

# Ein Verfahren zur Auswahl der geometrischen Konfiguration von Windparks

A procedure for the choice of the geometric configuration of a wind farm

Beyer, Hans Georg; Rüger, Torsten; Waldl, Hans-Peter, FB Physik, Universität Oldenburg

## Summary

*This procedure allows for automatic configuration of larger wind farms. In addition to the criterion "maximum efficiency of the farm" discussed below, further optimization criteria can be included. Therefore it is necessary that the chosen quality criterion can be determined as function of a given farm configuration. Other restrictions for optimization of the installation's geometry can be applied in the same way.*

*With financial backing of the state of Lower Saxony the University of Oldenburg develops a user friendly software for the design and optimization of wind farms in order to give access to this optimisation method. The programme allows interactive set up and modification of farm area, of position of wind turbines, and of acoustic reference points. Apart from automatic optimization of wind farm layout, it is possible to calculate the annual energy yield as well as acoustic emission in the vicinity of the wind farm. Windturbines of different makes and hub height can be used within a given farm configuration. The programme is in the development phase and will possibly be available in the first quarter of 1995.*

## 1. Einleitung

Mit dem zunehmenden Ausbau der Windenergienutzung stellt sich das Problem der optimalen Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Flächen. Es werden Verfahren benötigt, die eine schnelle Auswahl der Konfiguration von Windparks auf den ausgewiesenen Flächen unter Berücksichtigung vorgegebener Bewertungsfunktionen (Energieertrag, spezifische Investitionen etc.) und Randbedingungen (z.B. Schallimmission an vorgegebenen Punkten) erlauben. Wir stellen hier eine Methode vor, mit der eine Optimierung der Aufstellungsgeometrie von Windparks hinsichtlich des Energieertrags durchgeführt werden kann. Dabei ist es möglich, die Einhaltung von Grenzwerten der akustischen Belastung an umliegender Wohnbebauung mit zu berücksichtigen. In den folgenden Abschnitten werden einige Grundlagen zur Bestimmung des Energieertrags unterschiedlicher Windparkkonfigurationen erläutert. Das Optimierungsverfahren wird vorgestellt und Ergebnisse für die Optimierungsfunktion 'Energieertrag' werden diskutiert. Abschließend wird die Berücksichtigung der akustischen Randbedingungen beschrieben.

## 2. Bestimmung des Energieertrags von Windparks

Die kompakte Aufstellung von Windenergieanlagen in einem Windpark kann zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Anlagen führen. In der Regel arbeitet ein Teil der Anlagen in einer Windströmung, die bereits durch vorstehende Anlagen beeinflusst ist (Abb.1). In Abhängigkeit von der Windrichtung wird

dadurch die momentane Leistungsabgabe und damit der Jahresenergieertrag dieser Anlagen vermindert. Eine typische Messung dieses Effekts ist in Abb. 2 dargestellt. Zur Beschreibung des Betriebsverhaltens des Gesamtparks wird hier die Größe 'Parkwirkungsgrad' verwendet. Sie gibt das Verhältnis der Leistungsabgabe des Parks zur theoretischen Leistungsabgabe einer gleichen Anzahl von ungestört angeströmten Anlagen an.

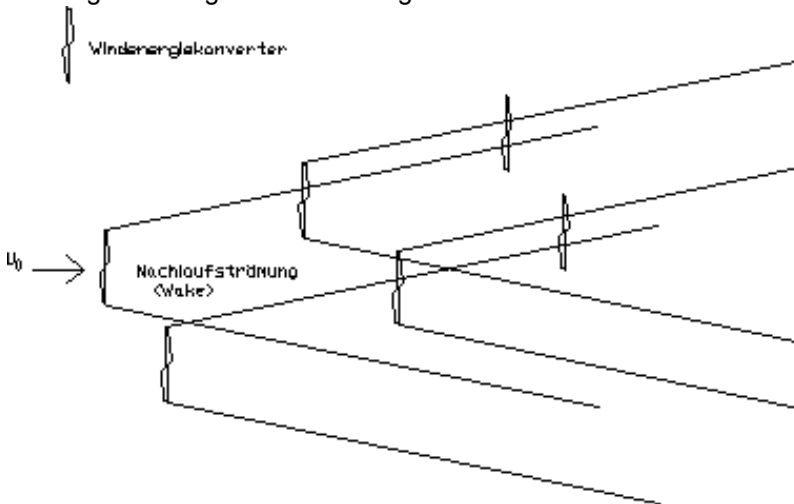


Abb.1: Diese Abbildung gibt eine schematische Darstellung der Strömungsverhältnisse in einem Windpark. Hinter jeder Anlage bildet sich eine Nachlaufzone (Wake) in der die Windgeschwindigkeit vermindert ist. Anlagen, die in dieser Nachlaufströmung arbeiten, zeigen eine entsprechend verminderte Leistungsabgabe.

Fig. 1.: Schematic outline of the flow conditions in a wind farm. Behind each turbine a wake is generated in which the wind speed is reduced. Wind turbines operating within a wake show a corresponding reduction of power output.

Der Parkwirkungsgrad ist von der geometrischen Anordnung der Anlagen, der relativen Windrichtung und der Windgeschwindigkeit in der ungestörten Strömung abhängig. Daneben beeinflusst das Betriebsverhalten der Anlagen die Größe der auftretenden Effekte.

Zur Modellierung des Parkwirkungsgrades wurden verschiedene Methoden entwickelt [1,2,3]. Sie unterscheiden sich in der Detaillierung der Beschreibung der turbulenten Windströmung innerhalb des Parks. Ein vergleichsweise einfaches Modell, das eine schnelle Ermittlung des Parkwirkungsgrades erlaubt, ist das Verfahren von Jensen [1,4]. Die Nachlaufströmung der Windenergieanlagen wird durch ein einfaches geometrisches Modell in Verknüpfung mit der strömungsmechanischen

Massenerhaltungsgleichung beschrieben. Dieses Verfahren ist z.B. in dem weit verbreiteten Computerprogramm 'Park' implementiert, das im Paket mit dem Standortanalyseprogramm WAsP des dänischen Forschungszentrums Risø vertrieben wird [5]. Die Güte des Verfahrens wurde für eine einfache Parkkonfiguration (5 Anlagen in einer Reihe) exemplarisch untersucht [6]. Abb.3 zeigt ein typisches Ergebnis des Vergleichs. Limitierungen des Modells werden bei einer detaillierten Analyse des Strömungsfeldes im Nachlauf einer Anlage deutlich (Abb.4). Diese Einschränkungen lassen sich zunächst für praktische Betrachtungen vernachlässigen. Eine detailliertere Diskussion der Windparkmodellierung wird in [7] dargestellt. Für die in den folgenden Abschnitten dargestellten Optimierungsprobleme stellt der unter Verwendung des Risø-Modells ermittelte jährliche Parkwirkungsgrad die zu maximierende Optimierungsfunktion dar. Zur Bestimmung dieser Größe wird der Jahresenergieertrag des Parks unter Berücksichtigung der Verteilungen von Windrichtung und Windgeschwindigkeit am Standort des Parks ermittelt.

### 3. Auswahl eines Optimierungsverfahrens

Die Diskussion des vorliegenden Optimierungsproblems wird anhand des in Abb.5 dargestellten Beispieldparks durchgeführt. Auf der Aufstellungsfläche mit L-förmigem Grundriß sollen 15 Anlagen aufgestellt werden. Die gezeigte Konfiguration stellt bereits das Ergebnis einer Optimierung dar. Sie kann als Ausgangspunkt für die Vermittlung eines Eindrucks der Struktur der Optimierungsfunktion genutzt werden. Dazu wird untersucht, in welcher Weise der Parkwirkungsgrad durch die Wahl der Position einer einzelnen Anlage beeinflusst wird. In Abb. 6 ist der Parkwirkungsgrad als Funktion der Position der in Abb.5 gekennzeichneten Anlage dargestellt. Es wurden hier nur Positionen berücksichtigt, die einen Minimalabstand von 2 Rotordurchmessern von Anlage zu Anlage nicht unterschreiten. Es zeigt sich, daß der Parkwirkungsgrad - bei einer nur geringen absoluten Variation - zahlreiche relative Maxima und Minima aufweist. Damit ist die Anwendung klassischer Optimierungsverfahren, die Maxima auf der Basis lokaler Gradienten der Optimierungsfunktion ermitteln, erschwert. Detaillierte Untersuchungen zeigen, daß entsprechende Verfahren i.a. in Nebenmaxima

konvergieren.

Für Optimierungsprobleme der hier vorliegenden Struktur bietet sich der Einsatz neuerer stochastischer Verfahren an. Diese Methoden beruhen auf einer zufälligen Variation der Parametersätze vorgegebener Konfigurationen. Aus den sich neu ergebenden Konfigurationen wird auf Grundlage der Qualitätsfunktion die Basis für weitere Iterationsschritte ausgewählt. Von [8] wurde für die Windparkoptimierung die Nutzung eines genetischen Algorithmus [9] vorgeschlagen. Der hier vorgestellte Ansatz nutzt ein verwandtes Verfahren: die Evolutionsstrategie [10, 11].

Für die Beschreibung des Verfahrens sei hier zunächst das Optimierungsproblem in genauer Weise gefaßt. Es werden 2N Koordinaten der Positionen von N Anlagen eines Windparks gesucht, für die sich ein möglichst hoher Parkwirkungsgrad ergibt. Dabei sind zum einen die durch die Begrenzung der zur Verfügung stehenden Fläche gegebenen Randbedingungen einzuhalten. Zum zweiten wird eine weitere Einschränkung der möglichen Konfigurationen durch die Vorgabe eines Mindestabstands der Anlagen (hier: 2 Rotordurchmesser) vorgegeben.

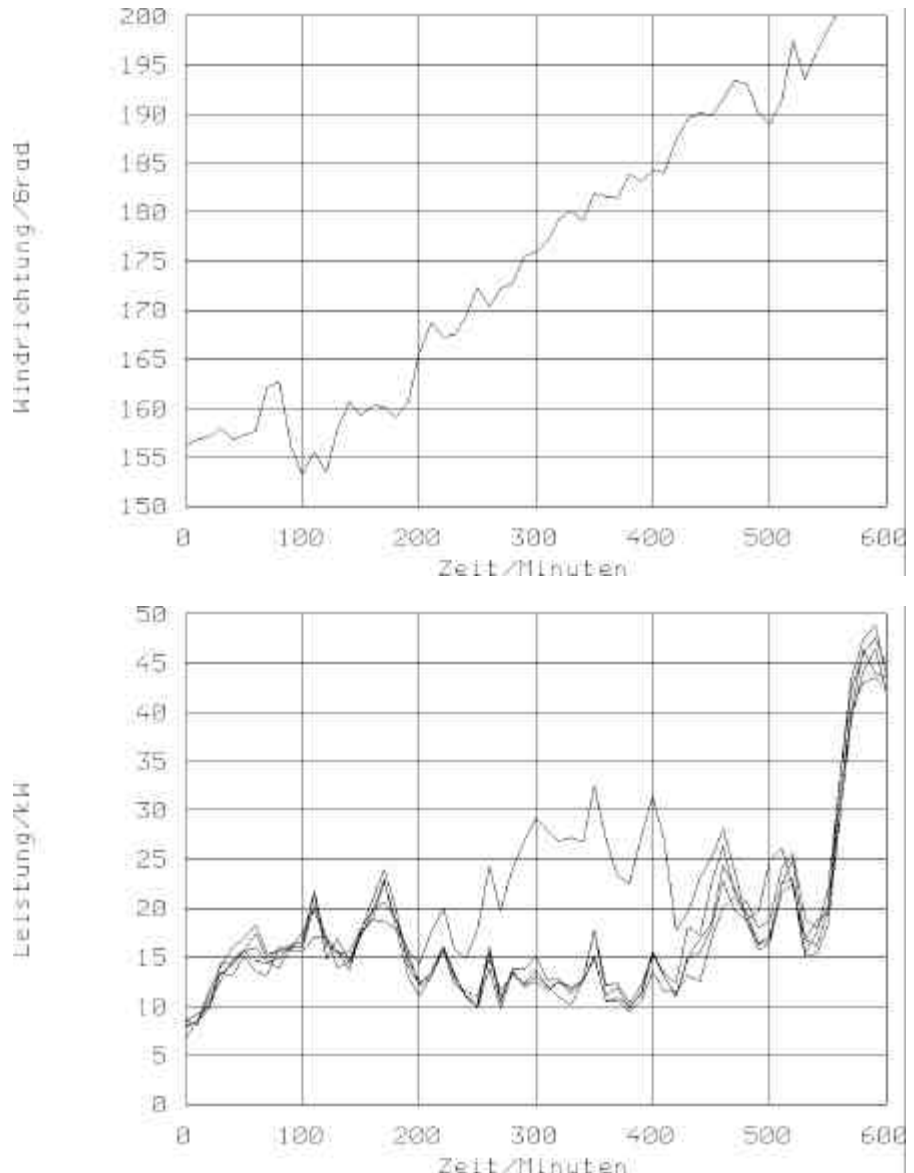


Abb.2: Leistungsabgabe der Anlagen eines Windparks beim Auftreten von Abschattungseffekten. Die Daten wurden im Windpark 'Norder Windlöpvers' in Norddeich aufgezeichnet. Dieser kleine Park besteht aus 5 in einer Reihe aufgestellten Anlagen (15m Rotordurchmesser). Die obere Grafik zeigt die zeitliche Entwicklung der Windrichtung. Die Richtung 180° entspricht der Ausrichtung des Parks. Unten sind die Verläufe der Leistungsabgabe der 5 Anlagen dargestellt. Für Windrichtungen nahe 180° arbeiten die Anlagen 2-5 im Bereich der Nachlaufströmungen. Ihre Leistungsabgabe ist gegenüber der frei angeströmten Anlage 1 deutlich vermindert.

Fig. 2.: Power output of wind turbines in a wind farm at operating under wake conditions. Data has been recorded at "Norder Windlöpvers" at Norddeich. This little wind farm consists of 5 turbines installed in line (rotor diameter: 15m). The figure above presents the time history of wind direction. The direction of 180° corresponds with the alignment of the farm. The figure below shows the course of power output of these wind turbines. For wind directions at about 180° the turbines 2-5 operate within the wake. Their power output is clearly reduced in comparison to turbine 1 operating in unstructured flow.

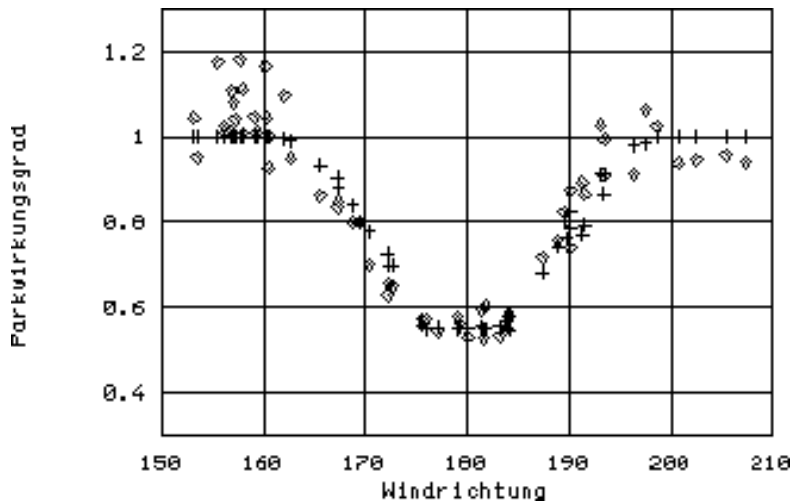


Abb. 3: Parkwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Windrichtung für den in Abb.2 behandelten Park. Karos: Meßwerte; Kreuze: Ergebnisse des Rechenmodells 'Park'. Die mittlere Windgeschwindigkeit für die hier dargestellte Meßperiode betrug 8 m/s.

Fig. 3.: This figure presents the efficiency of the wind farm (see fig. 2) in dependence on the wind direction. (squares = measurement data ; crosses = result of the calculated model "Park") Average wind speed of the presented measurement period is 8 m/s.

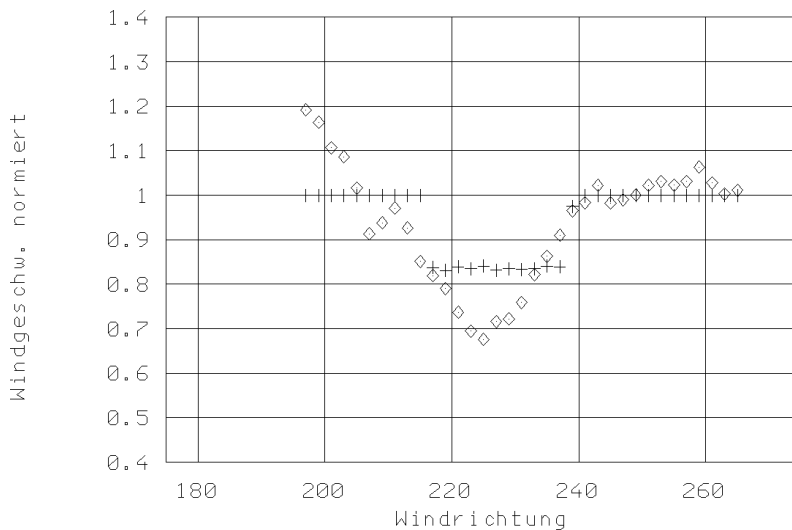


Abb. 4: Vergleich eines gemessenen Querprofils der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe in der Nachlaufströmung einer WEA (Karos) mit dem Modellansatz des Risø Verfahrens (Kreuze). Dargestellt ist das Verhältnis der Windgeschwindigkeit in der Nachlaufströmung zur ungestörten Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Windrichtung (die Richtung 225° entspricht der Ausrichtung von Anlage und Meßpunkt). Das Risø Verfahren geht von einem 'kastenförmigen' Windprofil aus.

Fig. 4.: Comparison between the measured transverse profile of hub height wind speed in the wake of a turbine (squares) and the Risø model (crosses). Illustrated is the ratio of in wake wind speed and the undisturbed wind speed as a function of wind direction (the direction of 225° corresponds to the alignment of turbine and reference point). The Risø model assumes a "box-like" wind profile.

Das evolutionstrategische Verfahren startet von einer beliebigen Ausgangskonfiguration des Parks, die durch die Koordinaten der Anlagen beschrieben wird. Die Positionen der Anlagen werden dann im geringfügigen Ausmaß zufällig verändert. Dadurch wird aus jeder der Ausgangskonfigurationen eine vorgegebene Anzahl neuer Konfigurationen erzeugt. Für die so erhaltenen Konfigurationen wird der jeweilige Wert der Optimierungsfunktion Parkwirkungsgrad ermittelt. Die besten Konfigurationen werden als Ausgangspunkt des nächsten Iterationsschrittes verwendet. Eine schematische Darstellung dieser Methodik ist in Abb.7 gegeben.

Um ein evolutionstrategisches Verfahren an das untersuchte Problem anzupassen, können die Zahl der Ausgangskonfigurationen, die Zahl der pro Iterationsschritt neu erzeugten Konfigurationen und die Stärke der Veränderung der Ausgangskonfiguration variiert werden. Ziel ist dabei die Identifikation eines Parametersatzes, der sowohl eine schnelle als auch sichere Konvergenz des Verfahrens gewährleistet. Für das hier behandelte Optimierungsproblem hat sich die Nutzung der Minimalzahl von Konfigurationen (1 Ausgangskonfiguration, 1 erzeugte Konfiguration) als sinnvoll erwiesen [11].

#### 4. Anwendung des Optimierungsverfahrens

Für den in Abb.5 dargestellten Park wurden mehrere Optimierungsläufe durchgeführt. Die Startkonfigurationen wurden zufällig ausgewählt. In Abb.8 ist die Entwicklung des Parkwirkungsgrades während mehrerer Optimierungsläufe dargestellt. Es zeigt sich, daß nach einer anfänglich schnellen Zunahme des Wirkungsgrades eine Stagnation auftritt. Die hier bei Abbruch der Rechnungen nach 10.000 Bestimmungen des Parkwirkungsgrades untersuchten Konfigurationen erreichten Jahresenergieerträge variieren um etwa 0.5%. Die Betrachtung der entsprechenden Konfigurationen zeigt interessanterweise große Unterschiede in der Anlagenpositionierung (Abb.9, vgl. auch Abb.5). Daraus ist zu schließen, daß das hier untersuchte 'Optimierungsgebirge' eine große 'Hochebene' aufweist, auf der sehr unterschiedliche Konfigurationen nahezu gleicher Güte lokalisiert werden können. Das Problem der Optimierung der Windparkkonfiguration hinsichtlich des Parkwirkungsgrades hat also eine große Menge 'nahezu optimaler' Lösungen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, weitere Kriterien und Randbedingungen zur Auswahl von Parkkonfigurationen hinzuziehen zu können, ohne damit zwangsweise große Einbußen des Parkwirkungsgrades hinnehmen zu müssen.

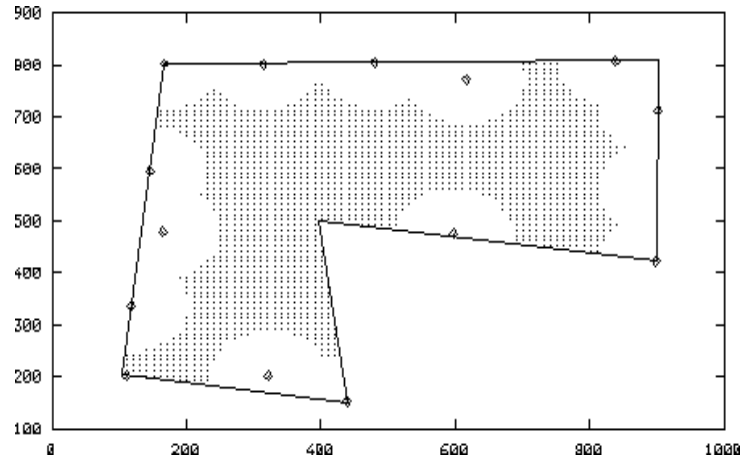


Abb. 5 Konfiguration des Beispieldparks. Auf einem L-förmigen Gelände sollen 15 WEA aufgestellt werden. Die Anlagenpositionen sind das Ergebnis eines Optimierungslaufes. Die Konfiguration ist Ausgangspunkt für die Untersuchung des Einflusses der Position einer einzelnen WEA auf den Wirkungsgrad des Gesamtparks. Die Position der Testanlage wird dafür innerhalb des gekennzeichneten Untersuchungsgebietes variiert unter Einhaltung eines Mindestabstandes zu den übrigen Anlagen.

Fig. 5.: Configuration of the modelled farm. 15 wind turbines are to be installed on an L-shaped area. The turbine positions are the result of an optimization trial. This configuration is the basis for examining the influence of the position of a single wind turbine on efficiency of the wind farm as a whole. The position of the tested wind turbine can be varied within the marked area keeping a minimum distance to other turbines.

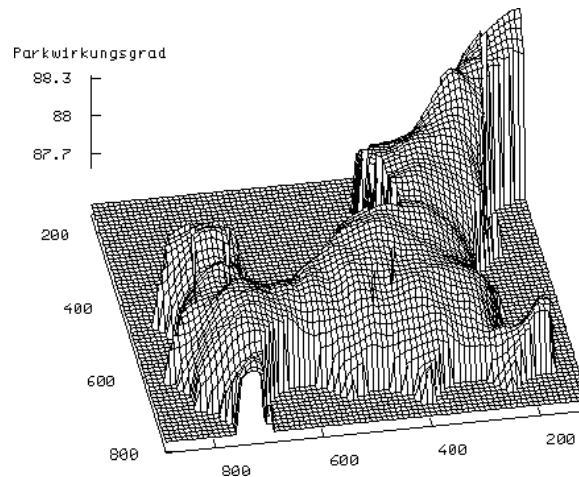


Abb. 6: Der Wirkungsgrad des in Abb.5 dargestellten Parks in Abhängigkeit der Position der Testanlage. Zur besseren Darstellung wird das untersuchte Gelände aus einem um 160° gedrehten Blickwinkel dargestellt.

Fig. 6.: Efficiency of the wind farm (see fig. 5) in dependence on the position of the tested turbine. For reasons of better representation the test field is depicted from a 160° point of view.

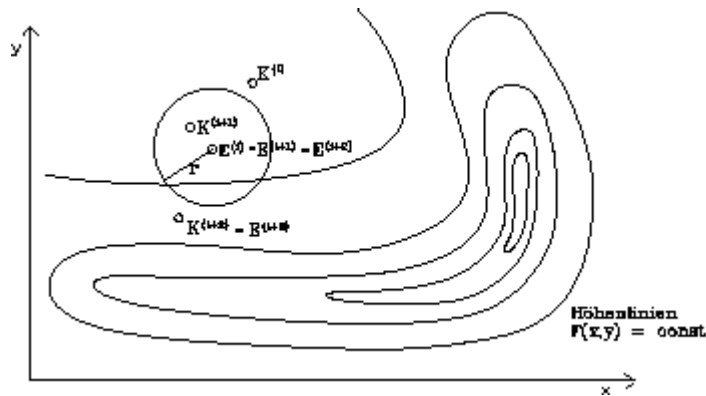


Abb.7: Vorgehensweise einer einfachen Evolutionsstrategie. Die Konturen repräsentieren die Höhenlinien einer Qualitätsfunktion. Aus einer Ausgangskonfiguration  $E(i)$  werden durch schrittweise Variation der Koordinaten neue Konfigurationen  $K$  erzeugt. Der Radius des um  $E(i)$  dargestellten Kreises repräsentiert einen typischen Abstand der neuen Konfigurationen zur Ausgangskonfiguration. Die Konfiguration  $K(i+2)$  hat einen besseren Wert der Qualitätsfunktion als  $E(i)$ . Sie wird für den nächsten Schritt als Ausgangskonfiguration festgelegt.

Fig. 7.: Method of a simple evolution strategy. The lines represent contour lines of a quality function. From a given configuration  $E(i)$  a new configuration  $K$  is created by gradually varying the coordinates. The radius of the circle around  $E(i)$  represents a characteristic distance of the new configuration from its predecessor. Configuration  $K(i+2)$  has a much better value of the quality function than  $E(i)$ . It will be basis for the next step.

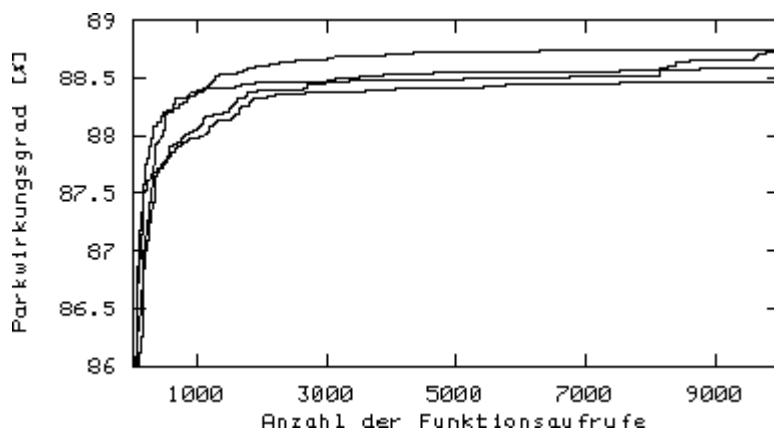


Abb.8: Entwicklung des Parkwirkungsgrades im Verlauf einer Optimierung abhängig von der Zahl der berechneten Parkkonfigurationen. Die Kurven entsprechen Optimierungsläufen mit verschiedenen zufällig gewählten Anfangskonfigurationen.

Fig. 8.: Development of the wind farm efficiency in the course of optimization in dependence on the number of calculated farm configurations. The curves correspond to optimisation run with arbitrary configurations.

### 5. Berücksichtigung akustischer Randbedingungen

Als Beispiel für zusätzliche Randbedingungen wurde die Einhaltung von Grenzwerten der durch die Windenergieanlagen bedingten Schallimmissionen an vorgegebenen Aufpunkten untersucht. Diese Vorgaben stellt heute eine deutliche Restriktion bei der Realisierung von Windparkprojekten dar.

Für eine gegebene Windparkkonfiguration läßt sich die Schallimmission in der Umgebung des Parks mit den Vorgaben der DIN 18005 bestimmen [12]. Überschreitet der Immissionswert die vorgegebenen Grenzwerte (z.B. 45dB an Wohnbebauung), ist diese Konfiguration zu verwerfen. Diese Randbedingung ist in dem hier diskutierten Optimierungsverfahren einfach zu implementieren.

Abb.10 zeigt den Vergleich von Optimierungsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung von Schallimmissionsgrenzwerten. Es wurde ein 'bananenförmiges' Gelände vorgegeben, auf dem 35 Anlagen positioniert werden sollen. Für die Anlagen wurde eine typische Schallemission von je 100 dB angenommen. In der Umgebung dieses Geländes sind mehrere Aufpunkte angegeben, die der Position von nahegelegener Wohnbebauung entsprechen sollen. Für einen ohne Einschränkungen optimierten Windpark wird der Immissionsgrenzwert von 45 dB an diesen Aufpunkten überschritten. Die Optimierung unter Berücksichtigung des Grenzwertes führt zu einer deutlich veränderten Parkkonfiguration. Die Einbuße im Parkwirkungsgrad beträgt dabei lediglich 1.7 %.

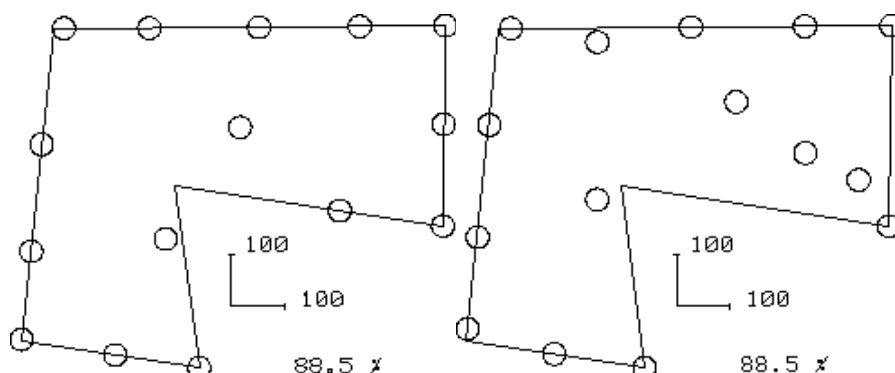


Abb. 9: Vergleich zweier Parkkonfigurationen mit gleichem Parkwirkungsgrad. Diese Konfigurationen ergaben sich nach Optimierungsläufen mit jeweils 10.000 Parkberechnungen.

Fig. 9.: Comparison of two farm configurations with the same efficiency. These configurations are results of optimization with 10,000 wind farm calculations each.

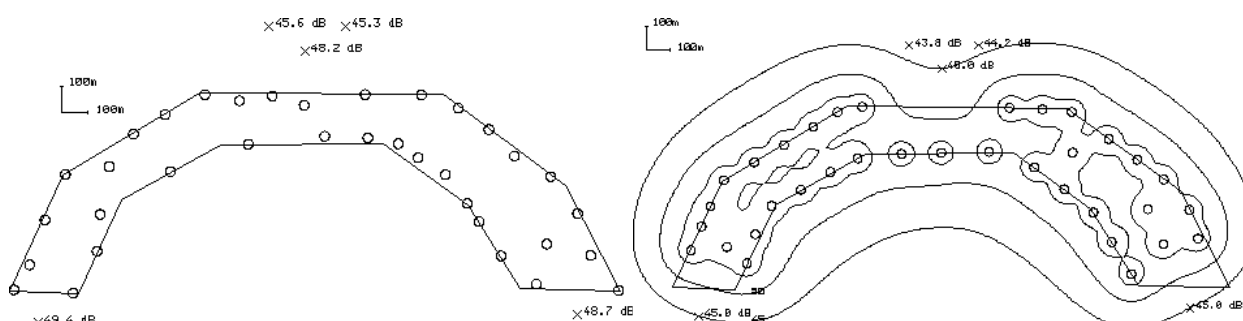


Abb. 10: Vergleich optimierter Parkkonfigurationen bei Nichtberücksichtigung (links) und Berücksichtigung (rechts) akustischer Randbedingungen. Die Kreuze kennzeichnen Punkte, an denen die akustische Immission 45 dB nicht überschreiten sollte. Der jährliche Parkwirkungsgrad der beiden Konfigurationen unterscheidet sich um 1.7%.

Fig. 10.: Comparison of optimised farm configurations considering (right) and not considering (left) acoustic boundary conditions. Crosses represent points where acoustic emission is not more than 45 dB. The difference between the annual wind farm efficiency of both configurations is 1.7%.

## 6. Literatur

- [1] Jensen, N.O.: A Note on wind generator interaction, Risø Technical Report, M-24111 (1983)
- [2] Crespo, A.; Manuel, F.; Hernández, J.: Numerical modelling of wind turbine wakes, EWEC, Madrid (1990)
- [3] Ansoorge, Th.; Fallen, M.; Günther, P.; Ruh, C.; Wolfanger, Th.: Numerical simulation of wake-effects in complex terrain and application of a reynolds-stress turbulence model, Proc. EWEC, Thessaloniki (1994)
- [4] Katic, I.; Højstrup, J.; Jensen, N.O.: A simple model for cluster efficiency, Proc. EWEC, Rome (1986)
- [5] Katic, I.: Program PARK, Calculation of wind turbine park performance, Risø National Laboratory, Roskilde (1989)
- [6] Beyer, H.G.; Pahlke, T.; Schmidt, W.; Waldl, H.-P.; de Witt, U.: Wake Effects in a Linear Wind Farm. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **51**, (1994)
- [7] Waldl, H.-P.: Diss. in Vorb., FB Physik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- [8] Mosetti, G.; Poloni, C.; Diviacco, B.: Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of genetic algorithm, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **1**, (1994)
- [9] Holland, J.:Adaption in Natural and Artificial Systems, Univ. of Michigan Press (1975)
- [10] Rechenberg, I.: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Fromann Vlg (1973)
- [11] Rüger, T.: Optimierung der Konfiguration von Windparks, Diplomarbeit, FB Physik, Uni Oldenburg (1994)
- [12] Verein Deutscher Ingenieure, Schallausbreitung im Freien, Beuth-Verlag (1988)