

# Erfahrungen mit Windenergiekonvertern in der VR Polen<sup>1)</sup>

Dipl.-Ing. T. Kukla, Institut für Bauwesen, Mechanisierung und Elektrifizierung der Landwirtschaft (IBMER) Warschau (VR Polen)

## Verwendete Formelzeichen

A	m <sup>2</sup>	Fläche
A <sub>R</sub>	m <sup>2</sup>	Rotorfläche
C <sub>P</sub>		Leistungsbeiwert (für Propellerrotoren c <sub>p</sub> = 0,593; theoretischer Idealwert)
E <sub>Pot</sub>	kWh/m <sup>2</sup> · a	spezifisches jährliches Windenergiepotential
E <sub>Pot,z</sub>	kWh/m <sup>2</sup> · a	spezifisches jährliches Windenergiepotential in der Höhe z in m über der Oberfläche
E <sub>WEK</sub>	kWh/a	Jahresenergieproduktion des WEK
H	m	Höhe der unteren Rotorflächenbegrenzung über der Oberfläche
P	kW	Leistung, Energiestrom
P̄(t)	kW	mittlere Leistung in der Zeit t
P <sub>WEK</sub>	kW	Leistung des WEK
P̄ <sub>WEK</sub> (t)	kW	mittlere Leistung des WEK in der Zeit t
P <sub>WEK theor.</sub>	kW	verlustfreie Leistung des WEK
t	h, a	Zeit
v	m/s	Windgeschwindigkeit
z	m	Höhe über der Oberfläche
z <sub>H</sub>	m	Hindernishöhe (Gelände, Bewuchs, Bebauung)
α		Exponent (α = 0,13...0,27 in Abhängigkeit von der Geländestruktur)
η <sub>AM</sub>		Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine
η <sub>mech</sub>		Wirkungsgrad der mechanischen Übertragung
η <sub>ges</sub>		Gesamtwirkungsgrad
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Luft

## 1. Einleitung

Auf etwa einem Drittel des Territoriums der VR Polen bieten die natürlichen Windverhältnisse (Bild 1) die Möglichkeit, sowohl technisch als auch ökonomisch Windenergiekonverter (WEK) vom Typ WE einzusetzen. Im übrigen Teil des Landes ist der Einsatz dieser Konverter nur an windexponierten Standorten sinnvoll.

Aus der klimatologisch bedingten starken regionalen und lokalen Differenzierung der Windenergiepotentiale ergeben sich entsprechend große Unterschiede bei der Bewertung des möglichen Anteils der Windenergie an der Gesamtenergieproduktion des Landes. So wird derzeit bei einer hochentwickelten Windenergietechnik der mögliche Beitrag des „Windstromes“ zur Energieversorgung des Landes nur mit wenigen Prozenten angegeben. Er kann aber an exponierten Standorten und in Mikroregionen Anteile von 20 bis 50% des Energiebedarfs abdecken. Verallgemeinernd kann festgestellt werden, daß die Windenergie als additive Energiequelle zu konventionellen Energien wirksam wird, letztere aber nicht ersetzen kann.

Nachfolgend seien einige wesentliche Vor- und Nachteile der Windenergie aufgeführt:

1) Fachliche Bearbeitung: Dipl.-Ing. J. Schwabe, Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben

## Vorteile

- Einsparung konventioneller Energieträger
- keine Umweltbelastung durch Abprodukte
- stabile Einheitskosten der Energieerzeugung
- Korrelation des Wärmeenergiebedarfs mit dem Windenergieangebot in den Wintermonaten
- Installation des WEK in Verbrauchernähe
- Gesamtenergieaufwendungen zur Wandlung der Windenergie in technisch nutzbare Energie betragen ein Zehntel des Aufwands im konventionellen Bereich.

## Nachteile

- diskontinuierliches Energieangebot und damit diskontinuierliche Energieproduktion
- aufwendige Regelungs- und Speichereinrichtungen zur kontinuierlichen Energiebereitstellung
- geringer jährlicher Anteil der Produktionsstunden im Nennleistungsbereich des WEK (rd. 10% der Jahrestunden).

## 2. Windenergiepotential und Energieproduktion

Die Windleistung P, bezogen auf eine zur Strömungsrichtung senkrecht stehende Fläche, resultiert aus

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (1)$$

Aus Gl. (1) ergibt sich für das im Wind enthaltene Energiepotential E<sub>Pot,z</sub> bezogen auf einen Zeitraum t:

$$E_{Pot} = \bar{P}(t) t \quad (2)$$

Die Leistung und besonders das Energiepotential werden aus Gründen der Vergleichbarkeit auf eine Einheitsfläche von A = 1 m<sup>2</sup> bezogen und als spezifische Größen ausgewiesen, z. B. E in kWh/m<sup>2</sup> · a.

Die Umwandlung des natürlichen Windstromes (Windleistung) nach Gl. (1) in technisch

nutzbare Energie, wie z. B. Elektroenergie oder mechanische Energie, durch den WEK ist verlustbehaftet. Die Leistung des WEK ist dann

$$P_{WEK} = \eta_{ges} \frac{1}{2} \rho v^3 A_R \quad (3)$$

Die konstante Rotorfläche A<sub>R</sub> und der Gesamtwirkungsgrad η<sub>ges</sub> sind konverterspezifische Größen. Der Gesamtwirkungsgrad ist das Produkt aus

$$\eta_{ges} = C_P \eta_{mech} \eta_{AM} \quad (4)$$

und hat mit

$$C_P, \eta_{mech}, \eta_{AM} = f(v) \quad (4a)$$

einen von der Windgeschwindigkeit abhängigen Betrag.

Zur Bestimmung der theoretischen, d. h. verlustfrei durch den WEK wandelbaren Leistung P<sub>WEK</sub> in kW wird folgende, nach Gl. (1) zugeschnittene Größengleichung verwendet:

$$P_{WEK theor.} = 0,5 \cdot 10^{-3} \rho v^3 A_R \quad (5)$$

Tafel 1. Mittleres spezifisches jährliches Windenergiepotential E<sub>Pot,z</sub> für zwei Beispielregionen in Abhängigkeit von der Höhe z

Höhe über der Oberfläche z m	spezifisches jährliches Windenergiepotential E <sub>Pot,z</sub>	
	Region A kWh/m <sup>2</sup> · a	Region B kWh/m <sup>2</sup> · a
10 <sup>1)</sup>	250	1 000
20	379	1 577
30	483	1 934
50	656	2 626
100	1 000	4 000
200	1 508	6 035

1) Potential in 10 m Höhe nach Berechnungen an Standorten meteorologischer Stationen

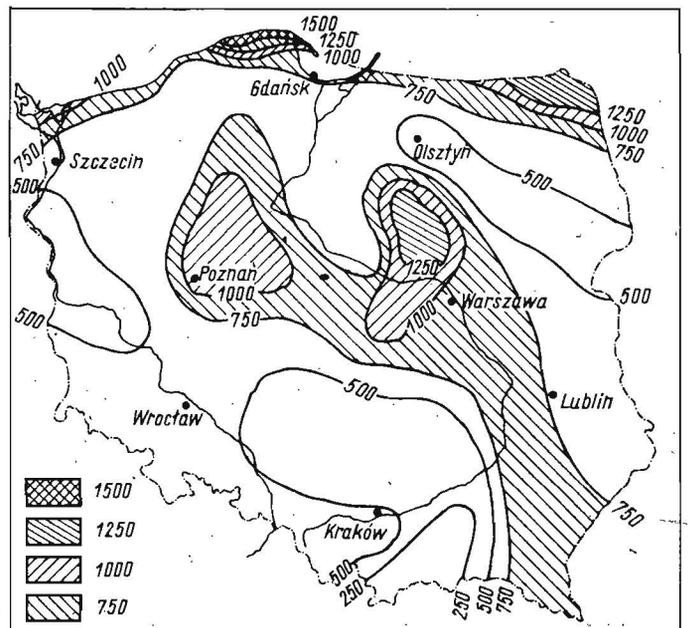
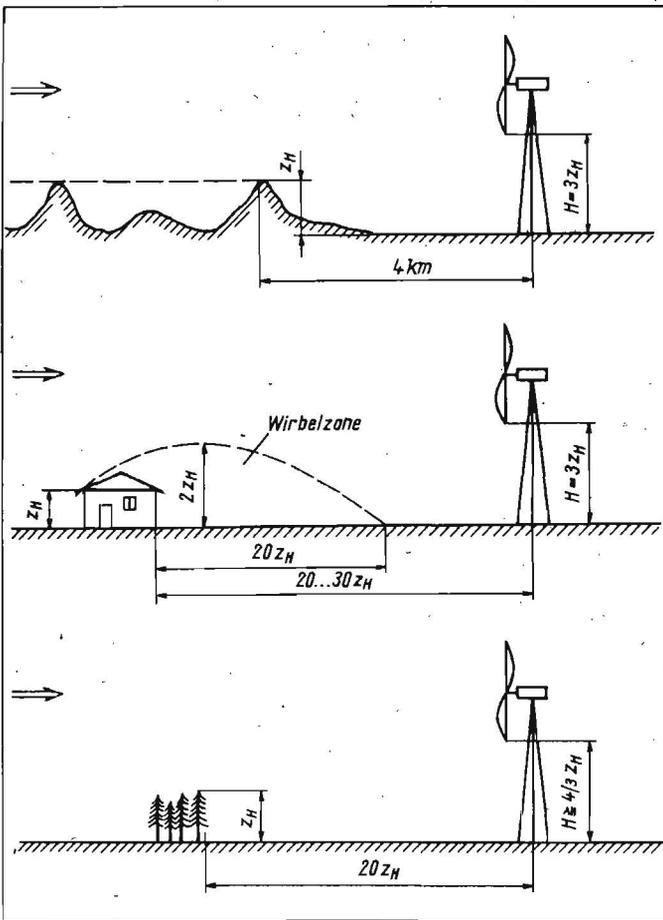


Bild 1  
Mittleres jährliches Windenergiepotential in kWh/m<sup>2</sup> · a im Windgeschwindigkeitsbereich von 4 bis 16 m/s (20 m über der Oberfläche) für windgünstige Regionen der VR Polen



2



4

Neben der zeitlichen Stochastik der Windgeschwindigkeit besteht ein funktionaler Zusammenhang zur Höhe  $z$  über der Geländeoberfläche. Mit zunehmendem  $z$  verringern sich die Reibungsverluste zwischen bewegter Luftschicht und Geländeoberfläche, und der Betrag der Windgeschwindigkeit wächst überproportional. Zur Modellierung dieses Zusammenhangs werden Exponenten  $\alpha$  ein-

geführt, die in Abhängigkeit von der Kontur des Geländes (Oberflächengestalt, Bewuchs, Bepflanzung) Werte zwischen 0,13 und 0,27 annehmen. Für das Energiepotential in Abhängigkeit von der Höhe  $z$  gilt dann die vereinfachte Beziehung:

$$E_{\text{Pot } z} = E_{\text{Pot } 10} \left( \frac{10}{z} \right)^{-3\alpha} \quad (6)$$

Nach Bild 1 und Gl. (6) können für unterschiedliche Regionen und Höhen über der Geländeoberfläche die Jahreswindenergiepotentiale ermittelt werden. Tafel 1 verdeutlicht für zwei Beispielregionen die Höhenabhängigkeit der Energiepotentiale. Die Ausgangspotentiale in 10 m Höhe (Standardmeßhöhe) wurden aus langjährigen Meßreihen meteorologischer Stationen ermittelt. In Re-

3

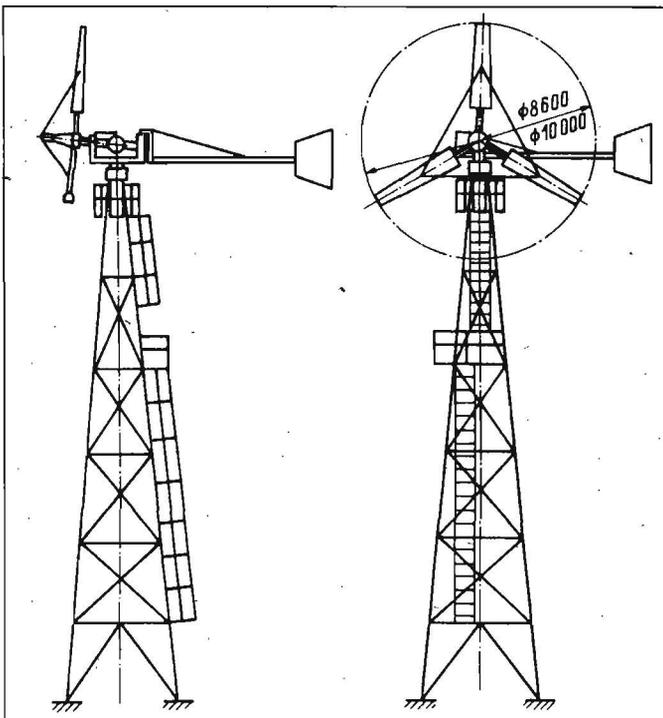


Bild 2. Regeln zur Wahl von Standorten für Windenergiekonverter mit weitgehend ungestörten Anströmverhältnissen

Bild 3. Windenergiekonverter WE-8/WE-10

Bild 4. WS-8/24 mit Verdichterantrieb zur Gewässerbelüftung

Tafel 2. Technische Daten der Windenergiekonverter WE-8 und WE-10

Parameter	Typ WE-8	WE-10
Rotordurchmesser	8,6 m	10 m
Rotorachsennhöhe (2 Turmvarianten)		12 m; 18 m
Windrichtungsnachführung		Hauptwindfahne
Leistungsregelung und -begrenzung		Rotor „dreht aus dem Wind“ mit Hilfe einer Seitenwindfahne
Getriebeübersetzung		gesamt 1:20,1 davon: 1:6,7 (Achsgetriebe) 1:3 (Riemenantrieb)
Generator		Synchrongenerator 400/231 V 50 Hz 20 kVA 1 500 min <sup>-1</sup>
Windgeschwindigkeitsbereich der Leistungsabgabe		4 bis 18 m/s
Jahresenergieproduktion		8 000 bis 12 000 kWh/a (in Abhängigkeit vom Standort)

gionen mit  $E_{pot,10} = 250 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$  sind WEK nur an Standorten mit einer Höhe von rd. 50 m über dem allgemeinen Geländeniveau (z. B. auf Hügeln) einsetzbar.

Zur Bestimmung der jährlichen Energieproduktion  $E_{WEK}$  ergibt sich analog zu Gl. (2):

$$E_{WEK} = \bar{P}_{WEK} (t) \cdot t. \quad (7)$$

Mit Einführung der konverterspezifischen Größen aus Gl. (3) und der Höhenbeziehung aus Gl. (6) ist die Energieproduktion eines Konverters in einer Höhe  $z$  ( $\hat{=}$  Rotorachsenhöhe):

$$E_{WEK,z} = E_{pot,z} \cdot \eta_{ges} \cdot \bar{A}_R. \quad (8)$$

Des weiteren sind zur Sicherung optimaler Betriebsbedingungen für WEK bei der Standortwahl die im Bild 2 dargestellten Regeln zu berücksichtigen.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Beziehungen und Berechnungen – wie die Gln. (4), (4a), (6) und (8) – beruhen auf vereinfachten Ansätzen und bilden die Grundlage für

eine erste Abschätzung der Leistung von WEK beim Einsatz an unterschiedlichen Standorten in der VR Polen.

### 3. Produktion und Einsatz von Windenergiekonvertern

Seit dem Jahr 1981 werden im Institut für Bauwesen, Mechanisierung und Elektrifizierung der Landwirtschaft Warschau Aufgaben zur Konstruktion, Installation und Prüfung von WEK gelöst. Als ein Kriterium für die konstruktive Gestaltung der Konverter wurden Kennwerte für den Materialaufwand vorgegeben. So ist z. B. bei der Installation von WEK in einer Region mit  $E_{pot,10} = 1\,000 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$  eine spezifische Energieproduktion von  $3,5 \text{ kWh/a}$  je  $1 \text{ kg}$  Konstruktionsmasse zu erreichen.

In die Serienproduktion wurden die Windenergiekonverter WE-8 und WE-10 überführt (Bild 3). Tafel 2 enthält die wichtigsten technischen Daten der Konverter. Mehr als ein Dutzend dieser Anlagen werden in landwirtschaftlichen Betrieben zur Heizwasserbereitung in Kopplung mit Speicherbehältern ein-

gesetzt. Prüfungen haben ihre Tauglichkeit für diesen Anwendungsfall bestätigt. Die Produktion der WEK haben Instandhaltungsbetriebe der Landwirtschaft übernommen.

### 4. Entwicklungen und Perspektiven

Im Entwicklungs- bzw. Versuchsstadium befinden sich weitere Prototypen von Windkraftanlagen:

- WP-3,5 (Antrieb einer Kolbenpumpe zur Wasserförderung)
- WS-8 und WS-8/24 (Antrieb eines Verdichters zur Belüftung von Gewässern, Bild 4)
- WE-12 und WE-18 (Elektroenergieerzeugung mit einem Synchrongenerator, Leistung  $37,5 \text{ kVA}$  bzw.  $62,5 \text{ kVA}$ ).

Weiterhin befindet sich ein Drehstromthyristorwandler für den Leistungsbereich von 5 bis  $15 \text{ kW}$  in der Projektierungsphase, und der Einsatz von Asynchrongeneratoren in WEK für den Netzparallel- und Inselbetrieb wird vorbereitet. Diese Arbeiten sollen bis zum Jahr 1990 abgeschlossen sein.

A 5459

## Strom aus Sonne und Wind für die Landwirtschaft<sup>1)</sup>

Dr.-Ing. J. Fraś, Landwirtschaftliche Akademie Szczecin, Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft (VR Polen)

### 1. Einleitung

Windkraftwerke und photovoltaische Solargeneratoren können in Zukunft in verschiedenen Regionen der Erde die Stromversorgung unterstützen oder sogar übernehmen. Beide Technologien haben sich einzeln bereits in einer Vielzahl von Versuchs- und Demonstrationsanlagen bewährt. Die Kombination von Sonnen- und Windenergie in einer Anlage bringt unter bestimmten Voraussetzungen Vorteile. So kann im Inselbetrieb (autarkes elektrisches Netz) die Versorgungssicherheit bei gleichzeitiger Verkleinerung des Energiespeichers wesentlich vergrößert werden. Ein solches kombiniertes Solar-Wind-Kraftwerk wurde vom Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft der Landwirtschaftlichen Akademie Szczecin (VR Polen) untersucht. Die Anlage soll die Nutzung von Sonnen- und Windenergie sowie deren erhöhte Verfügbarkeit durch die Kombination beider Energiequellen bei gleichzeitiger Energiespeicherreduzierung demonstrieren.

Die natürliche Voraussetzung für den Einsatz einer solchen Anlage ist das jahreszeitlich gegenläufige Angebot von Sonnen- und Windenergie. Im Bild 1 sind als Beispiel die jährlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung und der mittleren Windgeschwindigkeit im Nordwesten Polens dargestellt.

### 2. Aufbau des Solar-Wind-Kraftwerks

Die Anlage besteht aus einem zweiachsig nachgeführten photovoltaischen Solargenerator und einem Windenergiekonverter (WEK) mit Elektrogenerator. Über eine neuentwickelte Verbrauchersteuerung werden die Energiewandler mit den unterschiedlichen Energieverbrauchern zusammengeschaltet. Im Bild 2 ist das Schaltschema des untersuchten Solar-Wind-Kraftwerks dargestellt.

#### 2.1. Komponenten der Anlage

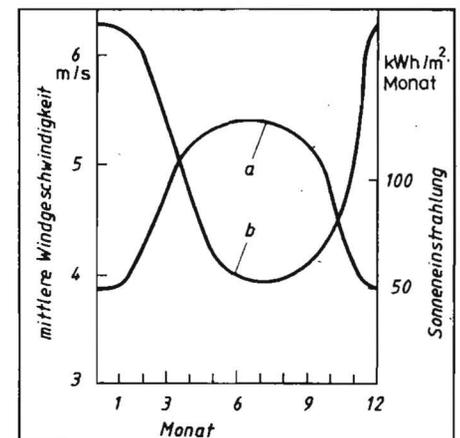
##### 2.1.1. Solargenerator

Der Grundbaustein des Solargenerators ist die Solarzelle. Die Strahlungsenergie der Sonne wird in der Solarzelle direkt in elektrische Energie umgewandelt. Das Prinzip dieser photovoltaischen Energieumwandlung beruht auf dem Effekt der Absorption von Licht in Halbleitern. Dabei werden positive und negative Ladungsträger freigesetzt. Das elektrische Feld zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Bereichen des Halbleiters trennt die freien Ladungsträger und führt sie über metallische Leiter den Verbrauchern zu (Bild 3). Typische Wirkungsgrade liegen bei rd. 10%. Um eine optimale Energieausbeute zu erreichen und die Stromerzeugungskosten zu senken, ist es sinnvoll, die Solargeneratoren der Sonne nachzuführen. Im Bild 4 wird das dadurch erreichbare gleichmäßige Energieangebot während eines Sonnentages verdeutlicht. Auf diese Weise erreicht man eine bis zu 50% höhere Energieausbeute als bei der sonst üblichen Aufstellung unter einem festen Winkel (Bild 5).

Die zweiachsig nachführbare Tragkonstruktion ist aus einem konzentrierenden, solarthermischen Kollektormodul entwickelt worden. Die Nachführung wird von einem Sensor gesteuert. Sie arbeitet autark und folgt dem Sonnenstand, so daß die Solarmodule stets senkrecht angestrahlt werden. Bei Störungen an der autarken Nachführung ist eine Handsteuerung möglich.

Die Tragkonstruktion ist auf einer rd.  $3 \text{ m}$  hohen Säule um zwei Achsen drehbar angebracht. Ihre Beweglichkeit um die horizontale Achse reicht von der Stellung „Solarzellen zeigen nach oben“ bis zur Stellung „Solarzellen zeigen nach unten“, z. B. nachts

Bild 1. Mittlere jährliche Klimadaten; a Sonneneinstrahlung, b mittlere Windgeschwindigkeit



1) Fachliche Bearbeitung: Dipl.-Ing. J. Schwabe, Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben