

Schlussbericht November 2002

Standortabklärung und Messung Leichtwindanlage

ausgearbeitet durch
Ueli Spalinger
Aventa AG
Zürcherstrasse 58
8406 Winterthur

0 Zusammenfassung

Die Firma Aventa AG produziert speziell für schweizerische Verhältnisse optimierte Windkraftanlagen. Da diese auf leichte und variable Winde optimiert sind, werden sie unter dem geschützten Markennamen **Leichtwindanlagen**[®] vertrieben.

Um die Leistungsfähigkeit der Leichtwindanlage AV-7 (12.8 m Rotordurchmesser, 6.4 kW Leistung) zu verifizieren, wurde über den Zeitraum vom Juli 2001 bis April 2002 die Leistungskennlinie einer AV-7 in Brütten (Nähe Winterthur) vermessen. Für diese Messungen wurde im Abstand von 18 m von der Windanlage ein Windmessmast, bestückt mit einem Ultraschallwindmesser, zwei Schalenkreuz- Anemometern sowie einem Windrichtungssensor, aufgestellt.

Zusätzlich wurden das Anlaufverhalten, die Windnachführung und die Pitchregelung beurteilt.

Auf der Basis der vermessenen Leistungskennlinie wurde die Energieproduktion für verschiedene Windstandorte hochgerechnet und daraus die Energiegestehungskosten bestimmt.

Die vermessene Leistungskennlinie entspricht gut der berechneten Leistungskennlinie. Das Anlaufverhalten entspricht ebenfalls den Erwartungen. Die Windnachführung wurde im Laufe des Messprojektes empirisch optimiert. Die Pitchregelung ist im Bereich der Leistungsbegrenzung noch nicht optimal. Es ist deshalb vorgesehen, im Rahmen einer Semesterarbeit an der ETH den Regelalgorithmus weiter zu verbessern.

Die Stromgestehungskosten liegen im Bereich vom 49 Rp./kWh bis 91 Rp./kWh bei mittleren Windgeschwindigkeiten von 4,5 m/s resp. 3,0 m/s (Betrachtungshorizont 20 Jahre). Im Vergleich zu Grossanlagen ist der Stromgestehungspreis der Leichtwindanlage AV-7 nicht konkurrenzfähig. Dies liegt daran, dass Windkraftanlagen bei zunehmender Grösse relativ günstiger werden (economy of scale) und Leichtwindanlagen an Standorten stehen, wo das Windangebot begrenzt ist. Berücksichtigt man aber die Nähe zum Stromkunden und den Landschaftsschutzaspekt, so rechtfertigt sich der Strompreis, liegt er doch bei mittleren Windgeschwindigkeiten ab 3.0 m/s bereits unter demjenigen von Solaranlagen.

1 Abstract / Résumé

1.1 *Englisch*

Aventa Ltd. produces wind turbines which are specially designed for Swiss conditions and similar regions. We call them Low Wind Turbines or Light Wind Turbines. Aventa Low Wind Turbines are characterized by three main features

- They exploit also light and variable winds (by means of a large rotor, variable speed, variable pitch, active yaw control).
- They fit into the landscape of small scale and also densely populated countries (due to limited tower height).
- They can be installed close to buildings (due to the very low noise level).

To verify the performance of the low wind turbine AV-7 (12,8 m rotor diameter, 6,4 kW rated output AC, 18 m hub height) the power curve has been measured on a site in Brütten (near Winterthur) over the period from July 2001 to April 2002. To this end a special mast was erected near the wind turbine on which three wind velocity instruments and a wind vane were mounted.

Additionally start-up behaviour, yaw control and pitch control were examined.

Based on the measured power curve the energy production and the costs per kilowatthour for several different sites have been calculated.

The measured power curve corresponds well with the predicted calculated power curve. The start-up behaviour is within expectations. The active yaw control was improved based on the data gained by the measurements and now works well. Pitch control is not optimal as yet. It is planned to improve the control algorithm with the assistance of the ETH (Federal Institute of Technology in Zurich).

The price per kilowatthour produced by an AV-7 varies from 49 Rp to 91 Rp in relation to the mean annual wind speed ranging between 4,5 m/s and 3,0 m/s respectively. Compared with the prices of power produced by large wind turbines an AV-7 is not competitive. This is due to two factors: (1) economy of scale making a large wind turbine specifically less expensive and (2) the fact that the output of a wind turbine is very strongly dependent on wind speed and therefore the energy production of a low wind turbine is limited. Taking into consideration aspects of environmental protection and the fact that low wind turbines are producing clean energy next to the consumers the kilowatthour price looks different. For sites with mean annual wind speeds of 3,0 m/s or higher it also compares favourably with the kilowatthour price of photovoltaic plants.

1.2 *Französisch*

La société Aventa SA est le seul fabricant suisse d'éoliennes pour vents faibles (Leichtwindanlagen). Les éoliennes Aventa sont optimisées pour des vents faibles et variables. Leicht-windanlagen est une marque enregistrée.

Avec le but de vérifier le rendement de l'éolienne pour vents faibles AV-7 (diamètre du rotor: 12,8 m, puissance nominale (courant alternatif): 6,2 kW) nous avons mesuré la courbe de puissance entre Juillet 2001 et Avril 2002. Pour ces mesures un mât de mesure de vent avec une anémomètre ultrason, deux Schalenkreuz-anémomètre et une sonde de direction du vent a été installé à 18 m de l'éolienne pour vents faibles.

En plus, nous avons vérifié la vitesse de démarrage, l'ajustement actif à la direction du vent, le contrôle à calage variable de pale et la qualité de l'énergie raccordée au réseau.

Au niveau du résultat de la mesure de la courbe de puissance nous avons estimé le rendement de l'éolienne pour vents faibles pour des sites divers et les prix de revient correspondants.

La courbe de puissance vérifiée correspond bien avec la courbe de puissance estimée. La vitesse de démarrage se montre comme prévue. Au cours du projet l'ajustement actif à la direction du vent a été mis au point. Le contrôle à calage variable de pale n'est pas encore parfait au niveau de la limitation de performance. Il est prévu d'améliorer l'algorithme de réglage au cours d'un travail de semestre à l'ETH Zurich.

Les prix de revient s'élèvent à CHF 0.49 – CHF 0.91/kWh pour des vitesses moyennes annuelles du vent de 4,5 m/s et de 3,0 m/s. Comparé aux grandes éoliennes traditionnelles le prix de revient est 'hors concours. La raison est que le prix de revient par kWh diminue avec la dimension croissante de l'éolienne. Compte tenu de la production de l'énergie proche du consommateur et du fait que les éoliennes pour vents faibles s'intègrent parfaitement dans des paysages compartimentés et assez densément habités, le prix de revient plus élevé est justifié. D'ailleurs il est nettement au-dessous du prix de revient de l'énergie solaire pour des vitesses moyennes annuelles du vent au-dessus de 3 m/s.

2 Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	1
1	Abstract / Résumé	2
1.1	<i>Englisch</i>	2
1.2	<i>Französisch</i>	3
2	Inhaltsverzeichnis.....	4
3	Ausgangslage	5
4	Ziel der Arbeit.....	5
5	Lösungsweg	6
6	Hauptereignisse	7
7	Messdatenerfassung	7
8	Ergebnisse.....	8
8.1	<i>Leistungskennlinie</i>	8
8.2	<i>Energielieferung während eines Jahres</i>	9
8.3	<i>Energieerträge nach Windklassen</i>	10
8.4	<i>Anlaufverhalten</i>	11
8.5	<i>Windnachführung</i>	11
8.6	<i>Pitcheinstellung</i>	11
9	Stromgestehungskosten	12
10	Verbesserungspotentiale	13
10.1	<i>Leistungsanpassung bei grösseren Höhen</i>	13
10.2	<i>Vereisung</i>	13
11	Ausblick.....	14
12	Symbolverzeichnis	14
13	Literaturverzeichnis.....	14
Anhang		15
A.1	<i>Messstellenliste</i>	15
A.2	<i>Speicherstellenliste</i>	16
A.3	<i>Messanordnung</i>	17
A.4	<i>Leistungsmessgerät</i>	18
A.5	<i>Leistungskurve AV-7</i>	19
A.6	<i>Leistungskurve AV-7 – Vergleich Schalenkreuz-Anemometer mit Ultraschallwindmesser</i>	20
A.7	<i>Leistungskurve AV-7 – Vergleich ausgewählte Sektoren mit allen Sektoren</i>	21

3 Ausgangslage

Die heute am Markt erhältlichen Windenergieanlagen wurden für Küstengebiete mit mittleren Windgeschwindigkeiten von > 5.0 m/s entwickelt. In der Schweiz finden sich nur wenige potentielle Standorte, an denen die Windverhältnisse mit denen der Küstenregionen vergleichbar sind. Da sich diese Standorte ausschliesslich in höheren Lagen befinden, sind sie häufig landschaftsschützerisch kritisch und schlecht erschliessbar. Die Nutzung von Küstenanlagen im Binnenland bei Standorten mit mittleren Windgeschwindigkeiten unter 4.5 m/s ist zwar möglich, führt aber zu geringen Energieerträgen und dadurch hohen Stromgestehungskosten.

Durch ein auf Binnenlandstandorte angepasstes Anlagekonzept, Leichtwindkonzept genannt, ist es möglich, auch in schwachen Windgebieten wie z.B dem schweizerischen Mittelland, Windstrom zu attraktiven Gestehungskosten zu produzieren. Neben Photovoltaikanlagen und Kleinwasserkraftwerken steht damit eine weitere Möglichkeit zur Produktion von Oekostrom nahe beim Kunden zur Verfügung. Durch Anpassung der Grösse der Windkraftanlage an das bestehende Landschafts- und Siedlungsbild wird zudem dem Landschaftsschutz so weit als möglich Rechnung getragen.

1997 wurde von drei Ingenieurbüros die Arbeitsgemeinschaft Aventa gegründet mit dem Ziel, eine Leichtwindanlage zu entwickeln und eine breite Markteinführung anzustreben. Im Zielkonflikt günstige Stromgestehungskosten (->möglichst grosse Anlagen) und Landschaftsschutz wurde die AV-7 definiert, eine Leichtwindanlage mit $6,4$ kW Leistung, 12.8 m Rotordurchmesser und 18 m Masthöhe.

Im Februar 2000 wurde dann die Aventa AG mit Sitz in Winterthur gegründet. Zwei Monate später konnte der erste Prototyp der AV7-7 in Oberhelfenschwil SG ans Netz geschaltet werden. Um die Leistungsfähigkeit der Leichtwindanlage AV-7 nachzuweisen, wurde im April 1999, basierend auf einer Voranfrage vom November 1997, beim BfE ein Gesuch gestellt, die Leistungskennlinie zu vermessen. Dem Gesuch wurde am 9. Juni 1999 entsprochen.

4 Ziel der Arbeit

Für das vorliegende Projekt wurden folgende Ziele definiert :

- Erfassen der Leistungskennlinie der Leichtwindanlage AV-7
- Demonstration der Leistungsfähigkeit von Leichtwindanlagen
- Verifizieren der Berechnungen durch Messungen
- Verbesserungsmöglichkeiten.

5 Lösungsweg

Ursprünglich war vorgesehen, den ersten Prototypen der Leichtwindanlage AV-7 in Oberhelfenschwil SG zu vermessen. Die ersten Betriebserfahrungen zeigten jedoch, dass der Standort, obwohl auf über 900 müM gelegen, für eine Leistungskennlinienvermessung ungeeignet ist. Deshalb wurde beschlossen, den zweiten Prototypen der Leichtwindanlage AV-7, der im April 2001 in Brütten ZH installiert wurde, zu vermessen. Der Standort wurde von der Firma Interwind AG begutachtet, dabei wurden unter Berücksichtigung des Geländes und der Position des Windmessers zwei Messsektoren definiert :

- Sektor I 135° - 170°, typische Eigenschaften der Rauigkeitsklasse 2, mit einer geschätzten Rauigkeitslänge von z_0 von 0.15
- Sektor II 220° - 260°, bis etwa 300 m von der Windanlage entfernt typische Eigenschaften der Rauigkeitsklasse 2, mit einer geschätzten Rauigkeitslänge von z_0 von 0.15. Danach wechselt die Klasse abrupt nach Rauigkeitsklasse 3, mit einer geschätzten Rauigkeitslänge von z_0 von 0.50 oder mehr.



Im Juni 2001 wurde ein Windmessmast westlich der Windkraftanlage aufgestellt und mit Windsensoren bestückt (vergleiche Kapitel 7, Messdatenerfassung).

Vom 26. Juni 01 bis 23. April 02 war die Messeinrichtung in Betrieb. Jede Sekunde wurden die Messwerte erhoben, vor Ort in Minutenmittelwerte gemittelt und auf einer Memory Card gespeichert. Etwa alle drei Wochen wurde die Karte ausgelesen. Die Messwerte wurden im Büro in 10-Minutenmittel umgerechnet.

Die Messeinrichtung lief ohne technische Störung. Einmal wurde vergessen, das Schnittstellenkabel anzuschliessen, was zu einem Datenverlust von 22 Tagen führte. Während ca. 3 Wochen fiel ein Anemometer wegen Vereisung aus.

Abbildung 1 : Leichtwindanlage AV-7 mit Messmast

6 Hauptereignisse

08.05.01	Inbetriebnahme der AV-7 in Brütten (2. Prototyp)
24.06.01	Inbetriebnahme der Messeinrichtung für das BfE Messprojekt
ab 20.07.01	Daten in der Schlussauswertung berücksichtigt
06.10.01	Ausfall der Windanlage wegen eines Generatorkurzschlusses
06.11.01	Wiederinbetriebnahme der Windanlage nach Neuwicklung des Generators
23.04.02	Abbau der Messeinrichtung

7 Messdatenerfassung

Auf dem Messmast wurde in Nabenhöhe (18 m) die Windgeschwindigkeit mit einem Ultraschall-Windmesser und einem geeichten Schalenkreuz- Anemometer gemessen. Dabei zeigte sich, dass der Ultraschall- Windmesser eine im Schnitt um 0.27 m/s geringere Windgeschwindigkeit mass. Obwohl die Ultraschall- Windmesser als genauer gelten, entschlossen wir uns, als Basis für die Leistungskurve das geeichte Schalenkreuz- Anemometer zu verwenden. Dieser Typ Anemometer wird von uns standardmässig für Windmessungen eingesetzt, zudem war die Relation zum Schalenkreuz- Anemometer des selben Typs, das auf 12 m Höhe montiert war, plausibel.

Die Messdatenerfassung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Die eingesetzten Geräte sind in der Messstellenliste im Anhang A.1 aufgelistet. Im Anhang A.2 befindet sich die Speicherstellenliste Die räumliche Messanordnung ist Anhang A.3 dargestellt. Die technischen Daten des Leistungsmessgerätes finden Sie im Anhang A.4.

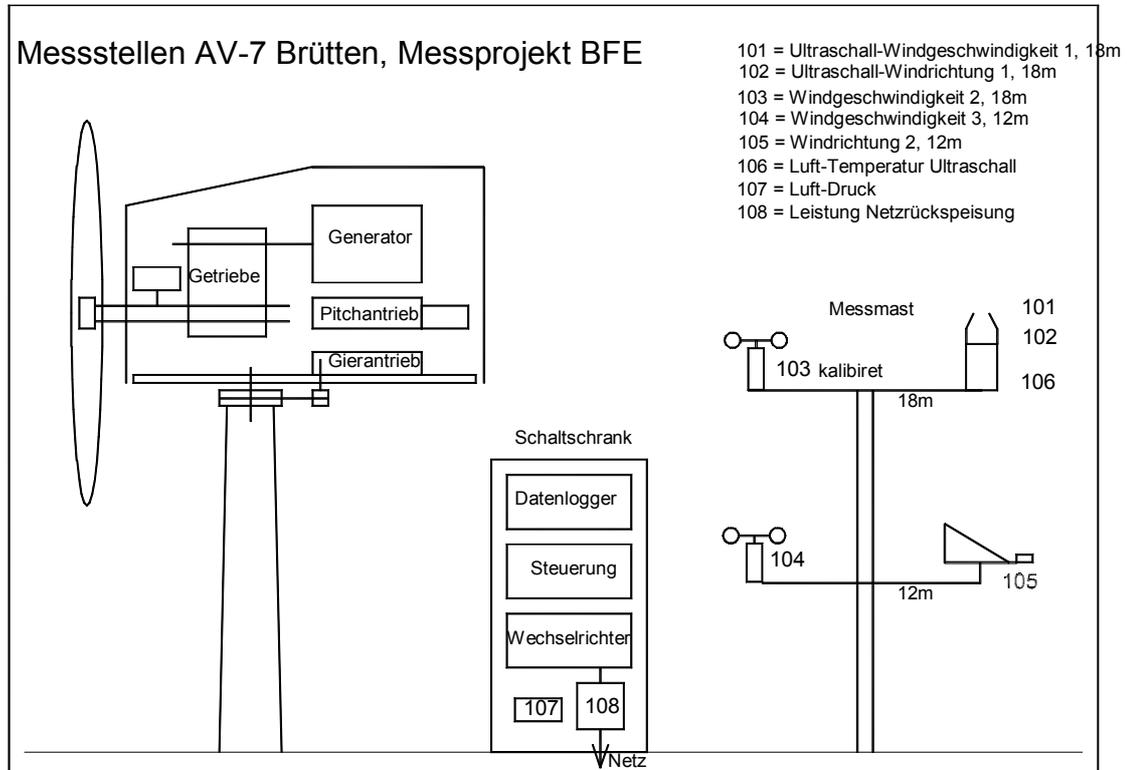


Abbildung 2 : Messdatenerfassung

8 Ergebnisse

8.1 Leistungskennlinie

Die Leistungskennlinie wurde nach der IEC Norm 61 400-12 „Wind turbine generator systems – Part 12: Wind turbine power performance testing“ (1) vermessen.

Als Basis für die Vermessung der Leistungskennlinie wurde ein Schalenkreuz- Anemometer (Typ 4.3519.00 von Thies), geeicht durch das DEWI, verwendet. Der auf gleicher Höhe montierte Ultraschall- Windmesser (Typ 4.3800.00 von Thies) mass im Schnitt 0.27 m/s weniger. Die Leistungskurve auf Basis des Ultraschall- Windmessers ist demnach deutlich besser (vergleiche Anhang A6), wurde aber aus den in Kapitel 7 (Messdatenerfassung) beschriebenen Gründen nicht verwendet.

Die Messungen basiert auf folgenden Grundlagen :

Kriterium	Bedingung	Begründung
Anemometer	Thies Opto	geeicht durch das DEWI
Betriebszustand	0 oder 1	AV-7 betriebsbereit, keine Störung
Sektoren	135°-170° und 220°-260°	zulässige Sektoren gemäss IEC Norm 61 400-12
Aussentemperatur	>=4°C	Vereisungsgefahr unter 4°C, mögliche Störungen des montierte Ultraschall- Windmesser über 25°C
v-ultra/ v-opto	0.78 – 1.00	Messwerte mit Vereisung respektive Störungen vermeiden

Tabelle 1

Im Zeitraum vom 20.07.01 bis zum 23.04.02 konnten 6'797 10-Minutenmittel ausgewertet werden. Dies entspricht einer Messdauer von 1'133 h. Die Datenbasis ist somit sehr gut.

Die Übereinstimmung der in der aerodynamischen Auslegung der AV-7 berechneten mit der gemessenen Leistungskennlinie ist als gut zu bezeichnen. Die flachere gemessene Kurve im Bereich von 5 bis 7 m/s Windgeschwindigkeit ist auf die Leistungsbeschränkung ab 6 m/s zurückzuführen, was bei der langen Mittlungszeit von 10 Minuten zum entsprechenden Bild führt. Für die zukünftige Energieertragsberechnung ist dieser Effekt jedoch zu berücksichtigen. Die vermessene Leistungskennlinie ist nur bis 12 m/s Windgeschwindigkeit angegeben, da darüber die Datenbasis ungenügend ist. Die IEC Norm 61 400-12 fordert die Angabe der Leistungskennlinie in unserem Fall bis zu 9 m/s Windgeschwindigkeit.

Die effektiv gemessene Leistungskurve auf 610 müM lag, infolge der weniger dichten Luft, bei 95% der Leistungskurve bei ISO Standard-Atmosphäre. Die Faustregel von 1% Leistungsverlust pro 100 m Höhe bestätigt sich somit.

Die vermessene Leistungskennlinie ist in der Abbildung 3 dargestellt. Eine Tabelle der Resultate befindet sich im Anhang A5.

10 Minuten Mittel, normiert auf ISO Standardatmosphäre

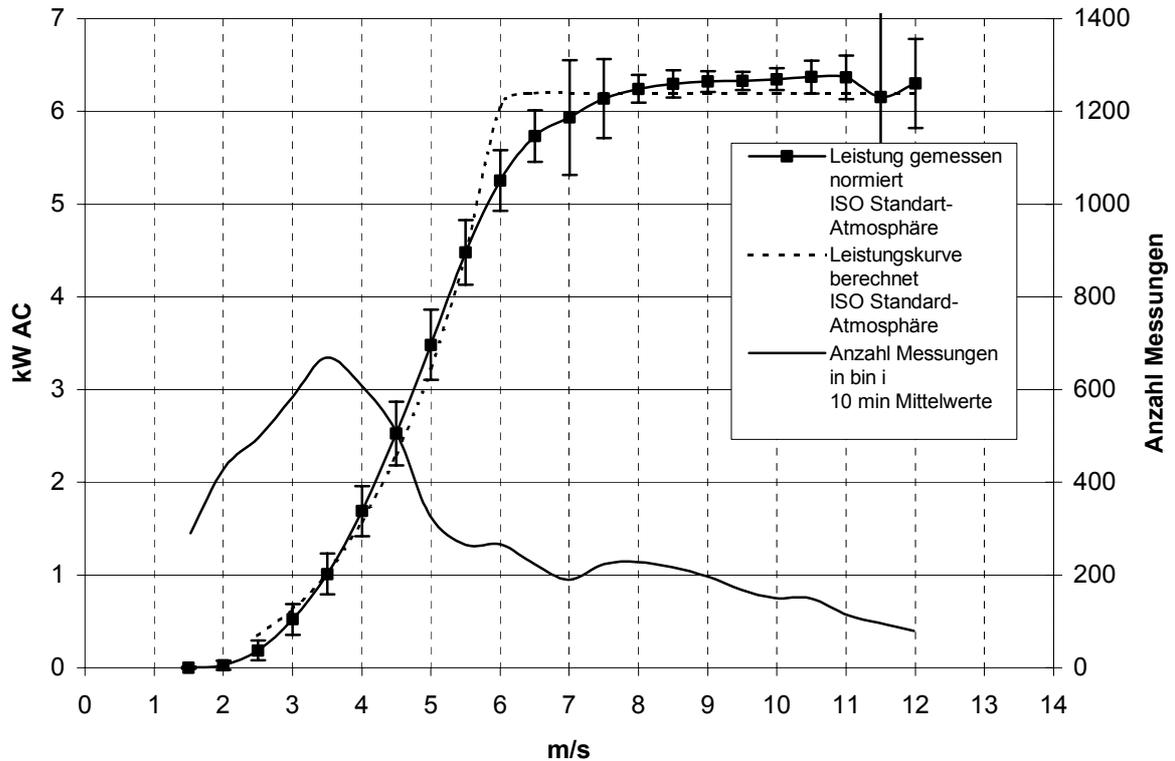


Abbildung 3 : Leistungskennlinie AV-7

Eine Auswertung über alle Sektoren ergab keine markant andere Leistungskurve bei einer leicht höheren Turbulenzintensität von 0,20 (vergleiche Anhang A7). Dies zeigt, dass die AV-7 den variablen Winden gut zu folgen vermag. Für die Betrachtungen der folgenden Kapitel wurde auf Grund der breiteren Datenbasis von den Messungen über alle Sektoren ausgegangen.

8.2 Energielieferung während eines Jahres, Volllaststunden, Capacity Factor

Im ersten Betriebsjahr vom 07.04.01 bis zum 01.04.02 lieferte die Leichtwindanlage AV-7 in Brütten 10'539 kWh. Zu berücksichtigen ist, dass die Verfügbarkeit der Anlage nur ca. 85% war. Insbesondere führte ein Generator-Kurzschluss zu einem Betriebsunterbruch während des ganzen Oktobers 2001, zudem traten Probleme mit dem Sensor der Drehzahlmessung auf und die Anlage war für Tests und Vorführungen zum Teil abgestellt. Bei 100 % Verfügbarkeit dürfte die Anlage den prognostizierten Ertrag von 12'000 kWh gut erreichen, dies bei einer geschätzten mittleren Windgeschwindigkeit von 3,03 m/s.

Die produzierten 10'539 kWh im ersten Betriebsjahr entsprechen 1'647 Volllaststunden, was einem Capacity Factor von 0,19 entspricht. Bei 98% Verfügbarkeit wären 1'838 Volllaststunden und ein Capacity Factor von 0,21 erreicht worden.

In der Messperiode vom 20.07.01 bis zum 23.04.02 konnten über alle Sektoren 4'133 h Messungen ausgewertet werden. Die AV-7 produzierte in dieser Zeit bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,43 m/s (Weibullfaktoren $A = 3,79$, $k = 1,49$) 6'666 kWh Elektrizität. Auf ein Jahr mit 8'760 h hochgerechnet ergibt dies 14'129 kWh oder 2'207 Volllaststunden resp. einen Capacity Factor von 0,25.

Rechnerisch ergeben sich mit der vermessenen Leistungskennlinie folgende Energieerträge für verschiedene mittlere Windgeschwindigkeiten, normiert auf ISO Standardatmosphäre und mit einem k-Faktor der Weibull- Verteilung von 1.5 :

bei mittlerer Jahreswindgeschwindigkeit von	2,5 m/s	8'600 kWh/a
	3,0 m/s	12'700 kWh/a
	3,5 m/s	16'700 kWh/a
	4,0 m/s	20'300 kWh/a
	4,5 m/s	23'400 kWh/a

8.3 Energieerträge nach Windklassen

Die Abbildung 4 zeigt die Energieerträge, aufgeteilt in die einzelnen Windklassen.

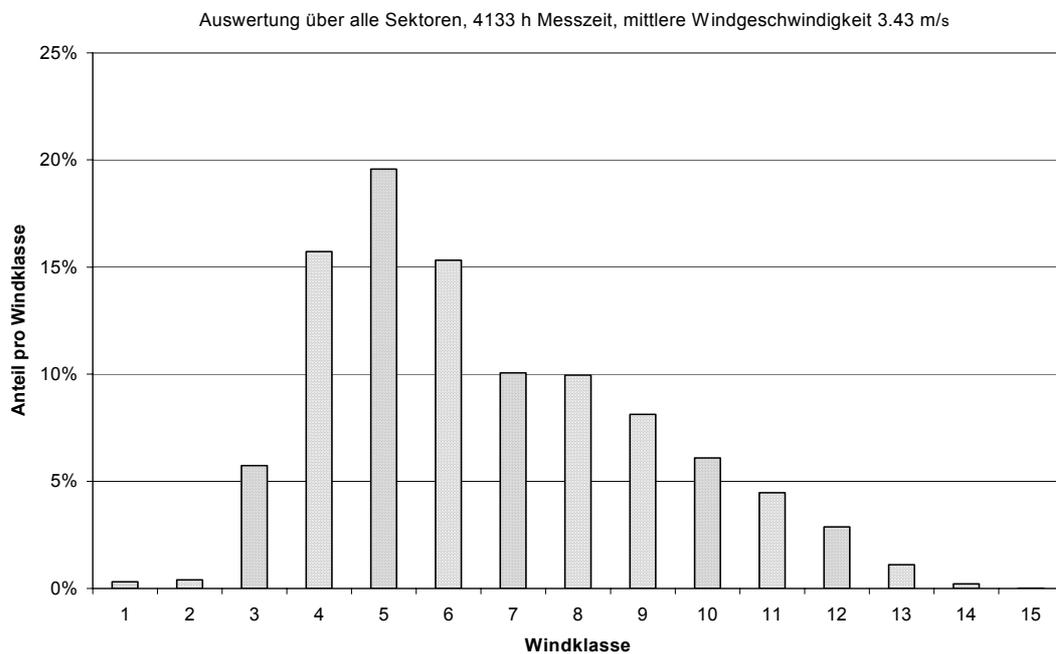


Abbildung 4 : Anteil Energieerträge pro Windklasse

8.4 Anlaufverhalten

Die für das Anlaufverhalten der AV-7 relevanten Parameter wurden empirisch optimiert. Es ist aus der Leistungskurve ersichtlich, dass die Leichtwindanlage AV-7 bereits bei Windklasse 2 Energie produziert. Dies führt zu hohen Betriebszeiten, was von der Bevölkerung sehr positiv aufgenommen wird. Der untenstehende Zeitschrieb (Abbildung 5) zeigt eine typische Schwachwindphase über 15 h mit Windgeschwindigkeiten um die 2 m/s, in der die Anlage zum Teil steht und anläuft. Das Anlaufverhalten entspricht den Erwartungen.

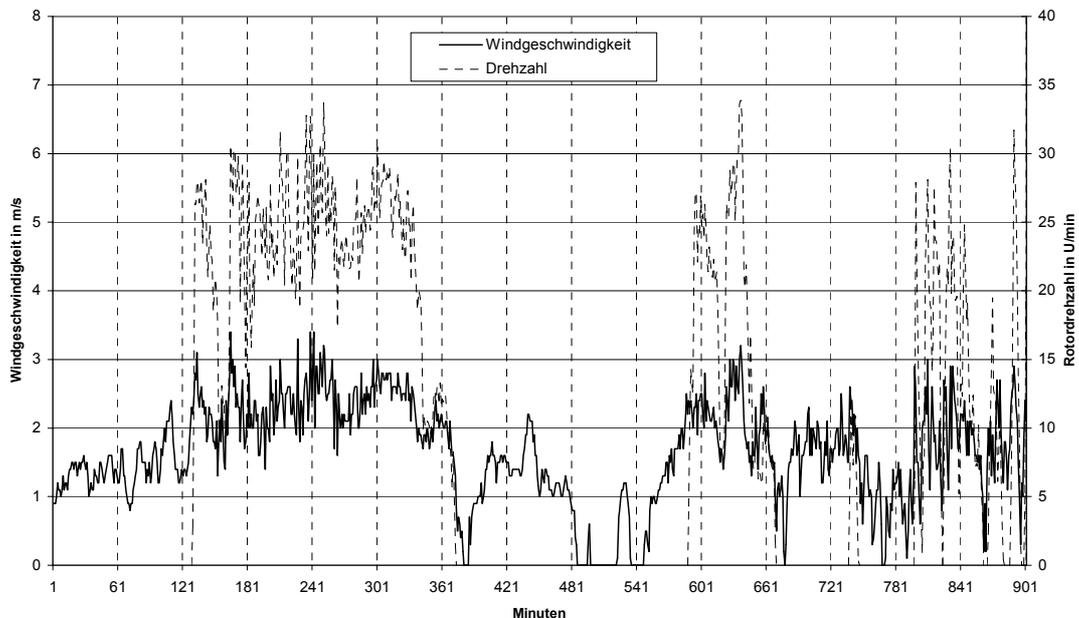


Abbildung 5 : Zeitschrieb Drehzahl der AV-7 und Windgeschwindigkeit

8.5 Windnachführung

Der Algorithmus für die Windnachführung wurde empirisch in den ersten 3 Betriebsmonaten optimiert und hat sich seither gut bewährt. Der Algorithmus richtet die Anlage nach der Windrichtung mit dem grössten Energieinhalt aus, der Nachführrythmus ist dabei abhängig von der Windstärke und der gemessenen Abweichung. Genauere Angaben können aus Urheberrechtsgründen nicht gemacht werden.

8.6 Pitcheinstellung

Die Pitcheinstellung entspricht den Planungswerten. Das Regelverhalten der Anlage im Regelbereich erfüllt die Erwartungen noch nicht ganz. Die Drehzahlschwankungen sind mit ca. 2 U/min noch zu hoch, führt dies doch zu unnötigen Lastschwankungen an den Flügeln. Verschiedene Versuche brachten bisher keine Verbesserung. Es ist vorgesehen, den Regelalgorithmus im Rahmen einer Semesterarbeit an der ETH weiter zu verbessern.

9 Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten wurden unter folgenden Annahmen berechnet :

Investitionskosten schlüsselfertig	127'000.-	CHF
Amortisationszeit	20	Jahre
Zinssatz	4	%
Annuitätsfaktor	0.074	
Unterhalt	2000.-	CHF/a
Verfügbarkeit	98	%
Jahreskosten	11'345.-	CHF/a

Daraus ergeben sich folgende Stromgestehungskosten für Leichtwindanlage AV-7 :

vm m/s	Energieertrag ¹⁾ kWh/a	Energiekosten Rp/kWh
2,5	8'430	135
3,0	12'450	91
3,5	16'370	69
4,0	19'890	57
4,5	22'930	49

¹⁾ nomiert auf ISO Standardatmosphäre mit einem k-Faktor von der Weibull- Verteilung von 1.5

Im Vergleich zu Grossanlagen ist der Stromgestehungspreis der Leichtwindanlage AV-7 nicht konkurrenzfähig. Dies liegt daran, dass Windkraftanlagen bei zunehmender Grösse relativ günstiger werden (economy of scale) und Leichtwindanlagen an Standorten stehen, wo das Windangebot begrenzt ist.

Berücksichtigt man aber die Nähe zum Stromkunden und den Landschaftsschutzaspekt, so rechtfertigt sich der Strompreis, liegt er doch bei mittleren Windgeschwindigkeiten ab 3,0 m/s bereits unter demjenigen von Solaranlagen.

10 Verbesserungspotentiale

10.1 Leistungsanpassung bei grösseren Höhen

Die möglichen Standorte für Leichtwindanlagen in der Schweiz liegen auf Höhen von 400 müM im schweizerischen Mittelland bis über 2500 müM in den Alpen. Bereits auf 400 müM ist mit einer Leistungseinbusse infolge weniger dichter Luft von 4% gegenüber der ISO Standard-Atmosphäre zu rechnen. Da die weniger dichte Luft aber auch geringere Kräfte auf die Anlage ausübt, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, den Leistungsverlust zu kompensieren.

Für Höhen bis zu ca. 1000 müM liegt die Lösung in der Anhebung der Nenndrehzahl um 3 % von 64 U/min auf 66 U/min und einer Anpassung der Belastungskurve der Anlage (was dank dem Konzept der variablen Drehzahl bei der Leichtwindanlage AV-7 problemlos möglich ist). Die Nenndrehzahl ist allerdings limitiert durch die Eigenfrequenz des Mastes, so dass an der vermessenen Anlage keine Anpassung mehr möglich war. Die Erkenntnis ist jedoch bereits in die erste Serie eingeflossen (steifere Masten).

Für Höhen über 1000 müM ist eine Lösung in Bearbeitung, bei der durch eine Kombination von längeren Flügelspitzen und höherer Nenndrehzahl die Leistungseinbusse kompensiert werden soll.

10.2 Vereisung

Die Windmesssensoren haben sich als sehr empfindlich auf Vereisung erwiesen. Es gab während der Messperiode Zustände, bei denen einer der zwei für die Messung eingesetzten Schalenkreuz-Anemometer über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen festgefroren war (es handelte sich dabei ausgerechnet um den geeichten Windmesser, der für die Leistungsmessung verwendet wurde, so dass während dem entsprechenden Zeitraum keine Daten ausgewertet werden konnten). Interessant ist die Tatsache, dass das andere Anemometer und das Anemometer auf der AV-7 unter den gleichen Bedingungen keine Probleme zeigten. Der als Redundanz eingesetzte Ultraschall Windmesser zeigte ebenfalls einzelne Fehlmessungen, allerdings deutlich weniger als das Anemometer.

Die Leichtwindanlage AV-7 benötigt heute für den Betrieb ein Anemometer sowie eine Windfahne. Vereisen die Messgeräte, wird eine Störung dedektiert und die Anlage stellt ab, obwohl technisch eigentlich nicht notwendig. Dadurch entsteht ein unnötiger Produktionsausfall. Die gemachten Beobachtungen führten zu einem Konzept, das den Windmesser überflüssig macht. Eine eingefrorene Windfahne wird von der Software erkannt und führt zu einem anderen Algorithmus für die Nachführung, die Anlage bleibt in Betrieb.

Ernsthafte Vereisung der Flügel wurde bisher an keinem der beiden Prototypen der AV-7 beobachtet (Prototyp 1 in Oberhelfenschwil auf 900 müM, zwei Winter, Prototyp 2 in Brütten, 610 müM, ein Winter).

11 Ausblick

Zur Zeit (Dezember 2002) stehen neun Leichtwindanlagen AV-7 im Wind. Die bisherigen Erfahrungen mit der Anlage sind gut. Das Leichtwindkonzept bewährt sich an vielen Standorten mit kleinem Windangebot, wie sie in der Schweiz und an vielen Binnenlandstandorten überall auf der Welt typisch sind. Die Bevölkerung findet Gefallen an den sehr häufig laufenden Leichtwindanlagen in ihrer nächsten Umgebung. Die Geräuschbelastung ist dank Riemengetriebe und niedriger Drehzahl praktisch gleich null. Die Leichtwindanlagen bereichern in den Augen einer grossen Mehrheit das Landschaftsbild.

Das grösste Hemmnis für eine stärkere Verbreitung der Leichtwindanlage AV-7 ist ihr Preis und die daraus entstehenden Stromgestehungskosten. Es sind Bestrebungen im Gange, die Produktionskosten zu senken, viel wird aber bei Kleinserienfertigung nicht mehr möglich sein. Eine deutliche Verbesserung der Energiegestehungskosten ist nur durch deutlich höhere Stückzahlen oder eine grössere Leichtwindanlage möglich. Dabei ist der Zielkonflikt zwischen Anlagengrösse und Landschaftsschutz nicht ausser acht zu lassen.

Ebenfalls diskutiert wird eine Kleinst- Leichtwindanlage mit ca. 1 kW Nennleistung.

12 Symbolverzeichnis

i	Bin
v_i	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe
N_i	Anzahl Messungen in Bin i 10 min Mittelwerte
P_i	Leistung gemessen in Brütten auf 610 müM
Pn_i	Leistung gemessen normiert ISO Standart- Atmosphäre
s_i	Unsicherheit Kategorie A
v-ultra	Windgeschwindigkeit gemessen mit Ultraschall - Windmesser
v-opto	Windgeschwindigkeit gemessen mit Schalenkreuz- Anemometer

13 Literaturverzeichnis

- (1) IEC Norm 61 400-12 „Wind turbine generator systems – Part 12: Wind turbine power performance testing“, erste Ausgabe : 1998-02

Anhang

A.1 Messstellenliste

Erfassung 1-Sek.-Takt
Speicherung 1-Minutenmittel

Messstelle Nr.	Bezeichnung	Abkürzung	Montageort	Sensor-Fabrikat
101	Windgeschwindigkeit Ultraschall, 18m	VUL	18m	Thies Ultrasonic Anemometer 2 D Typ 4.3800.00
102	Windrichtung Ultraschall, 18m	DUL	18m	Thies Ultrasonic Anemometer 2 D Typ 4.3800.00
103	Windgeschwindigkeit Thies Opto 1, 18m	VO1	18m	Thies Schalenkreuz-anemometer Opto Typ 4.3519.00
104	Windgeschwindigkeit Thies Opto 2, 12m	VO2	12m	Thies Schalenkreuz-anemometer Opto Typ 4.3519.00
105	Windrichtung Thies Potentiometer, 12m	DTP	12m	Thies Windfahne Typ 4.3129.00
106	Luft-Temperatur Ultraschall	TAL	12m	Thies Ultrasonic Anemometer 2 D Typ 4.3800.00
107	Luft-Druck	PAL	Schrank Datenlogger	Huba Control
108	Leistung Netzurückspeisung	PNR	Schalttschrank AV-07	ELKO

Tabelle 2

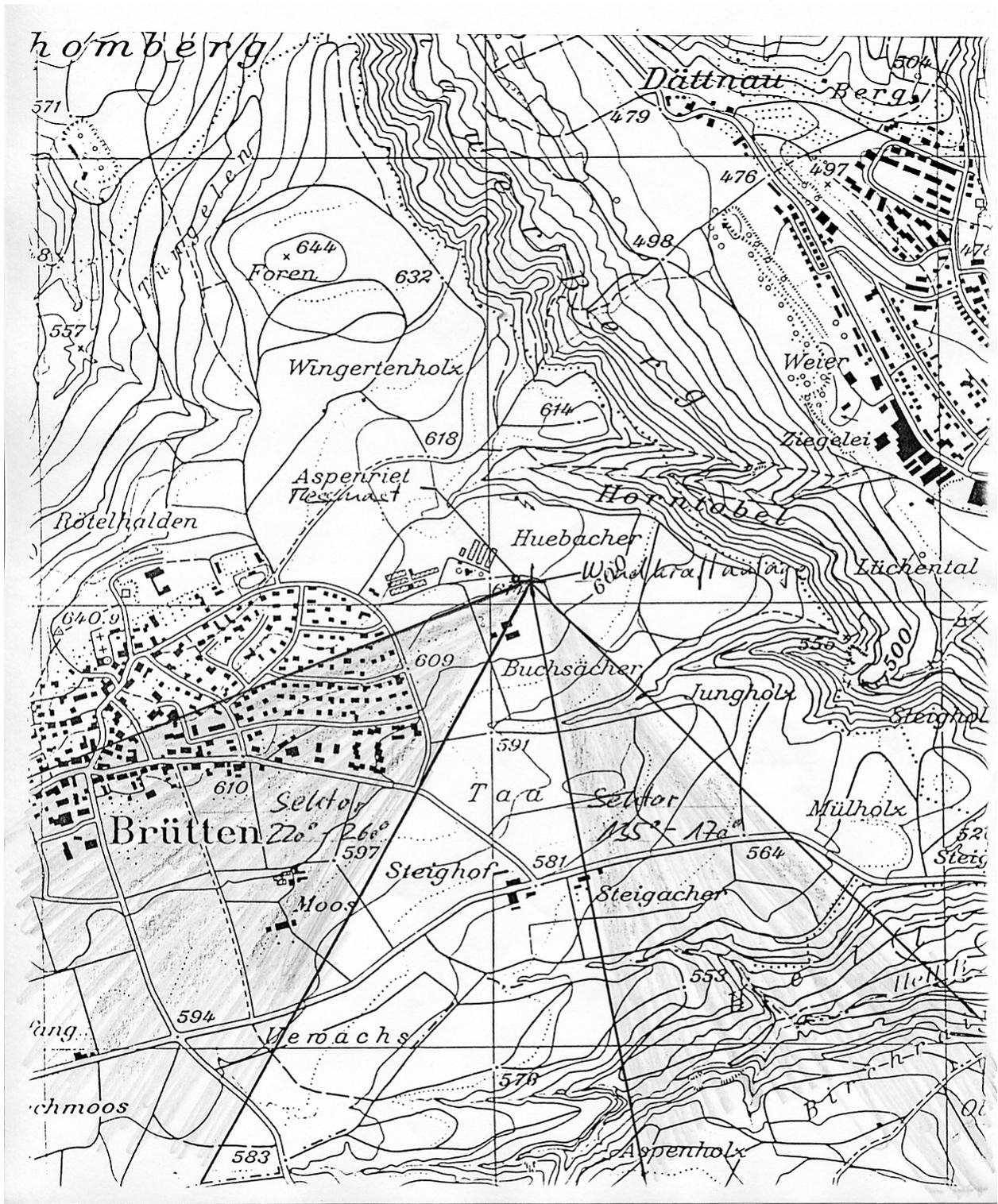
A.2 Speicherstellenliste

Erfassung 1-Sek.-Takt
 Speicherung 1-Minutenmittel (n=60)

Speicherstelle im Datenpaket	Bezeichnung	Format	Messstelle Nr.
1	Datum der Speicherung	dd.mm.yy	
2	Zeitpunkt der Speicherung	h:m:s	
3	Mittlere Windgeschwindigkeit Thies Opto 1, 18m	$(\sum v)/n$	103
4	Mittlere Abweichung Windgeschwindigkeit Thies Opto 1, 18m	$\text{Wurzel}(\frac{n\sum v^2 - (\sum v)^2}{n^2})$	103
5	Minimale Windgeschwindigkeit Thies Opto 1, 18m	$lf < v$	103
6	Maximale Windgeschwindigkeit Thies Opto 1, 18m	$lf > v$	103
7	Mittlere Windgeschwindigkeit Thies Opto 2, 12m	$(\sum v)/n$	104
8	Mittlere Windgeschwindigkeit Ultraschall, 18m	$(\sum v)/n$	101
9	Mittlere Windrichtung Ultraschall, 18m	$\text{Arctg}(\sum \sin; / \sum \cos;)$	102
10	Mittlere Windrichtung Thies Potentiometer, 12m	$\text{Arctg}(\sum \sin\beta / \sum \cos\beta)$	105
11	Mittlere Luft-Temperatur Ultraschall	$(\sum T)/n$	106
12	Mittlerer Luft-Druck	$(\sum p)/n$	107
13	Mittlere Leistung Netzurückspeisung	$(\sum P)/n$	108

Tabelle 3

A.3 Skizze Messanordnung



A.4 Leistungsmessgerät

Messgeräte · Systeme · Anlagen
zur Kontrolle und Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie

Artikel-Nr.	Bezeichnung	Menge
7 70 278	CVM-BD-RED-C420-H Powermeter 4 Quadrant-Powermeter mit Energiemessung Anzeige von 52 Elektrischen Parameter auf 3-zeiligem Display inkl. THD (total harmonic distortion) 2 RS485 Schnittstellen ASCII Protokoll und Modbus 1 Relaisausgang Energie/Alarm 1 Analogausgang 0/4-20mA 3x20...866V Ph-Ph 45..65Hz 3 oder 4 Leiteranschluss für Stromwandleranschluss x/5A Strom-und Spannungswandlerverhältnisse frei Einstellbar (auch Mittelspannung) Hilfsenergie 230 VAC 45..65Hz Sicherheit: EN 61010 CE-Zeichen Genauigkeit: 0.5% Strom und Spannung 1.0% Leistung und Energie EMV: IEC801-2, IEC801-3, IEC801-4 Messeingänge isoliert (keine Shunt) TrueRMS Messung, daher in Netzen mit Oberschwingungen einsetzbar.	1
2 26 202	TA 20 50/5 Stromwandler	3

A.5 Leistungskurve AV-7

Messzeit	von	20.07.01	bis	23.04.02			
Sektor	1	von	135 °	bis	170 °		
Sektor	2	von	220 °	bis	260 °		
Mittelwert	(min)	10					
Windmesser		Thies Schalenkreuzanemometer					
	Typ	4.3519.00.000					
	Serirr.	1000329					
	Eichprotokoll	DEWI No.	111_01				
Bin	Windklassen	Wind- geschwindigkeit in Nabenhöhe	Anzahl Messungen in Bin i 10 min Mittelwerte	Leistung gemessen Brütten 610 müM	Leistung gemessen normiert ISO Standard- Atmosphäre	Unsicherheit Kategorie A	Leistungskurve berechnet ISO Standard- Atmosphäre
i		v _i	N _i	P _i	P _{n i}	s _i	
	m/s	m/s		kW	kW	kW	kW
1	0.5	0.59	31	0.000	0.000	0.000	
2	1	1.03	158	-0.001	-0.001	0.005	
3	1.5	1.53	290	0.000	0.000	0.009	
4	2	2.01	431	0.027	0.027	0.050	
5	2.5	2.50	496	0.188	0.188	0.105	0.345
6	3	3.00	584	0.522	0.522	0.167	0.626
7	3.5	3.49	669	1.011	1.011	0.222	1.026
8	4	4.00	609	1.689	1.689	0.269	1.578
9	4.5	4.50	509	2.528	2.528	0.344	2.299
10	5	4.99	328	3.483	3.483	0.381	3.228
11	5.5	5.50	265	4.479	4.479	0.348	4.476
12	6	6.01	266	5.254	5.254	0.327	6.050
13	6.5	6.50	224	5.734	5.734	0.276	6.200
14	7	6.99	190	5.935	5.935	0.619	6.200
15	7.5	7.50	224	6.140	6.140	0.425	6.200
16	8	7.99	228	6.244	6.244	0.152	6.200
17	8.5	8.48	217	6.296	6.296	0.149	6.200
18	9	9.01	196	6.322	6.322	0.113	6.200
19	9.5	9.49	168	6.330	6.330	0.099	6.200
20	10	9.97	151	6.346	6.346	0.117	6.200
21	10.5	10.49	149	6.370	6.370	0.176	6.200
22	11	11.02	114	6.367	6.367	0.236	6.200
23	11.5	11.47	97	6.155	6.155	1.057	6.200
24	12	11.98	80	6.300	6.300	0.481	6.200
25	12.5						6.200
26	13						6.200
27	13.5						6.200
28	14						6.200

Tabelle 4

A6 Leistungskurve AV-7

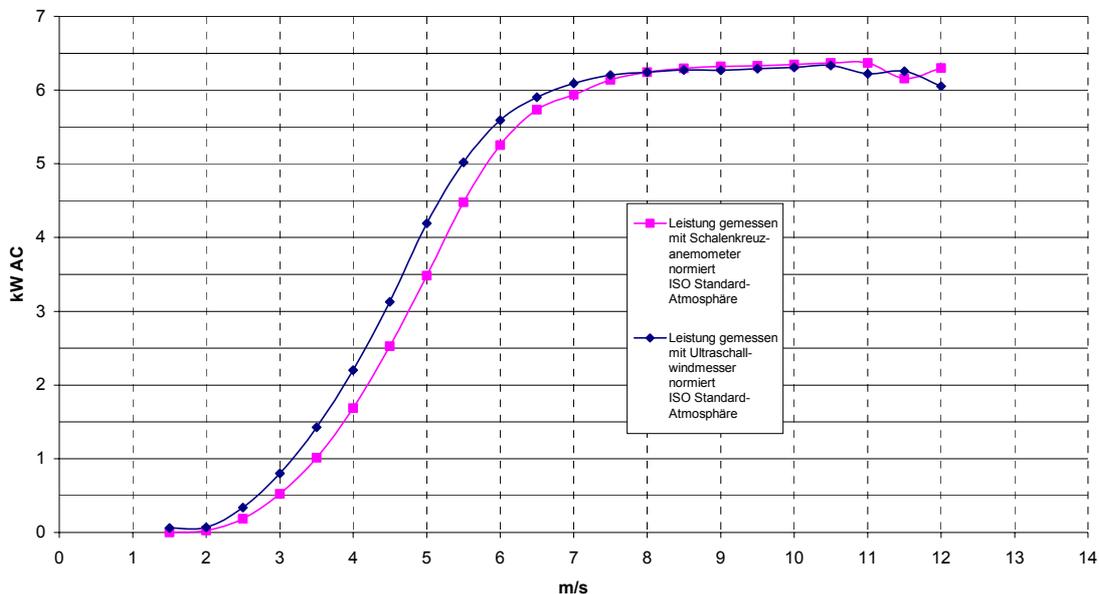
Vergleich auf Basis Schalenkreuzanemometer und Ultraschallwindmesser

Dataset	von	3 bis	18
Messzeit	von	20.07.01 bis	23.04.02
Sektor	1 von	135 ° bis	170 °
Sektor	2 von	220 ° bis	260 °
Mittelwert (min)		10	

Windmesser 1	Thies Schalenkreuzanemometer	Windmesser 2	Thies Ultrasonic Anemom
Typ	4.3519.00.000	Typ	4.3800.00.0
Serirr.	1000329	Serirr.	?????
Eichprotokoll	DEWI No. 111_01	Eichprotokoll	baulich geg

Bin i	Windklassen	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe Schalenkreuzanemometer v _i	Anzahl Messungen in bin i 10 min Mittelwerte Schalenkreuzanemometer N _i	Leistung gemessen mit Schalenkreuzanemometer normiert ISO Standard-Atmosphäre Pn _i	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe Ultraschallwindmesser v _i Ultra	Anzahl Messungen in bin i 10 min Mittelwerte Ultraschallwindmesser N _i Ultra	Leistung ge mit Ultraschallwindme normi ISO Stan Atmospl Pn _i U
	m/s	m/s		kW	m/s		kW
1	0.5	0.59	31	0.000	0.55	177	0.00
2	1	1.03	158	-0.001	1.00	326	0.00
3	1.5	1.53	290	0.000	1.51	473	0.06
4	2	2.01	431	0.027	2.00	586	0.06
5	2.5	2.50	496	0.188	2.50	713	0.33
6	3	3.00	584	0.522	3.01	846	0.80
7	3.5	3.49	669	1.011	3.50	780	1.42
8	4	4.00	609	1.689	3.99	718	2.20
9	4.5	4.50	509	2.528	4.48	533	3.12
10	5	4.99	328	3.483	5.00	399	4.19
11	5.5	5.50	265	4.479	5.49	405	5.01
12	6	6.01	266	5.254	5.97	352	5.58
13	6.5	6.50	224	5.734	6.49	302	5.90
14	7	6.99	190	5.935	6.99	270	6.09
15	7.5	7.50	224	6.140	7.48	332	6.20
16	8	7.99	228	6.244	7.99	314	6.24
17	8.5	8.48	217	6.296	8.51	278	6.27
18	9	9.01	196	6.322	9.00	240	6.27
19	9.5	9.49	168	6.330	9.49	223	6.29
20	10	9.97	151	6.346	10.00	171	6.30
21	10.5	10.49	149	6.370	10.50	145	6.33
22	11	11.02	114	6.367	10.97	118	6.22
23	11.5	11.47	97	6.155	11.50	96	6.25
24	12	11.98	80	6.300	11.99	57	6.05
25	12.5						
26	13						
27	13.5						
∞	∞						

Leistungskurve AV-7
10 Minuten Mittel, normiert auf ISO Standardatmosphäre



A7 Leistungskurve AV-7

Vergleich ausgewählte Sektoren und alle Sektoren

Dataset	von	3 bis	18
Messzeit	von	20.07.01 bis	23.04.02
Sektor	1 von	135 ° bis	170 °
Sektor	2 von	220 ° bis	260 °
Mittelwert	(min)	10	

Windmesser 1	Thies Schalenkreuzanemometer	Windmesser 2	Thies Ultrasonic
Typ	4.3519.00.000	Typ	4.38
Serirr.	1000329	Serirr.	???
Eichprotokoll	DEWI No. 111_01	Eichprotokoll	bau

Bin i	Windklassen m/s	Wind- geschwindigkeit in Nabenhöhe Sektoren 135° bis 170° und 220° bis	Anzahl Messungen in bin i 10 min Mittelwerte Sektoren 135° bis 170° und 220° bis 260°	Leistung gemessen Sektoren 135° bis 170° und 220° bis 260° normiert ISO Standard- Atmosphäre	Wind- geschwindigkeit in Nabenhöhe alle Sektoren	Anzahl Messungen in bin i 10 min Mittelwerte alle Sektoren	Lei- t
		v_i m/s	N_i	Pn_i kW	v_i_alle m/s	N_i_alle	
1	0.5	0.59	31	0.000	0.54	508	
2	1	1.03	158	-0.001	1.03	1277	
3	1.5	1.53	290	0.000	1.51	2411	
4	2	2.01	431	0.027	2.00	3028	
5	2.5	2.50	496	0.188	2.49	3117	
6	3	3.00	584	0.522	2.99	2791	
7	3.5	3.49	669	1.011	3.49	2538	
8	4	4.00	609	1.689	3.99	2060	
9	4.5	4.50	509	2.528	4.49	1635	
10	5	4.99	328	3.483	4.99	1108	
11	5.5	5.50	265	4.479	5.48	758	
12	6	6.01	266	5.254	6.00	588	
13	6.5	6.50	224	5.734	6.49	396	
14	7	6.99	190	5.935	6.99	331	
15	7.5	7.50	224	6.140	7.50	335	
16	8	7.99	228	6.244	7.99	345	
17	8.5	8.48	217	6.296	8.48	293	
18	9	9.01	196	6.322	9.00	252	
19	9.5	9.49	168	6.330	9.49	218	
20	10	9.97	151	6.346	9.97	190	
21	10.5	10.49	149	6.370	10.49	168	
22	11	11.02	114	6.367	11.01	130	
23	11.5	11.47	97	6.155	11.47	112	
24	12	11.98	80	6.300	11.98	84	
25	12.5						
26	13						
27	13.5						
28	14						

Leistungskurve AV-7
10 Minuten Mittel, normiert auf ISO Standardatmosphäre

