

Optimierung der Konfiguration von Windparks mit variabler WEK-Anzahl

Hans Georg Beyer*, Torsten Rüger, Gisela Schäfer, Hans-Peter Waldl

Abteilung Energie- und Halbleiterforschung, Fachbereich Physik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Postfach 2503, 26111 Oldenburg, Fax 0441/798-3326
e-mail: igor@ehf.physik.uni-oldenburg.de

*z.Z.: Groupe Teledetection et Modélisation, Ecole des Mines de Paris, Sophia-Antipolis, France

Zusammenfassung

Bei der Planung eines Windparks müssen die durch Abschattungseffekte verursachten Verluste in der Energieproduktion berücksichtigt werden. Der Energieertrag der einzelnen Windenergiekonverter in einem Park hängt von der Gesamtanzahl der Turbinen und von ihrer geometrischen Anordnung ab. Der erzielbare betriebswirtschaftliche Gewinn ist eine Funktion dieses Energieertrags und der Investitionskosten, welche überwiegend durch die WEK-Anzahl bestimmt werden. Dementsprechend hängt der ökonomische Erfolg eines Windparks von der Anzahl errichteter WEK und von den Verlusten ab, die aus der gegenseitigen Abschattung der Turbinen resultieren. Diese können durch den Parkwirkungsgrad ausgedrückt werden. Wir präsentieren eine Optimierungsmethode zur automatisierten Identifikation von Kombinationen der WEK-Anzahl und -Geometrie, welche einen maximalen Gewinn ergeben. Diese Methode basiert auf Genetischen Algorithmen.

In mehreren Fällen bestimmt die automatisierte Optimierung Gewinne, die sich von den Ergebnissen von 'Expertenaufstellungen' von Hand nicht wesentlich unterscheiden.

Es existieren jedoch Fälle, in denen die Optimierung eine WEK-Anzahl findet, die stark von der WEK-Anzahl der Expertenaufstellung differiert und zu deutlich höheren Gewinnen führt.

1 Einleitung

Um den Jahresenergieertrag eines Windparks mit einer festen Anzahl von Turbinen zu optimieren, präsentierten wir in [1], [2] eine Methode, die auf Evolutionsstrategien basiert. Für eine gegebene Parkgrundfläche und eine gegebene Anzahl von Turbinen wird dieser Energieertrag von der geometrischen Anordnung der WEK beeinflusst. Der Algorithmus identifiziert optimale Koordinaten für die WEK-Standorte.

Um den Energieertrag eines Windparks im Vergleich zur Einzelaufstellung der WEK zu charakterisieren, verwenden wir den Parameter 'Parkwirkungsgrad'. Er ist definiert als das Verhältnis des gesamten Jahresenergieertrages des Parks zur Summe der Jahresenergieerträge der gleichen Anzahl von frei aufgestellten Turbinen. In dieser Optimierungsmethode wurde der Parkwirkungsgrad mit dem Riso-Modell (vgl. [3]) bestimmt.

Bei der Planung eines Windparks ist nicht der Parkwirkungsgrad der wichtigste Parameter, sondern

der mögliche betriebswirtschaftliche Gewinn. Er hängt sowohl vom Parkwirkungsgrad, bestimmt durch die geometrische Konfiguration, als auch von der Gesamtanzahl der Turbinen ab, da diese die Investitionskosten dominiert.

Wenn die Anzahl von WEK fest ist, ist der Gewinn im wesentlichen proportional zum Wirkungsgrad. Daher kann man die Optimierung mit Evolutionsstrategien, welche die vorgegebene WEK-Anzahl während eines Optimierungslaufes nicht verändern, mehrfach auf verschiedene Anzahlen anwenden. Der Vergleich der Gewinne der verschiedenen optimierten Konfigurationen ergibt dann die beste Konfiguration und WEK-Anzahl. Ein Beispiel der sich ergebenden Gewinne ist in Abbildung 1 dargestellt.

Methoden zur direkten Identifikation der optimalen WEK-Anzahl in Kombination mit der entsprechenden geometrischen Konfiguration in einem Optimierungslauf in Bezug auf ein ökonomisches Optimum wurden z.B. in [4] präsentiert. Wir nutzen einen solchen Ansatz, der auf Genetischen Algorithmen basiert.

Als Maß für die Qualität eines Windparks verwenden wir den betriebswirtschaftlichen Gewinn nach den üblichen Berechnungsmethoden.

2 Optimierungsmethode

2.1 Darstellung des Systems

Bei Evolutionsstrategien wird das zu optimierende System durch einen Satz von n Variablen repräsentiert, die kontinuierliche Werte annehmen können. Im Fall einer zweidimensionalen Suche müssen $n = N \times 2$ Variablen betrachtet werden (N : WEK-Anzahl). In unserem Fall sind diese Variablen die x - und y -Koordinaten der WEK auf der Parkgrundfläche. Jede Parkkonfiguration wird durch einen Punkt in diesem n -dimensionalen Suchraum repräsentiert. Während der

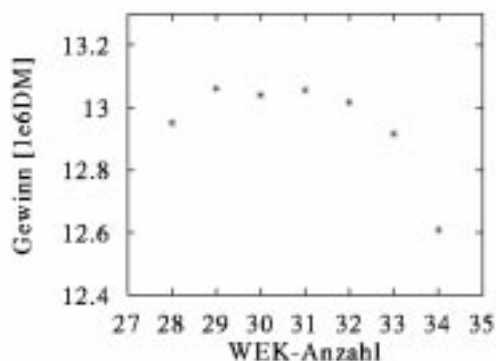


Abb. 1: Gewinn in Abhängigkeit von der Anzahl der WEK

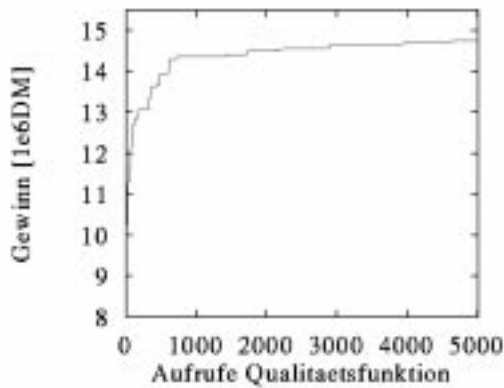


Abb. 2: Entwicklung des Gewinns während eines Optimierungslaufes

Optimierung ist die Dimension n des Problems (und damit die WEK-Anzahl) fest.

Um N variieren zu können, ist eine andere Darstellungsweise des Problems notwendig. Eine Parkkonfiguration kann durch einen Satz binärer Variablen beschrieben werden. Jede Variable ist mit einem Paar von festen (x,y) -Koordinaten innerhalb der Begrenzungslinie der Parkgrundfläche verknüpft. Diese Variablen können die Werte 0 oder 1 (kein WEK / WEK) annehmen. Die Anzahl dieser Punkte, die Dimension des Problems, hängt von der Parkgrundfläche und von der Wahl der Abstände im (x,y) -Gitter ab.

2.2 Methode

Genetische Algorithmen basieren ebenso wie Evolutionsstrategien auf Ideen, welche sich an der biologischen Evolutionstheorie orientieren. Sie wurden von Holland (vgl. [5]) in den 70er Jahren entwickelt.

Die Optimierung startet mit μ Zufallskonfigurationen des Parks gleichzeitig. Für jede Konfiguration wird der Wert der Qualitätsfunktion bestimmt. Die 'besten' α Parks werden für die nächste Iteration gespeichert. Hierbei sind typische Werte für α z.B. 2 und für μ z.B. 8. Dann werden aus allen μ Parks ($2 \times (\mu - \alpha)$) Parks mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu ihrer Qualität (d.h. dem Wert der Qualitätsfunktion) ausgewählt. Mehrfachauswahlen sind hierbei nötig. Die ausgewählten Parks werden in Paare sortiert. Die Information jedes Paares (= zwei Sätze binärer Variablen) wird zu einer neuen Parkkonfiguration kombiniert.

An diesen $(\mu - \alpha)$ neuen Parks werden kleine zufällige Veränderungen durchgeführt. Diese leicht veränderten Parks zusammen mit den α besten Parks bilden die Basis für die nächste Iteration. Die Verwendung von zufälligen Veränderungen zusammen mit der Kombination mehrerer Parkkonfigurationen reduziert die Wahrscheinlichkeit, in einem lokalen Optimum 'steckenzubleiben'.

Die Entwicklung des Wertes der Qualitätsfunktion eines Parks während eines Optimierungslaufes ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Optimierungsprozess startet mit einer Zufallskonfiguration mit sehr geringem Gewinn. Während der ersten Optimierungsschritte zeigt sich ein steiler Anstieg. Dann wird die Zunahme geringer, bis der Gewinnwert konvergiert.

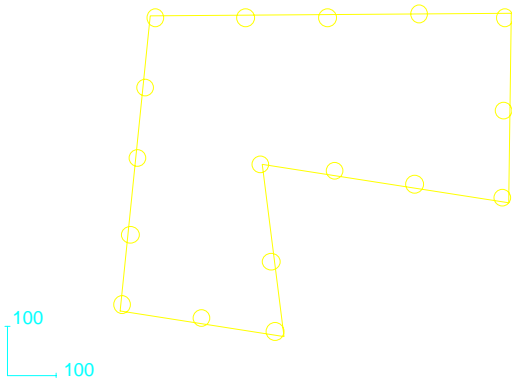


Abb. 3: Park 1, Expertenaufstellung (N=17)

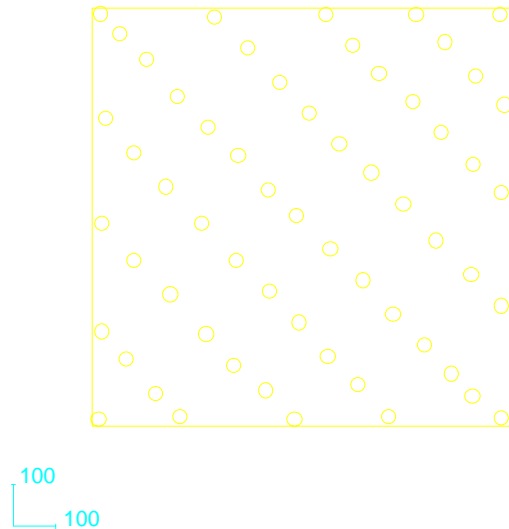


Abb. 4: Park 2, Expertenaufstellung (N=59)

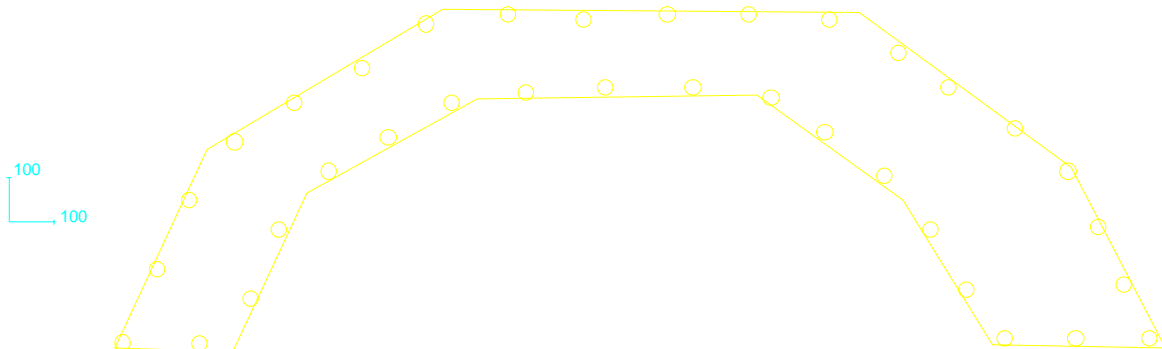


Abb. 5: Park 3, Expertenaufstellung (N=35)

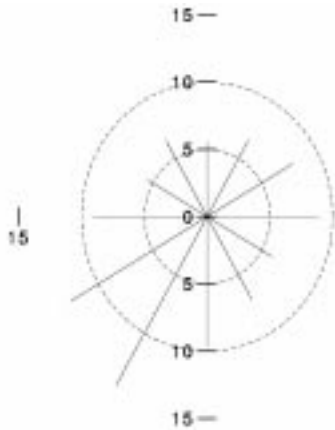


Abb. 6: Windrichtungsverteilung (prozentuale Häufigkeit für 12 Sektoren). Die mittlere Windgeschwindigkeit in 50 m Höhe beträgt 6.7 m/s.

3 Ergebnisse

3.1 Beispiele

Als Beispiele untersuchten wir drei Parks mit verschiedenen Formen und Größen der Parkgrundfläche (Abbildung 3–5).

Die Windrichtungsverteilung entspricht einem norddeutschen Küstenstandort; sie ist in Abbildung 6 dargestellt. Der betrachtete WEK-Typ hat eine Nennleistung von 450 kW, eine Nabenhöhe von 42 m und einen Rotordurchmesser von 37 m.

Zu Vergleichszwecken sind in den Abbildungen 3 – 5 'Expertenanstellungen' für die Konfiguration der

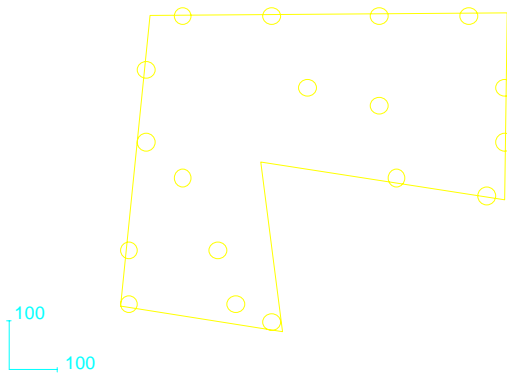


Abb.7: Park 1, optimiert mit Genetischen Algorithmen (N=18)

	Park 1		Park 2		Park 3	
	Exp.	opt.	Exp.	opt.	Exp.	opt.
N	17	18	59	33	35	32
G	7.71	7.87	-12.82	13.10	14.42	15.06
η	90.7	89.8	78.0	88.9	89.8	90.6
F	$(3.9 D)^2$	$(3.8 D)^2$	$(3.5 D)^2$	$(4.7 D)^2$	$(3.6 D)^2$	$(3.8 D)^2$

Tab. 1: Ergebnisse des Vergleichs Expertenanstellungen \Leftrightarrow optimierte Konfigurationen. N: WEK-Anzahl, G: betriebswirtschaftlicher Gewinn [10^6 DM], η : Parkwirkungsgrad [%], F: mittlere Flächenbelegungsichte des Parks (D: Rotordurchmesser).

Windparks dargestellt, welche typische Werte für die mittlere Flächenbelegungsichte der Parks verwenden $(1 \text{ WEK pro Fläche von } (3 D)^2 - (4 D)^2$, D: Rotordurchmesser; vgl. Tabelle 1). In zwei Fällen führt die Optimierung mit Genetischen Algorithmen zu nur marginalen Verbesserungen im Vergleich zu den Expertenanstellungen (Abbildungen 7 und 9, Tabelle 1). Hier differiert die optimale WEK-Anzahl nicht stark von der angenommenen Anzahl. In einem Fall jedoch ist die optimale WEK-Anzahl deutlich kleiner als die Anzahl, die der Standard-

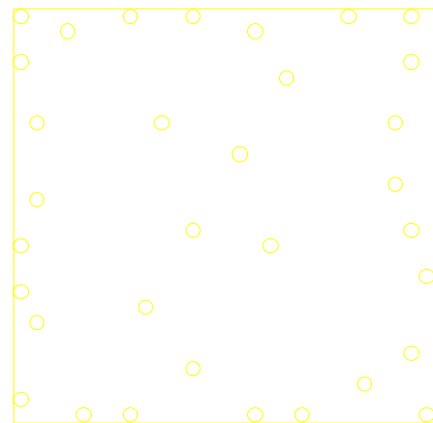


Abb. 8: Park 2, optimiert mit Genetischen Algorithmen (N=33)

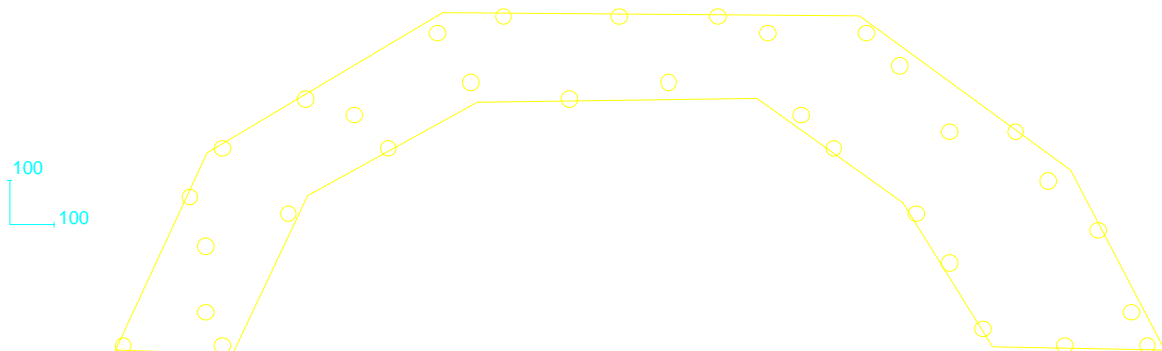


Abb. 9: Park 3, optimiert mit Genetischen Algorithmen (N=32)

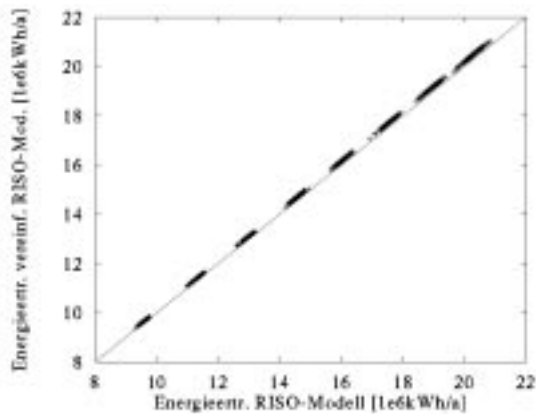


Abb. 10: Vergleich Risø-Modell und vereinfachtes Risø-Modell. Der jährliche Energieertrag ist für 1000 zufällige Parkkonfigurationen aufgetragen. Beide Modelle stimmen gut überein.

Flächenbelegungsichte entspricht (vgl. Abbildung 8, Tabelle 1). Die qualitative Veränderung im Verhalten des Parks ist offensichtlich.

3.2 Rechenzeit

Um eine Lösung für ein Optimierungsproblem mit einer solch hohen Dimension (z.B. 261, 494 und 729 in den Beispielen) zu erhalten, müssen Tausende von Parkkonfigurationen bewertet werden. Die dazu nötige Rechenzeit hängt sehr stark von der Komplexität der Berechnungsfunktion für den Qualitätswert ab. Bei der Optimierung der Beispielparks wurde die Qualitätsfunktion je 5000 mal ausgewertet. Das führt, in Abhängigkeit von der mit der Parkgröße variierenden Dimension, zu Rechenzeiten im Bereich von einigen Stunden bis zu Tagen (HPUX Workstation). Um diesen Prozeß zu beschleunigen, haben wir versucht, eine einfache (und daher schnelle), aber gute Näherung für die Qualitätsfunktion zu finden. Die von uns gewählte Möglichkeit hierzu besteht in der Vereinfachung des verwendeten Risø-Park-Modells zur Bestimmung des jährlichen Energieertrags als Basis für die Wirtschaftlichkeitsberechnung. Eine dementsprechende Modifikation dieses Verfahrens unter Vernachlässigung einiger Details der Windverhältnisse am Standort wurde in [6] entwickelt und in [7] überprüft. Die weitgehende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen dieser Vereinfachung und dem Risø-Modell wird für 1000 zufällig Parkkonfigurationen in Abbildung 10 dargestellt. Daher ist der Optimierungsverlauf mit beiden Modellen nahezu gleich. Die Rechenzeit wird dadurch um den Faktor 5 reduziert.

3.3 Zusätzliche Randbedingungen

Der Vorteil der automatisierten Optimierung im Vergleich zur manuellen Auswahl einer Parkkonfiguration wird noch deutlicher, wenn zusätzliche Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die Begrenzung von Schallimmissionswerten an Wohngebäuden in der Umgebung des Windparks. Einschränkungen dieser Art können in die Optimierung einfließen, indem während des Optimierungsverlaufes erzeugte Parkkonfigurationen verworfen werden, wenn sie die Randbedingungen nicht erfüllen.

4 Fazit

Die vorgestellte, auf Genetischen Algorithmen basierende Methode ist für die automatisierte Optimierung von Windparks hinsichtlich ihrer Ökonomie geeignet. Der Algorithmus identifiziert sowohl die optimale WEK-Anzahl als auch ihre beste geometrische Anordnung. Er ist besonders nützlich, wenn die optimale WEK-Anzahl für eine vorgegebene Parkgrundfläche nicht offensichtlich ist. Darüber hinaus können zusätzliche Randbedingungen wie akustische Grenzwerte einfließen.

Literatur

- [1] H. G. Beyer, T. Rüger, W. Schlez, H.-P. Waldl: Optimizing the Geometrical Arrangement of Windfarms. Proc. EWEC 1994
- [2] T. Rüger: Optimierung der Konfiguration von Windparks. Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1994
- [3] N. O. Jensen: A note on wind generator interaction. Risø Technical report M-2411, 1983
- [4] G. Mosetti, C. Poloni, B. Diviacco: Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994/1
- [5] J. Holland: Adaption in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975
- [6] H.-P. Waldl: Modellierung und Optimierung von Windparks. Dissertation (in Vorbereitung), Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1996
- [7] G. Schäfer: Vergleich von Evolutionsstrategien und Genetischen Algorithmen für die Optimierung der Konfiguration von Windparks hinsichtlich technischer und ökonomischer Optimierungsziele. Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 1996