

# Windenergiepotential in Sachsen

## Wind Energy Resources in Saxony

Hirsch, Werner; Rindelhardt, Udo; Forschungszentrum Rossendorf e.V

### Summary

*The wind energy resources of Saxony, a typical interior state of Germany, have been estimated based on a special wind measuring programme. It was performed between 1991 and 1995. The main problem in applying the wind atlas method was to determine the areas with the same wind climate and the corresponding data sets (atlas stations). After defining the atlas stations resource file calculations were performed over about 60 % of the saxon territory. The technical potential of wind energy in Saxony was estimated to be 5 TWh p.a. First results from Saxon WTGS confirm the results.*

### 1. Einleitung

Seit 1990 werden in Sachsen Untersuchungen zur Windenergienutzung durchgeführt [1]. Wesentliche Impulse gingen von den seit 1991 durchgeführten Windmeßprogrammen aus, die durch das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung initiiert und gefördert wurden. Ihre Ergebnisse sind in mehreren Berichten zusammengefaßt [2,3]. Als wesentlichstes Ergebnis dieser Meßprogramme kann die Bereitstellung von geeigneten Datensätzen zur Durchführung von WASP-Rechnungen angesehen werden. Nach Veröffentlichung einer Reihe von weiteren Datensätzen durch den DWD [4] bestand nunmehr die Möglichkeit der Durchführung flächendeckender Rechnungen zur Ermittlung des Gesamtpotentials in Sachsen.

Im folgenden werden die zugehörigen Untersuchungen zusammenfassend beschrieben. Schwerpunkt bilden dabei die bei der Anwendung von WASP [5] in orographisch komplexem Gelände gesammelten Erfahrungen. Für über 60 % der Fläche Sachsens wurden WASP-Rechnungen in einem 250 m x 250 m Raster durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit Resultaten von anderen Modellen verglichen. Die Ermittlung windhöffiger Gebiete erfolgte auf der Basis von Ertragsrechnungen für eine Vergleichs-Windkraftanlage (500 kW, 60 m Nabenhöhe). Abschließend werden die Vorausberechnungen mit Ergebnissen von Windkraftanlagen verglichen.

Windklimatologisch wird Sachsen durch unterschiedliche Regionen charakterisiert. Während im nördlichen Teil Sachsens Flachland überwiegt, wird das Gelände nach Süden komplexer. Das bedeutende orographische Element Sachsens ist die Pultscholle des Erzgebirges. Dieses Gebirge verläuft entlang der südlichen Landesgrenze von Südwest nach Nordost. Ausläufer davon führen über den Freiburger Raum und - in abgeschwächter Form - bis in die Gegend von Grimma und Oschatz. Im östlichen Teil befinden sich das Lausitzer Bergland und das Lausitzer Gebirge. Das Erzgebirge ist durch mehrere tief eingeschnittene Flußtäler gekennzeichnet. Der größte Fluß Sachsens, die Elbe, verläuft von der tschechischen Grenze bis kurz nach Meißen ebenfalls in einem ausgeprägtem Tal. Die Kammlagen des Erzgebirges - insbesondere des Westerzgebirges - sind teilweise stark bewaldet. Außerdem gibt es größere zusammenhängende Waldgebiete um Dresden und im nordöstlichen Teil Sachsens. Zentralsachsen zwischen Leipzig und Dresden ist verhältnismäßig schwach bewaldet.

### 2. WASP-Nutzung im Binnenland

Zur Bestimmung des Windenergiepotentials wurde das - weit verbreitete - Windatlasprogramm WASP genutzt. Es erlaubt die Extrapolation der Windstatistik von einem Meßort zu potentiellen Anlagenstandorten in dessen (näherer oder weiteren) Umgebung. WASP wurde ursprünglich für Anwendungen im Küstenbereich entwickelt und verifiziert. Mit zunehmender Erschließung der Windenergiepotentiale im Binnenland wird es auch dort in zunehmenden Maße angewandt, wobei dessen Grenzen mitunter übersehen werden.

Drei Modelle im WASP-Programmsystem korrigieren die Einflüsse von Hindernissen im Nahbereich sowie Orographie und Rauigkeit auf die Windverhältnisse der bodennahen Luftschicht. Im Idealfall, d.h. bei nur geringem Einfluß der Umgebungsbedingungen auf die Windverhältnisse (Flachland mit geringer Rauigkeit, keine Hindernisse im Nahbereich), kann der gebildete WASP-Datensatz den durch den mittleren geostrophischen Wind vorgegebenen Bedingungen nahekomen. Bei nicht idealen Ver-

hältnissen jedoch - wie an den meisten Standorten in Sachsen - repräsentiert die Atlas-Datei das regionale Windklima eines mehr oder weniger großen Gebietes (Repräsentanzgebiet). Die Größe dieses Gebietes hängt im wesentlichen von der Orographie ab. Im Flachland (außerhalb Sachsens) kann sich das Repräsentanzgebiet bis zu 100 km Entfernung um eine Windmeßstation erstrecken. In Gebirgsgegenden mit stark strukturiertem Geländere relief reduziert sich der Repräsentationskreis einer Windmeßstation bis hin zu dem Extremfall, daß eine Meßstation in exponierter Lage nicht als Atlasstation genutzt werden kann [5]. Die Anwendung von WASP bzw. von Atlasstationen erfordert somit immer Untersuchungen zum Repräsentanzgebiet des verwendeten Datensatzes.

Dessen Verifikation kann grundsätzlich nur punktuell durch einen Vergleich der Ergebnisse von WASP-Rechnungen mit weiteren Windmeßdaten in der interessierenden Region erfolgen. Die vorhandene räumliche Dichte derartiger Meßdaten ist allerdings auch nach Veröffentlichung der DWD-Daten insbesondere im Binnenland häufig nicht ausreichend, im Binnenland sollte die Entfernung zwischen verfügbaren Datensätzen nicht über 50 km liegen. Nur wenn die Ergebnisse von WASP-Rechnungen (d.h. A- und k-Parameter, Windrose) zwischen verschiedenen Stationen übereinstimmen, kann das durch die Stationen definierte Gebiet als Repräsentanzgebiet eines Datensatzes aufgefaßt werden. Innerhalb dieses Gebietes kann - bis auf Standorte mit extremen orographischen Bedingungen - mit belastbaren WASP-Ergebnissen gerechnet werden.

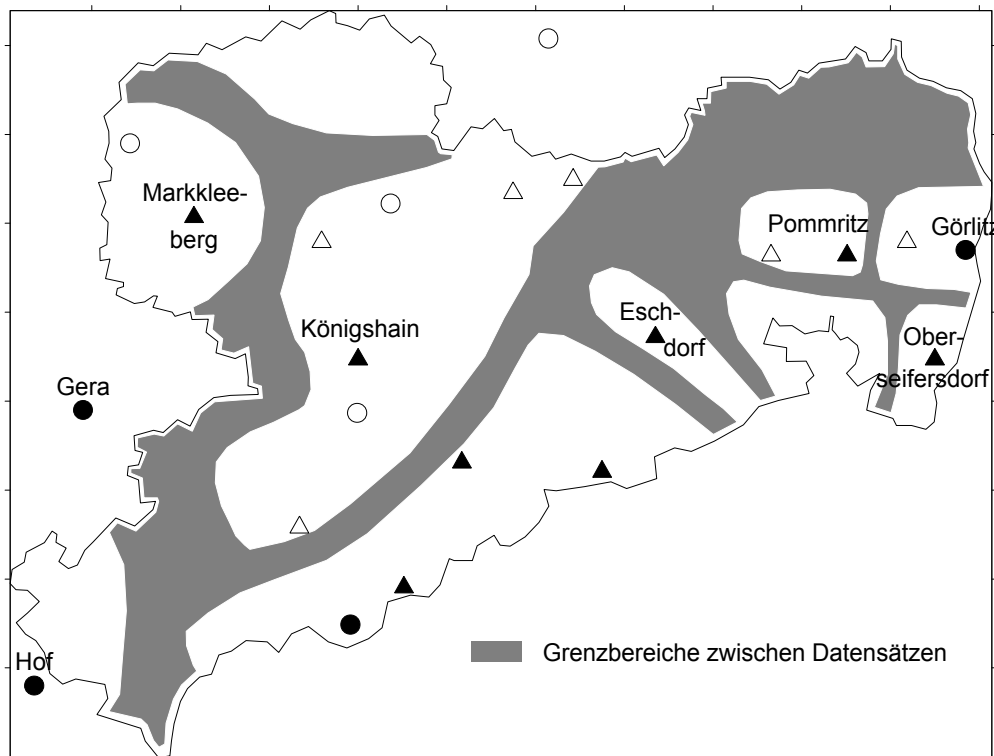


Abb. 1: Repräsentanz der Datensätze (Kreis: DWD; Dreieck: sächsisches Windmeßprogramm)

Fig. 1: Representativ selection of the data (circle: DWD; triangle: Saxon wind measurement program)

Wegen der Orographie in Sachsen sind WASP-Rechnungen grundsätzlich nicht mit einem einzigen Datensatz möglich. Die Untersuchungen zur Repräsentanz der insgesamt verfügbaren 22 Datensätze (davon 8 durch den DWD) sind im Detail in [3] beschrieben. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden 8 Windmeßstationen mit den zugehörigen Repräsentanzgebieten ermittelt (Abb.1), deren Daten zur Berechnung der Windverhältnisse in großen Teilen Sachsens genutzt werden können. Für einige Gebiete Sachsens kann die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Repräsentanzgebiet (Datensatz) gegenwärtig nicht eindeutig angegeben werden. Die Berechnung des Windenergiepotentials führt dann in solchen Gebieten - in Abhängigkeit vom verwendeten Datensatz - zu u.U. erheblich differierenden Aussagen. Von verschiedener Seite vorgeschlagene Interpolationsverfahren (z.B. [7]) in den fraglichen Regionen lösen das Problem nicht grundsätzlich. Allerdings sind Gebiete vorstellbar, in denen der Übergang von einem zu einem anderen Repräsentanzgebiet nach der in [7] beschriebenen Art und Weise verläuft. In jedem Fall werden die Grenzen zwischen unterschiedlichen Repräsentanzgebieten nicht schroff, sondern kontinuierlich verlaufen.

In den oberen Lagen des Erzgebirges kann wegen der Komplexität der Orographie WASP nicht bzw. nur sehr eingeschränkt angewendet werden [6]. Für diese Region sind in Abb. 1 die Lage der Stationen eingezeichnet, deren Daten gegenwärtig verfügbar sind. Die Standorte von weiteren Stationen mit verfügbaren, aber redundanten Datensätzen sind mit einem leeren Sinnbild (Kreis: DWD, Dreieck: sächsisches Windmeßprogramm) eingetragen.

### 3. Potentialbestimmung mit mesoskaligen Modellen

Mesoskalige atmosphärische Simulationsmodelle wurden speziell für regional differenzierte Wettervorhersagen und für Ausbreitungsprognosen von Luftschadstoffen [8] entwickelt. Sie können auch zur Ermittlung des langjährigen Windangebotes über einem größeren Gebiet genutzt werden. Allerdings sind zusätzliche statistische Betrachtungen und vielfache Simulationsläufe nötig, um von der Einzelfallrechnung zu einem bestimmten Zeitpunkt (Episode) auf langjährige Mittelwerte zur Beschreibung der mittleren Windverhältnisse zu gelangen.

Für große, auch orographisch komplizierte Regionen kann mit komplexen atmosphärischen mesoskaligen Simulationsmodellen ein Überblick über das vorhandene Windenergiepotential erreicht werden, wie er mit anderen Methoden nicht möglich ist. Wegen verwendeter Modellnäherungen können allerdings die Gitterelemente nicht beliebig klein gewählt werden [9]. In der Regel stellen Gitterelemente von Seitenlängen im Bereich zwischen 1 km und 5 km die untere Grenze dar bzw. sind bei Rechnungen üblich. Kleine Gitterabstände führen außerdem bei größeren Gebieten wegen der Komplexität der Programme zu einem starken Anwachsen an erforderlicher Rechenzeit. Aus diesen Gründen sind Aussagen über Einzelstandorte nicht möglich. Vielmehr wird das über das Gitterelement gemittelte Windklima bestimmt.

Für ein größeres Gebiet Sachsens (Zentralsachsen) liegen Ergebnisse von Rechnungen mit mesoskaligen Modellen (KAMM [10]) vor. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den WASP-Resultaten zeigt allerdings erhebliche Abweichungen. So wird die Windgeschwindigkeit in 40 m Höhe durch KAMM durchweg um 0,6 bis 1,5 m/s höher als mit WASP ermittelt. Ähnlich große Abweichungen wurden bei der Berechnung der Leistungsdichte im Harz unter Verwendung des mesoskaligen Programms GESIMA ermittelt [11]. Offensichtlich bestehen bei Nutzung der mesoskaligen Modelle für windenergetische Fragestellungen noch grundsätzliche Probleme.

Zentralsachsen, Differenzen zwischen WASP- und AIOLOS-Rechnung der Windgeschwindigkeit in 40 m Höhe

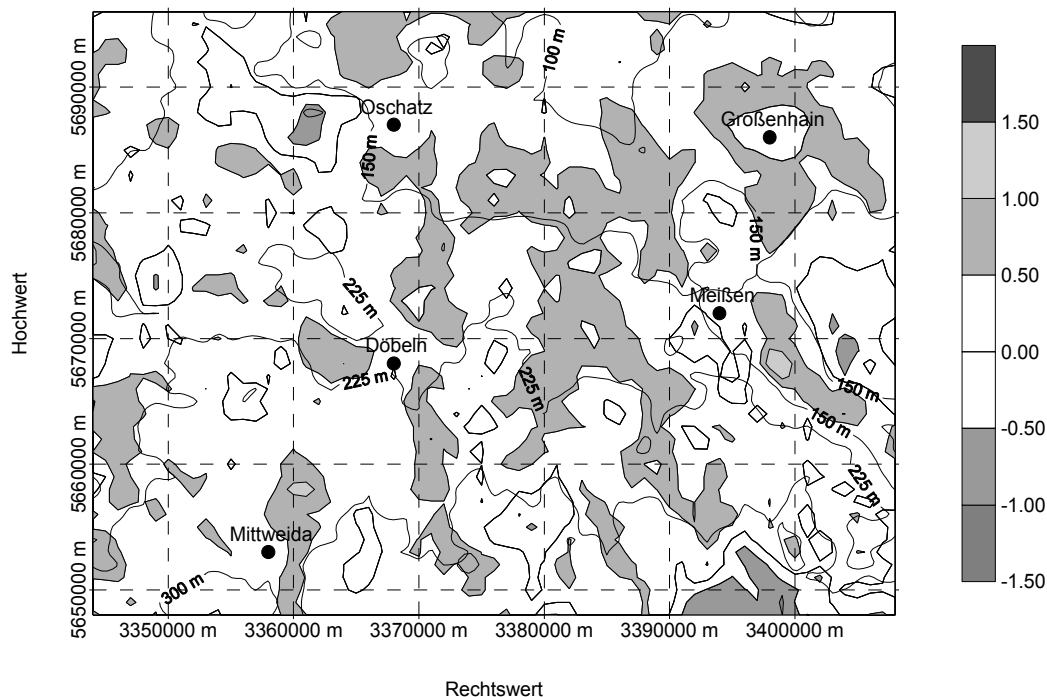


Abb. 2: Differenzen zwischen WASP- und AIOLOS-Rechnung  
Fig. 2: Differences between WASP- and AIOLOS-calculation

Eine bessere Annäherung an die Meßwerte der Windmeßstationen bzw. die flächenhaften WASP-Rechnungen zeigen die Resultate von einfacheren Modellen (AIOLOS [12]). Wegen der kürzeren Rechenzeit derartiger Programme lassen sich für sämtliche Konstellationen der Häufigkeitstabelle des Höhenwindes Berechnungen des Bodenwindes durchführen. Auf diese Weise ist zumindest eine realistischere Bestimmung der Windstatistik des Bodenwindes möglich. Außerdem kann mit kleineren Gitterweiten als bei komplexen mesoskaligen Simulationsmodellen gearbeitet werden, wodurch die Orographie besser berücksichtigt wird. Abb. 2 zeigt die Differenzen in der Windgeschwindigkeit in 40 m Höhe in der Region Zentralsachsen zwischen einer WASP-Rechnung (Datensatz Königshain, Meßhöhe 36 m) und einer AIOLOS-Rechnung, bei der als Eingangsdaten diejenigen des Höhenwindes (850 hPa) der Station Dresden (1971 bis 1990) verwendet wurden. Für die AIOLOS-Rechnung wurde die gleiche Orographie, jedoch eine einheitliche Rauigkeitslänge von 0,05 m verwendet. Letzteres ist für freiliegende Standorte weitgehend zutreffend. Trotz völlig unterschiedlicher Windeingangsdaten und verschiedener Berechnungsverfahren wurde bessere Übereinstimmung erzielt. In weiten Bereichen ist sie kleiner als  $\pm 0,5$  m/s. Für Windenergieprognosen sind solche Abweichungen allerdings unakzeptabel.

#### 4. Potentiale in Sachsen

Zur Charakterisierung des Windenergiepotentials wird häufig die mittlere Windgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe über Grund herangezogen (z.B. [13]). Derartige Angaben sind jedoch nur unter der Voraussetzung identischer Verteilungsfunktionen der Windgeschwindigkeiten vergleichbar. Dies trifft jedoch praktisch kaum zu. Wegen der starken Variation der Verteilungsfunktion der gemessenen Windgeschwindigkeiten können gleiche mittlere Windgeschwindigkeiten sehr unterschiedlichen Leistungsdichten entsprechen. Beispielsweise ergeben die Parameterkombinationen der Weibull-Verteilung ( $A = 5,53$  m/s,  $k = 1,5$ ) und ( $A = 5,64$  m/s,  $k = 2,5$ ) eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5 m/s. Im ersten Fall ergibt sich für die Leistungsdichte  $207$  W/m<sup>2</sup>, im zweiten Fall jedoch lediglich  $121$  W/m<sup>2</sup>! Eine Variation des k-Parameters in der angegebenen Größenordnung kann im Binnenland durchaus auftreten, wie aus der Gegenüberstellung in Tab. 1 zu entnehmen ist. Wegen dieser Zusammenhänge ist die Angabe einer mittleren Windgeschwindigkeit zur Charakterisierung des Windenergiepotentials ungeeignet, zumal diese Angabe auch noch von der Höhe abhängt.

<b>1. WASP-Atlasdatei der Station Königshain (25.11.92 - 24.11.94)</b>						
h [m]	v [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]	P [MWh/a]	A [m/s]	k	
10	4,9	153	623	5,5	1,81	
30	6,1	264	1014	6,8	1,97	
40	6,4	302	1142	7,2	2,05	
60	7	375	1363	7,9	2,15	

<b>2. WASP-Atlasdatei der Station Görlitz (1979 - 1991)</b>						
h [m]	v [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]	P [MWh/a]	A [m/s]	k	
10	4,1	114	451	4,5	1,5	
30	5,1	195	731	5,7	1,63	
40	5,4	222	824	6,1	1,7	
60	5,9	275	992	6,6	1,78	

<b>3. WASP-Atlasdatei der Station Fichtelberg (1976 - 1990)</b>						
h [m]	v [m/s]	E [W/m <sup>2</sup> ]	P [MWh/a]	A [m/s]	k	
10	5,3	178	726	5,9	1,92	
30	6,5	310	1173	7,4	2,09	
40	6,9	356	1319	7,8	2,17	
60	7,5	443	1566	8,5	2,28	

Tab. 1: Vergleich unterschiedlicher WASP-Atlasdateien bei ebener Orographie und gleichmäßiger Rauigkeitslänge von 0,03 sowie ohne Hindernisse im Nahbereich.

Tab. 1: Comparison between different WASP-atlas files with a smooth orography, a regular roughness length of 0.03 and without obstacles nearby.

Zur Charakterisierung des natürlichen Potentials ist deshalb die Angabe der mittleren Leistungsdichte in einer realistischen Nabenhöhe sinnvoll, da sie das Arbeitsvermögen des Windes charakterisiert. Windkraftanlagen nutzen allerdings nicht das gesamte Arbeitsvermögen des Windes aus. Für die Angabe der an einem Standort erzeugbaren Elektroenergie müssen neben den Weibull-Parametern in Nabenhöhe zusätzlich die Leistungskennlinie der jeweils zugrundegelegten Anlage bekannt sein. Um das zu einem bestimmten Zeitpunkt realisierbare technische Potential zu ermitteln, ist es somit naheliegend, die Erträge einer bestimmten Vergleichsanlage zu verwenden.

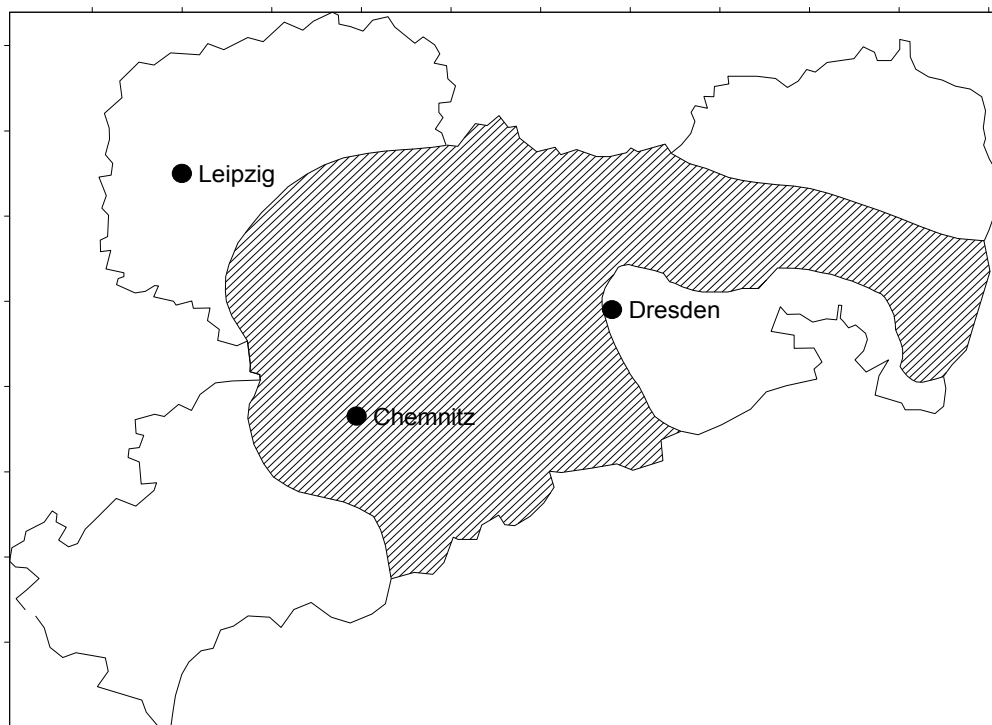


Abb. 3: Windhöfliche Gebiete in Sachsen (schraffierte Fläche)  
Fig. 3: Regions in Saxony with good wind (hatched areas)

Aus den durchgeführten Untersuchungen zum Windenergiepotential und den vorliegenden Betriebsergebnissen von Windkraftanlagen wurde die in Abb. 3 dargestellten windhöflichen Gebiete in Sachsen ermittelt. In freien Lagen der schraffierten Gebiete kann bei Nutzung moderner WEK (Nabenhöhe 60 m) mit einem Ertrag von mindestens 1500 Vollbenutzungsstunden gerechnet werden. Selbstverständlich existieren auch außerhalb der angegebenen Gebiete geeignete Einzelstandorte.

Die WASP-Rechnungen auf einer Gesamtfläche von etwa 12000 km<sup>2</sup> führten zu einer windhöflichen Fläche von 976 km<sup>2</sup>. Das entspricht etwa 5 % der Gesamtfläche Sachsens. Unter der Voraussetzung der vollständigen Ausnutzung (d.h. Belegung in einem 250 m x 250 m Raster) der ermittelten windhöflichen Gebiete wurde das resultierende Gesamtpotential Sachsens - einschließlich der Schätzung für das Erzgebirge und anderer nicht berechneter windhöflicher Gebiete - zu etwas weniger als 20 TWh/a bestimmt. Mit jeweils 50 % Abschlag für konkurrierende Landnutzung (windhöfliche Stellen, an denen Windkraftanlagen wegen anderer Flächennutzung nicht aufgestellt werden können) und Bebauungsdichte (Berücksichtigung raumplanerischer Gesichtspunkte; Begrenzung der Aufstellungsdichte) kann ein realistisches technische Potential auf etwa 5 TWh/a geschätzt werden.

## 5. Nutzung der Potentiale

Seit 1992 vollzieht sich in Sachsen eine rasche Entwicklung auf dem Gebiet der Windenergienutzung. Die durchgeführten Windpotentialuntersuchungen waren dabei ebenso wichtig wie die laufenden Bundes- bzw. Landesförderungen. In Sachsen waren Ende 1996 159 Anlagen mit einer installierten Leistung von etwa 70 MW am Netz, etwa die Hälfte der Leistung ging erst 1996 in Betrieb. Im Jahr 1996 wurde eine Energiemenge von etwa 70 GWh erzeugt. Die Erträge der einzelnen Anlagen spiegeln direkt die lokalen Windverhältnisse wider und können zur Verifikation der ermittelten Potentiale genutzt werden. Voraussetzung ist hierbei, daß keine maschinenbedingten Stillstandszeiten aufgetreten sind.

An den besten Standorten (Region Sayda im Erzgebirge, Laucha in der Oberlausitz) wurden im - allerdings extrem windschwachen - Jahr 1996 Erträge von über 1800 Vollaststunden erzielt. In mittleren Windjahren kann für die derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen im Mittel mit 1500-1600 Vollaststunden gerechnet werden. Allerdings werden auch Anlagen an ungeeigneten Standorten (weniger als 1000 Vollaststunden) betrieben. Dies unterstreicht deutlich die Notwendigkeit qualifizierter Standortbegutachtungen in orographisch komplexen Gelände. Angesichts der oben beschriebenen methodischen Schwierigkeiten kann die systematische Auswertung der Betriebsergebnisse der laufenden Anlagen eine wichtige Hilfe bei der Präzisierung der verfügbaren Windenergiepotentiale werden.

## 6. Literatur

- [1] RINDELHARDT, U.; MÜLLER, H.: Wind- und Wasserkraft in Sachsen. Neue Energie 1 (1991) 136.
  - [2] Windenergienutzung im Freistaat Sachsen, Windmeßprogramm Sachsen, (Abschlußbericht), Hrg.: Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, Dresden 1994.  
Windenergienutzung im Freistaat Sachsen, Windmeßprogramm Sachsen, Teil II (Abschlußbericht), Hrg.: Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, Dresden 1996.
  - [3] HIRSCH, W.; RINDELHARDT, U.; BRÜNIG, D.: Windpotentiale in Sachsen. Forschungszentrum Rossendorf 1997.
  - [4] DWD: Winddaten für Windenergienutzer, Offenbach 1996.
  - [5] TROEN, I.; PETERSEN, E.L.: European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark 1990.
  - [6] HIRSCH, W. u.a.: Untersuchungen zur Windenergienutzung in Sachsen. „Terratec '94“ 8. bis 12. März 1994 Leipzig, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig 1994.
  - [7] BROMEIS, M.; u.a.: Räumliche Interpolation von Basisstationsdaten des Europäischen Windatlas. 3. Deutsche Windenergiekonferenz 23./24.10.96 Deutsches Windenergie-Institut Wilhelmshaven 1996.
  - [8] SCHLÜNZEN, H.; SCHATZMANN, M.: Atmosphärische Mesoscale Modelle - Ein Überblick. G.M.L. Wittenborn Söhne, Hamburg 1984.
  - [9] ADRIAN, G.: persönlicher Hinweis
  - [10] HIRSCH, W.; RINDELHARDT, U.; TETZLAFF, G.: The Saxon Wind Energy Resources: Comparison of WASP and KAMM Results. 1996 European Union Wind Energy Conference and Exhibition, 20-24 May 1996, Göteborg, Sweden.
  - [11] MENGELKAMP, H.-T., u.a.: Bestimmung des Windenergiepotentials über komplexem Gelände. Deutsche Windenergie-Konferenz 1992, Wilhelmshaven 28. bis 29. Okt. 1992.
  - [12] MÜLLER, R.: Untersuchungen zur Windpotentialbestimmung in gegliedertem Gelände. Diplomarbeit Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, 1996.
  - [13] Windpotentialstudie Sachsen-Anhalt, Ministerium für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt, Magdeburg 1996.
-