Kleine Windkraftanlage für modulare Hybridsysteme - Entwicklung und Prototypentest -

Randolf Geipel, Berthold Hahn, Markus Landau
Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V. (ISET)
Königstor 59, D-34119 Kassel
Tel.: (0561) 7294-329, Fax: (0561) 7294-260
E-Mail: bhahn@iset.uni-kassel.de

Sönke Siegfriedsen
aerodyn Energiesysteme GmbH
Provianthausstraße 9, D-24768 Rendsburg

Jürgen Reekers, Mario Trinkaus
SMA Technologie AG
Hannoversche Str. 1-5, D-34266 Niestetal

Dr. Siegfried Heier, Abdelbahi Tamzarti
Universität Kassel, Institut für Elektrische Energietechnik (IEE-EVS)
Wilhelmshöher Allee 73, D-34121 Kassel

1 Einleitung

Der Markt bietet schon seit Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle kleiner Windkraftanlagen, die bisher in unterschiedlichsten, aber meist geringen Stückzahlen gefertigt wurden. Diese Anlagen speisen meist direkt in Batterien und sind zum einen aufgrund ihrer elektrotechnischen Ausrüstung für den direkten Anschluss an moderne Hybridsysteme zur dezentralen Versorgung nicht geeignet und zum anderen liegen die aktuellen, größenspezifischen Preise dieser kleinen Anlagen auf doppeltem oder sogar dreifachem Niveau der heutigen großen Windkraftanlagen. Letztlich entspricht aber auch ihre technische Reife bei weitem nicht der heutiger moderner Windkraftanlagen für den Netzparallelbetrieb, deren Entwicklung heute selbstverständlich auf höchstem technischem Niveau und mit modernsten Werkzeugen vorangetrieben wird.

Da weltweit grundsätzlich ein großer Bedarf an dezentraler Stromversorgung mit kleinen, autonomen Systemen besteht, unterstützt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit seit Ende 2001 die Entwicklung einer kleinen Windkraftanlage für die modulare Systemtechnik mit einem Forschungsprojekt (Förderkennzeichen 0329908A, 0329908B).

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde die *aeroSmart5* mit 5 kW Leistung nun mit modernen Werkzeugen entwickelt.

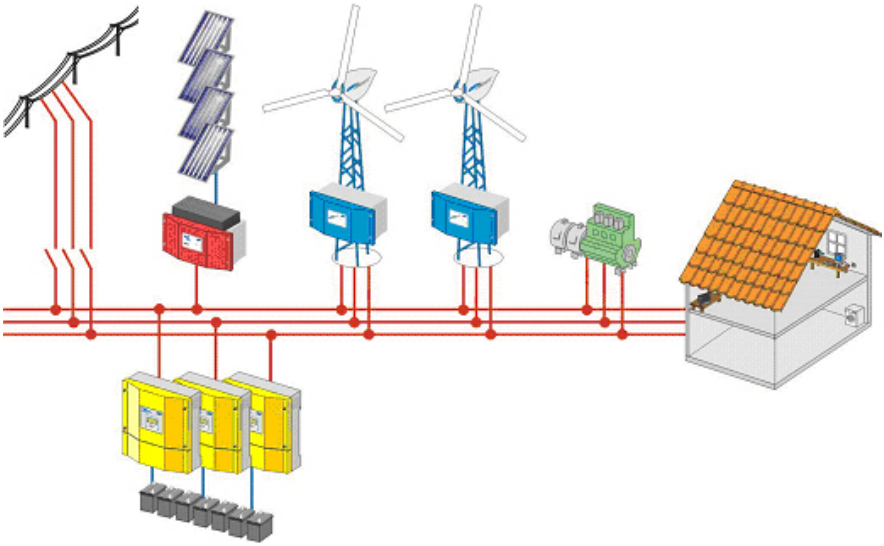


Abb. 1: Einsatz der *aeroSmart5* in Hybridsystemen oder am Verbundnetze

Im Frühjahr 2004 wurde ein erster Prototyp im Testfeld Kaiser-Wilhelm-Koog installiert und wird dort seitdem im Netzparallelbetrieb erprobt und optimiert. Ein zweiter Prototyp wird im Oktober 2004 auf dem ISET-Testfeld „Alte Schanze“ in Immenhausen aufgebaut und am dortigen Experimentier-Hybridsystem angeschlossen und erprobt werden.

2 Projektteam

Für die Entwicklung und Erprobung der *aeroSmart5* im Rahmen des geförderten Vorhabens fand sich ein Konsortium aus fünf Firmen und Instituten, die jeweils auf ihrem Gebiet über langjährige Erfahrung und detailliertes Know-how verfügen.

SMA Technologie AG (Projektleitung)

SMA hat im Gesamtvorhaben die Federführung übernommen und ist inhaltlich im Wesentlichen zuständig für die Systemintegration und die Entwicklung der elektrischen Komponenten einschließlich der kompletten Betriebsführungseinheit. Im Rahmen eines Unterauftrags an die Firma microwind GmbH, ließ SMA außerdem eine umfangreiche

Marktanalyse in der für den Einsatz der *aeroSmart5* in Frage kommender Länder anfertigen.

aerodyn Energiesysteme GmbH

aerodyn entwickelte den gesamten mechanischen Aufbau, vom Profil der Rotorblätter über Gehäuse und Getriebe bis hin zu Turm und Fundamentierung. Im Rahmen eines Unterauftrags an die Firma microwind GmbH ließ aerodyn zuvor verschiedene Turm- und Installationskonzepte auf ihre Anwendbarkeit in abgelegenen Regionen untersuchen.

Universität Kassel, Institut für Elektrische Energietechnik
Elektrische Energie-Versorgungs-Systeme (IEE-EVS)

Vom IEE-EVS wurde der Generator ausgelegt, wobei ein Hauptaugenmerk auf einem besonders günstigen Wirkungsgrad im Teillastbereich gelegt wurde. Für eine Modellvariante wird darüber hinaus zurzeit ein einphasiger Generator mit identischen Abmessungen und gleicher Nennleistung entwickelt.

Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V.

Das ISET stellt für die Erprobung das Testfeld „Alte Schanze“ mit Windmessmast und Experimentier-Hybridsystem zur Verfügung und begleitet die Optimierung durch Messung und Auswertung elektrischer und anderer systemspezifischer sowie Wind und klimatischer Größen.

3 Technische Ausführung *aeroSmart5*

Ziel der Entwicklung ist eine kostengünstige und systemfähige Windkraftanlage, mit der die Nutzung erneuerbarer Energiequellen durch Einbindung der Windenergie in die modulare Energie-Systemtechnik erweitert wird /Heier et al. 1997/, / Bishop et al. 1998/, /Kleinkauf et al. 1997/. Dazu sollten nach Möglichkeit störungsanfällige mechanische Funktionsbereiche reduziert bzw. auf elektrische Komponenten verlagert und ein Anlagenverkaufspreis von ca. 1000 €/kW erreicht werden, wie er heute bei Großanlagen üblich ist.

Als besondere technische Anforderungen an die Entwicklung ergaben sich:

- Universelle Einsatzmöglichkeit in unterschiedlichen Netzen,
- kostengünstige Einzelkomponenten
- hohe Effizienz von Triebstrang und Generator.

- nach Möglichkeit Vermeidung mechanisch beweglicher Steuer- und Regelungselementen und
- die Übernahme von Schlüsselfunktionen der Integrationsfähigkeit und Sicherheit durch geeignete Gestaltung des elektrischen Systems inkl. Regelung und Betriebsführung

Konstruktion und Auslegung der *aeroSmart5* orientieren sich dabei zunächst an den Vorgaben der internationalen Normenreihe IEC 61400. Da der spätere Einsatzort aber nicht absehbar ist und durchaus auch Standorte mit extremen externen Bedingungen in Frage kommen, erfüllt die kleine Anlage einige weitere besonders strenge Anforderungen, wie

- hohe maximale Überlebenswindgeschwindigkeit von 70 m/s,
- geringe Geräuschentwicklung durch niedrige Rotordrehzahlen von 200 min^{-1} (Blattspitzengeschwindigkeit: ≈50 m/s) in der schnellen Stufe,
- hohe Schutzklasse gegen Feuchtigkeit und Staub für das Gehäuse: IP65,
- weiter Bereich der Betriebstemperatur von –25°C bis 50°C,
- weiter Netzspannungsbereich von 400 V ±15% in 5% der Betriebszeit,
- weiter Frequenzbereich von 50 Hz ±2%.

Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass sich im Gegensatz zum Betrieb großer Netzparallelanlagen keine technische Betreuung vor Ort aufhält und auch kein Serviceteam in erreichbarer Nähe ist. Deshalb musste zusätzlich auf die folgenden Gesichtspunkte Rücksicht genommen werden:

- Aufstellbarkeit durch Menschenkraft oder nur mit geringen technischen Hilfsmitteln
- Hohe technische und Personensicherheit
- Einfache Bedienbarkeit ohne Spezialwissen
- Hohe Robustheit und Zuverlässigkeit
- hohe Lebensdauer bei langen Wartungszyklen

Die Technologie der auf der Basis dieser Anforderungen entwickelten *aeroSmart5* unterscheidet sich deutlich von der heutiger Großanlagen. Die größte Herausforderung lag in der größtmöglichen Zuverlässigkeit und geringst möglichen Wartung, da die Anreisekosten für qualifiziertes Personal unter Umständen schnell in den Bereich der Anlagenkosten kommen können.

Eine weitere wesentliche Anforderung an die Konstruktion stellt die Beständigkeit gegen Sand und Staub dar. Für küstennahe Standorte ist außerdem die Belastung durch stark salzhaltige und feuchte Luft zu berücksichtigen. Alle Anlagenteile müssen daher langfristig gegen deren Eindringen geschützt werden. Des Weiteren muss das Gondelgewicht so bemessen sein, dass Transport und Errichtung der Anlage mit einfachen Mitteln möglich sind.

Diese vorangestellten Überlegungen und die daraus abgeleiteten Notwendigkeiten führten zu den folgenden Auslegungsdaten:

IEC Typenklasse:	TK 1
Nennleistung (4-polig / 6-polig):	5,0 / 1,5 kW)
Generator:	Asynchrongenerator, polumschaltbar
Frequenz:	50 Hz (60 Hz)
Einschaltwind:	3,5 m/s
Nennwindgeschwindigkeit:	13,0 m/s
Betriebstemperaturbereich:	-25°C bis 50°C
Leistungsregelung:	Passiv-Stall
Blattanzahl:	3
Rotoranordnung zum Turm:	Lee
Durchmesser:	5,1 m
Windrichtungsnachführung:	freier Leeläufer
Nenndrehzahl:	133 / 200 min-1
max. Überlebenswindgeschwindigkeit:	70 m/s
1. Bremssystem:	elektromag. Sicherheitsbremse
2. Bremssystem:	Fliehkraftbremse
Mast, abgespannt	Gittermast, Rohrmast
Gondelmasse ohne Rotor:	110 kg
Rotormasse komplett:	31 kg

Tab. 1: Auslegungsdaten der aeroSmart5

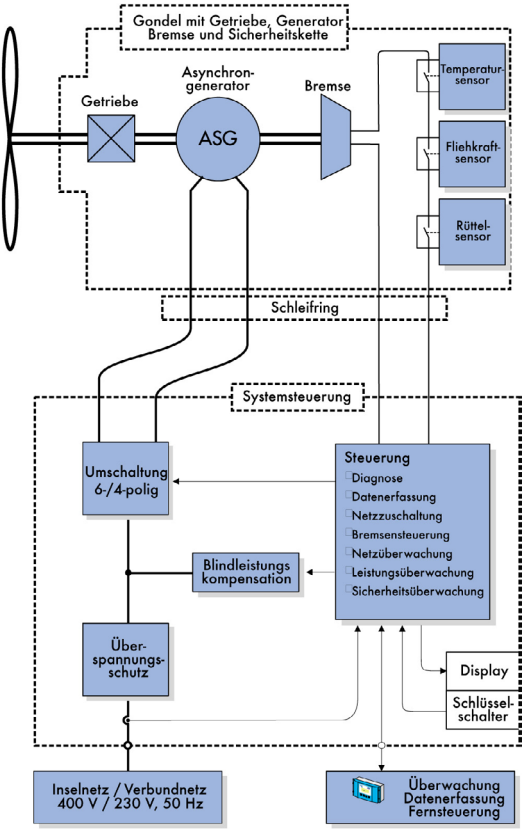


Abb. 2: Hauptkomponenten und –funktionen der *aeroSmart5*

Den prinzipiellen Aufbau der *aeroSmart5* zeigt Abb. 2 schematisch für den Anschluss an ein 3phasiges Netz mit 400 V Spannungsebene.

Aufgrund des angestrebten niedrigen Verkaufspreises ergab sich die Notwendigkeit, alle Komponenten hinsichtlich Konstruktion, Fertigung und Wirkungsgrad auf Einsparungs- bzw. Verbesserungsmöglichkeiten hin zu prüfen. Vor allem für die bei kleinen Anlagen oft überproportional teuren Komponenten Rotorblätter und Generator wurden Optimierungsmöglichkeiten gesehen, so dass hier – neben der Betriebsführungseinheit - besondere Entwicklungsanstrengungen unternommen wurden .

3.1 Rotorblattentwicklung

Der Rotor der *aeroSmart5* ist mit 3 Rotorblättern aus einem stranggezogen GFK-Profil ausgestattet. Dieses Material besitzt gute Ermüdungseigenschaften, eine hohe Abriebfestigkeit und hervorragende UV-Beständigkeit. Das aerodynamische Profil der Blätter wurde gezielt so ausgelegt, dass die abgegebene Leistung bei hohen Windgeschwindigkeiten durch Strömungsabriss (Stall-Effekt) begrenzt wird. Da geeignete Blattprofile für die gewünschte Auslegung nicht existierten, musste ein eigenes Profil entwickelt werden, das im Windkanal der Uni Stuttgart vermessen wurde. Mit diesem Profil wird trotz der einfachen Blattbauweise mit konstanter Tiefe und ohne Verwindung ein c_p von 0,43 für den Rotor erreicht.

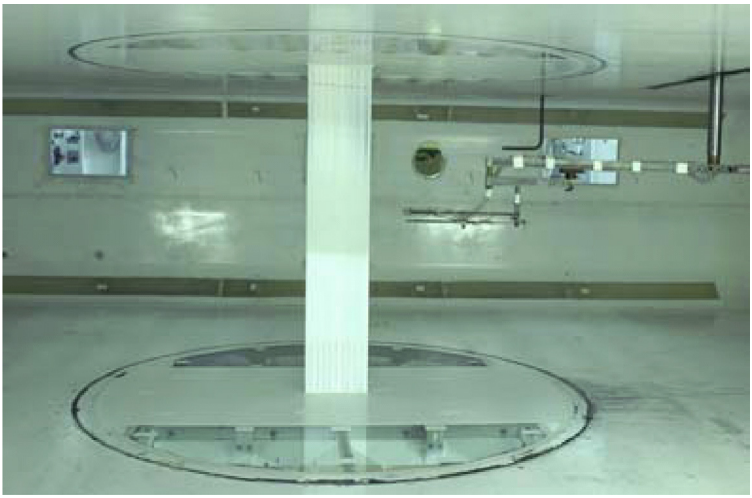


Abb. 3: Profilvermessung im Windkanal

Ein besonderes Problem für die *aeroSmart5* besteht im Gegensatz zu vielen Kleinwindenergieanlagen, die per Eklipsenregelung (Aus-dem-Wind-Schwenken) darin, dass der Rotor der Anlagen auch bei extremen Windverhältnissen (Taifun, Hurrikan) dem Winddruck standhalten muss. Die Auslegungswindgeschwindigkeiten betragen bis zu 70 m/s, also Windgeschwindigkeiten, bei diesen sich die *aeroSmart5* abgebremst im Stillstand befindet.

Um den in diesen Situationen auftretenden Kräften standzuhalten, wurden die Rotorblätter mit einer derart geringen Biegesteifigkeit in Schlagrichtung versehen, dass eine elastische Durchbiegung um mehr als zwei Drittel ihrer gestreckten Länge möglich ist. Bei einem Extremwind von 70 m/s biegt sich das Rotorblatt um 70% seiner

gestreckten Länge durch und vermindert den Rotorradius auf 67%. Durch die starke Durchbiegung vermindert sich zum einen also die projizierte Windangriffsfläche erheblich, zum anderen wird auch der Widerstandsbeiwert aufgrund der mit der Durchbiegung einhergehenden starken Krümmung der Blätter nach außen deutlich verkleinert. Diese beiden Effekte reduzieren bei Extremwindbedingungen den Windschub auf die gesamte Anlage im Vergleich zu Anlagen mit steifen Blättern auf die Hälfte. Dadurch konnte Material für die lastübertragenden Komponenten wie Rotorwelle, Maschinengehäuse, Vertikallagerung, Turm, Abspannung und Fundament gespart werden, so dass die Herstellungskosten der Anlage erheblich vermindert werden konnten.

3.2 Generatorentwicklung

Aus Gründen der Kostenbegrenzung wurde für die *aeroSmart5* ein polumschaltbarer Asynchrongenerator vorgesehen und im Institut IEE-EVS der Universität Kassel ausgelegt. Um die elektrische Energie aus Windkraft preiswert und hocheffizient zur Verfügung stellen zu können, wurde dem Wirkungsgrad der mechanisch-elektrischen Energiewandlung im einem weiten Spektrum der abgegebenen Leistung eine hohe Wichtigkeit beigemessen.

Dazu wurden zunächst - ausgehend von der Auslegung nach dem Kennlinienverfahren /Heier 2003/ von motorisch ausgelegten Serienmaschinen - Asynchrongeneratoren als Ständerausführungen in zwei Schritten untersucht, dimensioniert und insbesondere auf hohen Wirkungsgrad optimiert. Abschließend wurden gleichartige Stator- und Rotorsysteme von Asynchrongeneratoren im Gehäuse der *aeroSmart5* aufgebaut und gemeinsam mit dem Getriebe als gesamter Triebstrang untersucht.

Der Generator wurde polumschaltbar ausgeführt und wird im Betrieb entsprechend der aktuell eingespeisten Leistung zwischen den zwei Drehzahlen geschaltet. Die Nennleistung der ersten Stufe (6polig) beträgt 1,5 kW, die der zweiten Stufe (4polig) 5,5 kW.

Um energetische Auswirkungen und betriebstechnische Möglichkeiten der Auslegung zu untersuchen, wurden im gesamten auftretenden Leistungsspektrum – Leerlauf bis 130% Nennleistung – die mechanischen und elektrischen Messwerte in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung ermittelt. Darüber hinaus wurden diese Größen in Spannungsstufen – 90% bis 110% Nennspannung – im gesamten Leistungsspektrum untersucht.

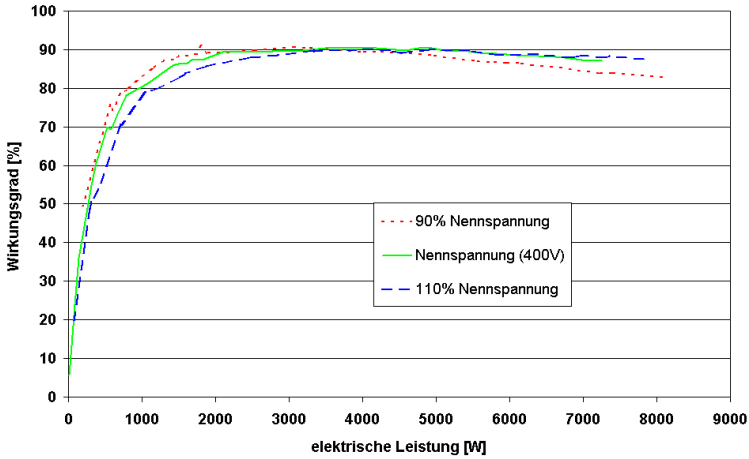


Abb. 4: Wirkungsgrad des Generators in der 4poligen Stufe bei unterschiedlichen Netzspannungen

In der schnellen Drehzahlstufe erreicht der speziell ausgelegte Generator in allen gemessenen Spannungsstufen (vgl. Abb. 4) hohe Teillastwirkungsgrade (80% bei etwa 20% Nennleistung) und Maximalwirkungsgrade (90%). Der maximale Wirkungsgrad stellt sich bei Nennspannung bei etwa 3 kW (60% Nennlast) ein. Bei einer Spannung von 360 V (90% Nennspannung) verschiebt sich das Maximum zu niedrigeren Leistungen (40% Nennleistung), bei 440 V (110% Nennspannung) zu höheren Leistungen (80% Nennleistung). Bei größeren Leistungen bis hin zu 130% Nennleistung fällt der Wirkungsgrad nur leicht ab. Im 6-poligen Betrieb erreicht der Generator seinen maximalen Wirkungsgrad von etwa 84% bei etwa 1 kW (67% Nennleistung).

Die Charakteristik des so ausgelegten polumschaltbaren Asynchrongenerators, bei niedrigen Leistungen bereits einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen und dabei etwas geringeren Wert auf hohe Wirkungsgrade bei Nennleistung zu legen, kommt der Auslegung einer Windkraftanlage, die ihre größten Beiträge zum Energieertrag aus mittleren Windgeschwindigkeiten bezieht, sehr entgegen.

Neben dem Wirkungsgrad ist natürlich auch ein hoher Leistungsfaktor von Interesse, da die benötigte Blindleistung von anderen Komponenten im Netz bereitgestellt werden muss und die Blindströme ungewollte Verluste verursachen. Einen maßgeblichen Einfluss auf den Leistungsfaktor bzw. auf die Höhe des Magnetisierungsstromes hat der Luftspalt.

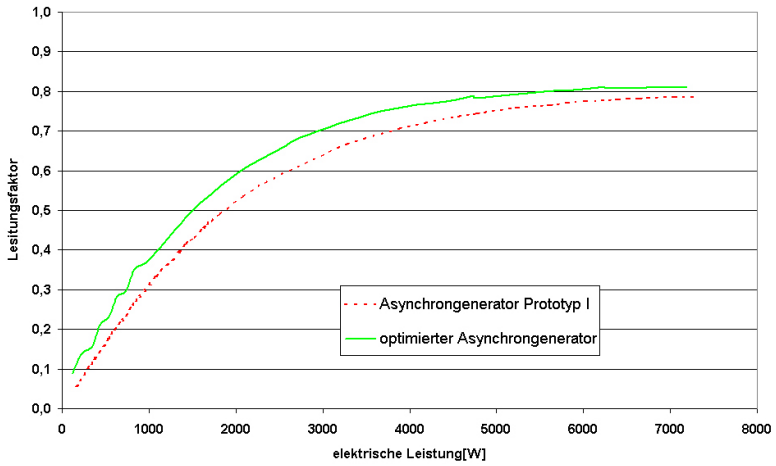


Abb. 5: Optimierung des Leistungsfaktors der 4poligen Stufe (unkompensiert)

Die technisch noch realisierbare Verringerung des Luftspalts um 0,10 mm auf 0,25 mm ergab eine Verbesserung des Leistungsfaktors im Teillastbereich um 10 %. Abb. 5 veranschaulicht den Verlauf des Leistungsfaktors der 4-poligen Stufe in Abhängigkeit von der abgegebenen elektrischen Leistung vor und nach der Optimierung.

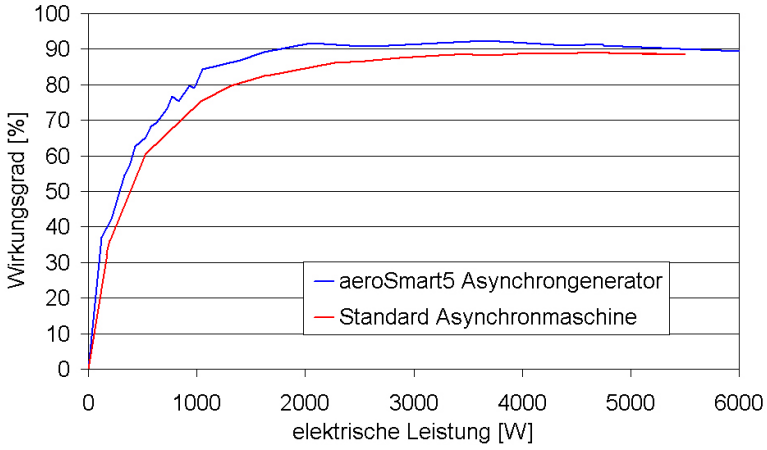


Abb. 6: Wirkungsgrad des optimierten Generators im Vergleich zum typischen Wirkungsgrad einer standardmäßig ausgelegten Asynchronmaschine

Mit der Verringerung des Luftspalts ergab sich zudem auch eine Erhöhung des Wirkungsgrads im Teillastbereich der kleinen Leistungsstufe zwischen 500 W und 1.000 W um ca. 10 Prozentpunkte (vgl. Abb. 6). Gegenüber herkömmlich ausgelegten polumschaltbaren Asynchronmaschinen dieser Leistungsklasse konnten also Wirkungsgradverlauf und Leistungsfaktor erheblich verbessert werden, was der Netzverträglichkeit und letztlich den Stromgestehungskosten entgegen kommt.

3.3 Betriebsführungseinheit

Die Auslegung der Windenergieanlage (WEA) erfolgt für unterschiedliche elektrische Netzbedingungen, da sie sowohl netzparallel als auch im Inselnetz, zusammen mit dem Sunny Island betrieben werden soll. Neben der Ausführung mit einem 3phasigen Generator (400 V / 50 Hz) soll auch eine später mögliche Variante mit 1phasigem Generator (240 V / 60 Hz) für den Betrieb in den USA vorgesehen werden. Der Generator ist jeweils polumschaltbar ausgeführt.

Die elektrischen Komponenten in der Gondel, die durch die Betriebsführung angesteuert werden sollen, sind der Generator und die elektro-mechanische Bremse. Die elektrischen Verbindungen zu Generator und Bremse werden über Schleifringe auf ein Kabel zum Turm geführt. Die Betriebsführungseinheit wird in einem separatem Edelstahl-Gehäuse in Schutzart IP65 untergebracht, das unten am Turm befestigt wird.

Das Betriebsführungssystem besteht aus einer speziell zugeschnittenen Leistungsplatine und einem Doppelprozessor-Mikrocontrollersystem. Auf einem Display werden die wichtigsten Anlageninformationen wie Leistung und Drehzahl dargestellt. Das System verfügt über eine Datenschnittstelle, über die Messdaten erfasst und oder Parametereinstellungen vorgenommen werden können. Falls eine Telefonleitung vorhanden ist, ist hierüber auch eine Fernüberwachung möglich.

Für die Einbindung in das Hybridsystem ist darüber hinaus die Entwicklung einer regelbaren Last vorgesehen, mit der überschüssige Energie in einem Inselnetz gezielt abgeführt werden kann.

Die Betriebsführungseinheit hat die Aufgabe, sämtliche Betriebszustände der Anlage einwandfrei zu erkennen und ggf. entsprechende Reaktionen auszulösen. Folgende Funktionen stellt die Betriebsführung zur Verfügung:

- Netzüberwachung und Freischaltung
- Betätigen und Lüften der Bremse
- Testaufschaltung zur Drehfeldprüfung des Generators
- Aufschalten auf Netz mit Sanftanlauf
- Kompensieren von Blindleistung, Schalten von Kondensatorbänke
- Umschalten des Generators zwischen kleiner und großer Stufe

- Messen, Aufzeichnen und Überwachen von Generatordrehzahl, Drehrichtung des Rotors und Generators, Drehfeld des Netzes, Spannung, Strom und Frequenz im Netz
- Überwachung der Bremsfunktion
- Überwachen der Sicherheitskette bestehend aus Rüttelsensor, Temperatursensor im Generator, Fliehkraftsensor
- Anzeigen von Betriebszustand, Bremsenzustand, Störungen und eingespeister Leistung
- Direkter Not-Aus
- Möglichkeit zur Fernüberwachung und –steuerung

Ein besonderes Augenmerk wird aus oben genannten Gründen auf einen sicheren Anlagenbetrieb gelegt. Deshalb wird die *aeroSmart5*, im Gegensatz zur üblichen Ausführung kleiner Windkraftanlagen, wie die modernen großen Anlagen über eine

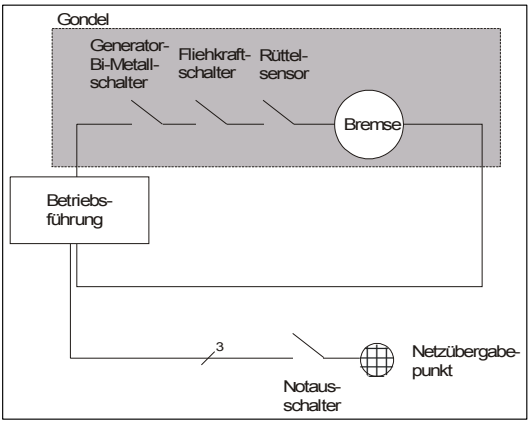


Abb. 7: Schema der Sicherheitskette

Kette von Sensoren verfügen, die den Betrieb überwachen.

Diese Sicherheitskette besteht aus einem Fliehkraftsensor, einem Rüttelsensor und einem Temperatursensor, die mit der Bremse in Reihe verdrahtet sind. Löst einer der Sensoren aus, wird ein EMERGENCY STOP ausgelöst, die Bremse fällt ein und die Maschine stoppt (vgl. Abb. 7).

4 Prototyp im Test

4.1 Messstand IEE-EVS und ISET DeMoTec

Die ersten beiden Prototypen der *aeroSmart5* wurden zunächst auf dem Teststand der Universität Kassel, im Labor des IEE-EVS erprobt. Um den realen Betrieb der kleinen Windkraftanlage näherungsweise nachfahren zu können, müssen für den Antrieb des Generators die Dynamik des Windes und das Massenträgheitsmoment des Rotors nachgebildet werden. Dies wird durch eine entsprechend geregelte Gleichstrommaschine erreicht. Der Laboraufbau besteht aus einem fremderregten 200 kW Gleichstrommotor (Abb. 8 links) zur Simulation des Rotors und der zu untersuchenden Maschine (Abb. 8 rechts).

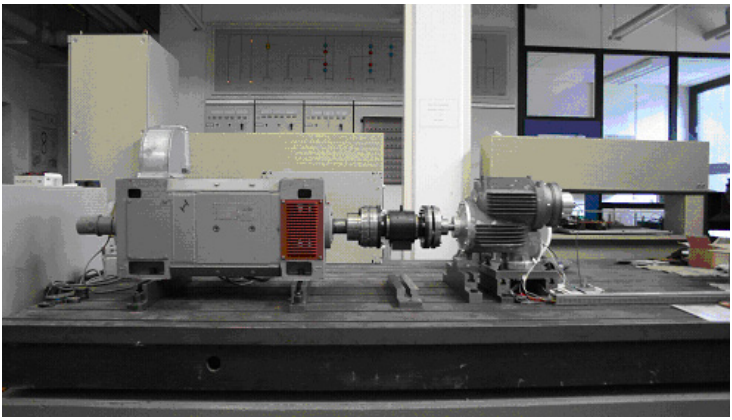


Abb. 8: AeroSmart5 auf dem Messstand des IEE-EVS

Auf dem Messstand des IEE-EVS wurden die Temperaturentwicklung im Betrieb, das Triebstrangverhalten, hier insbesondere die Getriebeverluste, die elektrischen Eigenschaften des neu entwickelten und gezielt ausgelegten Generators sowie die Funktionen der Betriebsführungseinheit untersucht (vgl. Kap. 3.2).

Während die erzeugte Leistung während der Triebstrang- und Temperaturuntersuchungen zunächst wieder zurück ins Netz gespeist wurde, konnte die kleine Anlage zur Untersuchung der dynamischen Vorgänge beim Aufschalten auf das Netz und bei der Erprobung der Betriebsführungseinheit schon an ein im DeMoTec

Abb. 9: Hybridsystem im ISET DeMoTec

(Design-Zentrum für Modulare Versorgungstechnik) des ISET installiertes Hybrid-System angeschlossen werden. Dieses Hybrid-System ähnelt in Aufbau und Ausrüstung stark dem Hybridsystem auf dem ISET-Testfeld und basiert ebenfalls auf Sunny-Island Wechselrichtern von SMA.

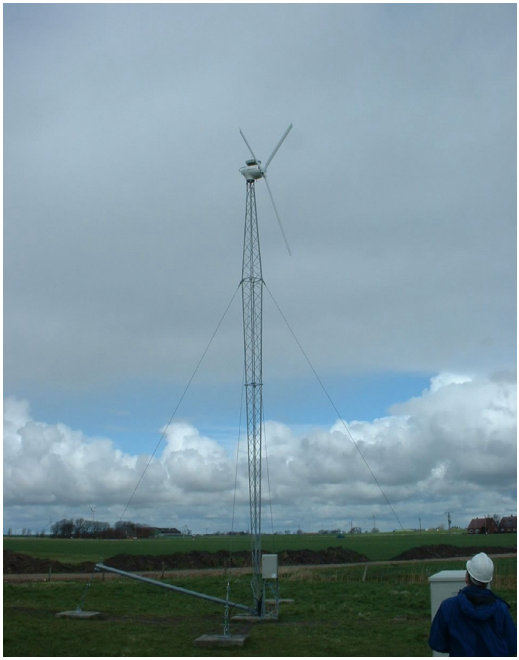
Die Triebstrang- und Temperaturmessungen ergaben hinsichtlich der mechanischen Konstruktion keine überraschenden Ergebnisse. Die Getriebeverluste liegen im erwarteten Bereich, müssen aber bekannt sein, um den Wirkungsgrad des Generators im eingebauten Zustand bestimmen zu können. Die Temperaturen lagen im Test auch bei Nennleistung in einem für Wicklungen und Lager unbedenklichen Bereich, allerdings musste dann mit einem stationären Gebläse gekühlt werden, ähnlich wie die Anlage im Betrieb durch den vorbei streichenden Wind gekühlt wird.

Vor allem die Untersuchung der dynamischen Entwicklung von Spannungen und Strömen beim Aufschalten des Generators über die neu entwickelte Betriebsführungseinheit auf das Inselnetz erbrachte noch in der frühen Erprobungsphase einige Erkenntnisse, die in die ersten Prototypen der Betriebsführung einfließen konnten. Diese und ähnliche dynamischen Untersuchungen sind später auch Bestandteil der Aufgaben auf dem ISET-Testfeld „Alte Schanze“.

4.2 Testfeld der Windtest Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH

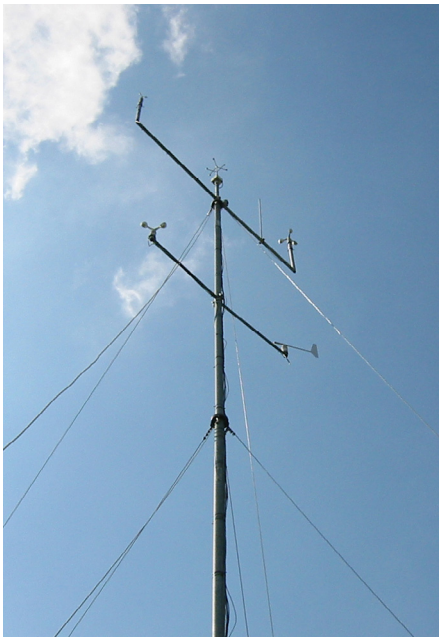
Der erste Prototyp der *aeroSmart5* wurde er im Frühjahr 2004 auf dem Testfeld der Windtest Kaiser-Wilhelm-Koog GmbH an der Nordseeküste installiert. Hier ist die Anlage parallel zum Netz angeschlossen und kann ohne eventuelle Einflüsse aus dem Experimentier-Hybridsystem getestet werden.

Seit Spätsommer 2004 läuft sie im vollautomatischen Betrieb, schaltet bei ausreichenden Windgeschwindigkeiten automatisch auf das Netz bzw. zwischen den beiden Leistungsstufen des Generators und erreicht bei hohen Windgeschwindigkeiten die vorgesehene Nennleistung. Damit bestätigten die ersten Tests zunächst die Funktionstüchtigkeit der Neuentwicklung und erbrachten erste Erkenntnisse z. B. zum Anlaufverhalten und zum Umschaltpunkt zwischen den Generatorstufen. Die weiteren Aufgaben bestehen nun beispielsweise in der Optimierung des Blatteinstellwinkel und der Leistungshysterese um den Umschaltpunkt und letztlich in der Vermessung der Leistungskennlinie.



4.3 ISET-Testfeld „Alte Schanze“ mit Experimentier-Hybridsystem

Der zweite Prototyp der *aeroSmart5* wird unter den Einsatzbedingungen im Betrieb an einem autonomen Hybridsystem getestet werden. Hier muss die Anlage hinsichtlich ihrer elektrischen Integration in das dezentrale Versorgungssystem Bedingungen erfüllen, die über die Anschlussbedingungen am Netz hinausgehen. Das ISET hat auf der „Alten Schanze“ in Immenhausen, etwa 10 km nördlich von Kassel, ein Testfeld eingerichtet, das die Vermessung der kleinen Windkraftanlage im Betrieb am Experimentier-Hybridsystem erlaubt. Die Aufstellung auf der „Alte Schanze“ wird im Herbst 2004 erfolgen, so dass Ende 2004 mit ersten belastbaren Ergebnissen zu rechnen ist.



Wind-richtung	Turbulenz-intensität
N (0°)	11 %
NNO (30°)	15 %
ONO (60°)	17 %
O (90°)	13 %
OSO (120°)	16 %
SSO (150°)	13 %
S (180°)	13 %
SSW (210°)	13 %
SWS (240°)	15 %
W (270°)	14 %
WNW (300°)	14 %
NNW (330°)	12 %
alle Richtungen	14 %

Abb. 11: Windmessungen auf der Alten Schanze in 12 m und in 15 m Höhe sowie richtungsabhängige Turbulenzintensitäten

Das Testfeld befindet sich in etwa 400 m Höhe in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem Windpark mit 12 Windkraftanlagen (50 – 70 m Nabenhöhe, 600 – 1000 kW Nennleistung) in weitgehend landwirtschaftlich genutzter Fläche. Buschgruppen, ein kleines Wäldchen im Westen und der Reinhardswald im Osten sorgen für typische

Binnenland-Windverhältnisse mit im Vergleich zur Küste durchschnittlich eher niedrigen Windgeschwindigkeiten und relativ hohen Turbulenzen (vgl. Abb. 11).

Aufgrund der geringen Entfernung zum ISET und der für diese Region günstigen Windverhältnissen bietet sich das eingezäunte Gelände für verschiedene Messungen und Versuche an. So werden auf dem Testfeld z. B. seit längerem unterschiedliche Anemometer-Typen vermessen und verglichen. Der dazu verwendete Messmast konnte für die Vermessung der *aeroSmart5* mit einer weiteren kalibrierten Windmessung ausgestattet werden, so dass für die Einschätzung des Betriebsverhaltens auch Winddaten aus 12 m Nabenhöhe vorliegen.

Das Hybridsystem ist in einem Standard-Container untergebracht und wird hier völlig autonom ohne Anschluss an das Netz betrieben. Zur Versorgung dient eine 2,6 kW Photovoltaik-Anlage und ggf. verschiedene Generatoren im Testbetrieb (hier: *aeroSmart5*). Ein Diesel-Generator dient als Backup. Sollte die eingespeiste Energie nicht ausreichen, könnte jederzeit auch das Netz als Energiequelle angeschlossen werden. Im Fall einer geladenen Batterie und gleichzeitig hoher Einspeisung aus Photovoltaik und Windkraftanlage kann die Verbraucherleistung durch Zuschalten eines Heizwiderstands außerhalb des Containers deutlich erhöht werden.

Alle Generatoren und Verbraucherlasten sowie ggf. der Netzanschluss sind mit Strom-, Spannung- und Leistungsmessungen ausgerüstet. So können nicht nur die Energieflüsse bilanziert, sondern auch das dynamische Verhalten dieser Größen gemessen werden. Der meteorologische Messmast liefert Messdaten von Windgeschwindigkeit und –richtung sowie der wichtigsten klimatische Größen.

Den Kern des Experimentier-Hybridsystems bilden drei Batterie- Wechselrichter „Sunny-Island“ (4,5 kW) von SMA, die zusammen mit der Batteriebank (60 V, 30 kWh) das Netz bilden und überwachen. Alle anderen an Netz angeschlossenen Komponenten (3 PV-Stromrichter „Sunny-Boy“ mit je 850 W, Dieselaggregat 9 kW) arbeiten unabhängig und sind für sich betriebssicher, d. h. die im Falle von internen Störungen dieser Komponenten oder von Netzstörungen müssen diese in einen sicheren Betriebszustand schalten oder sich ggf. selbst abschalten. Im Fall des Experimentiersystems überwacht zusätzlich eine übergeordnete Betriebsführung in Form eines PC sämtliche Funktionen. Durch diesen PC können alle angeschlossenen Aggregate über ein Bussystem (Interbus-S) gezielt ein- und ausgeschaltet werden.

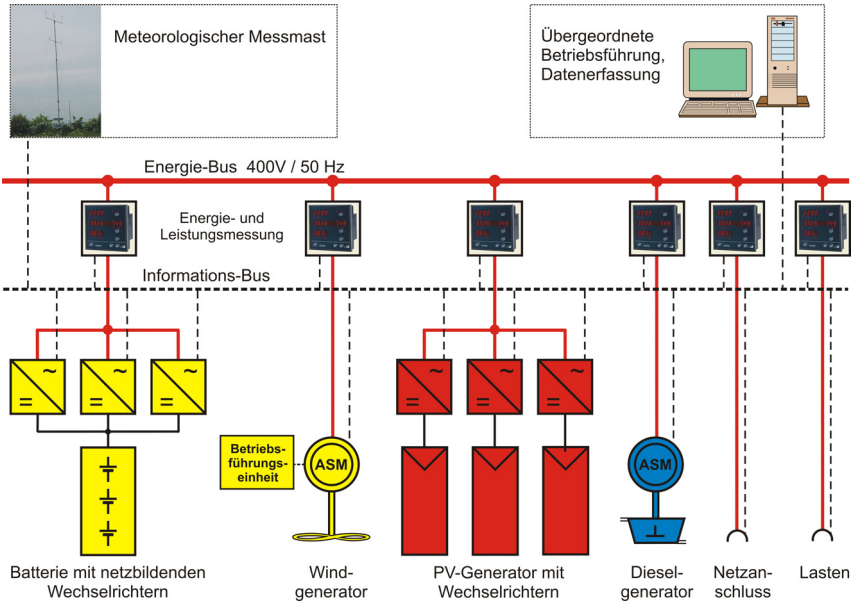


Abb. 12: Blockschaltbild des Experimentier-Hybridsystems

Der Betriebsführungs-PC übernimmt auch die Vorverarbeitung der Messdaten, deren temporäre Archivierung und die Fernübertragung von Steuerkommandos und Messdaten. Die Messwerte der in die Anschlusspfade der Aggregate integrierten Energie- und Leistungsmessungen werden über einen „Profibus“ vom Betriebsführungs-PC ausgelesen, die PV-Wechselrichter kommunizieren über eine RS485-Verbindung mit dem PC und die meteorologischen Größen werden via Interbus-S übertragen. Für den Test der *aeroSmart5* wurde zusätzlich eine Messung der Gondelstellung, der Turmbeschleunigungen und der Wirk- und Blindleistung durch eine schnelle, analoge Übertragung vorgesehen.

Test und Vermessung des Prototyps im Experimentier-Hybridsystem betreffen vor allem das Zusammenspiel mit den drei Batterie-Wechselrichtern „Sunny-Island“. Dazu müssen Spannungen, Ströme und die Frequenz während der verschiedenen Betriebszustände der *aeroSmart5* und insbesondere beim Aufschalten auf das Netz und beim Umschalten zwischen den beiden Generatorstufen beobachtet werden. Auch die Anlage selbst betreffend werden auf der Alten Schanze Messungen und Auswertungen vorgenommen. Da es sich bei der *aeroSmart5* um einen Lee-Läufer handelt, ist z. B. auf Grund des Turmschattens mit regelmäßigen Einbrüchen von Rotordrehmoment und Leistung sowie

Abb. 13: ISET Experimentier-Hybridsystem mit PV-Versorgung (links) und 3phasigem Netz (rechts Wechselrichter)

mit einer Schwingungsanregung von Rotorblättern und Turm zu rechnen. Das schnell abgetastete Leistungssignals wird deshalb hinsichtlich der Einflüsse des Turmschattens überprüft.

Die beschriebenen Messmöglichkeiten sind so gewählt, dass folgende Untersuchungen und ggf. Abhilfemaßnahmen möglich sind:

- Energieflüsse und Energiebilanz bei tageszeitlich und saisonal unterschiedlichen Einstrahlungs- und Windbedingungen
- Funktion der Blindleistungskompensation in unterschiedlichen Betriebszuständen
- dynamisches Verhalten elektrischer Größen beim Aufschalten auf das Netz bzw. beim Umschalten zwischen den beiden Leistungsstufen des Generators
- Wechselwirkung zwischen elektrischen Größen im Netz und der schwankenden eingespeisten Leistung im Teillastbereich und während der Wirkung des Stall-Effekts
- Wirkung des Stall-Effekts zur Leistungsbegrenzung bei hohen Windgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten
- Einfluss des Turmschattens auf das Leistungssignal und rückwirkende Schwingungsanregungen von Blättern und Turm

- dynamische Ausrichtung der Gondel nach der Windrichtung bei turbulenter Anströmung
- Anlaufverhalten bei niedrigen Windgeschwindigkeiten
- Leistungskennlinie in Anlehnung an IEC 61400
- Leistungsverhalten bei unterschiedlichen internen und externen Betriebszuständen

5 Erste Ergebnisse des Prototypentests und Ausblick

Die Messung der abgegebenen elektrischen Leistung auf dem Testfeld im Kaiser-Wilhelm-Koog bestätigte zunächst die Funktionstüchtigkeit der Anlage. Die Vermessung unter zwei unterschiedlichen Einstellwinkel der Rotorblätter (Abb. 14) zeigt, wie genau die computergestützte Entwicklung des Profils und die Fertigung der ersten Blattsätze

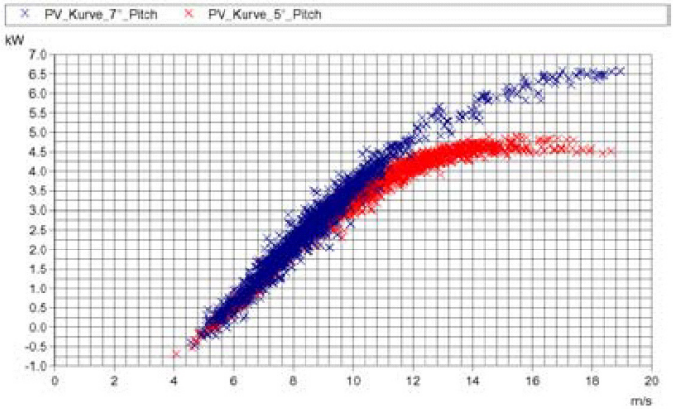


Abb. 14: Gemessene Leistung mit 5° bzw. 7° Einstellwinkel über der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe

waren. Der vorgesehene Einstellwinkel von 5° muss lediglich um 1° korrigiert werden, um die Leistungsabgabe zu optimieren.

Auch die Ausrichtung der Gondel relativ zur Windrichtung wurde bereits ausgewertet (Abb. 15). Würde die Gondel stark pendeln und häufig schräg angeströmt, könnte ein Teil der potenziell vorhandene Energie nicht genutzt werden und der Turm zu unerwünschten Schwingungen angeregt werden. Die ersten Ergebnisse zeigen eine relativ konstante Gondelstellung, die allerdings um wenige Grad von der gemessenen Windrichtung abweicht. Diese kleine Abweichung hat für die Energieausbeute einen relativ geringe Bedeutung und könnte möglicherweise auch an einer geringen Fehljustierung der Messtechnik liegen.

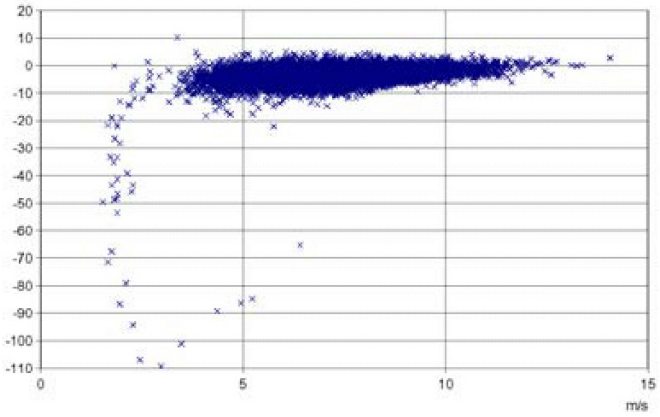


Abb. 15: Gemessene Fehlstellung der Gondel zur Windrichtung über der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in Winkelgraden

Insgesamt ergeben die ersten Messungen und Auswertungen sehr zufriedenstellende Ergebnisse, so dass an der Funktionalität der Neuentwicklung keine Zweifel bestehen. Die bevorstehenden Untersuchungen auf dem Testfeld „Alte Schanze“ bezüglich des Anlagenverhaltens unter deutlich turbulenteren Windbedingungen und bezüglich des Zusammenspiels von *aeroSmart5* und Inselsystem werden möglicherweise weitere Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen.

Die Ergebnisse der bisherigen Entwicklungsarbeiten und der ersten Betriebsstunden der *aeroSmart5* auf dem Testfeld Kaiser-Wilhelm-Koog waren aber bereits jetzt so ermutigend, dass von den federführenden Projektpartnern die Fertigung einer Vorserie und deren Test unter realen Betriebsbedingungen geplant wird. Die Installation der ersten Vorserienmodelle könnte, abhängig von den weiteren Ergebnissen der Tests, schon im Frühjahr 2005 erfolgen.

Des Weiteren wird auch über eine neue Entwicklung nachgedacht. Die gewählte Nennleistung der *aeroSmart5* ist abgestimmt auf die typischen kleinen Leistungen von Generatoren und Verbrauchern in dezentralen Versorgungssystemen. Bei etwas größeren Verbraucherleistungen können aufgrund der modularen Philosophie des Hybridsystems „Sunny-Island“ leicht mehrere Windkraftanlagen parallel integriert werden. Für diesen Fall wäre aber wahrscheinlich eine 10-kW-Windkraftanlage deutlich kostengünstiger als zwei 5-kW-Anlagen. Deshalb werden zurzeit die Möglichkeiten zur Entwicklung einer 10-kW-Variante der *aeroSmart* auf der Basis der jetzt in der Erprobung befindlichen *aeroSmart5* untersucht.

6 Literatur

/Heier et al. 1997/ S. Heier, W. Kleinkauf, F. Raptis: Rural Electrification with Hybrid Plants. 20th International Conference CIGR: Rural Electrification and Rational Use in Agriculture. 21.–25. April 1997, Agadir, ANAFID, Agadir, Morocco, pp 3.1–3.7

/Bishop et al. 1998/ J. Bishop, O. Haas, W. Kleinkauf, F. Raptis, J. Sachau: Standardisation of Systems Technology for PV Power Supply – Modular Structures with Series Produced Components. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, July 1998, Wien

/Kleinkauf et al. 1997/ W. Kleinkauf, F. Raptis: Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien – Hybridanlagentechnik zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung. In: Forschungsverbund Sonnenenergie – Themen 96/97 – Strom aus Sonne und Wind. Köln, 1997

/Heier 2003/ Siegfried Heier, Windkraftanlagen –Systemauslegung, Integration und Regelung-, 3.Auflage, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B.G.Teubner, 2003 ISBN 3-519-26171-5