharger“ von 1,8 Metern Durchmesser und 2 Flügeln eine Windturbine mit integriertem elektrischen Dynamo auf den Markt. Jacobs, der Sohn eines Viehzüchters, verwendet „Propeller“, die den Flugzeug-Luftschrauben gleichen. Seine Kleinanlagen liefern unmittelbar den elektrischen Strom für einzelne Haushalte, vor allem aber für abgelegene Höfe und Farmen. Die Inve-

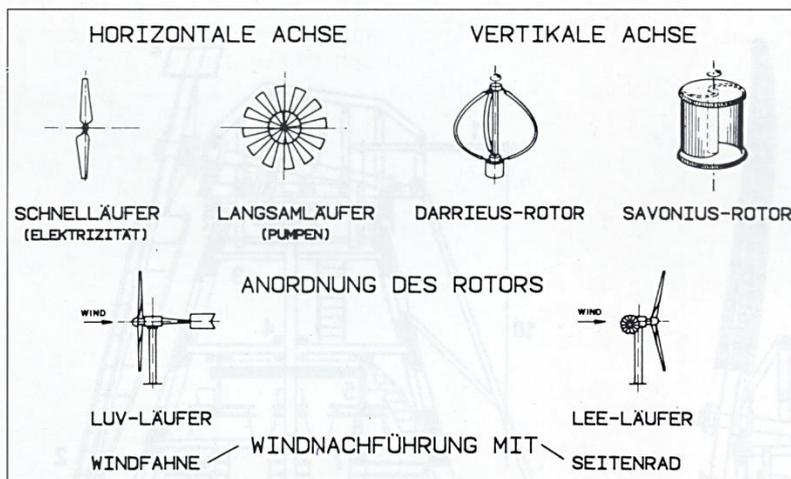


Abb. 4: Typische windnutzende Geräte, Übersicht der wichtigsten Systeme.

stitionskosten betragen für eine Anlage unter 100 US-Dollar. Ohne diese Energielieferanten wäre die Entwicklung des amerikanischen Westens nicht so zügig vorangeschritten.

1931 nehmen russische Ingenieure in Jalta am Schwarzen Meer ein Windkraftwerk von 100 kW Leistung in Betrieb. Der zweiflügelige Rotor hat 30 Meter Durchmesser.

In Deutschland plant Hermann Honnef in den 30er Jahren 400 Meter hohe Gittertürme mit bis zu 5 Rotoren mit je 160 Meter Durchmesser, wobei er bis zu 20 Megawatt Leistung in ein solches Gerät installieren will.

Ab 1934 entwickelt das Ingenieur-Gespann Smith und Putnam in den USA die damals größte Windturbine der Welt. Auf dem Grandpa's Knob in Vermont, nahe Rutland oberhalb des „Champlain Valley“, wurde eine 2flügelige Windturbine mit 53,2 Meter Durchmesser und 1 250 Kilowatt installierter Leistung errichtet. Die Anlage läuft bis 1945 zufriedenstellend, wird nach einem Rotorblatt-Schaden allerdings nicht mehr in Betrieb genommen. Ein Rotorblatt von 8 Tonnen Masse hatte sich eines Nachts von der Nabenbefestigung bei der 7-Uhr/13-Uhr-Stellung des Zweiflügelrotors mit einem 750-Foot-Flug, also ca. 230 Meter weit, verabschiedet.

Urmodell von Ulrich Hütter entwickelt

Ulrich Hütter, Professor am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart von 1959 bis 1980, entwickelt bei der Firma Ventimotor GmbH in Weimar ab 1939 Wind-

energiekonverter nach seiner Theorie. Die Firma betreibt von 1939 bis 1943 auf dem Wehbicht vor den Toren Weimars ein Versuchsfeld für alle Arten von Windturbinen. Es werden Anlagen mit bis zu 18 Metern Durchmesser und 50 kW Leistung erprobt. Nach dem 2. Weltkrieg kann Hütter bei der Firma Allgaier in Uhingen, Württemberg, einen aerodynamisch hochwertigen Schnellläufer mit 3 Rotorblättern in

Stahlblechbauweise verwirklichen. Der Anlagen-Durchmesser von 11,28 Metern ergibt gerade 100 Quadratmeter Rotorkreisfläche im Wind. Je nach Aufstellungsort, also den Windverhältnissen, sind 4, 6 oder 8 kW-Generatoren im Maschinensatz im Turmkopf vorgesehen. Von diesen Geräten werden rund 200 Exemplare gebaut und in Südafrika, Indien und Südamerika, aber auch in abgelegenen Gebieten von Deutschland aufgestellt.

Als Forschungsgerät entwickelt Hütter 1957 dann das Urmodell aller heutigen modernen Windenergie-Konverter (WEC), seine 100 kW-Prototyp-Anlage mit 34 Metern Durchmesser und zwei Rotorblättern. Dabei war der größte zukunftsweisende Schritt der Rotorflügelbau in Glasfaserverbund-Technologie. Die 17 Meter langen Rotorblätter wurden als selbsttragende Bauteile aus je zwei Halbschalen hergestellt, verklebt und voll mit einem eigens dafür hergestellten Styropor-Kugel-Schaum ausgeschäumt. Die Anlage läuft auf einem Testfeld zwischen Stötten und Schnittlingen auf der Schwäbischen Alb von 1959 bis 1968 im Versuchsbetrieb. Dabei erfolgt eine automatische Netzeinspeisung. Von dieser

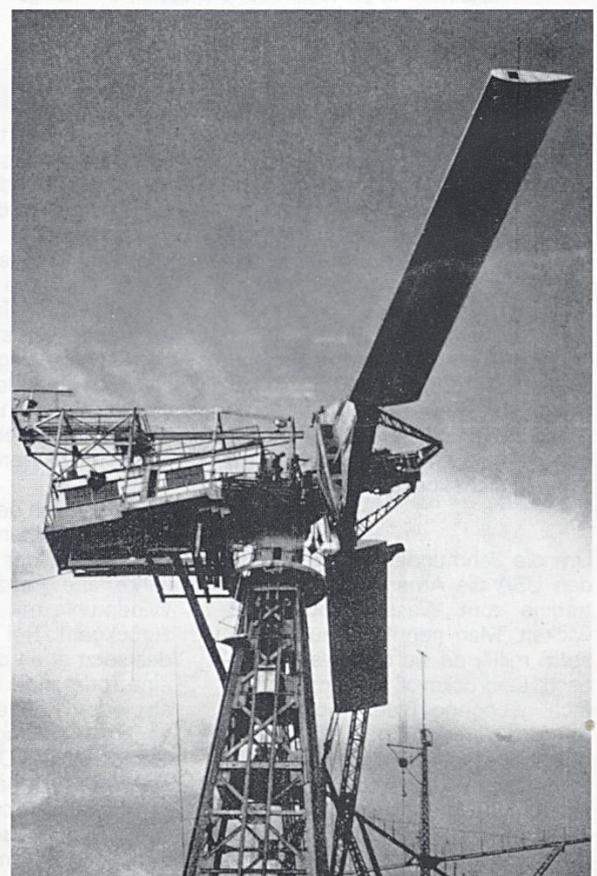


Abb. 5: Die amerikanische Smith-Putnam-Anlage auf dem „Grandpa's Knob“ in Vermont, USA, 1939 – 1945. 1,25 MW installierte Leistung, 53,2 Meter Durchmesser, Nabenhöhe 32,6 Meter, 2-flügeliger Lee-Läufer.

richtungsweisenden Anlage ist noch ein Rotorblatt erhalten, nachdem die Anlage 1968 aus Mangel an Interesse an der Windenergie von Menschenhand geschleift wurde. Das Rotorblatt steht als mahrender Energiefinger im Universitätsgelände Vaihingen vor dem Gebäude Pfaffenwaldring 31.

In den 80er Jahren hat die DFVLR Stuttgart das alte Testfeld Stötten/Schnittlingen wieder in Betrieb genommen. Es erhält den Namen „Ulrich Hütter Windtestfeld“. Verschiedene Anlagen-Typen werden getestet, eine 10-kW-Modulanlage und die WEC-52 Voith-Hütter-Maschine mit 52 Meter Durchmesser und einer Leistung von rund 300 kW am Rotor. Die DEBRA-25, eine andere Maschine, ist mit zwei Generatoren von 45 und 55 kW bei 25 Metern Rotordurchmesser ausgestattet. Bei starkem Wind arbeiten beide Generatoren zusammen. Das Gerät wird im Rahmen des Deutsch-Brasilianischen Wissenschaftsabkommens konstruiert, gebaut und im Versuchsbetrieb gefahren. Automatische Netzeinspeisung ist dabei selbstverständlich. Die Firma Köster in Heide, Schleswig-Holstein, baut das Gerät unter dem Namen Adler 25 in Lizenz nach.

1990 verabschiedet sich die nun in DLR umbenannte Forschungseinrichtung mit dem Stuttgarter Institut von der Windenergieforschung. Das heute schon historische Testfeld wird inzwischen von einer neuen Nutzergruppe betrieben. Ihr gehören an: Die Neckarwerke Esslingen als Hauptfinanzier; die Fachhochschule für Technik, Esslingen, FHTE, Professor Schnabel; die Fachhochschule Aalen, Professor Weber, und die Universität Stuttgart mit dem Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, ISD, Professor Kröplin, sowie dem Institut für Flugzeugbau, IFB, Professor Arendts.

Aus der Geschichte lernen. Kann das der Mensch wirklich?

Heute sind freifahrende Turbinen nach dem System Hütter Standardangebote vieler Anlagenhersteller. Einzelanlagen und Windfarmen beherrschen inzwischen optisch eine Vielzahl von Landschaften unserer Erde. Sie zeugen zwar von dem „politischen Willen“ der Menschen, die Naturkraft Wind als umweltfreundliches Angebot zu nutzen, doch den endgültigen Durchbruch hat diese saubere Energiewandlungsart im Rahmen ihrer

Möglichkeiten noch lange nicht geschafft.

Theorie erfordert Phantasie – Die Luftfahrttechnik „beflügelt“ die Windmühlen

Die Bewegung der Atmosphäre wird durch die Zufuhr von Strahlungsenergie der Sonne aufrechterhalten. Die Gesamtenergie der auf die Atmosphäre treffenden Sonnenstrahlung beträgt etwa $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh/a. Energie, die über Windener-



Abb. 6: Das Urmodell aller modernen Windenergie-Konverter, die Hütter StGW-34 Anlage. 100 kW Leistung bei einer Windgeschwindigkeit von 8,5 Meter je Sekunde, Rotordurchmesser der 2flügeligen Anlage: 34 Meter, Standort Stötten/Schnittlingen auf der Schwäbischen Alb von 1957 bis 1968. Rotorblätter erste Großbauteile aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK).

gie-Konverter (WEC) aus dem Luftmeer gewandelt in elektrische Energie entnommen wird, ist also eine sekundäre Form der Solarenergie. Die Größe der Bewegungsenergie, die in allen Windströmen enthalten ist, kann über Langzeitmessungen von Boden- und Höhenwinden sowie aus den Zuggeschwindigkeiten von Wetterfronten abgeschätzt werden. Bekannt gewordene Schätzungen ergaben, daß 1,5 bis 2,5 % der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie ständig in Strömungsenergie der Atmosphäre umgesetzt werden, nämlich $2,3$ bis $3,8 \cdot 10^7$ Terawattstunden pro Jahr, das entspricht einer mittleren Leistung von 2 600 bis 4 300 Terawatt. Weltweit sind heu-

te in allen für die Elektrizitätsversorgung gebauten Kraftwerken ca. 100 Terawatt Leistung installiert.

Bis zu 3 % der Bewegungsenergie der Atmosphäre – das sind $6,9$ bis $11,4 \cdot 10^5$ Terawattstunden (1 114 000 Terawattstunden) – könnten global durch Windenergie-Konverter aus der Atmosphäre entnommen werden. Der gesamte Primärenergieverbrauch weltweit, d. h. alle Energiearten zusammen, betrug 1989 äquivalent rund 83 000 Terawattstunden, 1991 schon über 90 000 TWh. Die Elektrizität hatte dabei weltweit gemittelt einen Anteil von rund 12 % am Primärenergiebedarf.

Damit steckt in der umweltfreundlichen, regenerativen Windenergie ein vielfaches Potential gegenüber dem Weltenergiebedarf von heute.

Bevor der theoretische Hintergrund von windnutzenden Geräten an der Schwelle zum 20. Jahrhundert von verschiedenen Wissenschaftlern beleuchtet wurde, waren nur Praktiker am Werk gewesen.

Die Holländer schufen während drei Jahrhunderten ihre nahezu bis zur Perfektion ausgereiften Windmühlen mit 4 Flügeln oder Rotorblättern, wie der Fachmann sagt. Die größten Mühlen erreichten bis 30 Meter Rotordurchmesser und bei entsprechender Windgeschwindigkeit Leistungen bis 30 kW. Die Flügelzahl-Festlegung auf 4 Stück mit der eingebauten Verdrehung, d. h. Verwindung des einzelnen Flügels, erfolgte auf iterativem Wege, also durch probieren. Auch die Nabenbildung war bei der Wahl von 4 Flügeln einfacher zu bewerkstelligen. Die Holme oder Ruten der einzelnen Blätter konnten in Holzbauweise leicht über Kreuz geführt und verbunden werden. Das Anfertigen von Holzrahmen, Holzmasten oder -bäumen war ja aus dem Segelschiffsbau wohlbekannt.

Damit die Windradflügel bei Sturm nicht beschädigt wurden, mußten die Flächen veränderlich sein. Es gab zwei prinzipiell unterschiedliche Konstruktionen. Man baute Flügel mit Segeltuchspannung, die sich bei zu starkem Wind reffen ließ. Der Mensch war also wichtigstes Regelungsmitglied bei der Sturmsicherung. Aber auch bei der zweiten Lösung kam es im Ernstfall auf den Menschen an, von Hand verstellbare Holzjalousien machten die Flügel winddurchlässig. 1772 befestigte der schottische Mühlenbauer Andrew Meike die Jalousienblätter an Federn, die sie normalerweise

geschlossen hielten. Voller Sturm überwand die Federkraft, so daß der Luftstrom ungenutzt durch die Flügel streichen konnte und der Mensch in der Regelungskette nicht mehr gebraucht wurde. Auch das immer und automatisch wirkende Seitenrad zur Rotornachführung gehört in die Rubrik: Entlastung des Menschen von eintönigen immer wiederkehrenden Aufgaben.

Vorurteile gegen Windenergie

Psychologisch interessant für heute sind dabei die aus dieser Zeit stammenden Vorurteile gegen die Windenergie. Der Windmüller liegt träumend im Gras, im Mund einen Strohhalm kauend. Er sieht den treibenden Wolken nach, hinter ihm klappert die Windmühle, mahlt das Korn. Weht der Wind heute nicht, so weht er morgen und verrichtet die notwendige Arbeit eben später. Der Windmüller arbeitet also überhaupt nur, wenn der Wind bläst.

Diese Beschreibung der Windenergienutzung, quasi als antiquierte, unzuverlässige „grüne“ Energiequelle, schadete zu Beginn der 70er Jahre der Wiedergeburt der Windenergienutzung ganz erheblich. Das war auch mit ein Grund, warum dieser Energiewandlungsmöglichkeit über Jahre hinweg bei den fest etablierten Energieversorgungsunternehmen keine Chance eingeräumt wurde, denn ein Energie-Markt-Manager, der über Lieferverträge, Energiemengen, Kaltreserven, den Ölpreis oder eine Konzessionsabgabe nachdenkt, glaubt, mit der Windenergie nichts anfangen zu können.

Die Windmühlenkonstruktionen wirkten sich sehr stark auf den Maschinenbau der Neuzeit aus. Die Handwerker des 18. Jahrhunderts, die immer größere Windmühlen errichteten und regelmäßig warteten, waren keine „Kunstmeister“ mehr sondern praktische Vorgänger der modernen Maschinenbau-Ingenieure. Sie arbeiteten nach den Gesetzen der klassischen Mechanik und erfanden zahlreiche Maschinenelemente und ausgeklügelte Regelungsmechanismen. Allerdings erfolgten die Fortschritte in drei Jahrhunderten Windmühlenbau zumeist nach dem Prinzip: „learning by doing“, neudeutsch ausgedrückt: „probieren statt theoretisieren“.

Meisterwerk der Mechanik

Heute gelten die alten Holländermühlen als imposante niederländi-

sche Touristenattraktion. An ihnen kann man einige hervorragende mechanische Details bewundern. Zum Beispiel die lebensdauerhafte Lagerung der Hauptrotorwelle in offenen Speckstein-Gleitlager-Halbschalen, eine sehr einfache und fast wartungsfreie Lagerlösung. Auch die Kegelradübersetzung von der Hauptwelle auf die schnelle, vertikale Königswelle im Turminnen, die als Hauptabtriebswelle für alle mechanisch angetriebenen Mahlwerke, Aufzüge oder Pumpen-Untersysteme dient, stellt ein Meisterwerk der Mechanik und Zimmermannskunst dar. Holz war der am einfachsten zu bearbeitende Werkstoff, aber auch der lebensdauerhafteste. Große Kegel-Holzzahnräder mit über 3 Metern Durchmesser wurden am Radkranz mit Einzelzähnen bestückt. Brach ein Zahn aus, so war er sehr einfach zu ersetzen. Der teure Radkranz blieb so über Jahrzehnte funktionstüchtig. Diese Konstruktionsphilosophie hat später die Metallindustrie bei gußeisernen Großzahnradern übernommen. War ein Gußzahn gebrochen, war die billigste und beste Lösung der Austausch von Zahnsegmenten am Radkranz, d. h. es mußte nicht das ganze Rad in den Schrott.

Ende des 19. Jahrhunderts begannen dann Wissenschaftler ernsthaft die Theorie der Windenergienutzung zu bearbeiten. Der dänische Wissenschaftler La Cour schuf 1891 den ersten Windkanal zur Untersuchung von Windmühlenmodellen. Diese Untersuchungen fanden aber durch den verstärkten Einsatz von Elektrizität, gewonnen aus fossilen Energieträgern, und durch die im wahrsten Sinn des Wortes explosionsartig steigende Verwendung der Verbrennungsmotoren ein schnelles Ende.

Die Krisenzeit nach dem ersten Weltkrieg brachte dann ein Aufleben des Interesses an der „alten“ Windenergie. Namen wie Honnef, Betz und Prandtl stehen dafür als Vertreter. Honnef, der Bauingenieur, gilt als erster Verfechter der Windenergienutzung in großem Stil. Er wollte Riesenrotoren mit 160 Metern Durchmesser und mehr als 20 Megawatt Leistung im einzelnen Gerät verwirklichen, wobei er zukunftsweisend auch an die offshore Aufstellung dachte. Allerdings unterschätzte Honnef sicher die dynamischen Probleme von solchen Riesenanlagen. Er hatte vorher seine Erfahrungen als Baustatiker beim Bau des damals höchsten Sendemastes für den Rundfunk in Königswusterhausen bei Berlin ge-

sammelt. Honnef kam aber über Vorversuche an Kleinanlagen nicht hinaus. Manche Journalisten meinen noch heute, er sei ein verkanntes Genie gewesen. Die in dieser Zeit projektprüfende Reichsarbeitsgemeinschaft Windkraft führte dagegen in einer Stellungnahme zu den Honnef-Projekten aus: Der Antragsteller sollte besser Windkanalversuche durchführen als Werbefilme zu drehen. Diese Aussage schmälert Honnefs Ideen aber keineswegs.

Betz und Prandtl haben in der Strömungslehre einen ganz anderen Stellenwert. Beide sind hervorragende Wissenschaftler, ohne die die Luftfahrttechnik-Theorie undenkbar ist. Aerodynamik am Flugzeug, genauer gesagt an der Tragfläche, kann ähnlich an der Luftschraube, d. h. dem Propeller, oder auch am Windrotor-Flügel, der freifahrenden Turbine, gesehen werden.

Betz hat 1929 eine heute immer noch mustergültige und absolut geltende Grenze der Windenergienutzung aufgezeigt. Sein allein aus der Kontinuitätsgleichung, dem Impulsatz und dem Energieerhaltungssatz ermittelter Höchstwert eines Leistungsbeiwertes für eine Windturbine ergab sich zu 16/27, was rund 0,59259 oder 60 % des Energieinhaltes einer Windströmung bedeutet. Ein Gerät, das ohne Reibung arbeitet und der Strömung keinen Drall aufprägt, d. h. es wird nur achsiale Durchströmung angenommen, kann also nur 60 % der angebotenen Energie aus dem Wind entnehmen. Dazu muß das Gerät außerdem in der Lage sein, die Windgeschwindigkeit auf nur noch ein Drittel des ursprünglichen, ungestörten Wertes abzumindern, z. B. von 10 Meter je Sekunde auf 3,33 Meter je Sekunde.

Hier soll noch der prinzipielle Unterschied von Propeller und Windturbine erwähnt werden. Ein Propeller am Flugzeug beschleunigt die Luftströmung, eine Windturbine bremst sie ab. Gebrauchte Propeller können deshalb auch von Bastlern nicht als Windrotorflügel verwendet werden. Propeller sind dafür geometrisch falsch gebaut, weisen u. a. eine falsche Verwindung der aerodynamischen Profilquerschnitte auf und sind für ganz andere Durchströmungsgeschwindigkeiten ausgelegt.

Im Theorieansatz von Betz ist erstaunlicherweise über die Art des Gerätes, die Art der Rotorausbildung, die Lage der Welle oder die

Zahl der Flügel nichts ausgesagt. Sein Energieentzug passiert quasi in einer „black box“, die man in die Windströmung stellt. In der Neuzeit wurde die Betz-Theorie angezweifelt, sogar mit der Aussage abqualifiziert: „Hier irrte Betz“. Diese Unterstellung muß genauer betrachtet werden, weil diese Formulierung dem Wissenschaftler Betz in keiner Weise gerecht wird und nicht die grandiose Einfachheit seiner Theorie mit dem absolut richtigen Ergebnis unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen würdigt.

Jede Theorie versucht, über Festlegungen von Anfangsvorgaben eine Aussage über einen physikalischen Vorgang zu machen. Je nach Güte oder Exaktheit dieser angenommenen Bedingungen wird die Theorie mehr oder weniger genau die Realität beschreiben können. Einfache Theorien mit wenigen Annahmen werden die Grenzbereiche der physikalischen Realität nur schlecht erfassen können, während komplexe, aufwendige Theorien mit ausgefeilten Annahmen die Grenzbereiche mit großer Genauigkeit widerspiegeln werden.

Betz kam mit drei fundamentalen Aussagen aus. Das Ergebnis liefert einen Grenzwert über die Leistungsfähigkeit von Windrotoren. Kein moderner realer Windrotor wird diesen Grenzwert je erreichen können, denn sein Betrieb ist natürlich reibungsbehaftet, die Strömung wird außerdem drallbehaftet sein und Wirbel und Wirbelflächen gehen von der selbstverständlich endlichen Zahl von Rotorblättern aus.

Heute existieren drei gängige Arten von Theorien für Windenergie-Konverter, Theorien mit steigenden Ansprüchen. Die Theorie nach Betz ist die sogenannte Strahltheorie. Blattelement-Impulstheorien, z. B. auch nach Hütter, kommen von der Flugzeugaerodynamik her und berücksichtigen u. a. die Profilaerodynamik mit Widerstand, Auftrieb und Zirkulation. Diese Theorie bietet keine geschlossenen Lösungen, sondern führt nur auf iterativem Wege zu Ergebnissen, ebenso wie der dritte Typus, aufwendige Blattelement-Wirbeltheorien, die eigentlich so richtig erst durch den Einsatz von Computern möglich wurden, mit deren Hilfe eine große Zahl von Rechenoperationen in kurzer Zeit durchgeführt werden können.

Wie wurden Windmühlen aerodynamisch „beflügelt“?

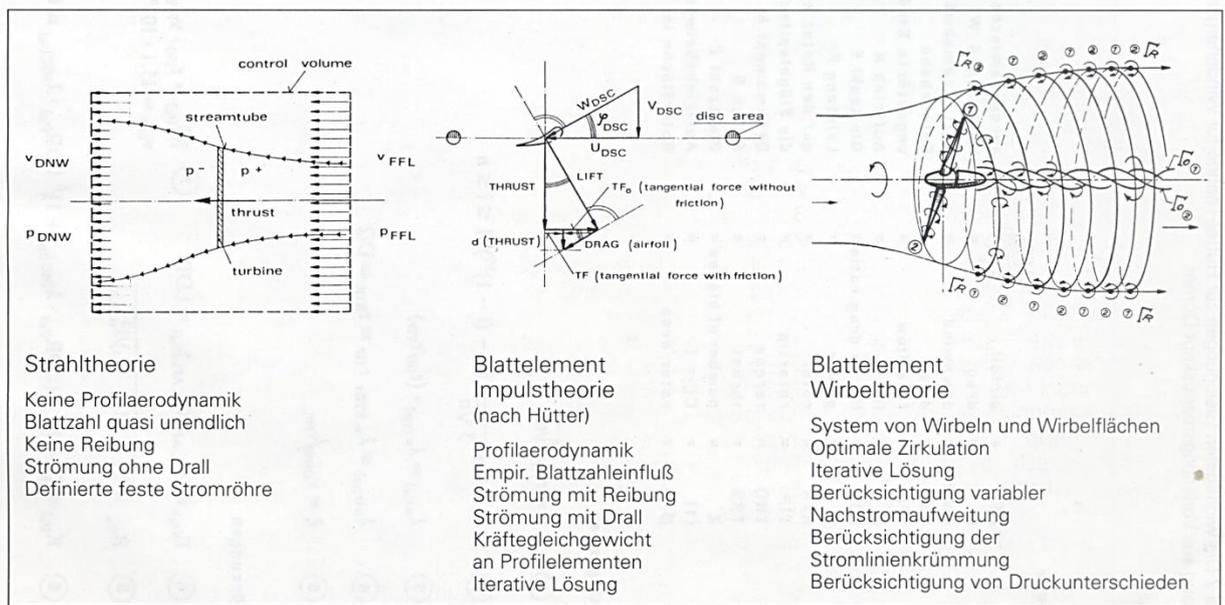
Ulrich Hütter kam vom Flugzeugbau her. Er hatte seinen Diplomabschluß 1935 an der Technischen Hochschule Stuttgart in diesem Fachgebiet gemacht, nachdem er zunächst in Wien mit dem Schiffbaustudium begonnen hatte. Wolf Hirth holte ihn als Konstrukteur in seine Firma nach Kirchheim/Teck. Hütter hatte noch als Student sein eigenes Segelflugzeug, die legendäre „H 17“, konstruiert und gebaut und sich damit exzellent als Konstrukteur ausgewiesen. Das war damals ein modernes kleines Segelflugzeug mit hervorragenden Flugeigenschaften, das Hütter selbst auf dem 1288 Meter hohen Gaisberg bei Salzburg eingeflogen hatte. Die

Maschine war so erfolgreich, daß sie Fliegergruppen weltweit in mehr als 200 Exemplaren nachbauten, praktisch ein erstes Serien-Segelflugzeug.

Als Hütter 1939 als Dozent für Flugzeugbau an die Ingenieurschule Weimar wechselte, kam er dort mit der Firma Ventimotor in Kontakt. Hier arbeitete er als Konstrukteur von Windkraftanlagen und als Leiter des Windtestfeldes. Dort legte er auch den Grundstein für seine Blattelement-Impulstheorie für Windrotoren. Er promovierte 1942 bei Professor Föppel in Wien mit der Arbeit: „Beitrag zur Schaffung von Gestaltungsgrundlagen für Windkraftwerke“.

Hütter war also der erste, der die Flugzeugaerodynamik auf Windrotoren angewendet hat. Er entwickelte seine Theorie ständig weiter und ließ sie besonders nach der ersten Energiekrise 1972 an seinem Institut für Flugzeugbau wieder aufleben. Das Institut hatte er 1956 als Nachfolger von dem Vorkriegsleiter Professor Georg Madelung übernommen. Hütter emeritierte 1980 und verstarb im August 1990 in Kirchheim/Teck. Er war jahrzehntelang nicht nur für seine Mitarbeiter der Windpapst gewesen, auch international galt er neben Juul aus Dänemark, Vadot und Noel aus Frankreich und Stodhart aus England als der Fachmann für Windenergie.

Heute noch wird die Hütter-Theorie in einer Windenergie-Vorlesung den Studenten der Luft- und Raumfahrt-



Tafel 1 Verschiedene Theorien zur Auslegung der Rotorblätter von Windenergie-Konvertern.

Tafel 2 Die wichtigsten Gleichungen zur Hütter-Theorie für Windenergie-Konverter, Auszug aus Vorlesungsmanuskript Dörner.

Indices

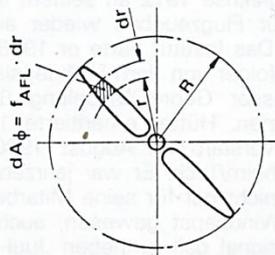
- AFL = airfoil
 - D = drag
 - DNW = downwind
 - DSC = disc
 - FLL = free flow
 - L = lift
 - LDR = lift to drag ratio
 - P = power
 - RTR = rotor
 - TIP = rotortip
 - TRQ = torque
 - TRS = thrust
 - Z = number of blades
 - (1) = CL = 1
 - ∅ = rotor area
- aerodynamisches Profil
 - Widerstand W
 - weit stromabwärts
 - Rotorebene
 - ungestörte Strömung
 - Auftrieb A
 - Gleitzahl E
 - Leistung P
 - auf den Rotor bezogen
 - die Flügelspitze betreffend
 - Drehmoment M
 - Schub S
 - Blattzahl Z
 - Auftriebsbeiwert CA = 1
 - Rotorfläche im Wind A ∅

Festlegungen

- 1 $i_1 = \Gamma_{TIP} \sqrt{i/n}$
- 2 $i_1 = \Gamma_{TIP} \frac{2}{3\sqrt{n}} (i^2 - (i-1)^2); 1 \leq i \leq n$
- 3 $\lambda_{\omega(\Gamma_{TIP})} = \lambda_{\omega RTR} \cdot (\Gamma_{(n)}/\Gamma_{TIP})$
- 4 $\lambda_{\omega(\Gamma_{TIP})} \equiv \lambda_{\omega RTR}, \Gamma_{TIP} \equiv \Gamma_{RTR} \equiv D/2$
- 5 $\zeta \equiv v_{DNW}/v_{FLL}$

Abkürzungen

- 6 $E_{(n)} \equiv (C_{L,AFL}/C_{D,AFL})_{(n)} \equiv LDR$
- 7 $R_{CL}^* = \Gamma_{(n)} \cdot v_{FLL}/v_{Luf}^2$
 $v_{Luf} \approx 15,1 \cdot 10^{-6} [m^2/s]$
- 8 $R_{(n)} = \sqrt{1 + [(1 - \zeta^2)/\lambda_{\omega(\Gamma_{TIP})}^2]}$
- 9 $K_{(n)} \equiv (1 - \zeta_{(n)}^2) (\lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})} \cdot \lambda_{DSC(\Gamma_{RTR})} + 1) / \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})} \cdot \lambda_{DSC(\Gamma_{RTR})} \equiv C_{D,RTR}$



Leistungabelwert $C_P \equiv \frac{\text{Rotorwellenleistung}}{V_{FLL}^3 \cdot A_P \cdot \rho/2}$

Schub/Widerstands-Beiwert $C_{D,RTR} \equiv \frac{\text{Rotorschub/Widerstand}}{V_{FLL}^2 \cdot A_P \cdot \rho/2}$

Drehmomentenbeiwert $C_{TRQ} \equiv C_P / \lambda_{TIP}$

Flächenbelastung $\kappa \equiv \frac{\text{installierte Generatorleistung}}{A_P}$

Leistung $P = M \cdot \omega$

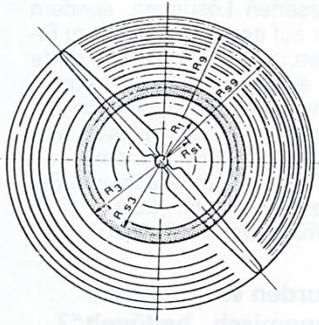
Drehmoment $M = C_{TRQ} \cdot V_{FLL}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_P \cdot R_{TIP}$

$\lambda_{TIP} = R_{TIP} \cdot \omega / v_{FLL}$

$\omega = v_{FLL} \cdot \lambda_{TIP} / R_{TIP}$

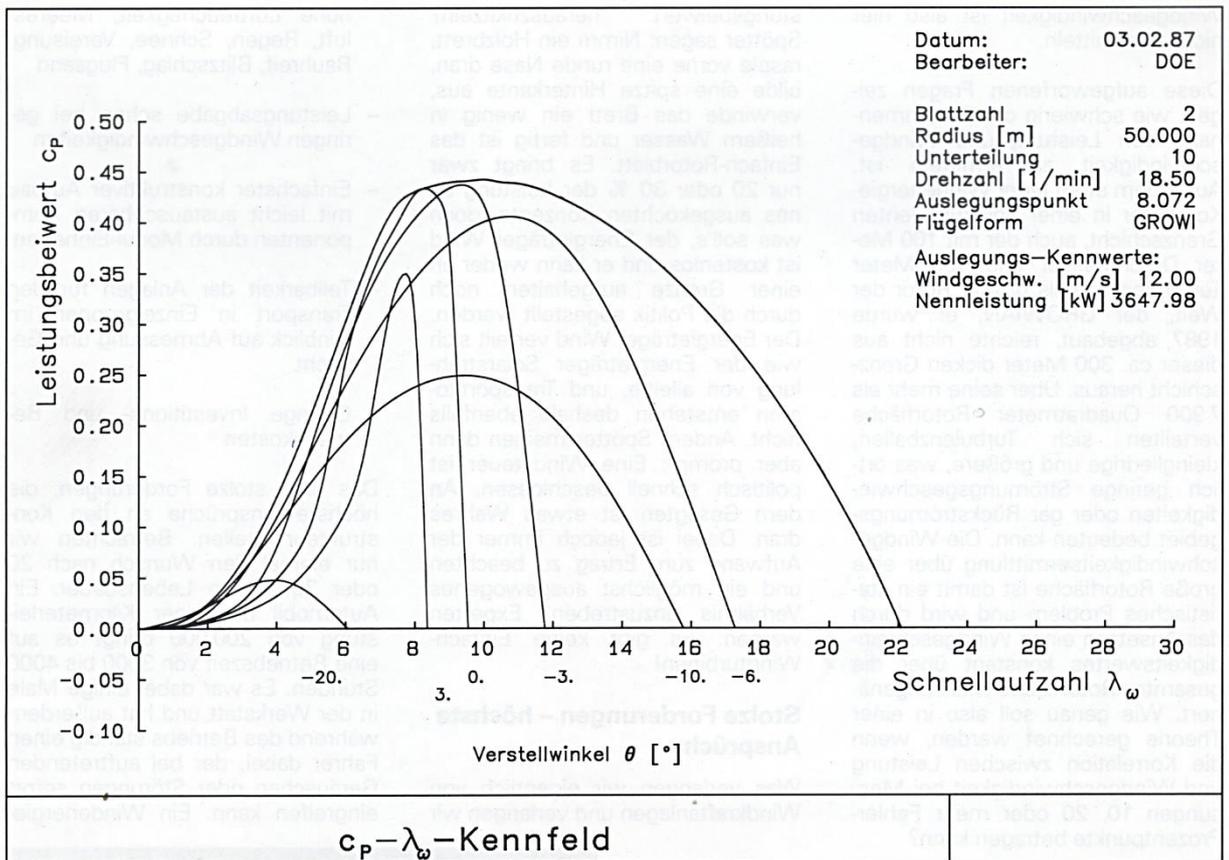
Integrationen

- 10 $C_{P,RTR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{P(\Gamma_{TIP})}$
- 11 $C_{TRQ,RTR} = C_{P,RTR} / \lambda_{\omega RTR}$
- 12 $C_{D,RTR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{(n)}$



Formeln

- 13 $C_{P(\Gamma_{TIP})} = \eta_{z,RTR} \cdot \eta_{LDR(\Gamma_{TIP})} \cdot C_{P(\Gamma_{TIP}),id.}$
- 14 $\eta_{z,RTR} = (1 - (2 \ln 2/z \cdot \sqrt{1 + \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})}^2}))^2$
- 15 $\eta_{LDR(\Gamma_{TIP})} = (1 + \sqrt{1 - K_{(n)}}) \cdot (LDR_{(\Gamma_{TIP})} - \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})}) / LDR_{(\Gamma_{TIP})} (1 + \zeta_{(\Gamma_{TIP})})$
- 16 $C_{P(\Gamma_{TIP}),id.} = (R_{(\Gamma_{TIP})} - 1) (1 + \zeta_{(\Gamma_{TIP})}) \cdot \lambda_{\omega(\Gamma_{TIP})}^2$
- 17 $R_{CL(\Gamma_{TIP})} = R_{CL(\Gamma_{TIP})}^* \cdot 4 \pi (1 - \zeta_{(\Gamma_{TIP})}) / z \cdot \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})} \cdot C_{L,AFL(\Gamma_{TIP})}$
- 18 $f_{AFL(\Gamma_{TIP})} = 8 \pi \Gamma_{(n)} (1 - \zeta_{(\Gamma_{TIP})}) / z \cdot C_{L,AFL(\Gamma_{TIP})} \cdot (1 + \zeta_{(\Gamma_{TIP})}) \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})} \sqrt{1 + \lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})}^2}$
- 19 $\lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})} = (1 + R_{(\Gamma_{TIP})}) \lambda_{\omega(\Gamma_{TIP})} (1 + \zeta_{(\Gamma_{TIP})})$
- 20 $\varphi_{DSC(\Gamma_{TIP})} = \arctan(\lambda_{DSC(\Gamma_{TIP})})$



Tafel 3 Leistungskurven eines nach Hütter-Theorie ausgelegten Windenergie-Konverters (GROWIAN).

technik der Universität Stuttgart als Wahlfach angeboten. Die Vorlesung wird auch an der Fachhochschule für Technik in Esslingen im Semester 7 Maschinenbau/Energietechnik gehalten und steht im Studium Generale außerdem allen interessierten Hörern sowie den Studenten der Universität Stuttgart aus anderen Fakultäten als Wahlfach mit schriftlicher Prüfung offen.

Mit 20 Gleichungen und hüttertypischer Indizierung der Kenngrößen mit drei Großbuchstaben, abgeleitet von englischen Fachausdrücken, wird der Student unter Zuhilfenahme eines „Fahrplanes“ in die Lage versetzt, die aerodynamische Auslegung eines Windrotors für maximale Leistung bei gegebenem Windstandort, z. B. mit einer gemessenen und damit bekannten Windhäufigkeitsverteilung, durchzuführen. Wie ausgeführt beschreiben alle Theorien mehr oder weniger exakt das Verhalten von Windrotoren, den freifahrenden Turbinen, in einer Windströmung. Dabei erhebt sich die Frage, wie genau sollte gerechnet werden? Oder: Wo liegen die realen, die Praxis-Probleme bei der Nutzung der Windenergie?

Wind-Ernte realistisch, nicht theoretisch – Probleme der Praxis

Physikalisches Grundprinzip der Windenergienutzung ist das Abbremsen der Bewegung der horizontalen Luftströmung, also dem Wind. Das Abbremsen erfolgt durch irgendwie gestaltete Flächen, die entweder Widerstandskräfte wie bei ebenen Platten oder Auftriebskräfte wie bei Tragflügeln nutzen. Zur effektivsten und wirtschaftlichsten Nutzung der Windenergie kommen besonders die „Freifahrenden Turbinen“, also Windenergie-Konverter mit 1, 2 oder 3 Rotorblättern in Frage. Dabei kann der Rotor vor dem Turm, also luvseitig, oder hinter dem Turm, leeseitig, positioniert sein. Darrieus-Rotoren mit vertikaler Achse sind windrichtungsunabhängig und eignen sich besonders für windstarke Gebiete wie in arktischen Regionen. Der Savonius-Rotor mit vertikaler Achse ist als Elektrizitäts-Wandlungs-System ungeeignet, zur Erzeugung als Lüfter bei Kühleinrichtungen aber geeignet.

Wird man heute stolzer Besitzer eines Windenergiekonverters, so er-

wartet man in der Transportkiste neben den üblichen Unterlagen und technischen Papieren auch ein Diagramm, das den Bezug herstellt zwischen der Leistung der Anlage, z. B. in kW, und einer dazugehörenden Windgeschwindigkeit. Dieses Diagramm kann gerechnet sein oder der Hersteller hat die Messungen an seiner Anlage dem Interessenten weitergegeben. Die Leistung einer Anlage kann relativ leicht über einen Verbraucher und die elektrischen Werte Spannung und Strom ermittelt werden. Doch wie sieht es mit der Messung der momentanen dazugehörenden Windgeschwindigkeit aus? Wo messe ich überhaupt? Weit vor der Anlage in der von der Anlage unbeeinflussten, ungestörten Windströmung? Und wie berücksichtigt man dann die Laufzeit des Windes bis zum Rotor? Oder mißt man in der Rotorebene neben der Anlage? Und was geschieht dann, wenn die Anlage einer neuen Windrichtung nachdreht? Direkt in der Rotorebene zu messen, das wäre der richtige Ort, dort ist aber die Strömung durch die Rotorblätter bereits abgemindert, abgelenkt und in Wirbel zerteilt, die „echte“ herrschende

Windgeschwindigkeit ist also hier nicht zu ermitteln.

Diese aufgeworfenen Fragen zeigen, wie schwierig der Zusammenhang von Leistung und Windgeschwindigkeit zu ermitteln ist. Außerdem steht jeder Windenergie-Konverter in einer voll turbulenten Grenzschicht, auch der mit 100 Meter Durchmesser und 100 Meter Turmhöhe damals größte Rotor der Welt, der GROWIAN, er wurde 1987 abgebaut, reichte nicht aus dieser ca. 300 Meter dicken Grenzschicht heraus. Über seine mehr als 7900 Quadratmeter Rotorfläche verteilten sich Turbulenzballen, kleingliedrige und größere, was örtlich geringe Strömungsgeschwindigkeiten oder gar Rückströmungsgebiete bedeuten kann. Die Windgeschwindigkeitsermittlung über eine große Rotorfläche ist damit ein statistisches Problem und wird durch das Ansetzen eines Windgeschwindigkeitswertes konstant über die gesamte Rotorfläche nur angenähert. Wie genau soll also in einer Theorie gerechnet werden, wenn die Korrelation zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit bei Messungen 10, 20 oder mehr Fehlerprozentpunkte betragen kann?

Noch etwas kommt hinzu. Die theoretischen Berechnungen gehen von einer idealen Blattgeometrie aus. Welche Bauweise wird aber gewählt und wie genau kann die rechnerisch „optimal“ ermittelte Geometrie in die Flügel überhaupt eingebaut werden? In Blechbauweise sind Laminarprofile mit hohen Gleitzahlen nicht zu verwirklichen, da die untere, nach innen eingezogene Profilkontur nicht herstellbar ist. Auch in Holzbauweise läßt sich eine solche Kontur nicht ausbilden, da wäre eine gerade Profilverkantung der einzelnen Flügelquerschnitte von Vorteil. Die Herstellung der Blattverwindung ist dann noch schwierig und aufwendig genug. Einzig die Leichtbauweise im Faserverbund-Werkstoff läßt schwierige Profilkonturen zu. Der ohnehin kostenintensive Vorgang, zunächst die Erstellung eines absolut formtreuen Urmodells des Flügels, danach davon die Abnahme von Negativ-Schalen-Hälften und zuletzt der Flügelbau in diesen Negativ-Schalen, bringt es mit sich, daß man bei den hohen Kosten dann auch die besten aerodynamischen Profilverkantung quasi umsonst einbauen kann.

Und wieder erhebt sich die Frage, welchen Aufwand soll man in der Theorie und im Bau treiben, um die letzten Prozentpunkte beim Lei-

stungsbeiwert herauszukitzeln? Spötter sagen: Nimm ein Holzbrett, rasple vorne eine runde Nase dran, bilde eine spitze Hinterkante aus, verwinde das Brett ein wenig in heißem Wasser und fertig ist das Einfach-Rotorblatt. Es bringt zwar nur 20 oder 30 % der Leistung eines ausgekochten Konzepts, doch was soll's, der Energieträger Wind ist kostenlos und er kann weder an einer Grenze aufgehalten noch durch die Politik abgestellt werden. Der Energieträger Wind verteilt sich wie der Energieträger Solarstrahlung von alleine, und Transportkosten entstehen deshalb ebenfalls nicht. Andere Spötter meinen dann aber prompt: Eine Windsteuer ist politisch schnell beschlossen. An dem Gesagten ist etwas Wahres dran. Dabei ist jedoch immer der Aufwand zum Ertrag zu beachten und ein möglichst ausgewogenes Verhältnis anzustreben. Experten warnen: Es gibt keine Einfach-Windturbinen!

Stolze Forderungen – höchste Ansprüche

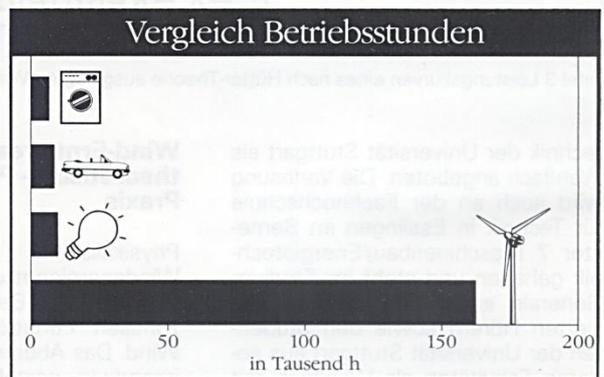
Was verlangen wir eigentlich von Windkraftanlagen und verlangen wir

hohe Luftfeuchtigkeit, Meeresluft, Regen, Schnee, Vereisung, Rauhreif, Blitzschlag, Flugsand

- Leistungsabgabe schon bei geringen Windgeschwindigkeiten
- Einfachster konstruktiver Aufbau mit leicht austauschbaren Komponenten durch Modul-Einheiten
- Teilbarkeit der Anlagen für den Transport in Einzelgruppen im Hinblick auf Abmessung und Gewicht
- Geringe Investitions- und Betriebskosten

Das sind stolze Forderungen, die höchste Ansprüche an den Konstrukteur stellen. Betrachten wir nur einmal den Wunsch nach 20 oder 30 Jahren Lebensdauer. Ein Automobil mit einer Kilometerleistung von 200 000 bringt es auf eine Betriebszeit von 3000 bis 4000 Stunden. Es war dabei einige Male in der Werkstatt und hat außerdem während des Betriebs ständig einen Fahrer dabei, der bei auftretenden Geräuschen oder Störungen sofort eingreifen kann. Ein Windenergie-

Abb. 7: Lebensdauer verschiedener Geräte und Anlagen im Vergleich (Quelle: Firma ENERCO, Aurich).



nicht am Ende zu viel? Liegt darin vielleicht das Problem der immer noch nicht erfolgten vollen Durchsetzung dieser umweltfreundlichen Energiewandlungsart?

Forderungskatalog für moderne Windenergie-Konverter:

- Einfachste Bedienung der Anlage, ohne besondere fachliche Ausbildung der Benutzer
- Hohe Lebensdauer, 20 bis 30 Jahre, möglichst ohne Wartung oder nur sehr großen Wartungsintervallen
- Beständigkeit der Windenergie-Konverter-Komponenten gegen alle klimatischen Bedingungen wie Hitze, Kälte, Trockenheit,

konverter wird bei richtiger Auslegung in einem einzigen Jahr an seinem Standort 6000 bis 6500 Stunden in Betrieb sein. Er muß außerdem ohne Aufsicht störungsfrei arbeiten und das dann 20 und mehr Jahre lang. Ein Windenergiekonverter muß also ca. 40mal so lange leben wie ein herkömmliches Auto, und die Bauteile sind die gleichen, Schrauben, Muttern, Bolzen, Wellen, Zahnräder, Lager, Dichtungen, Gehäuse usw. Darin liegt der wahre Grund, warum heute so wenige Hersteller von Anlagen wirklich erfolgreich sind. Und mehr als ein halbes Jahr Garantie wird bei diesen Produkten nicht angeboten.

Es ist also nichts mit den einfachen Anlagen, z. B. auch für den Einsatz

in Drittländern. Jede Anlage sollte eigentlich Leistungen von 1- bis 1000fach im Sturm abfahren können und darf dabei nicht zerstört werden, denn die Leistung von Windturbinen steigt mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Eine Verdoppelung der Windgeschwindigkeit führt also zur Verachtachung der Leistung. Segeltuch-Konzepte mit Holz- und Bambusstangen verkauft als „angepaßte Technologie“ oder neudeutsch „appropriate technology“, das funktioniert bei der Windenergienutzung nicht. Eine Anlage in Drittländern darf höchstens einmal in einem Zeitraum von einigen Jahren vom Sturm zerstört werden, sonst wird sie aus Mentalitätsgründen von den einheimischen Bewohnern wohl nicht mehr aufgebaut. Im Gegenteil, die Anlagen müssen zwar robust und einfach, aber „high sophisticated“, also mit „Gehirnschmalz“, höchst ausgefuchst konstruiert sein. Der Turm einer solchen Anlage darf z. B. nicht umfallen, wenn am Turmfuß eine Befestigungsmutter M 36 entfernt wird. Damit muß man immer rechnen, denn in Ländern, in denen die technische Revolution noch bevorsteht, schleicht immer jemand mit einem Schraubenschlüssel herum, der gerade eine solche M 36er Mutter für seinen Traktor sucht...

Zurück nach Deutschland. Wie groß ist die Windernte in unseren Breiten überhaupt? Windstandort und Anlagengüte spielen hier die entscheidende Rolle, natürlich auch die Größe der Anlage, da der Rotordurchmesser mit der Turmhöhe gekoppelt ist. Die Anlagen-Nabe reicht bei großen Rotoren in höhere, windstärkere Luftströmungen, und die Energieernte, aufsummiert z. B. über ein Jahr, fällt vom Angebot her gleichmäßiger und höher aus. Aus Betreiberstatistiken kann man für kleine Anlagen, Standort Norddeutschland, ein Energieangebot je Quadratmeter Rotorfläche zwischen 200 und 300 kWh im Jahr entnehmen. Für größere Anlagen steigt dieser Wert auf 700 bis 800 kWh/a. Es gibt Spitzenanlagen direkt an der Nordseeküste, die 1992 störungsfrei liefen und bis zu 1500 kWh pro Quadratmeter geerntet haben.

Die Bezugsfläche Quadratmeter ist sinnvoll, da die Rotoren ja aus der Windströmung eine Fläche herauschneiden, die beeinflusst wird. Innerhalb dieser Fläche wird die Strömung durch die Rotorblätter umgelenkt, in Rotation oder Drall versetzt und abgebremst. Die Windenergieer-

ntemengen pro Flächeneinheit liegen höher als mögliche solare Wärmemengen mit Kollektoren oder gar die direkten, hochwertigen solaren Elektrizitätsmengen mit Solarzellen. Anhaltswerte für unsere klimatischen Bedingungen für thermische Kollektoren wären rund 400 kWh/a m² und unter 200 kWh/a m² für monokristalline Silizium-Solarzellen.

Windenergie heute – Silberstreifen am regenerativen „Energiehimmel“?

Die Experten sind sich einig: Neben der Solarenergienutzung, zunächst hauptsächlich die Wärmenutzung und erst in zweiter Linie die Elektrizitätswandlung über Solarzellen, hat die Nutzung der Windenergie die größten Aussichten aller regenerativen Energieformen.

Weltweit geht der Trend dabei in zwei Richtungen. Kalifornien als Trendsetter der Windfarmen mit heute fast 20 000 Anlagen am Netz bestimmte ab 1978 die eine Richtung. In Europa dagegen sind heute die Dänen bei den Windfarmen führend. Inzwischen trägt die Windenergie dort durch über 1000 Anlagen mit über 1,5 % zur Elektrizitätsversorgung bei. Anlagen bis 450 kW sind Seriengeräte und mehrere Hersteller teilen sich den Markt.

Die Niederlande, Deutschland, Großbritannien, Spanien, Italien und Schweden konkurrieren mit der Einrichtung von Windfarmen mit bis zu 100 Anlagen an einem Standort. An-

fang 1993 wurden die zwei größten Windfarmen Europas in Tarifa in Andalusien eröffnet. 250 Anlagen stehen an der Straße von Gibraltar und bilden ein Kraftwerk von 30 MW installierter Leistung. Die staatlich subventionierten Windfarmen sind von einem Konsortium aus Elektrizitätsunternehmen und staatlichen Institutionen für ca. 76 Mio DM gebaut worden. Frankreich, prädestiniert für die Windenergienutzung durch eine über 3000 km lange Küste, steht abseits. Dies ist nicht verwunderlich, wird doch dort mit einem Anteil von über 70 % die Kernenergie bei der Elektrizitätsversorgung politisch favorisiert. Und wer will sich schon „politisch“ in die inneren Angelegenheiten von Frankreich einmischen?

Die erste deutsche Windfarm wurde am Standort des nur drei Jahre im Versuchsbetrieb gefahrenen GROWIAN, am Kaiser-Wilhelm-Koog in der Nähe von Marne, von dem örtlichen Energieversorgungsunternehmen Schleswag errichtet. Die Windfarm wird bis heute im Dauerbetrieb gefahren. Damit liegen in diesem „Windpark Westküste“ seit November 1986 die längsten Erfahrungen in Deutschland mit Windenergie-Konvertern am Netz vor.

Drei damals gängige Anlagentypen wurden aufgestellt: 20 AEROMAN-Anlagen der Firma M.A.N., 2flügelig, mit 30 kW Nennleistung und 12,5 m Durchmesser, 5 ENERCON Anlagen, 3flügelig, mit 55 kW und 15,3 m Durchmesser und 5 elektro-



Abb. 8: Typisches Erscheinungsbild einer Windfarm, hier die älteste deutsche Windfarm am Kaiser-Wilhelm-Koog mit 32 Anlagen von zusammen 1,3 MW installierter Leistung. Netzbetrieb durch die SCHLESWAG seit November 1986 bis heute.



Abb. 9: Die DEBRA-25 oder ADLER-25 (Namensgebung durch die Firma Köster, Heide, für den Lizenznachbau), zwei Generatoren für Schwach- und Starkwind, 45 und 55 kW (100 kW DEBRA), 100 und 65 kW (165 kW ADLER), Durchmesser 25 Meter, Nabenhöhe 22 Meter, 3flügeliger Lee-Läufer: Energieertrag 175 000 kWh/a bei 4,5 m/s Wind, 450 000 kWh/a bei 7,5 m/s Wind jeweils in 10 Metern Höhe über Grund.

mat-25 Anlagen, 3flügelig, mit 25 kW und 10,4 m Durchmesser. Das Versuchsfeld weist damit 1 Megawatt installierter Leistung bei einem Flächenbedarf von 20 Hektar auf, was etwa der Fläche von 14 Fußballfeldern entspricht. Vor zwei Jahren kam dann noch ein vierter Maschinentyp hinzu, der Lizenzbau der Firma Köster aus Heide in Schleswig-Holstein. Dieses Gerät, die DEBRA-25, bei Köster Adler 25 genannt, entstand bei der DFVLR in Stuttgart, ausgeführt von ehemaligen Hütter-Mitarbeitern. Am Standort Nordseeküste sind die Anlagen mit zwei zusammen 165 kW leistenden Generatoren ausgestattet. Die jährlich erwarteten 2,7 Mio kWh Energielieferung wurden vom gesamten Windpark ungefähr auch erbracht und über zwei 630 kVA-Transformatoren in das 20 kV-Netz der Schleswig eingespeist. Die Investitionskosten betragen damals 6,3 Mio DM.

Inzwischen sprießen Windfarmen wie „Sonnenblumen-Windmühlen-

Felder“ aus dem Boden. Mit einem Windpark Nordfriesland wurde im September 1991 begonnen. Endziel sind 50 Anlagen der Husumer Schiffswerft mit je 250 kW installierter Leistung, zusammen also 12,5 Megawatt. Standort ist der Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog in der Nähe vom Sylter Hindenburgdamm. Private Investoren wollen mit 22 Anlagen des Typs ENERCON-33 an gleicher Stelle mit einem Bürgerpark erweitern. Die Mindesteinlage beträgt 30 000 DM und 117, Gesellschaftsanteile sind ausgegeben; schließlich sind 22 Mio DM zu finanzieren, wobei der Bund 6 Pf/8 Pf Zuschuß als Anreiz für jede ins Netz eingespeiste Kilowattstunde zahlt.

Hier eine unvollständige Aufzählung weiterer Windparks für den Hobby-sucher im Urlaub:

Norden 1, errichtet 2/90, 10 x ENERCON-33 mit je 300 kW;
 Westermarkelsdorf, 10/90, 7 x AN-BONUS, je 150 kW;
 Festehmann, 8/91, 6 x ENERCON-33, je 300 kW;

Dornumergrode, 2/92, 11 x ENERCON-33, je 300 kW;
 Südermarsch, 4/92, 8 x HSW 53 T, je 250 kW;
 Galmsbüll, 6/92, 6 x Windtechnik-Nord WTN, je 200 kW;
 Windpark Osterhof bei Niebüll, 12/92, 7 x AN-BONUS, je 450 kW und 3 x ENERCON E 32, je 300 kW.

Auch im Binnenland werden Windparks versucht. Die Gemeinde Satzung, südöstlich von Annaberg, mit dem 890 Meter hohen Hirtstein im Erzgebirge an der tschechischen Grenze ist eine Adresse. Dort stehen 5 Anlagen mit zusammen 1 MW Leistung. Die Bevölkerung hat ihnen aus der heimatischen Sagenwelt überlieferte Namen gegeben. Lustig doch mit ernstem Hintergrund drehen im Wind: „Weiße Fraa“, „Kräuterhannes“, „Mazzebille“, „Lustiger Hans“ und „Stülper Karl“. Die Anlagen wurden von den Firmen Vesats, Micon und Lagerwey geliefert.

An dieser Tatsache zeigt sich, daß Windenergie-Konverter auch mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben. Am Hirtstein war die Aufstellung von Anfang an von den Betroffenen als ein Beitrag zur Energierversorgung positiv angegangen worden. In Norddeutschland gab es jedoch nach der Einrichtung mehrerer Windfarmen von Umweltschutzeinrichtungen Proteste. Fragen des Vogelschutzes, der „optischen Umweltverschmutzung“ der Landschaft durch die Aufstellung vieler Geräte, ja sogar die Lärmbelastung wurden aufgeworfen. Die örtliche Landwirtschaft oder die Kommunen, meist die Betreiber der Anlagen selbst, hatten dabei keine Probleme. Auch die Touristen und Urlauber sahen die Windfarmen positiv, wie Umfragen ergaben. Allein die Optik könnte kritisch beurteilt werden, doch auch hierbei gibt es Ästheten, die viele in der Sonne glitzernd drehende Rotoren als schön bezeichnen. Und es muß ja nicht unbedingt der zwar billige, aber strömungstechnisch und optisch schlecht wirkende Gittermast sein.

Probleme mit Zugvögeln oder Vogel-tod sind nicht bekannt geworden. Auch Änderungen des Kleinklimas sind nicht vorhanden, eher ist ein positiver Effekt zu nennen: Dünen bleiben dauerhafter bestehen, wenn viele Windrotoren den Wind abbremsen, d. h. Rotoren als Ersatz oder Unterstützung der Dünen-Bepflanzung mit Strandhafer.

Der Lärm der Anlagen ist unkritisch, denn wenn die Anlagen so richtig

im Sturm drehen, sind zumeist die Windgeräusche, hervorgerufen durch natürliche oder künstliche Hindernisse, stärker als der Lärm der Anlagen selbst. Eventuell muß ein Augenmerk auf die Getriebe-geräusche geworfen werden. Und auch hier sind die Konstrukteure tätig. Getriebelose Anlagen sind in Entwicklung, die von elektrischer Seite her die von der Aerodynamik geforderte Schnellläufigkeit der Anlagen bringen werden.

Neben der Aufstellung von Windparks oder Windfarmen ist die zweite weltweit verfolgte Trendrichtung die immer größer werdende Einzelanlage, gedacht zur Einspeisung in öffentliche Netze. Nachdem der GROWIAN die technisch möglichen Grenzen einer Windenergie-Anlage aufgezeigt hat und auch mit aus diesem Grund abgebaut wurde, widmete man sich zunächst der Serienreife-machung von Anlagen kleiner 100 kW Leistung. Inzwischen beherrscht man diese Technik, die Anlagengrößen wachsen und die Serienmaschinen leisten heute 450 kW.

Schlußglied in der wachsenden Anlagengröße in Deutschland ist zur Zeit der GROWIAN II oder die WKA-60-Anlage. Der Prototyp wurde auf Helgoland aufgestellt. Dieser 60 Meter-Rotor mit 1,2 MW installierter Leistung ist ein wichtiges Element im Energieversorgungskonzept der Insel Helgoland. Der Helgoländer Energieverbund muß für 1800 Inselbewohner und auch für den Komfort von 500 000 Gästen im Jahr sorgen. Dazu wurde ein Konzept mit Blockheizkraftwerk, d. h. Kraft-Wärme-Kopplung, zur besten Ausnutzung des Dieseltreibstoffes, mit Meerwasser-Wärmepumpe und mit einem Windenergie-Konverter zur Strombereitstellung für das Umkehrosmose-Verfahren zur Trinkwasserbereitstellung erarbeitet und inzwischen verwirklicht. Technische Daten des Insel-Ener-gienetzes: 2 Dieselaggregate, 3,4 MW Strom, 2,1 MW Wärme; 2 Heizkessel, 11 MW Wärme; Abgaswärmetauscher 1,8 MW; 5 Notstromdieselaggregate 1,85 MW; Meerwasser-Wärmepumpe 1,3 MW Wärme; Windkraftanlage 1,2 MW. Die Meerwasserentsalzungsanlage liefert 960 Kubikmeter Trinkwasser am Tag, eine Brackwasser-aufbereitungsanlage steuert täglich weitere 275 Kubikmeter hinzu. Der Inselbedarf erfordert maximal die Bereitstellung einer Leistung von 3,2 MW Strom und 12 MW Wärme sowie am Tag 1200 Kubikmeter Trinkwasser.



Abb. 10: GROWIAN, der einst größte Windenergie-Konverter der Welt. Rotordurchmesser 100,4 Meter, Nabenhöhe 100 Meter, 2flügeliger Lee-Läufer, 3 MW Leistung bei einer Windgeschwindigkeit von 12 Metern je Sekunde in Nabenhöhe. Standort Kaiser-Wilhelm-Koog, nahe Brunsbüttel, 1981 bis 1987, Prototyp-Anlage gefahren im Versuchsbetrieb mit Netzeinspeisung. Energieertrag 12 000 MWh/a bei 8,5 m/s Wind in 10 Metern Höhe über Grund.

Die Windkraftanlage WKA-60 wurde wenige Meter vom Unterland der Insel entfernt im Hafenbecken gegründet und von der Firma M.A.N. gebaut. Generator und Regelungstechnik lieferte die Firma Siemens. Die Nennleistung der 8 Mio DM teuren Anlage wird bei einer Windgeschwindigkeit von 12 Metern/Sekunde erreicht. Der Durchmesser des dreiflügeligen Rotors beträgt 60 Meter, die Nabenhöhe 50 Meter. Der Windenergie-Konverter WKA-60 zeigt auf, wie gut eine windnutzende Anlage in ein Energieversorgungskonzept eingebunden werden kann. Dieses Beispiel weist auch exzellent darauf hin, daß auf dem Energiesektor das Ausschließlichkeitsdenken heute keine Berechtigung mehr hat. Also

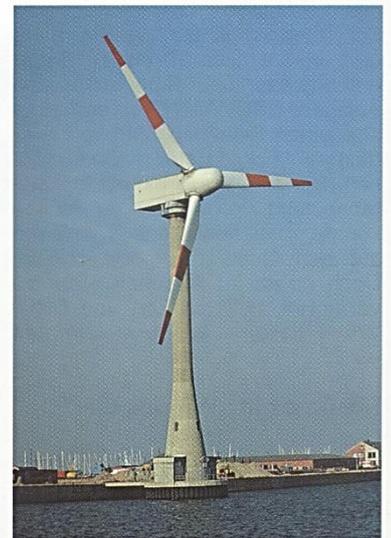


Abb. 11: Die WKA-60-Anlage der Firma M. A. N., Standort Helgoland, 1,2 MW installierte Leistung, Rotordurchmesser 60 Meter, Nabenhöhe 50 Meter, 3flügeliger Lee-Läufer. Turm Stahlbeton mit 8,4 bis 3,3 Meter Durchmesser und 0,3 Meter Wandstärke. Inbetriebnahme März 1990, die Anlage soll 25 bis 30 % des elektrischen Jahresenergie-Bedarfs der Insel decken.

nicht nur Kohle, nicht nur Kernenergie, nicht nur Gas oder Öl, nicht nur Sonne, nicht nur Wind...

Anders als in Kalifornien, wo Grund und Boden zunächst in Hülle und Fülle zur Verfügung stand, ist die Massenaufstellung von Windenergie-Konvertern in Deutschland ein Flächenproblem. In Kalifornien kostet das „acre“ Land inzwischen so viel, als ob man am Ort Öl gefunden hätte, denn Windenergie zu ernten, und das über Jahre hinweg, ist dort ein einträgliches Geschäft geworden. Dies gilt immer noch, wenn auch inzwischen die staatlichen Subventionen erheblich eingeschränkt wurden.

Im dichtbesiedelten Deutschland dagegen gelten andere Bedingungen, und man wird eine geometrische Rasteraufstellung wie in Kalifornien nicht ausführen können. Da die Aufstellung z. B. an schon vorhandenen Erschließungsstraßen vorgenommen werden muß, wird aus diesem Grund in unserem Land der Trend natürlich mehr zu Großanlagen gehen.

Freifahrende Turbinen können nicht beliebig eng zueinander stehen. Da die Windgeschwindigkeit durch die Anlagen abgemindert wird, erfolgt aus Gründen des Kontinuitätsgesetzes eine Aufweitung der Stromröhre. Durch turbulenten Ausgleich aus höheren energiereicheren Schichten erholt sich die Strömung erst wieder nach 10 bis 15 Rotordurchmesser Lauflänge hinter den Anlagen. GROWIAN-Rotoren hätten also einen Reihenabstand von mindestens 1 Kilometer haben müssen. Bei einem ausreichenden Seitenabstand von Anlage zu Anlage könnte man höchstens 8 Anlagen auf den Quadratkilometer stellen. Doch es ist im Augenblick nur zu vermuten, daß die Zeit von GROWIAN-Riesen wieder kommen wird...

Resümee in „Windes-Eile“

Es ist sinnvoll, die umweltfreundliche natürliche Energiequelle Wind zu nutzen.

Freifahrende Turbinen, sogenannte Schnellläufer, also Windenergie-Konverter mit horizontaler Achse und zwei oder drei Rotorblättern, stellen die ökonomischen Gerätetypen im Hinblick auf das Verhältnis von Aufwand zu Ertrag bei der Windenergienutzung dar. Einzel-Großanlagen im Megawattbereich sind ebenso wie eine Vielzahl von kleineren Anlagen, aufgestellt in Windparks oder

Windfarmen, in der Lage, einen Beitrag zur Elektrizitätsversorgung zu leisten. Flächenprobleme beschränken dabei in Deutschland eine ungebremste Ausweitung von Windfarmen. Denkt man z. B. nur an einen 5 %igen Beitrag der Windenergie zur Elektrizitätsmengen-Bereitstellung in Deutschland, so wären rein rechnerisch ca. 3500 GROWIAN-Anlagen notwendig. Energieanfall- und -ausfallzeiten, also Sturm- und Flautezeiten, Speicherfragen oder Hoch- und Niedrigtarifzeiten, d. h. Energiebedarfszeiten sind dabei nicht einmal berücksichtigt. Platz für diese Anlagenzahl wäre vorhanden. Den GROWIAN gibt es heute aber nicht mehr, nicht einmal den Prototypen vom Ende der achtziger Jahre. Und wenn Automobilfirmen sofort einige Typenbänder stilllegen würden, um GROWIANE zu bauen, wären Produktionszahlen von 200 Stück im Jahr schon eine optimistische Annahme. Eine weit über zehn Jahre lange Produktion wäre mit so einer Maßnahme sichergestellt...

Bis zum Jahr 2000 kann also die Aussage eines Windanteils von höchstens 2-3 % als realistisch bezeichnet werden, wobei der zusätzliche Nachteil besteht, daß der politische Wille dazu noch nicht klar erkennbar ist, trotz des 250 MW Wind-Zuschuß-Programms. Eine Verbesserung dieser Aussage über Windfarmkonzepte wird im dichtbesiedelten Deutschland nicht gesehen. Sicherlich kann und wird die Windenergie im überschaubaren Bereich vor Ort einen hervorragenden Beitrag leisten, besonders dann, wenn diese Energiewandlungsart in ein Energiekonzept eingebunden und ihr außerdem ein Ökologiebonus im Preis zugestanden wird. Mit herkömmlichen Wandlungsarten über Kohle, Öl, Gas oder Kernbrennstoff zu konkurrieren fällt dem Wind eben immer noch schwer, da diesen Brennstoffen heute ökologische, soziale, also gesellschaftliche Umfeld- und Randkosten überhaupt nicht oder erst unvollkommen zugerechnet werden.

Europäisch denkend müßte eigentlich das Motto länderübergreifend heißen: „Laßt Windmühlen blühen vom Nordkap bis nach Gibraltar“, entlang der europäischen Westküste. Doch wer schließt die große französische Lücke? 70 % Kernenergieanteil an der Stromversorgung...

Das Institut für Flugzeugbau war von Anfang an dabei, als in

Deutschland das Interesse an der Windenergie 1972 wieder „auffrischte“. Der ehemalige Institutsleiter und Windpapst, Professor Dr. Ulrich Hütter, hat dem Institut sein Wissen um die Windenergie hinterlassen. Das Institut war an der GROWIAN-Entwicklung beteiligt, baute zusammen mit Studenten in der Versuchshalle aerodynamisch hochwertige Prototyp-Rotorblätter für Kleinanlagen und gehört heute zur Nutzergruppe des „Ulrich-Hütter-Windtestfeldes“ auf der Schwäbischen Alb. Die Theorie der „Freifahrenden Turbine“ nach Hütter wird an die Studenten in Vorlesungen weitergegeben. Den Studenten wird auch die Schere zwischen Theorie und Praxis aufgezeigt, wobei besonderer Wert auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der notwendigen theoretischen Tiefe und der Konstruktions- und Betriebs-Problematik von Windenergie-Konvertern gelegt wird. Das Wahlfach-Angebot an die Studenten wird durch die Möglichkeit zum Anfertigen von Labor-, Studien und Diplomarbeiten abgerundet.

„Der Wind weht wo es ihm gefällt. Du hörst ihn nur rauschen, aber Du weißt nicht, woher er kommt und wohin er geht“. Johannes 3, Vers 8.

„Ärgerlich aus der Mühle schaut der Müller, der so gerne mahlen will. Stillter wird der Wind und stiller, und die Mühle stehet still. So geht's immer, wie ich finde, rief der Müller voller Zorn. Hat man Korn so fehlt's am Winde, hat man Wind so fehlt's am Korn.“ Wilhelm Busch

Der Mensch ist ein intelligentes Wesen. Er muß entscheiden, ob er trotz der vorhandenen Schwächen das Naturgeschenk Wind ohne Wenn und Aber für sich nutzen will.

Literatur

- Dörner, H.: Gesichtspunkte zur optimalen Auslegung von Windenergieanlagen. Seminar Windenergie 1974, Kernforschungsanlage Jülich
- Dörner, H.: Efficiency and Economic Comparison of Different WEC-(Wind-Energy-Converter)Rotor-Systems. International Conference: „Appropriate Technologies for Semiarid Areas: Wind- and Solar Energy for Water Supply.“ Berlin 1975.
- Armbrust, S., Dörner, H., Hütter, U., Knauss, P., Molly, J. P.: Nutzung der Windenergie. Teil III: Energiequellen für morgen? Nichtnukleare-Nichtfossile Primärenergiequellen. Programmstudie durchgeführt im Auftrag des BMFT, 1976.
- Dörner, H.: Windenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Jahrbuch Ingenieure 1981, Expert-Verlag Grafenau, 1981
- Dörner, H.: Nutzung der Windenergie – Neues Tätigkeitsfeld für die Industrie? VDI-Bericht Nr. 455, 1982

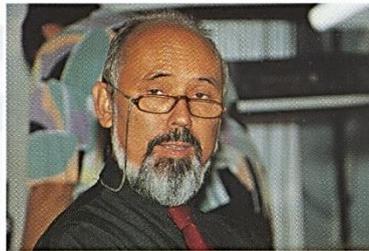
Dörner, H.: Windenergie, 65 Seiten, Beitrag im Handbuch der Energiespartech- niken, Kompendium für Lehre und Praxis, Band 3, Nutzung regenerativer Energien und passive Spartechnik, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1983

Dörner, H.: Wind Energy Utilization, Deutsch-Ägyptisches Seminar, „New and Renewable Sources of Energy“, 3.-7. November 1985, Faculty of Engineering, University of Cairo, Egypt

Dörner, H.: Wind Energy Utilization – General View for Brazil, Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC, 23.-27. March 1987, Belo Horizonte University, Brazil.

Dörner, H.: Analysis of total energy input for building up different wind energy converters (WECS) in operating conditions, international Conference on Applications of Solar & Renewable Energy, ASRE '92, April 19/22, 1992, Cairo, Egypt.

Der Autor



Dipl.-Ing. Heiner Dörner, geb. am 24.4.1940 in Brünn/CSSR. 1959 Abitur am Robert-Mayer-Gymnasium Heilbronn. Als Abiturient wurde er mit dem Otto-Lilienthal-Preis der Wissenschaftlichen Ge-

sellschaft für Luft- und Raumfahrt WGLR (heute DGLR) ausgezeichnet. Nach der Mechanikerlehre von 1959 bis 1961 studierte er Luftfahrt- technik an der TH Stuttgart und schloß 1967 mit dem Diplom ab. Heiner Dörner ist seit 1968 wissen- schaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau und kann auf eine 16jährige Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Ulrich Hütter zurückblicken. Seit 1971 ist er Lehrbeauftragter im Stu- diengang Luft- und Raumfahrttech- nik und seit 1991 Lehrbeauftragter der Fachhochschule für Technik, Esslingen, für Windkraftanlagen im Bereich Maschinen der Energieum- wandlung.