

# Chancen der Windenergie

Von Prof. Dr. Ulrich Hütter, Stuttgart

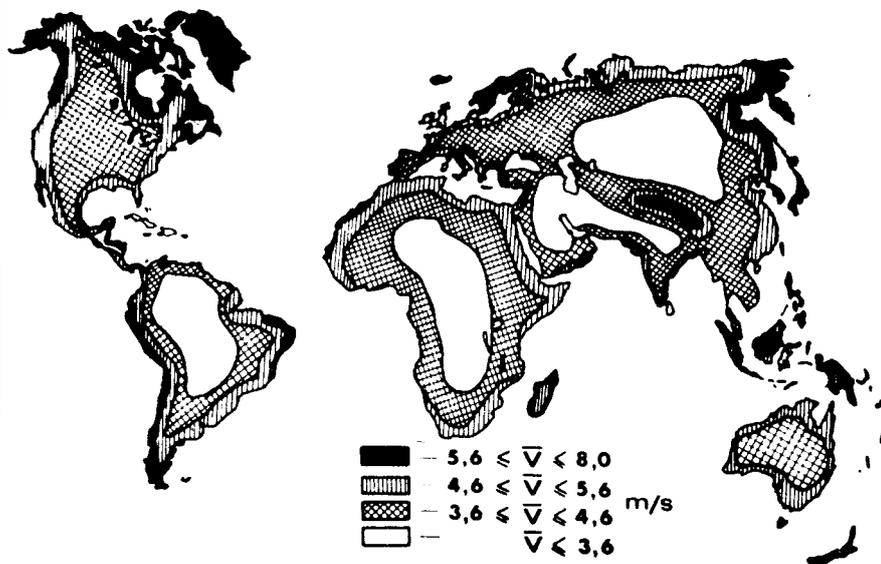


Bild 1: Windgeschwindigkeitsgebiete der Welt

In den USA wird der Windenergie seit langem große Bedeutung unter den regenerativen Energiequellen beigemessen. Ein erheblicher Anteil der Solarforschung und der technischen Entwicklung auf diesem Gebiet konzentriert sich auf die Nutzung der Windenergie, denn sowohl an den Küsten Nord- als auch Südamerikas ist ein beträchtliches Windenergiepotential zu erschließen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die energetischen und technischen Möglichkeiten der Windenergienutzung unter besonderer Berücksichtigung der europäischen, insbesondere der deutschen Wetterbedingungen.

## Meteorologische Voraussetzungen

Die Bewegung der Atmosphäre wird durch Zufuhr von Strahlungsenergie der Sonne aufrechterhalten. Energie, die über Windenergie-Konverter aus dem Luftmeer entnommen wird, ist also eine sekundäre Form der Sonnenenergie. 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 einstrahlten Sonnenenergie ständig in Strömungsenergie der Atmosphäre umgesetzt werden, nämlich 2,3 bis 3,8 ·

$10^7$  Terawattstunden pro Jahr, oder 2,6 bis  $4,3 \cdot 10^3$  Terawatt mittlere Leistung. Bis zu 3 % dieser Energie – das sind 6,9 bis  $11,4 \cdot 10^4$  TWh/a – könnten global durch Windenergie-Konverter aus der Atmosphäre entnommen werden.

Für Westeuropa ergeben sich unter Berücksichtigung technischer Gesichtspunkte mögliche Windenergiemengen von im Mittel rund  $6,2 \cdot 10^3$  TWh/a. Das ist etwas das Fünffache der im Jahr 1973 in ganz Westeuropa verbrauchten elektrischen Energie.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist das Verhältnis zwischen elektrischem Verbrauch und Windenergieangebot nicht so vorteilhaft wie für Westeuropa, weil in bezug auf die gesamte Fläche des Landes nur ein relativ kleiner Anteil hinreichend hohe Mittelwerte der Windgeschwindigkeit erreicht.

Darum resultieren nur 220 TWh/a potentieller Energieertrag aus dem Wind



Bild 2: Isoventkarte von Europa (Linien konstanter mittlerer Windgeschwindigkeit)

bei einem Verbrauch von elektrischer Energie in 1973 von 299 TWh (Tabelle 1), während in Westeuropa insgesamt 6200 TWh/a Windenergiepotential einem Stromverbrauch von 1260 TWh in 1973 gegenüberstehen.

Grundlegende Untersuchungen hierzu wurden in den fünfziger Jahren vom Deutschen Wetterdienst und von der Studiengesellschaft Windkraft e. V. Stuttgart angestellt. Eine Karte (Bild 3) von langfristigen Mittelwerten der ökonomisch nutzbaren Windgeschwindigkeit in etwa 10 m Höhe über Grund für die BRD wurde anhand von Daten aus dem Jahre 1943 vom Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, erstellt.

Die Daten eines speziellen Jahres sind mit einem mittleren Fehler von weniger als + 5 % auch langfristig repräsentativ.

Durch die geringe Reibung der Luftströmungen über den Wasserflächen erreichen die kräftigen Seewinde die Küste mit hohen Geschwindigkeitsmittelwerten, verlieren dann aber 150 bis 200 km landeinwärts wegen der höheren Reibung über den Landflächen be-

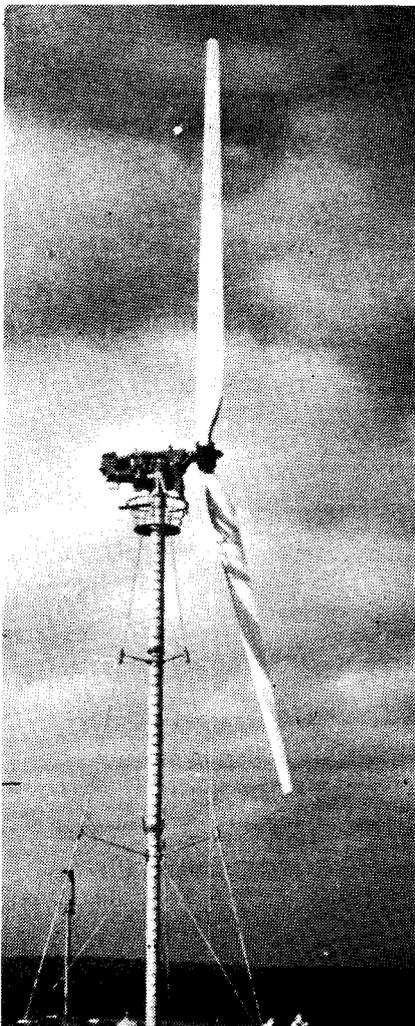


Bild 4: 100-kW-Anlage mit 34-m-Rotordurchmesser System Hütter

Land	Großbritannien	Frankreich	Irland	Schweden	Spanien	Norwegen	Italien	BR Deutschland	Niederlande	Österreich	Portugal	Belgien	Summe
Techn. nutzbare Windenergie TWh	1800	1100	600	500	500	400	400	220	220	200	200	70	6 190
Erzeugt. elektr. Energie 1973 TWh	280	182	7,3	77,3	75,7	72,6	145	299	52,3	13,2	0,7	41,1	1 261,6

Tabelle 1: Vergleich der technisch nutzbaren Windenergie mit der elektrischen Energieerzeugung verschiedener westeuropäischer Länder

deutend an Energie. Schichten gleicher Windgeschwindigkeit werden mit zunehmender Lauflänge über dem Land in größere Höhen verdrängt.

In Deutschland wirkt sich das so aus, daß nur auf den Bergkuppen der Mittelgebirge und im Süden des Landes auf den Höhen der Alpen wieder ähnlich hohe mittlere Windgeschwindigkeiten wie an den Küsten angetroffen werden.

Die Voraussetzungen der Energieausbeute großer Anlagen, die Höhen bis 200 m über Grund erfassen können, sind noch mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet, da weniger Daten über die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe vorliegen.

Die Geländekontur wie die wirksame Bodenrauigkeit prägen den Geschwindigkeitsverlauf in der Bodenschicht und bestimmen die Koeffizienten der die Geschwindigkeitsverteilung über der Höhe beschreibenden Gleichung. Weitere Messungen und Untersuchungen hierzu sind zur Sicherung der Energieangebotsermittlung wünschenswert.

Weil die Nutzung der Windenergie wegen höher mittlerer Windgeschwindigkeit in den Küstenregionen am wirtschaftlichsten ist, sollte in den Ländern Schleswig-Holstein und Niedersachsen mit der Nutzung im großen Stil – Einspeisung in öffentliche Versorgungs-Netze – begonnen werden. Kleine Anlagen für den privaten Gebrauch (auch in Verbindung mit Wärmepumpen oder Sonnenkollektoren) können bei entsprechend kleinerem spezifischem Energieertrag überall eingesetzt werden.

### Rotorflächenleistung und Energieertrag

Die technische Entwicklung der Windenergie-Konverter hat zu den aus vielen Gründen optimalen Horizontalachsen-WEK mit einfachem Rotor und zwei bis drei Rotorblättern geführt (Bild 4). Andere Lösungen, auch gegenläufige Doppelrotor-Anlagen, sind aus technischen wie aus wirtschaftlichen Überlegungen ungünstiger.

Die Energieertragsberechnung zur Beurteilung der technisch möglichen Windenergienutzung in der BRD wurden auf den an der 100-kW-Anlage Stötten 1959/1968 simultan gemessenen Zusammenhängen zwischen Kurzzeit-Mittelwerten von Windgeschwin-

digkeit und Leistung aufgebaut. Diese Meßwerte wurden auf Werte für verschiedene spezifische installierte Generatorleistungen – bezogen auf Quadratmeter der von den Rotorblättern bestrichenen Fläche – umgerechnet. Daraus ergab sich die in Bild 5 dargestellte Abhängigkeit der spezifischen Rotorflächenleistung  $\pi$  (in Watt pro  $m^2$ ) von der Windgeschwindigkeit  $v$  (in Meter pro Sekunde).

Insgesamt wurden die Energieerträge von vielen Flächenleistungen  $\pi$  für die Windgeschwindigkeiten in fünf verschiedenen Höhen über Grund (Achshöhen der Rotoren) an 25 Wetterstationen in Deutschland ermittelt. Da jede Station 8760 Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit aufweist, wurden somit nahezu zehn Millionen Einzeldaten nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet.

Aus dieser Datenfülle ergab sich anhand der Kriterien für Gesamtenergieertrag, Gleichförmigkeit des Angebots, Nulllastzeiten der WEK und auch im Hinblick auf wirtschaftliche Gesichtspunkte eine Leistungsdichte von  $\pi = 300 \text{ W/m}^2$  als besonders vorteilhaft für Anlagen mittlerer Leistungsgröße. Bei einer Rotornabhöhe von 72 m, einem Rotordurchmesser von 113 m und 3 MW installierter Generatorleistung können die in Bild 6 aufgetragenen Energieerträge pro Jahr erwartet werden.

Eine sinnvolle Entwicklungs-Vorstufe zu dieser Großanlage wird ein 52 m hoher, mit 80 m Rotordurchmesser und 1 MW ( $\pi = 200 \text{ W/m}^2$ ) versehener, kleinerer WEK-Typ sein. Seine von der mittleren Windgeschwindigkeit abhängigen Energieerträge sind ebenfalls dem Bild 6 zu entnehmen.

### Windkraftwerke

Mit der 3-MW-Anlage können mittelfristig (bis 1990) mehrere "Windkraftwerke" (Gruppenaufstellung von jeweils 100 Einzelanlagen) errichtet werden, die eine fühlbare Entlastung der öffentlichen elektrischen Energieversorgung bringen können.

Ein aussichtsreicher Vorschlag, die zu einem 300-MW-Kraftwerk gehörenden 100 Einzelanlagen zu gruppieren, ist die Aufstellung in zwei Reihen im Abstand von 1000 bis 1200 m hintereinander. Länge der beiden Anlagereihen je 10 km. Damit ist eine ähnliche Situation wie bei Hochspannungs-Fernleitungstrassen gegeben, bei welchen

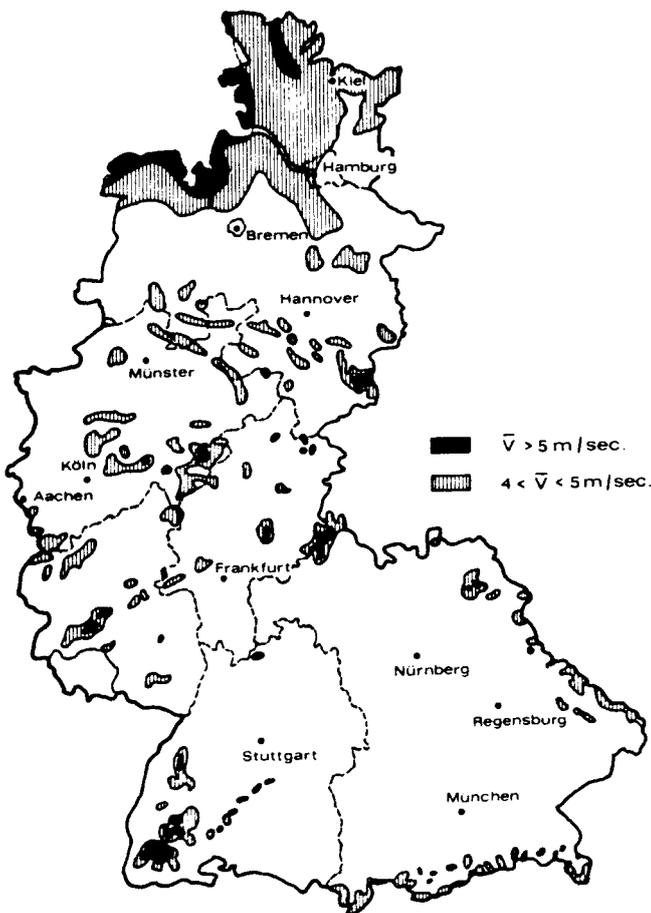


Bild 3: Ökonomische Windgeschwindigkeitsgebiete der Bundesrepublik Deutschland

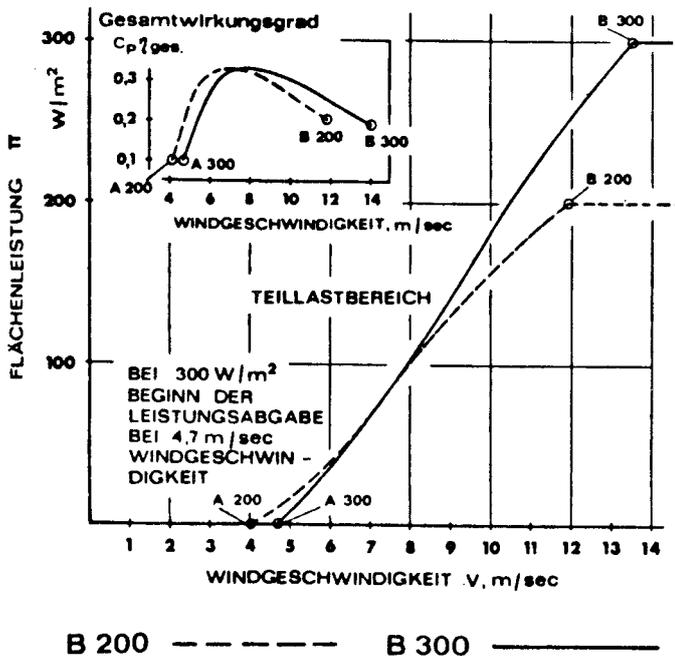
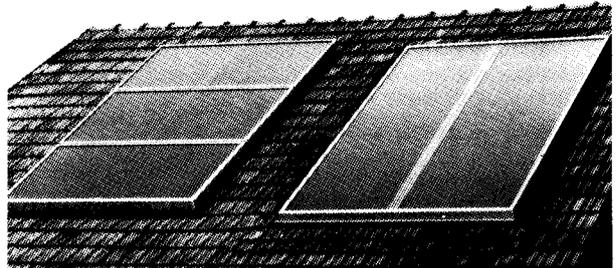


Bild 5: Zusammenhang zwischen Leistung eines Windconverters und Windgeschwindigkeit  
 B 200 = bei 200 W/m<sup>2</sup> Konstante, Leistungsabgabe ab 11,9 m/s  
 B 300 = bei 300 W/m<sup>2</sup> Konstante, Leistungsabgabe ab 13,9 m/s

## Unsere Sonnenkollektoren sind 100%

- korrosionsbeständig
- trinkwasserverträglich
- schwimmbadwasserfest
- wartungsfrei
- und ab Lager lieferbar



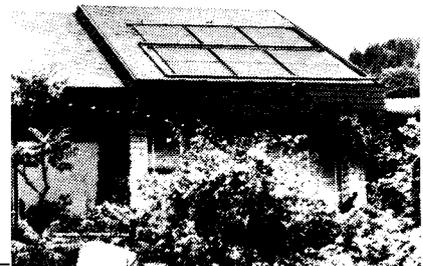
solar-tech GSJ (Links: 3 Kollektoren auf Dach aufgebaut. Rechts: 3 Kollektoren in Dachhaut integriert, grossflächig verglast.)

### für Warmwasser, Raumheizung, Schwimmbad, industrielle und gewerbliche Anwendung

Das ist der Sonnenkollektor, der zeitlebens keinen Unterhalt benötigt: sämtliche Materialien sind korrosionsfest; das Absorptionsschwarz ist im Absorbermaterial drin — es kann nicht abgekratzt werden, es blättert nicht ab, es oxydiert nicht; die Spezialverglasung ist hagelresistent... und übrigens nicht-spiegelnd!

Standardgrösse 3.5 m<sup>2</sup> (Sondermasse auf Anfrage), zerlegbar, in Betrieb nur 20 kg/m<sup>2</sup>, Befestigung an vier Punkten frei wählbar rundherum, einfacher Anschluss mit nur zwei Schraubverbindungen.

«solar-tech GSJ»-Kollektoren stehen seit 1974 im Einsatz — ein praxiserprobtes Konzept!



solar-tech POOL

### Spezial-System für Schwimmbäder, steckerfertig geliefert\*, in 1 bis 2 Tagen betriebsbereit montiert

Früher baden, länger baden, wärmer baden, Energiekosten sparen! Das ist jetzt sofort möglich. Direkte Badewasserzirkulation (drucklos) mittels bestehender Filteranlage — also keine Umwälzpumpe, kein Expansionsgefäss und Frostschutz nötig!

**Günstig!** Für ein 4 x 8 m Bad, 5 Kollektoren von zusammen ca. 18 m<sup>2</sup>, mit sämtlichen Befestigungs- und Verbindungsmaterialien sowie Rückschlagventil, Sensor, Steuerautomatik und Trafo 220/24 V, ab DM 4300.— (zuzügl. Transport und Montage und \*exkl. Zuleitungen).

# solar-tech®

### Prospekt und Preislisten:

BRD: solar-tech R. Janssen, 2900 Oldenburg, Kurwickstrasse 23-24, Tel. 0441-27325, Telex 25 740

Zentrale: Solar-Technik AG, Postfach 122, CH-2500 Biel 3  
 Tel. (032) 22 13 19, Telex 34 746

Schreiben Sie uns, falls Sie an einer Lizenz für Fabrikation und/oder Vertrieb interessiert sind.

98 % der Fläche landwirtschaftlich genutzt werden können – mit dem Unterschied, daß hier Flächenbedarf und Umweltbelastung sowie Energieverbrauch durch ein Kraftwerk entfallen.

Windkraftwerke können kontinuierlich erweitert, also auch modernisiert werden. Solche Fortentwicklungen sind möglich, ohne daß das gesamte "Kraftwerk" stillgelegt werden muß. Die technische Einsatzwahrscheinlichkeit liegt sehr hoch, da der Ausfall einzelner Anlagen oder der Wartungsfall nur eine anteilmäßig geringe Einbuße der Gesamtenergieabgabe bedingt, keinesfalls den völligen Ausfall einer ganzen Gruppe.

Geht man von der für Deutschland realistischen Annahme aus, daß die Windkraftwerke ausschließlich oder zumindest vorwiegend in Gegenden mit mehr als 4,5 m/sec mittlerer Windgeschwindigkeit eingerichtet werden, so wird jedes 300-MW-Kraftwerk 700 GWh elektrische Energie pro Jahr liefern können.

### Ausreichend für den Strombedarf Norddeutschlands

Mit 5500 Einzelanlagen der 3-MW-Größe können insgesamt 16% des Strombedarfs der Bundesrepublik aus dem Jahre 1973 gedeckt werden. Das entspricht dem Verbrauch der Länder Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen. Bezogen auf die Fläche der beiden letztgenannten Länder sind das im Durchschnitt nur 8,7 WEK auf 100 km<sup>2</sup>.

Die optische Belästigung kann nicht höher eingestuft werden als die der allgegenwärtigen Hochspannungsstraßen. Belästigungen anderer Art gibt es nicht. Die Abminderung des Windes an den Küsten ist sogar ein erwünschter positiver Effekt, da Winderosion und Dünenwanderungen vermindert werden können.

Hinzu kommt als sehr gewichtiger Aspekt, daß es möglich ist, die Energieerzeugungskosten relativ stabiler zu halten als bei allen konventionellen Kraftwerken, da der Energieträger Wind kostenlos zur Verfügung steht und von niemandem kontrolliert werden kann. Nur Wartungs- und Betriebskosten sind inflationistischen Entwicklungen unterworfen. Weder Lagerstätten, Seehäfen, Pipelines oder ähnliche Substruktursysteme sind für den Energieträger Wind erforderlich.

### Gleichförmigkeit des Energieangebots

Vielfach wird Windenergie deshalb für wenig wertvoll gehalten, weil ihre Darbietung zeitlich starken Schwankungen unterworfen ist. Die Schwingzeit dieser Schwankungen reicht von Sekundenbruchteilen – bedingt durch Großwetterlagen – bis zu Wochenintervallen.

Die turbulenzbedingten, zeitlichen Änderungen sind durch den Verbundbetrieb innerhalb eines aus mehreren Anlagen bestehenden Kraftwerks weit-

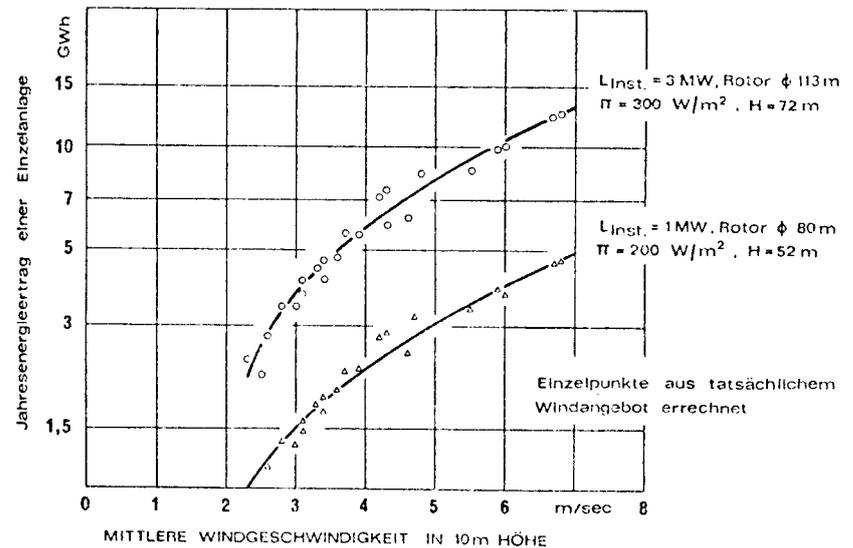


Bild 6: Jahresenergieertrag verschieden großer Anlagen (Einzelpunkte aus tatsächlichem Windangebot an 25 deutschen Wetterstationen errechnet)

gehend auszuschalten, da die Turbulenzballen des Windes nicht die räumliche Ausdehnung eines gesamten Kraftwerks erreichen und daher jeweils nur einen sehr kleinen Teil aller Anlagen gleichzeitig beeinflussen.

Die längerfristigen Schwankungen werden durch einen entsprechend großräumigen Verbund mehrerer Windkraftwerke erheblich vermindert. Das kann so weit gehen, daß beim Zusammenwirken einer genügend großen Zahl von Windkraftwerken am Verbundsys-

tem keine Zeitintervalle ohne Energie-darbietung anfallen.

Dieses Verhalten konnte durch von Rechner simulierte Verbundantriebe mehrerer gegeneinander unterschiedlich gruppierter Standorte tatsächlich beobachtet werden. Bild 7 gibt im oberen Bereich ein Band von zu erwartenden Nulllastzeiten der Einzelstationen wieder, während die eingerahmten Ziffern die Anzahlen von im Verbund betriebenen Stationen markieren.

Werden alle 25 durch Wetterstationen beschriebenen Gebiete auf ein Verbundsystem zusammengeschaltet, so erfolgt statistisch nur fünf Stunden im Jahr keine Energieabgabe, obwohl auch Gebiete in den Verbund einbezogen wurden, in denen ein einzelner Windenergiekonverter bis zu 7200 Stunden keinerlei Energie anbieten könnte.

Windenergieangebot und Stromverbrauch führen auf der Nordhalbkugel der Erde in geographischen Breiten größer als etwa 40° über die Zeit jedes Jahres phasengleich Schwingungen aus, mit einem Energiemaximum im Winter und einem Minimum im Sommer.

In Bild 8 ist zum Vergleich mit dem Windenergieangebot eines in den deutschen Küstengebieten stehenden Windkraftwerkverbundes die Energiebedarfskurve von Schleswig-Holstein eingetragen. Die nur geringe Abweichung von Energiebedarf und Windenergieangebot ist augenfällig.

Laufwasserkraftwerke besitzen dagegen häufig eine gegenläufige Tendenz mit erheblichen Abweichungen, wie es das Beispiel eines Neckar-Wasserkraftwerkes deutlich macht.

### Kompromiß zwischen Leistung und Verfügbarkeit

Die Gleichförmigkeit des Windenergieangebots wächst mit abnehmender spezifischer Rotorflächenleistung  $\pi$  und

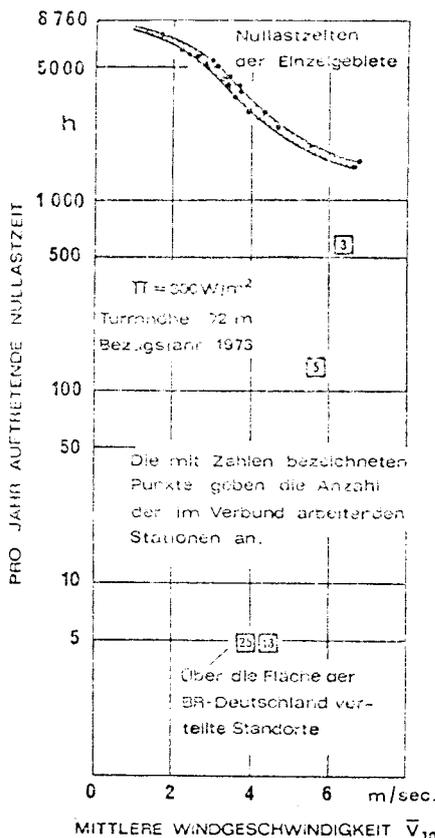


Bild 7: Vergleich der Nulllaststunden einzeln und im Verbund betriebener Anlagen

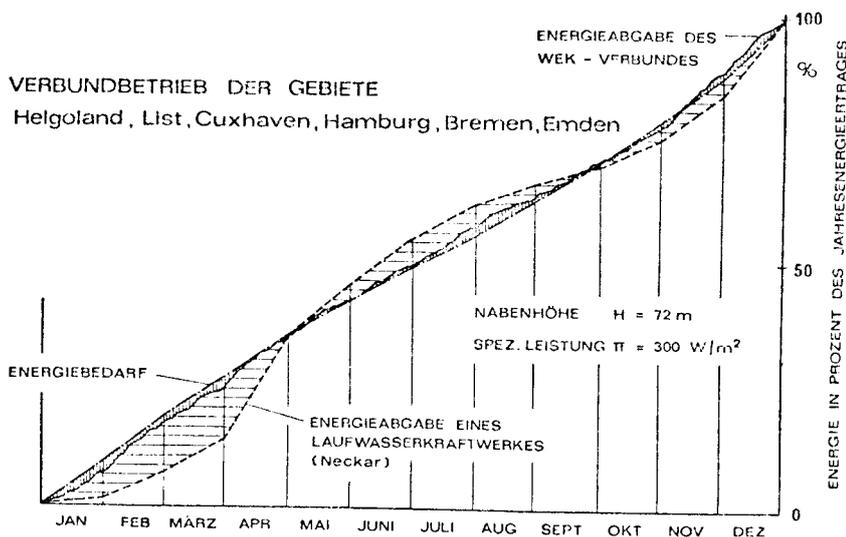


Bild 8: Vergleich der Energiesummenkurven von Windangebot, Laufwasserkraftwerk und Energiebedarf von Schleswig-Holstein

erreicht beim Wert  $\pi \rightarrow 0$  nahezu konstante Energiedarbitung. Hohe Werte von  $\pi$  bedeuten für einen einzeln betriebenen WEK starke Energieabgabeschwankungen und wegen der hohen absoluten Verluste im mechanischen wie im elektrischen Teil der Anlage auch längere Stillstandszeiten, da der WEK höhere Windgeschwindigkeiten sowohl für die Überwindung des Losbrechmoments als auch für die Nulllast-Verluste benötigt (vgl. Bild 5).

Andererseits wächst mit steigenden Werten für  $\pi$  der jährliche Energieertrag. Das gilt besonders für WEK, die in einem Gebiet mit hoher mittlerer Windgeschwindigkeit betrieben werden.

Demnach muß bei der Auslegung von WEK stets ein Kompromiß zwischen Energieertrag und Gleichförmigkeit der Energieabgabe gefunden werden, weil sich Gleichförmigkeit der Energiedarbitung und deren Menge in bezug auf eine Änderung von  $\pi$  invers verhalten. Dieser Kompromiß führt bei den in Betracht kommenden Windgeschwindigkeitsbereichen für eine 3-MW-Anlage auf  $\pi = 300 \text{ W/m}^2$  und für den 1-MW-Typ auf  $\pi = 200 \text{ W/m}^2$ .

**Kosten**

Die angemessene Auslegung von 1-MW- und 3-MW-Konvertern anhand der Auswertung meteorologischer Da-

ten ermöglicht es bei gegebenem Konzept, die anfallenden Kosten für 300-MW- und 100-MW-Gruppen-Windkraftwerke zu errechnen. Das WEK-Konzept des 1-MW-Typus der DFVLR/FWE-Gruppe ist in Bild 9 im Vergleich mit zwei 1942 beziehungsweise 1957 ausgeführten Anlagen durch Übersichtszeichnungen und charakteristische Parameter skizziert. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten von 800,- DM pro installiertes Kilowatt für den 3-MW-WEK, und 900,- DM/kW für den 1-MW-WEK, sowie einem Kalkulationszinsfluß von 7% ergeben sich die in

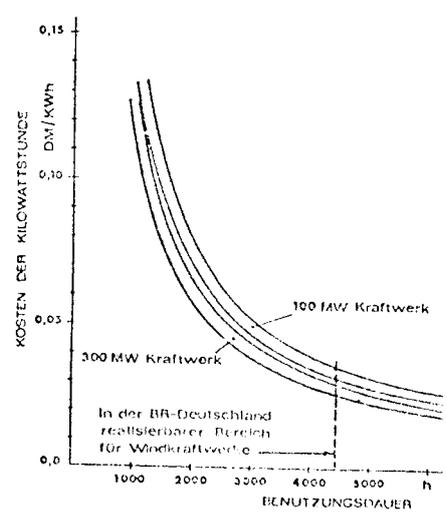


Bild 10: Kilowattstundenkostenvergleich zwischen auf unterschiedlichen Einheitstypen aufbauenden Windkraftwerken in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer

Bild 10 dargestellten Kostendegressionen der Kilowattstunde für ein jeweils aus 100 Anlagen bestehendes Gruppen-Windkraftwerk in Abhängigkeit vom Jahresmittel der Windgeschwindigkeit.

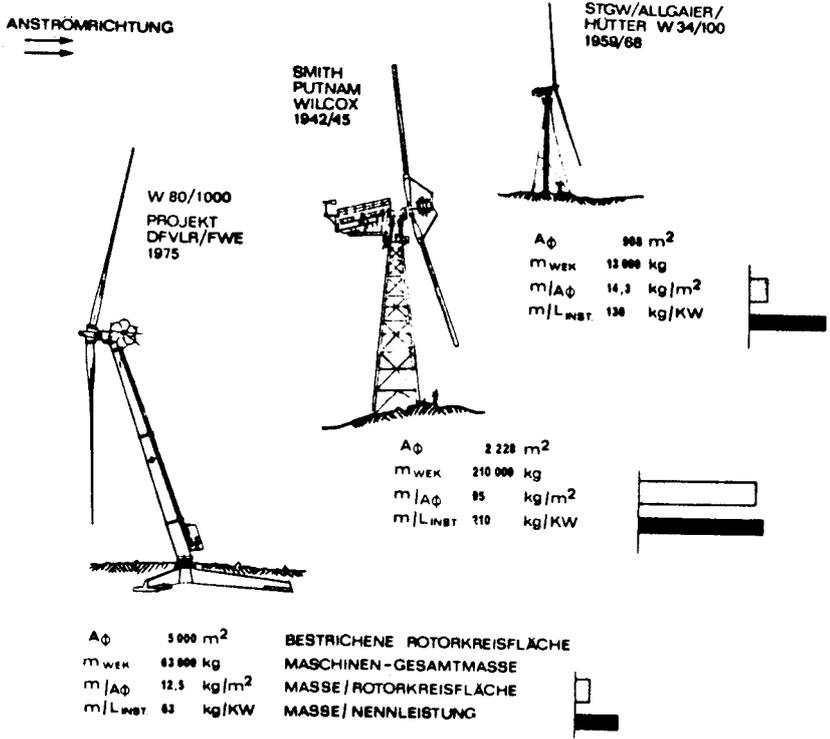


Bild 9: Vergleich zwischen zwei bisher realisierten Windenergiekonvertern und dem Projekt DFVLR/FWE mit 80 m Rotordurchmesser und 1 MW Leistung

**Literaturhinweise**

- Hütter, U.
- 1) Beitrag zur Schaffung von Gestaltungsgrundlagen für Windkraftwerke; Dissertation TH Wien (1942)
  - 2) Der Einfluß der Windhäufigkeit auf die Drehzahlabstimmung von Windkraftanlagen; Zeitschrift für Elektrotechnik 6/1948, S. 117/122 und 1/1949, S. 10/15, Stuttgart
  - 3) The aerodynamic layout of wind blades of wind-turbines with high tip-speed ratio; Paper presented at: United Nations Conference on New Sources of Energy, Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy. Roma/Italia, Proceedings printed in: E/Conf. 35/W/31 (New York 1961)
  - 4) Betriebserfahrungen mit der 100-kW-Windkraftanlage der Studiengesellschaft Windkraft E.V., Stuttgart, BWK Band 16, Nr. 7, S. 333/340 (1964)

Fortsetzung nächste Seite