

# Eine Methode zur Bestimmung der maximalen Treibstoffeinsparung in einfachen Wind-Diesel Systemen

Hans Georg Beyer<sup>1,2</sup>, Thomas Degner<sup>1</sup>, Kai Mönnich<sup>1</sup>

1: Abteilung Energie- und Halbleiterforschung, Fachbereich Physik, C.v.O. Universität Oldenburg  
Postfach 2503, D-26111 Oldenburg, Fax: ++49-441-798-3326

2: Groupe Télédétection et Modélisation, Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris  
Sophia-Antipolis, Frankreich

**Zusammenfassung:** Wir stellen eine statistische Methode vor, um die obere Grenze der mit einfachen Wind-Diesel Systemen erreichbaren Treibstoffeinsparungen zu bestimmen.

Der Treibstoffverbrauch wird dabei für ein optimal gesteuertes System aus den statistischen Eigenschaften der Zeitreihe der Leistungsbilanz 'Windanlagenleistung – Verbraucherlast' bestimmt. Dies erlaubt die Abhängigkeit der Treibstoffeinsparung von unterschiedlichen Windklimata einfach zu untersuchen. Zur Validierung des Verfahrens werden Vergleiche mit numerischen und Echtgrößen-Simulationen entsprechend gesteuerter Systeme vorgestellt.

## 1 Einleitung

Viele der heutigen Wind-Diesel Systeme zur autonomen Versorgung von Verbrauchern in der Größenordnung von 10 – 300 kW beinhalten einen Energiespeicher. Die Treibstoffeinsparungen, die mit dieser Art von System erreicht werden können, sind im allgemeinen groß. In Wind-Diesel Systemen ohne Energiespeicher [7] [6] müssen die Fluktuationen in der Leistungsabgabe der Windanlage durch den Dieselgenerator kompensiert werden. Größere Treibstoffeinsparungen können allerdings nur dann erzielt werden, wenn der Dieselgenerator intermittierend betrieben wird. Dies begründet sich in der Verbrauchscharakteristik des Dieselgenerators. Auch wenn der Dieselgenerator keine elektrische Leistung abgibt, beträgt der Treibstoffverbrauch typischerweise noch etwa 30% des Verbrauchs bei Nennleistung.

Andererseits sollten häufige Startzyklen des Dieselmotors vermieden werden, da sonst Schäden am Dieselmotor auftreten können. Deshalb wurden verschiedene Steuerfunktionen für den Dieselmotor bezüglich den erzielbaren Treibstoffeinsparungen und deren Einfluß auf die Diesel Schaltzyklen untersucht [5]. Allerdings ist es bis jetzt unklar, ob auch mit einfachen Wind-Diesel Systemen (Systeme ohne Energiespeicher) hohe Treibstoffeinsparungen möglich sind.

Wir stellen eine Methode vor, mit der die obere Grenze für die Treibstoffeinsparungen, die mit einfachen Wind-Diesel Systemen erreichbar sind, bestimmt werden kann. Wie erwähnt sollten häufige Schaltzyklen des Dieselgenerators vermieden werden. Andererseits ist es schwierig, eine obere Grenze für die zulässige Schaltzyklenhäufigkeit anzugeben, da die Effekte, die durch häufige Schaltzyklen verursacht werden, je nach Motortyp und der Methode des Startens variieren. Daher berechnen wir die erzielbaren Treibstoffeinsparungen für verschiedene Werte der maximalen Schaltzyklenzahl.

## 2 Methode

Als Maß für die Qualität des Systembetriebs stellen wir eine Kostenfunktion  $J = J_m + J_s$  auf. Der erste Term  $J_m$  gibt die Kosten des im betrachteten Betriebszeitraum verbrauchten Treibstoffs an. Da sowohl Windgeschwindigkeit als auch Verbraucherlast stochastische Größen sind, werden die Kosten als Ensemblemittel von verschiedenen Realisationen des Systembetriebs ermittelt:  $J_m = \langle \dot{m} \rangle$ . Der zweite Term  $J_s$  ist dann Null, wenn die Diesel Schaltzyklenrate  $N$  im Ensemblemittel nicht die maximal zulässige Schaltzyklenrate überschreitet, andernfalls ist  $J_s$  unendlich groß:

$$J_s = \begin{cases} 0 & \text{if } \langle N \rangle \leq N_{\max} \\ \infty & \text{if } \langle N \rangle > N_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1 Steuerfunktionen

Es ist die Aufgabe der Steuerfunktionen den Dieselmotor zu bestimmten Zeiten zu starten bzw. auszuschalten. Die optimale Steuerfunktion soll auf diese Weise den Treibstoffverbrauch innerhalb des betrachteten Zeitraums minimieren. Dabei darf die vorgegebene maximale Schaltzyklenrate nicht überschritten werden. Wir nehmen nun an, daß die Entscheidung den Diesel zu Starten von der aktuellen Leistungsbilanz abhängig gemacht werden kann. Während der Diesel gestartet wird, kann die Last von der Rotationsenergie des Rotors der Windanlage oder, falls vorhanden, von einem kleinem Schwungrad, versorgt werden. Die verbleibende Entscheidung ist dann, wann der Diesel ausgeschaltet werden soll.

#### 2.1.1 Optimale Steuerfunktion

Um die optimale Steuerfunktion zu bestimmen, betrachten wir zunächst das System mit kontinuierlich betriebem Dieselmotor. Für einen Betriebszeitraum  $[t_0, t_1]$  der Dauer  $T = t_1 - t_0$  kann die Leistungsbilanz  $P_{diff}(t)$  zwischen der Leistungsabgabe

der Windanlage  $P_{wtg}$ , dem Verbrauch  $P_{load}$  und den Verlusten im System  $P_{loss}$  berechnet werden:

$$P_{diff}(t) = P_{wtg}(t) - P_{load}(t) - P_{loss}(t) \quad (2)$$

Die Nullstellen der Funktion  $P_{diff}(t)$  teilen das Intervall  $[t_0, t_1]$  in Intervalle unterschiedlicher Länge. Sei nun  $\{\tau_i\}$  die Menge der Intervalle mit  $P_{diff}$  positiv,  $\mathcal{N}(T)$  die Anzahl aller Elemente von  $\{\tau_i\}$  und  $\mathcal{N}(\tau)$  die Anzahl der Elemente, die eine Dauer kleiner als  $\tau$  haben. Für eine Ensemble von Realisationen des Systembetriebs kann nun folgende Wahrscheinlichkeitsfunktion definiert werden:

$$F_\tau(\tau) \stackrel{\text{def}}{=} \langle \mathcal{N}(\tau) / \mathcal{N}(T) \rangle \quad (3)$$

Mit der in Gl. (1) gegebene Kostenfunktion sollte jedem Dieselausschaltvorgang eine möglichst lange Zeit folgen, während dieser der Diesel nicht betrieben werden muß, der Diesel sollte also zu Beginn der längsten Intervalle aus  $\{\tau_i\}$  ausgeschaltet werden. Nach Gl. (3) haben diese Intervalle mindestens eine Länge  $\tau_{opt}$  gegeben durch:

$$(1 - F_\tau(\tau_{opt})) \langle \mathcal{N}(T) \rangle = N_{\max} \quad (4)$$

Damit läßt sich die optimale Steuerfunktion  $s_{opt}(t)$  schreiben als:

$$s_{opt}(t) : \text{Motor nur aus wenn} \\ P_{diff}(t') \geq 0 \quad \forall t' \in [t, t + \tau_{opt}] \quad (5)$$

### 2.1.2 Suboptimale Steuerfunktion

Die Steuerfunktion  $s_{opt}$  setzt die Kenntnis der zukünftigen Entwicklung der Leistungsbilanz  $P_{diff}(t)$  voraus und ist daher in realen Systemen nicht anwendbar. Daher definieren wir eine zweite Steuerfunktion  $s_{per}$ , die eine Persistenzvorhersage für die Länge des Intervalls mit  $P_{diff} > 0$  macht:

$$s_{per}(t) : \text{Motor nur aus wenn} \\ P_{diff}(t') \geq 0 \quad \forall t' \in [t - \tau_{opt}, t] \quad (6)$$

## 2.2 Schätzfunktionen

Für die eingeführten Steuerfunktionen können einfache Schätzfunktionen für den Treibstoffverbrauch angegeben werden. Dazu muß die Zeitreihe der Leistungsbilanz  $P_{diff}(t)$  bekannt sein. Sie kann z.B. durch eine Systemsimulation ermittelt werden. Der momentane Treibstoffverbrauch kann dann aus  $P_{diff}(t)$  berechnet werden.

Für den kontinuierlichen Betrieb des Dieselgenerators kann der Treibstoffverbrauch geschrieben werden als:

$$\langle \dot{m}_{con} \rangle = \langle \dot{m}_{basis} \rangle + \langle \dot{m}_{idle} \rangle \quad (7)$$

Hier ist  $\langle \dot{m}_{basis} \rangle$  der Treibstoffverbrauch wenn  $P_{diff}(t) < 0$  und  $\langle \dot{m}_{idle} \rangle$  der Treibstoffverbrauch wenn  $P_{diff}(t) \geq 0$ . Wenn  $P_{diff} \geq 0$  wird der Diesel bei der vorgegebenen Mindestlast betrieben, der Treibstoffverbrauch  $\dot{m}_{idle}$  ist daher proportional zur Leerlaufzeit des Dieselmotors.

### 2.2.1 Treibstoffverbrauch bei optimaler Steuerung

Um den Treibstoffverbrauch des Dieselmotors bei Verwendung der optimalen Steuerung zu bestimmen betrachten wir die relative Stillstandszeit des Dieselmotors:  $\langle \tilde{t}_{nop} \rangle = \langle t_{nop} \rangle / T$ . Die Stillstandszeit  $t_{nop}$  ist durch die Summe der Intervalle  $\tau_i$ , die eine Länge größer als  $\tau_{opt}$  haben, gegeben. Um  $\langle \tilde{t}_{nop} \rangle$  von  $F_\tau(t)$  abzuleiten führen wir eine weitere Funktion ein:

$$G_\tau(\tau) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\langle \mathcal{N}(T) \rangle}{T} \int_\tau^T f_\tau(t') t' dt' \quad (8)$$

Mit  $f_\tau(\tau) = dF_\tau(\tau)/d\tau$ . Die relative Stillstandszeit bei Verwendung von  $s_{opt}$  ist also durch  $\langle \tilde{t}_{nop} \rangle = G_\tau(\tau_{opt})$  gegeben und daher:

$$\langle \dot{m}_{opt} \rangle = \langle \dot{m}_{basis} \rangle + \left( 1 - \frac{G_\tau(\tau_{opt})}{G_\tau(0)} \right) \langle \dot{m}_{idle} \rangle \quad (9)$$

### 2.2.2 Treibstoffverbrauch bei suboptimaler Steuerung

Der Treibstoffverbrauch, der sich bei Anwendung von  $s_{per}$  ergibt, kann auf ähnliche Weise bestimmt werden:  $s_{per}$  verursacht die gleiche Anzahl von Schaltzyklen für das Dieselaggregat, der Treibstoffverbrauch ist jedoch größer: Bevor der Dieselmotor ausgeschaltet wird, wird er zusätzlich die Zeit  $\tau_{opt}$  im Leerlauf betrieben, daher gilt:

$$\langle \dot{m}_{per} \rangle = \langle \dot{m}_{basis} \rangle + \left( 1 - \frac{G_\tau(\tau_{opt})}{G_\tau(0)} + \frac{N_{\max} \tau_{opt}}{T G_\tau(0)} \right) \langle \dot{m}_{idle} \rangle \quad (10)$$

## 3 Ergebnisse

Um den Einfluß der vorgestellten Steuerfunktionen auf die Treibstoffeinsparungen zu untersuchen, wenden wir die Steuerfunktionen in einer numerischen Systemsimulation an und berechnen auch die eben angegebenen Schätzfunktionen. Das verwendete Simulationsmodell beschreibt einfache Wind-Diesel Systeme, die aus einem Dieselgenerator mit Synchronmaschine (30 kW Nennleistung), einer Wind Anlage mit Asynchronmaschine (30 kW oder 60 kW Nennleistung), einer regelbaren Blindlast und einer Verbraucherlast bestehen. Das Simulationsmodell wurde in Anlehnung an das AWIDIMOD Modell, Option 1 [8] entwickelt.

### 3.1 Validierung des numerischen Modells

Um das numerische Modell zu validieren und um die verschiedenen Steuerfunktionen zu testen haben wir eine Reihe von Experimenten an dem experimentellen Wind-Diesel System des Deutschen Windenergie Instituts DEWI durchgeführt. Das System bietet die Möglichkeit Systeme mit verschiedenen Konfigurationen zu testen [3]. Um die Steuerfunktionen unter reproduzierbaren Bedingungen durchzuführen, haben wir anstelle einer Windanlage den Echtgrößensimulator für Windanlagen verwendet. Es wurde gezeigt,

Steuerfunktion	el. Leistung Diesel		Treibstoffverbrauch		Diesel Starts
	[kW]	$\Delta$ [%]	[ $l h^{-1}$ ]	$\Delta$ [%]	
M $s_{con}$	6.09	–	4.13	–	0
S $s_{con}$	6.07	-0.3	4.11	-0.5	0
M $s_{min}$	4.38	–	2.93	–	41
S $s_{min}$	4.36	-0.5	2.96	+1.0	40
M $s_{opt}$	4.15	–	2.86	–	12
S $s_{opt}$	4.25	+2.4	2.87	+0.4	12
M $s_{per}$	5.12	–	3.55	–	12
S $s_{per}$	4.92	-3.9	3.33	-6.2	13

Tabelle 1: Vergleich zwischen gemessenen Werten (M) und Werten aus einer numerischen Systemsimulation (S).  $\Delta$  gibt die relative Abweichung der berechneten zu den gemessenen Werten an.

daß die Leistungsabgabe des Simulators sehr ähnlich zu derjenigen der simulierten Windanlagen (in unserem Fall einer HSW 30) ist [2].

Für jede der untersuchten Steuerfunktionen wurde das System für einen Zeitraum von 12 h betrieben. Die untersuchten Steuerfunktionen sind:  $s_{con}$  – kontinuierlicher Betrieb des Dieselgenerators,  $s_{min}$  – eine Kontrollfunktion bei der der Diesel mindestens 10 Minuten betrieben werden muß, bevor er ausgeschaltet werden darf,  $s_{opt}$  und  $s_{per}$  wie in Gln. (5) und (6) gegeben: Hier wurde  $\tau_{opt} = 10s$  gewählt.  $s_{opt}$  wurde realisiert, indem vor dem Experiment die Zeitreihe der Leistungsabgabe des Windanlagensimulators analysiert wurde.

Für die Verbraucherlast wurde ein konstanter Wert von 8 kW gewählt, als Mindestlast für den Dieselgenerator wurden 6 kW vorgegeben. Die Zeitreihe der Windgeschwindigkeit, die verwendet wurde um den Windanlagensimulator zu betreiben, wurde auf dem Testfeld gemessen, der Mittelwert beträgt  $8.6ms^{-1}$ . Der untersuchte Systembetrieb ist daher typisch für eine Situation mit guten Windbedingungen und geringer Verbraucherlast.

Die wichtigsten Ergebnisse der Experimente sind zusammen mit den Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen in Tab. 1 gezeigt. Die Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten ist offensichtlich. Es ist daher zu erwarten, daß die Werte, die mit dem Simulationsmodell erzielt werden, dicht an den Betriebsdaten von realen Systemen liegen.

### 3.2 Qualität der Schätzfunktionen und Vergleich der Steuerfunktionen

Um die Qualität der in Gl. (9) und (10) angegebenen Schätzfunktionen zu überprüfen wurden die Steuerfunktionen  $s_{opt}$  und  $s_{per}$  in einer numerischen Systemsimulation mit verschiedenen Werten des Steuerparameters  $\tau_{opt}$  angewendet.

Eingangsdaten für das Modell sind Zeitreihen von Verbraucherlast und Windgeschwindigkeit. Die Verbraucherlast wird durch eine periodische Funktion mit der Periode von einem Tag beschrieben. Das Verhältnis von mittlerer Last zu maximaler Last ist 2.2, der Mittelwert 13 kW. Die verwendete Zeitrei-

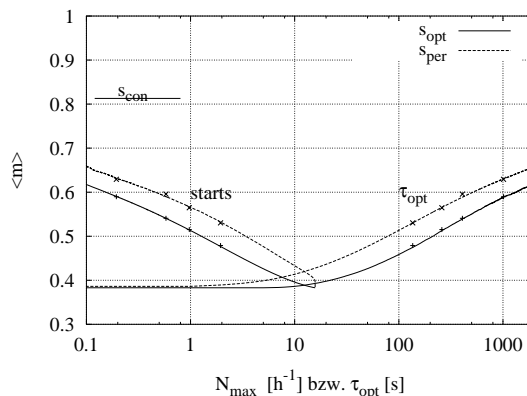


Abbildung 1: Vergleich der Werte aus einer numerischen Systemsimulation (Kreuze) mit den Werten der Schätzfunktionen (Linien, Gln. 9, 10). Der Treibstoffverbrauch ist hier angegeben relativ zu einem System ohne Windanlage für verschiedene Werte des Steuerparameters  $\tau_{opt}$  bzw. der maximalen Dieselstartzyklenrate  $N_{max}$ .

he der Windgeschwindigkeit erstreckt sich über einen Zeitraum von 3 Monaten mit einer Zeitaufösung von ungefähr 1 s. Die Methode zur Generierung der Zeitreihe aus stündlichen Werten ist in [1] angegeben.

Die primären Daten der Windgeschwindigkeit wurden in der Nähe der Nordseeküste gemessen. Die Systemsimulation umfaßt einen Zeitraum von 3 Monaten. Unter den Windbedingungen ( $\bar{u} = 7.0ms^{-1}$  in Nabenhöhe) beträgt die mittlere Leistungsabgabe der Windanlage (60 kW Nennleistung) 23.9 kW. Die Ergebnisse der Simulation für den 3-monatigen Betrieb des Systems zusammen mit den Schätzfunktionen sind in Abb. 1 gezeigt. Die Werte der Schätzfunktionen liegen dicht an den Werten, die sich aus der numerischen Systemsimulation ergeben.

Wie in dem Bild zu sehen, sind die Unterschiede zwischen  $\langle \dot{m}_{opt} \rangle$  und  $\langle \dot{m}_{per} \rangle$  relativ gering und über einen großen Bereich der zulässigen Dieselstartzahlen konstant. Die maximale relative Verbesserung von  $\langle \dot{m}_{opt} \rangle$  gegenüber  $\langle \dot{m}_{per} \rangle$  beträgt 11%. Die Treibstoffeinsparungen, die mit der Steuerfunktion  $s_{per}$  erzielt werden können, liegen demnach sehr nahe bei der oberen Grenze der Treibstoffeinsparungen, die durch  $\langle \dot{m}_{opt} \rangle$  gegeben ist.

### 3.3 Vergleich mit Speichersystem

Die Schätzfunktionen für den Treibstoffverbrauch des Systems an zwei verschiedenen Standorten sind in Abb. 2 gezeigt: Die Daten der Windgeschwindigkeit, die für diese Rechnungen verwendet wurden, umfassen einen Zeitraum von 6 Monaten und sind von einem Standort an der Nordseeküste ( $\bar{u} = 6.4ms^{-1}$ ) und von Las Palmas ( $\bar{u} = 10.2ms^{-1}$ ). Die primären Winddaten für Las Palmas wurden [9] entnommen, Zeitreihen der Stundenmittelwerte wurden mit einer in [4] angegebenen Methode generiert. Mit diesen Daten beträgt die mittlere Leistungsabgabe der Wind-

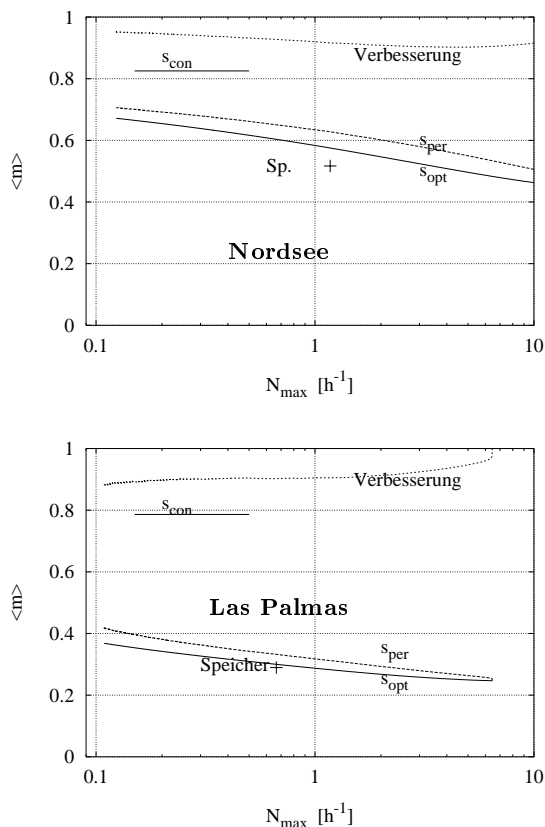


Abbildung 2: Schätzfunktionen für  $\langle \dot{m}_{opt} \rangle$  und  $\langle \dot{m}_{per} \rangle$  als Funktion der zulässigen Diesel Schaltzyklenrate sowie relative Verbesserung von  $\langle \dot{m}_{opt} \rangle$  gegenüber  $\langle \dot{m}_{per} \rangle$ . Zusätzlich gezeigt ist der Wert für ein System mit Energiespeicher, der aus einer numerischen Systemsimulation ermittelt wurde.

anlage (60 kW Nennleistung) 19.7 kW (Nordsee) bzw. 38.6 kW (Las Palmas). Der Vorteil des Standorts mit der höheren Windgeschwindigkeit ist offensichtlich.

Um den Einfluß eines Energiespeichers auf das Treibstoffeinsparpotential zu untersuchen, haben wir ein System mit Energiespeicher und einfacher Steuerung untersucht. In unserem Beispiel ist die Speicherkapazität so gewählt, daß der Speicher alleine die mittlere Verbraucherlast für einen Zeitraum von 10 Minuten versorgen kann.

Bei gleichen Dieselstartzahlen hat das System mit Energiespeicher an beiden Standorten einen geringeren Treibstoffverbrauch als das System ohne Speicher. Die Unterschiede sind jedoch gering. Daher müssen möglicherweise weitere Kriterien herangezogen werden, um die geeignete Systemkonfiguration auszuwählen.

#### 4 Zusammenfassung

Wir haben eine Methode vorgeschlagen, mit der die maximale Treibstoffeinsparung, die mit einfachen Wind-Diesel Systemen erreichbar ist, bestimmt wer-

den kann. Auf Basis der statistischen Eigenschaften der Leistungsbilanz Windproduktion – Verbrauch kann eine optimale Steuerfunktion für den Dieselgenerator identifiziert werden. Diese minimiert für vorgegebene Dieselschaltzyklen den Treibstoffverbrauch des Generators. Es konnte gezeigt werden, daß eine suboptimale, aber einfach realisierbare Steuerung nur zu geringfügig höheren Verbräuchen führt. Das Verhalten der Steuerungsfunktionen im Betrieb und der daraus ableitbaren Treibstoffverbrauchsdaten konnte mit Hilfe eines Echtgrößensimulators eines Wind-Diesel Systems validiert werden.

Ein Vergleich zeigt, daß mit den hier behandelten einfachen Systemen im allgemeinen geringere Treibstoffeinsparungen erzielt werden können als mit Speichersystemen. An guten Standorten und für eine große Zahl vor erlaubten Schaltzyklen sind die Treibstoffeinsparungen der einfachen Systeme jedoch in der gleichen Größenordnung wie die der Speichersysteme.

#### Literatur

- [1] H.G. Beyer, T. Degner und H. Gabler. Operational Behaviour of Wind Diesel Systems Incorporating Short-Term Storage — an Analysis via Simulation Calculations. *Solar Energy*, 54(6):429–439, 1995.
- [2] H.G. Beyer, T. Degner, G. Gerdes, K. Mönnich und F. Santjer. Experimental Results from the DEWI Wind Diesel Testsite. In *Proc. European Wind Energy Conference, Thessaloniki*, Seiten 1030–1033, 1994.
- [3] H.G. Beyer, T. Degner, G. Gerdes und F. Santjer. Experimental Wind-Diesel System at the German Institute for Wind Energy — Layout of the Storage Unit and First Operational Experience. In *Proc. European Wind Energy Conference, Travemünde*, Seiten 339–342, 1993.
- [4] H.G. Beyer und K. Nottebaum. Synthesis of Long Term Hourly Wind Speed Time Series on the Basis of the European Wind Atlas Data. *Solar Energy*, 54(5):351–355, 1995.
- [5] D.G. Infield. A Wind/Diesel System Operating with Flywheel Storage. In *Proc. European Community Wind Energy Conference, Herning*, Seiten 367–372, 1988.
- [6] R. Lemoine und J. Hiller. Ergebnisse des modularen Wind-Diesel Systems in Emden. In *Proc. 2. Deutsche Windenergie Konferenz, Wilhelmshaven*, Seiten 325–330, 1994.
- [7] P. Lundsager und P. Nørgaard. The 55/33 kW Experimental Wind/Diesel System at Risø National Laboratory. In *Proc. European Community Wind Energy Conference, Herning*, Seiten 373–379, 1988.
- [8] J.T.G. Pierek. AWIDIMOD — A computer program for the dynamic analysis of Autonomous Wind-Diesel Systems. Dokumentation, Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Petten, 1989.
- [9] I. Troen und E.L. Peterson. *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory, 1989.