
Archiv-Ex.:

FZR-138

April 1996

*H. Futterschneider, W. Hirsch,
U. Rindelhardt und G. Teichmann*

**Elektroenergieerzeugung einer
kombinierten Wind-Photovoltaik-Anlage
in Ottendorf-Okrilla (Sachsen)**

Forschungszentrum Rossendorf e.V.

Postfach 51 01 19 · D-01314 Dresden

Bundesrepublik Deutschland

Telefon (0351) 260 3663

Telefax (0351) 260 3440

E-Mail rindelh@fz-rossendorf.de

Elektroenergieerzeugung einer kombinierten Wind- Photovoltaik-Anlage in Ottendorf-Okrilla (Sachsen)

H. Fatterschneider, W. Hirsch, U. Rindelhardt, G. Teichmann

April 1996

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Untersuchungen wurden mit freundlicher Genehmigung und technischer Unterstützung der Plus Warenhandelsgesellschaft mbH & CO. OHG, Zentrallager Ottendorf-Okrilla, durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt allein bei den Autoren.

Kurzfassung

Vom Zentrallager der Plus-Warenhandelsgesellschaft in Ottendorf-Okrilla (Sachsen) wird seit 1992 eine hybride Wind-Photovoltaik-Anlage zur Erzeugung von Elektroenergie betrieben. Die Anlage besteht aus einer 60-kW-Windkraftanlage des Typs TW 60 und einer Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 3,18 kW. Letztere zeichnet sich durch einige Besonderheiten (Orientierung des Generators, Master-Slave-Betrieb der Wechselrichter) aus. Das Betriebsverhalten der Anlagen wurde über einen längeren Zeitraum untersucht.

Im Jahr 1995 erreichte die Photovoltaikanlage mit 689 Vollastbetriebsstunden etwa die Ergebnisse anderer Photovoltaikanlagen in Sachsen. Mögliche höhere Erträge werden durch die gewählte Orientierung des Generators verhindert. Die Master-Slave-Schaltung der Wechselrichter arbeitete ohne Probleme. Ihre Effektivität wurde durch die nicht optimale Abstimmung von Generator- und Wechselrichterleistung beeinträchtigt. Die Windkraftanlage erreichte im gleichen Jahr mit 990 Vollastbetriebsstunden ein auch für Binnenlandstandorte nur durchschnittliches Ergebnis. Es wird durch die ungünstigen Standortbedingungen (Hindernisse im Nahbereich) bestimmt. Die Zeitverfügbarkeit des kombinierten Wind-PV-Systems lag im Jahr 1995 bei 71,5 % (6260 Stunden).

Summary

A hybrid wind-photovoltaic system has been operated in the Zentrallager of the Plus-Warenhandelsgesellschaft in Ottendorf-Okrilla (Saxony) since 1992. A 60 kW wind energy converter of Tackes TW-60 type has been combined with a 3.18 kW photovoltaic system. Some special features of the pv system (orientation of the generator, master-slave operation of the inverters) are remarkable. The operation of both systems was investigated in detail.

With a yield of 689 kWh/kW_{p,a} in 1995 the pv system achieved comparable results with other grid coupled pv systems in Saxony. Possible better results are prevented by the selected generator orientation. The master-slave mode of the inverter was studied in detail. The nonoptimal relation between the generator size and the inverters influenced the results. The wind energy converter achieved in 1995 a yield of 990 kWh/kW, which is below average also for non coast areas. The result is influenced by many obstacles in the surrounding of the converter. The time availability of the hybrid energy system in 1995 was 71.5 % (6260 hours).

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Beschreibung der Anlagen und des Meßsystems	1
2.1.	Photovoltaikanlage	1
2.2.	Windkraftanlage	2
2.3.	Meßdatenerfassungssystem	3
3.	Einzelergebnisse	4
3.1.	Photovoltaikanlage	4
3.1.1.	Energieerträge und Wirkungsgrade	4
3.1.2.	Einfluß der Generatororientierung auf den Energieertrag	5
3.1.3.	Das Master-Slave-Konzept der Wechselrichter	6
3.2.	Windkraftanlage	7
3.2.1.	Energieertrag	7
3.2.2.	Statistische Auswertung des Windenergieangebotes	9
4.	Gesamtbewertung	10
4.1.	Windkraft- und PV-Anlage als Hybridsystem	10
4.2.	Anlagenzuverlässigkeit und energetische Gesamtbewertung	11
	Literatur	13
	Bilder	14
	Tabelle	31

1. Einleitung

Durch die Unternehmensgruppe Tengermann wurde im Jahr 1992 in einem Gewerbegebiet in Ottendorf-Okrilla (etwa 10 km nördlich von Dresden) als bedeutendste Einzelinvestition in den neuen Bundesländern ein Logistikzentrum errichtet [1]. Das Zentrallager dient der Versorgung der Filialkette Plus in Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und dem südlichen Brandenburg.

Am Eingang des Zentrallagers wurden eine 60-kW-Windanlage und eine 3,18-kW-Photovoltaikanlage zur Erzeugung von Elektroenergie installiert (Bild 1). Mit dem Aufbau dieser Anlagen demonstriert das Unternehmen sein Bestreben nach ressourcen- und umweltschonendem Handeln nicht nur im eigentlichen Tätigkeitsbereich, sondern auch in angrenzenden Gebieten.

Der Bau der Windkraftanlage wurde mit Mitteln des BMFT-Projektes "250-MW-Wind-Programm" gefördert [2], die PV-Anlage wurde aus Eigenmitteln finanziert.

Die Anlagenkombination stellt die erste derartige Hybridanlage zur Energieerzeugung in Sachsen dar. Im Frühjahr 1994 wurden durch die Gruppe Erneuerbare Energiequellen des Institutes für Sicherheitsforschung des Forschungszentrums Rossendorf Untersuchungen zum Betriebsverhalten dieser Anlage aufgenommen. Neben der Energieerzeugung und der Anlagenzuverlässigkeit sollte vor allem ermittelt werden, inwiefern unter den gegebenen Standortbedingungen die Vorteile eines derartigen Hybridsystems zum Tragen kommen.

2. Beschreibung der Anlagen und des Meßsystems

2.1. Photovoltaikanlage

Die netzgekoppelte Photovoltaikanlage befindet sich gut sichtbar neben dem Haupteingang des Logistikzentrums am Fuße des Windgenerators. Eine leichte Anhöhe erhebt die Gründung des PV-Generators inmitten einer Grünfläche ca. 2 m über die Geländelinie.

Der PV-Generator ist als Aufständigung von 5 einzelnen Generatoren auf je einem Traggestell ausgeführt. Jeder Teilgenerator besteht aus 12 Modulen mit einheitlichem Neigungswinkel von 29° . Eine Besonderheit des Generators besteht darin, daß die Teilgeneratoren keine einheitliche Fläche bilden, sondern in verschiedenen Richtungen orientiert (Bild 2) sind. Die mittlere Ausrichtung liegt etwa bei 30° SW. Zum Einsatz kamen insgesamt 60 Module der Firma DASA vom Typ MQ36D mit je $53 W_p$, die installierte Gesamt-Leistung beträgt $3,18 kW_p$ bei einer wirksamen Gesamtfläche von $27,08 m^2$.

Elektrisch sind die Module zu 10 Strängen mit je 6 Modulen verschaltet, womit ein Gleichspannungspegel von 105 V im MPP erreicht wird. Die zwei PV-Abzweiggästen vom Typ PV-A2100 sind mit Überspannungsableitern (Varistoren) und Strangsicherungen ausgestattet, sie befinden sich unmittelbar am Fuße eines Traggestelles in einer Box. Dadurch konnten die Modulleitungen vom Typ H07RN-F $2,5 mm^2$ sehr kurz

gehalten werden. Von hier aus ist die Gleichstromhauptleitung (ausgelegt für einen Maximalstrom von $> 32 \text{ A}$) in einem Rohr von ca. 20 m Länge bis zum Wechselrichter verlegt. Eingesetzt wurden zwei Wechselrichter der Firma SMA vom Typ PV-WR1800. Die Wechselrichter arbeiten im sogenannten Master-Slave-Betrieb. Beide Wechselrichter könnten zusammen max. 3600 Watt DC-Leistung (Nennleistung) verarbeiten, bei Eingangsleistungen unter 1000 Watt (einstellbar) schaltet sich bei diesem Betrieb automatisch nur ein Gerät - der Master - ans Netz. Dadurch wird eine Verbesserung des Wirkungsgrades bei kleineren Eingangsleistungen erreicht. Die Wechselrichter sind in einem Nebengebäude innerhalb eines Schrankes angeordnet und speisen die erzeugte Energie über einen Erzeugungszähler in das dreiphasige TN-Netz des Zentrallagers ein.

2.2. Windkraftanlage

Bei der installierten Windkraftanlage handelt es sich um den Typ TW 60 der Fa. Tacke Windtechnik GmbH & Co. KG in Rheine (Westfalen). Von diesem Typ wurden zwischen 1990 und 1992 insgesamt 40 Anlagen - vorwiegend im Binnenland - errichtet. Sie gilt heute wegen der rapiden Entwicklung der Anlagentechnik bereits als veraltet.

Auf einem konischen Stahlrohrturm von 40 m Höhe befindet sich die Gondel. Der Rotor mit 3 feststehenden Blättern (stall-geregelte Anlage) besitzt 17,5 m Durchmesser. Die Anlage ist ein Luvläufer mit motorisch betriebem Windrichtungsnachführungssystem. Das Bremssystem, bestehend aus Scheiben- und Blattspitzenbremse, gewährleistet eine sehr hohe Sicherheit. Über ein zweistufiges Stirnradgetriebe mit einer Übersetzung von 1:21 wird der polumschaltbare Asynchrongenerator (30/60 kW) angetrieben. Die Einschaltgeschwindigkeit der Anlage beträgt 2,5 m/s, die Abschaltgeschwindigkeit 25 m/s und die Überlebensgeschwindigkeit 60 m/s. Bei der Nenngeschwindigkeit von 12 m/s erreicht der Generator die Nennleistung von 60 kW.

Die Einspeisung des Stromes erfolgt ebenfalls in das TN-Netz des Zentrallagers. Im Gegensatz zu Photovoltaikanlagen hängt der Ertrag von Windkraftanlagen stark vom jeweiligen Standort und vom eingesetzten Anlagentyp (insbesondere auch der Nabenhöhe des Generators) ab. Als entscheidende Standorteigenschaften gelten Geländere relief (Orographie), Rauigkeit und Hindernisse.

Der vorliegende Standort befindet sich 182 m ü.NN in weitgehend flachem Gelände. In seiner Umgebung sind nur leichte Erhebungen wie der nahegelegene bewaldete Eichelberg (194,6 m) vorhanden. Ein Einfluß der Orographie auf die Strömungsbedingungen ist daher praktisch vernachlässigbar.

Nördlich des Standortes liegen die Ortschaft Ottendorf-Okrilla und das ausgestreckte Waldgebiet der Laussnitzer Heide. Wegen der großen Seltenheit von Nordwinden werden sie keinen Einfluß auf den Ertrag der Anlage ausüben. Für die in dieser Region überwiegenden maßgebenden West- und Südwestwinde verursachen die sich von etwa 500 m bis 1000 m Entfernung erstreckenden Siedlungen und Waldstücke eine Behinderung. Das anschließende freie Feld mit geringer Rauigkeit bietet günstige Strömungsbedingungen. Einen unvorteilhaften Einfluß - wegen des nun schon großen Abstandes vom Standort in abgeschwächter Form - bringt der Friedewald

zwischen Moritzburg und Weinböhla.

Die für eine freie Windströmung nachteilige (und in den letzten Jahren rasch gewachsene) Bebauung in unmittelbarer Umgebung des Standortes wirkt sich grundsätzlich negativ auf die zu erwartenden Erträge aus. Inwiefern die relativ große Nabenhöhe der Anlage dies kompensieren kann ist fraglich.

2.3. Meßdatenerfassungssystem

Das Schaltschema des Meßdatenerfassungssystems ist im Bild 3 dargestellt. Zur Bewertung des energetischen Verhaltens der Photovoltaikanlage werden die am Wechselrichter anstehende Gleichleistung (DC), die abgegebene Wechselleistung (AC) und die momentan einfallende Sonnenstrahlung gemessen. Die Gleichleistung wird aus den Meßgrößen Gleichstrom und Gleichspannung ermittelt. Je ein Shunt in der Master- und der Slaveeinspeisung dienen der getrennten Stromerfassung für beide Geräte. Wegen der eingangsseitigen Parallelschaltung ist nur eine Spannungsmessung nötig. Alle drei Größen werden über Trennverstärker abgenommen. Zur Bestimmung der AC-Leistung dient ein elektromechanischer Zähler, dessen Antriebs-scheibe je Umdrehung 5 Impulse (entsprechend 600 Impulsen/kWh) abgibt. Die Einstrahlungsmessung erfolgt mit einer geeichten Si-Zelle PRM 3, die als Sensor in der Mitte der Modulfelder angeordnet ist. Die unkritische (niederohmige) Anschlußleitung des Sensors führt durch den Netzanschlußkanal der Windanlage.

Von der Windanlage kann nur die erzeugte Energie gemessen und erfaßt werden. Dazu dient ein dreiphasiger elektromechanischer Zähler für max. 100 A pro Phase. Je erzeugter kWh werden 300 Impulse abgegeben.

Als Erfassungssystem der einzelnen physikalischen Größen wird ein Datenlogger für Wetterstationen DL 15 der Firma Thies (Göttingen) verwendet. Er kann - auch netzunabhängig - bis zu 10 analoge und 5 digitale Meßwerte erfassen und zeitproportional abspeichern. Der Meßtakt ist zwischen 1 Sekunde und 24 Stunden wählbar. Der Datenlogger ermöglicht die Berechnung von Mittelwerten über vorwählbare Zeiten (hier über 10 Minuten). Bei einer maximalen Datenspeichergröße von 256 kB kann das Gerät diese Mittelwerte aus 7 Kanälen ca. 2 Monate lang abspeichern. Die Daten werden dann mittels eines Laptop über eine serielle Schnittstelle periodisch ausgelesen.

Die eingesetzten Wechselrichter der PV-Anlage verfügen ebenfalls über eine Meßwerterfassung und -verarbeitung. U.a. werden die abgegebenen AC-Erträge innerhalb jedes Wechselrichters als Tagesenergieerträge über ein Jahr gespeichert. Weiterhin sind 15-Minuten Mittelwerte über ca. 2 Wochen verfügbar.

Die Messungen am Plus-Zentrallager wurden vom 15.02.1994 aufgenommen und bis 31.12.1995 durchgeführt. Während der gesamten Meßzeit kam es zu keinem Ausfall des Meßwerterfassungssystems. Anfängliche Probleme mit einigen Meßstellen der PV-Anlage wurden beseitigt, ab Anfang Oktober 1994 liegen vollständige Datensätze vor.

3. Einzelergebnisse

3.1. Photovoltaikanlage

3.1.1. Energieerträge und Wirkungsgrade

Während des Jahres 1995 wurde an der Anlage Ottendorf insgesamt eine eingestrahelte Energie von $1023,5 \text{ kWh/m}^2$ registriert. Dies entspricht etwa den langjährigen Mittelwerten für den Standort Dresden-Wahnsdorf [3]. Im Bild 4 ist für den Standort Ottendorf die Häufigkeit der Sonneneinstrahlung nach Leistungsklassen dargestellt. Für das Jahr 1995 ist neben der Häufigkeitsverteilung in 100 W/m^2 -Stufen die mit der jeweiligen Klasse erzeugte Energie (rechte Skala im Bild 4) aufgetragen. Erwartungsgemäß treten Werte $>900 \text{ W/m}^2$ sehr selten (11,5 Stunden) im Jahr auf, während kleine Einstrahlungen um und unter 200 W/m^2 sehr häufig (1250 Stunden) vorkommen. Die solar erzeugte Energie wird demgegenüber vor allem durch die oberen Einstrahlungsgruppen zwischen 400 und 800 W/m^2 bestimmt. Im Bild 5 sind die Anteile von 2 Sommer- und 2 Wintermonaten im Vergleich dargestellt. Die Beiträge der Monate Juni und Juli sind im Bereich 700 W/m^2 mit einem Anteil von ca. 40 % dominierend. Demgegenüber sind die im Dezember und Januar einstrahlenden Energien nur zu etwa 10 % am möglichen Jahresertrag der unteren Einstrahlungsgruppen beteiligt.

Der ins Netz eingespeiste Jahresertrag der PV-Anlage in 1995 betrug $2189,7 \text{ kWh}$, was einem normierten Jahresertrag von $688,6 \text{ kWh/kW}_p$ entspricht. Im Bild 6 sind für die PV-Anlage Ottendorf Energieerträge und Einstrahlung während des Beobachtungszeitraumes 1994-1995 als Monatsmittelwerte dargestellt. Im Vergleich mit den Ergebnissen von 50 PV-Anlagen des 1000-Dächer-Programmes in Sachsen im gleichen Zeitraum ergeben sich in Ottendorf im Sommerhalbjahr - im Gegensatz zum Winterhalbjahr - leicht höhere Werte. Der als Yield (Y) bezeichnete auf den Tag bezogene Ertragswert je kW_p installierter Leistung folgt dabei recht gut der angebotenen Einstrahlungssumme H. Den Einbruch im Juni 1995 durch die schlechten Wetterbedingungen zeigen alle drei Kurven. Mit der Gesamterzeugung von $2189,7 \text{ kWh}$ ergibt sich ein Jahresmittelwert 1995 für Y von $1,89 \text{ kWh/kW}_p \cdot \text{d}$. Zum Vergleich sei der Mittelwert von 50 PV-Anlagen des 1000-Dächer-Programmes mit $Y=1,88 \text{ kWh/kW}_p \cdot \text{d}$ angegeben, 9 Anlagen mit dem gleichen Modultyp MQ36 wie die hier betrachtete Anlage erreichten im Mittel einen Yield von $1,97 \text{ kWh/kW}_p \cdot \text{d}$.

Der jährliche Verlauf der Wirkungsgrade der Komponenten Wechselrichter und Generator ist im Bild 7 dargestellt. Der Generatorwirkungsgrad erreicht im Frühjahr sein Maximum, hohe Sonneneinstrahlung und noch geringe Temperaturen sind dafür die Ursachen. In den Sommermonaten tritt eine leichte Absenkung wegen des negativen Leistungs-Temperaturkoeffizienten der Module auf, während in den Wintermonaten der Wirkungsgrad wegen Schnee- oder Reifbedeckung sowie oft trübem Wetter absinkt. Der Betriebswirkungsgrad des Generators erreicht im Sommer etwa 9,5 %, er liegt damit um 2,2 % unter dem STC-Wirkungsgrad der Module laut Datenblatt.

Der Wechselrichterwirkungsgrad erreicht im Sommer sein Maximum mit 86 %. In dieser Zeit erreichen beide Geräte einen Auslastungsgrad im Bereich der maximalen Wirkungsgradkennlinien. Im Winter bei geringeren Einstrahlungen sinkt der Wirkungs-

grad ab. Der Einfluß des Master-Slave-Betriebes auf den Wirkungsgrad wird unten diskutiert. Im Ergebnis beider Kennlinien entsteht als dritte Kurve das Monatsmittel des Performance Ratio (PR).

Im Bild 8 sind die Tages-Mittelwerte des Performance Ratio PR - auch als Gesamtnutzungsgrad der Anlage bezeichnet - des Jahres 1995 dargestellt. Mit dieser Kenngröße wird der Anteil der abgegebenen AC-Energie der PV-Anlage an der theoretisch möglichen Energieabgabe bei verlustfreier Umwandlung beschrieben. Der mittlere PR-Wert im Jahr 1995 beträgt 62,5 %. Im Sommer werden bis zu 70 %, und im Winter ca. 40 % erreicht. PR-Messungen an anderen PV-Anlagen zeigen Maximalwerte der Monatsmittel im Frühjahr und Herbst mit einer leichten Einsenkung im Sommer [5]. An der Anlage in Ottendorf wird dieses Verhalten nicht beobachtet. Die Monatsmittelwerte setzen sich aus stark schwankenden Einzelwerten besonders in der strahlungsarmen Zeit (Winterhalbjahr) zusammen. Die Entstehung dieser Werte ist aus Bild 9 erkennbar. Die Tagesmittelwerte des PR sind über dem Tageswert der jeweils eingestrahlt Energie aufgetragen. Für Einstrahlungssummen $H > 1,5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ liegen die PR-Werte bei 70 %. Für $H < 1 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ fällt das PR rasch bis auf 40 % ($H=0,5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$). Ursache für dieses Verhalten ist der schlechte Wirkungsgrad des Wechselrichters bei kleinen DC-Leistungen (entsprechend kleinen Strahlungssummen). Die in Bild 9 sichtbaren Ausreißer entstehen durch Schneebedeckung des Generators an einzelnen Wintertagen.

Kleine Strahlungsstärken führen auch an besonders trüben Tagen im Sommer zu geringen Einstrahlungsenergien, die Zahlenwerte an den Minima-Spitzen im Bild 7 kennzeichnen solche Tage mit der gemessenen Einstrahlungsenergie H . Als Schwelle für eine meßbare Energieabgabe des untersuchten Systems sind im Bild 9 Tageseinstrahlungssummen von ca. $0,2 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ abzulesen.

3.1.2. Einfluß der Generatororientierung auf den Energieertrag

Im Bild 10 ist die abgegebene Leistung der PV-Anlage während eines schönen Sommertages über der Bestrahlungsstärke aufgetragen. Die eingetragenen Zeitpunkte der Messungen belegen, daß Werte für gleiche Einstrahlungen vormittags im unteren und nachmittags im oberen Zweig der Kurve erscheinen. Die Lücke im oberen Zweig entstand durch Bewölkung zwischen 16:40 Uhr und 18:00 Uhr. Im Gegensatz dazu zeigt sich an einem trüben Wintertag wegen der diffusen ungerichteten Einstrahlung erwartungsgemäß ein geradliniger Verlauf, die Einschaltsschwelle des Systems liegt zwischen 30 und 50 W/m^2 Bestrahlungsstärke. Trägt man alle 4320 10-min-Mittelwerte z.B. des Monats Juli 95 in gleicher Weise auf, so ergibt sich Bild 11. Erkennbar ist die charakteristische Ansammlung von Punkten auf zwei parallelen Linien -ähnlich Bild 10- die sich erst bei hohen Einstrahlungen (mittags, geringe Einstrahlwinkeldifferenzen zwischen den einzelnen Teilgeneratorflächen) verbinden. Berechnet man das momentane PR z.B. bei 200 W/m^2 so erhält man vormittags (7:20 Uhr) 34 % und nachmittags (18:30 Uhr) 70 %.

Im Bild 12 sind die einzelnen 10-min-Mittelwerte des PR vom Monat Juli 1995 über den Momentanwerten der Bestrahlungsstärke G aufgetragen. Die Darstellung der Momentanwerte zeigt im Gegensatz zu Bild 9 ein wesentlich breiteres Spektrum, welches

durch den meteorologischen Ablauf während jedes Tages entsteht. Dabei sind ebenfalls zwei charakteristische Punkt-Häufungen auffällig, die niedrigen Werte ($PR < 60\%$ bei G zwischen 100 und 500 W/m^2) entstehen wie oben angegeben jeweils in den Vormittagsstunden. Die sich in der linken unteren Ecke abzeichnenden Punktreihen resultieren aus dem Verfahren zur AC-Leistungsmessung. Die Impulszählung an der Scheibe des AC-Zählers erzwingt eine Quantisierung in 10-Watt-Schritten , während die DC-Leistungsmessung quasi analog erfolgt.

Die stark schwankenden PR-Verläufe im Bild 8 und die tageszeitlich unterschiedlichen PR im Bild 12 werden vor allem durch die im Bild 2 gezeigten unterschiedlichen Orientierungen der Teilgeneratoren der Anlage verursacht. Einfluß auf das Meßergebnis hat auch die Einstrahlungsmessung, die entsprechend der Orientierung des Strahlungssensors grundsätzlich nur für den Teilgenerator mit einer Ausrichtung von 30° S-W gültig ist. Die Einstrahlung auf die anderen Teilgeneratoren wird in Abhängigkeit vom aktuellen Sonnenstand unter- bzw. überschätzt. In geringerem Maße beeinflußt die Ergebnisse auch die Süd-West-Orientierung des Generators.

3.1.3. Das Master-Slave-Konzept der Wechselrichter

An der Anlage in Ottendorf bot sich die Möglichkeit, die Betriebsweise der Master-Slave-Schaltung genauer zu untersuchen. Dabei sind neben dem Wirkungsgrad der Schaltung auch die Betriebszeiten beider Geräte interessant. Im Bild 13 sind die Anteile an der Gesamtbetriebszeit des Jahres 1995 über der Bestrahlungsstärke aufgetragen. Erwartungsgemäß ist der Slave bei höheren Einstrahlungen (etwa $500 - 600 \text{ W/m}^2$) immer zeitgleich mit dem Master in Betrieb. Entsprechend verhalten sich die von beiden Geräten abgegebenen Energien (vgl. Bild 4).

Im Bild 14 ist für den Verlauf eines Tages das Zusammenspiel beider Geräte dargestellt. Bei einer DC-Eingangsleistung von ca. 1200 W wird der Slave zugeschaltet und übernimmt relativ langsam im Verlaufe einer Stunde die halbe Last. Er bleibt von 9 Uhr bis 17 Uhr am Netz. Infolge von Gerätetoleranzen verarbeitet der Slave einen geringfügig höheren Leistungsanteil als der Master. Die eingespeiste AC-Leistung folgt direkt der Einstrahlung. Werden die einzelnen Tagesmessungen zu einem mittleren Tagesverlauf eines Monats zusammengefaßt, so verändert sich je nach Jahreszeit der charakteristische Anteil des Slave. Dazu ist im Bild 15 ein Sommermonat (Juli 95) mit fast 50% Anteil und im Bild 16 ein Wintermonat (Januar 95) mit nur ca. 20% Anteil des Slave an der Gesamtleistung dargestellt. Im Winter bleibt die abgegebene AC-Leistung wegen des geringeren Wirkungsgrades der Wechselrichter zudem deutlich unter der Summe der DC-Leistungen.

Zur Veranschaulichung der Leistungsverteilung der Geräte ist im Bild 17 der Anteil jedes Gerätes als Funktion der zu verarbeitenden DC-Leistung während eines schönen Tages aus einzelnen $10\text{-min-Mittelwerten}$ aufgetragen. Während bei kleinen Leistungen der Master 100% verarbeitet, verteilt sich bei höheren Leistungen der Anteil fast im Verhältnis 50 zu 50 , der leicht höhere Anteil des Slave wurde schon im Bild 14 ausgewiesen. Im Bild 18 sind schließlich alle $10\text{-min-Mittelwerte}$ des Monats Juli 95

aufgetragen. Das Spektrum der Zwischenwerte entsteht durch die im Bild 14 erkennbaren Ein- und Ausschaltzeiten von bis zu einer Stunde.

Aus den gemessenen maximalen DC-Leistungswerten der Anlage von ca. 2300 Watt, wie sie in den Bildern 11 und 18 erkennbar sind, und der geringen Häufigkeit ihres Auftretens kann eine Überdimensionierung der Wechselrichter abgeleitet werden. Ursache für das Nichtauftreten höherer Spitzenwerte ist wieder die unterschiedliche Orientierung der Teilgeneratoren. Sie bewirkt, daß die einzelnen Generatorfelder zeitlich nacheinander ihre Spitzenleistung erreichen und der resultierende Anlagenspitzenwert "geglättet" wird. Zudem wird ein Betrieb der Generatorteilfelder im optimalen Arbeitspunkt verhindert. Deshalb würde die Nennleistung eines Wechselrichters von 1800 Watt (bei einer zulässigen Spitzenleistung von 2100 Watt) ausreichen um die vom PV-Generator erzeugte DC-Energie umzuwandeln. Selbst wenn in den selten auftretenden Fällen (im Monat Juli etwa 50 Minuten) eine kurzzeitige Abregelung wegen Überlast im Gerät notwendig wird und damit ein zusätzlicher Verlust eintritt, steht dieser in keinem Verhältnis zum getriebenen Aufwand von ca. 4500.-DM für den Einbau des zweiten Wechselrichters.

3.2. Windkraftanlage

3.2.1. Energieertrag

Die Windkraftanlage erzeugte im Jahr 1995 insgesamt 59,4 MWh Elektroenergie. Dies entspricht 990 Vollaststunden. Die Anlage schneidet im Vergleich zu Anlagen desselben Typs an anderen Binnenland-Standorten durchschnittlich nicht schlechter ab (Tabelle 1). Lediglich die Anlage am windreichen küstennahen Standort Ihlow zeigt wesentlich bessere Betriebsergebnisse. Ein guter Standort sollte jährlich mindestens etwa 2000 Vollaststunden bringen.

Der saisonale Verlauf der Windenergieerzeugung geht aus Bild 19 (Monatssummen der eingespeisten Energie in den Jahren 1994 und 1995) hervor. In den Sommermonaten beträgt sie durchschnittlich lediglich ein Drittel derjenigen der Wintermonate. Grundsätzlich ist die saisonale Abhängigkeit invers zur saisonalen Abhängigkeit der solaren Stromerzeugung (vgl. Bild 6). Die Windverhältnisse verschiedener Jahre schwanken zudem stärker als die solare Einstrahlung und sind im einzelnen nicht langfristig vorhersagbar.

Die Wirtschaftlichkeit einer Windkraftanlage auf lange Zeit wird vor allem durch die erzeugte Energiemenge bestimmt. Hierzu kann einerseits mit Hilfe eines Windindex eine Langzeitextrapolation von Kurzzeitmessungen am Standort durchgeführt werden. Für den Fall, daß die Windkraftanlage schon wenigstens ein Jahr in Betrieb war, bietet sich ein von ALLNOCH entwickeltes Verfahren [6] an. Hierbei werden die Monatsmittel des Höhenwindes im 850-hPa-Niveau einer für den Standort der Anlage maßgebenden Wetterstation mit den zeitgleichen monatlichen Energieerträgen der Windkraftanlage verglichen. Es konnte gezeigt werden, daß dieser Zusammenhang häufig linear ist. Mit Hilfe einer durch Regressionsrechnung bestimmten Geraden läßt sich andererseits aus dem Langzeitmittel des Höhenwindes der Langzeitertrag der Windkraftanlage berechnen. Wird das Verfahren auf die Monatserträge der TW 60 in Ottendorf-

Okrilla mit den Windgeschwindigkeiten des Höhenwindes (850 hPa) von Dresden angewandt, so läßt sich ein annähernd linearer Zusammenhang allenfalls erahnen (Bild 20). Die Quadrate repräsentieren die gemessenen Erträge; mittels Regressionsrechnung wurde die Gerade diesen Werten angenähert. Der langjährige Mittelwert des Höhenwindes von Dresden (850 hPa, 1981 bis 1994) beträgt 9,51 m/s. Unter Zuhilfenahme der Regressionsgeraden erhält man damit einen mittleren zu erwartenden Langzeitertrag von etwa 4800 kWh monatlich bzw. 58 MWh jährlich (960 Vollaststunden) in immerhin bemerkenswerter Annäherung an die tatsächlich erreichten Ergebnisse.

Die Häufigkeitsverteilung der abgegebenen Leistung (Zehnminutenmittelwerte, Bild 21) der Anlage im Jahr 1995 weist in den unteren Leistungsklassen hohe Werte auf (ein deutliches Indiz für Schwachwindgebiete). In das Diagramm sind außerdem die beim Auftreten der jeweiligen Leistung erzeugten Energiemengen eingetragen. Das Maximum wird in der Klasse $10 \text{ kW} < P < 15 \text{ kW}$ erreicht. Aus dem Auftreten relativ hoher Werte in den Klassen um 30 kW und den großen Unterschieden in den Säulenhöhen zwischen Stundenzahl und abgegebener Leistung in den oberen Leistungsklassen erkennt man die große Bedeutung einer möglichst hohen Windgeschwindigkeit für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

Die Leistungskennlinie einer Windkraftanlage gibt an, wie hoch die abgegebene Leistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten ist. Sie wird auf einem Testfeld gemessen, um mit ihrer Hilfe bei bekannten Windverhältnissen an einem anderen Standort die jährlich zu erwartende Energieproduktion errechnen zu können. Der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und abgegebener Leistung kann jedoch auch in umgekehrter Form verwendet werden, um aus der eingespeisten Leistung auf die Windverhältnisse am Standort der Anlage zu schließen. Da die untersuchte Anlage nur an ca. 6 Tagen im genannten Jahr wegen Maschinenschadens stillstand, ist das vorgeschlagene Verfahren gerechtfertigt. Aus der im Bild 21 dargestellten Häufigkeitsverteilung der Zehnminutenmittelwerte lassen sich grundsätzlich über die Leistungskennlinie der Turbine (Bild 22) die Windverhältnisse am Standort ermitteln. Dabei werden die Ergebnisse im Bild 21 gewissermaßen umsortiert, mögliche Mehrdeutigkeiten wegen des Kennlinienverlaufes im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten sind wegen deren geringer Häufigkeit unkritisch. Es wurde eine Klassenbreite von 1 m/s gewählt (Klassenmitte volle m/s). Die Klassen 1 m/s und 2 m/s treten hierbei nicht auf, da erst ab 2,5 m/s eingespeist wird. Das Ergebnis ist im Bild 23 dargestellt. Zur Beschreibung der Windstatistik ist es üblich, das Histogramm der Häufigkeitsverteilung durch eine kontinuierliche Weibull-Verteilung zu approximieren. Diese zweiparametrische Verteilung wird durch den Skalenparameter A und den Formparameter k beschrieben. Für die im Bild 23 dargestellte Häufigkeitsverteilung wurden für die Windverhältnisse am Standort der Anlage durch Parametervariation $A = 3,4 \text{ m/s}$ und $k = 1,3$ ermittelt. Die mittlere Windgeschwindigkeit über das Jahr beträgt lediglich 3,1 m/s. Nach diesen Ergebnissen ist der Standort - insbesondere unter wirtschaftlichen Aspekten - als eher ungünstig zu bewerten.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Windverhältnisse am Standort der Anlage nicht ausreichend sind, um auf Dauer niedrige Stromgestehungskosten zu erreichen. Im Vergleich zu Anlagen desselben Typs an anderen Standorten im Binnenland schneidet sie aber nicht wesentlich schlechter ab.

3.2.2. Statistische Auswertung des Windangebotes

Als Meßwerte von der Windkraftanlage standen lediglich die in das Netz eingespeisten Erträge der als Zehnminutenmittelwerte der Leistung im Zeitraum April 1994 bis Dezember 1995 zur Verfügung. Aus der graphischen Darstellung dieser Verläufe (als Beispiel jeweils ein typischer Winter- und Sommermonat; Bild 24: Januar 95 und Bild 25: Juli 95) geht eindrucksvoll die stochastische Natur des Windes hervor. Besonders auffallend ist die zehntägige Flaute in der ersten Januarhälfte 95. In der zweiten Januarhälfte dagegen wird an sehr vielen Tagen Volleistung der Maschine erreicht. Im Sommer sind die erzielbaren Erträge insgesamt wesentlich niedriger (Bild 25). Nur an wenigen Tagen im Monat Juli 95 erreicht die Anlage gerade die Hälfte der installierten Leistung. Auffallend in beiden Darstellungen ist eine Tagesperiodizität des Windes.

Im Jahr 1994 wurden in den Monaten April bis Dezember an 31 Tagen während kurzer Zeitabschnitte Volleistung (bzw. nahezu Volleistung) erreicht; im gesamten Jahr 1995 an 50 Tagen. Sehr selten (an 9 Tagen im untersuchten Zeitraum) führten starke Winde von mehr als 25 m/s zur Abschaltung der Anlage wie beispielsweise im November 1994. Der Tagesverlauf vom 5.11.94 ist als Beispiel in Bild 26 dargestellt, zwischen 11.00 Uhr und 13.00 Uhr war die Anlage außer Betrieb.

Aus der Statistik der monatlichen Stillstandszeiten (Bild 27) geht hervor, daß die Anlage durchschnittlich 250 Stunden (etwa 10 Tage) pro Monat wegen Flaute bzw. zu geringer Windgeschwindigkeit keine Leistung erzeugt. Im Jahre 1995 gab es lediglich 6 Tage Ausfall durch Maschinenschaden, so daß das Diagramm weitgehend die Statistik der Flautezeiten widerspiegelt. Besonders in den Sommermonaten Mai bis August ist die Anzahl der Flautezeiten hoch.

Der mittlere Tagesverlauf eines Wintermonats zeigt im Vergleich zu demjenigen eines Sommermonats (Bild 28, Januar und Juli 95) eine weitgehend gleichmäßige Erzeugung der Leistung über den Tag. Allerdings sind auch im Winter witterungsbedingte längere Flautezeiten vorhanden, wie die erste Januarhälfte 1995 zeigt. Im Sommer wird durchschnittlich nachts nur wenig Energie erzeugt (schwache Winde), ein Maximum - offensichtlich einstrahlungsbedingt - ergibt sich um die Mittagszeit (12 bis 16 Uhr).

Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung der erzeugten Leistung (Anzahl der Stunden über der Leistung mit der Klassenbreite von 5 kW) zeigt für den Monat Januar 1995 einen für mittlere Windverhältnisse typischen Verlauf (Bild 29). Die im gleichen Bild eingetragene Abhängigkeit für den Monat Juli 95 zeigt - wie aus dem Verlauf der Leistung zu erwarten - nur in den unteren Windklassen hohe Werte (typisch für Schwachwindgebiete).

4. Gesamtbewertung

4.1. Windkraft- und PV-Anlage als Hybridsystem

Eine grundsätzliche Schwäche regenerativer Energieversorgungssysteme besteht im meteorologisch bedingten (semi-)stochastischen Aufkommen der erzeugten Energie. Da die Bedarfsschwankungen der zu versorgenden Verbraucher wesentlich geringer und zudem determiniert sind, besteht in der Regel die Notwendigkeit des Einsatzes von Energiespeichern oder der parallelen Nutzung von konventionellen Energiequellen. Der jährliche Verlauf der photovoltaischen Elektroenergieerzeugung ist relativ determiniert und an die jeweilige solare Einstrahlung gebunden (vgl. Bild 6). Weniger determiniert, jedoch im langjährigen Mittel ebenfalls mit deutlicher saisonaler Struktur ist die Elektroenergieerzeugung aus Windenergie. Häufig wird ein saisonal antikorrelierter Verlauf zur photovoltaischen Energieerzeugung gefunden. Die Kombination von Windkraft- und PV-Anlagen stellt deshalb ein favorisiertes Hybridsystem dar.

Im Bild 30 ist der auf die jeweils installierte Leistung bezogene monatliche Energieertrag der beiden untersuchten Anlagen im Jahr 1995 dargestellt. Auch für den untersuchten Binnenlandstandort wird der antikorrelierte Verlauf bestätigt. In der Summe führen beide Anlagen zu einem jahreszeitlich weitgehend ausgeglichenen Verlauf der Energieerzeugung. Er ist für den untersuchten Standort in Bild 30 eingetragen und beträgt im Jahresmittel für die untersuchten Anlagen etwa 4 - 5 kWh/kW_{p,d}.

Grundsätzlich schwieriger als der saisonale Ausgleich gestaltet sich die täglich stabile Energieerzeugung aus regenerativen Energiequellen. Im Bild 31 ist der mittlere tägliche Verlauf der auf die jeweils installierte Anlagenleistung bezogenen Energieabgabe beider Anlagen im Jahr 1995 dargestellt. Die mittlere Leistung der PV-Anlage ist durch den Tag-Nacht-Rhythmus determiniert, die mittägliche Spitze liegt bei 270 W/kW_p. Eher überraschend ist demgegenüber die mittlere Leistungsabgabe der Windkraftanlage. Trotz der großen und stochastischen Schwankungen des Windes und des relativ häufigen Auftretens von Flauten bzw. Schwachwinden zeigt die mittlere Leistungsabgabe eine klare Struktur. Einem Grundpegel von etwa 90 W/kW ist zwischen 7 und 18 Uhr ein breites Maximum mit Spitzenwerten von etwa 180 W/kW überlagert. Durch Addition beider Ergebnisse entsteht der in Bild 32 dargestellte mittlere tägliche Verlauf der Leistungsabgabe des untersuchten Hybridsystems. Dieser Verlauf ähnelt in erstaunlicher Weise der Lastabnahme aus dem öffentlichen Netz in Deutschland (vgl. Bild 32) und zeigt die grundsätzlichen Möglichkeiten der Einbindung regenerativer Energiesysteme in die öffentliche Energieversorgung.

Die in den Bildern 31 und 32 gezeigten mittleren Leistungsabgaben der beiden Anlagen sind allerdings aus Einzelwerten ermittelt, die zwischen 0 und einem Mehrfachen der angegebenen Mittelwerte schwanken. Eine aus den Bildern abzulesende Kontinuität der Energieerzeugung ist tatsächlich nicht vorhanden (vgl. Bild 24). Die Leistungsfähigkeit eines Kraftwerkes wird im allgemeinen durch die sogenannte Jahresdauerlinie beschrieben. Sie gibt an, wieviel Stunden im Jahr die betrachtete Anlage welche Leistung erzeugt. Im Bild 33 sind die Jahresdauerlinien für die beiden untersuchten Anlagen dargestellt. Die PV-Anlage war im Jahr 1995 insgesamt 3443 Stunden in Betrieb, was jährlich theoretisch möglichen 4380 Sonnenscheinstunden einer Zeitverfügbarkeit von immerhin 78 % entspricht. Sie lieferte jedoch nur während

ca. 1300 Stunden eine Leistung von mehr als 20 % der installierten Leistung, mehr als 50 % der installierten Leistung wurden in lediglich 350 Stunden abgegeben. Leistungen von über 70 % der installierten Leistung wurden aus den unter 3.1 diskutierten Gründen nicht erreicht.

Die Jahresdauerlinie der Windkraftanlage unterscheidet sich nicht grundsätzlich vom Ergebnis der PV-Anlage. Die Windkraftanlage war insgesamt ca. 5500 Stunden in Betrieb, das sind etwa 2/3 des Jahres. Mehr als 20 % der Nennleistung wurden während 1700 Stunden, mehr als 50 % der Nennleistung wurden während 500 Stunden abgegeben. Insgesamt 46 Stunden im Jahr 1995 erreichte die Anlage Volleistung. Im Bild 33 ist neben den Dauerlinien der Einzelanlagen auch die Dauerlinie des kombinierten Wind-PV-Systems eingetragen. Dabei wurden gleiche installierte Leistungen in beiden Anlagen vorausgesetzt. Auffällig ist, daß im Hybridsystem der zeitliche Anteil hoher erzeugter Leistung gegenüber den Einzelanlagen deutlich zurückgeht. Dieses Ergebnis ist meteorologisch bedingt: Zu Zeiten klaren Himmels (d.h. hoher Einstrahlung) weht in der Regel kaum Wind und umgekehrt. Die Zeitverfügbarkeit des Hybridsystems erhöht sich gegenüber dem besseren Einzelsystem (Wind) um ca. 800 Stunden auf insgesamt 6260 Stunden bzw. 71,5 %. Diese Ergebnisse zeigen, daß eine ausschließlich auf die hier betrachteten erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung (etwa in Inselssystemen) großer Energiespeicher zur Sicherung einer kontinuierlichen Energieabgabe bedarf.

Die Einspeisung der erzeugten Elektroenergie in das öffentliche Netz bzw. ein Parallelbetrieb zu diesem Netz führen zu energiewirtschaftlichen Vorteilen: Praktisch die gesamte photovoltaisch erzeugte Energie und etwa 58 % der erzeugten Windenergie fallen in der sogenannten Hochtarifzeit der EVU (vgl. Bild 21) an und tragen somit zur Spitzenbedarfdeckung im Netz bei.

4.2. Anlagenzuverlässigkeit und energetische Gesamtbewertung

Die Anlagen arbeiteten im gesamten Untersuchungszeitraum zuverlässig. An der Photovoltaikanlage traten keinerlei Störungen auf. Dies ist deshalb bemerkenswert, weil die in der Anlage eingesetzten Wechselrichter in anderen Anlagen [5] häufig Anlaß für mit Betriebsausfällen verbundene Störungen waren. Inwieweit die oben erwähnte starke Überdimensionierung der Wechselrichter zu dem stabilen Betrieb beigetragen hat, konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht geklärt werden.

Auch die Windkraftanlage zeigte mit nur 6 Ausfalltagen eine sehr hohe technische Zuverlässigkeit (98,3 %). Angesichts der großen dynamischen Beanspruchungen von modernen Windkraftanlagen zeugt dies einerseits vom erreichten hohen technischen Entwicklungsstand. Andererseits ist der technische Service der Anlagenhersteller heute auch im Binnenland gewährleistet.

Insgesamt wurden durch das hybride regenerative Stromerzeugungssystem im Jahr 1995 61.6 MWh Elektroenergie erzeugt. Wegen der ungünstigen Windverhältnisse am Standort erbrachte die Windkraftanlage mit 990 Vollaststunden nur vergleichsweise wenig mehr Ertrag als die Photovoltaikanlage mit 688 Vollaststunden. Eine modernere

Windkraftanlage mit größerer Nabenhöhe (etwa 60 m) würde sicherlich zu einem merklich höheren Ertrag der Windkraftanlage am gleichen Standort führen.

Der jährliche Elektroenergiebedarf im Zentrallager Ottendorf liegt bei etwa 1600 MWh. Er entsteht - neben der Klimatisierung und Beleuchtung der Hallen - vor allem durch die elektrisch betriebenen Transport- und Förderfahrzeuge. Der Energiebedarf wird durch das regenerative Stromerzeugungssystem zu lediglich 3,8 % gedeckt. Dieser marginale Anteil führt dazu, daß der gesamte regenerativ erzeugte Strom im Zentrallager selbst verbraucht wird (Eigennutzungsgrad 100 %), eine Einspeisung in das Netz des regionalen Energieversorgers erfolgt nicht.

Die Anlage ist - auch energiewirtschaftlich - als Demonstrationsanlage zu bewerten. Die langfristige Verfolgung ihrer technischen, energetischen und nicht zuletzt betriebswirtschaftlichen Ergebnisse ist wünschenswert.

Literatur

- [1] N.N.
Dynamik im Handel, Heft 1/96, Seite 73
- [2] BMFT
Richtlinie zur Förderung der Erprobung von Windenergieanlagen "250-MW-Wind"
Bundesanzeiger v. 4. Februar 1994 (Jahrgang 46), Nr. 24, Seite 921
- [3] Deutscher Wetterdienst
Ergebnisse von Strahlungsmessungen in der BRD, Sonderreihe: Messdaten aus zurückliegenden Jahren, Band I: Station Wahnsdorf
Hamburg 1995
- [4] Forschungszentrum Rossendorf, Gruppe Erneuerbare Energiequellen
Unveröffentlichte Werte
- [5] U. Rindelhardt, G. Teichmann, D. Lang
Report FZR-109, September 1995
- [6] N. Allnoch, J. Werner
Neue Energie 30/1993, Seite 1286
- [7] Firmenunterlagen Tacke Windtechnik GmbH
- [8] VDEW
Jahresbericht 1989
Frankfurt 1990, Seite 28
- [9] Interessenverband Windkraft Binnenland e.V. (Hrg.)
Windkraftanlagen Marktübersicht 1995
Osnabrück 1995, Seite 96

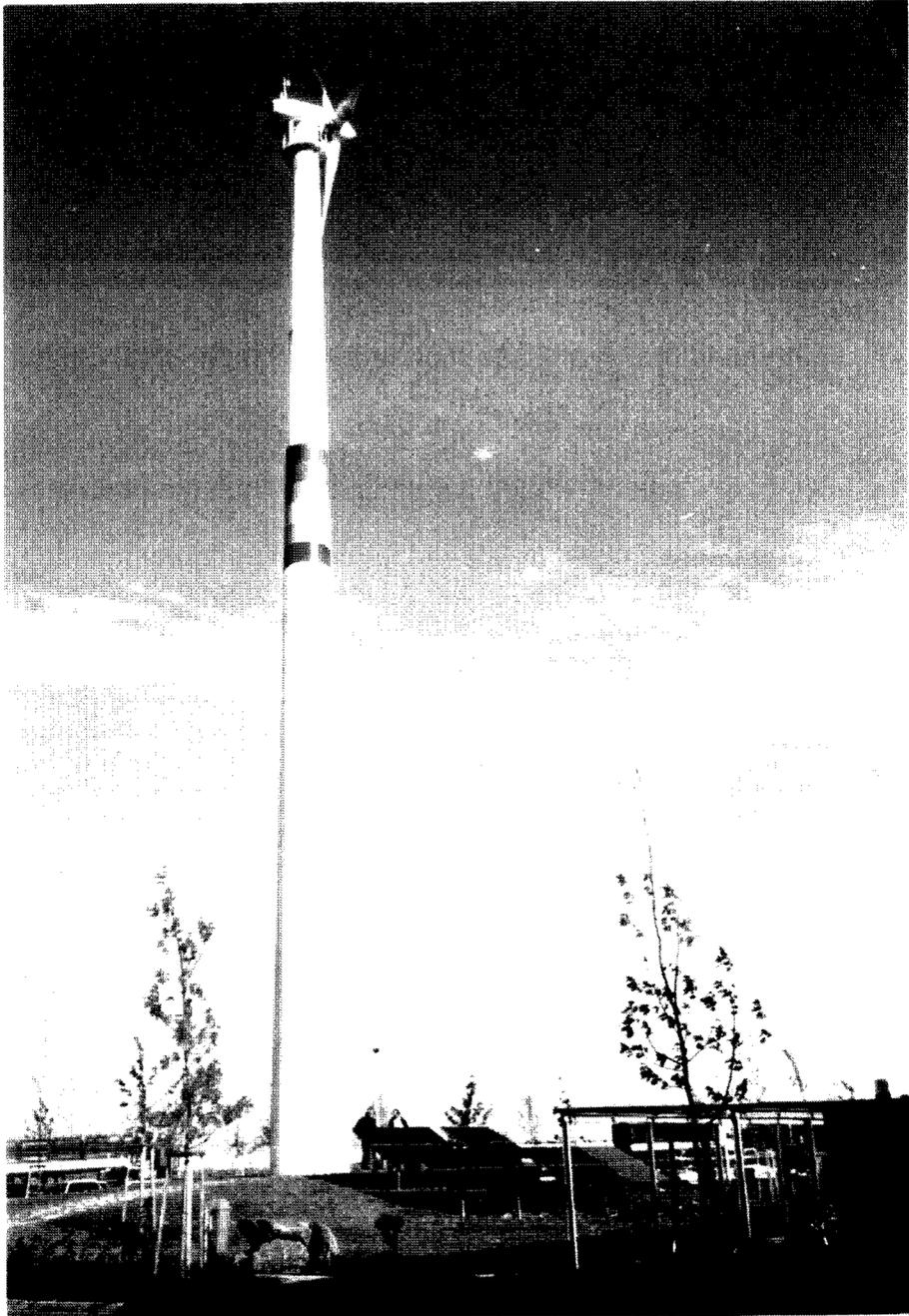


Bild 1: Kombinierte Windkraft- und Photovoltaikanlage in Ottendorf-Okrilla

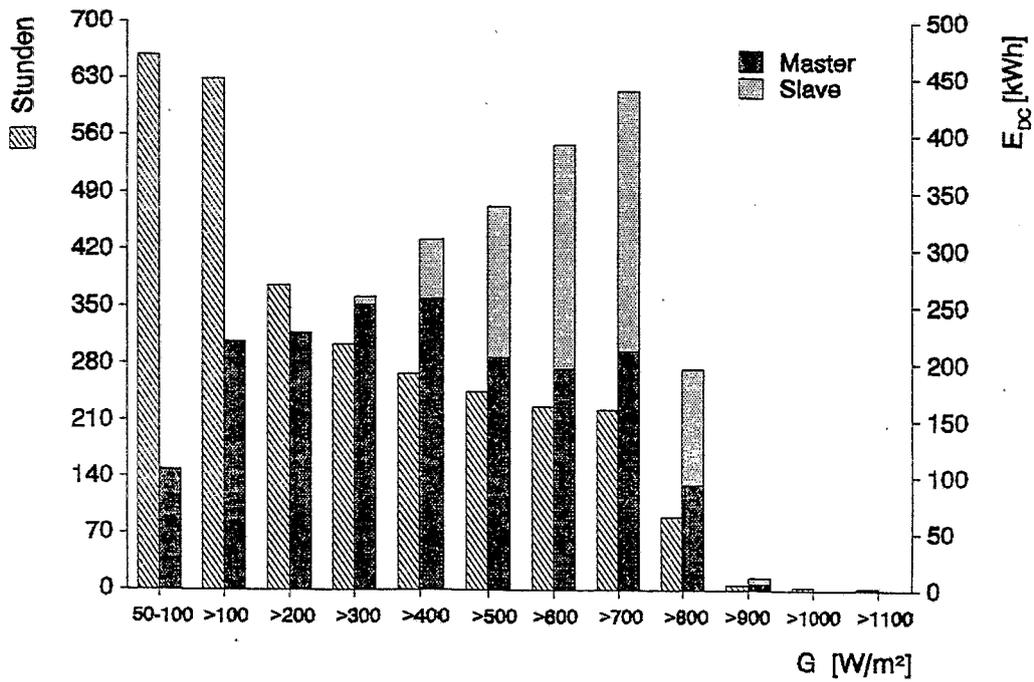


Bild 4: Häufigkeitsverteilung der solaren Einstrahlung und solar erzeugte Energie (getrennt nach Wechselrichtern) nach Einstrahlungsklassen im Jahr 1995

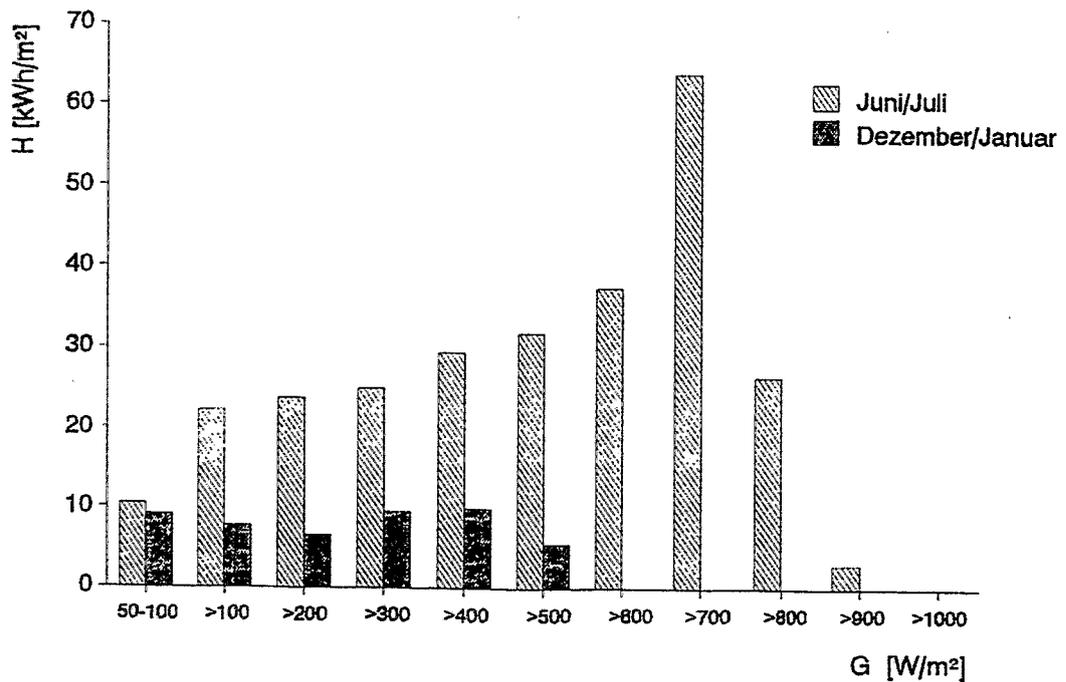


Bild 5: Häufigkeitsverteilung der solaren Einstrahlung in 2 Sommer - und 2 Wintermonaten des Jahres 1995

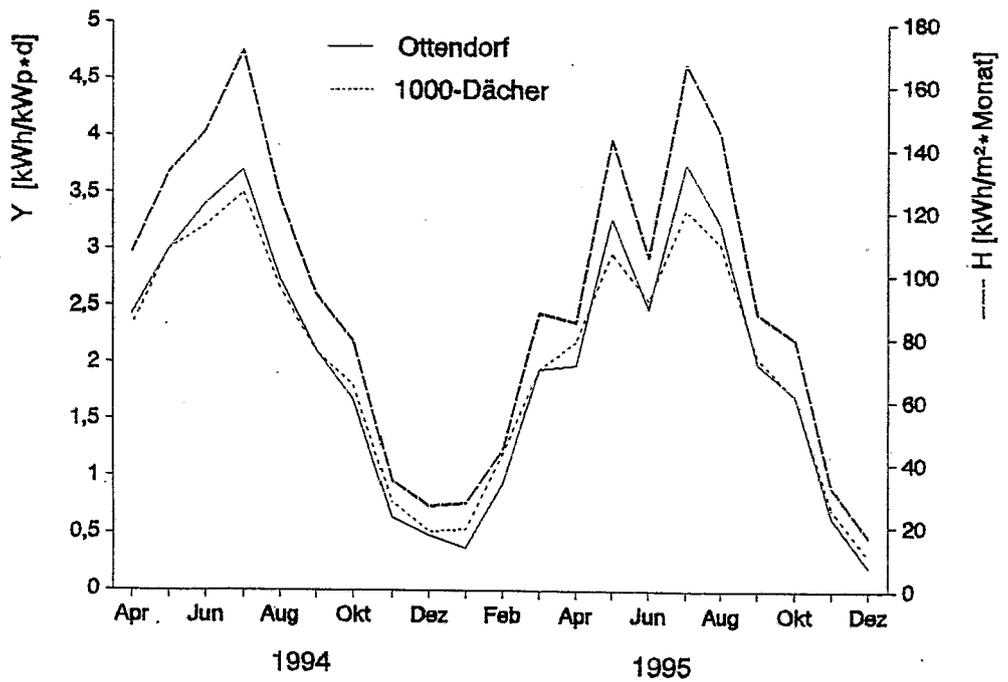


Bild 6: Monatsmittelwerte des Yield der Anlage Ottendorf im Vergleich zu 1000-Dächer-Anlagen in Sachsen sowie monatliche Einstrahlungssumme in Ottendorf

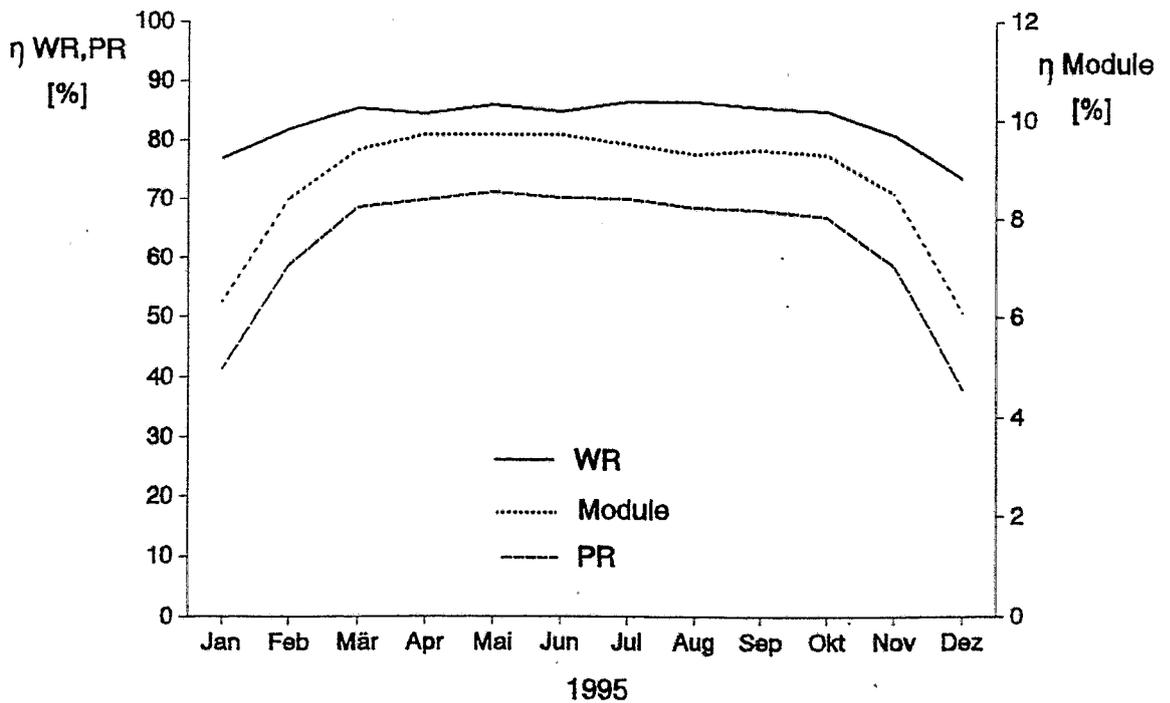


Bild 7: Monatliche Mittelwerte des Generator- und des Wechselrichterwirkungsgrades sowie des Performance Ratio

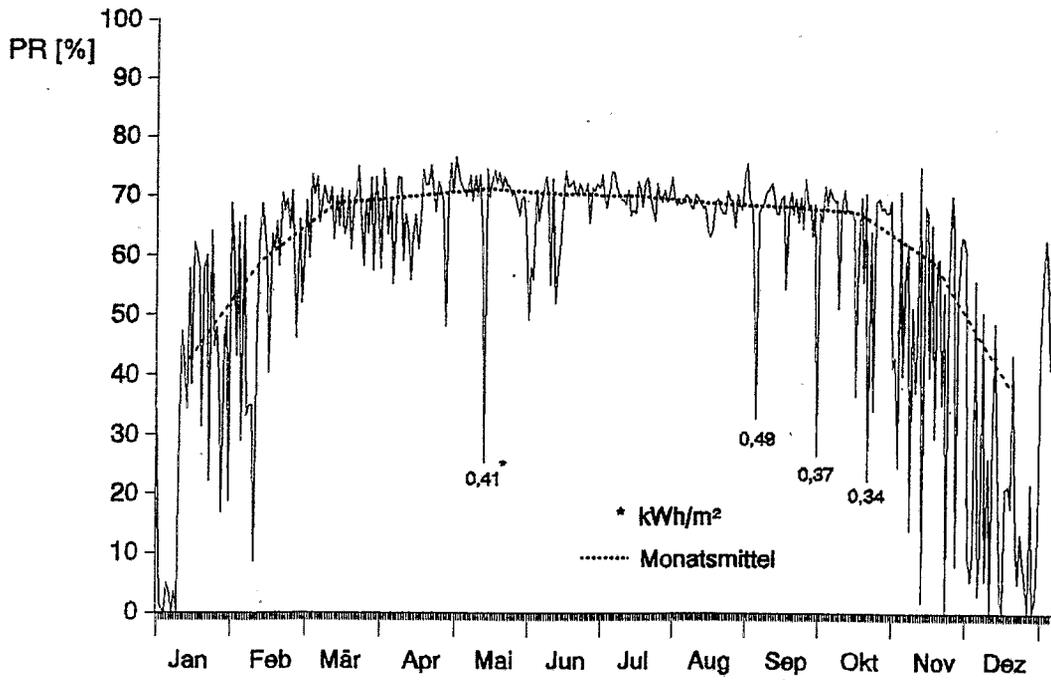


Bild 8: Tagesmittelwerte des Performance Ratio 1995

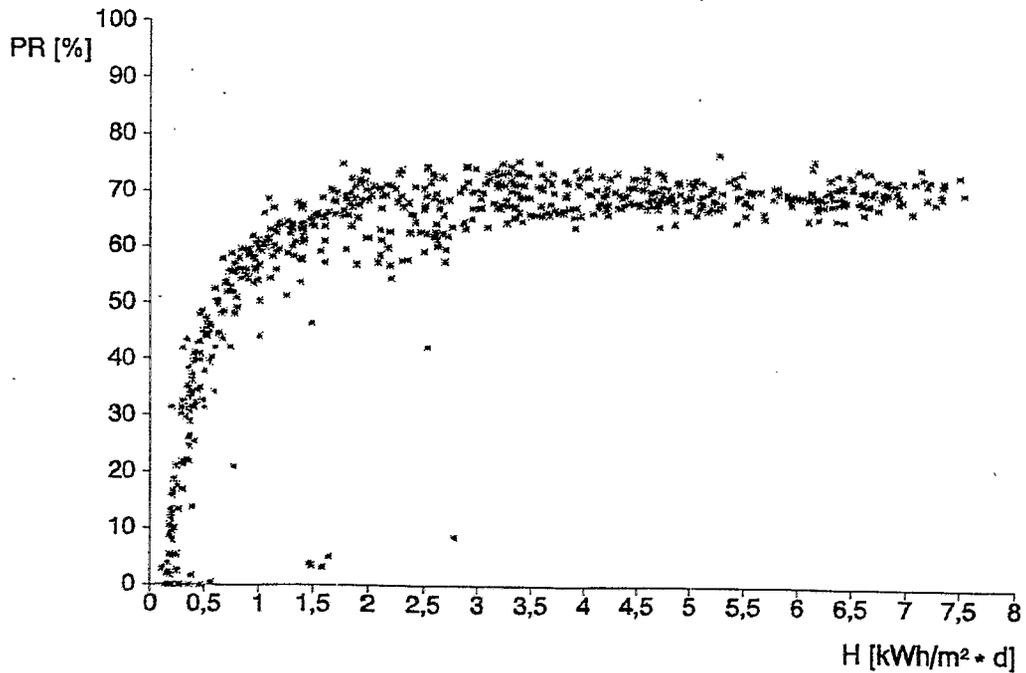


Bild 9: Tagesmittelwerte des Performance Ratio über der jeweiligen Einstrahlungssumme (1994-1995)

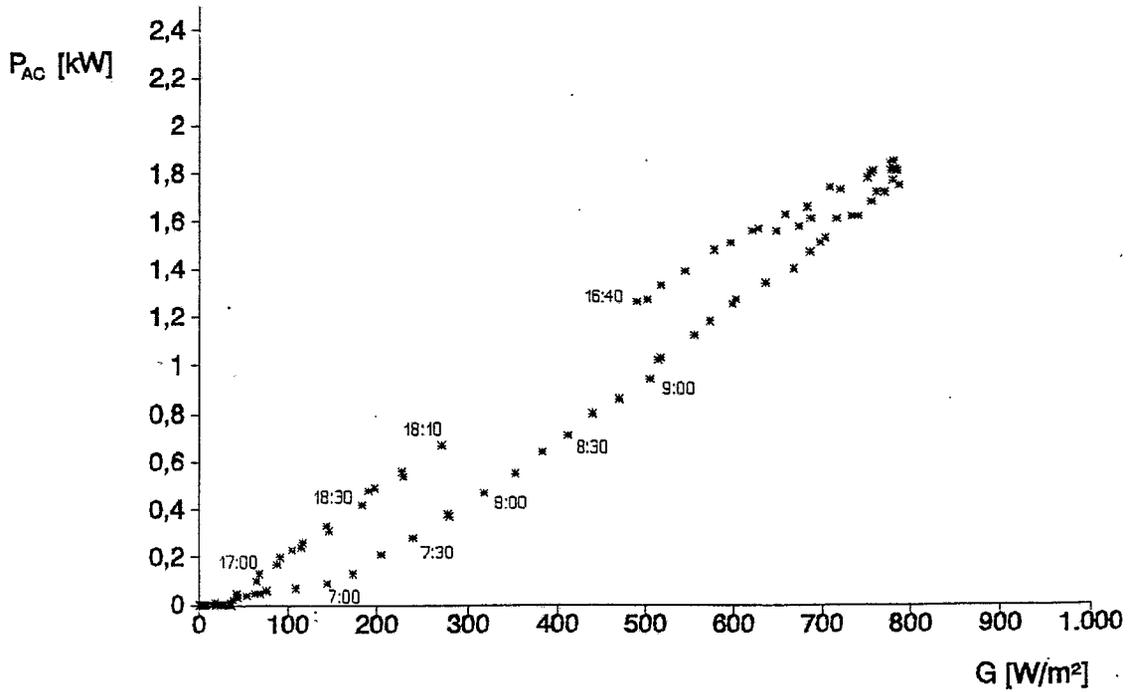


Bild 10: Ausgangsleistung der PV-Anlage über der Bestrahlungsstärke im Tagesverlauf eines Sonnentages (10.07.95)

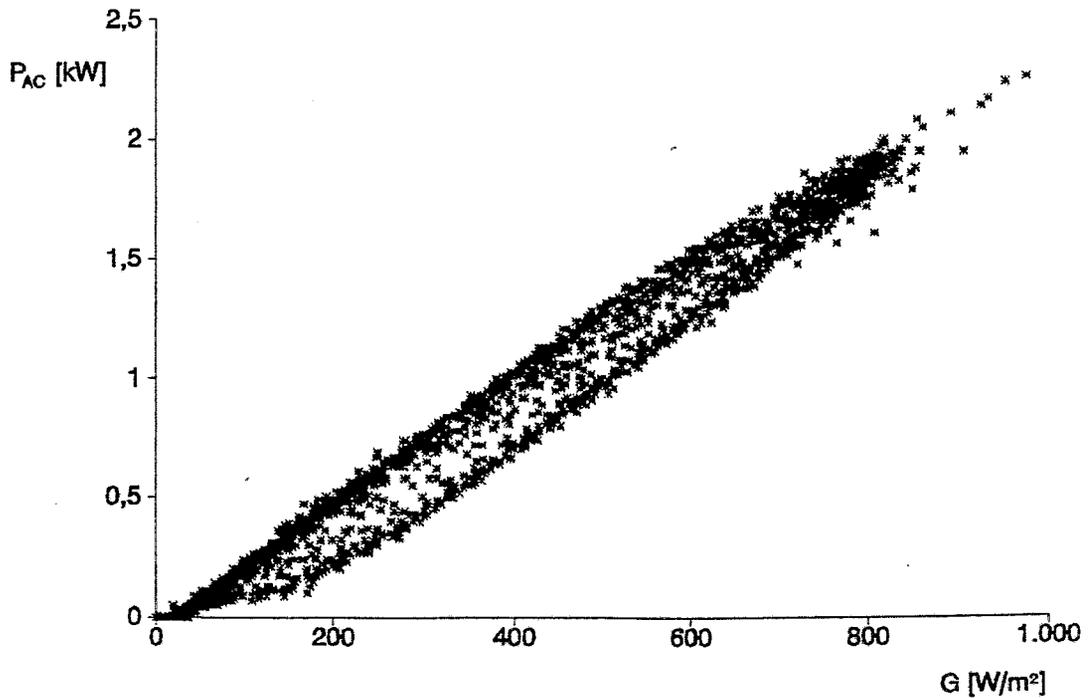


Bild 11: Ausgangsleistung der PV-Anlage über der Bestrahlungsstärke während des Monats Juli 95

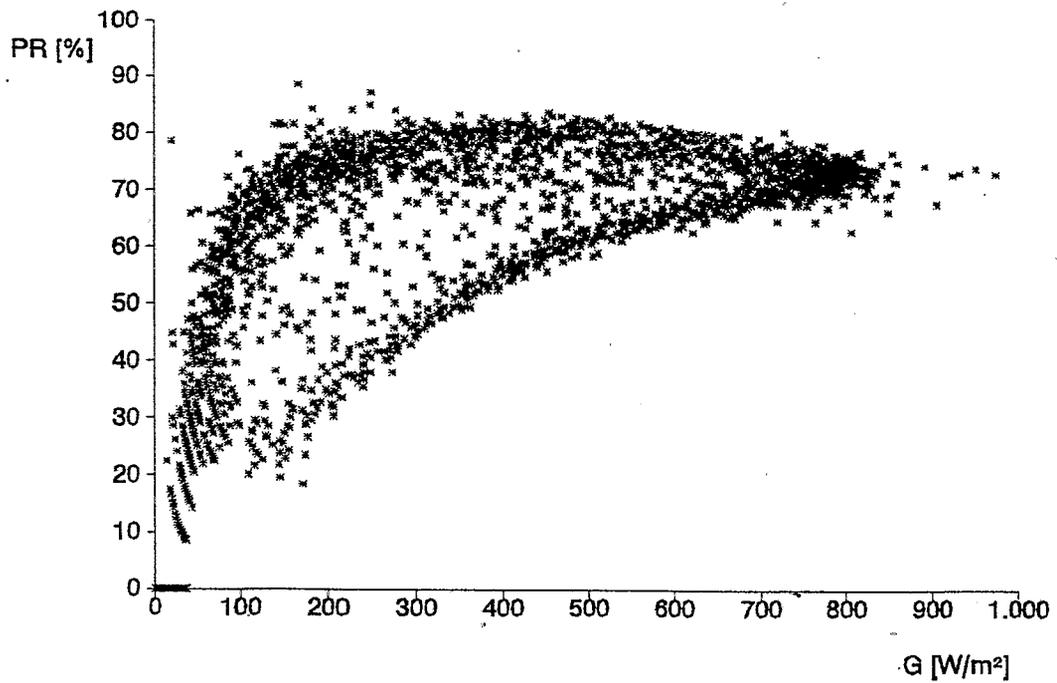


Bild 12: 10-Minuten-Mittelwerte des Performance Ratio über der Bestrahlungsstärke während des Monats Juli 95

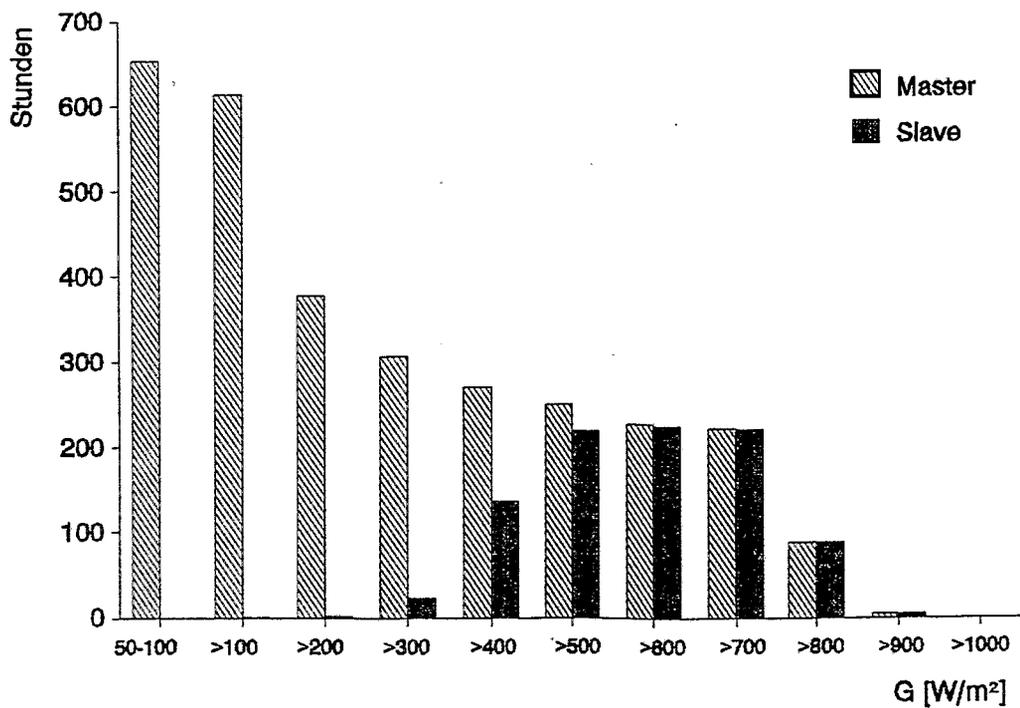


Bild 13: Betriebsstunden der Wechselrichter im Jahr 1995 in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke

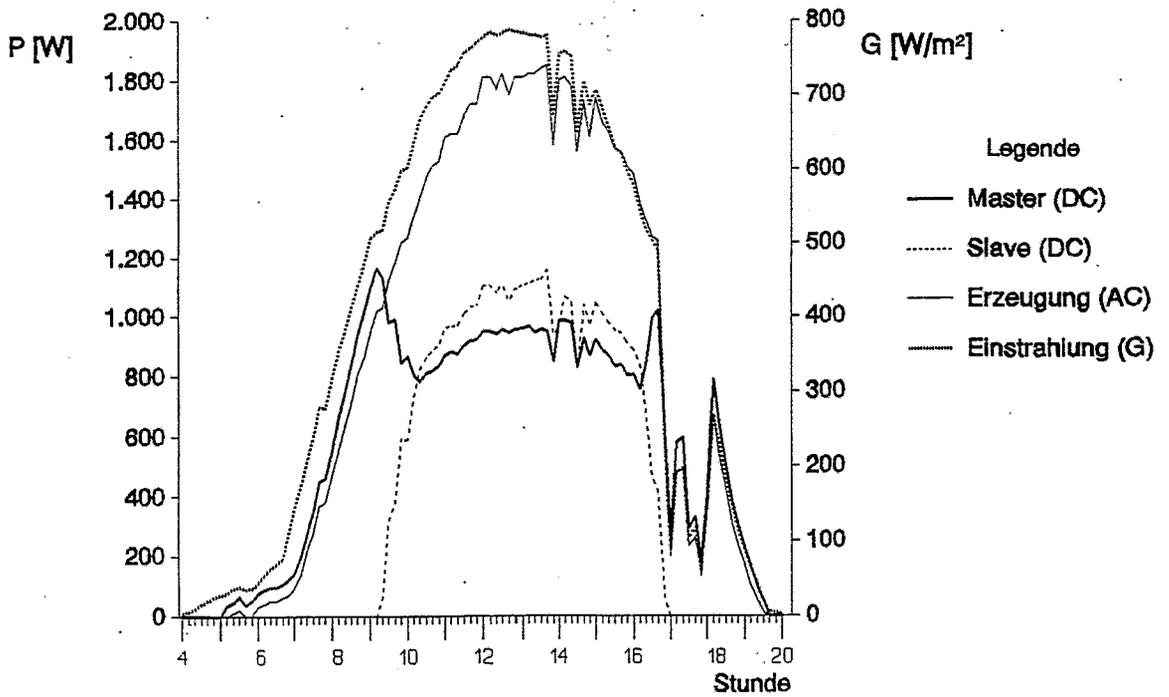


Bild 14: Energieerzeugung von Master und Slave an einem sonnigen Tag (10.07.95)

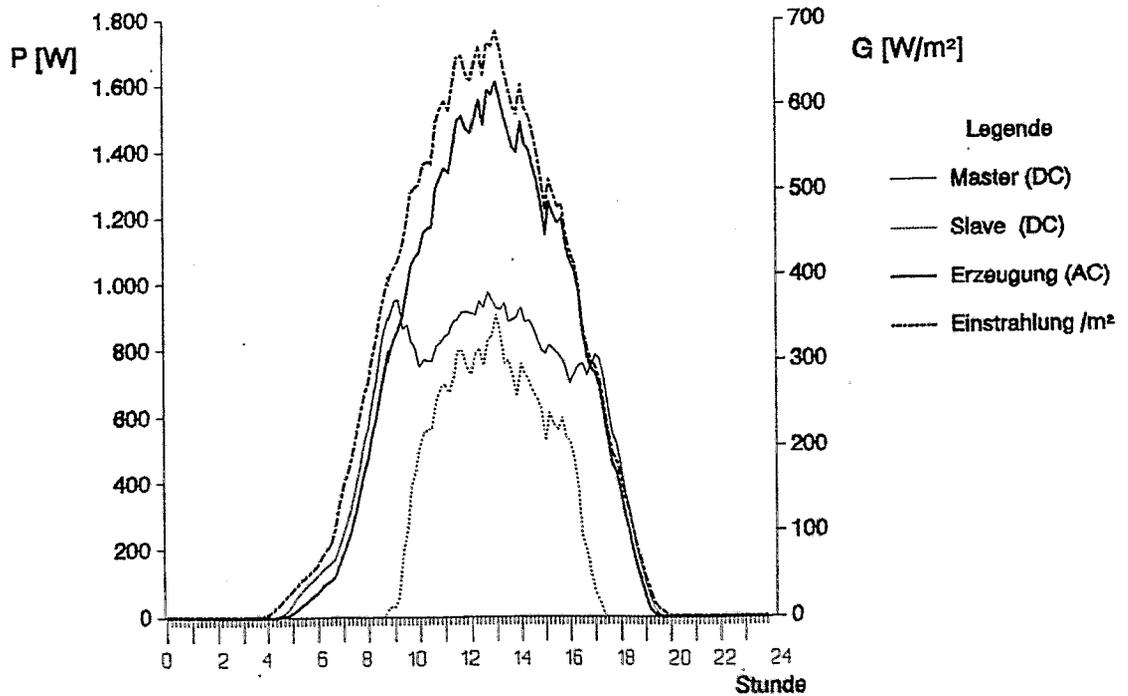


Bild 15: Mittlerer Tagesverlauf der photovoltaischen Energieerzeugung im Juli 95

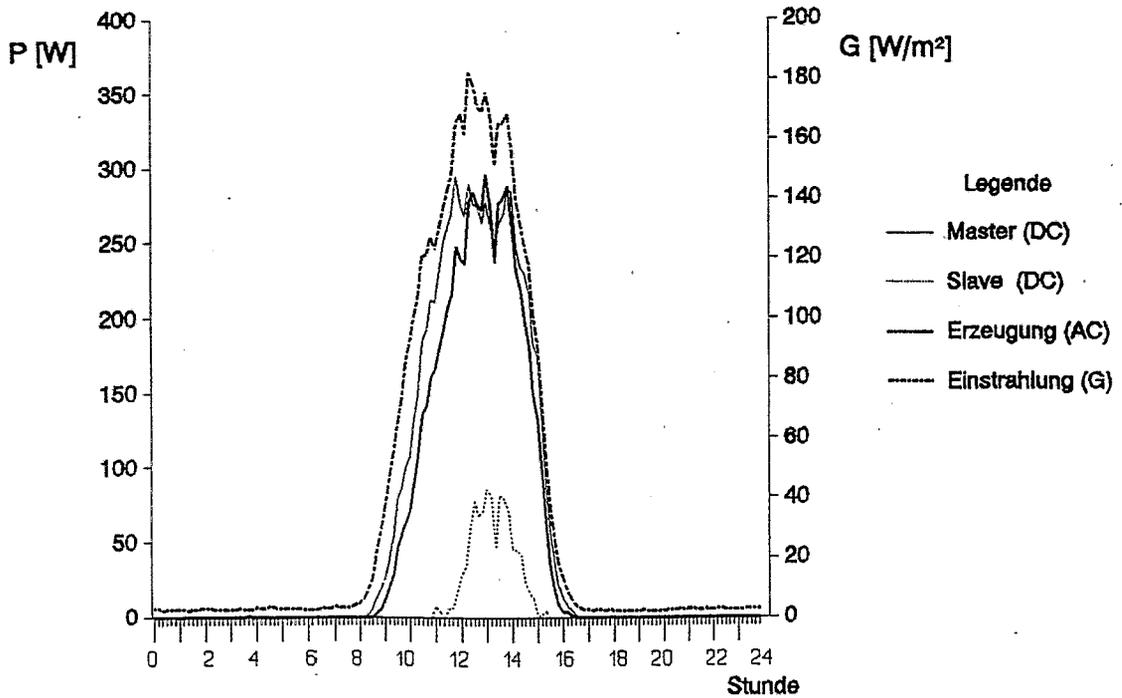


Bild 16: Mittlerer Tagesverlauf der photovoltaischen Energieerzeugung im Januar 1995

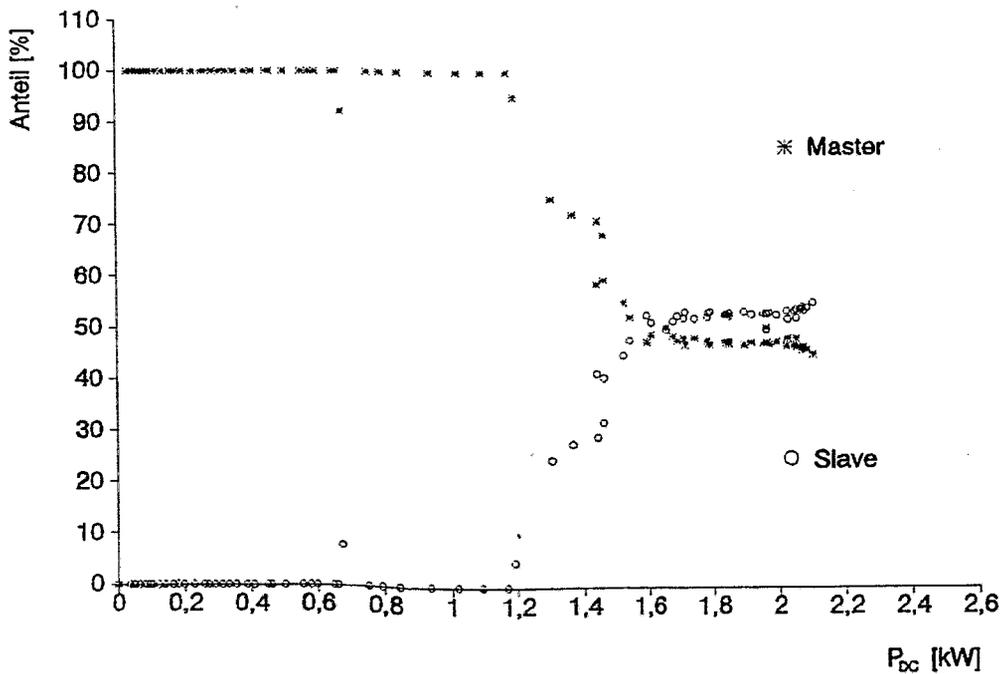


Bild 17: Prozentuale Anteile von Master und Slave an der Energieerzeugung (10-Minuten-Mittelwerte) in Abhängigkeit von der Eingangsleistung an einem sonnigen Tag (10.07.95).

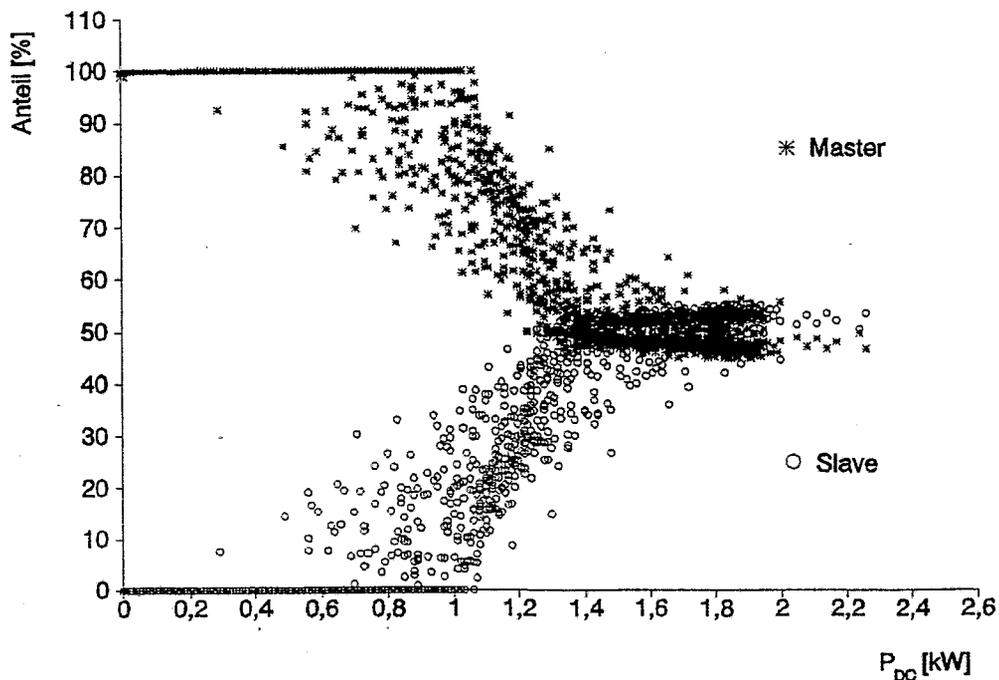


Bild 18: Prozentuale Anteile von Master und Slave an der Energieerzeugung (10-Minuten-Mittelwerte) in Abhängigkeit von der Eingangsleistung im Monat Juli 1995

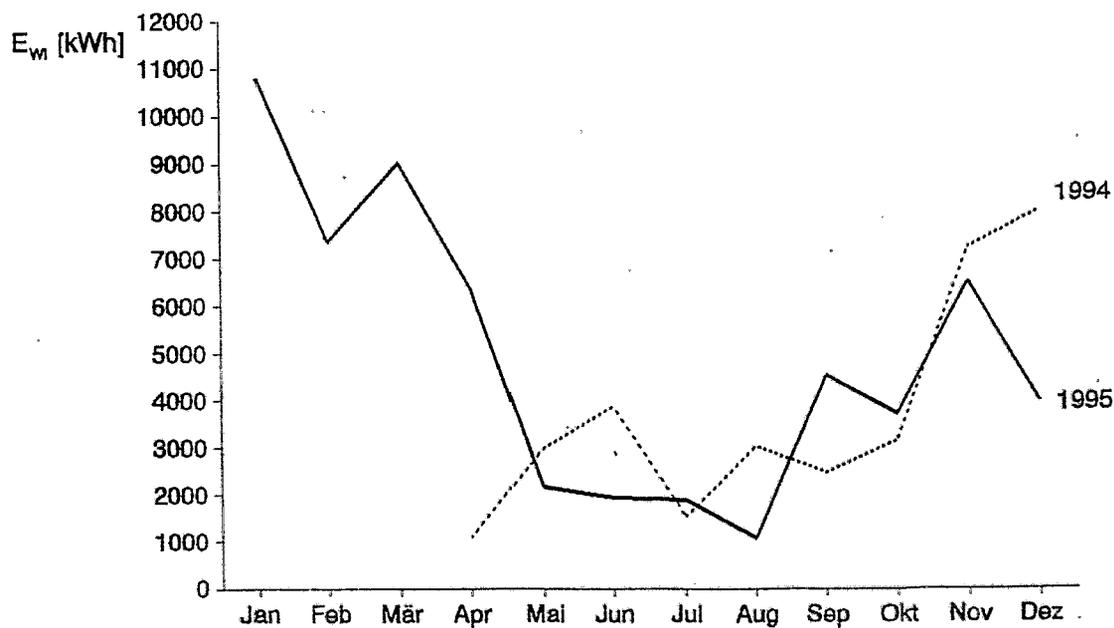


Bild 19: Monatssummen der erzeugten Elektroenergie der Windkraftanlage Otten-dorf

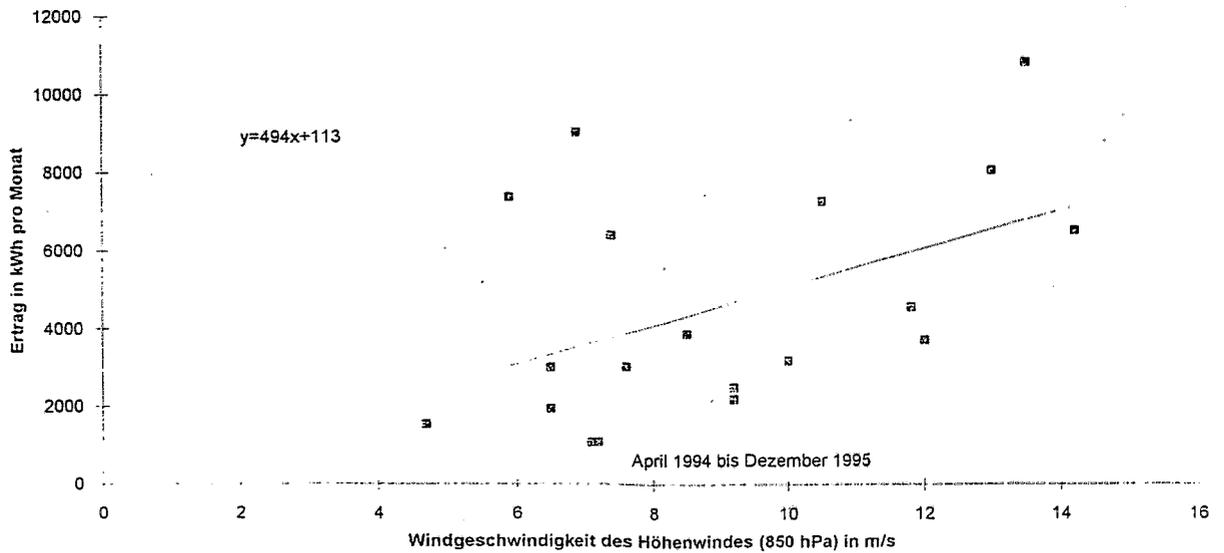


Bild 20: Zusammenhang zwischen dem monatlichen Energieertrag der Windkraftanlage und dem Monatsmittel des Höhenwindes (850-hPa-Niveau) in Dresden-Wahnsdorf

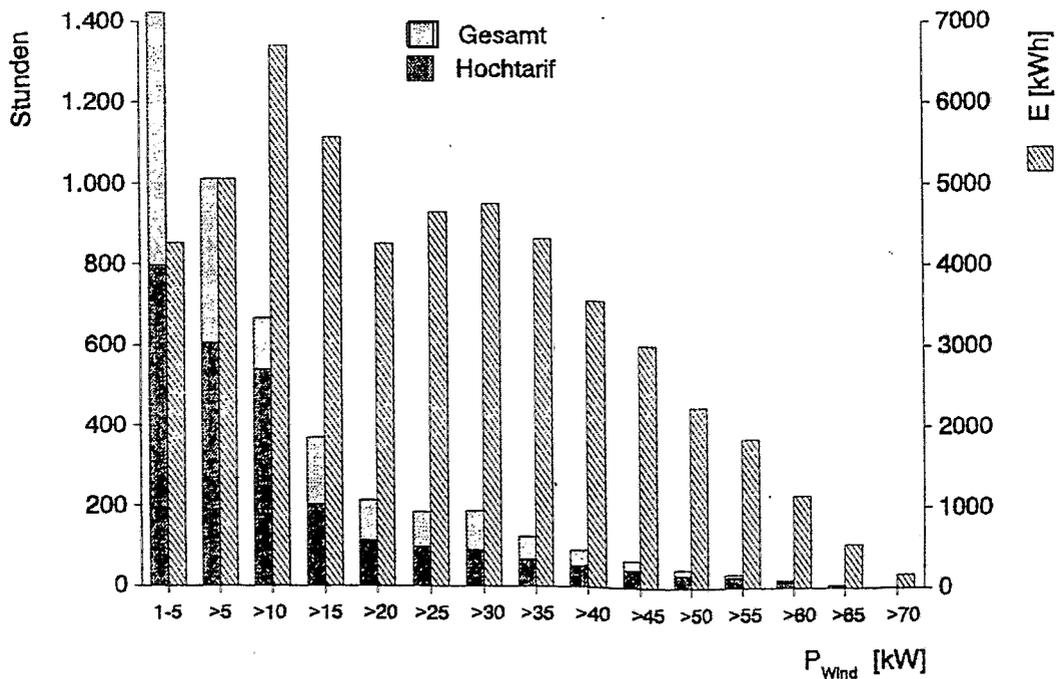


Bild 21: Häufigkeitsverteilung der abgegebenen Leistung der Windkraftanlage und abgegebene Energie nach Leistungsklassen

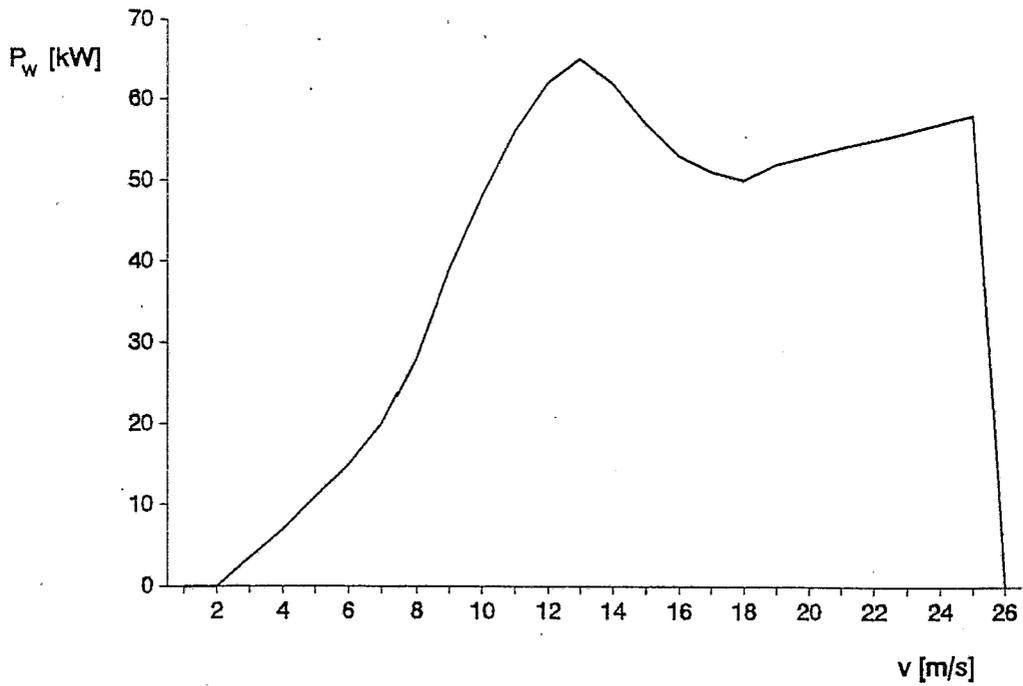


Bild 22: Leistungskennlinie der Windkraftanlage TW 60 [7]

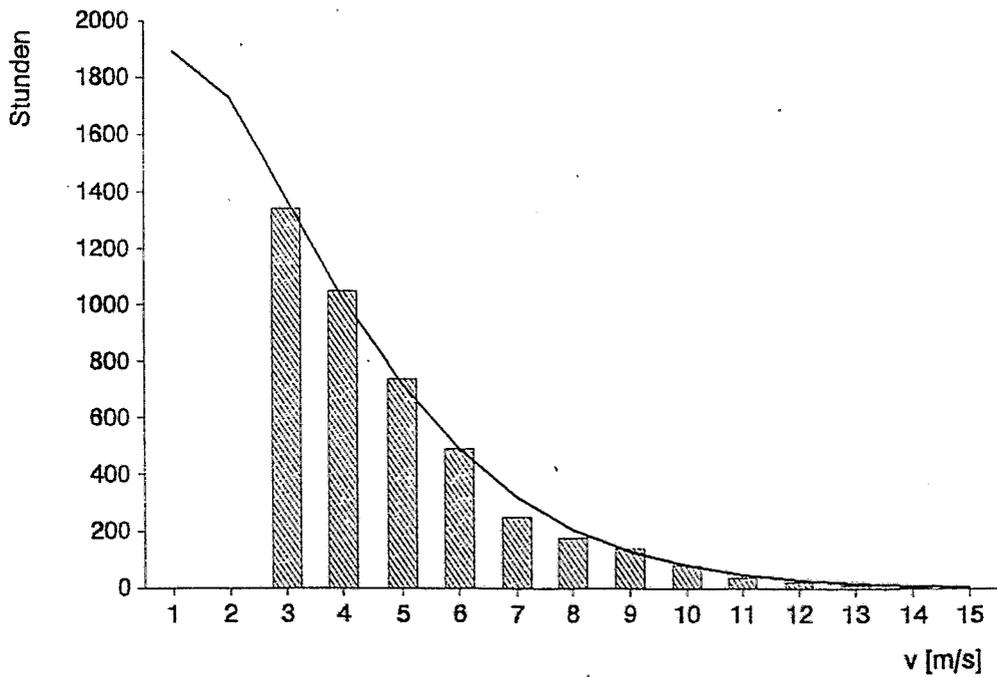


Bild 23: Berechnete Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit nach Klassen mit angepaßter Weibullverteilung für den Standort Ottendorf

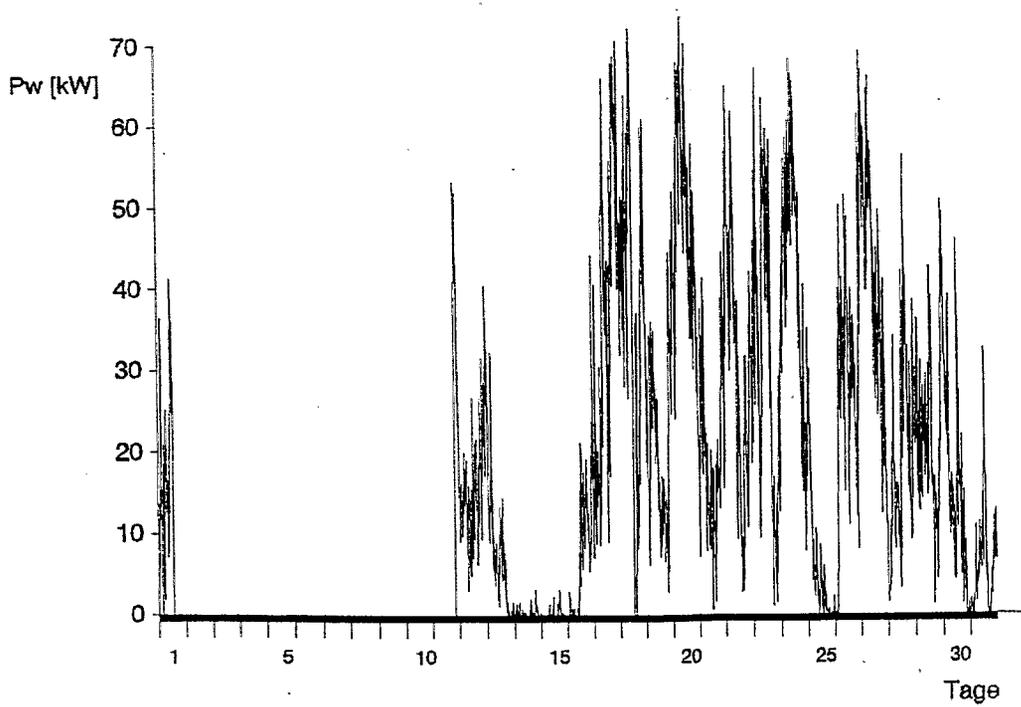


Bild 24: Monatlicher Verlauf der erzeugten Elektroenergie aus Windkraft, Januar 1995

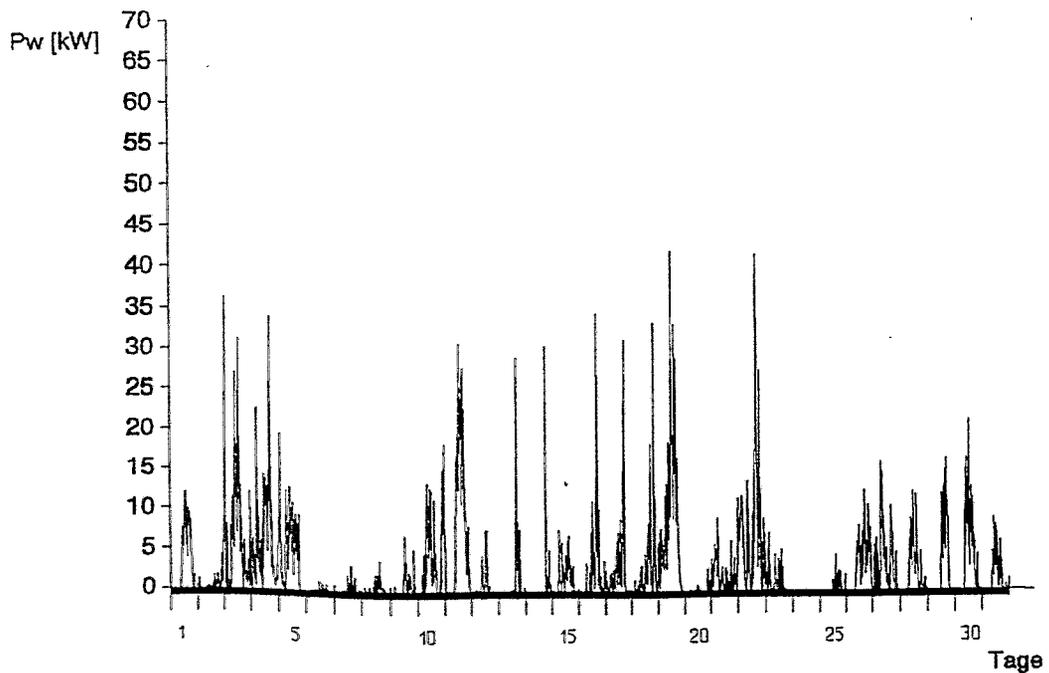


Bild 25: Monatlicher Verlauf der erzeugten Elektroenergie aus Windkraft, Juli 1995

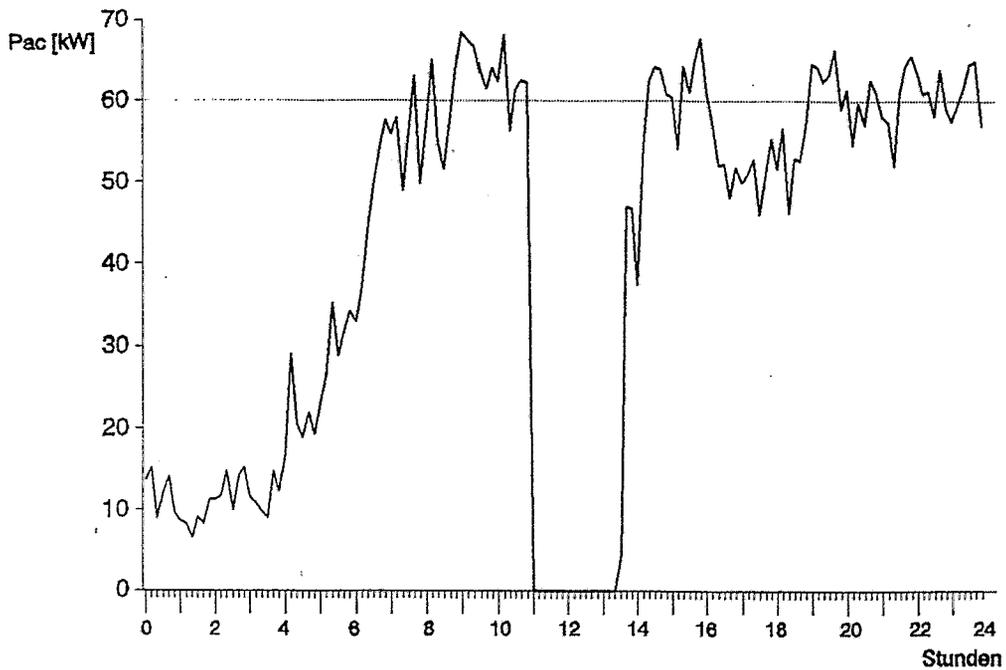


Bild 26: Tagesverlauf der Energieerzeugung am 5.11.1995. Zwischen 11 Uhr und 13.30 Uhr ist die Anlage wegen zu hoher Windgeschwindigkeiten außer Betrieb.

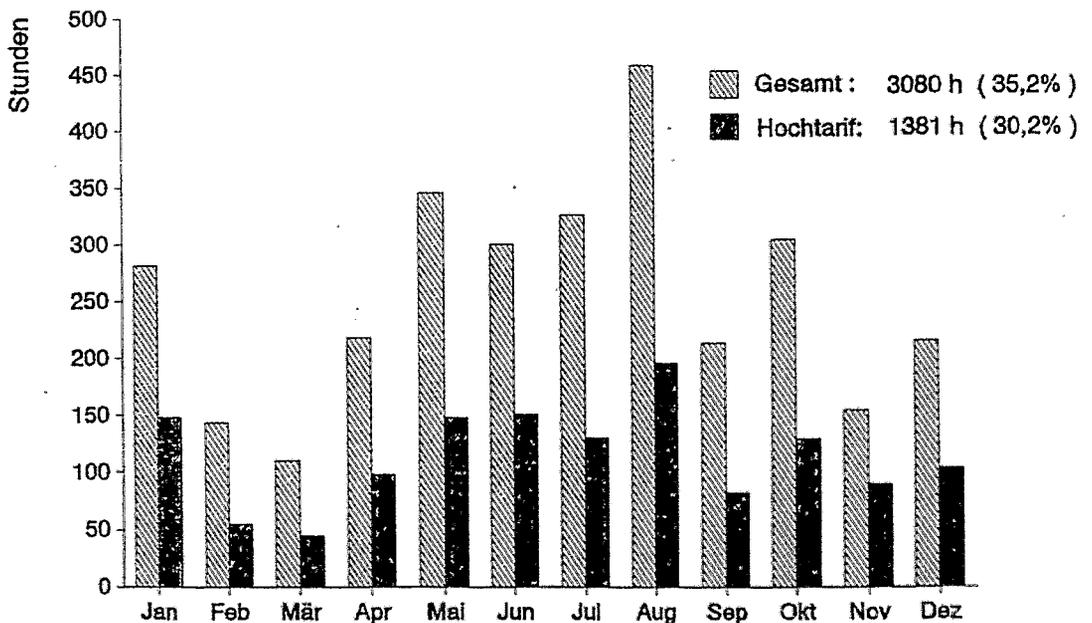


Bild 27: Monatliche Stillstandszeiten der Windkraftanlage Ottendorf wegen Flaute bzw. Schwachwind im Jahr 1995. Die Stillstandszeiten während der Hochtarifzeit (Spitzenbelastung) sind gesondert ausgewiesen.

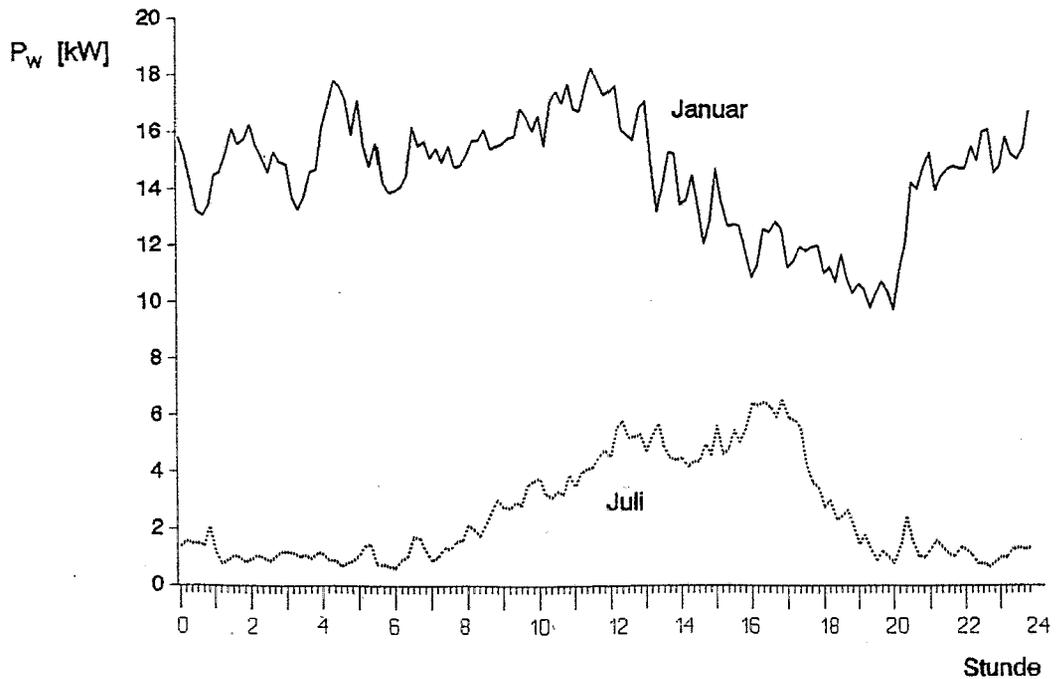


Bild 28: Mittlere tägliche Energieabgabe der Windkraftanlage in den Monaten Januar und Juli 1995

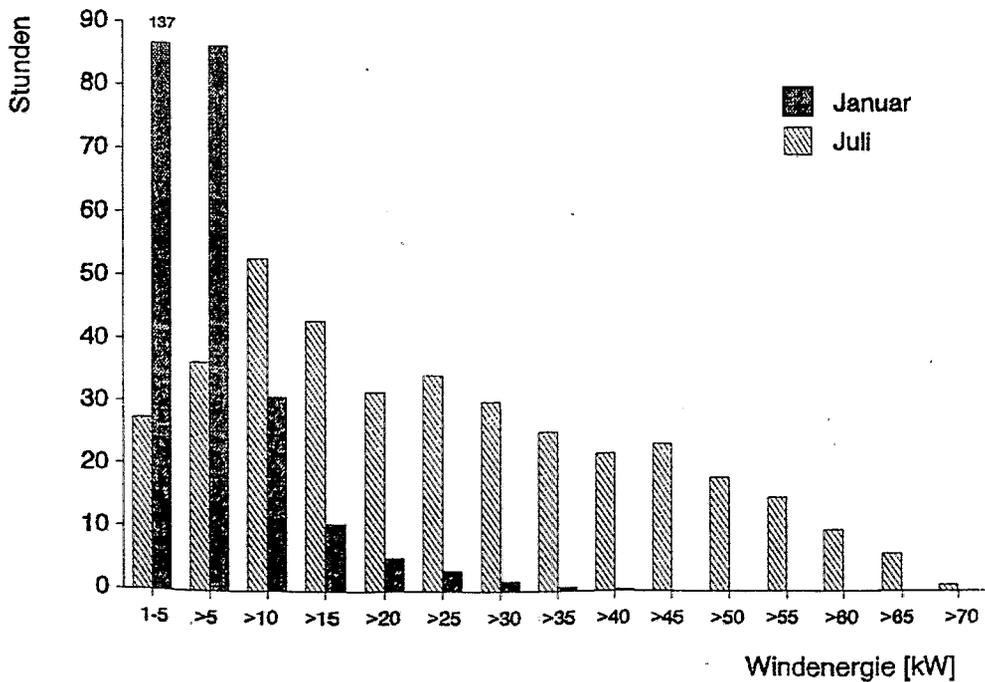


Bild 29: Häufigkeitsverteilung der abgegebenen Energie für die Monate Januar und Juli 1995

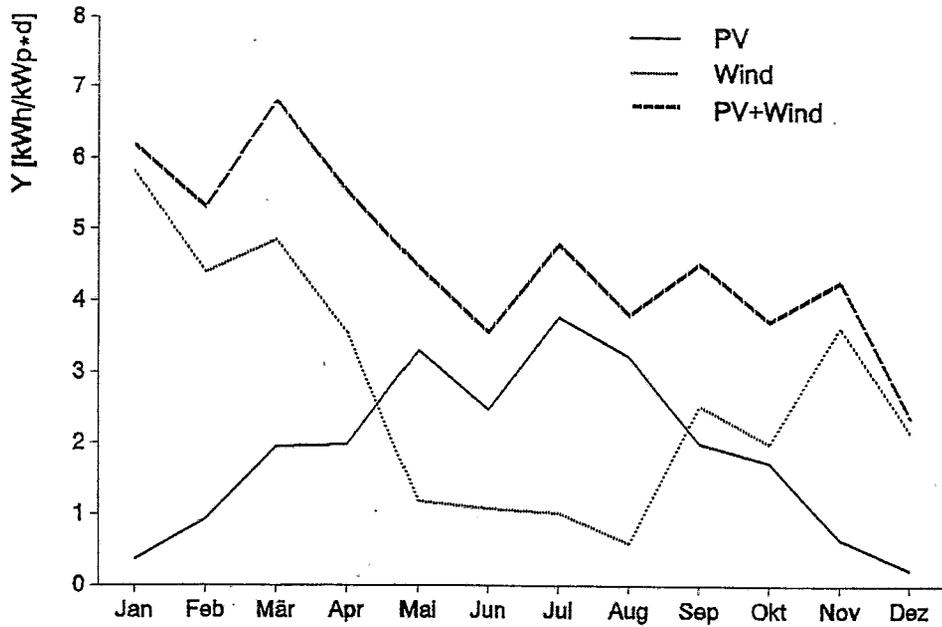


Bild 30: Saisonaler Verlauf der normierten Energieerzeugung beider Anlagen und resultierender Gesamtverlauf im Jahr 1995

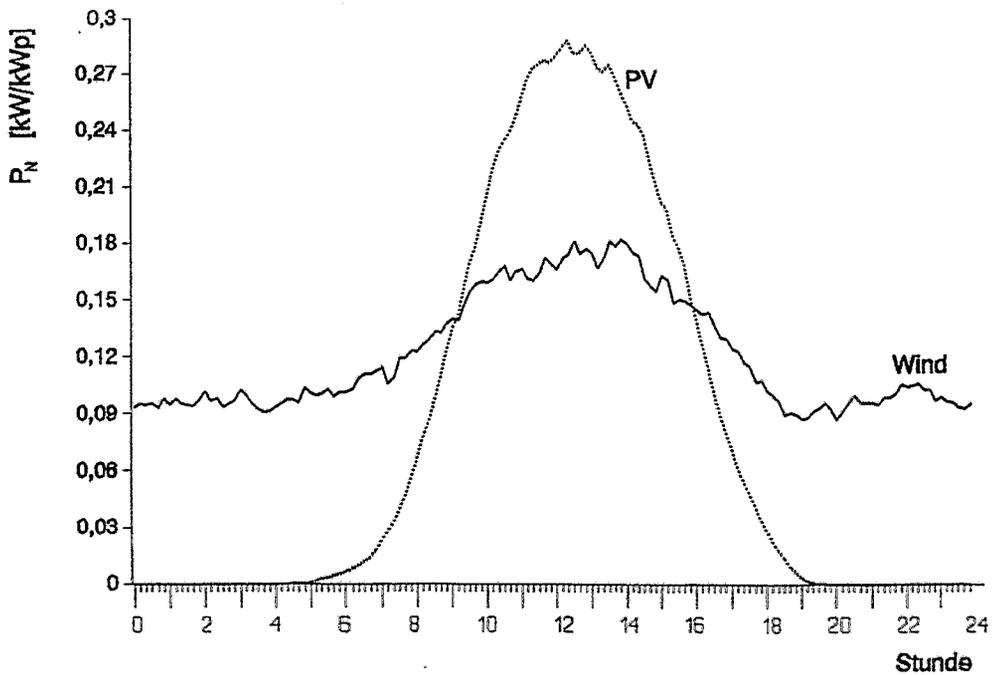


Bild 31: Mittlere tägliche Energieerzeugung beider Anlagen im Jahr 1995

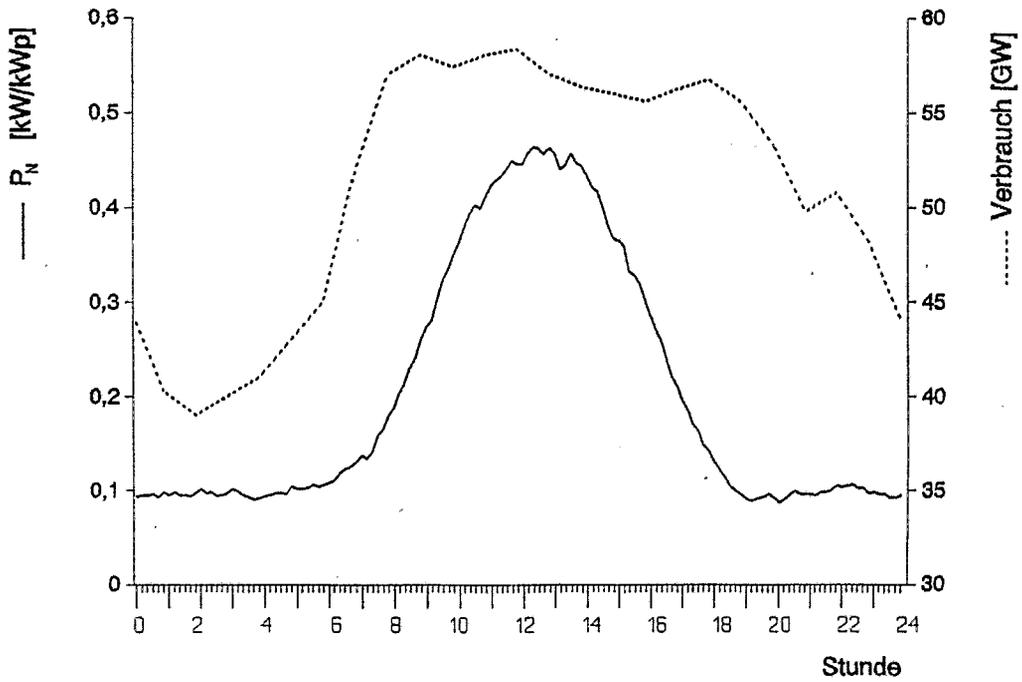


Bild 32: Mittlere tägliche Energieerzeugung eines Wind-PV-Hybridsystems am Standort Ottendorf und Lastprofil der öffentlichen Energieversorgung in Deutschland (nach [8])

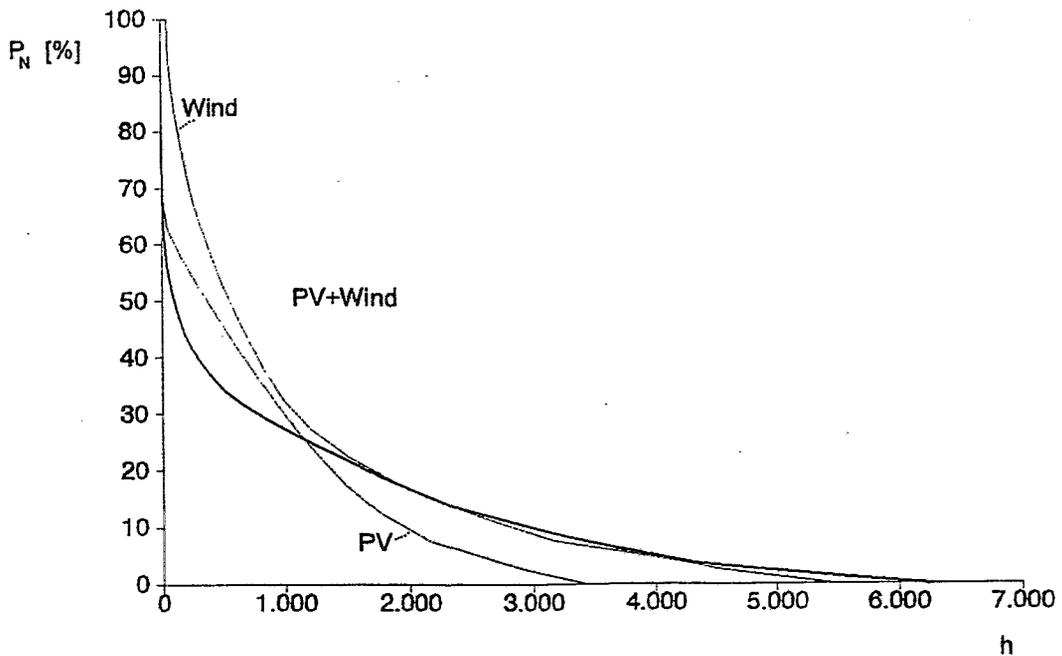


Bild 33: Jahresdauerlinien der beiden regenerativen Energieerzeugungsanlagen in Ottendorf und Dauerlinie des Gesamtsystems

Tabelle 1: Betriebsergebnisse (in kWh) von WKA TW 60 in den Jahren 1994 und 1995 [9]

		1994													
PLZ	Ort	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Gesamt kWh/m ²	
26632	Ihlow	13.0	8.51	36.5	6.74	5.69	8.04	1.52	5.63	8.76	11.4	7.11	19.8	132.762	552
27255	Harbergen		3.49	14.6	6.45	1.86	3.99	8.84	3.22	5.15	6.0	3.88	10.4	59.969	249
49074	Osnabrück	10.5	6.78	15.0	3.06	1.71	4.12	8.77	3.91	3.51	5.6	2.01	9.8	66.942	278
48432	Rheine	8.7	3.08	8.7	3.82	2.00	2.94	1.06	2.20	3.58	3.7	3.08	7.7	50.696	211
48607	Ochtrup	13.7	6.06	13.2	7.10	3.38	4.19	1.63	3.61	4.87	5.2	6.10	12.3	81.306	338
01458	Ottendorf				1.01	3.00	3.87	1.53	3.02	2.48	3.1	7.25	8.03		
		1995													
01458	Ottendorf	10.8	6.52	3.71	4.54	6.39	9.01	7.36	1.94	2.17	1.07	1.89	3.99	59.398	246