

Kleine Windkraftanlagen

Nennleistung im Netzparallelbetrieb bis 5 kW

von M. Dittrich, J. Röhrer, Th. Schmalschläger

Noch immer hält sich das Vorurteil, daß sich die Windenergienutzung in Süddeutschland nicht lohnt und, daß die Stromgestehungskosten viel zu hoch sind. Auf der anderen Seite werden für Strom aus Photovoltaik bereitwillig 2 DM/kWh bezahlt. Im Rahmen von zwei Diplomarbeiten /1/ und /2/ wurde untersucht, inwieweit der netzparallele Betrieb kleiner Windkraftanlagen in windschwachen Gebieten technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Der vorliegende Bericht faßt die Ergebnisse zusammen.

Aus den verschiedenen möglichen Anlagentypen hat sich bei den Klein-Windkraftanlagen (Klein-WKA), äquivalent zu großen Anlagen, der Horizontalachsläufer als die vorherrschende Bauform durchgesetzt (siehe Abb. 1).

Aufbau und Funktionsweise

Die Anlage setzt sich zusammen aus den Komponenten

- Rotor
- Generator (meist mit einem Gehäuse geschützt)
- Windfahne
- Masten.

Der Rotor, der wichtigste Teil der WKA, ist für die Umsetzung der Windkraft in die Drehbewegung des Generators verantwortlich. Die abgegebene Leistung beträgt:

$$P \sim v^3 \cdot R^2$$

Sie steigt proportional mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit (v) und dem Quadrat des Rotordurchmessers (R). Die effektive Leistung der WKA kann also über die Windgeschwindigkeit und/oder den Rotordurchmesser gesteigert werden. Ist ein Einsatz in Schwachwind-Regionen vorgesehen, muß der Rotor auf ein Optimum ausgelegt sein.

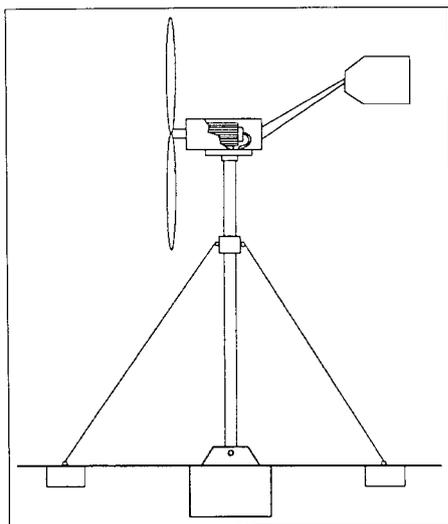


Abb. 1: WKA mit abgespanntem Rohrmasten

Dabei spielt neben den Kosten die Abstimmung zwischen Rotor und Generator eine wichtige Rolle.

Die sogenannte spezifische Flächenleistung Π

$$\Pi = \frac{P}{A} = \frac{\text{Generatorleistung [W]}}{\text{Rotorkreisfläche [m}^2\text{]}}$$

sollte, um ein Anlaufen der WKA bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (< 3 m/s) zu ermöglichen, einen kleinen Wert aufweisen.

Auch die Anzahl der Rotorblätter spielt in diesem Zusammenhang eine Rolle. Vielblatt-Rotoren (> 4 Rotorblätter) liefern hohe Drehmomente bei niedrigen Drehzahlen, Zwei- bis Dreiblatt-Rotoren hohe Drehzahlen mit niedrigeren Momenten. Klein-WKA ohne Getriebe müssen also mit Zwei- und Dreiblatt-Rotoren ausgerüstet werden, um die hohen Drehzahlen für den Generator bereitstellen zu können. Der Dreiblatt-Rotor stellt dabei die bessere Alternative dar. Durch sein, über die Rotorkreisfläche, ausgeglichenes Massenträgheitsmoment weist er ein ruhigeres Laufverhalten bei gleichzeitig früherem Anlauf auf.

Inwieweit eine WKA für den Einsatz in Schwachwindregionen ausgelegt ist, erkennt der Betreiber als Endprodukt dieser Abstimmung an der Lei-

stungskennlinie (Abgegebene Leistung pro Windgeschwindigkeit). Die Leistungsabgabe muß bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (> 2 m/s) beginnen und einen schnellen Anstieg bis zur Nennleistung aufweisen (siehe Abb. 2). Die Nennleistung sollte bei 10 m/s erreicht sein.

Damit der Rotor seine volle Leistung bringen kann, muß er optimal zum Wind ausgerichtet sein. Klein-WKA werden zu diesem Zweck mit einer Windfahne ausgerüstet.

Um eine Zerstörung der Anlage auszuschließen, müssen Windgeschwindigkeiten ab einer bestimmten Drehzahl- und Leistungsabgabe begrenzt werden. Klein-WKA werden ausschließlich mechanisch geregelt. Die Verkleinerung der effektiven Rotorkreisfläche durch die Drehen des Rotors aus dem Wind in die verbreitetste Form. Nachteilig ist, daß durch die seitliche Ablenkung der Rotor stark belastet wird (siehe Abb. 3).

Nur ein Hersteller (AeroCraft) mittlerweile die von den großen Herstellern bekannte Rotorblattverstellung. Hier wird die Leistung dadurch begrenzt, daß der aerodynamische Antriebsmoment der Rotorblätter durch eine Verstellung des Anströmwinkels verringert wird. Eine schräge Anströmung kann dadurch vermieden werden.

Zur fertigen WKA wird also noch ein Mast benötigt. Verschiedene Konstruktionen kommen zum Einsatz: Vom abgespannten Rohrmasten (siehe Abb. 1), bis zum frei stehenden beinigen Masten, der eine Errichtung der WKA ohne Fundament erlaubt.

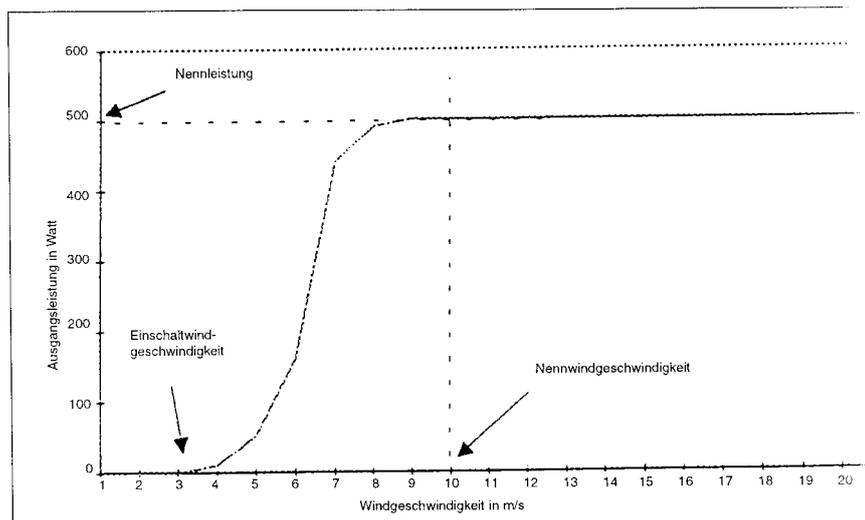


Abb. 2: Leistungskennlinie einer WKA

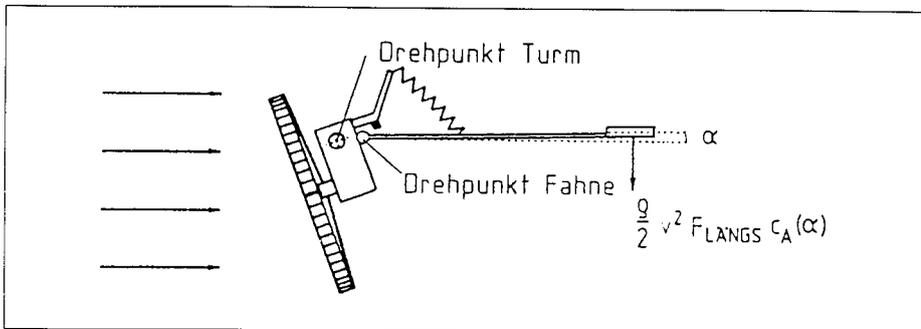


Abb. 3: Drehzahlregelung einer Kleinwindkraftanlage über die sog. Eklipsen-Regelung

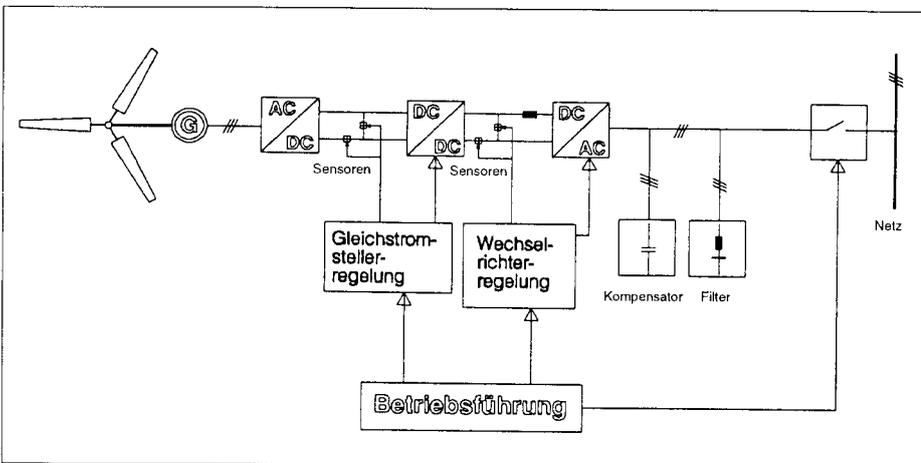


Abb. 4: WKA mit Gleichspannungszwischenkreisrichter

Netzparallelbetrieb

Die Umsetzung der elektrischen Energie in eine dem Netz entsprechende Form, muß bei Klein-WKA im Netzparallelbetrieb genauso wie bei einer PV-Anlage über eine Umrichterschaltung erfolgen, um die windabhängigen variablen Größen (Spannung und Frequenz) dem Netz anpassen zu können. Eine direkte Kopplung des Generators mit dem Netz ist nicht möglich. Der mittlerweile auch bei großen WKA verbreitete drehzahlvariable Betrieb liefert hier die besten Ergebnisse. Da Klein-WKA ausschließlich mit Permanentmagnet erregten Generatoren betrieben werden, ohne Einflußmöglichkeit auf die Ausgangsspannung, kann die Umwandlung nur über eine selbstgeführte Stromrichterschaltung mit Gleichspannungs-Zwischenkreis erfolgen. Abb. 4 zeigt den schematischen Aufbau einer derartigen Schaltung.

Die vom Generator in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit abgegebene Leistung wird dabei über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und mit einem Gleichstromsteller (DC-DC-Wandler) in einen Zwischenkreis mit konstanter Spannung gesetzt. Aus dem Gleichspannungs-

Leistungs-klasse	Bezeichnung	Leistung in Watt	Flügelzahl	Rotordurch-messer m	Spez. Flächen-leistung (W/m)	Netto-Preis in DM	Lieferant Hersteller
I	LV 025	25	5	0,57	98	800	AEROGEN
	LV 003	50	5	0,77	107	1359	AEROGEN
	WG 910	70	5	0,91	108	962	A. Habarth
	Solavent W 100	100	2	100 x 100		3497	Solavent
	AC 120	120	5	1,2	106	1990	AeroCraft
II	AC 240	240	5	1,65	112	2450	AeroCraft
	LMW 250	250	3	1,7	110	2465	W+W Windtechnik
	WB 15 R-24	300	3	1,5	170	3915 *	Atlantis GmbH
	D. 303	300	3	1,90	106	2785	A. Habarth
	AC 300	300	3	2,4	66	3790	AeroCraft
	Solavent F 230	300	2	2	95	2500	Solavent
	Solavent W 300	300	2	190 x 185		8100	Solavent
III	AC 500	500	3	2,4	111	4390 *	AeroCraft
	Solavent F 400	500	2	2,5	102	3800	Solavent
	WB 20 R-24	600	4	2	191	5085 *	Atlantis GmbH
	Solavent F 600	600	3	2,5	123	4500	Solavent
	W 600	600	2	2,1	173	3140	Whisper
	LMW 600	600	2	2,2	158	4094	W+W Windtechnik
	AC 750	750	3	2,7	131	4690 *	AeroCraft
IV	W 1000	1000	2 [3]	2,7	175	4400 [5100]	Whisper
	LMW 1003	1000	3	3	141	5295,5	W+WWindtechnik
V	LMW 2500	2500	3	5	127	16594	W+W Windtechnik
	W 3000	3000	2 [3]	4,5	189	8800 [9500]	Whisper
	AC 3000	3000	3	5,25	139	25500 **	AeroCraft
	LMW 3600	3600	3	5	183	16594	W+W Windtechnik
	AC 5000	5000	3	5,25	231	28900 **	AeroCraft

Stand 1994. Die Angaben erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

* Preis inkl. Laderegler

** Preis inkl. 12m Mast und el. Belastungssteuerung/Laderegler

Tab. 1: Marktübersicht von Klein-WKA im Leistungsbereich bis 5 kW

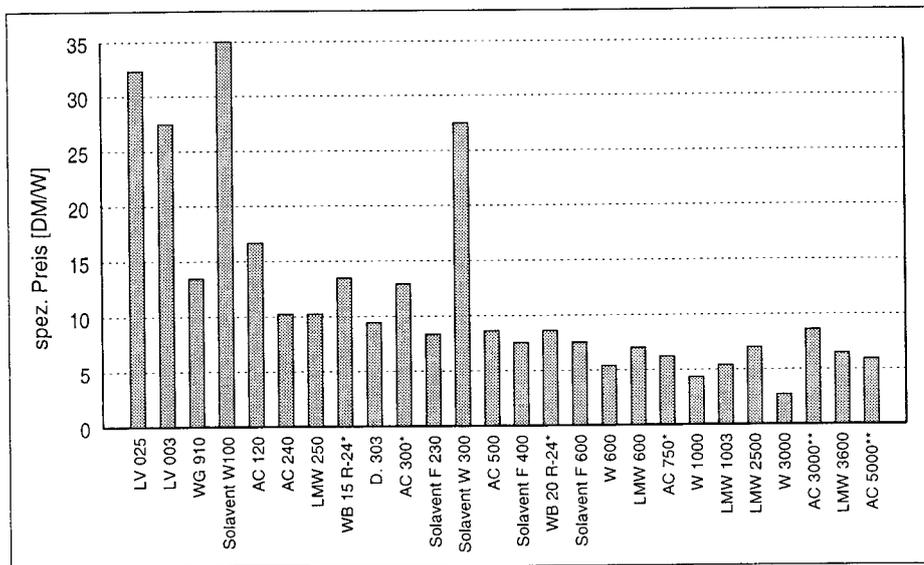


Abb. 5: Spezifische Preise (* Preis incl. Laderegler ** Preis incl. Laderegler und 12 m Mast)

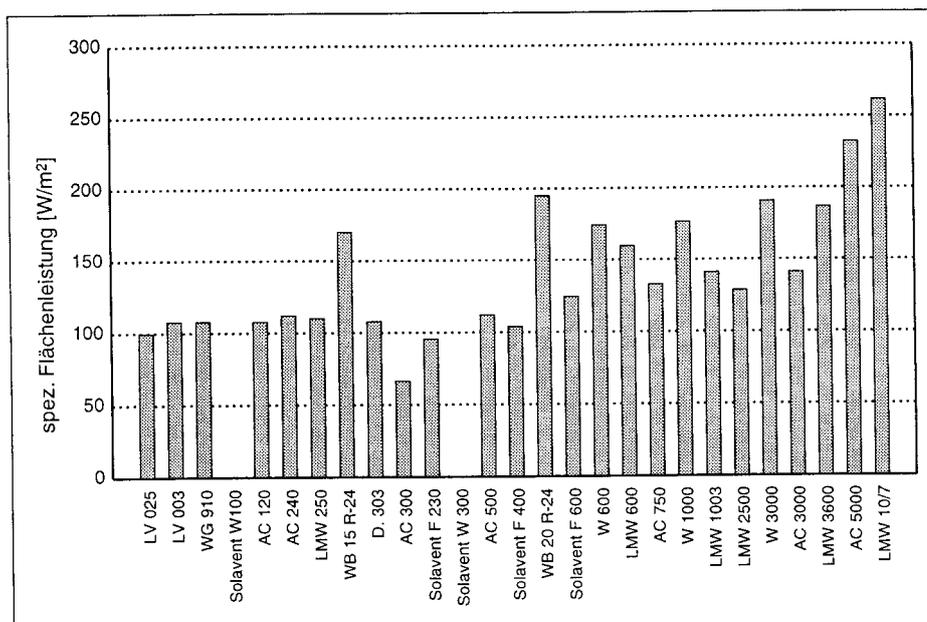


Abb. 6: Spezifische Flächenleistung

Um die Auswahl einer geeigneten WKA zu erleichtern, sollte ein Interessent einen auf seine Wünsche abgestimmten Bewertungskatalog erstellen, der dann eine qualifizierte Beurteilung ermöglicht.

Als Grundlage des Bewertungskatalogs sollten folgende Schwerpunkte dienen:

- Sicherheit der Anlage
 - Überlebensgeschwindigkeit der WKA
 - Drehzahlregelung/Sturmabschaltung
 - Zusatzbremse
- Aufstellungsort
 - Wieviel Platz steht zur Verfügung
 - Schallemission (wie laut ist die WKA im Betrieb)
- Leistungsabgabe in Schwachwindregionen
 - Einschaltgeschwindigkeit
 - Nennwindgeschwindigkeit
 - Anzahl der Rotorblätter
 - Rotordurchmesser
 - Nenndrehzahl
 - Spez. Flächenleistung (siehe oben)
- Bedingungen für den Netzparallelbetrieb
 - Bietet der Hersteller ein Umrichtersystem an
 - Besteht die Möglichkeit einer hohen Ausgangsspannung >24V
- Kosten
 - spezifischer Preis in [DM/W].

Mit Hilfe des Kataloges kann dann eine Auswertung erfolgen. Abb. 5 zeigt in der Übersicht den spezifischen Preis der in Tab. 1 aufgeführten WKA. In Abb. 6 ist die spezifische Flächenleistung dargestellt, wie oben beschrieben, die besonders für die Leistungsabgabe in Schwachwindregionen von Bedeutung ist.

Bei der Auswahl einer WKA muß jedoch immer das Gesamtbild aus den einzelnen Bewertungskriterien gesehen werden. Denn nur eine optimale Abstimmung der WKA bezüglich des Standortes, dem Einsatzzweck und der Wirtschaftlichkeit ermöglicht einen sinnvollen Einsatz der WKA.

Standortwahl

Die Windgeschwindigkeit ist das entscheidende Kriterium für die erzeugbare Leistung und bildet somit die Grundlage für eine ökonomisch sinnvolle Windenergienutzung. Dieser Tatsache kommt deshalb bei der Standortwahl besondere Bedeutung zu. Großen WKA mit einer Nennleistung > 100 kW können z.B. heute schon ab einer mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten größer als 5 m/s ohne finanzielle Fördermittel wirtschaftlich betrieben werden.

Die Beeinflussungen des Windes durch orographische und topographische Strukturen (z. B. erhöhte Rau-

zwischenkreis kann dann die Leistung über einen Wechselrichter in das öffentliche Netz eingespeist werden. Wegen unterschiedlicher Kennlinien muß die Schaltung an jeden Generatortyp angepaßt werden, es können dadurch keine Standardgeräte wie z.B. bei PV-Anlagen zum Einsatz kommen.

Die Entwicklung entsprechender Umrichter für den Netzparallelbetrieb scheint, mit aufkommender Nachfrage, gerade erst zu beginnen. Einzelanfertigungen sind schon erhältlich (Fa. INEK GbR).

Einige WKA-Hersteller bieten jedoch die Möglichkeit ihre WKA über einen Lade/Belastungsregler mit einem Standard-Wechselrichter in Netzparallelbetrieb zu betreiben. Dabei geht ein Teil der möglichen Energie verloren, es stellt jedoch eine Möglichkeit dar, bei dem derzeitigen Entwicklungsstand eine WKA im Netzparallelbetrieb zu betreiben.

Aufgrund der aufwendigen Technik und der Verluste bei der Umwandlung wird aber auch in der näheren Zukunft ein Netzparallelbetrieb erst ab einer Nennleistung von ca. 1 kW sinnvoll sein.

Marktübersicht

Eine Übersicht über die derzeit auf dem Markt erhältlichen WKA bis 5 kW Nennleistung gibt Tab. 1. Insgesamt bieten sieben Hersteller 24 Horizontalachs- und zwei Vertikalachs-WKA an.

In der Mehrzahl handelt es sich dabei um Batterielader mit Ausgangsspannungen von 12V und 24V, die z. B. im Zusammenspiel mit einer PV-Einheit als Versorger einer Inselanlage bestimmt sind. Eine Umrüstung auf die für den Netzparallelbetrieb benötigten höheren Spannungen (>100 V) ist jedoch bei den meisten Herstellern ab einer Anlagengröße von 500 W möglich.

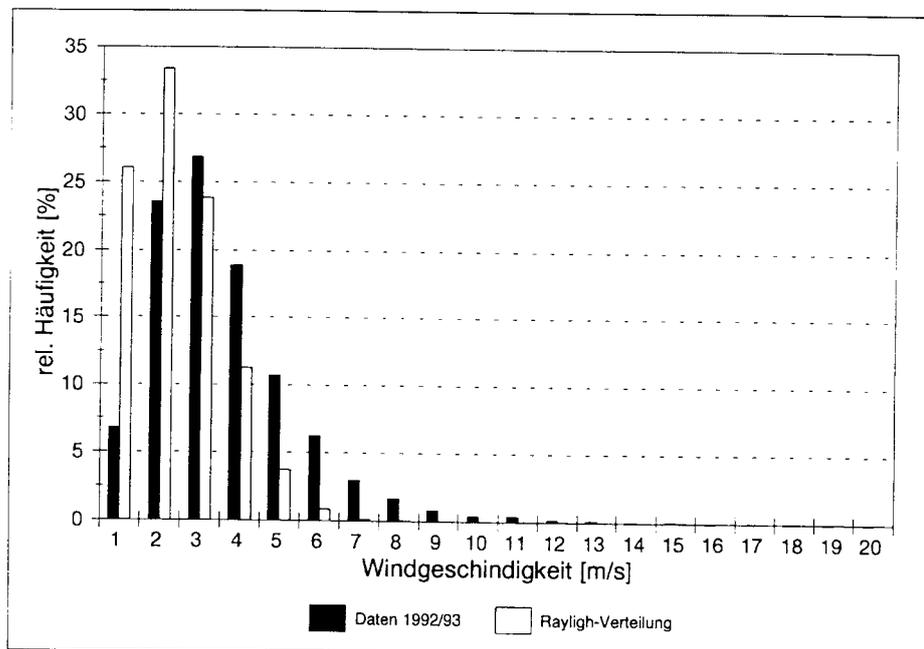


Abb. 7: Relative Häufigkeit der Windgeschwindigkeit und Rayleigh-Verteilung für den Standort FH-München

higkeit durch Bäume und Bebauungen, Tallagen, windabgewandte Lagen, Kanalisierungseffekte) führen außerdem zu lokal ausgeprägten Besonderheiten der Windströmung, die berücksichtigt werden müssen. So wirken sich z. B. von Gebäuden oder Bäumen erzeugte Turbulenzen negativ auf den Betrieb und die Lebensdauer von Windkraftanlagen aus. Deshalb sollte bei der Standortwahl auf einen ausreichenden Abstand zu größeren Hindernissen geachtet werden. Andererseits verbessert sich die Ertragslage, wenn natürliche Erhebungen als Standort genutzt werden.

Wirtschaftlichkeit

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit müssen zunächst die gesamten Investitionskosten ermittelt werden. Im wesentlichen setzen sie sich aus folgenden Kosten zusammen:

- Ab-Werk-Preis der Windkraftanlage
 - Preis für den zugehörigen Mast
 - Montage- und Transportkosten
 - Planungskosten (auch für kleine Windkraftanlagen ist eine Baugenehmigung erforderlich)
 - Kosten für das Fundament
 - Netzanschlußkosten
 - Grundstückskosten, falls ein Grundstück zur Errichtung einer Windkraftanlage gekauft wird
 - Kosten für die Windkraftklassifizierung am beabsichtigten Standort
 - Beratungskosten (Finanzplanung, Ingenieurplanung)
 - Reisekosten
 - Werkzeuge
 - Wegemäßige Erschließung.
- Darüber hinaus sind die laufenden Betriebskosten zu berücksichtigen. Hierzu zählen vor allem Kosten für
- Wartung und Instandsetzung

- Landkosten (Pacht)
- Versicherungen
- Kapitalkosten für die Gesamtinvestition.

In welcher Höhe die einzelnen Kosten konkret für den Betreiber einer Windkraftanlage bei der Berechnung der Investitions- und Betriebskosten zu berücksichtigen sind, hängt von der Eigenleistung ab, die der Betreiber selbst erbringen kann und die er nicht in seine Wirtschaftlichkeitsberechnung einbezieht. Für einen technisch versierten Anwender werden Wartungs- und Instandsetzungskosten sicherlich weitaus geringer ins Gewicht fallen als für einen technischen Laien.

Ebenso wichtig ist die Frage, ob der Einzelne die Kapitalkosten für die Gesamtinvestition berücksichtigen möchte. Sie stellen selbst bei einem niedrigen Zinsfuß von z. B. 6 % einen bedeutenden Posten dar.

Eine Windkraftanlage arbeitet wirtschaftlich, wenn die Differenz aus Ertrag und anfallender Kosten einen positiven Wert ergibt. Zur Ertragsbestimmung muß zwischen Eigenverbrauch und Netzeinspeisung unterschieden werden. Bei vollständigem oder teilweisem Eigenverbrauch an Windstrom kann die Einsparung an Netzstrom oder anderen Energieträgern als indirekter Ertrag angesetzt werden.

Darüber hinaus tragen Förderprogramme zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei, wobei die Zuschüsse üblicherweise als laufender Ertragszuschuß oder als einmaliger Investitionszuschuß gewährt werden.

Juristische Aspekte

In der Bundesrepublik Deutschland existiert bisher keine nur auf Windkraftanlagen zugeschnittene gesetz-

liche Regelung. Dies führt dazu, daß in einzelnen Fällen von Bundesland zu Bundesland unterschiedliche Entscheidungen getroffen werden.

Es ist deshalb ratsam, bereits während der Planungsphase die landesspezifischen juristischen Aspekte zu berücksichtigen und frühzeitig mit den zuständigen Baubehörden Kontakt aufzunehmen. Dem Genehmigungsverfahren sollte daher eine fundierte Bauberatung vorausgehen. Hilfreich sind hierbei folgende Unterlagen:

- Amtlicher Lageplan
 - Gezeichneter Lageplan
 - Anlagenbeschreibung (Fotos, technische Zeichnungen, Abmessungen, technische Daten)
 - Aussagefähige Fotos von der Umgebung des geplanten Standorts.
- Allgemein sind für das Genehmigungsverfahren jedoch folgende gesetzlichen Grundlagen und Bestimmungen zu berücksichtigen:
- Energiewirtschafts- und Stromspeisungsgesetz
 - Bundesimmissionsschutzgesetz
 - Bauplanungs- und Bauordnungsrecht
 - Haftpflicht
 - Natur- und landschaftsschutzrechtliche Bestimmungen
 - Denkmalschutz
 - Gewerbeordnung.

Das Baugenehmigungsverfahren beginnt mit der Einreichung des Bauantrages, der vom Bauherrn schriftlich und unterzeichnet bei der zuständigen Baubehörde einzureichen ist. Besitzt der Bauherr nicht die erforderliche Sachkunde, ist von ihm ein Entwurfsverfasser (Architekt, Bauingenieur), Unternehmer und Bauleiter zu benennen. Die mit dem Bauantrag einzureichenden Unterlagen (das sind alle Unterlagen, die zur Beurteilung des Bauvorhabens notwendig sind) sind vom Entwurfsverfasser zu unterschreiben.

Verantwortlich für die richtige Bau-durchführung ist der Unternehmer, der Bauleiter überwacht die baulichen Maßnahmen.

Stehen der Errichtung der Windkraftanlage keine öffentlich-rechtlichen Vorschriften entgegen, wird die Baugenehmigung (evtl. mit Auflagen) schriftlich dem Bauherrn mitgeteilt. Erst ab diesem Zeitpunkt darf der Baubeginn erfolgen, ein vorzeitiger Baubeginn kann mit hohen Geldbußen belegt werden.

Windgeschwindigkeit und Energieertrag einer WKA

Die Windgeschwindigkeit und der mögliche Energieertrag sind die beiden wichtigsten Kriterien inwieweit die Errichtung einer WKA an einen bestimmten Standort möglich und sinnvoll ist.

Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten müssen die Windverhältnisse so genau wie möglich bestimmt werden. Denn eine Fehleinschätzung der Windgeschwindigkeit um 10 % entspricht schließlich einer Fehleinschätzung der Windleistung von ca. 30 %

In Schwachwindregionen kommt dieser Umstand besonders zum tragen. Die WKA werden hier, wegen der niedrigen Windgeschwindigkeiten im unteren Grenzbereich ihrer Leistungsabgabe betrieben.

Windverhältnisse eines Standortes, Messung und Darstellung

Die Bestimmung der Windverhältnisse kann grundsätzlich nur über eine Messung erfolgen. Was nicht heißt, daß immer eine direkte Messung durchgeführt werden muß. Es können z. B. auch Daten des Deutschen Wetterdienstes zugrunde gelegt werden.

Folgende Möglichkeiten stehen zur Verfügung:

- langjährige Messung
- Kurzzeitmessung
- Abschätzung über die Weibull - oder Rayleighverteilung.

Die langjährige Messung liefert das beste Ergebnis. Der zu erwartende Energieertrag kann sehr gut angenähert werden. Es muß jedoch eine aufwendige und teure Meßeinrichtung über mehrere Jahre betrieben werden.

Stehen Zeit und nötige Gelder nicht zur Verfügung, können ersatzweise die Windverhältnisse auch über eine Kurzzeitmessung im Bereich von 3 bis 6 Monaten mit einer ausreichenden Genauigkeit bestimmt werden. Die Unsicherheit der jahreszeitlichen Windschwankungen durch örtliche Gegebenheiten, wie beispielsweise Herbststürme, und die jährlichen Windschwankungen bleiben hier unberücksichtigt und gehen als Unsicherheitsfaktor ein.

Ohne eine konkrete Messung können die Windverhältnisse mit Hilfe der Rayleigh-Verteilung auf der Basis der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit angenähert werden. Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit kann für Deutschland und Europa aus denmittlerweile für alle Gebiete ausgeführten Windatlas entnommen werden (siehe Literatur-Verzeichnis). Dieser Atlas ist eine vom Deutschen Wetterdienst erstellte Windkarte mit den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten, auf der Grundlage einer mindestens 10jährigen Messung.

Der Betreiber sollte bei der Auswahl eines der Verfahren grundsätzlich immer zwischen Kosten und Nutzen unterscheiden. Eine Langzeit-

messung für die Errichtung einer WKA mit einer Leistung von z.B. 100 W mit Investitionskosten unter 5000 DM wäre absolut falsch kalkuliert.

Das Windhistogramm ist ein auf Stundenmittelwerte aufgebauter Tages-, Monats- oder Jahresgang. Aufgeteilt auf eine Klassenbreite von 1 m/s wird eingetragen wieviel Stunden der gemessenen Zeit die jeweilige Windgeschwindigkeit herrschte. Aus der somit gewonnenen Summenhäufigkeit kann dann die relative Häufigkeit 'hi' gebildet werden, die für die Berechnung des Energieertrages zugrundegelegt wird. Abb. 7 zeigt eine für Schwachwindgebiete typische Häufigkeitsverteilung. Der Hauptanteil der Windgeschwindigkeit liegt zwischen 2 und 4 m/s.

Der Häufigkeitsverteilung liegen gemessene Daten über zwei Jahre zugrunde. Die daraus resultierenden Mittelwerte können Tab. 2 entnommen werden.

Zum Vergleich ist in Abb. 7, die anhand der mittleren Jahresgeschwindigkeit aus dem Bayerischen Windatlas berechnete Rayleigh-Verteilung dargestellt, die dritte der oben genannten Methoden zur Windgeschwindigkeitsbestimmung.

Der aus dem Windatlas entnommene Mittelwert der Windgeschwindigkeit für den Raum München beträgt in einer Meßhöhe von 10 m:

$$v_{10} = 1,4 \text{ m/s}$$

Da der geplante Standort auf dem Dach der FH-München in einer Höhe von 35 m liegt muß der Höhengradient der Windgeschwindigkeit (die effektive Windgeschwindigkeit steigt mit zunehmender Höhe) in die Rechnung mit einbezogen werden.

Der Höhengradient kann mit folgender Beziehung abgeschätzt werden:

$$v_n = v_{10} \cdot (n/10)^P$$

mit
 v_n Windgeschwindigkeit in der Höhe n
 n Nabenhöhe
 P Höhenexponent.

Zusätzlich ist in dieser Rechnung der Höhenexponent mit aufgenommen. Er ist ein Maß für die Abschwächung der freien, ungebremsten Windgeschwindigkeit durch die Oberflächenrauigkeit.

Bei einer ungefähren Meßhöhe von 35 m, ergibt sich mit einem Geländefaktor 0,4 für Städte eine mittlere Windgeschwindigkeit von:

$$v_{\text{mittel}} = 2,3 \text{ m/s}$$

Im letzten Schritt müssen die Werte der einzelnen Parameter, im Bezug zur jeweiligen Windgeschwindigkeit von 1 bis 20 m/s, zusammengefaßt und die Summe des jährlichen Energieertrages gebildet werden.

Für die in Abb. 8 dargestellte Leistungskennlinie der AC 500 (technische Unterlagen siehe Marktanalyse) ergibt sich unter Einbeziehung der Verluste für die gemessenen Daten ein Energieertrag von:

$$E = 589 \text{ kWh/a}$$

und bei Verwendung der Rayleigh-Verteilung:

$$E_{\text{Rayleigh}} = 117,5 \text{ kWh/a}$$

Ein im Vergleich zum gemessenen Wert nicht mehr zu akzeptierendes Ergebnis. Der große Unterschied ist in diesem Fall auf die sehr exponentielle Lage auf dem Dach der FH-München zurückzuführen. Bei normaler Aufstellung am Boden kann ein besseres Ergebnis erwartet werden.

Grundsätzlich liefert also eine Messung immer ein genaueres Ergebnis. Bei der Aufstellung einer WKA über 1 kW Nennleistung mit entsprechenden Investitionskosten sollte deshalb immer eine Windmessung erfolgen.

Ergebnis-Bewertung:

Nach Ermittlung des Energieertrages muß das gewonnene Ergebnis bewertet werden. Um eine Aussage über die Möglichkeit eines Einsatzes treffen zu können.

Als Vergleich soll hier der Energieertrag einer durchschnittlichen PV-Anlage in Deutschland herangezogen werden, auf der Basis von 1 kW Nennleistung. Ein Vergleich zu konventionellen Energieerzeugern ist wegen deren Möglichkeit einer konstanten Energieabgabe in diesem Punkt nicht sinnvoll.

Die oben betrachtete WKA liefert:

$$E_{\text{AC500}} = 1178 \text{ kWh/kW p.a.}$$

Eine PV-Anlage liefert dagegen nach der ersten Auswertung des 1000-

Winddaten	1992/1993
Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in m/s	3,0815
Maximal aufgetretener Wert in m/s	14,45

Tab. 2: Winddaten, Standort FH-München/Lothstr.

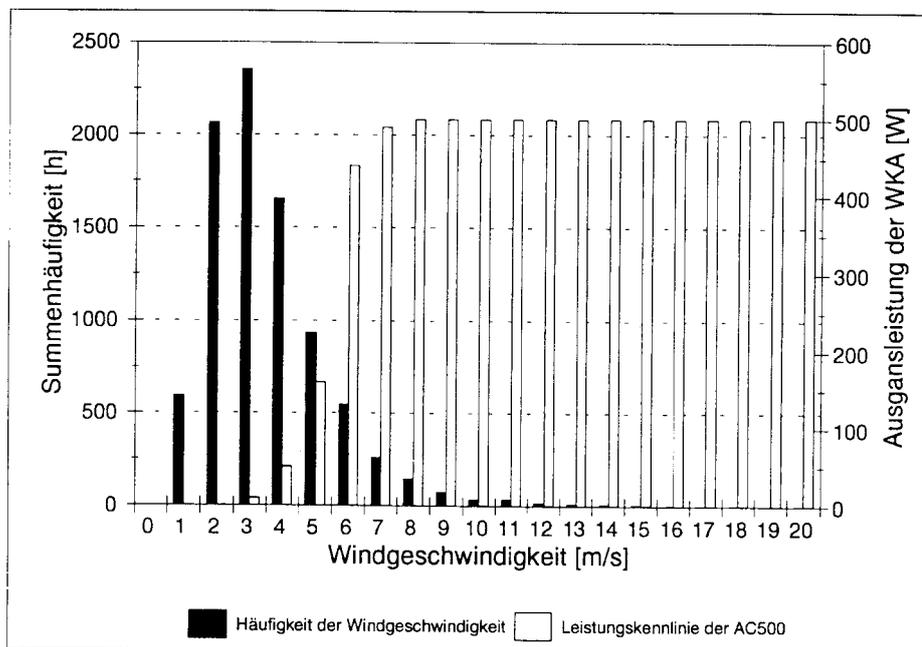


Abb. 8: Energieertragsberechnung der AC 500 am Standort FH-München

Dächer-Programmes einen jährlichen Energieertrag von:

$$E_{PC} = 757 \text{ kWh/kW p.a.}$$

Es ist also zu erkennen, daß die WKA bei dem heutigen technischen Entwicklungsstand und den Windverhältnissen des Standortes einen höheren Energieertrag erwarten läßt als eine PV-Anlage gleicher Nennleistung.

Wie in Abb. 7 zu erkennen ist verschieben sich die Werte der berechneten Häufigkeitsverteilung im Vergleich zu den gemessenen hin zu kleineren Windgeschwindigkeiten. Die Abschätzung des Energieertrages über die Rayleigh-Verteilung wird also ein schlechteres Ergebnis liefern (siehe unten).

Energieertrags-Berechnung

Aus dem Windhistogramm und der Leistungskennlinie der ausgewählten WKA kann nun der mögliche Energieertrag (Abb. 8) errechnet werden. Der Wirkungsgrad des Umrichters und die technische Verfügbarkeit müssen dabei als Verlustquellen zusätzlich mit berücksichtigt werden.

Der Wirkungsgrad des Umrichters kann, da Daten aus der Praxis fehlen, nur theoretisch abgeschätzt werden. Zieht man einen Vergleich zu den Wirkungsgraden von Wechselrichtern für PV-Anlagen erkennt man, daß diese bei 30 % der Nennleistung (P_N) ihren endgültigen Wirkungsgrad von 90 % erreichen.

Der Umrichter ist im Leistungsteil in dem die Verluste anfallen, aus einem Wechselrichter und einem DC-DC-Steller aufgebaut. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, daß sich dieser, im Hinblick auf die Verluste, ähnlich verhält wie

ein PV-Wechselrichter, unter der Berücksichtigung des zusätzlichen Gleichstromstellers.

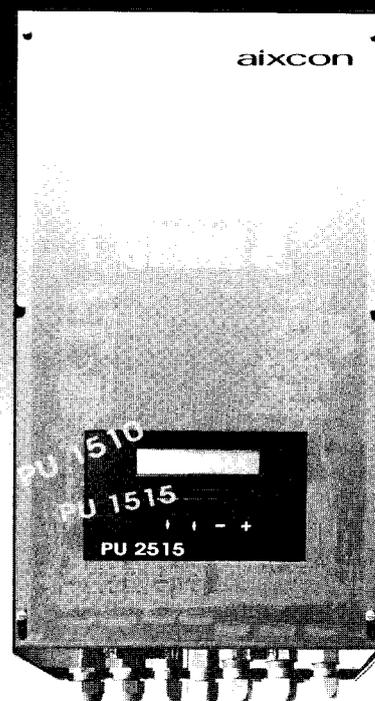
Bei einer groß dimensionierten Drossel können die ohmschen Verluste des Gleichstromstellers vernachlässigt werden. Es bleiben nur noch die durch den Bahnwiderstand der Halbleiter verursachten Verluste übrig. Da diese im Vergleich zu den umgesetzten Leistungen sehr gering sind, geht der Gleichstromsteller nur mit wenigen Prozentpunkten in den Wirkungsgrad mit ein.

Für die Energieertragsberechnung kann also der Wirkungsgrad mit 80 % bis zu einer Ausgangsleistung von $0,6 \cdot P_N$ und darüber mit 90 % angesetzt. Dies bedeutet eine Vereinfachung auf zwei Stufen, im Gegensatz zu dem kontinuierlich ansteigenden realen Wirkungsgradverlauf. Diese Annahme ist dadurch gerechtfertigt, daß im unteren Leistungsbereich der Wirkungsgrad niedrig angesetzt wird ist. Die technische Verfügbarkeit der WKA wird mit 90 % festgelegt.

Verwendete Literatur

- /1/ M. Dittrich: Klein-Windkraftanlagen bis 5 kW Nennleistung im Netzparallelbetrieb; Diplomarbeit, Stadtwerke München, 1995
- /2/ J. Röhrer: Genehmigungsrechtliche und wirtschaftliche Betrachtungen zum netzparallelen Einsatz kleiner Windkraftanlagen bis 5 kW Nennleistung im Raum München; Diplomarbeit Stadtwerke München, 1995
- /3/ H. Schulz: Kleine Windkraftanlagen – Technik, Erfahrungen, Meßergebnisse; Öko-Buch Stauf bei Freiburg 1991, Marktübersicht 1993
- /4/ Windatlas

FAMILIEN ZUWACHS



Der bewährte PV-Umrichter PU2515 für den Netzparallelbetrieb hat zwei Geschwister bekommen:

den PU 1510 und den PU 1515. Beide Geräte haben eine Nennleistung von 1,5 kW und können ohne Probleme an bis zu 2,2 kW großen PV-Generatoren betrieben werden.

Der PU 1510 arbeitet mit einer Nennspannung von 100 Volt, der PU 1515 mit einer Nennspannung von 150 Volt.

Natürlich haben auch die beiden neuen "Kleinen" alle Vorteile des großen Bruders:

Betriebsdatenspeicherung für die letzten 45 Tage, Fernüberwachungsoption, Inselbetriebsfähig (Notstromversorgung), Anschlußmöglichkeit für externes Sensorkit zur Erfassung der Solarstrahlung und von Umgebungs- und Modultemperatur, ...

Und wie immer bei aixcon-Wechselrichtern gilt auch hier: **effizient, robust, preiswert.**

HelioTec

PHOTOVOLTAIKANLAGEN GmbH

Tel. (0241) 90 19 124
Fax (0241) 90 19 125

Coupon auf Postkarte kleben, und die umfangreichen Informationsunterlagen anfordern:

Heliotec GmbH
Elsaßstraße 57
52068 Aachen

SE